



ETSIT
UPM



E. T. S. DE INGENIEROS DE TELECOMUNICACIÓN.
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID



Proyecto Fin de Carrera

**SISTEMA DE RECONOCIMIENTO DE PERSONAS
MEDIANTE SU PATRÓN DE IRIS BASADO EN LA
TRANSFORMADA WAVELET**

Ponente: *Rafael Coomonte Belmonte*

Tutora: *Carmen Sánchez Ávila*

**Departamento: Matemática Aplicada a las Tecnologías de la Información
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación**

Mayo de 2006

Proyecto Fin de Carrera:

Título: Sistema de reconocimiento de personas mediante su patrón de iris basado en la transformada wavelet

Autor: Rafael Coomonte Belmonte

Tutora: Carmen Sánchez Ávila

Departamento: Matemática Aplicada a las Tecnologías de la Información

Miembros del Tribunal:

Presidente: Dña. Carmen Sánchez Ávila

Vocal: D. José Miguel Góñi Menoyo

Secretario: D. Ricardo Riaza Rodríguez

Fecha de Lectura: 26 de Mayo de 2006

Calificación: Matrícula de Honor

Resumen: En el presente proyecto se exponen los fundamentos de la biometría, una de las más novedosas tecnologías, desarrolladas con el objetivo de mejorar la seguridad a nivel general de diversos aspectos presentes en la sociedad actual. En particular, se centra en la técnica de reconocimiento biométrico de iris, quizás la que mayor proyección de futuro tiene, dentro de las numerosas existentes dentro de la biometría (huella, geometría de la mano, retina, cara,...), y que presenta unas prestaciones muy propicias para formar parte de un sistema de seguridad altamente fiable. Uno de los fundamentos en los que se basa el diseño de este sistema, es el uso de la transformada wavelet, que permite el análisis de las señales unidimensionales, obtenidas a partir de las imágenes del iris, y que precisan de una explicación exhaustiva para conocer sus fundamentos. A lo largo de la memoria aquí expuesta, se proponen diversos aspectos relacionados con este sistema, que permiten conocer, la base sobre la que se fundamentan así como, desarrollar aspectos relacionados directamente con el mismo, y dar una visión del estado del arte de esta tecnología.

Palabras Clave: Identificación Biométrica, Reconocimiento de Iris, Transformada Wavelet, Análisis Multiresolución, Reconocimiento de Patrones, Estandarización biométrica, Bases de datos de iris.

A Carol
A mi madre Charo
A mi hermano Dani

Agradecimientos

En esta líneas, quiero agradecer sinceramente todo el apoyo que me ha brindado, la gente que me ha acompañado durante estos ya muchos años que ha durado mi carrera.

En primer lugar a las personas que más cerca de mí ha estado durante esta travesía, mi novia Carolina, que siempre ha creído en mí y que más ha comprendido, que ante todo en esta vida esta el ser feliz y que a su lado he conseguido serlo, y a mi madre Charo, que ha sido el guardián, que no ha dejado nunca que desfalleciera en esta tarea de terminar mi carrera, guiándome para que no perdiera el camino, y haciéndome saber que soy capaz de todo lo que me proponga .

También agradecer a mi hermano, Dani, que aunque no siempre hemos sido un modelo de amistad, siempre hemos estado el uno junto al otro.

A mi cuñada favorita, Laura, que aunque nunca sabrá que es eso de la biometría, con ella he pasado muy buenos momentos.

A mi extensa familia de amigos, que me acompañan un día sí y otro también y que me han apoyado y han creído en mí siempre. Gracias a mis compañeros *perezosos*: Iván, Luís y Dani, a mis siempre amigos: Manu, Serrano, Adrián, Irene, Nacho, Germán, Álvaro, Rayito, Susana, Sergio, Edu

,..., y muchos otros compañeros de viajes, fiestas y fatigas varias, que han sido mi apoyo incondicional.

A mis compañeros de viaje en esta Escuela, David y Juan Carlos, que estuvieron conmigo desde el primer día. Siempre recordaremos aquella noche, hace ya mucho tiempo, que nos quedamos a dormir en el jardín de la Escuela, para matricularnos.

Y a los demás compañeros de viaje, que han sido muchos: Hugo, Javi Corona, Eloy, Plá, Carlos, y más sin los que nunca hubiese podido jugar interminables partidas de cartas, al fútbol o simplemente ver pasar la vida juntos.

A Carmen Sánchez, mi tutora, por abrirme las puertas de este mundo de la biometría que me ha fascinado, y que siempre me ha apoyado aunque el trayecto de este proyecto ha sido largo.

A Consuelo Flores y a Vicente Ortega, mis primeros compañeros, en mi nueva y que espero sea otra larga travesía en la Escuela, por su cariño y confianza en mí en todo momento.

A mis compañeros de C.D. La Resaca, con los que he compartido grandes momentos, y que sobre todo han supuesto para mí un desahogo del día a día.

Y por supuesto al “Tibu”, que siempre ha ido conmigo de “aquí para allá”.

ÍNDICE

ÍNDICE	1
LISTA DE FIGURAS	5
LISTA DE TABLAS	9

CAPÍTULO 1 - INTRODUCCIÓN A LA BIOMETRÍA **11**

1.1. INTRODUCCIÓN A LA SEGURIDAD INFORMÁTICA	11
1.2. PROCESOS DE IDENTIFICACIÓN	12
1.3. INTRODUCCIÓN A LA BIOMETRÍA	15
1.3.1. CONCEPTO DE BIOMETRÍA	15
1.3.2. ORIGEN DE LA BIOMETRÍA	16
1.3.3. TIPOS DE SISTEMAS BIOMÉTRICOS	17
1.3.3.1. Reconocimiento biométrico de Cara	18
1.3.3.2. Reconocimiento biométrico de Huellas Dactilares	20
1.3.3.3. Reconocimiento biométrico de la Geometría de la mano	26
1.3.3.4. Reconocimiento biométrico de Retina	28
1.3.3.5. Reconocimiento biométrico de Firma	31
1.3.3.6. Reconocimiento biométrico de Voz	33
1.3.3.7. Reconocimiento biométrico de la Dinámica de Tecleo	35
1.3.3.8. Reconocimiento biométrico de Iris	39
1.3.3.9. Reconocimiento biométrico de ADN	40
1.3.3.10. Otras técnicas biométricas	42
1.3.4. PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE LOS SISTEMAS DE IDENTIFICACIÓN BIOMÉTRICA	43
1.3.5. COMPARACIÓN DE LAS DIVERSAS TECNOLOGÍAS	44
1.3.6. PARTES DE UN SISTEMA BIOMÉTRICO	46
1.3.6.1. Reclutamiento	47
1.3.6.2. Verificación	48
1.3.6.3. Identificación	49
1.3.7. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL SISTEMA BIOMÉTRICO	50
1.4. OTROS ASPECTOS DE LA BIOMETRÍA	55
1.4.1. BIOMETRÍA MULTIMODAL	55
1.4.2. RETOS Y PROBLEMAS EN EL USO DE LA BIOMETRÍA	58
1.5. APLICACIONES DE LA BIOMETRÍA	61

CAPÍTULO 2 - LA TRANSFORMADA WAVELET **64**

2.1. INTRODUCCIÓN	64
2.2. FUNDAMENTOS DEL ANÁLISIS DE SEÑALES	64
2.2.1. EVOLUCIÓN HISTÓRICA DEL ANÁLISIS DE SEÑALES	68
2.2.2. TRANSFORMADA DE FOURIER	69
2.2.3. TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER	70
2.3. LA TRANSFORMADA WAVELET	75
2.3.1. INTRODUCCIÓN	75
2.3.2. ASPECTOS BÁSICOS DE LA TRANSFORMADA WAVELET	76

2.3.2.1.	Proceso de la transformada	76
2.3.2.2.	La transformada wavelet continua. Wavelet madre	78
2.3.2.3.	Operaciones de traslación y escalado	79
	Traslación	80
	Escala	80
	Conjunción traslación y escala	80
2.3.3.	TIPOS DE TRANSFORMADAS WAVELET	82
2.3.3.1.	Transformada wavelet continua (CWT)	82
2.3.3.2.	Transformada wavelet semidiscreta	84
2.3.3.3.	Transformada wavelet discreta.	84
2.3.4.	LA TEORÍA WAVELET	84
2.3.4.1.	Vectores base	85
2.3.4.2.	Producto interior, ortogonalidad y ortonormalidad	86
2.3.4.3.	El proceso de síntesis wavelet. Transformada wavelet inversa	87
	Discretización de la transformada wavelet continua: las series wavelet	87
2.3.4.4.	Propiedades de las wavelets	90
2.3.4.5.	Comparación entre la FT y la WT	91
	Semejanzas	91
	Diferencias	92
2.4.	ANÁLISIS MULTIRRESOLUCIÓN	93
2.4.1.	INTRODUCCIÓN	93
2.4.2.	CODIFICACIÓN DE SUB-BANDAS	95
2.5.	APLICACIÓN DE LA CWT Y DWT	102
2.5.1.	APLICACIÓN DE LA CWT	103
2.5.2.	APLICACIÓN DE LA DWT	107

CAPÍTULO 3 - INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS DE RECONOCIMIENTO DE IRIS

113

3.1.	INTRODUCCIÓN	113
3.2.	ANÁLISIS ANATÓMICO Y FISIOLÓGICO	113
3.2.1.	ETAPAS DE FORMACIÓN DEL GLOBO OCULAR	117
3.2.2.	DESCRIPCIÓN DE LAS CAPAS DEL GLOBO OCULAR	118
3.2.2.1.	Túnica externa o fibrosa	119
	Córnea	119
	Esclerótica	121
	Limbo esclero-corneal	123
3.2.2.2.	Túnica media o vascular	124
	Iris	124
	Cuerpo Ciliar	131
	Coroides	132
3.2.2.3.	Túnica interna o neurosensorial	133
	Retina	133
3.2.2.4.	Medios transparentes	136
	Cuerpo vítreo	136
	Cristalino	137
3.3.	ASPECTOS BÁSICOS DEL RECONOCIMIENTO DE IRIS	138
3.3.1.	HISTORIA DEL RECONOCIMIENTO DE IRIS	138
3.3.2.	FUNDAMENTOS DEL RECONOCIMIENTO DE IRIS	140
3.3.2.1.	Partes del sistema de reconocimiento basado en el iris	142

Proceso de adquisición de la muestra	143
Extracción de características	144
Comparación de plantillas	144
Proceso de decisión	144
3.3.3. PARÁMETROS DE UN SISTEMA DE RECONOCIMIENTO DE IRIS	144
Universalidad	145
Unicidad	145
Estabilidad	146
Facilidad de Captura	146
Rendimiento	146
Aceptación por los usuarios	147
Robustez frente a la burla del sistema	147
Coste	148
Conclusión	148
3.3.4. ESTADO DEL DESARROLLO DE LA TECNOLOGÍA, MERCADO, APLICACIONES Y TENDENCIAS FUTURAS	148
3.3.4.1. Retos relativos a la tecnología	149
3.3.4.2. Especificaciones de mercado	150
3.3.4.3. Aplicaciones	150
3.3.4.4. Tendencias futuras	151
3.3.5. RECONOCIMIENTO DE IRIS: FALSIFICACIONES Y MEDIDAS PARA EVITARLAS	151

CAPÍTULO 4 - BASES DE DATOS 156

4.1. INTRODUCCIÓN	156
4.2. DESCRIPCIÓN DE LAS BASES DE DATOS	157
4.2.1. CASIA IRIS DATABASE	157
4.2.2. PALACKY UNIVERSITY IRIS DATABASE	158
4.2.3. UNIVERSITY OF BATH IRIS IMAGE DATABASE	159
4.2.4. BASE DE DATOS DE IRIS DEL GBTNI	164
4.2.4.1. Base de datos antigua GBTNI I(año 2000)	165
4.2.4.2. Base de datos nueva GBTNI II(año 2005-06)	168
4.2.5. CUHK IRIS DATABASE	173
4.3. COMPARATIVA DE LAS BASES DE DATOS	174

CAPÍTULO 5 - DISEÑO DEL SISTEMA DE RECONOCIMIENTO BIOMÉTRICO DE IRIS 175

5.1. INTRODUCCIÓN	175
5.2. RECONOCIMIENTO DE PATRONES	176
5.3. ETAPA DE ADQUISICIÓN DE LAS MUESTRAS	180
5.4. ETAPA DE PREPROCESADO	180
5.5. ETAPA DE EXTRACCIÓN DE CARACTERÍSTICAS	184
5.5.1. OBTENCIÓN DE LA FIRMA DE IRIS	185
5.5.2. CÁLCULO DE LA TRANSFORMADA DIÁDICA WAVELET DE LA FIRMA DE IRIS	188
5.5.3. ALGORITMOS RÁPIDOS DE CÁLCULO DE LA DDWT PARA SEÑALES UNIDIMENSIONALES	192
5.5.4. DIFERENTES MÉTODOS DE REPRESENTACIÓN DE LA INFORMACIÓN OBTENIDA DE LA APLICACIÓN DE LA TRANSFORMADA WAVELET DIÁDICA A LA FIRMA DE IRIS	194
5.5.4.1. Representación de los cruces por cero de los patrones de iris	194

Aplicación del algoritmo de eliminación de falsos cruces por cero por FFRn	198
5.5.4.2. Representación y cálculo de los módulos de los patrones de iris	199
5.6. ETAPA FINAL	200
5.6.1. COMPARATIVAS	200
5.6.2. DIFERENTES DISTANCIAS USADAS PARA LOS ALGORITMOS DE CLASIFICACIÓN	202
5.6.2.1. Distancia Euclídea	202
5.6.2.2. Distancia de Hamming	202
5.6.2.3. Distancia de Boles	204
<u>CAPÍTULO 6 - RESULTADOS</u>	<u>206</u>
6.1. INTRODUCCIÓN	206
6.2. RESULTADOS DEL ALGORITMO DE CRUCES POR CERO	207
6.2.1. RESULTADOS EN IDENTIFICACIÓN	207
6.2.2. RESULTADOS EN VERIFICACIÓN	209
6.3. RESULTADO DEL ALGORITMO DE MÓDULOS	211
6.3.1. RESULTADOS EN IDENTIFICACIÓN	211
6.3.2. RESULTADOS EN VERIFICACIÓN	213
6.3.2.1. Resultados en verificación con distancia Hamming	213
6.3.2.2. Resultados en verificación con distancia euclídea	215
6.4. ESTUDIO Y COMPARATIVA DE DIFERENTES ALGORITMOS	218
6.4.1. ALGORITMO DE FILTROS DE GABOR	218
6.4.2. ESTUDIO COMPARATIVO DE DIFERENTES ALGORITMOS	221
6.4.2.1. Algoritmos “Avila”	221
6.4.2.2. Algoritmos “Li Ma”	224
6.4.2.3. Algoritmos “Tisse”	228
6.4.2.4. Algoritmos “Daugman”	231
6.4.2.5. Resultados del estudio	234
6.4.2.6. Otros algoritmos	236
<u>CAPÍTULO 7 - CONCLUSIONES</u>	<u>238</u>
7.1. INTRODUCCIÓN	238
7.2. ASPECTOS RELEVANTES RELATIVOS AL DESARROLLO DE LA TECNOLOGÍA DE RECONOCIMIENTO BIOMÉTRICO DE IRIS	239
7.2.1. EL MERCADO DE LOS SISTEMAS BIOMÉTRICOS Y SUS TENDENCIAS	239
7.2.2. LOS ESTÁNDARES BIOMÉTRICOS	241
7.2.2.1. ISO/IEC JTC1 y SC37 [JTC1]	242
7.2.2.2. ANSI INCITS M1 [INCITS]	244
7.2.2.3. BIOAPI [BAPI]	245
7.2.3. ÉTICA EN LOS PROCESOS Y SISTEMAS BIOMÉTRICOS	245
7.3. LÍNEAS FUTURAS DE ACTUACIÓN	248
ANEXO A – LISTADO DE ESTÁNDARES	250
BIBLIOGRAFÍA	252
PRESUPUESTO	266

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1 Gráfica del nivel de seguridad en función de los factores involucrados en el sistema.	12
Figura 1-2 Diferentes tipos de sistemas biométricos.....	18
Figura 1-3 Imágenes relativas al reconocimiento facial	18
Figura 1-4 (de izq. a dcha.) Jan Evangelista Purkinje y Juan Vucetich	21
Figura 1-5 (de izq. a dcha.) Richard Edgard Henry y Francis Galton	21
Figura 1-6 Alphonse Bertillón	22
Figura 1-7 Minucias características de la huella dactilar	23
Figura 1-8 Esquema del funcionamiento de los diferentes sensores de superficies lectoras de huellas dactilares.....	23
Figura 1-9 Detalles de la tecnología biométrica de geometría de mano.....	26
Figura 1-10 Esquema de la composición de la retina ocular	29
Figura 1-11 Ejemplos de imágenes obtenidas por un sistema biométrico basado en la exploración de la retina [RETIN]	30
Figura 1-12 Funcionamiento de los diferentes sistemas biométricos de firma [Fie05].....	32
Figura 1-13 Sistema característico de reconocimiento de voz	34
Figura 1-14 Índice cronológico del desarrollo de la tecnología biométrica de escritura en teclado.....	36
Figura 1-15 Gráficas de datos de las latencias de diferentes usuarios al escribir <i>password</i>	38
Figura 1-16 Esquema de funcionamiento del sistema Biopassword.....	39
Figura 1-17 Esquema de la herencia de los factores genéticos	40
Figura 1-18 Imagen representativa del <i>locus</i> de un gen y de las diferentes plantillas de ADN [Fro05]..	41
Figura 1-19 Esquema del proceso de estudio de las posibles muestras de ADN	42
Figura 1-20 Esquema de las diferentes partes de un sistema biométrico	46
Figura 1-21 Esquema del proceso de reclutamiento [SCA02]	48
Figura 1-22 Esquema del proceso de verificación.....	49
Figura 1-23 Esquema del proceso de identificación.	50
Figura 1-24 Esquema explicativo de las situaciones de error en los sistemas biométricos [Fro05].....	52
Figura 1-25 Curva del umbral de decisión [Fro05].	53
Figura 1-26 Obtención del valor EER.	54
Figura 1-27 Valor EER mediante el análisis ROC.	55
Figura 1-28 Figura representativa de los diferentes tipos de fuentes de biometría multimodal.	57
Figura 1-29 Figura representativa de los niveles de fusión de los sistemas de biometría multimodal [Fie05].	58
Figura 1-30 Escala de principios fundamentales para la elección de un sistema de seguridad [Kei03]..	59
Figura 1-31 Matriz de caracterización de sistemas biométricos.....	60
Figura 2-1 Señal de 50 Hz. y su transformada de Fourier.....	65
Figura 2-2 Señal estacionaria y su respectivo espectro de frecuencia.....	66
Figura 2-3 Señal no estacionaria y su respectivo espectro de frecuencias.....	67
Figura 2-4 Cuadro explicativo del desarrollo en serie de Fourier, y una imagen de su creador, Joseph Fourier.	68
Figura 2-5 Explicación gráfica de la STFT.	70
Figura 2-6 STFT de la señal no estacionaria con ventana gaussiana.....	71
Figura 2-7 Representación de la función gaussiana para distintas anchuras.....	72
Figura 2-8 STFT con función ventana gaussiana de $a = 1800$	73
Figura 2-9 STFT con función ventana gaussiana de $a = 18$	73
Figura 2-10 STFT con función ventana gaussiana de $a = 1.8$	74
Figura 2-11 Imagen comparativa del funcionamiento de las distintas transformadas.....	75
Figura 2-12 Codificación en sub-bandas.	76
Figura 2-13 Explicación gráfica del proceso de descomposición descrito.	77
Figura 2-14 Interpretación gráfica de la resolución en el tiempo y la frecuencia.....	77
Figura 2-15 Análisis de la resolución en el tiempo y la frecuencia de una señal discreta.....	78

Figura 2-16 Ejemplos de wavelet madre.	79
Figura 2-17 Ejemplo de la señal coseno a distintas escalas.	80
Figura 2-18 Plano tiempo-escala.	81
Figura 2-19 Funcionamiento de la CWT.	83
Figura 2-20 Representación tridimensional del valor de los coeficientes calculados de la CWT.	83
Figura 2-21 Representación de la escala diádica empleada en la transformada wavelet.	88
Figura 2-22 Funciones base de Fourier, distribución en el plano tiempo-frecuencia [Gra95].	92
Figura 2-23 Funciones base de la wavelet de Daubecheis, distribución en el tiempo-frecuencia.	93
Figura 2-24 Esquema de codificación subbandas.	98
Figura 2-25 Algoritmo piramidal o codificación sub-banda con J etapas.	99
Figura 2-26 Esquema de la descomposición wavelet usando la notación de operadores.	100
Figura 2-27 Ejemplo de descomposición DWT.	101
Figura 2-28 Señal no estacionaria de 10, 25, 50 y 100 Hz.	102
Figura 2-29 Forma de cálculo de la CWT para $s=0.0001$ y distintos valores de τ	104
Figura 2-30 Forma de cálculo de la CWT para $s = 0.002$ y distintos valores de τ	105
Figura 2-31 Forma de cálculo de la CWT para $s = 0.004$ y distintos valores de τ	105
Figura 2-32 Transformada wavelet continua de la señal no estacionaria.	106
Figura 2-33 CWT de la señal girada para una mejor visualización.	107
Figura 2-34 Ejemplo de interpretación de los coeficientes de la DWT.	108
Figura 2-35 Coeficientes de la DWT de la señal no estacionaria.	110
Figura 2-36 Detalles de la DWT de la señal no estacionaria.	111
Figura 3-1 Localización en el cráneo del globo ocular [Lag00].	114
Figura 3-2 Capas del globo ocular [Lag00].	114
Figura 3-3 Sección del globo ocular.	115
Figura 3-4 Esquema de la composición del globo ocular.	116
Figura 3-5 Corte horizontal del globo ocular.	116
Figura 3-6 Vista general y detalle del globo ocular en el 2º mes del desarrollo embrionario [Lag00]. ...	117
Figura 3-7 Esquema de la composición de las diferentes capas del globo ocular.	118
Figura 3-8 Corte del segmento anterior del ojo.	119
Figura 3-9 Esquemas de la composición de la córnea.	121
Figura 3-10 Esquema de la composición de la esclerótica.	123
Figura 3-11 Esquema de la composición del limbo esclero-corneal.	123
Figura 3-12 Esquema de las partes de la túnica media o vascular [Lag00].	124
Figura 3-13 Anatomía de la zona y detalles de los rasgos anatómicos del iris.	125
Figura 3-14 Anatomía muscular y situación del iris.	126
Figura 3-15 Corte transversal y vista superior (frontal).	127
Figura 3-16 Esquema de la disposición de las diferentes capas del iris.	127
Figura 3-17 Esquema de las distintas capas del iris.	128
Figura 3-18 Composición del iris [Lag00].	129
Figura 3-19 Cara anterior y posterior del iris.	130
Figura 3-20 Imagen fotográfica de la retina.	133
Figura 3-21 Corte de la retina.	134
Figura 3-22 Detalle de la composición celular de las capas de la retina.	135
Figura 3-23 Detalles de la formación vascular del fondo de ojo.	136
Figura 3-24 Estructura responsable del fenómeno de la acomodación.	137
Figura 3-25 Extracto de la patente presentada por L. Flor y A. Safir en 1987.	139
Figura 3-26 Fotografías de la chica afgana publicadas en el estudio de Nacional Geographic acerca de los sistemas biométricos basados en el iris.	153
Figura 3-27 Comparativa de los espectros de Fourier de un iris real y otro falso.	154
Figura 4-1 Muestras de la base de datos de patrones de iris <i>Casia</i>	158
Figura 4-2 Muestras de la base de datos de patrones de iris <i>Phoenix</i>	159

Figura 4-3 Muestras de la base de datos de patrones de iris <i>Bath University</i>	160
Figura 4-4 Vista del sistema de captura de imágenes de iris de la <i>Bath University</i>	161
Figura 4-5 Imágenes de la cámara digital utilizada en la <i>Bath University</i>	162
Figura 4-6 Respuesta espectral del sensor de la cámara	162
Figura 4-7 Lente <i>Pentx C-3516 M</i>	163
Figura 4-8 Dispositivo de iluminación <i>DLI/VarioFlash IRI2</i>	163
Figura 4-9 Respuesta del filtro usado	164
Figura 4-10 Máscara superpuesta a las imágenes del patrón de iris.....	165
Figura 4-11 Imágenes de la cámara digital Kodak Professional DCS 315 (modelo nuevo).	167
Figura 4-12 Imagen del objetivo usado para la captura de imágenes de iris.	167
Figura 4-13 Muestras de la base de datos de patrones de iris <i>GBTNI I</i>	168
Figura 4-14 Muestras de la base de datos de patrones de iris <i>GBTNI II</i>	169
Figura 4-15 Imagen y esquema de dimensiones de la cámara <i>BASLER A102-f</i>	170
Figura 4-16 Respuesta espectral del sensor <i>SONY ICX-285 Progressive Scan CCD</i> de la cámara	171
Figura 4-17 Imagen y esquema de dimensiones del dispositivo de iluminación <i>SPOT20</i>	171
Figura 4-18 Esquema del grado de incidencia de la luz en el objeto.....	172
Figura 4-19 Imágenes de los anillos de extensión y de un filtro de polarización.....	172
Figura 4-20 Muestras de la base de datos de la <i>CUHK Iris Database</i>	173
Figura 5-1 Etapas del sistema de reconocimiento de iris.	175
Figura 5-2 Distribución de las diferentes clases dentro del espacio de representación	177
Figura 5-3 (a) Agrupamientos ideales. (b) Agrupamientos solapados	179
Figura 5-4 Rasgo biométrico en el que se basa el sistema [Lye02]......	181
Figura 5-5 Esquema de la disposición geométrica del iris y la pupila [Lib03]......	183
Figura 5-6 Imágenes de las diferentes etapas del proceso [Apa05].	184
Figura 5-7 Posible método de referencia para el desarrollo de procesos invariantes frente a la rotación.	185
Figura 5-8 Esquema de la circunferencia de radio inicial para el proceso de extracción de características.....	186
Figura 5-9 Imagen de los puntos tomados del iris y su respectiva señal de valores de escala de gris de estos puntos.....	187
Figura 5-10 Esquema del proceso de extracción de características [Apa05]......	188
Figura 5-11 Gráfica de la función $\psi(x)$ y su dilatación.	189
Figura 5-12 (a) Spline cuadrática; (b) Spline cúbica	191
Figura 5-13 Firma del iris (en negro) y su transformada Diádica Wavelet para los valores de escala 3, 4 y 5 [Apa05].....	193
Figura 5-14 Señal de 256 muestras.	196
Figura 5-15 Wavelet madre (sombbrero mexicano).	196
Figura 5-16 DDWT a diferentes escalas y residuo.....	197
Figura 5-17 Representación de cruces por cero a diferente resolución.	197
Figura 5-18 Cruces por cero de DDWTs a tres niveles de resolución.	198
Figura 5-19 Representación de los módulos de la transformada Diádica Wavelet para los valores de escala 3, 4 y 5 de la IS.	200
Figura 5-20 Medida de las diferentes distancias.	201
Figura 5-21 Diagrama de trabajo en la distancia euclídea.	202
Figura 5-22 Posibles distancias Hamming para códigos de 2 bits.	203
Figura 5-23 Posibles distancias Hamming para códigos de 3 bits.	203
Figura 5-24 Ejemplo de operación XOR con dos códigos.	204
Figura 6-1 Gráfica comparativa de resultados del algoritmo de cruces por cero en proceso de identificación.	208
Figura 6-2 Gráfica comparativa de resultados del algoritmo de cruces por cero en proceso de verificación.	210

Figura 6-3 Gráfica comparativa de resultados del algoritmo de módulos en proceso de identificación.	211
Figura 6-4 Resultados del algoritmo de módulos en proceso de verificación con distancia Hamming sin invariancia frente a la rotación.	213
Figura 6-5 Resultados del algoritmo de módulos en proceso de verificación con distancia Hamming con invariancia frente a la rotación.	214
Figura 6-6 Resultados en verificación con distancia Euclídea sin invariancia frente a la rotación.	216
Figura 6-7 Resultados en verificación con distancia Euclídea con invariancia frente a la rotación.	217
Figura 6-8 Resultado de los procesos de verificación mediante uso de filtros de Gabor.	219
Figura 6-9 Resultado de los procesos de verificación mediante uso de cruces por cero.	220
Figura 6-10 Etapas del proceso de preprocesado (a) Muestra del iris, (b) Detección de borde exterior, (c) Detección de borde interno y (d) Imagen del iris aislado.	222
Figura 6-11(a) Región anular considerada para hallar la firma del iris que se muestra en (b).	223
Figura 6-12 (a) Transformada wavelet diádica discreta (3 niveles de resolución, $3 < j < 5$) de la firma del 6.11 (b), y (b) representación multiescala de cruces por cero correspondiente.	223
Figura 6-13 Código de la firma del iris.	224
Figura 6-14 Preprocesado de la imagen (a) imagen original, (b) región de interés localizada (c) imagen normalizada (d) iluminación de fondo estimada y (e) imagen normalizada después del realce.	225
Figura 6-15 Respuesta de los filtros (a) filtro simétrico con $\delta_x = \delta_y$, (b) filtro simétricos con $\delta_x > \delta_y$ y (c) filtro de Gabor. (d), (e) y (f) son los espectros de Fourier de (a), (b) y (c), respectivamente.	226
Figura 6-16 Región de Interés (Region Of Interest ROI).	227
Figura 6-17 Representación rectangular del iris según el algoritmo "Tisse".	229
Figura 6-18 (a) Función de la fase instantánea, (b) Función de la frecuencia emergente.	230
Figura 6-19 Generación del código de iris.	231
Figura 6-20 Delimitación de la zona de estudio a partir del algoritmo "Daugman".	232
Figura 6-21 Proceso de modulación de la imagen del iris.	232
Figura 6-22 <i>Iriscode</i> generado tras la extracción de características del iris.	233
Figura 6-23 Gráfica comparativa de los resultados FAR/FRR de los 4 algoritmos.	234
Figura 6-24 Gráfica comparativa de los resultados de precisión de los 4 algoritmos.	235
Figura 6-25 Equipos de captura de imágenes para reconocimiento biométrico de iris según Boles (a) Diagrama esquemáticos del equipo de Daugman. (b) Diagrama esquemático del equipo de Wildes <i>et al.</i>	237
Figura 7-1 Cifras de mercado de la tecnología de reconocimiento de iris [GBM05].	240
Figura 7-2 Esquema de organización de la JTC1 SC37	244
Figura 7-3 Esquema de organización del INCITS M1.	245
Figura 7-4 Relación entre aspectos técnico y no técnicos de los sistemas biométricos.	247

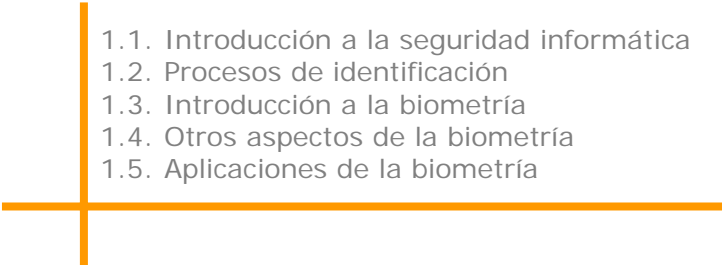
LISTA DE TABLAS

Tabla 1-1 Componentes de un sistema de seguridad.....	14
Tabla 1-2 Usos y aplicaciones de los sistemas de verificación.....	15
Tabla 1-3 Tabla comparativa de las propiedades del reconocimiento facial.....	20
Tabla 1-4 Tabla comparativa de las propiedades del reconocimiento de huellas dactilares.....	25
Tabla 1-5 Tabla comparativa de las propiedades del reconocimiento geométrico de la mano.....	27
Tabla 1-6 Tabla comparativa de las propiedades del reconocimiento de retina.....	30
Tabla 1-7 Tabla descriptiva de los métodos de reconocimiento de firma.....	33
Tabla 1-8 Tabla comparativa de las propiedades del reconocimiento de firma.....	33
Tabla 1-9 Tabla comparativa de las propiedades del reconocimiento de voz.....	35
Tabla 1-10 Tabla comparativa de las propiedades del reconocimiento de la dinámica de tecleo.....	39
Tabla 1-11 Tabla comparativa de las propiedades del reconocimiento de iris.....	40
Tabla 1-12 Tabla comparativa de las propiedades del reconocimiento de ADN.....	42
Tabla 1-13 Tabla comparativa de los diferentes sistemas de reconocimiento biométrico.....	45
Tabla 2-1 Resumen de las transformaciones de traslación y escalado.....	79
Tabla 3-1 Comparación de las similitudes en los detalles del iris entre gemelos y mellizos.....	131
Tabla 3-2 Tabla comparativa de los métodos y costes de copia de distintos rasgos biométricos.....	153
Tabla 4-1 Comparativa de las distintas bases de datos de iris.....	174
Tabla 5-1 Respuesta finita al impulso de los filtros H, G y K correspondientes a la Spline cuadrática mostrada en la figura 6(a).....	192
Tabla 5-2 Valores de K para j.....	193
Tabla 6-1 Tabla de resultados del algoritmo de cruces por cero en proceso de identificación.....	208
Tabla 6-2 Tabla de tiempos del algoritmo de cruces por cero en proceso de identificación.....	209
Tabla 6-3 Tabla de resultados del algoritmo de cruces por cero en proceso de verificación.....	210
Tabla 6-4 Tabla de resultados del algoritmo de módulos en proceso de identificación.....	211
Tabla 6-5 Tabla de tiempos del algoritmo de módulos en proceso de identificación.....	212
Tabla 6-6 Tabla de resultados del algoritmo de módulos en proceso de verificación con distancia Hamming.....	213
Tabla 6-7 Tiempos empleados en las diferentes etapas de la verificación con distancia Hamming sin invariancia frente a la rotación.....	214
Tabla 6-8 Tiempos empleados en las diferentes etapas de la verificación con distancia Hamming con invariancia frente a la rotación.....	215
Tabla 6-9 Tabla de resultados del algoritmo de módulos en proceso de verificación con distancia euclídea.....	215
Tabla 6-10 Tiempos empleados en las diferentes etapas de la verificación con distancia euclídea sin invariancia frente a la rotación.....	216
Tabla 6-11 Tiempos empleados en las diferentes etapas de la verificación con distancia euclídea, con invariancia frente a la rotación.....	217
Tabla 6-12 Tabla de resultado de los procesos de identificación mediante uso de filtros de Gabor.....	218
Tabla 6-13 Tabla de resultado de los procesos de verificación mediante uso de filtros de Gabor.....	218
Tabla 6-14 Tabla de resultado de los procesos de identificación mediante uso de filtros de cruces por cero.....	219

Tabla 6-15 Tabla de resultado de los procesos de verificación mediante uso de filtros de cruces por cero.	220
Tabla 6-16 Tiempos empleados en los diferentes algoritmos de verificación.	220
Tabla 6-17 Resultados de los procesos llevados a cabo con los 4 algoritmos descritos.....	234
Tabla 7-1 El mercado de la biometría.	239
Tabla 7-2 Grupos de trabajo de la JTC1 SC37.....	243

Capítulo 1

Introducción a la biometría

- 1.1. Introducción a la seguridad informática
 - 1.2. Procesos de identificación
 - 1.3. Introducción a la biometría
 - 1.4. Otros aspectos de la biometría
 - 1.5. Aplicaciones de la biometría
- 

Capítulo 1 - Introducción a la biometría

1.1. Introducción a la seguridad informática

Desde los tiempos más antiguos la obsesión por la seguridad ha sido un tema que ha comprendido el desarrollo de diversas técnicas para evitar el acceso de personas no deseadas a información personal o a lugares privados, lo que sin lugar a dudas en una sociedad como la actual, que ha venido a denominarse sociedad de la información, viene a constituir un aspecto fundamental, dado que gran parte del trabajo cotidiano esta basado en situaciones relacionadas con el uso de información confidencial de gran importancia tales como números de cuentas bancarias, accesos a determinadas fuentes de información privadas y un sinnúmero de aplicaciones que implican la necesidad de mantener un acceso restringido de personas. Es por tanto necesario desarrollar en todo momento aplicaciones y sistemas que ayuden a preservar la seguridad del usuario en cuanto al acceso a esta información y en lo que a cualquier tipo de comunicación se refiere, de manera que es un aspecto primordial garantizar que esta información se maneja de forma fiable y confiable

Desde el desarrollo en la época romana de códigos como el denominado Cesar, o incluso de las técnicas griegas de envío de información cifrada como la escítala, se han llevado a cabo numerosos esfuerzos por conseguir el proceso perfecto de encriptación y ocultación de la información. Así en la Edad Media se utilizaban discos de cifrado y más tarde durante la Segunda Guerra Mundial se usaron máquinas basadas en rotores para llevar a cabo el cifrado de la información. Todo esto, llevo poco a poco al desarrollo y posterior uso de los ordenadores, para desarrollar algoritmos criptográficos más complejos, que permitiesen llevar a cabo los procesos de intercambio de información de manera más o menos fiable. Sin embargo, ninguno de los procesos desarrollados hasta la fecha garantiza que no se puedan configurar procesos análogos e inversos que permitan descodificar la información en curso.

Es por esto que se continúa la línea de investigación de nuevos sistemas que puedan llegar a garantizar esta perdurabilidad de la seguridad, lo que da lugar al uso de técnicas tales como la criptografía cuántica o la biometría. La primera de estas opciones es hasta la fecha un tema de gran desarrollo pero exclusivamente teórico, debido a la complejidad de los fundamentos de la misma. Sin embargo la biometría es a día de hoy una realidad, que avanza cada vez más, y que trata de introducirse en cantidad de aspectos relacionados con el transito de información o el control de accesos e incluso en aspectos en auge en la sociedad actual como la domótica.

Para desarrollar sistemas de seguridad, pueden ser usados tres factores diferentes: algo que se sabe (una combinación, una clave, PIN,...), algo que se tiene (una llave, una tarjeta,...) o algo que se es (biometría). Tanto los sistemas informáticos como las personas utilizan en la vida cotidiana sistemas de reconocimiento para identificar personas. Por poner un ejemplo, la gente se reconoce por el peinado, el sonido de la voz (algo que son intrínsecamente) o por el coche que usan (algo que poseen), y los sistemas tales como un cajero automático reconocen a una persona por el uso de una tarjeta de crédito asociado a

un número de identificación personal (personal identification number; PIN), es decir por algo que saben.

Igualmente se pueden combinar estos tres factores de formas diferentes para conseguir mayores niveles de seguridad. Por ejemplo, un sistema en que el usuario deba, primero introducir su tarjeta, “algo que el usuario tiene”, luego de que el sistema la reconozca como válida, debe ingresar su PIN “algo que el usuario sabe”. Es común, también, que al comprar con tarjeta de crédito, la vendedora solicite el carné de identidad, combinando así las técnicas “algo que el usuario tiene” y “algo que el usuario es”, mediante el uso de una forma de técnica biométrica primitiva. Se utiliza también un sistema en el cual un individuo debe primero ingresar un código alfanumérico, y luego presentar al sistema alguna característica biométrica, por ejemplo, la palma de la mano. En este sistema se combinan las técnicas, “algo que el usuario es” con “algo que el usuario sabe”. Este factor de refleja en la siguiente imagen [SCA02]:

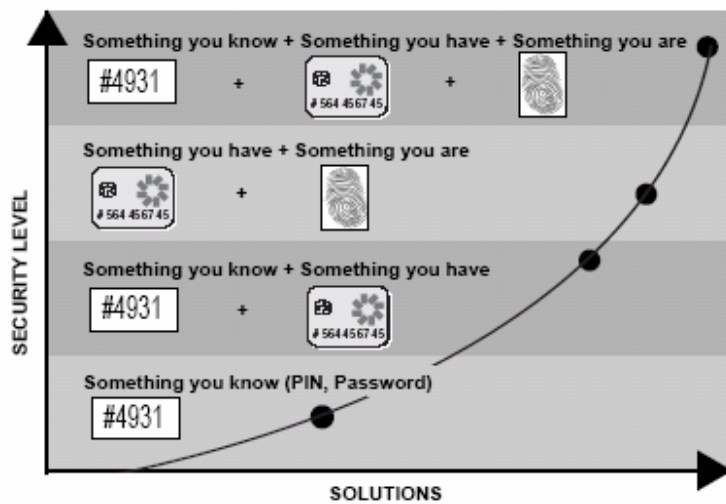


Figura 1-1 Gráfica del nivel de seguridad en función de los factores involucrados en el sistema.

La combinación de estos tres factores de seguridad conlleva sin duda un aumento de la seguridad del sistema, aunque igualmente incrementan la complejidad del mismo. Así por ejemplo las técnicas biométricas pueden combinarse con las tarjetas inteligentes (smart cards), tarjetas que tienen la habilidad de almacenar grandes cantidades de información tanto biométrica como de cualquier otro tipo, de manera que combinando ambas tecnologías se consigan ventajas tanto en el incremento de la seguridad como económicas.

1.2. Procesos de identificación

En la época actual cualquier persona lleva consigo tarjetas de identificación diversas, relativas a diferentes organizaciones públicas o privadas (bancos, bibliotecas, gimnasios,...). El propósito principal de estas credenciales es el de identificar a la persona que la porta como poseedor de privilegios y responsabilidades relativas al motivo de dicha credencial.

Los sistemas de identificación son importantes a la hora de aumentar la confianza a la hora de verificar la identidad de una persona dada, que trata de acceder física o virtualmente a un lugar o recurso. De este modo los sistemas de verificación de identidad permiten resolver el problema de aclarar si una persona es quien dice ser.

A medida que los privilegios asociados a cada tarjeta se incrementan y alcanzan grados más elevados es necesario controlar que la autenticidad de la persona que la porta. Si por ejemplo la credencial se usa para acceder a un área restringida, conducir un coche, o entrar en un país, es esencial que el proceso de identificación use medidas de seguridad y tecnologías adecuadas para impedir imitaciones y falsificaciones, y para preservar la privacidad de la información contenida en la tarjeta. Para implementar el nivel de seguridad deseable para cada aplicación, un sistema de identificación personal seguro debe asegurar:

- Las normas y procedimientos para procesar y monitorizar el uso de la credencial son los correctos.
- Establecimiento de los procedimientos de manipulación de los ciclos de vida del sistema.
- Entrenamiento adecuado para manipuladores y usuarios del sistema.
- Uso de un sistema de protección de datos de los usuarios registrados, con el fin de evitar acceso o modificaciones de los datos almacenados.
- Control de seguridad para el acceso a los datos de los usuarios por parte de personas autorizadas.
- Las credenciales solo serán otorgadas y manipuladas por la organización relacionada.
- La identidad de la persona que requiere la credencial se ha establecido fielmente.

Para implementar un sistema de seguridad efectivo, es necesario considerar diversos factores, tanto en el proceso de diseño del sistema como en el desarrollo y mantenimiento del mismo, lo que dependerá de la complejidad del mismo y de los elementos involucrados. Para ello se tendrán en cuenta aspectos diversos de cada elemento en particular, y de las necesidades de interacción de los mismos. En la siguiente tabla [SCA02], se abordan los criterios de diseño de un sistema que combina la biometría con el uso de tarjetas inteligentes o smart cards.

<i>Componente del Sistema de Seguridad</i>	<i>Elementos claves de diseño</i>
Biometría	<ul style="list-style-type: none"> -Tipo de biometría utilizada (iris, retina, huella...). -Algoritmos usados para el procesado de la información biométrica. -Número y localización de las medidas biométricas almacenadas. -Condiciones de uso. -Almacenamiento de imágenes completa o comprimida.
Credencial o tarjeta de identificación	<ul style="list-style-type: none"> -Tipos de aplicaciones presentes y futuras del sistema. -Diseño de la tarjeta: aspecto, medidas contra falsificaciones, necesidad o no de foto, información que incluye... -Tipos de uso (frecuencia, condiciones,...) -Capacidad de memoria necesaria. -Sistema operativo necesario. -Tipo de tecnología de la tarjeta. -Nivel de certificación de seguridad.
Criptografía	<ul style="list-style-type: none"> -Selección de la tecnología de encriptación. -Implementación de claves simétricas y asimétricas. -Número de claves emitidas y tamaño necesario del espacio de claves.
Emisor autorizado confiable	<ul style="list-style-type: none"> -Uso de mecanismos de certificación digitales homologados (Ej.: x.509). -Uso de un emisor comercial para la creación, protección y distribución de certificados, o creación propia de certificados en un entorno protegido. -Tipos de algoritmos a implementar. -Procesos claves de gestión.
Estaciones de suscripción al sistema	<ul style="list-style-type: none"> -Entorno y localización. -Método para la autenticación del operador. -Método de verificación de la identidad del candidato. -Interacción necesaria de las estaciones con la red.
Infraestructura de red	<ul style="list-style-type: none"> -Comunicaciones centralizadas o distribuidas. -Implementación de canales fiables. -Diseño de entornos seguros. -Mantenimiento y soporte de emisiones locales, regionales o centrales. -Distribución de materiales confiables. -Diseño de infraestructura de lectores. -Control y gestión del control de acceso.
Lectores varios	<ul style="list-style-type: none"> -Localización, número, arquitectura y protección de los lectores de tarjetas. -Diseño y aspecto de los lectores. -Autenticación de lectores mediante la tarjeta de identificación. -Gestión de los aspectos de seguridad y nivel de certificación de la misma. -Comunicación segura con la red. -Procesos de manufactura de los lectores.
Proceso de emisión	<ul style="list-style-type: none"> -Proceso de personalización de la tarjeta de identificación. -Conformidad del proceso de distribución con la política de seguridad definida. -Implementación del inventario de seguridad física de las tarjetas. -Gestión de la auditoría de tarjetas. -Implementación de la seguridad de la información. -Ciclo de vida del proceso de gestión.

Tabla 1-1 Componentes de un sistema de seguridad

Las aplicaciones derivadas del uso de sistemas de verificación de la identidad, se mueven en un amplio abanico de posibilidades, en la siguiente tabla se especifican algunas de ellas, aunque el desarrollo continuo de los sistemas convendrá en la aparición de nuevas y mejoradas aplicaciones.

Objetivos	Aplicaciones
Acceso físico	Entorno: recintos universitarios, edificios de oficinas, recintos de estacionamiento. Interiores: entradas, vestíbulos, oficinas, sala de ordenadores, cámaras de seguridad. Transportes: autobuses, aviones, trenes, transporte suburbano.
Acceso lógico	Redes: LAN, WAN, correo electrónico firmado y encriptado, transacciones seguras. Ficheros: documentos compartidos, grupos de noticias. Ficheros confidenciales: ficheros de recursos humanos, nóminas, secretos comerciales.
Privilegios	Asistencia sanitaria. Permiso de conducir. Votaciones. Permiso para cruzar las aduanas. Beneficios fiscales.
Cumplimiento de la ley	Registros criminales. Ciudadanía. Estado de inmigración. Confirmación de autenticidad de documentos y usuarios. Identificación en accidentes.

Tabla 1-2 Usos y aplicaciones de los sistemas de verificación

1.3. Introducción a la Biometría

1.3.1. Concepto de biometría

Se define la biometría como la ciencia por la que se puede identificar a una persona basándose en sus características biofísicas o de comportamiento, es decir algo que el ser humano posee de manera intrínseca. El término biometría comprende un amplio espectro de tecnologías mediante el uso de las cuales se permite verificar la identidad de una persona a partir del análisis de la medida de estas características, confiando en atributos propios de cada individuo en lugar de en cosas que conocen o poseen.

La capacidad para la identificación biométrica llevada a cabo por cualquier persona es algo innato, ya que siempre se ha utilizado esta técnica de manera inconsciente para reconocer a una persona por la calles o en una fotografía por ejemplo. Los distintos tipos de tecnología biométrica varían en complejidad, capacidades y modo de funcionamiento y pueden ser usadas para verificar o establecer la identidad de una persona. Sin embargo comparten igualmente elementos comunes. Todos hacen uso de dispositivos de adquisición de información adaptados a cada caso en particular, tales como cámaras o escáneres para obtener imágenes, registros o medidores, al igual que de software y hardware adaptado para extraer, codificar, almacenar y comparar las características medidas. Este carácter automático de los sistemas biométricos permite que el proceso de toma de datos y decisión sea muy rápido en algunos casos de tan solo de unos segundos de tiempo real.

Este grupo de diversas tecnologías puede ser usado por si solo o en combinación con algunos de los otros factores con el fin de reforzar la seguridad. La biometría presenta diversas ventajas respecto a las tecnologías desarrolladas en base a los otros dos factores, sobre todo en el hecho de que en ningún momento se le puede perder u olvidar a una persona su característica biométrica, siendo solo susceptible de falsificación, y en muchos

casos como se verá en la descripción de cada uno de los diferentes tipos de tecnologías biométricas, esta posibilidad de fraude al sistema ha sido estudiada y eliminada.

La tecnología es por tanto capaz de aprovechar rasgos característicos de las personas, ya sean de carácter físico o de comportamiento, para llevar a cabo el reconocimiento de una persona de manera automática.

1.3.2. Origen de la biometría

No es cierto que la biometría sea una técnica de identificación futurista. Desde hace varios siglos los hombres se han identificado por medio de este sistema.

Esta comprobado, que en la época de los faraones, en el Valle del Nilo (Egipto) se utilizaban los principios básicos de la biometría para verificar a las personas que participaban en diferentes operaciones comerciales y judiciales.

Muchas son las referencias de personas, que en la antigüedad, han sido identificados por diversas características físicas y morfológicas como cicatrices, medidas, color de los ojos, tamaño de la dentadura. Ésta clase de identificación se utilizaba, por ejemplo, en las zonas agrícolas, donde las cosechas eran almacenadas en depósitos comunitarios a la espera de que sus propietarios dispusieran de ellas. Los encargados de cuidar estos depósitos debían identificar a cada uno de los propietarios cuando estos hicieran algún retiro de su mercadería, utilizando para esta tarea principios básicos de biometría como eran sus rasgos físicos.

En el siglo diecinueve comienzan las investigaciones científicas acerca de la biometría con el fin de buscar un sistema de identificación de personas con fines judiciales. Con estas investigaciones se producen importantes avances y se comienzan a utilizar los rasgos morfológicos únicos en cada persona para la identificación.

De hecho, en cierta forma es una vuelta a los conceptos que durante la segunda mitad del siglo 19 manejó el francés Alphonse Bertillon. El funcionario de la Prefectura de Policía de París logró desarrollar, con las limitaciones de la época, una base de datos con las características fisiológicas de 1.500 procesados por delitos violentos en esa localidad.

Aunque Bertillon menospreciaba la utilidad de los rastros dactilares (para él eran simples “marcas distintivas”), su método se impuso en la Francia decimonónica, al punto que obtuvo el cargo de jefe nacional de identificación. El “bertillonage” incluía datos tales como la longitud de la mano izquierda, el largo y el ancho del cráneo, la longitud de la oreja izquierda y otros. Sirvió, por ejemplo, para determinar la verdadera identidad de antisociales reincidentes.

A más cien años de la muerte de Bertillon, los métodos más aceptados de identificación se basan en la colección de rastros dactilares y, últimamente, de muestras de ácido desoxirribonucleico (ADN), cuyos grados de confiabilidad resultan casi infalibles.

Hoy en día, la mayoría de los países del mundo utiliza las huellas digitales como sistema práctico y seguro de identificación. Con el avance tecnológico nuevos instrumentos aparecen para la obtención y verificación de huellas digitales. Se comienza a utilizar otros rasgos morfológicos como variantes de identificación, por ejemplo el iris del ojo, el calor facial o la voz.

Actualmente la biometría se presenta en un sin número de aplicaciones, demostrando ser, posiblemente, el mejor método de identificación humana.

1.3.3. Tipos de sistemas biométricos

Un número creciente de tecnologías relacionadas con la biometría han visto la luz durante varios años anteriores, pero ha sido en los últimos 5 años cuando se ha conseguido desplegar en mayor medida aquellas que se reconoce como punteras.

Sin duda alguna la viabilidad del mercado de sistemas biométricos depende de factores claramente ligados al usuario y a las necesidades de uso que se puedan llegar a crear sobre estos sistemas. Aspectos como el factor económico, la manejabilidad del sistema, que son sin duda aspectos que afectan al propio usuario, son en todo caso factores básicos a tener en cuenta en el desarrollo del sistema, en igual o mayor medida que otros aspectos meramente técnicos del mismo.

Estas técnicas biométricas pueden ser muy efectivas en la identificación de personas dado que miden características que en mayor o menor medida son distintivas de cada persona, siendo precisamente el grado de singularidad de cada característica el determinante a la hora de obtener mejores o peores resultados en el proceso de identificación. A diferencia de los métodos convencionales de identificación que hacen uso de cosas que alguien pueda poseer, como por ejemplo en el acceso a un edificio gracias a una tarjeta de seguridad, o de algo que conoce el individuo, como puede suceder en el acceso a un ordenador mediante el uso de una contraseña, las características usadas por los sistemas biométricos son propias de cada persona, a excepción claro de personas afectadas por enfermedades o problemas físicos, tales como personas mudas o que hayan sufrido amputaciones, o incluso en el caso de un sistema de reconocimiento de firma supondría un problema personas que no fueran capaces de escribir. El hecho de ser características fuertemente ligadas a cada individuo, confieren a estas una mayor confianza, y no pueden ser perdidas ni olvidadas como en los otros casos mencionados de las tarjetas o claves de acceso.

Algunas de las tecnologías biométricas son más adecuadas para el desarrollo de determinadas aplicaciones que otras y en otros casos se puede tener en cuenta la adaptación de los usuarios a ciertas tecnologías de manera más inmediata o cómoda. Es por esto que no se puede delimitar una determinada tecnología como la mejor sin atender a los requisitos específicos de cada situación. Pero sin duda los sistemas biométricos comparten patrones de comportamiento característicos, necesarios para delimitar su funcionamiento independientemente del rasgo característico utilizado para la identificación.

En el uso de tecnología biométrica para la identificación personal, los sistemas llevan a cabo medidas de las características tanto físicas como psicológicas, procediendo de manera directa sobre la parte del cuerpo usada en la persona en cuestión en los casos de medidas físicas, en lo que se denomina biometría estática o fisiológica, y a partir de la obtención de información derivada de diversas acciones comunes en cada persona en los casos de identificación mediante características psicológicas o de comportamiento que determinan la biometría de tipo dinámico. Las características físicas de un usuario son relativamente estables, sin embargo una característica relativa al comportamiento puede verse alterada por diversos motivos psicológicos o de situación, lo que implica que en

muchos casos sea necesario que los sistemas basados en estas características permitan la actualización de las plantillas de los usuarios.

En el siguiente cuadro [Eri00] se trata de separar e identificar las diversas tecnologías asociadas a cada uno de los tipos de identificación explicados.

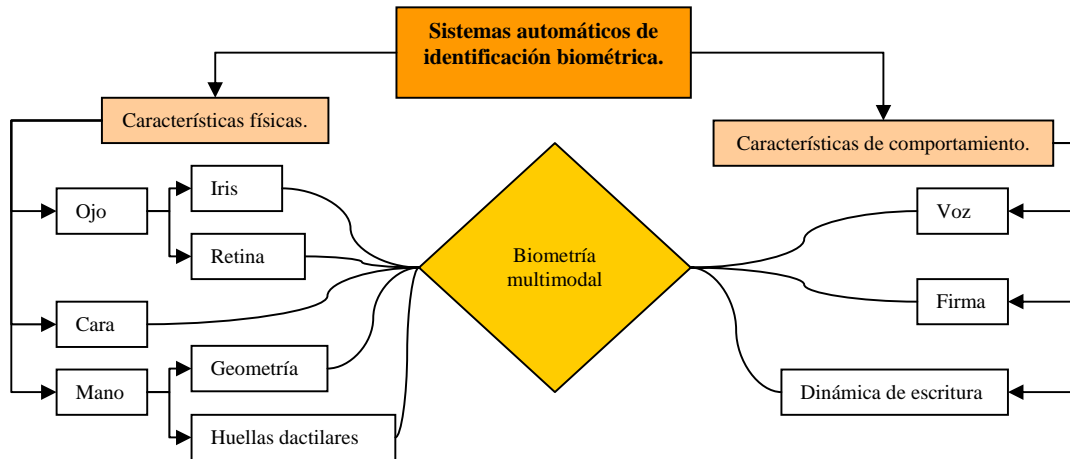


Figura 1-2 Diferentes tipos de sistemas biométricos

1.3.3.1. Reconocimiento biométrico de Cara

La fase de desarrollo de la tecnología de reconocimiento facial comenzó a finales de la década de los 80, y fue comercializada ya en los 90. A pesar de que mucha gente comenzó a saber de la existencia de esta tecnología a raíz de los atentados del 11 de Septiembre del 2001, dado el uso que se hizo de esta para reconocer a los terroristas implicados, ya se utilizaba el reconocimiento facial con anterioridad sobre todo en eventos deportivos. En la actualidad hay más de una docena de compañías trabajando en el desarrollo de estos sistemas, tales como el MIT Media Lab, la Universidad de Harvard o diversas firmas japonesas. Gran parte del esfuerzo de estas compañías se basa en el creciente uso de tecnología de video multimedia en los lugares como el trabajo o las propias viviendas, en aplicaciones tales como la webcam.

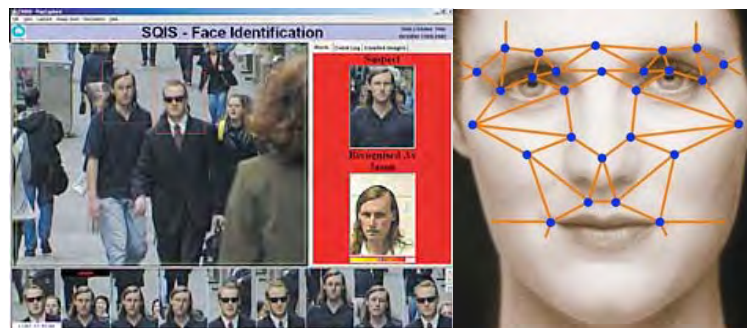


Figura 1-3 Imágenes relativas al reconocimiento facial

La tecnología de reconocimiento facial analiza las características de la imagen de la cara de una persona, obtenida mediante una cámara digital. A partir de esta imagen se miden, la estructura facial general, incluyendo las distancias entre ojos, nariz y boca, y otros aspectos de modificación mas acusada como los contornos superiores de la cuenca de los ojos, el área circundante de los pómulos o los contornos cercanos a la boca. Estas medidas se almacenan en una base de datos, y se usan como base para la comparación sobre la imagen que se toma posteriormente del sujeto. Este método se puede utilizar tanto en la comparación de imágenes dinámicas, es decir imágenes tomadas in situ con una cámara, mediante la comparación de esta con registros de análisis faciales anteriores, como también en procesos comparativos con imágenes estáticas tales como fotografías de pasaportes o documentos de identidad.

Para hacer uso de esta tecnología, el usuario se posiciona de cara a la cámara, a poco más de medio metro de distancia. El sistema localiza la cara del usuario, y busca coincidencias con la identidad proclamada haciendo uso de los datos registrados en la base de datos. Un factor muy importante en este sistema es la colocación angular de la persona, de modo que es posible que en algunos casos el usuario necesite realizar algún movimiento para reintentar la verificación. Es por esto que algunos sistemas más avanzados toman varias imágenes desde distintos ángulos. El sistema tarda en realizar los cálculos y tomar una decisión alrededor de 5 segundos.

Con el objetivo de prevenir el uso de caras falsas, moldes o caretas, algunos de estos requieren la realización de movimientos característicos, tales como sonreír o parpadear, antes de llevar a cabo la verificación.

Los métodos utilizados en el reconocimiento de rostros van desde la correlación estadística de la geometría y forma de la cara, hasta el uso de tecnología de redes neuronales que buscan imitar la manera en que funciona el cerebro humano. Muchos de estos sistemas pueden reconocer a una persona aun cuando esta se haya dejado crecer la barba o el bigote, se pinte o se cambie el estilo del cabello, tenga maquillaje o use anteojos.

Hay principalmente cuatro métodos usados para llevar a cabo este tipo de reconocimiento:

1. **Eigenfaces:** Una herramienta desarrollada por el MIT (Masachusset Institute of Technology), que extrae las características faciales mediante el uso de imágenes en escala de grises y dos dimensiones.
2. **Feature Analysis:** También conocido como Local Feature Analysis (LFA), es la técnica mas comúnmente utilizada, debido a su habilidad para acomodarse a cambios faciales. La LFA, hace uso de un algoritmo para crear una impresión de la cara, de un tamaño de 84 bytes, para la comparación.
3. **Neural Network:** Este método extrae los rasgos de la cara y crea una plantilla de elementos de contraste, que luego son comparados con la plantilla almacenada en la base de datos.
4. **Automated Face Processing (AFP):** Es la técnica de mejor uso en áreas de poca iluminación, y su uso se basa en la búsqueda de diferentes longitudes y distancias relativas de distintos rasgos faciales.

A pesar del hecho de que otros métodos biométricos tales como el de reconocimiento de huellas o el de iris, son más precisos, la tecnología de reconocimiento

facial cuenta con las ventajas de ser no intrusiva, ya que el proceso se lleva a cabo con el usuario a más de medio metro del sistema, y no requiere un tiempo de espera excesivo, además de no es necesario realizar más acciones que la de mirar a una cámara. Este aspecto de no intrusividad, también ha sido motivo de críticas dentro de la opinión pública, ya que la colocación de cámaras de reconocimiento facial escondidas en diferentes lugares públicos puede llevar a su uso sin el consentimiento o conocimiento del usuario.

Sin embargo las dificultades inherentes que presentan los requerimientos técnicos de este sistema en materia de luces o posicionamiento facial, son mayores de lo que el usuario conoce, lo que hace que este sistema sea mejor opción en sistemas de verificación y no de identificación, de manera que se hace uso de ellos para encontrar identidades específicas y no con intención de escaneo de personalidades, lo que lo adecua sin duda para llevar a cabo la labor de sistemas de vigilancia.

Reconocimiento Facial (Geometría de la cara).	
Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none">-Elevado ratio de eficacia.-Puede ser usado desde la distancia.-Aceptado por muchos usuarios.-No intrusivo.-No requiere acciones manuales.	<ul style="list-style-type: none">-No tiene en cuenta en todos los casos los efectos de la edad.-Sensible a las condiciones de iluminación.-Uso casi exclusivo en sistemas de verificación.

Tabla 1-3 Tabla comparativa de las propiedades del reconocimiento facial

Esta tecnología ha sido extensamente solicitada, por la eficacia del mismo en el reconocimiento de posibles amenazas, tales como terroristas o criminales conocidos, aunque su uso se esta extendiendo a otros sistemas de refuerzo de la seguridad. Sin embargo todavía no ha sido probada a gran escala, y en la actualidad se usa casi en exclusiva en sistemas de verificación, obteniendo excelentes estadísticas de funcionamiento. El software de estos sistemas también esta siendo utilizado en redes de ordenadores y cajeros de banco que usan esta tecnología con fines de verificación.

1.3.3.2. Reconocimiento biométrico de Huellas Dactilares

Las huellas digitales ya eran empleadas por los reyes de Babilonia que querían conferir a sus escritos un sello de autenticidad, para lo cual, ponían la huella de la mano derecha debajo del texto grabado sobre arcilla, antes de cocerlo. Los pueblos de Babilonia, como muchos otros de la Antigüedad, sabían que no hay dos manos con huellas idénticas. Igualmente la toma de huellas dactilares se usó durante el siglo XIV en China, como método utilizado por los padres para distinguir a sus hijos de los demás. Para esto, los niños pequeños, impregnaban en tinta sus huellas de manos y pies, y tras su estampación en papel, sus datos personales quedaban registrados. La práctica de las huellas digitales prosiguió durante siglos, hasta tal punto que pocas personas sabían firmar con su nombre.

En 1823, el checo Jan Evangelista Purkinje, fundador de la fisiología experimental, que estudiaba las glándulas sudoríparas, descubrió que no hay dos personas en las que el dibujo de las crestas y los surcos de la piel sean idénticos. Este factor queda al descubierto en el transcurso de su estudio, dado que las glándulas sudoríparas terminan en las depresiones de los surcos de las huellas dactilares.

Sólo entonces la ciencia consagra de modo oficial el carácter específico e individual de las huellas digitales. Pero tiene que pasar medio siglo para que la toma de huellas con tinta, o dactiloscopia, llegue al campo de la antropometría judicial. El primero, en utilizar las huellas tomadas con tinta o dactilogramas es un empleado de la policía argentina del estado de Buenos Aires, Juan Vucetich, que publica en 1888 un tratado de dactiloscopia comparada, creando un método que paso a denominarse Sistema Dactiloscópico Argentino, método que sigue en uso en algunos países latinoamericanos y también en España

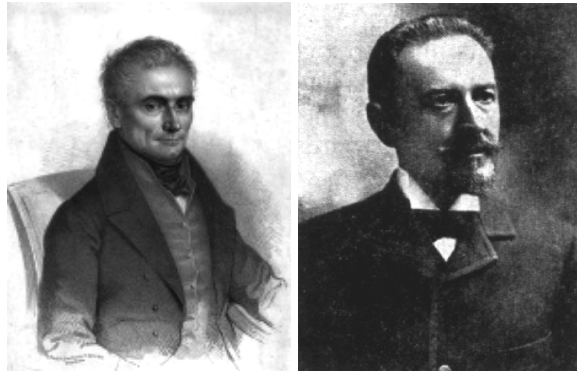


Figura 1-4 (de izq. a dcha.) Jan Evangelista Purkinje y Juan Vucetich

En la segunda mitad del siglo XIX, Richard Edgard Henry de Scotland Yard, desarrolló un método para caracterizar y clasificar las marcas características de las huellas. Este método fue una versión avanzada del que posteriormente diseñaría Francis Galton en 1892, y que fue usado con fines experimentales en la última etapa de la década de 1890, ya que se comprobó entonces que era un método muy confiable. El método que paso a denominarse Galton-Henry, lo aplicaría en su trabajo Scotland Yard a partir de junio de 1900.

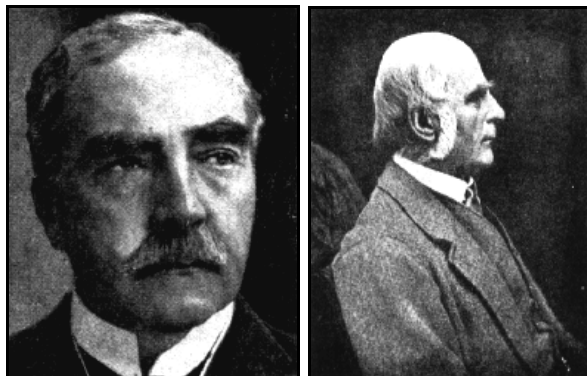


Figura 1-5 (de izq. a dcha.) Richard Edgard Henry y Francis Galton

Hasta entonces, la técnica utilizada para la individualización de las personas era el método antropométrico, ideado por el francés Alphonse Bertillón fundador de la antropometría criminal francesa. El "Bertillonage", basado en las medidas de ciertas partes del cuerpo humano y las particularidades fisonómicas, era utilizado como instrumento de

las investigaciones por la policía de Francia desde 1882, pero este método demostró ser muy poco preciso.



Figura 1-6 Alphonse Bertillon

Ya en el siglo XX, las técnicas de Juan Vucetich, y Galton-Henry se convirtieron tras el fracaso del método Bertillonage, en el utilizado por las policías de todo el mundo. Aún siguen siendo estos métodos los elegidos por los organismos encargados de la protección de la ley, pero la toma de huellas dactilares está experimentando un cambio muy acusado por primera vez desde que comenzó a usarse, dado que ahora se hace uso de escáneres en detrimento de las impresiones de tinta antes usadas, rivalizando con estas en calidad de imagen y costes. Caracterizado por su elevada eficacia y su simpleza, el uso de huellas dactilares como rasgo biométrico parece que será uno de los más usados en mucho tiempo tal y como se observa en los datos proporcionados por el Biometric Market Report 2003-2007 llevado a cabo por el International Biometric Group [GBM05].

El método para el análisis de huellas dactilares, toma una imagen de la huella para llevar a cabo un proceso que concluirá con la consecución de un registro de esta. Espirales, arcos y curvas se registran junto con los patrones de crestas, surcos y puntos específicos locales de los caballetes que se localizan tanto en los finales de los mismos como en las bifurcaciones (minucias), de los cuales se determina la posición x e y , y las variables direccionales. La extracción de características se determina por los datos obtenidos por la impresión producida por las crestas de las yemas de los dedos. Estas pueden ser tanto planas, es decir tan solo de la parte central del dedo, desde la punta del dedo hasta el primer nudillo, tal y como se apoyaría normalmente contra una superficie, o en otro caso se podrían obtener de todo el dedo es decir de la impresión obtenida tras hacer rodar la falange sobre la superficie de toma de datos.

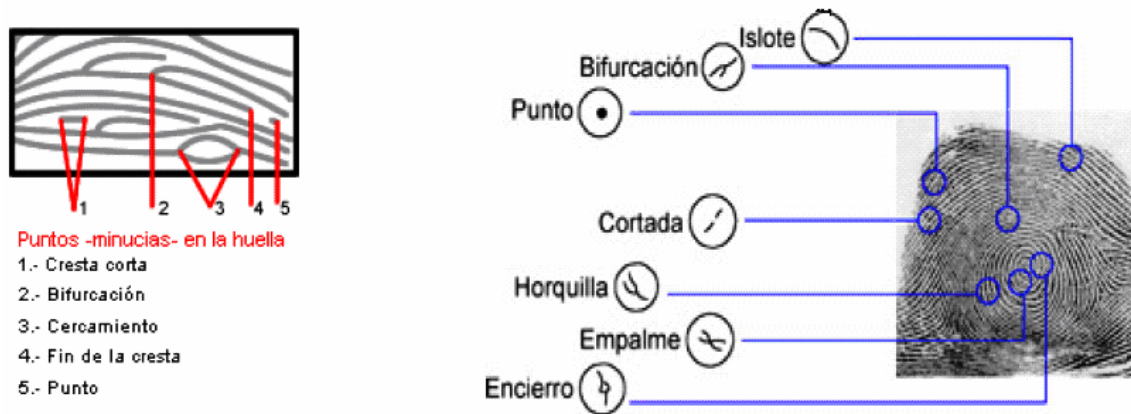


Figura 1-7 Minucias características de la huella dactilar

Normalmente esta toma de datos se realiza mediante el uso de un escáner o sensor, que realiza la imagen y la codifica. Las diversas tecnologías que se usan en el proceso de escaneo de la huella son: escáneres ópticos, sin duda los más usados, sensores capacitivos basados en el uso del silicio, sensores de campo eléctrico, sensores ultrasónicos y sensores térmicos.

Durante el proceso de realce de la imagen, el problema básico se encuentra en la aparición de ruido causado por cicatrices, suciedad, cortes, desgaste o pliegues e incluso el hecho de que la piel se encuentre excesivamente seca o mojada. Todos estos inconvenientes son correctamente tratados y reducidos de modo que la definición de las crestas de la huella se resalten para no perder la más mínima información.

El método usado consiste en lo siguiente. El usuario presiona su dedo contra una superficie lectora, de tipo óptico o capacitivo (*silicon*), de aproximadamente 5 cm², cuyo comportamiento se observa en la siguiente figura.

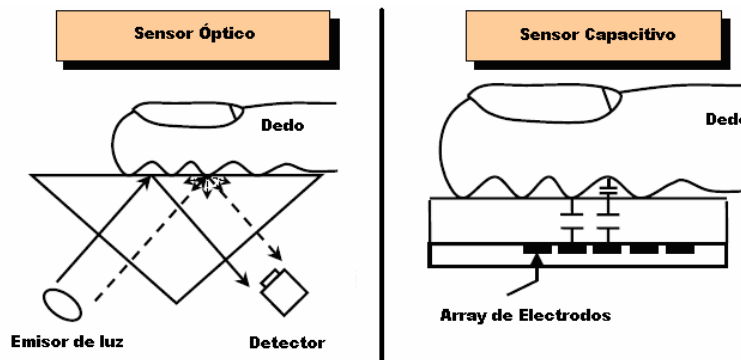


Figura 1-8 Esquema del funcionamiento de los diferentes sensores de superficies lectoras de huellas dactilares

El lector que está conectado a un ordenador mediante el cual se toma la información extraída del sensor y la envía a la base de datos, donde es tratada de forma conveniente. El usuario deberá hacer presión con su dedo sobre el lector durante aproximadamente 5 segundos, tiempo en el cual se lleva a cabo todo el proceso de identificación y verificación.

Actualmente existen dos tipos de métodos para la extracción de la información de la huella dactilar en uso: el basado en el estudio de los *minutiae points* en relación a roturas entre las ondulaciones propias de la huella, y los basados en el estudio de la correlación de patrones específicos de cada huella.

El primero de estos, lleva a cabo la localización de las características particulares de las crestas (bifurcaciones y terminaciones), asignando a estas sus coordenadas XY y almacenándolas en el archivo que servirá para llevar a cabo la plantilla. Una vez concluido el escaneo se lleva a cabo un análisis de los puntos específicos encontrados mediante complicados algoritmos matemáticos, tras lo cual se realizan comparaciones con las plantillas almacenadas en la base de datos. El método de estudio de correlaciones examina todo el patrón de crestas y valles de la huella. La localización de los rizos, giros y arcos así como la dirección en que estos fluyen es capturada y almacenada.

La información obtenida es procesada o almacenada, como una imagen o como un algoritmo codificado, para ser comparada posteriormente con otros registros de huellas dactilares. En el dominio digital, el software realiza un mapa con el emplazamiento relativo de los puntos *minutiae* en el dedo, buscando información de estos puntos similar en los archivos de la base de datos. A menudo se hace uso de un algoritmo que codifica la información en una cadena de caracteres, para que esta pueda ser localizada de manera más sencilla en la base de datos, método que mejora el tiempo de búsqueda. En la mayoría de los casos no se crea en realidad ninguna imagen usando tan solo la información extraída para llevar a cabo las comparaciones de modo que la imagen de la huella del usuario no puede ser copiada o robada.

Ninguno de los dos métodos guarda la imagen de la huella capturada, almacenando solo datos, de modo que resultaría imposible recrear la huella original, evitando así posibles robos y copias. Para evitar el uso de prótesis que imiten una huella, muchos sistemas realizan simultáneamente una medida de la presión sanguínea, o comprueban la colocación correcta de las crestas en los bordes de los dedos.

La precisión medida del proceso de reconocimiento de huella digital para un solo dedo es de alrededor de 1:500, cifra que se incrementa exponencialmente si se hace uso de más de un dedo. Gracias a la gran cantidad de información que se puede obtener de la huella, a medida que los sistemas se van haciendo más precisos y potentes, la precisión de los sistemas de reconocimiento de huellas debe de incrementarse en la misma medida.

La probabilidad de que dos huellas dactilares sean idénticas, está en torno a 1 en 64 billones, y por consiguiente imposible de distinguir dada la enorme cantidad de información que se puede extraer de la huella.

Otra ventaja en el uso de este rasgo biométrico es el pequeño espacio que requiere la plantilla obtenida de la huella para ser almacenada, lo que permite su uso con tarjetas inteligentes, así como la posibilidad de crear bases de datos con elevado número de estas plantillas.

En uso desde hace 100 años como ayuda en investigaciones criminales, y con el objetivo de identificación de personas en otras ocasiones, el uso de las huellas dactilares sigue en expansión día a día. Los sistemas basados en el análisis de huellas en controles de acceso de puertas y a redes de ordenadores, son cada vez más comunes. Recientemente algunos bancos han comenzado a hacer uso de este método de identificación para la

autorización del uso de cajeros, e incluso algunas tiendas de alimentación llevan a cabo procesos de escaneo de la huella que realiza el pago automático de la factura del cliente, como el sistema que hace escasas fechas se ha puesto en funcionamiento, en una cadena de supermercados alemana. Aunque sin duda el uso potencial del reconocimiento de huellas, así como el de casi todos los sistemas biométricos, viene determinado por la disponibilidad del usuario a hacer uso de estos.

Hoy en día la mayor aplicación basada en reconocimiento biométrico de huellas, se encuentra en los Sistemas de Identificación Automatizada de Huellas Dactilares o AFIS (Automated Fingerprint Identification Systems), usado por la policía de los Estados Unidos y en otros países. Estas instalaciones de alto coste, son responsables de haber llevado a cabo numerosos reconocimientos necesarios en diversas investigaciones criminales, y están empezando a usarse en aplicaciones como en controles de aduanas u otras de tipo económico y fiscal. Como cabe esperar, diversos verificadores de huellas controlan el acceso a lugares tan conocidos como el Pentágono u otras bases militares y laboratorios gubernamentales de relevante importancia en los Estados Unidos.

Es si duda esta tecnología la más antigua, investigada y desarrollada de todas las disponibles en el campo de la biometría, sin embargo el uso de esta técnica en procesos vinculados a investigaciones criminales, ha creado un estigma social que enmascara su gran utilidad, factor que poco a poco esta siendo superado.

Las compañías embarcadas en desarrollos de este tipo de tecnologías, más de 80 en la actualidad, se han concienciado de la importancia de investigar las riesgos de ataque que pueden sufrir estos sistemas, de modo que han ido progresivamente creando sensores más adaptados a las sensaciones humanas, capaces de diferenciar entre un dedo real e incluso algunas de las mejores replicas. Así mismo, dado que la información en la base de datos se encuentra codificada con algoritmos matemáticos, la recreación de una huella dactilar es extremadamente difícil incluso a escala limitada con los más modernos sistemas. Estas compañías están igualmente trabajando en el avance de estos sistemas de identificación basado en huellas, mediante el uso de tecnologías basadas en redes neuronales, lógica borrosa y escáneres de ultrasonidos.

Reconocimiento de Huellas Digitales.	
Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none">-Elevado ratio de eficacia.-Puede llevar a cabo comparaciones 1 a N (Identificación).-Equipo relativamente económico.-Facilidad de uso (muestra fácil de tomar y mantener).-Muy desarrollado e investigado dado su uso desde hace tiempo.	<ul style="list-style-type: none">-Las imágenes reales de la huella no pueden recrearse a partir de la plantilla.-Los usuarios relacionan esta técnica con investigaciones policiales y actividades de tipo criminal.

Tabla 1-4 Tabla comparativa de las propiedades del reconocimiento de huellas dactilares

1.3.3.3. Reconocimiento biométrico de la Geometría de la mano

El estudio de la geometría de la mano como rasgo biométrico es quizás la madre de las técnicas biométricas modernas, gracias a sus más de 30 años de historia y aplicaciones en la vida cotidiana. Hay hoy en día seis productos de escaneo de la palma de la mano desarrolladas para su uso en esta tecnología, incluyendo algunos de los sistemas biométricos de mayor comercialización hasta la fecha. En sus comienzos se hizo uso de esta tecnología en sistemas de control de acceso para facilitar la clasificación y ordenación de trabajadores de centrales nucleares.

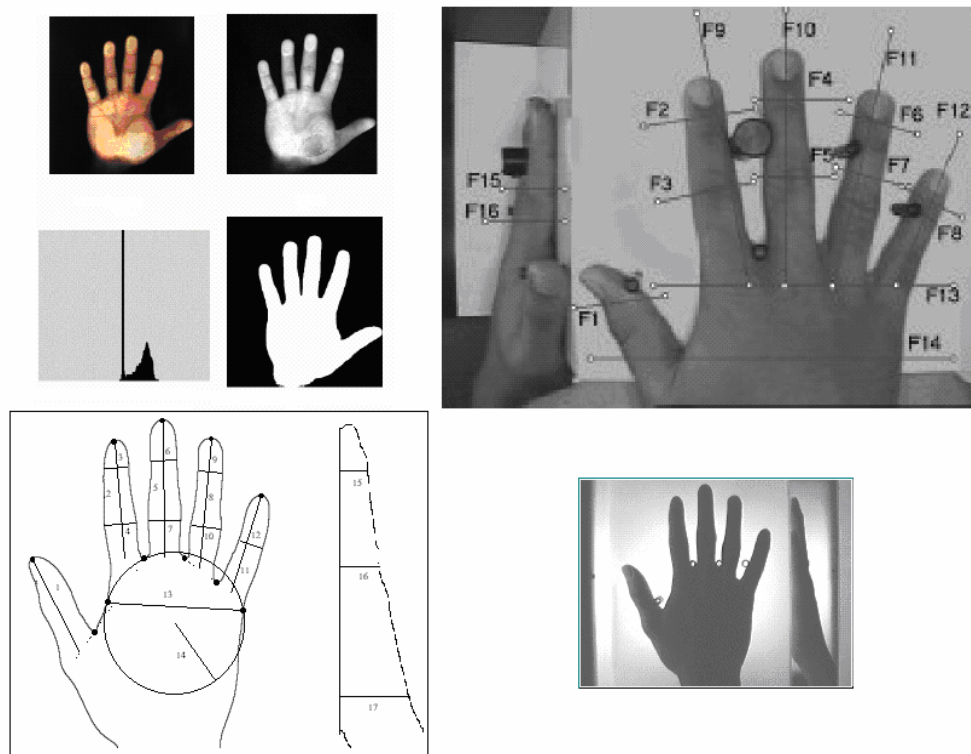


Figura 1-9 Detalles de la tecnología biométrica de geometría de mano

El estudio de la geometría de la mano comprende el análisis y la medida de las formas de la mano de una persona. Se trata de un proceso bastante sencillo y a la vez muy eficaz y preciso. A pesar de que requiere hardware especial para utilizarlo, es relativamente fácil integrarlos en otros dispositivos o sistemas. A diferencia de los sistemas de reconocimiento de huellas dactilares, las manos de una persona no tienen que ser únicas, no siendo los rasgos característicos de la mano lo suficientemente descriptivos para llevar a cabo una identificación de manera exitosa. Sin embargo la combinación de varios rasgos y medidas tanto de los contornos como de los dedos, y las relaciones entre estas, permiten llevar a cabo procesos de verificación totalmente válidos, para lo cual el proceso toma alrededor de 96 medidas de la mano incluyendo anchura y altura, la longitud de los dedos, el contorno de los nudillos y la distancia entre articulaciones. A pesar de que la geometría y tamaño de la mano humana permanece casi estable durante la etapa de vida adulta de las personas, es posible que se vean ligeramente afectadas por otros factores naturales y relativos al entorno.

La tecnología usa cámaras ópticas y diodos emisores de luz (LED Light-Emitting Diode), además de espejos y reflectores para capturar 2 imágenes ortogonales en dos dimensiones del reverso y los laterales de la mano.

Para llevar a cabo el proceso el usuario emplaza la palma de su mano en una superficie de metal con clavijas a modo de guía, para indicar la posición exacta de la mano, de modo que el dispositivo pueda leer los atributos de esta de manera apropiada. A continuación el dispositivo confirma su base de datos para verificar la identidad del usuario. El proceso completo se lleva a cabo en alrededor de cinco segundos.

Actualmente los escáneres usados para analizar la geometría de la mano no poseen la capacidad de detectar si la mano detectada esta viva o no de modo que es posible engañar al sistema mediante el uso de una mano falsa aplicada correctamente a la superficie lectora, siendo sin duda este factor una de las debilidades más acusadas de este tipo de sistemas.

Sin embargo el estudio de la geometría de la mano como técnica biométrica tiene varias fortalezas características. Es de uso muy sencillo para el usuario, ya que solo requiere que sitúe la mano sobre el dispositivo que además dispone de guías de posicionamiento. No tiene ningún tipo de condicionamiento público ya que este tipo de reconocimiento se relaciona comúnmente con sistemas de autorización de accesos. La cantidad de información requerida para identificar de manera única a un usuario es la menor de largo, de todos los sistemas biométricos, permitiendo que se pueda almacenar fácilmente en *smart cards*. Es bastante resistente a los intentos de engaño, ya que el tiempo y energía necesarios para emular de manera apropiada, es generalmente demasiada como para que merezca la pena el esfuerzo, especialmente dado que los sistemas se usan solo con propósitos de verificación.

Sin duda, al igual que la poca fortaleza frente a intentos de engaño al sistema, este tipo de sistemas cuentan igualmente con diversas desventajas, incluyendo el coste del hardware relacionado y el espacio que este ocupa. Además, cualquier herida en la mano puede dificultar el uso de la superficie lectora de manera efectiva, la falta de precisión en general supone que solo se utilicen estos sistemas para la verificación. De hecho, debido a la pequeña cantidad de información medida, es posible que existan lecturas iguales de diferentes personas si hubiese mucha gente inscrita en el sistema, lo que explica que no se uso como sistema de identificación.

Reconocimiento Geométrico de la Mano.	
Ventajas	Desventajas
-Cómodo para usuarios poco acostumbrados a uso de sistemas biométricos dado su fácil uso. (Superficie guiada). -Apropiado en bases de datos de mucho usuarios dado su poca información almacenada. -Facilidad de integración en otros sistemas y procesos de control.	-Elevado coste de hardware relacionado. -Gran espacio ocupado por el sistema. -Variación de la morfología y geometría de la mano a lo largo de la vida. -Falta de información para realizar la identificación.

Tabla 1-5 Tabla comparativa de las propiedades del reconocimiento geométrico de la mano

Ha habido durante la historia del desarrollo de esta técnica, seis productos diferentes para el escaneo de la palma de la mano, incluyendo el producto biométrico más exitoso

hasta la fecha, el ID-3D Handkey de Recognition Systems, Inc. Este dispositivo mira tanto el anverso de la mano como ambos lados para lo que incorpora una cámara de video y hace uso de diversos algoritmos de compresión. La plantilla de referencia es de menos de 10 bytes la menor de las usadas en todos los dispositivos desarrollados sobre esta tecnología. Los cortes y la suciedad acumulada en la mano no disminuye el rendimiento del sistema, y la mano puede ser guiada fácilmente a la posición idónea para llevar a cabo el proceso.

Otros dispositivos que consideran otros rasgos de la mano también están siendo desarrollados por diversas compañías incluyendo BioMet Partners, Palmetrics y BTG. Por ejemplo, BioMet, esta desarrollando una estrategia basada en el uso del escáner Digi-2 con dos dedos de la mano. Sus componentes se integran en sistemas de control de acceso, para controlar tiempo y la asistencia, y también para equipar cajeros, pero no se venden como productos configurados para usuario final.

1.3.3.4. Reconocimiento biométrico de Retina

La exploración de la retina es en realidad una de las técnicas biométricas más antiguas, ya que diversos estudios realizados en la década de los 30, sugerían que los patrones de los vasos sanguíneos que se encuentran en la parte posterior del ojo humano eran únicos en cada individuo. Sin embargo el paso de la teoría a la práctica fue en este caso un escollo difícil de salvar de modo que no fue hasta 1984, cuando la compañía EyeDentify, fundada en 1976, desarrollo y comercializó el primer dispositivo de escaneo de retina, más conocido como la unidad de identificación personal The Eyedentification 7.5. Para aquel entonces, eran la compañía principal en desarrollo de dispositivos de uso en sistemas de reconocimiento de retina a pesar de usar partes ya compradas a otras compañías.

El reconocimiento biométrico basado en la retina, analiza el fino estrato de la parte posterior del ojo, que procesa la luz que atraviesa la pupila, y que contiene numerosos vasos sanguíneos. Para escanear esta superficie es necesario hacer uso de una fuente de luz infrarroja de baja intensidad, y de un conector óptico capaz de interpretar los patrones de estos vasos con una elevada precisión. Es obligatorio para ello que el usuario se quite las gafas o lentillas, de modo que esto no impida el paso de la luz emitida, y coloque el ojo cercano al dispositivo, enfocándolo hacia un determinado punto.

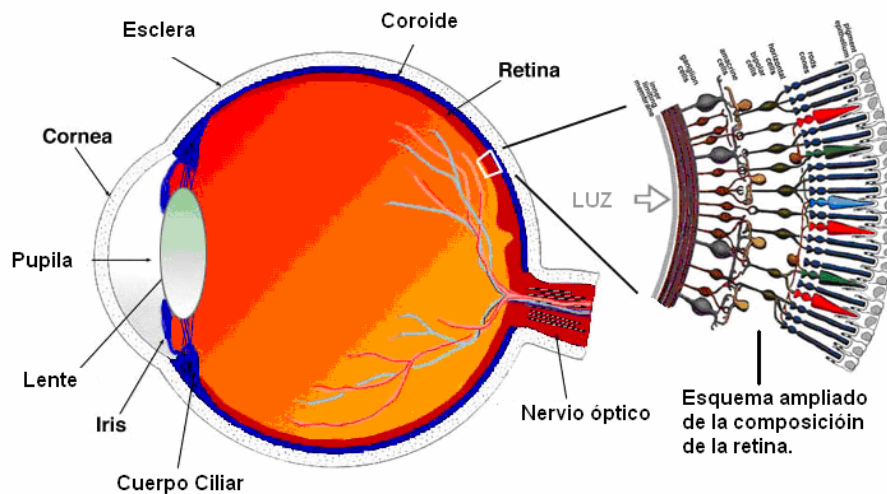


Figura 1-10 Esquema de la composición de la retina ocular

El hecho de que la retina sea pequeña, se encuentre en la cara interna del globo ocular y sea difícil de medir, conlleva a que el proceso de captura de la imagen de la retina sea de los de mayor dificultad de todos los procedimientos biométricos. Para llevar a cabo la medida es necesario que el usuario se posicione muy cercano a las lentes del dispositivo de rastreo de la retina, mire de manera directamente a las lentes, y permanezca perfectamente inmóvil enfocando la mirada hacia una luz giratoria mientras una pequeña cámara escanea la retina a través de la pupila. Todo este proceso cuando se lleva a cabo con motivos de alistamiento del usuario puede llevar más de un minuto.

Los patrones de la retina son rasgos altamente distintivos, de este modo cada ojo tiene su patrón totalmente único de vasos sanguíneos, incluso si comparamos el ojo izquierdo y derecho de una persona o los ojos de dos hermanos gemelos, al igual que ocurre con el iris. Aunque en general el patrón de cada ojo permanece constante a lo largo de la vida de un ser humano, este puede verse afectado por enfermedades tales como el glaucoma, la diabetes, subidas de presión sanguínea y también por el sida.

A pesar de que la precisión y eficacia de estos sistemas es muy elevada, esta por ver si conseguirá compensar las molestias que produce al usuario. El usuario debe mirar a través de una pequeña abertura en el dispositivo hacia una luz verde, manteniendo su cabeza quieta y enfocando su mirada hacia la luz por un tiempo aproximado de entre 10 y 15 segundos, durante los cuales el sistema verificará su identidad. Los patrones de la retina son reflejados hacia la cámara, que los captura y tras procesarlos se almacenan en menos de 35 bytes de información.

No existe ningún método conocido para duplicar una retina, y la retina procedente de una persona muerta resultaría inservible debido al rápido deterioro que esta sufre fuera del cuerpo, por lo que no es necesario tomar precauciones adicionales para preservar el sistema de posibles fraudes en cuanto a que el usuario no sea un ser humano vivo.

Contrariamente a las ideas erróneas populares, y como reflejo de lo que las películas han mostrado sobre estos sistemas, la biometría de retina se usa exclusivamente en

aplicaciones de alta seguridad, tales como áreas o instalaciones militares, centrales nucleares, y otras varias consideradas áreas de alto riesgo.

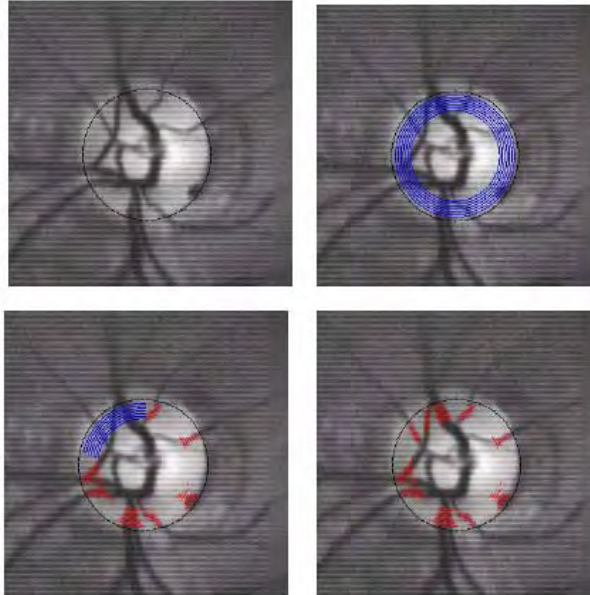


Figura 1-11 Ejemplos de imágenes obtenidas por un sistema biométrico basado en la exploración de la retina [RETIN]

Los sistemas de escaneo de retina son probablemente los más precisos de todos los sistemas biométricos disponibles en la actualidad, con ratios de falso rechazo de cerca del 0%, usando plantillas de datos pequeñas y con tiempos de trabajo relativamente buenos. La continuidad de los patrones de la retina a lo largo de la vida de una persona y la dificultad que presenta el tratar de engañar estos dispositivos, hacen de estos sistemas opciones de larga durabilidad y alta seguridad.

Desafortunadamente, el coste del hardware relacionado con estos sistemas, así como la dificultad de esta tecnología para evolucionar, hacen que no sea este el sistema más apropiado para la mayor parte de las situaciones. Tiene además el claro estigma creado en el usuario de que la luz utilizada puede dañar al ojo, y en general la dificultad de uso de estos sistemas, dado el alto intrusismo que conlleva.

<i>Reconocimiento de Retina.</i>	
Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> -Elevada precisión. -Dificultad par engañar al sistema. -Continuidad de los patrones de la retina a lo largo de la vida del usuario. 	<ul style="list-style-type: none"> -Poca disposición del usuario a su uso. -Elevado coste de los sistemas. -Escasa evolución de la tecnología. -Dificultad de uso. -Necesidad de prescindir de gafas y lentillas.

Tabla 1-6 Tabla comparativa de las propiedades del reconocimiento de retina

1.3.3.5. Reconocimiento biométrico de Firma

La firma ha sido utilizada durante cientos de años para determinar la identidad de un individuo, con un considerable reconocimiento legal y ampliamente utilizada para la autenticación y autorización de todo tipo de documentos. Gran cantidad de gente dispone en sus bancos de un archivo o tarjeta en los que se encuentra registrada su firma y es utilizada para realizar la comparación que permita la identificación del titular o usuario autorizado de la cuenta.

La verificación de la firma de un usuario es un proceso que trata de reconocer la firma manuscrita de un individuo cualquiera. Es uno de los tipos de reconocimiento biométrico, que se incluyen dentro del tipo dinámico o de comportamiento, y que se usa para llevar a cabo la confirmación de la identidad del usuario en el proceso de firma de un documento por ejemplo.

La firma es tratada como una serie de movimientos que contiene información biométrica propia de cada persona, tal como ritmo de escritura, aceleración o el flujo de presión ejercida durante el proceso. Por tanto se puede decir que esta tecnología trata de analizar como cada persona lleva a cabo su firma en base a su propio comportamiento.

Los sistemas que utilizan la identificación de la firma de un individuo pueden dividirse en dos grupos, los sistemas dinámicos o sistemas online y los sistemas estáticos o sistemas offline, dependiendo del tipo de sensor empleado.

Ambas técnicas pueden ser sistematizadas, pero la comparación simple o sistema offline, solo tiene en cuenta el modo en que la firma ha sido realizada, en el sentido de su aspecto. En este sentido, una imagen digital copiada sobre un documento, una fotocopidora o incluso un falsificador, pueden servir para falsificar una firma en cuanto a su aspecto visual, pero nunca en cuanto a sus características de elaboración, para lo cual sería necesario repetir el modo de comportamiento natural del usuario original, así como la práctica en cuanto a la ejecución de la firma. Por tanto, en un sistema basado en la comparación simple de una firma, que tan solo analiza la forma y aspecto, el nivel de seguridad decrece en gran medida. El proceso de un sistema offline, consiste en la realización de la firma por parte del usuario y posteriormente pasarla a través de un escáner para que mediante un programa se analicen las características de la firma y se comparen con las plantillas de la base de datos pertinente. Es habitual su uso en aplicaciones forenses y en procesos de autenticación de cheques. Algunos de los sistemas actuales de tecnología offline de autenticación mediante firma son: APP-DAVOS (<http://www.app-davos.ch/>) o NUMEDIA (<http://www.sapura.com.my/NuMedia/check.htm>)

En el caso de la verificación dinámica de la firma o proceso online, no se le da tanta importancia la forma o el aspecto de la firma, sino que se buscan y estudian aspectos como el cambio de velocidad en la escritura, de presión, y el ritmo de escritura llevados a cabo durante el proceso. Solo el usuario original puede recrear estas características singulares de cada firma.

En los sistemas dinámicos la firma es escrita con un dispositivo electrónico que permite obtener gran cantidad de información, incluso cuando el dispositivo no se encuentra en contacto con la superficie. La captura digital de la firma es una medida tanto de la imagen obtenida como de la dinámica de la misma, es decir, la velocidad, el orden, la

inclinación y ángulos del lápiz electrónico utilizado, la presión empleada en la redacción de los diferentes caracteres que conforman la rúbrica de una persona.

En este, el usuario realiza una firma manuscrita sobre una tableta de digitalización gráfica o en una PDA (Personal Digital Assistant), e inmediatamente el sistema analiza la dinámica del proceso de escritura, determinando velocidad, velocidad relativa, estilo de realización (orden, número de golpes en la escritura,...) y presión. Toda la información relativa al proceso de firma se encripta, se codifica y finalmente se comprime en una plantilla para cada usuario. La tecnología puede también seguir las fluctuaciones y variaciones de la escritura de la firma de cada persona a lo largo del tiempo. Este tipo de autenticación se usa en aplicaciones tales como la autenticación de un usuario in-situ en un ordenador (proceso de login), en procesos de autenticación de documentos y transacciones y en sistemas de uso común de la firma tales como el pago con tarjeta de crédito.

Algunas de las tecnologías online existentes son: SOFTPRO (<http://www.signplus.com/>), CYBERSIGN (<http://www.cybersign.com/>) y CIC (<http://www.cic.com/>).

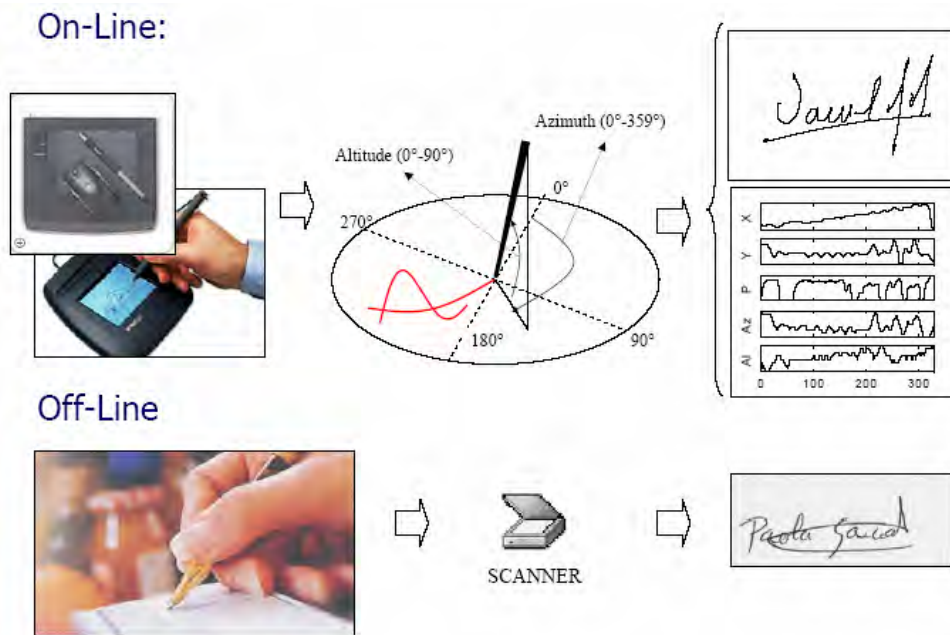


Figura 1-12 Funcionamiento de los diferentes sistemas biométricos de firma [Fie05].

Siempre existen pequeñas variaciones en cuanto a la firma de un usuario, pero la consciencia creada por el movimiento natural y la práctica adquirida con el tiempo, recrean un patrón reconocible que hace de la firma un elemento idóneo para la identificación biométrica.

La verificación de la firma es natural e intuitiva, y la tecnología usada es de fácil manejo, aunque por otro lado de alta fiabilidad, y con la desventaja del alto coste de los dispositivos.

La principal ventaja que presenta este tipo de biometría es la gran aceptación del proceso de firma como acción natural de identificación, sobre todo en procesos como el

pago con tarjetas de crédito o en la firma de documentos acreditativos, lo que implica el apoyo del usuario hacia sistemas biométricos basados en este proceso.

La firma junto con las variables de datos recogidos durante el proceso de realización de la firma, se transmite a un ordenador para que este genere la plantilla de datos.

El proceso se puede llevar a cabo de tres modos diferentes, en los que se hacen uso de diferentes métodos tanto en la representación de la información como en el tratamiento de esta en cuanto al proceso de comparación. Estas diferencias se resumen en la siguiente tabla:

<i>Tipo de proceso</i>	<i>Representación</i>	<i>Comparación</i>
Global	Vector de características.	Medida de distancias.
Regional	Secuencia de vectores (trazos, segmentos, etc....).	Distancia entre secuencias.
Local	Función relativa al tiempo (online) o al espacio (offline).	Distancia elástica entre funciones.

Tabla 1-7 Tabla descriptiva de los métodos de reconocimiento de firma

El hecho de que un proceso tenga carácter global, regional o local depende en gran medida del tipo de aplicación del sistema, por ejemplo en procesos de compra remota desde casa será precisa una configuración local, sin embargo en situaciones como la autenticación bancaria, el proceso deberá llevarse a cabo a través de una central de datos ya que el usuario podrá utilizar diversas localizaciones.

<i>Reconocimiento de la Firma.</i>	
Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> - Bastante aceptado por parte de los usuarios. - Bueno para aplicaciones de autenticación de documentos firmados. - Elevada cantidad de información derivada del proceso. - Dificultad para copiar efectivamente el proceso completo de firma. - No intrusiva y de sencillo uso. 	<ul style="list-style-type: none"> - Elevada variación intra-usuario. - Afectado por estado del usuario y por el tiempo. - Los instrumentos empleados, como tablas y lápices electrónicos, resultan caros y complejos. - Falsificaciones. - El potencial de miniaturización es reducido. - Bajo nivel de precisión.

Tabla 1-8 Tabla comparativa de las propiedades del reconocimiento de firma

1.3.3.6. Reconocimiento biométrico de Voz

En los sistemas de reconocimiento de voz, el objetivo no es identificar lo que el usuario está diciendo, sino reconocer una serie de rasgos distintivos como puede ser un conjunto de sonidos y sus características para poder confirmar si el usuario realmente es quien dice ser. Será especialmente importante para poder realizar el reconocimiento de manera satisfactoria, que la obtención de los datos, en este caso los sonidos emitidos por la persona al hablar, se realice en entornos libres de ruido y/o ecos. Estas condiciones deberán reproducirse en la medida de lo posible, siempre que se realice el reconocimiento.

Al igual que el sistema anterior, el reconocimiento de voz es una técnica biométrica basada en el comportamiento. Los instrumentos para el reconocimiento de voz miden el espectro de ésta en el tiempo. Esta forma de reconocimiento está basada en la similitud entre la voz recogida por un sensor y la voz almacenada en uno de los patrones.



Figura 1-13 Sistema característico de reconocimiento de voz

Este tipo de sistemas, como los basados en el reconocimiento facial, posee especial interés por su amplia utilización entre los seres humanos. Por ejemplo, cuando contestamos a una llamada telefónica, somos capaces de identificar si la voz al otro lado de la línea es de alguien conocido. Hablar solamente con el objetivo de ser identificado puede resultar poco natural, pero en situaciones en las que un sujeto necesita hablar para realizar una determinada acción, como aquellas personas que trabajan con sistemas controlados por la voz, el reconocimiento biométrico puede llegar a ser realizado de forma sencilla.

La voz de una persona puede ser identificada siguiendo distintos esquemas. Estos esquemas dependerán del grado de libertad admitido en lo que puede ser dicho por el usuario, es decir, podremos dividir estos sistemas en:

- **Sistemas de texto fijo:** el usuario deberá repetir una determinada palabra o una frase concreta, que fue grabada anteriormente en la fase de reclutamiento. La palabra o frase deberá ser secreta, como una contraseña. Si se graban estas contraseñas puede burlarse el sistema de forma sencilla, y sería necesario repetir el reclutamiento para cambiar la palabra o frase utilizada.
- **Sistemas de texto dependiente:** el sistema tendrá almacenado un conjunto muy limitado de frases y palabras que será capaz de reconocer. El usuario se limitará a pronunciar una de estas frases guardadas, y esperará a que el sistema le reconozca y le autentique.
- **Sistemas de texto independiente:** este tipo de sistemas proporciona mayores niveles de seguridad en comparación con los dos anteriores. En este caso, el sistema va pidiendo al usuario la pronunciación de unas determinadas palabras extraídas de un conjunto bastante grande.

Independientemente de cual sea el modelo empleado, lo normal es buscar palabras y frases lo más características posibles con el objetivo de maximizar la cantidad de datos que podrán ser analizados. Al mismo tiempo que el usuario se encuentra pronunciando el texto solicitado, el sistema registra la información útil para completar el reconocimiento.

<i>Reconocimiento de Voz.</i>	
Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> - Sistemas no invasivos y relativamente fáciles de usar por el consumidor. - Presentan una gran acogida por parte de los usuarios. 	<ul style="list-style-type: none"> - La voz está sujeta a variaciones. - Cambios en el volumen, velocidad o calidad y tono de la voz (por ejemplo al estar resfriado). - A medida que la tecnología sea desarrollada con mayor amplitud podrán reconocerse las voces provenientes de una grabación en lugar de un sujeto vivo, pero actualmente es posible engañar a estos sistemas mediante la utilización de voces grabadas. - El coste de un micrófono de alta calidad es elevado.

Tabla 1-9 Tabla comparativa de las propiedades del reconocimiento de voz

1.3.3.7. Reconocimiento biométrico de la Dinámica de Tecleo

La dinámica de pulsación es el proceso de analizar el modo en el que un cierto usuario escribe en un teclado mediante la monitorización las entradas que se hacen a través de este teclado, miles de veces por segundo con el objetivo de identificar el comportamiento de este usuario y su patrón de ritmo de tecleo.

Ha quedado demostrado en diversos estudios que el patrón de tecleo de un usuario es un rasgo biométrico de fundadas garantías, además a diferencia de otros sistemas biométricos, caros de implementar, este tipo de sistemas tan solo requiere de un teclado convencional y del software desarrollado necesario.

Las técnicas de verificación de usuarios mediante el análisis de la dinámica de tecleo, pueden definirse como estáticas o continuas. La verificación estática, lleva a cabo un análisis de las pulsaciones tan solo en momentos temporales específicos, por ejemplo durante la secuencia de entrada de la contraseña en un ordenador. Este método permite obtener una mayor seguridad que la que da tan solo el uso de una clave de acceso, pero tiene el inconveniente de no permitir la detección de una sustitución del usuario una vez finalizada la verificación inicial. Por el contrario la verificación continua, monitoriza el comportamiento del usuario a lo largo de todo el proceso de interacción del usuario con el teclado.

La idea de usar este rasgo biométrico, ha estado presente desde la II Guerra Mundial. Esta documentado que durante esta guerra, los operadores de telégrafo de diversos barcos del ejercito norteamericano podían reconocer al emisor de los mensajes, lo que se conocía como “El puño del remitente” (*Fist of the Sender*), dado que la unicidad en el ritmo de pulsación en el envío de mensajes en código Morse, permitía distinguir un operador de otro [Anil].

Uno de los trabajos más representativos en la materia es el realizado por Rick Joyce y Gopal Gupta.

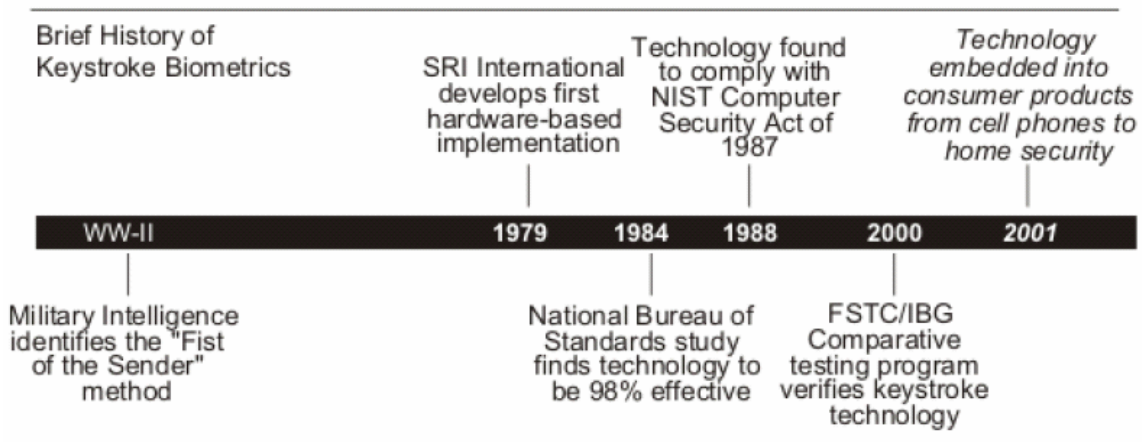


Figura 1-14 Índice cronológico del desarrollo de la tecnología biométrica de escritura en teclado

Posteriormente a la II Guerra Mundial, la Fundación Nacional de la Ciencia de Estados Unidos, viendo las virtudes de la dinámica de pulsación, financió un proyecto de investigación sobre seguridad en ordenadores en la RAND Corporation. Basándose. En este estudio exhaustivo, las pruebas aportadas concluían, que el concepto en el que se basaba el reconocimiento de los operadores de la II Guerra Mundial, tenía un gran merito estadístico.

A comienzos de la década de los 80, el U.S. National Bureau of Standards fundó el SRI International (Stanford Research Institute) para el desarrollo de una solución biométrica basada en hardware, que usase los principios de la dinámica de tecleo. La SRI realizó de forma exitosa una demostración eficaz de su sistema, lo que desembocó en la consecución de una patente. Posteriormente llevó a cabo un estudio acerca de la viabilidad del uso de este tipo de tecnología biométrica en aplicaciones de seguridad informática, para el National Bureau of Standard. Este estudio demostraba que con tan solo el tecleo de una palabra como podía ser la el nombre de usuario o la clave eran suficientes para llevar a cabo la autenticación de un usuario de manera efectiva y precisa.

En 1984, la International Bioaccess Systems Corporation adquirió todos los derechos acerca de la tecnología desarrollada por la SRI International. La patente número #4,805,222 se emitió en 1989 relativa a un método de verificación de identidad basado en la dinámica de pulsación de teclas. Ya en el año 2002 fue la empresa BioPassword Inc, la que adquirió todos los derechos secretos comerciales y patentes relacionados con esta tecnología.

Según los datos, las primeras investigaciones realizadas en este campo las llevaron a cabo los científicos R. Gaines y W. Lisowski, acerca de la posibilidad de usar la temporización del proceso para llevar a cabo la autenticación del usuario. Los experimentos realizados se realizaron con tan solo la participación de siete secretarias, llevando a cabo diferentes pruebas de independencia estadística de sus perfiles de escritura a máquina, bajo la hipótesis de que las medias de los tiempos de los dígrafos de dos sesiones serian similares, pero las variaciones fueron significativas. Experimentos similares fueron realizados por John Leggett y Glen Williams, con 17 programadores en el proceso de verificación continua. Los autores presentaron un verificador de identidad, que validaba los resultados obtenidos por Gaines y Losowski, este era un sistema de verificación de

identidad con niveles de falso rechazo de cerca del 5,5 por ciento y de falsa aceptación de aproximadamente el 5 por ciento.

Mientras que los enfoques de estos investigadores, implicaban un gran número de problemas inherentes a la verificación de identidad mediante el uso de tiempos, había un amplio margen de mejora.

Posteriormente D. Mahar y sus compañeros de investigación llevaron a cabo estudios que mostraban la significativa variación con la que los mecanógrafos producían cada dígrafo, y de ahí los problemas que se obtenían anteriormente

Además, los datos empíricos obtenidos por Gentner, sugerían que había una gran diferencia existente en la latencia entre pulsaciones de los escritores noveles y los experimentados, implicaba un rango temporal muy amplio, que necesitaba de un estudio específico de cada usuario en vez de un filtrado de los datos general independiente del usuario

En los últimos años se han producido diversos avances en el uso de redes neuronales adaptadas a estos sistemas, aunque siguen presentando limitaciones como la necesidad de volver a entrenar una y otra vez la red cada vez que se introduce un nuevo usuario, lo que implica costes desorbitados tanto de tiempo como de dinero en aplicaciones tales como controles de acceso.

Los sistemas biométricos basados en la dinámica de pulsación de teclas tienen gran variedad de aplicaciones en el área de seguridad en ordenadores. Una de estas áreas en la que el uso de una aproximación estática a la dinámica de tecleo resulta bastante conveniente es en la restricción de acceso a los niveles raíz de servidores en servidores que mantienen bases de datos de claves como Kerberos.

La dinámica de pulsación es un rasgo biométrico que se basa en la unicidad en el patrón de escritura en teclado de cada persona. Conceptualmente, el sistema biométrico más cercano a este es sin duda el de reconocimiento de firma, ya que en ambos casos se identifica a la persona mediante su dinámica de escritura, asumiendo que esta es única en un grado elevado entre diferentes usuarios.

También se conoce esta técnica con otros nombres tales como: dinámica de teclado, análisis de pulsaciones, biometría de mecanografía o ritmo mecanográfico.

En los accesos a sistemas y redes de ordenadores, es usual realizar un control mediante el uso de nombre de usuario y claves. Este esquema tiene el inconveniente de la posibilidad de que la información confidencial caiga en otras manos. Otros métodos biométricos o tarjetas de acceso, ayudan a fortalecer la seguridad de estos sistemas, pero tienen el inconveniente de ser más caros en cuanto a hardware se refiere, mientras que esta tecnología no requiere dispositivos específicos. Además la aceptación de los usuarios de un sistema biométrico de dinámica de tecleo es muy alta, dado que los usuarios ni siquiera notan que este sistema se usa mientras ellos teclean. Se puede hacer uso de esta técnica tanto para verificación como para identificación de personas, aunque es en primer campo en el que se aplica más comúnmente.

Los rasgos usados en el análisis de la dinámica de pulsación de un usuario, incluyen diversas medidas que pueden ser detectadas y analizadas cuando el usuario presiona las teclas en un teclado. Entre estos rasgos podemos encontrar:

- Duración de la pulsación (referido al momento que se mantiene pulsada la tecla).
- Velocidad de escritura global.
- Frecuencia de errores (veces que el usuario debe volver atrás para borrar).
- Hábitos de uso de diferentes combinaciones de teclas. Por ejemplo uso de la consola de números adicional.
- Orden de pulsación de botones especiales (ctrl., shift,...).
- Medida de la presión ejercida sobre las teclas durante la escritura, para lo cual si sería necesario el uso de un teclado especial adaptado.

Las estadísticas pueden ser globales, o deducidas para cada tecla o pulsación por separado, y no es necesario el análisis de todos los factores en cada sistema, y la mayoría de estos usan tan solo medidas de latencias entre pulsaciones consecutivas, o la duración propia de la pulsación. Esto se debe a que estas medidas pueden llevarse a cabo mediante teclados convencionales. Tanto la acción de presión de una tecla como de soltar la misma generan interrupciones mediante el hardware. Sin embargo pueden ocurrir algunos errores, como el producido por la pulsación accidental de una tecla posterior antes que la inmediatamente anterior, muy común cuando se escribe rápido, o la pulsación simultánea de dos teclas consecutivas

En la siguiente figura [Ilo03] se pueden observar las diferentes latencias medias producidas por la escritura de la palabra **password**, por 3 usuarios diferentes, donde se observa claramente la diferencia entre las latencias de cada uno y en sus desviaciones estándar. En este caso el proceso de escritura de la palabra escogida se repite varias veces, y en la figura las líneas representan la latencia media, mientras que las barras verticales de error representan las desviaciones.

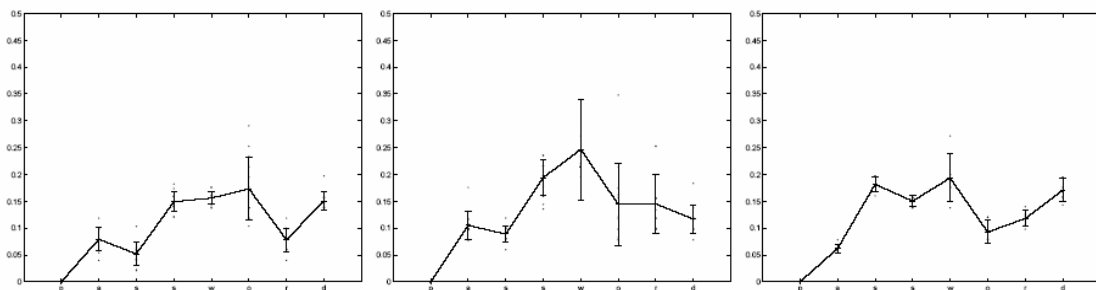


Figura 1-15 Gráficas de datos de las latencias de diferentes usuarios al escribir *password*

Otro reto relacionado con esta tecnología, es que existen gran variedad de técnicas de mecanografía y el sistema debe funcionar para todos los usuarios, uno de los factores más diferenciadores lo constituye la velocidad de escritura, aunque también pueden afectar factores como el nivel de atención durante el proceso, o problemas derivados de lesiones que afecten a las manos o brazos, al igual que el cambio de modelo de teclado o el uso del teclado de un ordenador portátil. Por eso todos estos factores han de tenerse en cuenta a la hora de diseñar el sistema biométrico de medida dinámica de tecleo.

Uno de los sistemas más conocidos que usan este rasgo biométrico es el Biopassword. Este sistema se puede probar en una demo alojada en la página web <http://www.biopassword.com/bp2/products/demo/>



Figura 1-16 Esquema de funcionamiento del sistema Biopassword

<i>Reconocimiento de Dinámica de Tecleo.</i>	
Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> - Aplicación práctica y sencilla en entornos informáticos - El reclutamiento y el reconocimiento puede realizarse de forma continua mientras el usuario se encuentra tecleando. - El coste de los dispositivos de captura (teclados) es muy reducido. 	<ul style="list-style-type: none"> - Los distintos teclados pueden variar el ritmo con el que usuario teclea. - Influencia de factores como lesiones o estado de concentración.

Tabla 1-10 Tabla comparativa de las propiedades del reconocimiento de la dinámica de tecleo

1.3.3.8. Reconocimiento biométrico de Iris

La tecnología de reconocimiento de iris es sin duda la base fundamental de este trabajo centrado exclusivamente en el desarrollo de un sistema de reconocimiento de personas mediante el reconocimiento de iris basado en la transformada wavelet, cuyo comportamiento se explicará en posteriores apartados.

El proceso biométrico de reconocimiento mediante iris se basa en el análisis del característico anillo de color que circunda la pupila del ojo. Tanto la base fisiológica del iris, de la que depende en gran parte la viabilidad de esta característica corporal como elemento biométrico, como el desarrollo de la tecnología asociada, se describen ampliamente en el capítulo 3 de este proyecto.

Sin embargo con el propósito de intentar dar una visión detallada de todos los diferentes sistemas de identificación biométrica, se resumen a continuación en la siguiente tabla, las ventajas y desventajas de esta tecnología de reconocimiento basada en el rasgo biométrico del iris:

<i>Reconocimiento de Iris.</i>	
Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> - Alta precisión y bajos niveles de error. - Unicidad del rasgo biométrico. - Poca variación del rasgo a lo largo de la vida. 	<ul style="list-style-type: none"> - Coste de los dispositivos. - Intrusividad. - Necesidad de desarrollo de los algoritmos.

Tabla 1-11 Tabla comparativa de las propiedades del reconocimiento de iris

1.3.3.9. Reconocimiento biométrico de ADN

El AND (Ácido Desoxirribonucleico), es una sustancia compleja, que contiene la información genética de un individuo. Se compone de una estructura en doble hélice, que fue descubierta por James Watson y Francis Crack en la Universidad de Cambridge en el año 1953. Cada una de las hélices es una disposición lineal de cuatro tipos de nucleótidos o bases: A adenina, C citosina, G guanina y T timina. Entre las cuatro bases, solo son posibles dos emparejamientos, A con T y C con G. Cada una de las secuencias es complementaria con la que contiene la otra hélice, así si la primera contiene AGTCCTAATGT, la segunda contendrá la cadena complementaria TCAGGATTACA. Esta secuencia de bases determina todos los atributos genéticos de la persona, aunque es cierto que tan solo el 2-3% de la secuencia de ADN contiene el material genético, mientras que casi el 70%, esta compuesto de regiones sin código conocido, y el restante 27-28% por ADN que no contiene ningún código, y se compone de secuencias repetitivas, de las cuales un tercio son repeticiones con sentido y los dos tercios restantes repeticiones aleatorias.

Las técnicas de reconocimiento basadas en la identificación del ADN, hacen uso de la parte no codificado que presenta repeticiones conjuntas, esto es tan solo un 10% del total del ADN, lo que corresponde a la información no confidencial de la cadena, con un grado elevado de polimorfismo.

El ADN, de un individuo puede aislarse a partir de una muestra de: sangre, saliva, orina, pelo, diente, hueso, tejido,... Por lo tanto se cuenta con diversas fuentes de evidencia biológica que representan a un mismo individuo. El ADN de cada individuo es único, con la excepción de los gemelos idénticos, ya que la información genética viene determinada por la aportación del padre y la madre a su hijo. En el siguiente esquema se puede observar como se obtiene esta información de manera hereditaria.

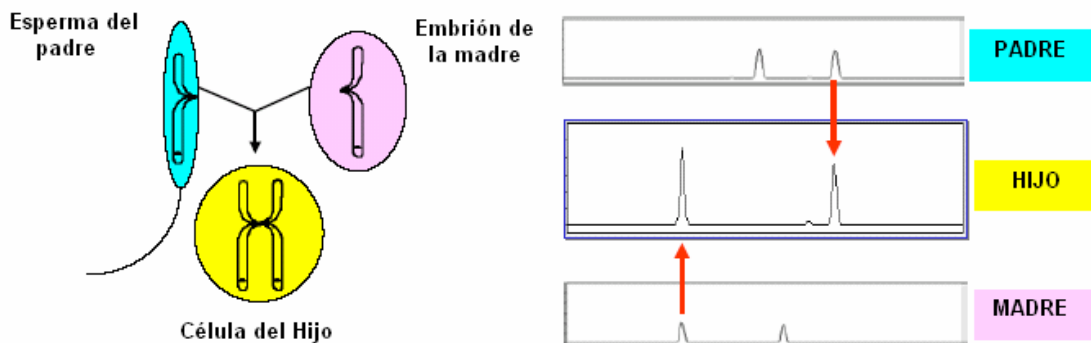


Figura 1-17 Esquema de la herencia de los factores genéticos

En el caso de uso de ADN como un rasgo biométrico, es necesario transformar la muestra obtenida en una plantilla. Este proceso es irreversible, y no tiene nada que ver con los procesos médicos o de análisis genético, ya que como se ha comentado, se utilizan regiones de la cadena diferentes. Las dos técnicas de generación de plantillas mediante el ADN, se denominan Huella de ADN (DNA Fingerprinting) y Perfil de ADN (DNA Profile).

El proceso de creación de una huella de ADN, fue descubierto por Alec Jeffreys en 1984 en la universidad de Leicester, y permite identificar los patrones de ADN en varios *locus* (lugares específicos de la cadena de ADN), que son únicos en cada individuo, a excepción de los gemelos idénticos. Cada patrón compone una sección repetida de fragmentos de ADN, conocida como Número Variable de Repeticiones en Tandem (Variable Number of Tandem Repeats, VNTR), y su tamaño depende del número de repeticiones. La técnica usada para examinar los patrones del ADN, se basa en el análisis de la longitud restringida de los fragmentos polimórficos (Restriction Fragment Length Polymorphism RFLP). El proceso de formación de la plantilla es el siguiente: aislamiento, desnaturalización (cortando, pegando y ordenando la cadena), transferencia y sondeo del ADN, y un posterior uso de entre 5 y 10 de estas sondas para generar la huella.

El proceso del perfil de ADN, ideado por Butler en el año 2004, se basa en la posibilidad de establecer perfiles de ADN que generen patrones específicos de datos numéricos. El resultado es una cadena de valores numéricos, como por ejemplo: 13,5, 17 – 16,15,3 -... - 11,9 - 10,8, en el que cada uno de los pares esta asociado a la localización de los *locus* en la cadena, que se determinan por un nombre característico como se puede observar en la tarjeta de la imagen.

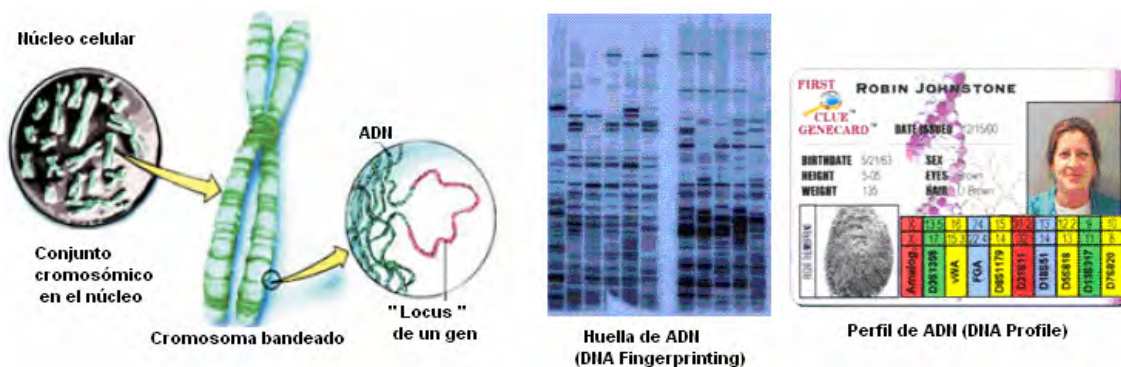


Figura 1-18 Imagen representativa del *locus* de un gen y de las diferentes plantillas de ADN [Fro05].

Los sistemas de tratamiento de ADN, como rasgo de identificación de personas se vienen desarrollando desde el año 1984, y se siguen desarrollando mecanismos y sistemas capaces de mejorar la precisión en el estudio del genoma humano. Igualmente siguen creciendo las bases de datos de muestras biológicas, útiles para la identificación de personas.

Entre las diferentes aplicaciones que se pueden encontrar se encuentran:

- Aplicaciones forenses.

- Pruebas de paternidad.
- Investigaciones históricas.
- Investigaciones de personas desaparecidas.
- Reconstrucción de cuerpos de víctimas de desastres masivos.
- Comprobación de placas de identificación de militares
- Bases de datos de personas peligrosas.

El proceso que se lleva a cabo en el sistema de reconocimiento de ADN es el que se puede ver en la siguiente figura:

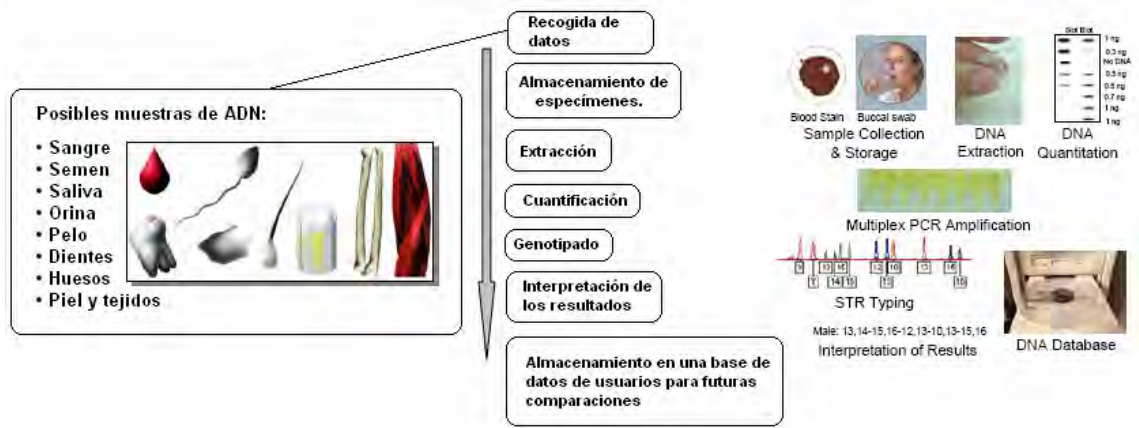


Figura 1-19 Esquema del proceso de estudio de las posibles muestras de ADN

Tal y como se observa las posibles fuentes de datos necesarias para el sistema, requieren de la participación directa del usuario, para recoger una muestra de manera intrusiva. El proceso completo requiere una elevada cantidad de tiempo, para que las muestras de ADN se extraigan correctamente, y se obtengan los datos necesarios que sean exclusivos de cada individuo.

<i>Reconocimiento de ADN.</i>	
Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> - Alta precisión y fiabilidad. - Bajo porcentaje de error. - Diversas fuentes de muestras para generar la plantilla. 	<ul style="list-style-type: none"> - Proceso intrusivo de obtención de datos. - Dificultad de uso. - Tiempo requerido para el proceso muy elevado. - Coste de los dispositivos del sistema. - Privacidad de los datos.

Tabla 1-12 Tabla comparativa de las propiedades del reconocimiento de ADN

1.3.3.10. Otras técnicas biométricas

Estas técnicas descritas no son las únicas que se pueden usar en un sistema biométrico, aunque si son las más desarrolladas en la actualidad, los avances necesarios para que el uso de éstas, dote de garantías a un sistema cualquiera, son todavía muchos. En primer lugar la necesidad de encontrar algoritmos eficaces que disminuyan las tasas de error hasta valores mínimos, así como el abaratamiento de los sistemas de captura necesarios, son solo algunos de los escollos que este tipo de sistemas de seguridad tienen que salvar, para que su uso se extienda a escala mundial.

Mientras continúa la expansión de la tecnología ya existente, se realiza de forma paralela la exploración de soluciones de seguridad biométricas innovadoras. Algunas de estas técnicas como el estudio de la geometría de los dedos, o de la parte blanca de las uñas, se sustentan sobre tecnología de análisis de huellas ya existente. En la siguiente lista se pueden observar posibles rasgos biométricos:

- Forma de la oreja.
- Olor corporal.
- Patrones de venas (de la muñeca, mano o cara).
- Geometría de dedos.
- Estudio de las zonas blancas de las uñas.
- Termografías corporales o faciales.
- Reconocimiento de los patrones de movimiento (modo de andar).
- Análisis de la dentadura.

1.3.4. Parámetros característicos de los sistemas de identificación biométrica

Los sistemas biométricos se pueden clasificar en base a distintos rasgos característicos que los diferencian, y que permiten determinar su aplicabilidad a un cierto sistema de seguridad. Algunos de estos rasgos son:

- **Universalidad:** Indica la posibilidad de obtener un determinado rasgo biométrico de cualquier usuario. Por ejemplo el reconocimiento facial presenta una alta universalidad, mientras que los sistemas basados en la dinámica del tecleo poseen una universalidad baja.
- **Unicidad:** Determina la probabilidad de que no existan dos sujetos diferentes con las mismas características biométricas. Los sistemas de reconocimiento basados en la geometría de la mano presentan un valor de unicidad medio, mientras que las técnicas de reconocimiento de patrones oculares como la retina o el iris tienen una unicidad elevada.
- **Estabilidad:** Cuantificar en que grado permanecen inalterables y constantes las características extraídas, ante diversos parámetros como pueden ser el tiempo, la edad, enfermedades, accidentes, etc. La voz presenta una baja estabilidad, sucediendo lo contrario para patrones de iris y retina.
- **Facilidad de captura:** Muestra si las técnicas bajo estudio disponen de mecanismos sencillos de captura de los rasgos biológicos usados. Métodos que presentan gran facilidad de captura son aquellos basados en el reconocimiento de voz, donde únicamente es necesario un micrófono para obtener la muestra. La situación opuesta puede verse en los sistemas encargados de explorar la retina, ya que los dispositivos de captura resultan complejos.
- **Rendimiento:** Se mide mediante las tasas de acierto y las tasas de error. Técnicas biométricas que presentan elevados rendimientos son las que utilizan las características extraídas del iris o la retina, por el contrario, los sistemas de reconocimiento de voz obtienen bajos rendimientos.

- **Aceptación por los usuarios:** Es un parámetro que los diseñadores tienden a olvidar, cuando se trata de uno de los más importantes, ya que una baja aceptación de los usuarios puede significar el fracaso del sistema desarrollado, ya que si un usuario no acepta el sistema puede negarse a usarlo, o lo que sería peor, podría utilizarlo de manera inapropiada, provocando la obtención de resultados erróneos. Ejemplos de sistema con baja aceptación son la retina, debido al dispositivo de captura empleado para la obtención de los datos y por el recelo que suelen presentar las personas a los temas relacionados con sus ojos, o en algunas ocasiones las huellas dactilares, por las connotaciones policiales y judiciales que presentan.
- **Robustez frente a la burla del sistema:** Evalúa en que grado el sistema será capaz de reconocer cuando los datos capturados son falsos. Ejemplos de datos falsos serían una máscara en un sistema de reconocimiento facial, o un dedo de látex para las huellas dactilares. La robustez de un sistema biométrico puede verse mejorada con la utilización de métodos asociados encargados de detectar si el sujeto está vivo. En las huellas dactilares puede identificarse a un individuo vivo por el flujo sanguíneo, o en el caso de reconocimiento de voz, cambiando el mensaje que debe pronunciar el sujeto.
- **Coste:** Siempre debe tenerse en cuenta a la hora de desarrollar cualquier tipo de sistema biométrico. Las técnicas de reconocimiento de voz suelen ser baratas, mientras que las basadas en la retina o en el iris muestran unos costes elevados. El coste de los componentes del sistema biométrico debe incluir factores como:
 - Hardware de captura de datos.
 - Potencia de procesamiento de reserva para mantener la base de datos.
 - Proceso de investigación desarrollo y prueba del sistema biométrico.
 - Instalación, montaje y conexión.
 - Costes de integración de los usuarios en el sistema.
 - Costes de formación de los usuarios para comprender el uso del sistema.
 - Mantenimiento del sistema.

1.3.5. Comparación de las diversas tecnologías

La selección de la tecnología apropiada para un sistema de identificación biométrica concreto dependerá de una serie de factores, incluyendo el entorno en el que el proceso de verificación se llevará a cabo, el perfil de los usuarios, los requisitos de precisión en la verificación, los costes relativos al desarrollo del sistemas y aspectos meramente culturales en relación con la aceptación de dicho sistema por parte del usuario.

Un factor de elevada relevancia es sin duda la precisión de dicho sistema que se puede medir atendiendo a diversos ratios tal y como se explica con detalle en el apartado relativo a las características técnicas de los sistemas biométricos.

Atendiendo a diferentes criterios de comparación, las distintas posibles técnicas biométricas pueden resultar idóneas en uno u otro entorno de uso del sistema. Así un usuario que de más importancia a la facilidad de uso y la comodidad del sistema, puede sacrificar una mayor precisión en el proceso de identificación dado que el control del

Capítulo 1 – Introducción a la biometría

proceso involucrado no ha de ser demasiado estricto. En el otro extremo, se encuentra el usuario que necesita una elevada tasa de precisión en el proceso, aunque esto repercute en una mayor complejidad del sistema. Sin lugar a dudas existen también técnicas que consiguen un compromiso entre estos dos factores, y que tal y como se ha intentado hacer ver, dependerá en gran medida de las condiciones circundantes del sistema y de los usuarios del mismo.

En la siguiente tabla [Sim01] [SCA02] [Por03], se puede observar una comparación de diferentes características propias de los sistemas biométricos:

Característica	Aceptación del usuario	Facilidad de uso	Coste	Utilidad		Estabilidad	Intrusismo	Fiabilidad
				Identificación	Verificación			
ADN	Baja	Baja	Alto	✓	✓	Alta	Muy alto	Alta
Dinámica de escritura	Alta	Alta	Bajo	✗	✓	Baja	No	Baja
Firma	Media	Alta	Bajo	✗	✓	Media	No	Baja
Geometría de la mano	Media	Alta	Alto	✗	✓	Media	No	Media
Huella dactilar	Media	Alta	Bajo	✓	✓	Alta	Bajo	Alta
Iris	Media	Media	Alto	✓	✓	Alta	No	Alta
Reconocimiento facial	Media	Media	Bajo	✗	✓	Media	No	Media
Retina	Media	Baja	Alto	✓	✓	Alta	Alto	Alta
Voz	Alta	Alta	Bajo	✗	✓	Media	No	Baja

Característica	Nivel de seguridad	Raio de error	Precisión	Errores	Falso positivo	Falso negativo
ADN	Alto	Sin datos	4	No conocidos.	5	5
Dinámica de escritura	Medio	Sin datos	1	Lesiones de mano, cansancio.	3	1
Firma	Medio	1/50	2	Cambios de escritura.	2	1
Geometría de la mano	Medio	1/500	3	Edad, lesiones varias.	4	2
Huella dactilar	Alto	1/500+	4	Sequedad, suciedad, edad.	5	5
Iris	Alto	1/131000	4	Iluminación inadecuada.	4	4
Reconocimiento facial	Medio	Sin datos	3	Pelo, gafas, edad, iluminación.	3	1
Retina	Alto	1/10 ⁶	4	Gafas, lentillas.	5	5
Voz	Medio	1/50	2	Ruidos, ronquera, resfriados...	2	1

Tabla 1-13 Tabla comparativa de los diferentes sistemas de reconocimiento biométrico

El nivel de precisión se ha medido en una escala del 1 al 4. Estimando como más precisos aquellos sistemas con mayor puntuación. Los niveles de falso positivo y falso negativo, determinan la posibilidad de que una persona pase por alguien que no es (falso positivo), y de que una persona evite ser identificado tras el proceso (falso negativo). Se ha medido la dificultad de que ocurra este hecho en una escala de 1 a 5 siendo 1 el nivel en que es relativamente fácil que ocurra, y el 5 para sistemas en los que este hecho tenga una probabilidad de ocurrencia casi nula.

1.3.6. Partes de un sistema biométrico

En los sistemas biométricos se presentan comúnmente tres componentes diferenciados:

- Un mecanismo para escanear o capturar una imagen analógica o digital de la característica en cuestión, o en el caso de la voz el sensor utilizado a tal efecto.
- El software necesario para procesar, comparar y almacenar el registro de la característica biométrica recogida.
- Un interfaz con el sistema de la aplicación para interactuar con los elementos relativos al acceso una vez confirmada o no la identidad del individuo.

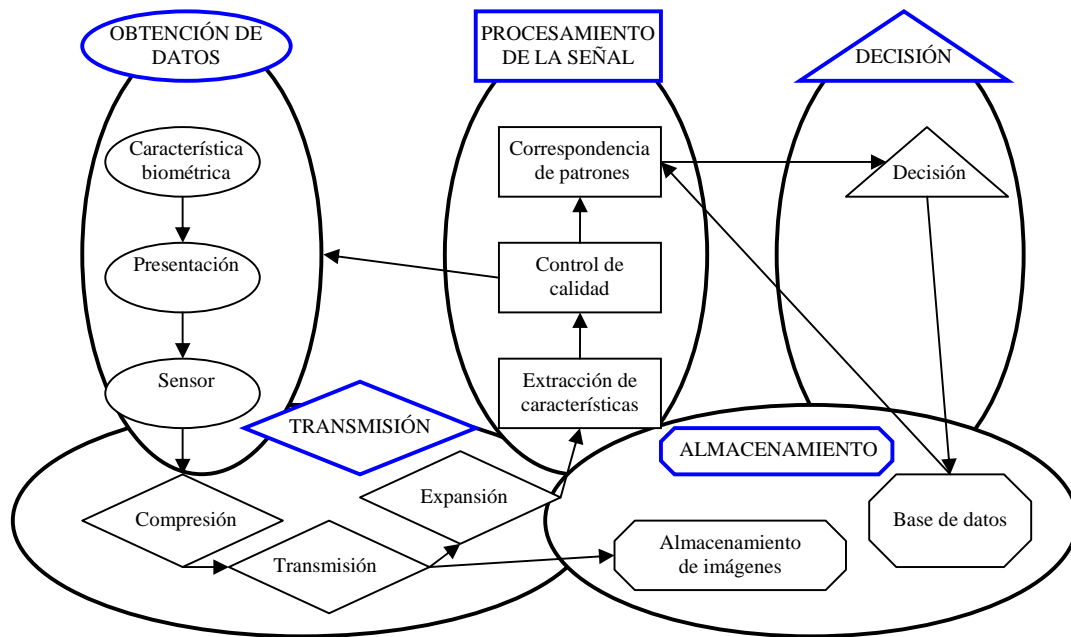


Figura 1-20 Esquema de las diferentes partes de un sistema biométrico

Resumiendo este diagrama [Jam98], podemos ver, que el sistema biométrico necesita de un sistema de captura, mediante el cual se obtiene la imagen o muestra de la característica biométrica en cuestión. Como se ha visto anteriormente dependiendo de la complejidad del rasgo y de su tratamiento se hará uso de dispositivos más o menos complejos, así por ejemplo el sistema de reconocimiento de dinámica de tecleo tan solo necesita de un simple teclado, mientras que un sistema de reconocimiento mediante el patrón venoso de la retina, necesita de cámaras adaptadas de alta resolución.

Posteriormente la información obtenida debe ser tratada para que el ordenador pueda extraer de esta los datos relevantes y necesarios para el buen funcionamiento del sistema, tras lo cual y aplicados los algoritmos necesarios, se obtiene la plantilla (*template*), mediante la cual se identifica a un usuario en particular. Esta plantilla se almacena o sirve como elemento de comparación dependiendo del proceso que este teniendo lugar en el sistema. Si es el primer caso se almacenará en una base de datos, accesible por el sistema de seguridad para posteriores comparaciones. Es en el bloque de decisión en el que se llevaran a cabo estas comparaciones, y en el que dependiendo del grado de unicidad de la

característica biométrica, deberá adoptarse una u otra medida de comparación para conseguir los resultados deseados debe prestar un especial interés con el fin de conseguir que el rasgo utilizado,

A pesar de que los diferentes sistemas biométricos llevan a cabo medidas de diferentes características de modos substancialmente diferentes, todos ellos comprenden procesos similares, los cuales pueden ser divididos en dos etapas diferentes: reclutamiento (enrollment) y autenticación o identificación.

Dependiendo de la aplicación requerida, los sistemas biométricos pueden ser usados en modo de verificación o de identificación. La verificación, también denominada autenticación, se usa para determinar que una persona realmente es quien dice ser. Por otro lado la identificación o reconocimiento se usa para establecer la identidad de una persona.

Ninguna comparación resulta perfecta en los sistemas, tanto de verificación como de identificación, ya que hay que garantizar que, tal como se explicó anteriormente, las plantillas obtenidas son en todos los casos únicas, por tanto, el sistema deberá establecer un umbral que determine la tolerancia en el grado de semejanza, entre la plantilla de prueba obtenida y la registrada en la base de datos, siendo este umbral el que determina el límite entre el acceso permitido y el no permitido. Para ello tras la comparación de ambas plantillas se lleva a cabo una medida de disimilaridad con el fin de obtener el grado de diferencia entre ambas en formato numérico que será comparado con el umbral predefinido para llevar a cabo la decisión oportuna.

1.3.6.1. Reclutamiento

Durante el proceso de inscripción o reclutamiento de personas realizado en un sistema biométrico, este es entrenado para la identificación de una persona específica. Esta persona permite la toma de una muestra de datos mediante los dispositivos habilitados a tal efecto, de modo que estos son extraídos, procesados y almacenados como referencia para futuras comparaciones. Dependiendo de la tecnología utilizada, la muestra se recoge como una imagen, una grabación o un registro de medidas relacionadas de manera dinámica. A partir de aquí el proceso desarrollado para la extracción de características y codificación de los datos obtenidos depende de los algoritmos usados, que a su vez es propio de cada fabricante. Los *templates*, en adelante plantillas, obtenidos pueden ser almacenados en bases de datos remotas, en el propio dispositivo de toma de datos e incluso y en caso de que ocupen poco espacio, en tarjetas inteligentes.

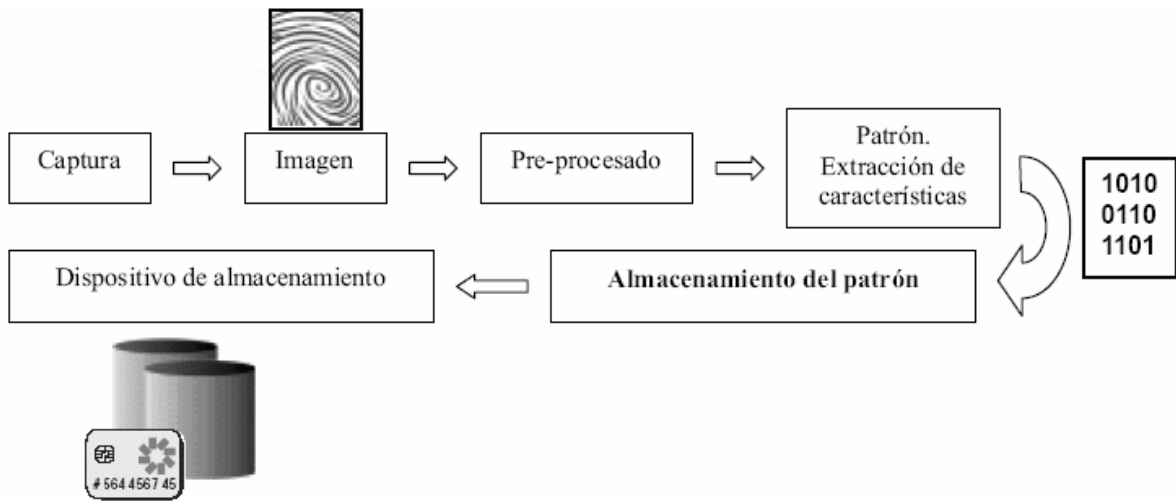


Figura 1-21 Esquema del proceso de reclutamiento [SCA02]

Los cambios de posición, en la distancia de toma, presión realizada sobre el dispositivo, entorno, y diversos otros factores influyen de manera significativa en la generación de la plantilla, haciendo que cada una de estas sea única, lo que implica que cada vez que se procesan los datos se crea una nueva plantilla. En algunos casos se precisa la toma de diferentes muestras lo que da lugar a diferentes plantillas usadas de forma simultánea. La calidad de la plantilla o plantillas obtenidas determina de forma crítica el éxito de la aplicación biométrica. Dada la no perdurabilidad de algunas características usadas en biometría, se hace necesario incluso llevar a cabo el proceso de entrenamiento en diversas ocasiones a lo largo de la vida de un mismo usuario. Esta perdurabilidad de la característica usada marcará indudablemente el rango de uso de esa característica particular.

1.3.6.2. Verificación

En los sistemas usados para la verificación o autenticación, el paso siguiente al entrenamiento es el de verificar que la persona es quien dice ser. Para llevar a cabo esto, el sistema necesita obtener del usuario un identificador en combinación con los datos relativos a la característica específica, que procesara para obtener una plantilla de prueba. Entonces el sistema hará uso del identificador para obtener la plantilla relativa al individuo comparándola con la obtenida de prueba y verificando que el individuo es quien dice ser.

Por poner un ejemplo si un usuario le dice al sistema que es el trabajador número *12345*, el sistema buscará la plantilla relacionada con ese usuario comparándola con la que obtiene en el momento del acceso.

Es por esto que el proceso de autenticación/verificación se puede tratar como una comparación 1 a 1, dado que solo se toman como referencia, la muestra tomada en el momento que el individuo intenta el acceso, y la muestra previamente almacenada relativa al individuo. Estos sistemas pueden albergar bases de datos de entre docenas y millones de plantillas, pero solo se toma para cada proceso una plantilla, siendo esta la determinada por la persona que realiza en cada caso el uso del sistema.

Un ejemplo de estos sistemas, es el que se usa en el acceso a determinados edificios por parte de una persona particular, y que necesita que el usuario se autentique en ese preciso instante.

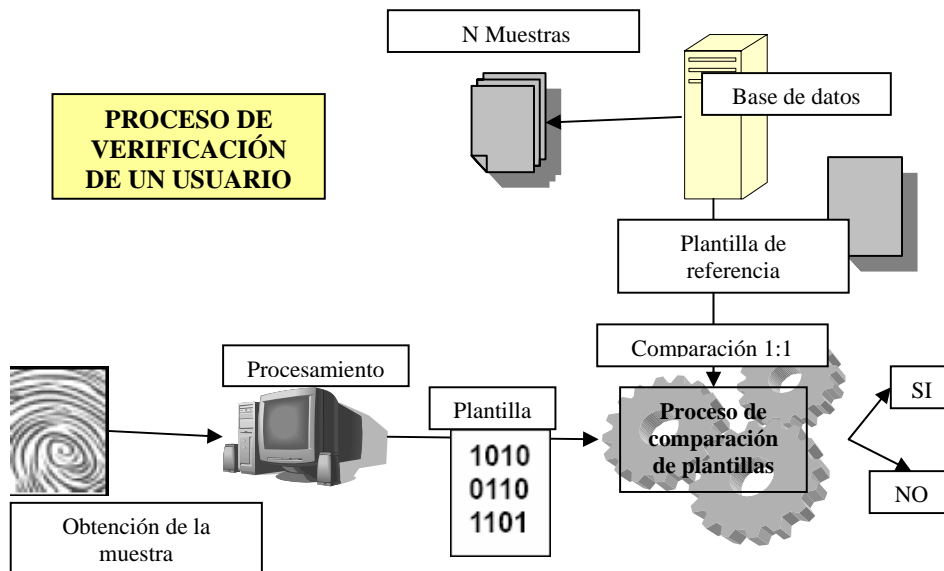


Figura 1-22 Esquema del proceso de verificación.

1.3.6.3. Identificación

Por otro lado en los sistemas de identificación, el proceso se centra en averiguar quien es el individuo que trata de obtener el acceso. En este caso no es necesario ningún identificador adicional, de modo que para obtener el acceso la plantilla obtenida en ese mismo instante es comparada con todas las plantillas relativas a los usuarios del sistema almacenadas en la base de datos del mismo. Por tanto podemos tratar los sistemas de identificación como sistemas de 1 a N comparaciones.

Podemos diferenciar los diversos sistemas de identificación en positivos y negativos. Los positivos están diseñados para asegurar la pertenencia de un individuo a un determinado sistema.

Un sistema positivo de identificación controla el acceso a un edificio o a un ordenador contrastando cualquier acceso con la base de datos que contiene la información de los usuarios permitidos, de modo que determina cuando un usuario que trata de acceder esta contenido en esta base de datos.

Por contraposición, los sistemas negativos de identificación, se usan para asegurar que una persona que accede al sistema no esta ya presente en la base de datos. Es decir si alguien trata de acceder al sistema de manera múltiple. Así el sistema detecta si la persona que intenta hacer uso del sistema esta o no ya contenida en la base de datos de usuarios. Otro ejemplo de este tipo de sistema, es aquel que se puede usar para permitir acceso a determinadas persona que no están contenidas en la base de datos, como podría darse para evitar por ejemplo el acceso a recintos deportivos a personas fichadas como de carácter agresivo, o el uso de cuentas bancarias a persona que se encuentren el listas de morosos.

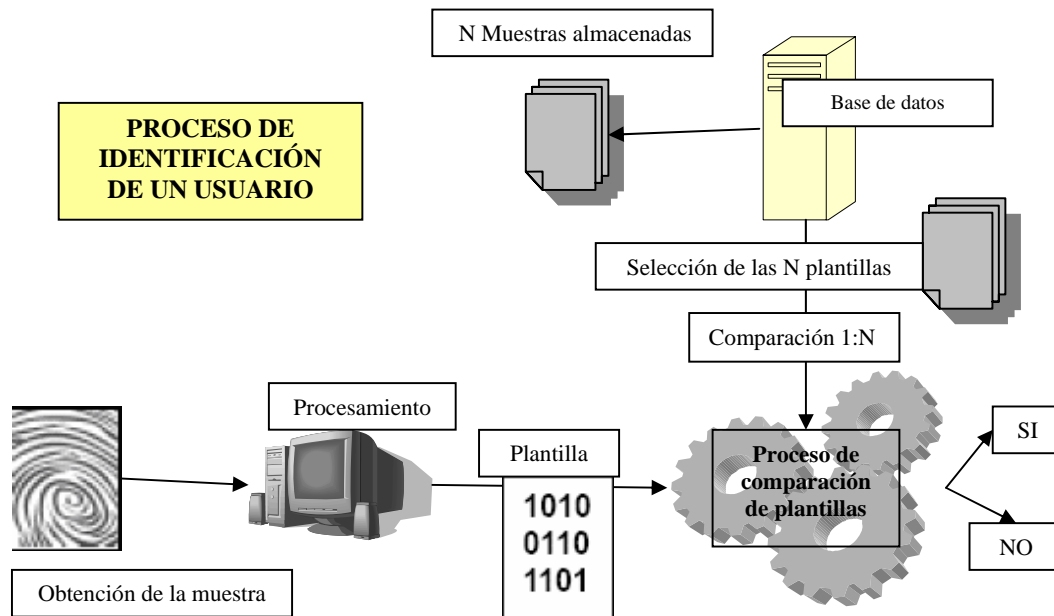


Figura 1-23 Esquema del proceso de identificación.

1.3.7. Características técnicas del sistema biométrico

La biometría es una tecnología relativamente joven, habiendo alcanzado hace poco tiempo cotas de funcionamiento que permiten su uso de manera aceptable. Es necesario analizar diversas métricas para determinar las fortalezas y debilidades de un sistema biométrico y de los algoritmos usados por cada distribuidor dentro de una misma tecnología y atendiendo a cada aplicación.

Los ratios estadísticos, que suponen una buena referencia acerca de las facultades de un cierto sistema de seguridad basado en la biometría son [NBTC]:

- FAR (False Acceptance Rate)
- FRR (False Rejection Rate)
- FTE (Failure to Enroll)
- EER (Equal Error Rate)

El ratio FAR, se define como la probabilidad de que un usuario que trata de engañar al sistema de reconocimiento acerca de su identidad, consiga engañar al sistema. Así por ejemplo, si un usuario **A** trata de acceder al sistema, usando la clave de otro usuario **B** si registrado, y tras presentar el rasgo biométrico en uso consigue acceder al sistema, entonces se ha producido una aceptación errónea de este usuario. Esto puede ocurrir debido a que el umbral de comparación de los patrones, está configurado a un nivel demasiado alto, o porque los rasgos biométricos de ambos usuarios fueran muy similares. En todo caso, ha ocurrido un error de funcionamiento óptimo del sistema.

Haciendo uso de este ejemplo, podemos decir que el ratio FAR es igual al número de veces que el usuario **A** accede al sistema haciendo uso de la identidad de **B**, dividido por el número total de veces que trata de acceder. Si describimos un sistema con un número

total de usuarios N , teniendo en cada caso un usuario cualquiera n , un $FAR(n)$ cada uno, podemos definir matemáticamente el valor del ratio total, como:

$$FAR = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N FAR(n) \quad (1.1)$$

El valor de este ratio está directamente relacionado con la fortaleza del algoritmo de comparación y con la capacidad del sistema para extraer características que consigan diferenciar de manera única a los usuarios del sistema. Cuanto mayor sea el número de usuarios del sistema, las probabilidades de una aceptación errónea de un usuario crecerán, ya que al haber más usuarios existen más posibilidades de que los rasgos biométricos de un usuario no registrado coincidan en la cantidad suficiente con uno si registrado.

En sistemas de verificación y de identificación positiva, si ocurre este hecho se permitiría el acceso a los recursos protegidos a usuarios no autorizados. En sistemas de identificación negativos, el resultado de una falsa aceptación, conllevaría que al usuario se le denegara el acceso, por ejemplo si una persona tratase de acceder al uso de recursos y erróneamente se le confundiera con un usuario de la base de datos de morosos, de manera que se le negaría el uso de dichos recursos.

El ratio FRR, se define como la probabilidad de que un usuario registrado no consiga acceder al sistema, es decir el sistema evitará el acceso a una persona con permiso. Volviendo al ejemplo de antes, si el usuario **B** intenta acceder al sistema, y una vez presentado su rasgo biométrico, el sistema no reconoce al usuario como él mismo, entonces se está produciendo un rechazo erróneo. Esto puede ocurrir, bien por que el umbral de comparación está demasiado bajo o porque rasgo presentado difiere en una medida elevada con la plantilla almacenada en el sistema.

Matemáticamente, podemos definir este ratio como el número de veces que un usuario registrado trata de acceder al sistema y se produce un rechazo, entre el número total de intentos de acceso por parte de este usuario. Otra vez si definimos el sistema de N usuarios, en el que cada usuario cualquiera n , tiene un $FRR(n)$, entonces:

$$FRR = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N FRR(n) \quad (1.2)$$

El ratio FRR es directamente proporcional a la fortaleza del algoritmo del sistema. Cuanto más preciso sea el algoritmo, es menos probable que suceda un falso rechazo. Igualmente cuanto menor sea el número de usuarios del sistema, es más fácil que los rasgos de un usuario le identifiquen de un modo más eficaz.

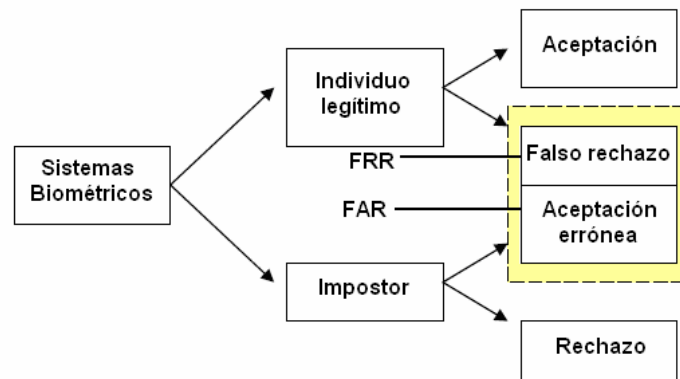


Figura 1-24 Esquema explicativo de las situaciones de error en los sistemas biométricos [Fro05].

Si el sistema biométrico fuese perfecto ambas ratios tendrían un valor nulo, sin embargo dado que la eficacia del 100% no es una cota alcanzable por ningún sistema biométrico es necesario alcanzar un compromiso entre ambos ratios para lo cual es necesario realizar diversas pruebas del sistema atendiendo a la utilización de diversos umbrales de comparación. Ambas dos probabilidades están inversamente relacionadas, por tanto es importante valorar ambas en común, en relación con su importancia relativa dentro del sistema en cuestión, disponiendo para ello niveles de riesgo aceptables, dependiendo del nivel de seguridad requerido. Por ejemplo, en sistemas de control de acceso, la seguridad perfecta consistirá en no permitir el paso a nadie, inversamente permitir el acceso a todo el mundo resultaría en no negárselo a ningún usuario. Lógicamente ninguno de los dos extremos plantea una situación razonable para conseguir un sistema biométrico útil, de modo que es necesario adquirir un compromiso entre ambos extremos.

Para la mayor parte de las aplicaciones, el riesgo que se está dispuesto a tolerar supone el factor decisivo, lo que se traduce en determinar un factor FAR aceptable, cuanto más elevado sea el riesgo vinculado a una falsa aceptación, menor deberá de ser el ratio FAR. Por ejemplo en un sistema de control de acceso a un recurso seguro, el valor del FAR deberá ser bajo lo que implica un valor elevado de FRR.

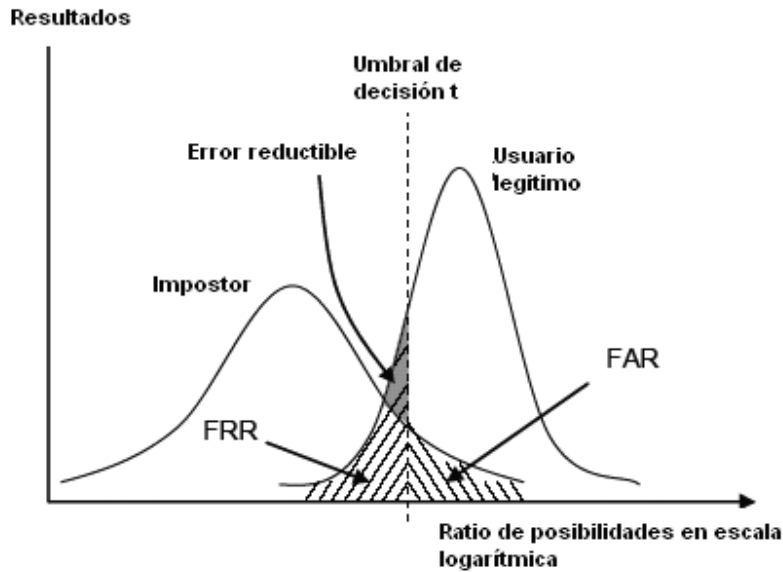


Figura 1-25 Curva del umbral de decisión [Fro05].

En esta gráfica se aprecia el valor de los ratios FAR y FRR, como el área que encierra la intersección de las curvas de probabilidad de los usuarios. Como se puede observar si rebajamos el umbral t , podremos reducir el error reductible, pero a la vez con ello, se incrementará el valor del FAR, lo que implica una disminución en el nivel de seguridad del sistema.

El tercero de los ratios, el FTE, define la probabilidad de que un usuario que trata de inscribir sus rasgos en un sistema biométrico, no lo consiga. Normalmente se define como la probabilidad de que este caso se produzca tras 3 intentos (regla del 3), ya que de otro modo es mucho más probable que ocurra si solo se observa tras un intento. De esta manera también se asume que cada intento de ingresar en el sistema es independiente, con una distribución idéntica de probabilidades, y teniendo en cuenta que se trata de un número de posibles usuarios elevado. Por ejemplo si un usuario C , forma parte de una población de 300 personas, entonces haciendo uso de la regla de 3, con un nivel de confianza del 95%, se obtiene un valor de FTER de 1%. Si el usuario es incapaz de ingresar en el sistema después de tres intentos, entonces se ha producido un FTE.

Así podemos definir de manera global el valor del FTE, como el número de ocasiones que ocurre un evento FTE, entre el número total de reclutamientos del sistema. Una vez más para un sistema de N usuarios, en el que cada usuario cualquiera n , tiene un $FTE(n)$, tenemos:

$$FTE = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N FTE(n) \quad (1.3)$$

El valor de este ratio, depende de la capacidad de cobertura que el sistema biométrico tenga sobre la población.

Si tenemos en cuenta que un sistema biométrico cualquiera, se compone básicamente de un hardware para adquirir el rasgo en cuestión, los algoritmos de creación

de la plantilla y de comparación y el usuario, el fallo producido en el proceso de reclutamiento se puede deber a fallos producidos en cualquiera de estos tres factores o a varios de ellos. Por ejemplo si el sensor de adquisición de muestras esta sucio o el usuario no lo manipula de manera correcta, por falta de precisión en la extracción de características del algoritmo o debido a taras físicas propias del usuario, como por ejemplo, las huellas dactilares de personas que trabajan intensamente con sus manos, que pueden llegar a estar tan gastados que no permitan ser capturadas, o en casos de reconocimiento de retina es muy común que un elevado porcentaje de personas no sean capaces de inscribir su registro en el sistema debido a la elevada precisión que este tipo de sistemas requieren. Gente con miembros amputados no podrían participar de sistemas de reconocimiento geométrico de manos o de huella dactilar, sin embargo este tipo de problema no se contempla dentro del ratio FTE, ya que este índice trata de valorar los problemas del sistema en personas con la capacidad usarlo.

Por último el valor de EER, que se define como el punto de intersección de las curvas de FAR y FRR. Este ratio permite comparar diferentes sistemas biométricos, ya que dado que no todos los sistemas hacen uso de los mismos valores umbral en los algoritmos de comparación, este valor supone un estadístico normalizado.

Para calcular de este modo el valor del ratio EER, se procede de la siguiente manera. Para cualquier valor de umbral entre 0 y 1, se dibuja una gráfica de los valores de FAR y FRR obtenidos. La gráfica obtenida sería de este modo [Pau03]:

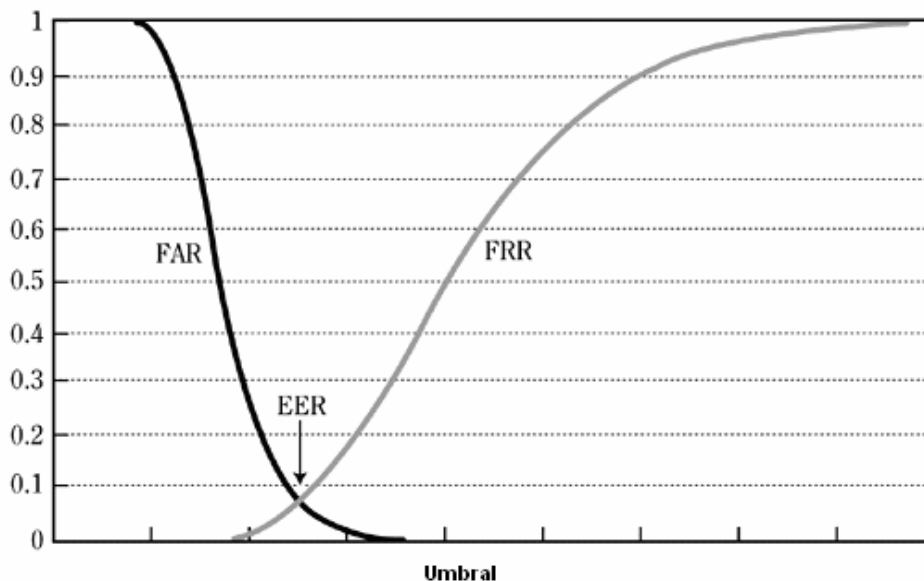


Figura 1-26 Obtención del valor EER.

Este valor también se puede calcular tras un análisis ROC (Receiver Operating Characteristic), que representa el valor del FAR frente al FRR en una escala logarítmica, para determinar la sensibilidad y precisión de un dispositivo en particular.

Para calcular la curva ROC del sistema biométrico, se enfrentan los valores de FAR y FRR en una escala logarítmica. EL valor de EER se obtiene de la intersección de esta curva con una recta de 45° extendida desde el eje de coordenadas. Esto ocurre debido a que

cuando el valor de FAR es de 0 el de FRR es de 1 y viceversa. El resultado de este proceso se puede observar en el siguiente gráfico [Pau03]:

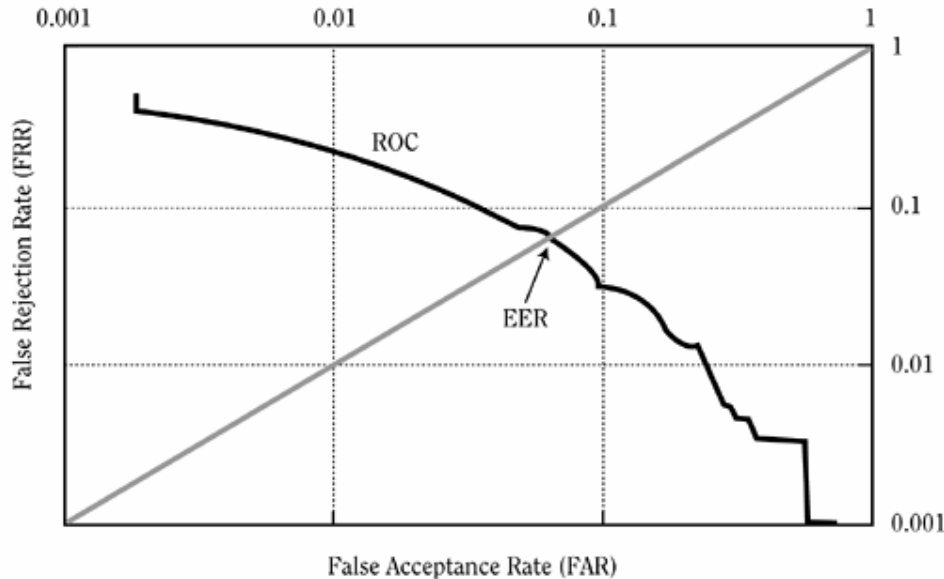


Figura 1-27 Valor EER mediante el análisis ROC.

Mediante el primer método podremos variar el valor del EER en base a la granularidad de los valores de los umbrales, mientras que en el caso de la curva ROC, el ratio no se ve afectado por este factor, ya que ambos FAR y FRR están dispuestos en la gráfica conjuntamente, por lo que el valor del EER es menos dependiente del escalado de la gráfica [2].

Para decidir que ratio es más importante a la hora de escoger un sistema biométrico, es necesario analizar aspectos como la población de uso del sistema, el uso que se le va a dar ya sea verificación o identificación, la posibilidad de otros métodos alternativos de autenticación, la importancia relativa del sistema biométrico en el control de acceso o si se hace uso del sistema por conveniencia o por facilidad de uso. Teniendo en cuenta estos factores se podrá optar por hacer uso de sistemas con niveles mayores o menores de los diferentes ratios estadísticos.

1.4. Otros aspectos de la Biometría

1.4.1. Biometría multimodal

Dado que los sistemas biométricos basados en una sola característica biométrica no siempre satisfacen los requisitos de seguridad del sistema, el desarrollo de sistemas que integran dos o más características se está convirtiendo en una tendencia generalizada. Esto supone la utilización combinada de dos tecnologías de reconocimiento biométrico, como por ejemplo combinar reconocimiento de iris y facial, aunque también puede involucrar el

análisis biométrico de una misma característica repetidas veces, como puede ser el analizar dos o más huellas dactilares, las dos manos o los dos ojos simultáneamente.

Los resultados experimentales relacionados con sistemas basados en biometría multimodal, han demostrado que estos consiguen establecer identidades de manera más fiable, en menor tiempo y pudiéndose aplicar en mayores grupos de personas.

Igualmente se han planteado posibles sistemas basados en el uso simultáneo de palabras de acceso reservadas (passwords) y rasgos biométricos, como también de claves de encriptación usadas sobre las plantillas generadas por los sistemas biométricos. Todas estas ideas comparten el objetivo común de alcanzar sistemas que garanticen una seguridad cercana al 100%.

Algunos de los problemas que plantean los sistemas biométricos unimodales son:

- **Ruido en la adquisición:** sensores defectuosos o malas condiciones de adquisición.
- **Variabilidad intra-usuario:** interacción incorrecta con el sensor, variación de las características del sensor, o variación de las características del usuario.
- **Poder discriminante:** información limitada en cada rasgo.
- **No universalidad:** fallo al registrar a determinados usuarios.
- **Ataques al sistema:** uso de rasgos artificiales.

Mediante el uso de Sistemas multimodales se pretende paliar estos defectos apoyándose igualmente en las propiedades adicionales que presentan estos sistemas como son:

- **Varias fuentes de información biométrica se combinan para mejorar el rendimiento** de un determinado sistema.
- Se **aumenta la cobertura** de la población reduciendo el fallo en el registro.
- Se **mejora la seguridad** del sistema al aumentar la dificultad de imitar o falsificar varios rasgos simultáneamente.

Sin embargo no solo se puede generar un sistema multimodal en base al uso de varias características físicas, ya que es posible desarrollar un sistema en base a otras disposiciones tal y como se observa en la siguiente figura [Fie05]:

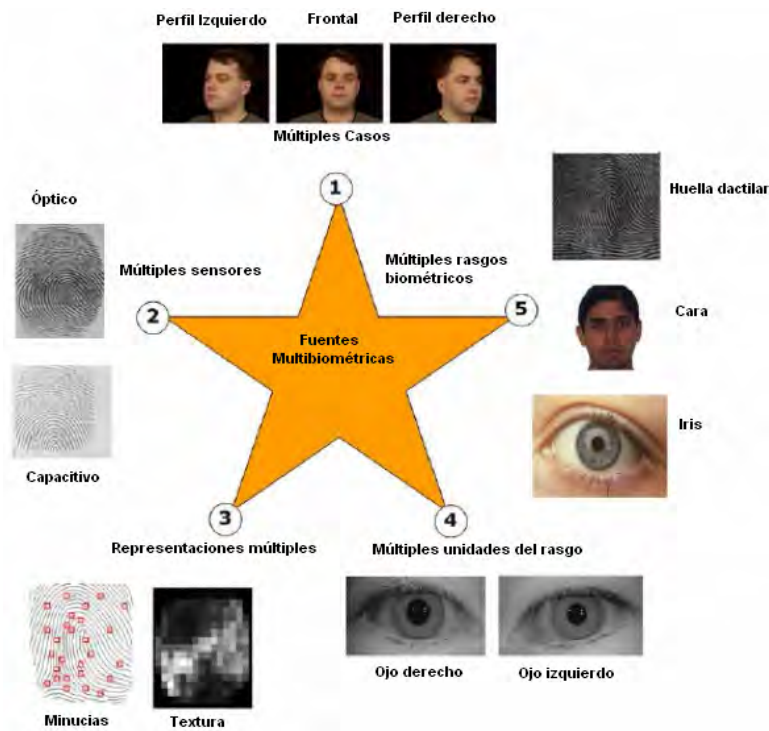


Figura 1-28 Figura representativa de los diferentes tipos de fuentes de biometría multimodal.

Igualmente es posible diseñar los sistemas basados en biometría multimodal, atendiendo al nivel de fusión de los diferentes rasgos usados. Así podemos encontrar diferentes niveles de fusión tales como:

- **Nivel de Sensor:** Por ejemplo, tres perfiles de la cara de un usuario que sirven de base para generar un rostro en 3D, a partir del cual se efectúan los desarrollos necesarios.
- **Nivel de Extracción de características:** Tras extraer las características necesarias tanto del ojo izquierdo como el derecho para generarlas imágenes de ambos, se combinan generando una sola imagen que servirá para continuar el desarrollo del sistema.
- **Nivel de Resultados:** Tras desarrollar los algoritmos del sistema sobre los rasgos se combinan los resultados dando lugar a un solo dato que se utiliza para pasar al punto de decisión del sistema.
- **Nivel de Decisión:** Se efectúa todo el desarrollo de los 2 rasgos utilizados por separado y una vez comparados los patrones con los almacenados se evalúan las decisiones y se fusiona el sistema.

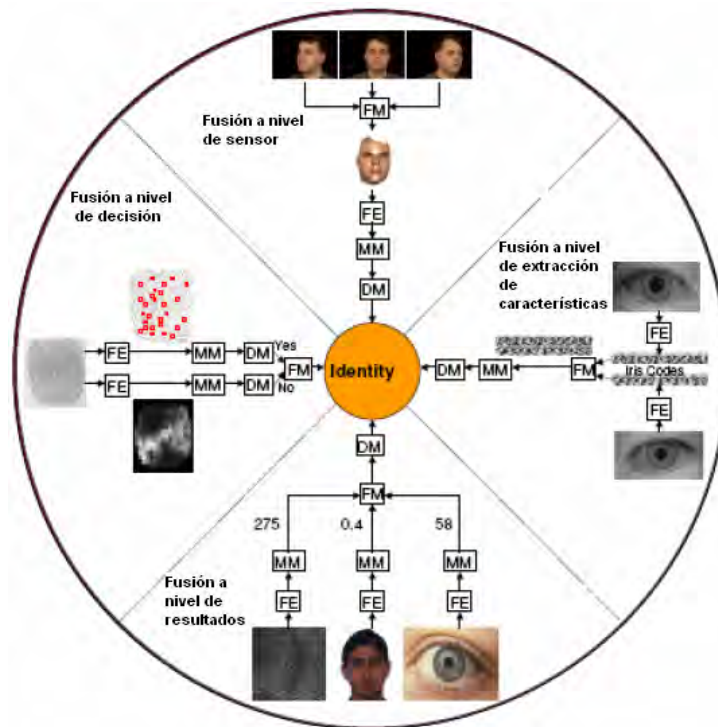


Figura 1-29 Figura representativa de los niveles de fusión de los sistemas de biometría multimodal [Fie05].

Por tanto la tecnología de los sistemas de biometría multimodal siguen en continuo avance llegándose a desarrollar sistemas basados en el estudio de lo que se puede denominar rasgos biométricos suaves, que son aquellos tales como el género, la altura, el color de los ojos los rasgos étnicos, los rasgos de la cara,..., los cuales todos combinados pueden ser útiles en sistemas de reconocimiento.

Como resumen se puede decir que como se ha visto es posible fusionar distinto tipo de información (rasgos, sensores, unidades, instancias y algoritmos) y a diferentes niveles (sensor, característica, puntuación y decisión). En el caso de fusión de rasgos, los sistemas multimodales solucionan algunos de los problemas del reconocimiento biométrico unimodal (no-universalidad, falsificación con rasgos artificiales, etc....) y conllevan algunos problemas adicionales, como pueden ser, la complejidad de proceso o diferentes problemas con la versatilidad del interfaz de captura.

1.4.2. Retos y problemas en el uso de la biometría

Mientras que las diversas tecnologías de origen biométrico están en hoy en día disponibles para su uso en una amplia variedad de aplicaciones, todavía quedan incógnitas por resolver acerca de la efectividad, tanto técnica como operacional, de estas tecnologías en aplicaciones a gran escala.

Una aproximación a la gestión de riesgos puede facilitar la elección de un sistema biométrico destinado a la seguridad, además, la decisión de usar biometría, debe considerarse en relación con los costes y beneficios de dicho sistema, y su efecto potencial

en la privacidad y comodidad del usuario. Conseguir una seguridad efectiva viene a determinar procesos similares indiferentemente del recurso protegido, ya sea sistemas de protección de datos, seguridad en edificios o en casas particulares.

Podemos basar los principios fundamentales para el uso de un sistema de seguridad en base al uso combinado de 5 pasos relativos al proceso de gestión de riesgos, que vienen a permitir la respuesta de cinco preguntas esenciales.

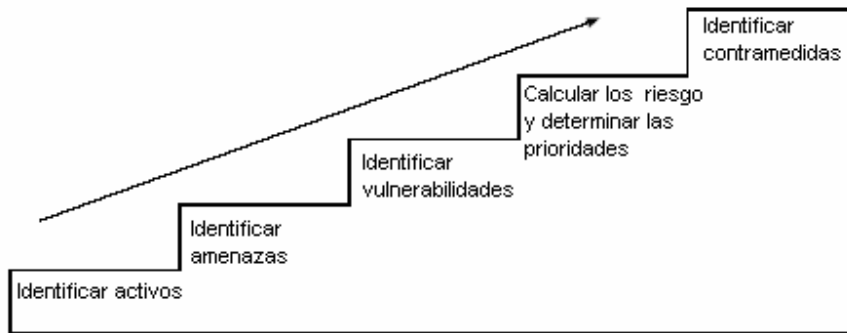


Figura 1-30 Escala de principios fundamentales para la elección de un sistema de seguridad [Kei03]

1. ¿Qué estoy protegiendo?
Debemos identificar los activos en peligro y el impacto de una pérdida potencial de los mismos.
2. ¿Quiénes son mis enemigos?
Caracterizar la amenaza sobre estos activos. Los propósitos y capacidades de los enemigos potenciales, deben ser el criterio principal para establecer el grado de amenaza a la que están sometidos los activos protegidos.
3. ¿De qué manera soy vulnerable?
Identificar y caracterizar las vulnerabilidades que permitirían que las amenazas se llevaran a cabo.
4. ¿Cuáles son mis prioridades?
Realizar una valoración del riesgo y determinar las prioridades sobre los activos protegidos. La valoración de los riesgos examina impacto de la pérdida o daño de cada activo, determinando los niveles de riesgo en función de dicho impacto, amenazas y vulnerabilidades relacionadas con los activos.
5. ¿Qué puedo hacer?
Identificar las medidas necesarias para reducir o eliminar los riesgos examinados, midiendo los beneficios de estas soluciones en comparación con sus costes y desventajas.

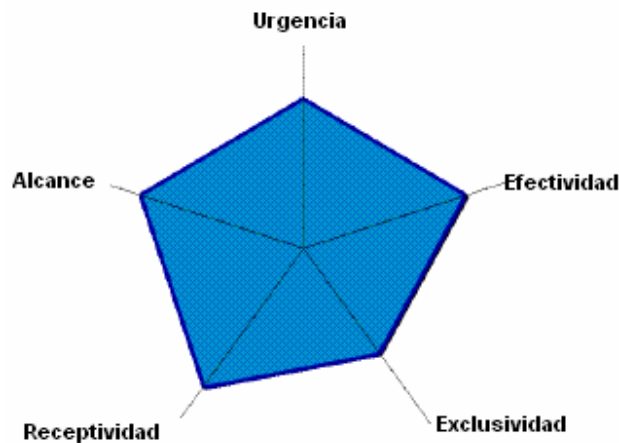


Figura 1-31 Matriz de caracterización de sistemas biométricos.

Las medidas identificadas mediante el análisis de riesgos relacionados apoyan los tres conceptos integrales de todo programa de seguridad: protección, detección y reacción.

La protección proporciona norma, procedimientos y controles técnicos para defender los activos protegidos contra los ataques. La detección permite monitorizar los fallos sufridos en los mecanismos de protección, que pueden suponer brechas de seguridad. Reacción, que requiere la implicación de los responsables del sistema de seguridad, responde a las acciones llevadas a cabo sobre las brechas detectadas, con el fin de frustrar los ataques antes de que el daño pueda ser llevado a cabo. Dado que la protección absoluta supone un reto imposible de alcanzar, ningún programa de seguridad es completo si no incluye procesos de detección y reacción.

Las tecnologías biométricas pueden componer el componente de protección de un sistema de seguridad, pero es importante darse cuenta de que el hecho de desplegar este sistema basado en tecnología biométrica por sí solo no eliminará todos los riesgos de seguridad. La seguridad efectiva incluye disponer de operarios del sistema bien entrenados y capaces de seguir de manera correcta los procedimientos y normas del sistema, ya que las debilidades en el proceso de seguridad o fallos cometidos por el personal encargado de manejar el sistema o de implementar los procesos de seguridad influyen todos disminuyendo la efectividad de la tecnología en cuestión.

Una de las etapas claves, en cuanto al hecho de involucrar a una persona que trabaja con el sistema, es la de inscripción de los usuarios en la base de datos, ya que es importante que nadie se encuentre inscrito en diversas ocasiones, ni nadie que no deba estar registrado lo consiga.

En conclusión hoy en día se dispone de tecnología de tipo biométrica capaz de ser usada en sistemas de seguridad de manera fiable para proteger todo tipo de recursos. De todos modos es importante tomar en consideración, que la seguridad efectiva se encuentra en relación directa con el compromiso de otros factores, como puede ser el humano, y no tan solo del propio trabajo del sistema por sí solo.

1.5. Aplicaciones de la biometría

Gran parte de las aplicaciones biométricas están relacionadas con la seguridad y son ampliamente utilizadas para propósitos militares y gubernamentales. Las diferentes aplicaciones que se pueden dar a la biometría podrán ser divididas en las siguientes categorías:

- *Control de inmigración y fronteras*: puestos de control fronterizos, aduanas, emisión de pasaportes y visas, casos de asilo.
- *Fuerzas de seguridad*: investigación criminal, instituciones penitenciarias, arresto domiciliario, armas inteligentes.
- *Permisos de conducción*: el objetivo buscado es que un mismo permiso no pueda ser utilizado por distintos conductores.
- *Seguridad en entornos informáticos*: acceso a ordenadores personales, acceso a redes, e-commerce, e-mail, encriptación.
- *Servicios financieros*: cajas de seguridad, transacciones bancarias.
- *Servicios sanitarios*: seguridad para mantener la privacidad de las historias médicas.
- *Sistemas de control de acceso*: tanto en edificios institucionales, corporativos y gubernamentales como en edificios residenciales (entornos domóticos e inmóticos).
- *Sistemas de pago de aseguradoras*: en América, algunos estados han conseguido ahorrar grandes cantidades de dinero empleando procedimientos de verificación biométrica. El número de individuos que ha reclamado indemnizaciones se ha visto reducido significativamente, confirmando la fiabilidad de los sistemas.
- *Sistemas de visita en prisiones*: el visitante deberá someterse a procedimientos de reconocimiento para evitar cambios de identidad con internos durante las visitas, hecho más común de lo que en un principio pueda parecer.
- *Sistemas de votación*: con este tipo de aplicaciones se busca reducir si no eliminar completamente posibles fraudes electorales motivados por ejemplo, por el múltiple ejercicio del derecho al voto de un individuo.
- *Telecomunicaciones*: teléfonos móviles, tarjetas telefónicas, teletienda.

Las aplicaciones biométricas pueden ser clasificadas siguiendo diferentes criterios, entre los cuales podemos destacar las siguientes categorías:

- Visibles o cubiertos.
- Cooperativos o no cooperativos.
- Habituales o no habituales.
- Supervisados o sin supervisión.
- Entornos estandarizados o no estandarizados.
- Sistemas abiertos o cerrados.
- Públicos o privados.

La primera de las clasificaciones indicadas permite diferenciar entre sistemas en los que el dispositivo de captura puede ser detectado o no por el usuario, es decir, si la persona que se desea reconocer sabe que está siendo partícipe de una identificación biométrica. Los sistemas de reconocimiento facial pueden ser utilizados de ambas maneras. La mayoría de

los sistemas de reconocimiento son visibles, ya que la participación activa del usuario permite obtener mejores resultados y menores tasas de error.

Al hablar de aplicaciones cooperativas y no cooperativas nos referimos al comportamiento del usuario, si éste desea o no ser identificado. Este aspecto resulta especialmente importante a la hora de planear los niveles de seguridad de los sistemas.

No existe ningún sistema biométrico perfecto. Los sistemas pueden ser utilizados de forma fraudulenta. Una forma de fortalecer la seguridad de estos dispositivos es solicitar a los usuarios una contraseña o un dispositivo adicional, como puede ser una tarjeta inteligente, en el que se almacene su patrón biométrico correspondiente, de forma que la comparación se realice únicamente con una de las muestras almacenadas en la base de datos del sistema en lugar de realizarla con todas ellas. De este modo burlar el sistema con una falsa identificación resultará más complicado.

Un sistema biométrico habitual se diferencia de otro que no lo es en el número de veces que el usuario debe utilizar el dispositivo de captura. Este dato resulta significativo, ya que la familiarización del usuario con el uso del dispositivo de captura afecta a su funcionamiento. Como ejemplo de una aplicación biométrica habitual podemos indicar las huellas dactilares, ya que su utilización se encuentra bastante extendida en la sociedad. Los sistemas habituales no lo son desde un principio, ya que las primeras semanas de funcionamiento los usuarios deben aprender la correcta utilización de los mismos.

Cuando la utilización del sistema requiere algún tipo de vigilancia, como puede ser un guardia de seguridad o un técnico especializado, hablaremos de sistemas supervisados. Un sistema será supervisado cuando los usuarios deban ser instruidos para su utilización, o cuando deba existir una persona encargada del correcto uso del dispositivo de captura para comprobar que la obtención de la imagen para conseguir las características biométricas relevantes es realizada correctamente. La fase de reclutamiento de los sistemas de reconocimiento casi siempre necesita ser supervisada, para asegurar el almacenamiento de un patrón de referencia viable.

Un entorno estandarizado resulta óptimo para los sistemas biométricos y su utilización. En entornos no estandarizados pueden aparecer una serie de variables que pueden derivar en falsos reconocimientos. Por ejemplo, en un sistema basado en el reconocimiento facial o en patrones de iris, su funcionamiento puede verse afectado por las condiciones de iluminación con las que la imagen fue tomada.

La diferenciación entre sistemas abiertos y cerrados se refiere al número de usos que se da a la base de datos en el presente y la que se dará en el futuro. Se distinguirá si la base de datos se utiliza con un único objetivo (sistema cerrado), o si la misma se utiliza en múltiples medidas de seguridad (sistema abierto). Por ejemplo, una empresa puede utilizar un sistema para controlar el acceso de sus empleados a las oficinas, y quizá use la misma base de datos para restringir el acceso a los ordenadores corporativos. Dependiendo de los niveles de seguridad esperados por la compañía, ésta podrá utilizar la misma base de datos para cubrir ambos requerimientos, o crear dos bases de datos diferentes para cada uno de los controles de acceso. La distinción entre públicos y privados indica el tipo de relación existente entre los usuarios y el administrador del sistema. Usuarios de un sistema privado serían los empleados de una empresa o los funcionarios de un ministerio. Un ejemplo de usuarios de un sistema público serían los clientes de un negocio. La actitud de los usuarios

finales frente a un dispositivo de reconocimiento, así como el trabajo del administrador del sistema, dependerá de si la aplicación es pública o privada. De nuevo la actitud del usuario ante la utilización del sistema afectará a su funcionamiento.

Debe considerarse que las características de un sistema, descritas por los fabricantes, obtenidas de las diferentes pruebas realizadas no son del todo fiables. Parte del problema es que para probar la unicidad de una característica biométrica es necesario testar el equipo con un grupo de miles de personas llegando incluso a millones, para verificar que las teorías aplicadas sobre el identificador sean ciertas. Pero por otro lado, adquirir muestras de un número tan ingente de personas en un espacio de tiempo razonable resultaría imposible. Además realizar todas las pruebas necesarias considerando todo tipo de variables dependiendo de las distintas aplicaciones para las que el sistema desea ser utilizado no sería viable, y de serlo, resultaría demasiado costoso. Normalmente las pruebas realizadas a este tipo de sistemas en laboratorios se completan para aplicaciones visibles, cooperativas, habituales, supervisadas, estandarizadas, cerradas y privadas.

Existen varias consideraciones significativas acerca de la privacidad y las libertades civiles relacionadas con el uso de instrumentos biométricos que deben ser consideradas. Algunas de estas consideraciones serían:

- Almacenamiento: ¿cómo deben ser almacenados los datos obtenidos, de forma centralizada o dispersa? ¿Cómo deben realizarse los procesos de captura de la información?
- Vulnerabilidad: ¿es la información vulnerable frente a posibles robos o usos indebidos?
- Fiabilidad: ¿qué tasas de error pueden considerarse aceptables en los procesos de reconocimiento?
- Autenticidad: ¿qué caracteriza a la información auténtica? Con el uso de los ordenadores como vehículos de las tecnologías de la información, es necesario restringir el acceso de personal no autorizado y el uso fraudulento de cajeros automáticos, teléfonos móviles, tarjetas inteligentes o redes informáticas. Los números de identificación personal y las contraseñas pueden ser fácilmente olvidados, y métodos como tarjetas de identificación, permisos de conducción o pasaportes pueden ser falsificados, robados o perdidos. Por estos motivos los sistemas de reconocimiento biométrico están cobrando especial interés.

Capítulo 2

La transformada wavelet

- 2.1. Introducción
- 2.2. Fundamentos del análisis de señales
- 2.3. La transformada wavelet
- 2.4. Análisis multirresolución
- 2.5. Aplicación de la CWT y DWT

Capítulo 2 - La transformada wavelet

2.1. Introducción

La transformada wavelet es una herramienta matemática relativamente reciente que surge, como técnica de ingeniería, para el análisis de series temporales, y que en los últimos años ha concentrado gran cantidad de estudios en gran parte debido al gran abanico de posibles aplicaciones que presenta. Algunas referencias sobre el funcionamiento y los fundamentos de esta transformada son las siguientes [Bog01] [Gra95] [Rob94] [Rob99].

Básicamente, consiste en la realización de un análisis de la señal a diferentes niveles de resolución. A diferencia de lo que ocurre con la transformada de Fourier, la transformada wavelet no realiza una descomposición de la señal en el dominio de la frecuencia, sino que analiza la señal a diferentes niveles de resolución o escalas. La principal diferencia entre ambas transformadas es el carácter local de las wavelets, lo que probablemente constituya igualmente la mayor ventaja para el análisis de señales no estacionarias, frente al análisis global realizado por la transformada de Fourier.

Este capítulo trata presenta una visión general de los conceptos necesarios para la comprensión de la “teoría wavelet”. Para ello se analizan en primer lugar los conceptos básico relacionados con el procesamiento de señales, resumiendo el concepto de transformada, y explicando además la necesidad del empleo de la Transformada de Fourier y otro tipo de transformadas en el entorno del procesamiento de señales, ámbito en el cual, es importante estudiar la transformada más adecuada en cada caso.

Dado que la transformada de Fourier presenta como no podía ser de otro modo limitaciones en el análisis de señales, el avance en este campo dio lugar al desarrollo de la transformada rápida (STFT), que también se presenta en este capítulo, para mostrar su empleo en las representaciones tiempo-frecuencia de señales no estacionarias. La STFT resulta de vital importancia de vital en la consecución de las wavelets, dado que estas aparecen como alternativa a problemas presentes en la utilización de la STFT.

2.2. Fundamentos del análisis de señales

Muchos de los fenómenos físicos pueden describirse mediante una señal en el dominio del tiempo; es decir, una de las variables es el tiempo (variable independiente) y la otra la amplitud (variable dependiente). Cuando se dibuja esta señal se obtiene una función tiempo-amplitud, que sin embargo, no corresponde siempre a la representación más idónea, ya que la información caracteriza a la señal, en muchos casos, puede observarse más claramente en el dominio de la frecuencia, es decir, mediante un espectro que muestre las frecuencias existentes en la señal. Por lo tanto, para una mejor representación de la señal se hace necesario disponer de su representación en el dominio del tiempo y de la frecuencia.

El objetivo de las transformadas matemáticas es doble:

- Simplificar las operaciones.
- Hacer más reconocible algún detalle de la función a transformar, que no fuese visible antes de llevar a cabo la transformación.

En la siguiente figura se muestran tres señales en el dominio del tiempo, para encontrar el contenido de frecuencia de cada una de estas señales se puede hacer uso de la transformada de Fourier (TF). Esta transformada parte de una representación en el dominio del tiempo de la señal y obtiene la representación en frecuencias de la misma, es decir, si se representará esto gráficamente, en un eje se mostraría la frecuencia y en el otro la amplitud. En la siguiente figura, se muestra una senoide con una frecuencia de 50 Hz, a la que se le aplica la transformada de Fourier, tras lo cual se aprecia que en todo el espectro de frecuencias solamente existe una componente de 50 Hz.

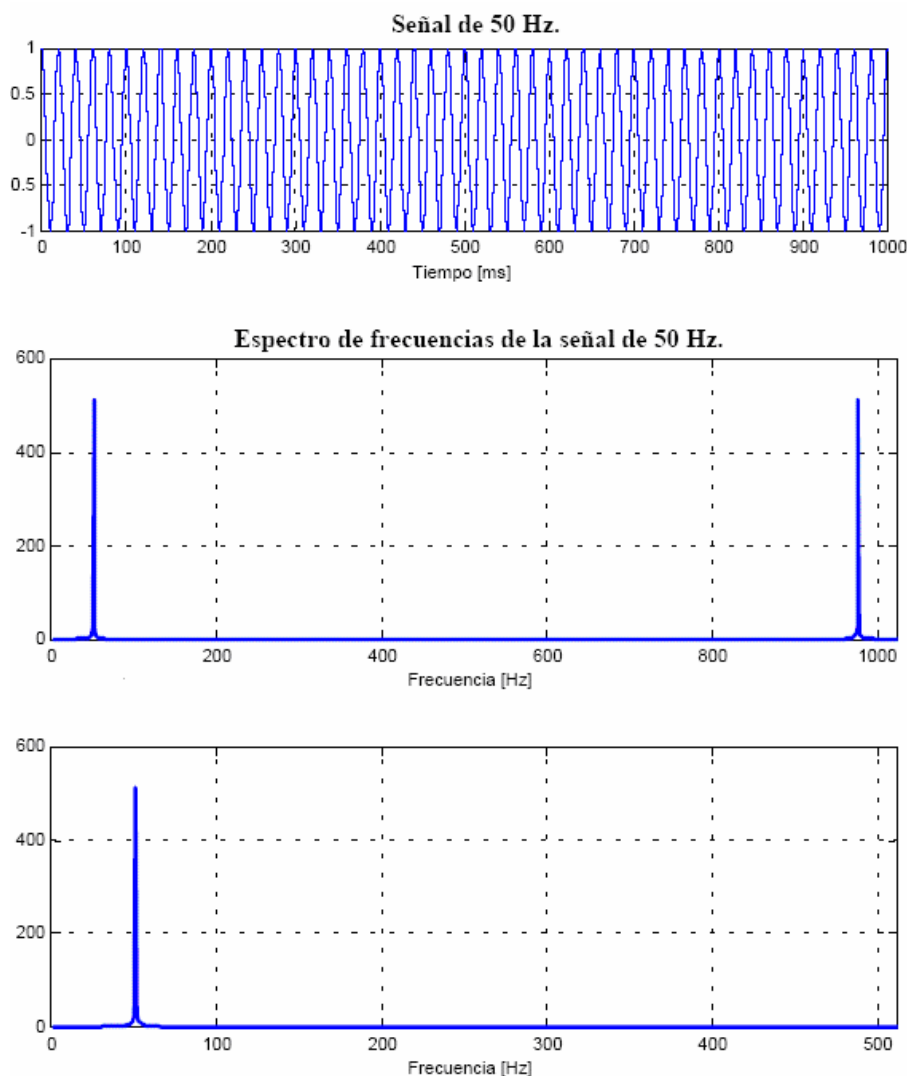


Figura 2-1 Señal de 50 Hz. y su transformada de Fourier.

Nótese que en esta figura observan dos versiones diferentes de la transformada de Fourier. En el segundo caso se muestra la primera mitad de la transformada que aparece en primer lugar, puesto que el espectro en frecuencias de una señal es simétrico respecto al semiperiodo de la señal transformada, y por lo tanto la segunda mitad es redundante.

Por otra parte, la TF entrega la información en frecuencia de la señal, pero no indica el instante de tiempo en el que aparece; esta información no es necesaria cuando la señal es estacionaria; sin embargo es de crucial importancia para señales no estacionarias.

El concepto de señal estacionaria es muy importante en el análisis de señales, denominándose así a las señales cuyo contenido de frecuencia no varía en el tiempo, por lo cual no se necesita saber en que instante de tiempo existen esas componentes de frecuencias, ya que están presentes en todo instante de tiempo. Por ejemplo, la señal siguiente:

$$x(t) = \cos(2\pi \cdot 10t) + \cos(2\pi \cdot 25t) + \cos(2\pi \cdot 50t) + \cos(2\pi \cdot 100t)$$

es una señal estacionaria cuyas frecuencias de 10, 25, 50 y 100 Hz. están presentes en cualquier instante. En la siguiente figura, se muestra la señal y su transformada de Fourier.

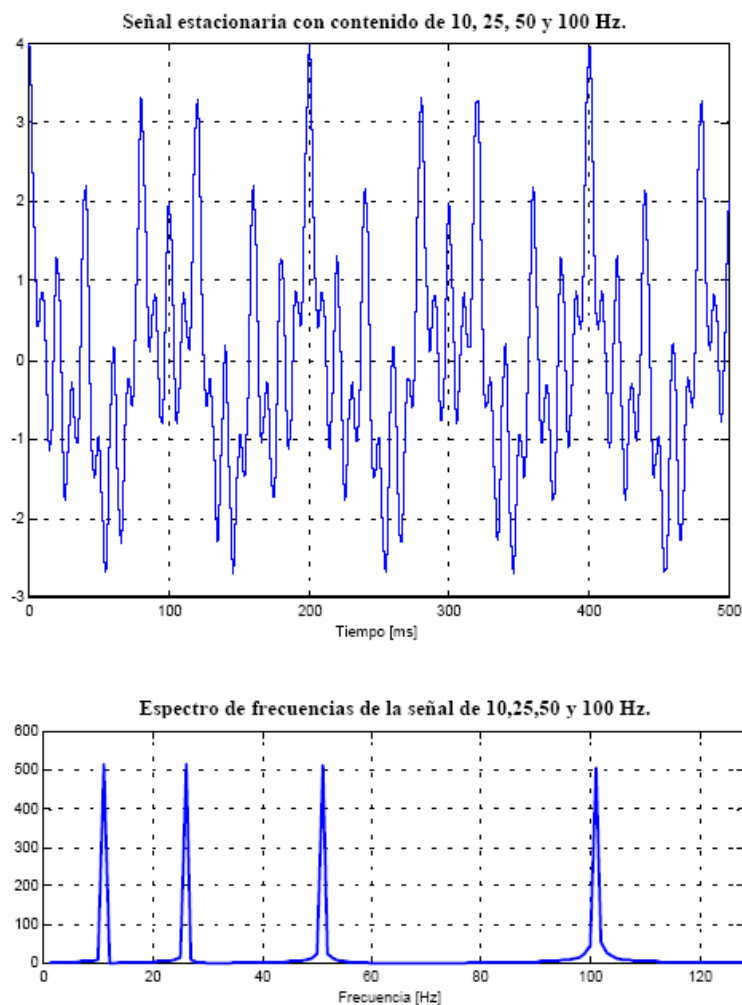


Figura 2-2 Señal estacionaria y su respectivo espectro de frecuencia.

Por otra parte la figura que se muestra a continuación, muestra una señal no estacionaria con cuatro componentes de frecuencia distintas para cuatro intervalos de tiempo diferentes. El intervalo de 0 a 300 ms. contiene una señal sinusoidal de 100 Hz., el intervalo de 300 a 600 ms. una senoide de 50 Hz., el intervalo de 600 a 800 ms., una senoide de 25 Hz., y finalmente el intervalo de 800 a 1000 ms. una senoide con una frecuencia de 10 Hz. Si se realiza la transformada de Fourier se observa que se obtienen cuatro picos correspondientes a las frecuencias presentes en la señal, 10, 25, 50 y 100 Hz., tal y como se había obtenido en el análisis de la señal estacionaria de la figura anterior.

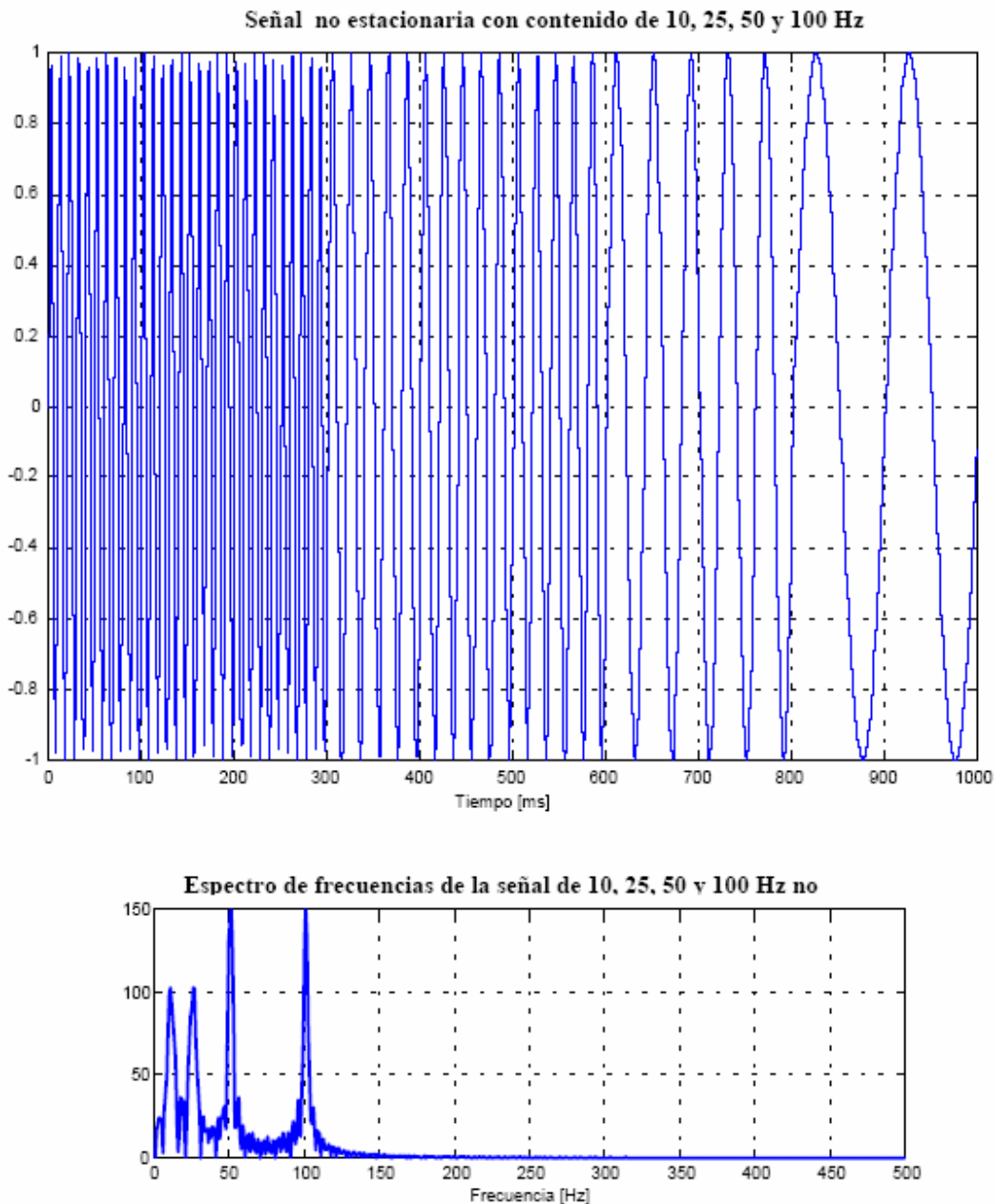


Figura 2-3 Señal no estacionaria y su respectivo espectro de frecuencias.

Si se comparan los espectros de las señales en el dominio del tiempo de la dos figuras anteriores, se puede observar que ambos muestran cuatro componentes espectrales para las mismas frecuencias: 10, 25, 50 y 100 Hz. Aparte del rizado y de la diferencia de amplitud los dos espectros son prácticamente idénticos, aunque las señales en el dominio del tiempo son completamente diferentes. Ambas señales contienen las mismas componentes de frecuencia, pero la de la primera figura contiene estas frecuencias para todo el tiempo y la de la representación de la señal no estacionaria presenta estas frecuencias en diferentes intervalos de tiempo. Esto se debe a que la TF sólo proporciona el contenido espectral de la señal y no la localización temporal de las componentes espectrales. Esta es la razón por la cual la TF no es una técnica adecuada para señales no estacionarias cuando se desea obtener una correspondencia tiempo-frecuencia.

2.2.1. Evolución histórica del análisis de señales

En la historia de las matemáticas, la transformada wavelet presenta una evolución histórica originada posiblemente en la teoría desarrollada por Joseph Fourier alrededor del año 1807 en la que se promulgaba una descomposición de las señales periódicas en senos y cosenos, y sus teorías relacionadas con el análisis en frecuencia. Fourier afirmó que cualquier función periódica $f(t)$ de periodo 2π es la suma de sus series de Fourier.


<p style="text-align: center;">Desarrollo en Series de Fourier:</p> $a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos kx + b_k \operatorname{sen} kx),$ <p style="text-align: center;">donde el cálculo de los coeficientes a_k y b_k del desarrollo se lleva a cabo atendiendo a las fórmulas:</p> $a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(x) dx$ $a_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \cos(kx) dx; \quad b_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \operatorname{sen}(kx) dx$	
--	--

Figura 2-4 Cuadro explicativo del desarrollo en serie de Fourier, y una imagen de su creador, Joseph Fourier.

Las teorías de Fourier desempeñaron un papel fundamental en la evolución de las ideas que los matemáticos tenían acerca de las funciones y del análisis de señales, y en el desarrollo de nuevas técnicas de análisis que desembocarían muchos años después en el desarrollo de las transformadas wavelet.

Después de 1807, los investigadores redirigieron sus estudios previos, del análisis de las frecuencias, al campo del análisis de las escalas. El esquema seguido consistía en construir una función, desplazarla en el tiempo un valor determinado y variar su escala, aplicando este procedimiento a una señal determinada. Posteriormente se repetían los cálculos, tomándose la función construida, desplazándola en el eje de tiempos a lo largo de la señal, y cambiando la escala de nuevo. Al realizar esto se obtiene una nueva aproximación de la señal. Este cálculo se repetiría de forma sucesiva hasta alcanzar la aproximación necesaria para completar el estudio requerido de la señal.

La primera mención de las wavelets fue realizada por H. Haar en un apéndice de su tesis. Entre otras propiedades de la wavelet de Haar se encuentra el hecho de que posee un soporte compacto, y que aporta el concepto de ondas base de corta duración.

En los años 30, varios grupos trabajando de forma independiente, investigaron la representación de funciones utilizando funciones base de escala variable. Alrededor del año 1946 Gabor introdujo el concepto del análisis tiempo-frecuencia, con lo que nació la STFT.

Ya en los años 80, Grossman y Morlet, un físico y un ingeniero, definieron el uso de las wavelets en el entorno de la física cuántica, introduciendo así por primera vez el concepto de wavelet, aplicado al análisis de señales de manera práctica.

En 1985, Stephane Mallat dio un salto cualitativo en el estudio de las wavelets en sus trabajos en el área de la señal digital. Descubrió las relaciones existentes entre los filtros denominados *QMT* (*Quadrature Mirror Filters*), los algoritmos en pirámide y las funciones base wavelet ortonormales, área a la que había contribuido ya de manera notable Meyer, gracias a su estudio acerca del origen de las wavelets ortogonales. Unos años después, fue Ingrid Daubechies quien utilizó los trabajos presentados por Mallat para construir un conjunto de funciones wavelet ortonormales, que se han convertido en una de las principales referencias en las aplicaciones actuales de las wavelets.

2.2.2. Transformada de Fourier

Aunque la TF es una de las más empleadas, especialmente en ingeniería eléctrica, no es la única, ya que hay muchas otras transformadas que se emplean, como la transformada Hilbert, la transformada rápida de Fourier (STFT), la distribución Wigner y la transformada wavelet. Cada una de estas tiene su propia área de aplicación, con ventajas y desventajas.

La transformada de Fourier expresa una función periódica como una suma de exponenciales complejas periódicas tal como se muestra en las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} X(f) &= \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot e^{-2\pi ft} dt \\ x(t) &= \int_{-\infty}^{+\infty} X(f) \cdot e^{-2\pi ft} df \end{aligned} \tag{2.1}$$

En este caso $X(f)$ corresponde a la Transformada de Fourier de la señal en el dominio del tiempo $x(t)$.

De la primera ecuación se observa que la señal es multiplicada por un término sinusoidal de frecuencia f . Si la señal tiene una alta componente de frecuencia “ f ”, entonces el producto de la señal y del término sinusoidal es relativamente grande. Sin embargo, si la señal no tiene una componente de frecuencia alta, el producto tiende a cero. Es importante destacar que la información proporcionada por la integral corresponde a todos los instantes del tiempo ya que el intervalo de integración va desde $-\infty$ a $+\infty$, esto significa que no importa el instante del tiempo en el que aparece la componente de frecuencia “ f ” porque no afectará el resultado de la integración. Por lo tanto la TF solamente es capaz de entregar

información de la existencia o no de ciertas componentes de frecuencia. Por lo tanto, para señales no estacionarias la TF no es adecuada, siendo necesario el empleo de otra técnica.

2.2.3. Transformada rápida de Fourier

Esta transformada, en adelante STFT¹, resuelve en parte el problema del análisis de señales no estacionarias. Consiste básicamente en dividir la señal en diferentes partes donde se puede asumir que la señal es estacionaria. Para este propósito la señal es multiplicada por una función ventana, cuya anchura debe ser igual a parte de la señal que se puede considerar como estacionaria. Esta función ventana inicialmente está localizada al inicio de la señal, es decir en $t = 0$. Si se asume que la anchura de la ventana es de T seg., entonces esta función se solapará con la señal para los primeros $T/2$ seg. La función ventana y la señal son entonces multiplicadas, de esta forma, solamente los primeros $T/2$ seg. de la señal están siendo escogidos. Una vez hecho esto la nueva señal es el producto de la función ventana y la señal original a la que se le aplica la TF.

El resultado de esta transformación, es la transformada de Fourier de los primeros $T/2$ seg. de la señal original, si esta parte de la señal es estacionaria quiere decir que los resultados obtenidos mostrarán la representación en frecuencia exacta de los primeros $T/2$ seg.

El próximo paso será desplazar esta ventana a una nueva localización hasta que toda la señal sea recorrida, lo que se resume en la siguiente ecuación:

$$STFT_x^w(t', f) = \int_t [x(t) \cdot w^*(t - t')] \cdot e^{-j2\pi ft} dt \quad (2.2)$$

donde $x(t)$ es la señal original y w^* viene determinada por la función ventana conjugada.

En cada instante t' y frecuencia f se calcula un nuevo coeficiente de la transformada de Fourier. La siguiente figura trata de explicar gráficamente el funcionamiento de la STFT, que hace uso de una función ventana de tipo gaussiana:

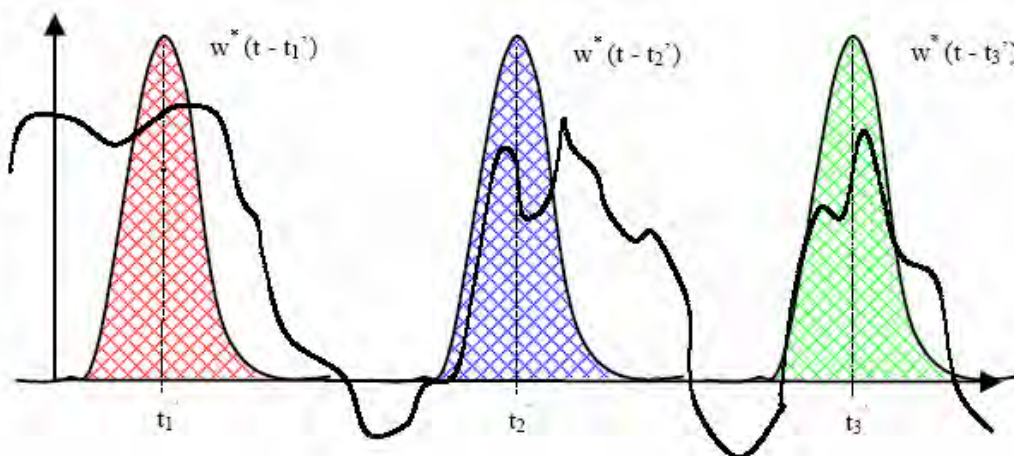


Figura 2-5 Explicación gráfica de la STFT.

¹ Siglas correspondientes al término en inglés, *Short Time Fourier Transform*.

La función “roja” muestra la ventana localizada en $t = t_1$, la azul en $t = t_2$ y la verde en $t = t_3$. Estas ventanas corresponderán a tres TF en tres tiempos distintos. Por lo tanto, se obtendrá una buena representación tiempo-frecuencia (TFR) de la señal.

Para comprender mejor este desarrollo teórico, podemos apoyarnos en el análisis de la señal no estacionaria utilizada en el apartado acerca de los conceptos básicos, que tenía componentes de frecuencia en $f=10, 25, 50$ y 100 . (Fig. 2.3)

Como se observa en la siguiente figura, la STFT de esta señal se puede representar en tres dimensiones (tiempo, frecuencia, amplitud) y se advierte que la gráfica es simétrica con respecto al punto medio del eje de la frecuencia, puesto que la STFT es la versión mediante ventanas de la TF clásica, la cual como se comentó anteriormente es siempre es simétrica respecto al semiperiodo. Lo importante es que existen cuatro picos que corresponden a las cuatro componentes de frecuencia de la señal original y además están localizados en diferentes intervalos de tiempo. Por lo tanto se cuenta con una representación tiempo-frecuencia de la señal, puesto que no sólo se conocen las componentes de frecuencia de la señal, sino que también su localización en el tiempo.

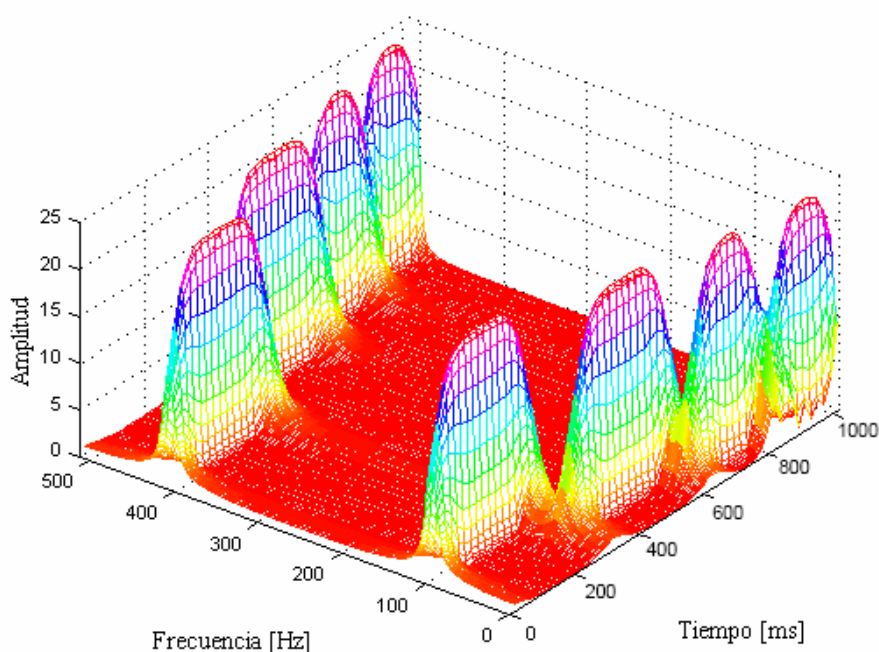


Figura 2-6 STFT de la señal no estacionaria con ventana gaussiana.

Con todo esto parecería que el problema de la representación tiempo-frecuencia de una señal estaría resuelto, sin embargo, existe un problema que tiene su origen en el principio de incertidumbre de Heisenberg; que en este caso se traduce en que no es posible conocer la representación exacta tiempo-frecuencia de una señal, sino tan sólo los intervalos de tiempo en los cuales existen determinadas bandas de frecuencia, por lo tanto, aparece un problema de resolución.

En la TF no existe problema de resolución en el dominio de la frecuencia, ya que se sabe exactamente las frecuencias que existen, de manera similar no existe problema de

resolución en el dominio del tiempo, ya que se conoce el valor de la señal para cada instante de tiempo. Lo que proporciona la perfecta resolución en frecuencia en la TF es el hecho de que la ventana empleada es la función exponencial $e^{j\omega t}$, la cual existe para todo instante de tiempo $[-\infty, +\infty]$.

En la STFT la ventana es de longitud finita, aplicándose a una parte de la señal, causando así una disminución de la resolución en frecuencia, con lo cual sólo es posible conocer una banda de frecuencias y no un valor exacto. Existe un compromiso entre buena resolución en el tiempo o buena resolución en frecuencia. Para obtener buena resolución temporal, se elige una ventana lo suficientemente estrecha en la cual la señal sea lo más estacionaria posible, cuanto más estrecha sea la ventana se obtendrá mejor resolución en el tiempo y por lo tanto una mejor representación de la estacionalidad, y peor resolución en frecuencia. Por tanto, el problema consiste en la selección de una ventana adecuada a la aplicación y al tipo de señales a usar. Así, si las componentes de frecuencia están bien separadas unas de otras en la señal original, se puede sacrificar resolución en la frecuencia y tratar de mejorar la resolución en el tiempo. En resumen:

- Ventana estrecha → Buena resolución en el tiempo y pobre resolución en el dominio de la frecuencia.
- Ventana ancha → Buena resolución en el dominio de la frecuencia y pobre resolución en el dominio del tiempo.

Para ilustrar el funcionamiento de la STFT, haremos uso de una ventana que aplicaremos a una cierta señal. Para ellos considerando una ventana gaussiana de diferentes anchuras, definida mediante la siguiente ecuación:

$$w(t) = e^{-\frac{t^2}{a}} \quad (2.3)$$

donde “a” representa la anchura de la ventana.

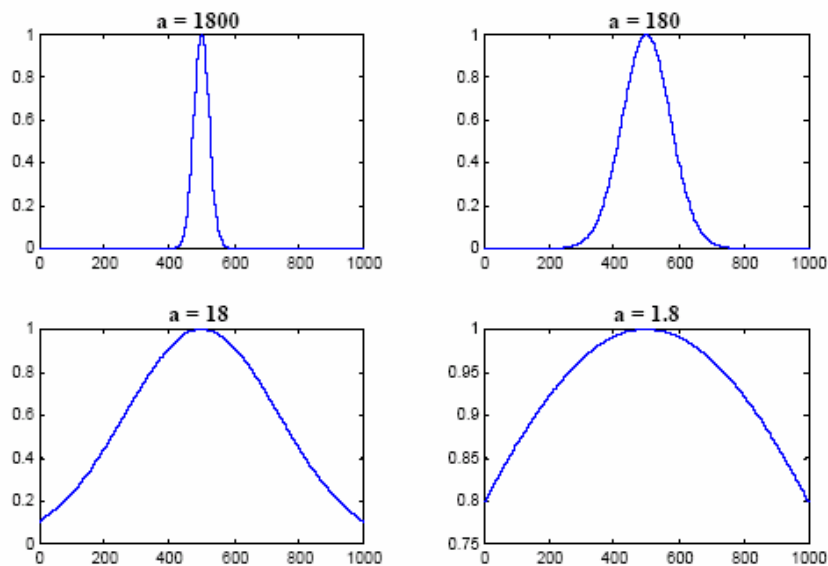


Figura 2-7 Representación de la función gaussiana para distintas anchuras.

Aplicando a la función de la señal no estacionaria (Fig. 2.3), la función ventana más estrecha ($a=1800$) para el cálculo de la STFT, se puede observar, una alta resolución en el tiempo y una pobre resolución en el dominio de la frecuencia. En esta figura se comprueba que los cuatro picos que existen están bien separados los unos de los otros en el dominio del tiempo. Además en el dominio de la frecuencia, cada pico cubre un rango de frecuencias, en lugar de un único valor de frecuencia.

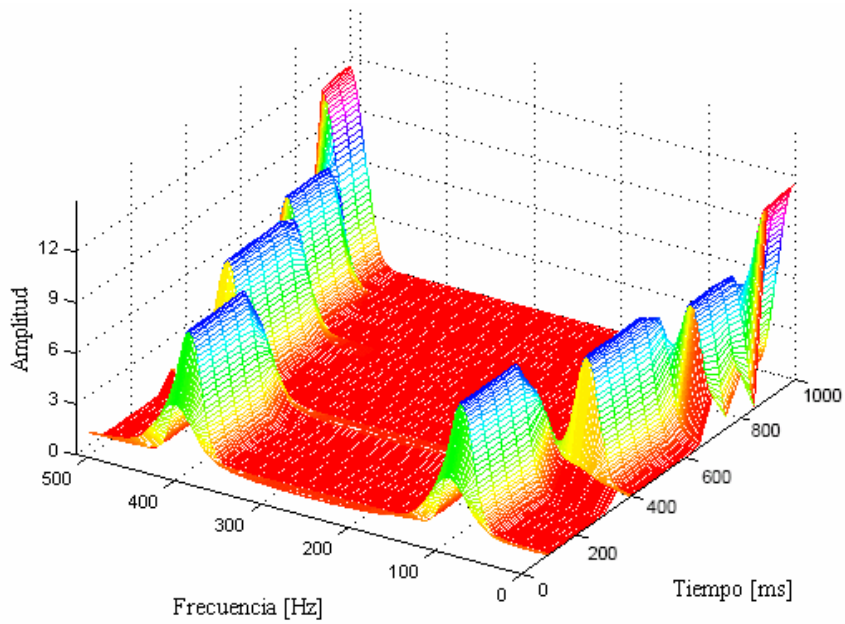


Figura 2-8 STFT con función ventana gaussiana de $a = 1800$.

En el caso de hacerse más ancha la ventana, por ejemplo para $a=18$, el resultado sería:

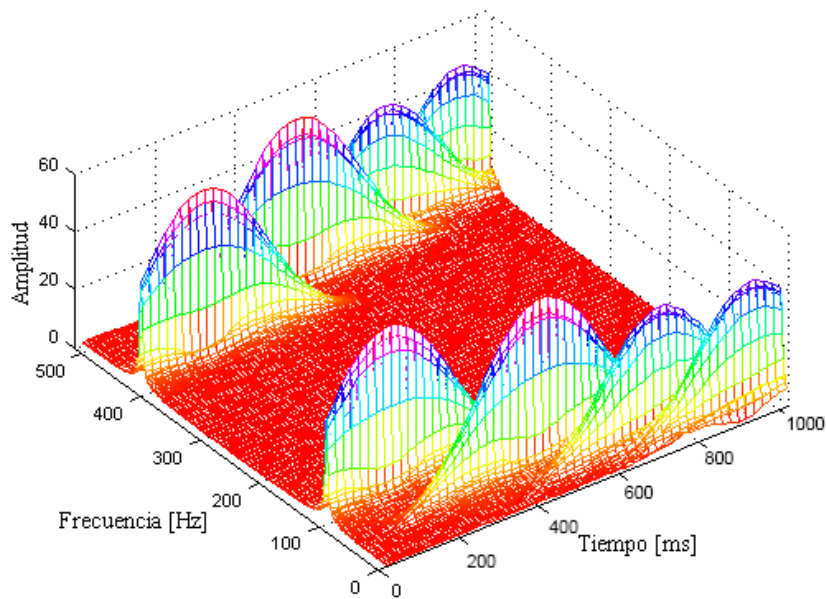


Figura 2-9 STFT con función ventana gaussiana de $a = 18$.

En esta figura se comprueba que los cuatro picos, correspondientes a cada frecuencia presente en la señal, no están tan bien separados en el dominio del tiempo como sucedía en el caso anterior, sin embargo, la resolución en el dominio del tiempo ha mejorado, pudiéndose observar claramente la separación existente entre las diferentes frecuencias en el eje correspondiente a la frecuencia.

El caso correspondiente para la ventana gaussiana de mayor anchura se muestra en la figura que viene a continuación. El resultado no debería sorprender, ya que como se suponía se detecta una resolución en el dominio temporal muy mala, sin embargo, cada pico cubre un rango de frecuencias muy estrecho.

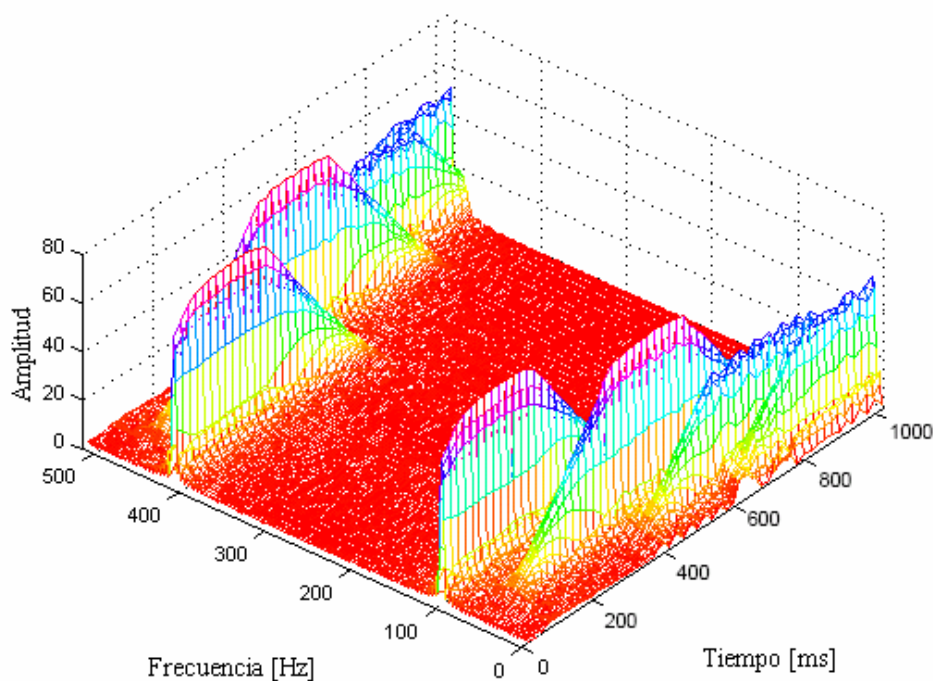


Figura 2-10 STFT con función ventana gaussiana de $a = 1.8$.

Estos ejemplos demuestran de manera implícita el problema de la resolución que existe con el uso de la STFT. Cuando se desea aplicar esta transformada se debe decidir la clase y características de la ventana a emplear, atendiendo a aspectos relacionados con la señal a analizar y la aplicación en cuestión.

El problema, por lo tanto, radica en una elección adecuada de la función ventana, que es única para todo el análisis. Si las componentes en frecuencia de la señal están bien separadas entre sí, entonces, se podría sacrificar algo de la resolución en frecuencia y preferir una buena resolución temporal, ya que las componentes espectrales ya están bien separadas.

Por lo tanto, se debe encontrar una transformada que dando información tiempo-frecuencia de la señal solucione el problema de la resolución implícito en la STFT. La transformada wavelet (WT) resuelve este problema, como se verá en los siguientes capítulos.

2.3. La transformada wavelet

2.3.1. Introducción

El problema de la resolución tiempo-frecuencia aparece sea cual sea la transformada que se emplee, sin embargo, es posible analizar cualquier señal empleando una técnica alternativa llamada análisis multirresolución (MRA). El MRA, que se abordará con más detalle en el siguiente capítulo, analiza la señal para diferentes frecuencias con diferentes resoluciones. Cada componente espectral, por lo tanto, no se resuelve de idéntica forma como en el caso de la STFT. Este análisis es por tanto la idea básica que subyace detrás de la transformada wavelet. El análisis multirresolución está diseñado para proporcionar una buena resolución temporal y pobre resolución en frecuencia para las altas frecuencias y buena resolución en frecuencia y baja en tiempo para bajas frecuencias. Este tratamiento adquiere un sentido especial cuando las señales a manejar tienen componentes de alta frecuencia de corta duración y componentes de baja frecuencia de larga duración.

En este capítulo se presenta la Transformada wavelet (WT)², explicando cómo esta transformada resuelve los problemas inherentes a la STFT, y dando una descripción de los aspectos básicos, tipos y forma de trabajo, así como una introducción de los principios matemáticos que soportan a esta transformada.

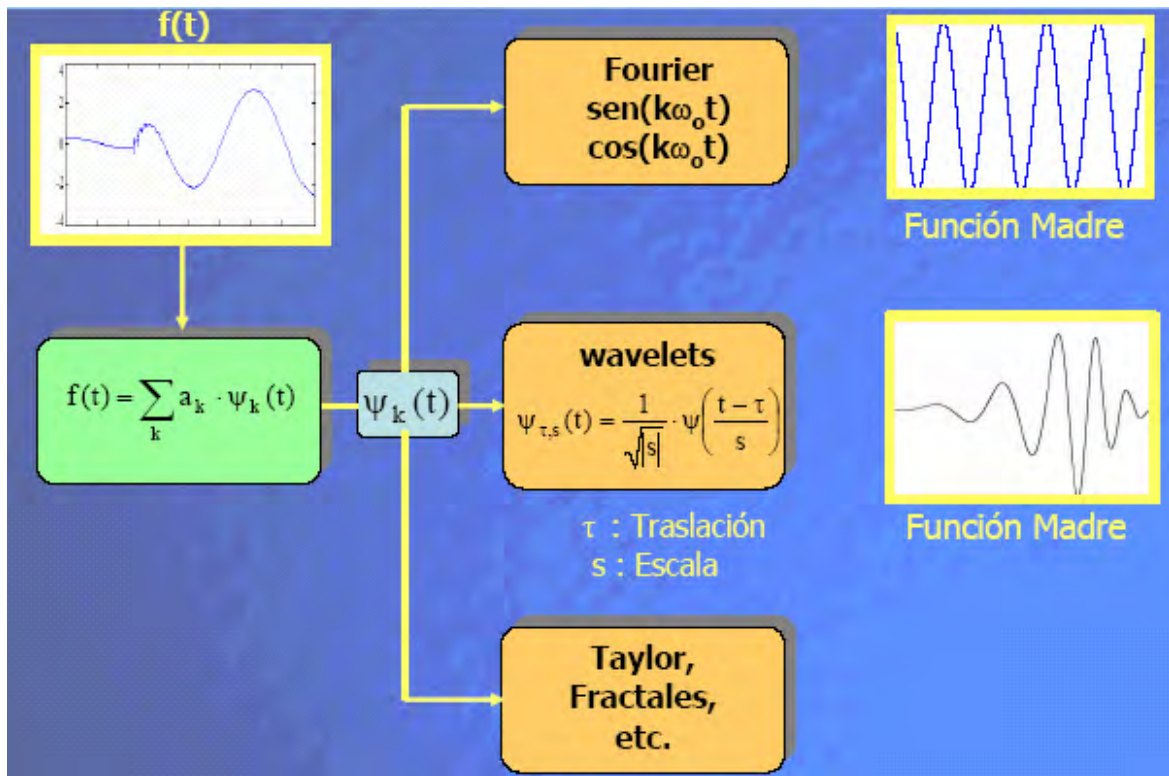


Figura 2-11 Imagen comparativa del funcionamiento de las distintas transformadas.

² Siglas del término *Wavelet Transform*.

2.3.2. Aspectos básicos de la transformada wavelet

Esta técnica se desarrolló, como se ha comentado antes, como alternativa para superar los problemas de resolución de la STFT, haciendo posible una buena representación de una señal tanto en tiempo como en frecuencia de forma simultánea, con lo que se puede determinar el intervalo de tiempo en el cual aparecen determinadas componentes espectrales.

2.3.2.1. Proceso de la transformada

Básicamente, lo que hace la transformada, es filtrar una señal en el dominio del tiempo mediante filtros paso bajo y paso alto que eliminan ciertas componentes de alta o baja frecuencia de la señal, repitiendo el procedimiento para las señales resultantes del proceso de filtrado anterior.

Por ejemplo, supongamos que hay una señal con frecuencias de hasta 1000 Hz, en la primera etapa de filtrado la señal se divide en dos haciéndola pasar a través de un filtro paso bajo y un filtro paso alto con lo cual se obtienen una señal que corresponde a las frecuencias entre 0 y 500 Hz. (paso bajo) y otra que corresponde a las frecuencias entre 500-1000 Hz. (paso alto). Posteriormente, se toma cualquiera de las dos versiones (comúnmente la parte del filtro paso bajo) o ambas y se hace nuevamente la misma división. Esta operación se denomina descomposición.

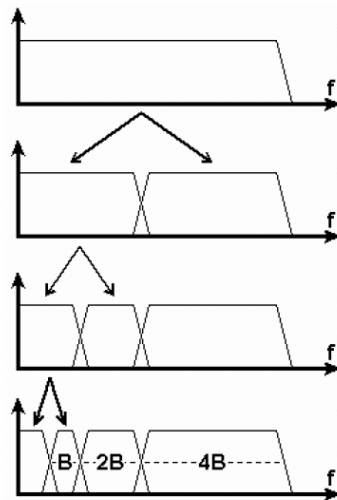


Figura 2-12 Codificación en sub-bandas.

De esta forma y suponiendo que se ha tomado la parte de la señal correspondiente al filtro paso bajo se tendrían tres conjuntos de datos, cada uno de los cuales corresponde a la misma señal pero a distintas frecuencias: 0-250 Hz., 250-500 Hz. y 500-1000 Hz. A continuación se vuelve a tomar la señal correspondiente a la parte del filtrado de paso bajo haciéndola pasar nuevamente por los filtros paso bajo y paso alto, de esta forma ya se tendrían 4 conjuntos de señales correspondientes a las frecuencias 0-125 Hz., 125- 250 Hz., 250-500 Hz. y 500-1000Hz. El proceso continúa hasta que la señal se ha descompuesto en un cierto número de niveles predefinidos, como se observa en la siguiente figura.

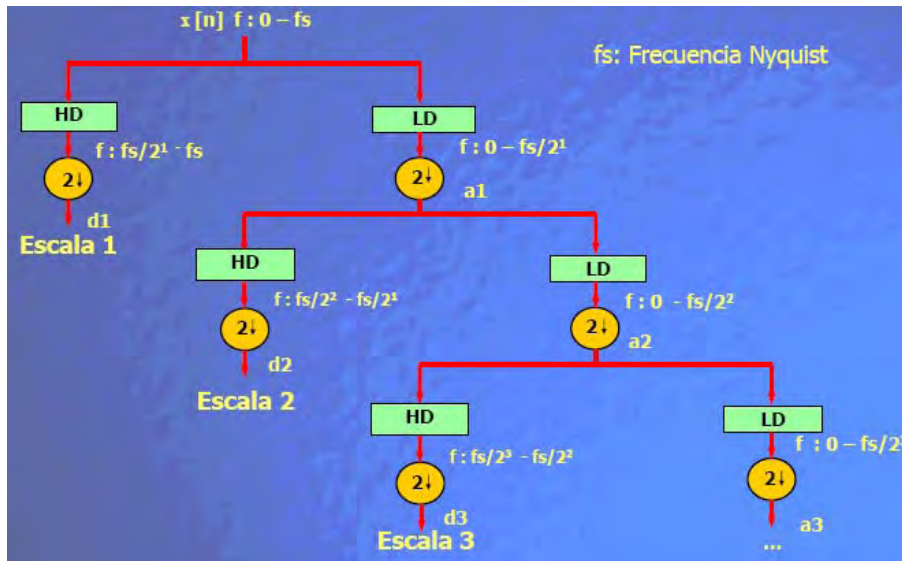


Figura 2-13 Explicación gráfica del proceso de descomposición descrito.

Una vez finalizado este proceso, se cuenta con un grupo de señales que representan la misma señal, pero correspondientes a diferentes bandas de frecuencia. Para cada una de estas bandas se conocen sus respectivas señales, si se juntan todas y se presentan en una gráfica tridimensional se tendría tiempo en un eje, frecuencia en el segundo y amplitud en el tercer eje.

Con la WT las altas frecuencias tienen mejor resolución en el tiempo mientras que las bajas frecuencias tienen mejor resolución en el dominio de la frecuencia. Esto significa que una determinada componente de alta frecuencia puede localizarse mejor en el tiempo, que una componente de baja frecuencia. Por el contrario, una componente de baja frecuencia puede localizarse mejor en frecuencia comparado con una componente de alta frecuencia. En la siguiente figura, puede observarse que a altas frecuencias (fila superior) la cantidad de puntos es mayor para un mismo intervalo de tiempo (ΔT); es decir, las altas frecuencias tienen una mejor resolución en el tiempo. Sin embargo, a bajas frecuencias para el mismo intervalo de tiempo existen menos puntos que caracterizan la señal, por lo tanto las frecuencias bajas no tienen buena resolución en el tiempo.

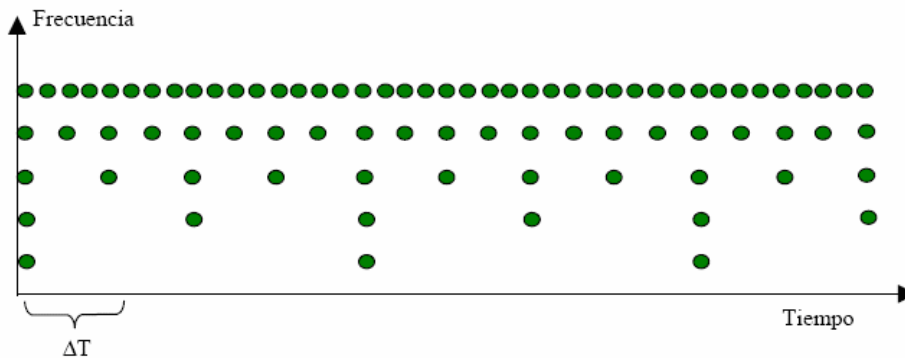


Figura 2-14 Interpretación gráfica de la resolución en el tiempo y la frecuencia.

En el caso de una señal discretizada en el tiempo, la resolución en el tiempo de la señal puede interpretarse de manera similar a lo comentado en el anterior caso, pero ahora la información en frecuencia tiene diferentes resoluciones en cada escalón de descomposición de la escala de frecuencias, tal como puede interpretarse al analizar la siguiente figura.

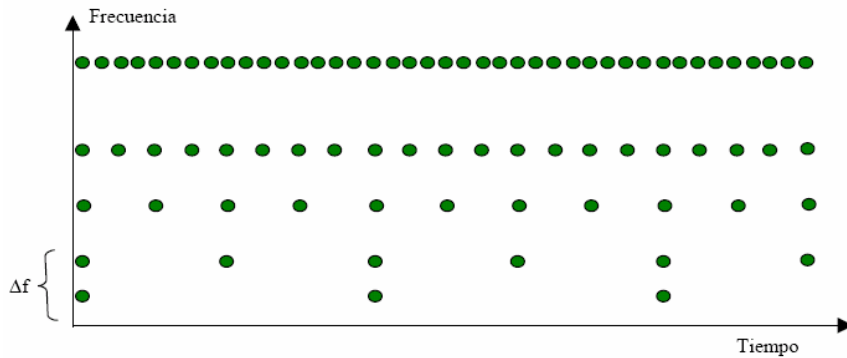


Figura 2-15 Análisis de la resolución en el tiempo y la frecuencia de una señal discreta.

Así se observa que para una variación de frecuencia (Δf) dada, la resolución en el tiempo es mejor para las bajas frecuencias que para las altas frecuencias, puesto que la separación entre cada escalón de descomposición aumenta a medida que se incrementa la frecuencia.

2.3.2.2. La transformada wavelet continua. Wavelet madre

Como ya se ha visto antes, el análisis wavelet se realiza de manera similar al análisis STFT, en el sentido que la señal es multiplicada por una función (función wavelet), y la transformada se calcula separadamente para distintos segmentos de la señal en el dominio del tiempo. Sin embargo, existen dos diferencias principales entre la STFT y la CWT:

- No se evalúa la transformada de Fourier de las señales ventana y por lo tanto aparece un único pico que corresponde a una senoide.
- El ancho de la ventana varía a medida que se evalúa la transformada para cada componente del espectro, esto es probablemente la característica más significativa de la transformada wavelet.

La transformada wavelet continua se define como sigue:

$$C(\tau, s) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi_{\tau, s}^*(t) dt \quad \text{donde} \quad \psi_{\tau, s}(t) = \frac{1}{\sqrt{|s|}} \psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right) \quad (2.4)$$

Como se observa en la ecuación anterior, la señal transformada es una función de dos variables, τ y s , denominadas parámetros de traslación y escala respectivamente. $\psi_{\tau, s}(t)$ es la función de transformación a la que se denomina “wavelet madre”, cuyo nombre deriva de dos importantes propiedades del análisis wavelet:

- El término *wavelet* significa “onda pequeña”. El término pequeño se refiere al hecho que esta función es de longitud finita (compactamente soportada) y el término onda se refiere a la condición que esta función es de naturaleza oscilatoria.
- El término *madre* determina que las funciones con diferentes regiones de actuación que se usan en el proceso de transformación provienen de una función principal. Es decir, mediante la wavelet madre se generan las otras funciones ventanas.

En la siguiente figura se pueden observar, algunas wavelets madre usadas en la práctica, definidas según un eje de tiempo continuo. El número que acompaña al nombre representativo de cada función, indica la cantidad de momentos nulos.

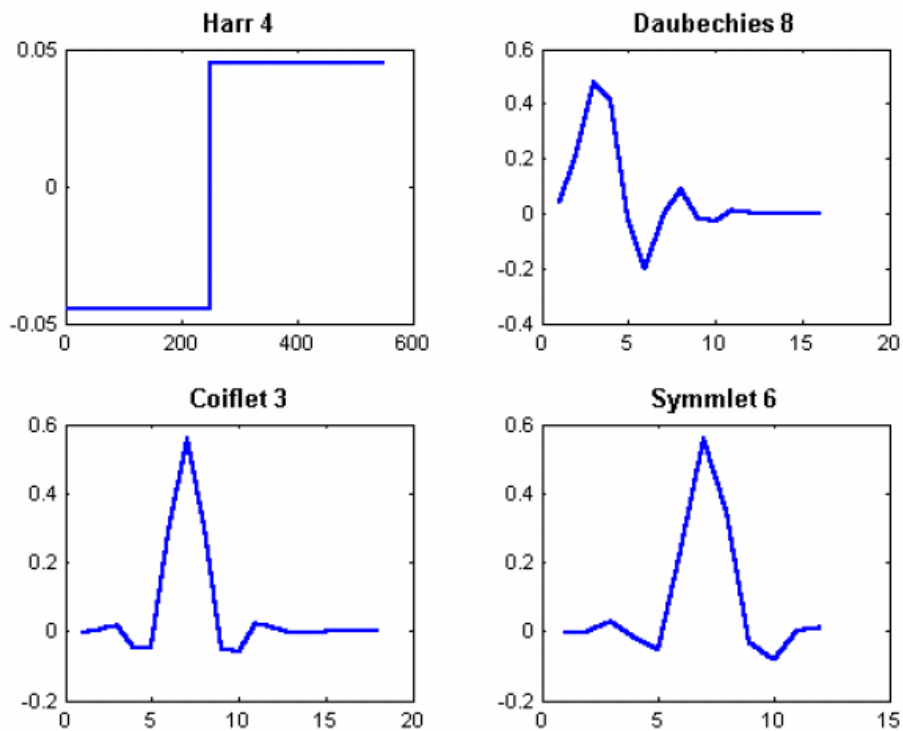


Figura 2-16 Ejemplos de wavelet madre.

2.3.2.3. Operaciones de traslación y escalado

Como en los demás tipos de transformadas, podemos definir para la WT, las transformaciones básicas de traslación y escalado, y la ejecución conjunta de ambas, tal y como queda detallado en la siguiente tabla.

Traslación	Cambio de escala	Traslación y cambio de escala
$\psi(t-b)$	$\frac{1}{\sqrt{a}}\psi\left(\frac{t}{a}\right)$	$\frac{1}{\sqrt{a}}\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$

Tabla 2-1 Resumen de las transformaciones de traslación y escalado

Traslación

El término traslación se usa con el mismo sentido que fue usado en la STFT y está relacionado con la localización de la ventana a medida que ésta se desplaza a través de la señal. Obviamente, este término corresponde a la información del tiempo en el dominio transformado.

Escala

Sin embargo, en la transformada wavelet no se tiene un parámetro que sea la frecuencia como se tenía antes en el caso de la STFT. En este caso, se tiene un parámetro de “escala” el que se define como: $frecuencia = \frac{1}{Escala}$.

En el análisis wavelet el parámetro escala es análogo con el parámetro escala utilizado en los mapas. Tal como en este último caso, las altas escalas corresponden a una visión global no detallada de la señal, y las bajas escalas corresponden a una vista detallada. De igual manera, en términos de frecuencia, las bajas frecuencias (altas escalas) corresponden a una información global de la señal que comúnmente abarca toda la señal, mientras que las altas frecuencias (escalas bajas) corresponden a una información detallada de una característica oculta en la señal que comúnmente dura un tiempo relativamente pequeño.

Conjunción traslación y escala

En señales que corresponden a fenómenos o aplicaciones reales las escalas bajas (altas frecuencias) no tiene una larga duración en la señal, sino que aparecen de tiempo en tiempo como picos o “spikes”, mientras que las altas escalas (bajas frecuencias) comúnmente abracan toda la duración de la señal. El escalamiento como operación matemática produce dilatación o compresión de una señal, así, las altas escalas corresponderán a señales dilatadas y las escalas pequeñas corresponden a señales comprimidas. Para ilustrar este dato podemos observar el siguiente gráfico en el que se muestran señales coseno a distintas escalas.

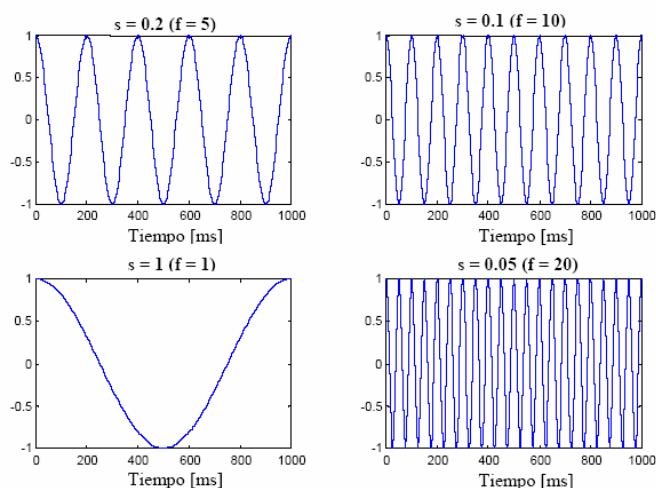


Figura 2-17 Ejemplo de la señal coseno a distintas escalas.

Todas las señales mostradas en la figura nacen de la misma señal coseno, es decir son versiones comprimidas o dilatadas de la misma función.

En términos de funciones matemáticas, si $f(t)$ es una función dada, $f(st)$ corresponderá a una versión contraída (comprimida) de $f(t)$ si $s > 1$ y a una versión expandida (dilatada) de $f(t)$ si $s < 1$.

Sin embargo, en la definición de la transformada wavelet, el término de escalamiento aparece en el denominador y por lo tanto la situación es opuesta a la descrita en el párrafo anterior; es decir escalas $s > 1$ dilatan la señal mientras que escalas $s < 1$ comprimen la señal, de este modo la relación escala-frecuencia es inversa, por lo que las escalas menores corresponden a altas frecuencias y las escalas mayores corresponden a bajas frecuencias.

Debido a que la transformada wavelet (WT) incluye información relacionada con el tiempo y la frecuencia, la representación gráfica de esta transformada se realiza en un plano denominado plano tiempo-escala, definido por las 2 operaciones básicas de escalado y traslación. En la siguiente figura queda reflejado este factor.

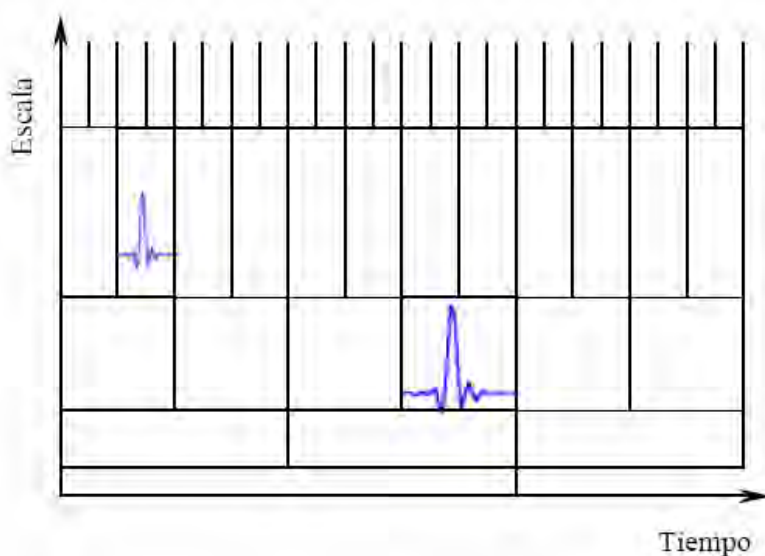


Figura 2-18 Plano tiempo-escala.

En caso de tener buena resolución temporal, la wavelet madre, representada en el eje inferior, se estrecha, con lo que se pierde resolución en la frecuencia. Si la wavelet madre se ensancha, se pierde resolución en el tiempo, pero se gana en la frecuencia. Así, variando la anchura y desplazándola por el eje temporal, se calcularía el valor correspondiente a cada celda. Así, cada celda representa un valor de la WT en dicho plano.

Cabe destacar el hecho que estas celdas tienen un área no nula, lo cual indica que no es posible conocer el valor de un punto particular. Sin tener en cuenta las dimensiones de las celdas, sus áreas, tanto en la STFT como en la WT, son las mismas, y están determinadas por el principio de incertidumbre de Heisenberg. En concreto, el área de cada

celda se fija mediante la función ventana en la STFT o por la wavelet madre en la WT, con lo que diferentes ventanas o funciones madre dan lugar a diferentes áreas. Sin embargo, todas las áreas tienen una cota inferior dada por $\pi/4$.

Si llevamos estas tipo de representación al marco de la STFT, debe recordarse que en este caso, la resolución en el tiempo y en la frecuencia quedan determinadas por el ancho de la función ventana, la cual se selecciona una sola vez durante todo el análisis, por lo que la resolución tanto en el tiempo como en la frecuencia permanecen constantes, en otras palabras la representación de las particiones en el plano tiempo-frecuencia para el caso de la STFT se haría mediante divisiones cuadradas.

Independientemente de las dimensiones de cada división, las superficies de éstas tanto para el caso de la STFT como para el caso de la WT son iguales, y vienen determinadas por el principio de incertidumbre de Heisenberg. Es decir, el área de cada división es fija para cada función ventana (STFT) o para cada wavelet madre (CWT), aun cuando diferentes ventanas o wavelet madres pueden representar diferentes áreas; el área de estas divisiones no se puede reducir todo lo que se desee debido al principio de incertidumbre de Heisenberg, pero para una wavelet madre dada el tamaño de las divisiones se puede variar la función, manteniendo constante la superficie, de hecho esto es exactamente lo que hace la transformada wavelet.

2.3.3. Tipos de transformadas wavelet

Existen tres tipos de transformada *wavelet*: continua (CWT), semidiscreta (SWT) y discreta (DWT). La diferencia entre ellas radica principalmente en la forma en que los parámetros de desplazamiento y escala son discretizados. A continuación se describen brevemente estos tres tipos.

2.3.3.1. Transformada wavelet continua (CWT)

Este tipo de transformada ya se ha introducido en el anterior apartado. En este caso los parámetros cambian de forma continua. Esta representación ofrece la máxima libertad en la elección de la wavelet, con la única restricción que satisfaga la condición de media nula. Esta condición permite que la CWT sea invertible en rango. La transformada inversa viene dada por:

$$f(t) = \frac{1}{K_\psi} \iint C(\tau, s) \frac{\psi(\tau, s)}{\tau^2} \cdot d\tau ds \quad (2.5)$$

Donde ψ satisface la condición de media nula comentada anteriormente, con $K(\psi)$ dada:

$$K_\psi = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\psi(w)|^2}{w} \cdot dw < \infty \quad (2.6)$$

siendo $\psi(w)$ la transformada Fourier de $\psi(t)$.

Desde un punto de vista intuitivo, la CWT consiste en calcular un índice de semejanza entre la señal que está siendo analizada, y la wavelet. Se toma la wavelet y se calcula su correlación con cierta sección de la señal. Se desplaza en el eje temporal y se calcula la correlación con la siguiente sección. Al terminar, se escala la wavelet y se repite el proceso, tal como se muestra en la siguiente figura:

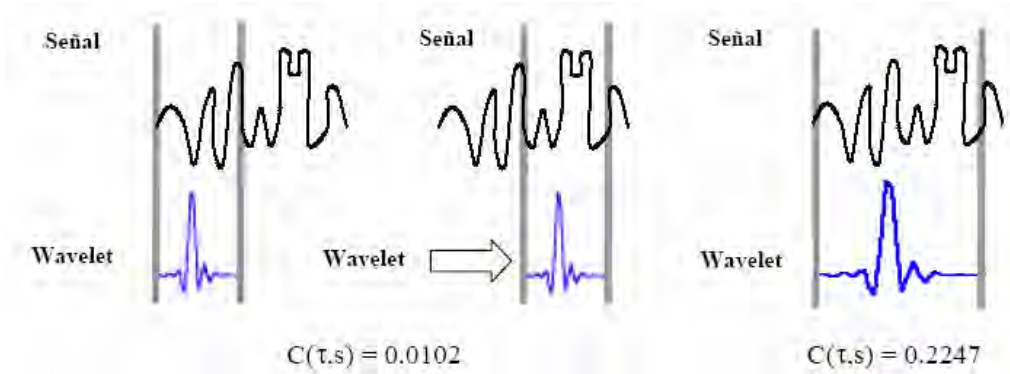


Figura 2-19 Funcionamiento de la CWT.

El proceso de cálculo de la CWT, puede ser así descrito en cuatro pasos como:

1. Tomar una wavelet madre.
2. Dados dos valores τ y s , calcular un coeficiente $C(\tau,s)$ mediante las ecuaciones (5) y (6), que represente la correlación entre la wavelet y la sección de la señal bajo análisis. Cuanto mayor sea éste, mayor es la similitud, con lo cual es interesante resaltar que los resultados dependerán por tanto de la forma de la wavelet.
3. Desplazar la wavelet en el sentido positivo del eje temporal, y repetir los pasos anteriores hasta que se haya cubierto la totalidad de la señal.
4. Escalar la wavelet en el tiempo, y repetir los pasos 1 a 3.

Por ejemplo, dada una señal no estacionaria como la representada en la figura 2.3, obtendríamos una transformada wavelet continua tal como se muestra en esta figura:

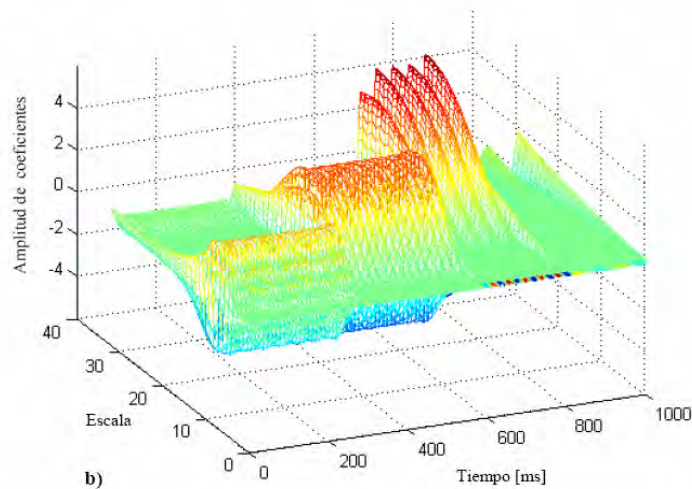


Figura 2-20 Representación tridimensional del valor de los coeficientes calculados de la CWT

2.3.3.2. Transformada wavelet semidiscreta

En la práctica, es más conveniente considerar la WT en algunos valores discretos de a y b (valores que determinan el factor de traslación y escalado). Por ejemplo, la escala diádica corresponde a la definición de los parámetros $a = 2^j$, $b = 2^j k$, con $(j, k) \in \mathbb{Z}^2$, denominándose transformada wavelet semidiscreta (SWT).

La transformada será reversible si se cumple:

$$A \|f\|^2 \leq \sum_{a,b} |\langle f, \psi(\tau, s) \rangle|^2 \leq B \|f\|^2 \quad (2.7)$$

donde A y B son dos constantes positivas y $f(t)$ sigue siendo una función continua.

2.3.3.3. Transformada wavelet discreta.

Sea la señal a analizar $f[n]$ una función discreta. En este caso la transformada wavelet de esta señal viene dada por:

$$C[j, k] = \sum_{n \in \mathbb{Z}} f[n] \psi_{j,k}[n] \quad (2.8)$$

Donde $\psi_{j,k}$ es una wavelet discreta definida como:

$$\psi_{j,k}[n] = 2^{j/2} \cdot \psi[2^{-j}n - k] \quad (2.9)$$

Los parámetros τ y s están definidos según la escala diádica, de manera que $\tau = 2^j$, $s = 2^j k$, con la diferencia respecto a la SWT que la señal bajo estudio es discreta. La transformada inversa se define de forma similar como:

$$f[n] = \sum_{j \in \mathbb{Z}} \sum_{k \in \mathbb{Z}} C[j, k] \cdot \psi_{j,k}[n] \quad (2.10)$$

Si las constantes indicadas en el apartado 2.4.2 son $A = B = 1$, entonces la transformada es ortogonal. Estas wavelets pueden ser construidas mediante un análisis multirresolución, cuyos fundamentos se detallaran en posteriores apartados.

2.3.4. La teoría wavelet

Para comprender la base de funcionamiento de esta transformada, es necesario definir ciertos aspectos de la teoría del análisis wavelet, los cuales pueden considerarse como los conceptos fundamentales de la mayoría de las técnicas de análisis de señales.

Por ejemplo, la transformada de Fourier usa funciones base para analizar y reconstruir una función. Cada vector en un espacio vectorial puede escribirse como combinación lineal de vectores bases. El análisis de la señal involucra la estimación de estas constantes (coeficientes de transformación, coeficientes de Fourier, coeficientes wavelet, etc.), mientras que la síntesis o reconstrucción, corresponde al proceso de calcular la ecuación de combinación lineal.

2.3.4.1. Vectores base

Una base de un espacio vectorial V puede definirse como un conjunto de vectores linealmente independientes, de manera que cualquier vector v en V puede escribirse como una combinación lineal de estos vectores bases. Puede existir más de una base para un espacio vectorial; sin embargo, todos ellos tienen la misma cantidad de vectores, lo que se conoce como la dimensión del espacio vectorial. Por ejemplo en un espacio bidimensional, las bases tendrán dos vectores. En un espacio k -dimensional la base tendrá k vectores, de modo que la combinación lineal que define un vector v será:

$$v = \sum_k v^k b_k \quad (2.11)$$

La ecuación anterior muestra como cualquier vector v puede escribirse como una combinación lineal de los vectores bases b_k y los correspondientes coeficientes v^k . Este concepto, dado en términos de vectores, puede fácilmente generalizarse a funciones reemplazando los vectores bases b_k por funciones bases $\phi_k(t)$ y el vector v por una función $f(t)$, tal como se muestra a continuación:

$$f(t) = \sum_k \mu_k \phi_k(t) \quad (2.12)$$

La función exponencial compleja (senos y cosenos) son las funciones bases para la transformada de Fourier, constituyendo además una base de funciones ortogonales, lo que proporciona algunas propiedades deseables para la reconstrucción de la función.

Sean $f(t)$ y $g(t)$ dos funciones en $L^2[a,b]$, donde con esto se denota el conjunto de funciones cuadrado integrables en el intervalo $[a,b]$, podemos definir el producto interior de dos funciones como:

$$\langle f(t), g(t) \rangle = \int_a^b f(t) \cdot g^*(t) dt \quad (2.13)$$

De acuerdo a la definición anterior, la CWT puede obtenerse como el producto interior entre la señal y la función base $\psi_{\tau,s}(t)$ como:

$$CWT_x^\psi(\tau, s) = \psi_x^\psi(\tau, s) = \int x(t) \cdot \psi_{\tau,s}^*(t) dt \quad (2.14)$$

donde:

$$\psi_{\tau,s} = \frac{1}{\sqrt{s}} \psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right) \quad (2.15)$$

La definición de la CWT muestra que el análisis wavelet puede interpretarse como una medida de la similitud entre las funciones bases (wavelets madres) y la señal en estudio, tratada esta similitud, en el sentido de un similar contenido en frecuencia, por lo que los coeficientes calculados de la CWT indican que tan próxima es la señal a la wavelet en una determinada escala. El análisis anterior determina la correlación existente entre la señal y la wavelet a una escala dada, de forma que si la señal tiene una alta componente de frecuencia, en una determinada escala, entonces la wavelet (función base), será similar o próxima a la señal en la ubicación en que aparece localizada esta componente de

frecuencia, y los coeficientes calculados de la CWT en el plano tiempo-escala serán relativamente mayores.

2.3.4.2. Producto interior, ortogonalidad y ortonormalidad

Dos vectores v, w se dicen que son ortogonales si su producto interior es nulo:

$$\langle v, w \rangle = \sum_n v_n w_n^* = 0 \quad (2.16)$$

Similarmente, dos funciones $f(t), g(t)$ se dice que son ortogonales una con otra si su producto interior es nulo:

$$\langle f(t), g(t) \rangle = \int_a^b f(t) \cdot g^*(t) dt = 0 \quad (2.17)$$

Por otro lado, se dice que un conjunto de vectores $\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ son ortonormales, si ellos son ortogonales entre si y su longitud es la unidad:

$$\langle v_m, v_n \rangle = \delta_{mn} \quad (2.18)$$

Similarmente, un conjunto de funciones $\phi_k(t)$ se dice que es ortonormal si:

$$\int_a^b \phi_k(t) \phi_l^*(t) dt = 0 \text{ si } k \neq l \quad (2.19)$$

y

$$\int_a^b \{|\phi_k(t)|\}^2 dx = 1 \quad (2.20)$$

o equivalentemente:

$$\int_a^b \phi_k(t) \phi_l^*(t) dt = \delta_{kl} \quad (2.21)$$

donde:

$$\delta_{kl} = \begin{cases} 1 & \text{si } k=l \\ 0 & \text{si } k \neq l \end{cases} \quad (2.22)$$

es la función de Kronecker.

Como se ha comentado antes, puede existir más de un conjunto de funciones bases; sin embargo, entre estas bases, las que son ortonormales son de particular importancia debido a que gracias a sus propiedades hacen posible la evaluación computacional de estos coeficientes de manera simple y rápida. Para bases ortonormales, los coeficientes μ_k pueden calcularse como:

$$f(t) = \sum_k \mu_k \phi_k(t) = \sum_k \langle f, \phi_k \rangle \phi_k(t) \text{ de modo que } \mu_k = \langle f, \phi_k \rangle \quad (2.23)$$

Las bases ortonormales pueden no estar disponibles para todos los tipos de aplicaciones, sin embargo, pueden emplearse bases biortogonales, es decir dos bases

diferentes que son ortogonales entre sí, pero que no forman un conjunto ortogonal. En algunas aplicaciones, las bases biortogonales también podrían no existir, en cuyo caso se pueden utilizar “frames”, los que constituyen parte importante de la teoría de wavelet.

2.3.4.3. El proceso de síntesis wavelet. Transformada wavelet inversa

La transformada wavelet continua es una transformada reversible si se satisface la siguiente condición de admisibilidad:

$$c_{\psi} = \left\{ 2\pi \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\hat{\psi}(\xi)|^2}{|\xi|} d\xi \right\} < \infty \quad (2.24)$$

donde $\hat{\psi}(\xi)$ es la transformada de Fourier (FT) de $\psi(t)$.

La factibilidad de la reconstrucción depende de esta constante que se conoce como “constante de admisibilidad”. Por lo tanto la reconstrucción de la señal se hace posible a través de la siguiente fórmula:

$$x(t) = \frac{1}{c_{\psi}^2} \int_s \int_{\tau} \psi_x^{\psi} \frac{1}{s^2} \psi \left(\frac{t-\tau}{s} \right) d\tau ds \quad (2.25)$$

donde c_{ψ}^2 depende del tipo de wavelet utilizada,

La ecuación anterior implica que $\hat{\psi}(0) = 0$, es decir:

$$\int \psi(t) dt = 0 \quad (2.26)$$

Con esto se indica que la wavelet debe ser una función oscilatoria de manera que la integral en todo su dominio sea nula.

Discretización de la transformada wavelet continua: las series wavelet

Dado que actualmente todos los procesos numéricos son realizados por computadores, resulta evidente que ni la FT, ni la STFT ni la CWT pueden evaluarse de manera práctica utilizando ecuaciones analíticas, integrales, etc. Por lo tanto se hace necesario discretizar la transformada, siendo la manera más intuitiva de hacer esto, muestreando el plano tiempo-frecuencia (escala) con una tasa de muestreo uniforme; sin embargo, en el caso de la transformada wavelet el cambio de escala puede utilizarse para disminuir la tasa de muestreo.

A altas escalas (bajas frecuencias) la tasa de muestreo puede disminuirse de acuerdo a la regla de Nyquist. Es decir, si el plano tiempo-escala se muestrea con una tasa de muestreo N_1 a una escala s_1 , el mismo plano puede muestrearse con otra tasa de muestreo N_2 y a una escala s_2 , con $s_1 < s_2$ (correspondientes a frecuencias $f_1 > f_2$) y $N_2 < N_1$. Las relaciones entre estas variables son:

$$N_2 = \frac{s_1}{s_2} N_1$$

$$N_2 = \frac{f_2}{f_1} N_1$$
(2.27)

En conclusión, a bajas frecuencias, puede disminuirse la tasa de muestreo, permitiendo un ahorro considerable de tiempo de cómputo.

La discretización puede realizarse sin restricciones, incluso no es necesario satisfacer el criterio de Nyquist, que determina la mínima tasa que permite que la señal original continua en el tiempo pueda reconstruirse a partir de sus muestras discretas, si no se requiere del proceso de síntesis. Por lo que las restricciones en la discretización y en la tasa de muestreo se hacen importantes, tan sólo si se desea reconstruir la señal. Los vectores bases que fueron mencionados anteriormente son de particular importancia en esta situación.

Como se ha dicho anteriormente, la wavelet $\psi(\tau, s)$ que satisface la anterior ecuación permite la reconstrucción de la señal haciendo uso de la ecuación de síntesis definida, siendo posible reconstruir la señal si se discretizan los parámetros tiempo y escala, pero bajo ciertas condiciones. En primer lugar, el parámetro escala s se discretiza en una escala logarítmica, para posteriormente discretizar el tiempo con respecto al parámetro escala; es decir, se utiliza una tasa de muestreo diferente para cada escala. En otras palabras, el muestreo se realiza mediante una escala diádica como la que se muestra en la siguiente figura:

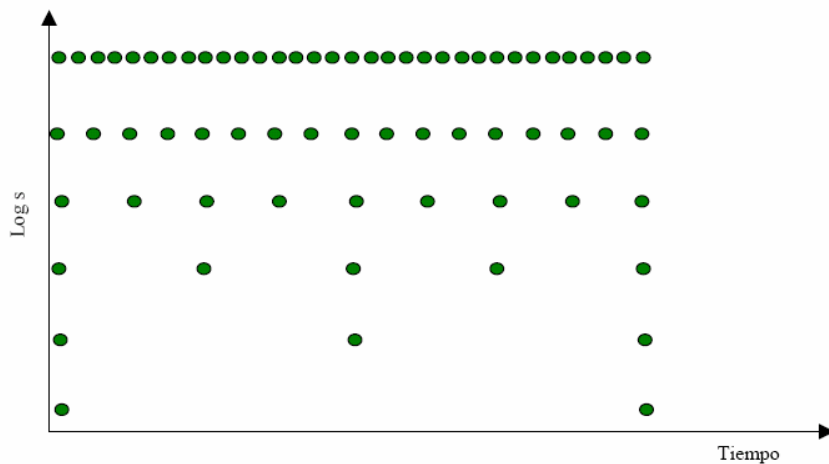


Figura 2-21 Representación de la escala diádica empleada en la transformada wavelet.

El plano tiempo-escala puede interpretarse como el área total que se cubre por los ejes. La CWT asigna un valor a cada punto en el plano de manera continua, por lo que existirán un número infinito de coeficientes de la CWT.

El proceso de discretización comienza con el eje de la escala, eligiendo un número finito de puntos utilizando una regla logarítmica, la base de este logaritmo puede seleccionarse libremente, sin embargo, el valor que más comúnmente se utiliza es 2, de

manera que sólo se aparecerán en este caso las escalas 2, 4, 8, 16, 32, 64,....etc. Si se eligiera el valor 3, se utilizarían las escalas 3, 9, 27, 81, 243,...., etc. Una vez terminado el proceso de discretización del eje de la escala, se discretiza el eje del tiempo en base a la realizada en el eje de la escala. Puesto que la escala discreta cambia por un factor de 2, la tasa de muestreo para el eje del tiempo se ve reducida por un factor de 2 para cada escala.

Obsérvese que en el caso particular de la figura, para la menor escala ($s = 2$) sólo se muestrean 32 puntos del eje del tiempo. En la escala siguiente, $s = 4$, la tasa de muestreo del eje del tiempo se reduce por un factor de 2, por lo tanto solo se toman 16 muestras. En el siguiente paso para una escala $s = 8$ sólo se tomarán 8 muestras en el tiempo y así sucesivamente.

Aunque toda esta discretización se realiza en lo que se denomina plano tiempo-escala, resulta mucho más exacto llamarle plano traslación-escala, dado que el “tiempo” en el dominio transformado realmente corresponde al desplazamiento de la wavelet en el tiempo.

Análogamente a la relación existente entre transformada de Fourier continua, series de Fourier y transformada discreta de Fourier, existe una transformada wavelet continua, una transformada wavelet semi-discreta (también conocida como series wavelet) y una transformada discreta.

Expresando el procedimiento de discretización descrito anteriormente en términos matemáticos, la escala se puede denotar como $s = s_0^j$ y la traslación como $\tau = k s_0^j \tau_0$, donde $s_0 > 1$ y $\tau_0 > 0$. Con esto queda definido, que la discretización de la traslación depende de la discretización de la escala.

Al reemplazar esta nueva notación de escalas y traslaciones en la ecuación de la función wavelet continua se obtiene:

$$\psi_{j,k}(t) = s_0^{-j/2} \psi(s_0^j \cdot t - k \tau_0) \quad (2.28)$$

Si $\psi_{j,k}(t)$ constituye una base ortonormal, la transformada de series wavelet puede expresarse como:

$$\psi_x^{\psi_{j,k}} = \int f(t) \psi_{j,k}^*(t) dt \quad (2.29)$$

o como:

$$f(t) = c_\psi \sum_j \sum_k \psi_x^{\psi_{j,k}} \psi_{j,k}(t) \quad (2.30)$$

Las series wavelet requieren que $\psi_{j,k}$ sea ortonormal, biortogonal o “frame”, si no lo fuera, la ecuación (31) se transformaría en:

$$\psi_x^{\psi_{j,k}} = \int f(t) \hat{\psi}_{j,k}^*(t) dt \quad (2.31)$$

Si $\psi_{j,k}$ es ortonormal o biortogonal, la transformada no será redundante, mientras si forma un “frame” la transformada será redundante, Por otro lado, es mucho más sencillo encontrar “frames” que encontrar bases ortonormales u ortogonales.

La siguiente analogía puede aclarar este concepto. Considere todo el proceso como la observación de un determinado objeto. Inicialmente el ojo humano realiza una visión global que depende de la distancia del ojo al objeto, esto correspondería al ajuste del parámetro escala a s_0^j . Cuando se desea observar el objeto con mayor nivel de detalle es equivalente al caso en que j es negativo y grande (baja escala, alta frecuencia, se analiza el detalle de la señal). El movimiento lento de la cabeza o de los ojos y con leves incrementos del ángulo o distancia al objeto corresponderá al caso en que $\tau = ks_0^j\tau_0$ toma valores muy pequeños. Observe que si j es negativo y grande existirán leves cambios en el tiempo τ (alta tasa de muestreo) y fuertes cambios en s_0^j (baja escala, altas frecuencias, tasa de muestreo alta). El parámetro escala también puede interpretarse como una ampliación.

El principal problema para optimizar el procedimiento es saber el mínimo valor de la tasa de muestreo para que aun así sea posible la reconstrucción de la señal, por razones de programación los valores más convenientes para esta situación son $s_0 = 2$ y $\tau = 1$. Cuando se utiliza una tasa de muestreo lo más baja posible también se reduce el número de wavelets ortonormales.

2.3.4.4. Propiedades de las wavelets

Las propiedades más importantes de las wavelets son las condiciones de admisibilidad y regularidad. Las funciones de cuadrado integrable $\psi(t)$ que satisfacen la condición de admisibilidad, pueden ser utilizadas para primero analizar y luego reconstruir una señal sin que se produzca pérdida de información. La condición de admisibilidad puede expresarse de la siguiente manera:

$$\int \frac{|\Psi(w)|^2}{|w|} dw < \infty \quad (2.32)$$

Donde $\Psi(w)$ es la transformada de Fourier de $\psi(t)$. La condición de admisibilidad implica que la transformada de Fourier de $\psi(t)$ desaparece para frecuencia cero.

$$|\Psi(w)|^2 \Big|_{w=0} = 0 \quad (2.33)$$

Esta última expresión indica que las wavelets deben tener un espectro con forma paso banda. Esta condición, de valor nulo a frecuencia cero, también implica que el valor medio de la wavelet en el dominio del tiempo debe ser nulo, y por tanto debe ser oscilatoria, es decir, $\psi(t)$ debe ser una onda. Esta última característica puede expresarse como:

$$\int \psi(t) dt = 0 \quad (2.34)$$

La transformada wavelet de una función unidimensional es bidimensional, así como la transformada wavelet de una función bidimensional será tetradimensional. El producto tiempo-ancho de banda de la transformada wavelet es el cuadrado de la señal de entrada, y para algunas aplicaciones prácticas, no es una propiedad deseable. Por este motivo se puede imponer una serie de condiciones adicionales a las funciones wavelet para que el valor de la transformada decrezca al mismo tiempo que se reduce el valor de escala. Éstas serán las llamadas condiciones de regularidad, que determinan que la función wavelet debe ser suave y concentrada tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia. El término *regularidad* puede resultar algo complejo. Para explicarlo se hará uso del concepto de *momentos de desvanecimiento*. Supongamos que tenemos la transformada wavelet definida por:

$$\gamma(s, \tau) = \int f(t) \psi_{s, \tau}^*(t) dt \quad (2.35)$$

Si se realiza un desarrollo en Series de Taylor para el instante $t=0$ hasta un orden n obtenemos:

$$\gamma(s, 0) = \frac{1}{\sqrt{s}} \left[\sum_{p=0}^n f^{(p)}(0) \int \frac{t^p}{p!} \psi \left(\frac{t}{s} \right) dt + O(n+1) \right] \quad (2.36)$$

En esta ecuación $f^{(p)}$ indica la derivada p-ésima de f , y $O(n+1)$ representará el resto de la expansión. Si ahora definimos los *momentos* de la wavelet como M_p

$$M_p = \int t^p \psi(t) dt \quad (2.37)$$

y sustituimos en la expresión correspondiente al desarrollo en series de Taylor tendremos:

$$\gamma(s, 0) = \frac{1}{\sqrt{s}} \left[f(0)M_0s + \frac{f^{(1)}(0)}{1!} M_1s^2 + \frac{f^{(2)}(0)}{2!} M_2s^3 + \dots + \frac{f^{(n)}(0)}{n!} M_n s^{n+1} + O(s^{n+2}) \right] \quad (2.38)$$

De la condición de admisibilidad presentada antes, tenemos que el momento M_0 es nulo, por lo que el primer término de la parte derecha de la igualdad mostrada en la expresión, será cero. Si ahora tratamos de hacer que el resto de momentos hasta M_p sean nulos también, entonces los coeficientes de la transformada wavelet $\gamma(s, \tau)$, decrecerán a un ritmo s^{n+2} para la señal $f(t)$. Esto se conoce como los *momentos de desvanecimiento* u *orden de aproximación*. Si la wavelet tiene N momentos de desvanecimiento, el orden de aproximación de la transformada wavelet también será N . Estos momentos no tiene porque ser cero, ya que un valor suficientemente pequeño sería válido.

En resumen, la condición de admisibilidad nos dará la onda necesaria para el análisis, mientras que la condición de regularidad y los momentos de desvanecimiento el rápido descenso de los valores de los coeficientes de la transformada.

2.3.4.5. Comparación entre la FT y la WT

Semejanzas

Las propiedades matemáticas de la transformada rápida de Fourier (FFT) y la transformada wavelet discreta (DWT) son similares. La matriz necesaria para la transformada inversa en ambos casos, es la transpuesta de la original. Como resultado,

ambas transformadas pueden verse como una rotación a un nuevo dominio. Para la FFT, este nuevo dominio contiene funciones base que son senos y cosenos, para la transformada wavelet, el nuevo dominio contiene unas funciones base más complicadas, las denominadas wavelets madre.

Otra semejanza existente entre ambas transformadas, es que las funciones base correspondientes a cada una de ellas se encuentran localizadas en la frecuencia, lo que permite conocer la cantidad de energía existente en cada intervalo de frecuencias, o calcular las distribuciones de energía de la señal.

Diferencias

La principal, y más interesante diferencia existente entre estos dos tipos de transformadas, es que las funciones wavelet se encuentran localizadas en el tiempo, no siendo este el caso de los senos y cosenos utilizados en la transformada de Fourier. Esta característica junto con la localización de la wavelets en la frecuencia, permite la utilización de la transformada wavelet en numerosas aplicaciones como la compresión de datos, detección de características concretas de las imágenes o la eliminación de ruido asociado a las señales.

Para poder ver mejor las diferencias existentes en la resolución tiempo-frecuencia entre la transformada de Fourier y la transformada wavelet, se muestra en las siguientes figuras, la cobertura de las funciones base correspondientes a cada una de ellas en el plano tiempo-frecuencia. En la siguiente figura, observamos que en la transformada ventana de Fourier (WFT), la ventana utilizada durante el análisis es una onda cuadrada. Esta ventana truncará la función seno o coseno para que quede ajustada a una ventana con una anchura concreta. Como en la WFT para todas las frecuencias es utilizada una única ventana, la resolución obtenida en el análisis es la misma para todas las localizaciones en el plano tiempo-frecuencia. Una ventaja de la transformada wavelet es que la anchura de la ventana utilizada en el proceso varía. Con el objetivo de aislar las discontinuidades de la señal, es conveniente emplear funciones base de pequeña longitud. Al mismo tiempo, para poder obtener un estudio detallado en el análisis de la frecuencia, necesitaremos unas funciones base con mayor longitud. Con la transformada wavelet puede conseguirse una longitud media para tener alta resolución.

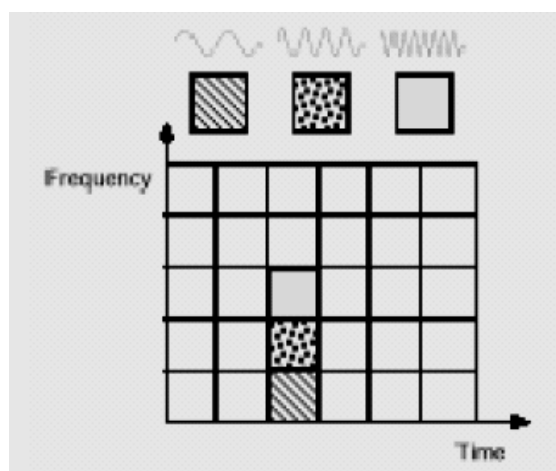


Figura 2-22 Funciones base de Fourier, distribución en el plano tiempo-frecuencia [Gra95].

En la siguiente figura [Gra95], se puede observar la forma en la que el plano tiempo-frecuencia es cubierto por las wavelet de Daubechies.

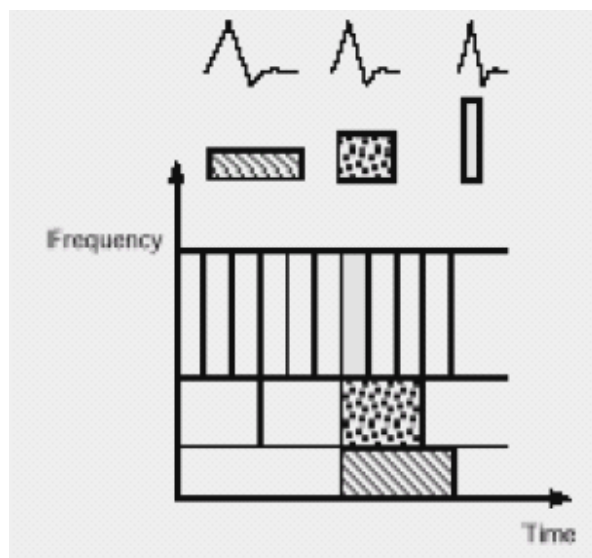


Figura 2-23 Funciones base de la wavelet de Daubechies, distribución en el tiempo-frecuencia.

Debe recordarse que la transformada wavelet no tiene un único conjunto de funciones base como la transformada de Fourier, que solamente utiliza las funciones senos y cosenos. Las transformadas wavelet disponen de un conjunto de posibles funciones base infinito. Es por este motivo, por el que el análisis mediante la utilización de wavelets proporciona acceso a información que puede permanecer oculta al utilizar otros métodos como el análisis de Fourier.

2.4. Análisis Multirresolución

2.4.1. Introducción

Aun cuando la transformada wavelet continua (CWT) puede evaluarse computacionalmente de manera discretizada, esto no constituye realmente una transformada discreta, sino una serie wavelet o la versión muestreada de la CWT, con la desventaja que la información que entregan es altamente redundante para la reconstrucción de la señal. Esta redundancia significa además un aumento significativo del tiempo de cálculo. Por este motivo se utiliza la transformada wavelet discreta (DWT) que es capaz de entregar suficiente información tanto para el análisis como para la reconstrucción de una señal con una significativa reducción del tiempo de procesamiento, siendo además mucho más fácil de implementar.

El origen de la DWT se remonta al año 1976 cuando Croiser, Esteban y Galand crearon una técnica para descomponer discretamente señales en el tiempo, en el mismo año Crochiere, Weber y Flanagan realizaron un trabajo similar para la codificación de señales de audio. El nombre que se utilizó para este tipo de análisis fue codificación de sub-bandas.

Posteriormente en 1983, Burt definió una técnica muy similar a la anterior que denominó “codificación piramidal” y que actualmente se conoce como “análisis multirresolución”. En 1989, Vetterli y Le Gall mejoran el esquema de codificación de sub-bandas disminuyendo la redundancia existente en el algoritmo piramidal.

Para ser útil, la teoría de wavelets debe disponer de algoritmos rápidos para su uso en computadores, es decir, un método similar al de la FFT para encontrar los coeficientes *wavelet* $C[j, k]$ y para reconstruir la función que representan. Existe una familia rápida de algoritmos basados en el análisis multirresolución o MRA. El análisis multirresolución, o algoritmo piramidal, se desarrolló para descomponer señales de tiempo discreto. La idea es la misma que en la CWT, obtener una representación tiempo-escala de una señal discreta, pero en este caso, los filtros trabajan a distintas frecuencias de corte, y se usan para analizar la señal en diferentes escalas. La señal se pasa a través de filtros paso alto para analizar las componentes de alta frecuencia, y se pasa a través de filtros paso bajo para analizar las componentes de baja frecuencia. Estas operaciones cambian la resolución de la señal, y la escala se cambia mediante operaciones de interpolación y submuestreo.

El análisis multirresolución de *Mallat* [Mal89] está relacionado con este algoritmo piramidal. En este caso, se incluyen filtros de espejo en cuadratura. Por tanto, la representación tiempo-escala de una señal digital se obtiene usando técnicas de filtrado digital. El proceso de descomposición comienza pasando la secuencia discreta correspondiente a la señal a través de un filtro paso bajo de media banda con respuesta al impulso $h[n]$. El filtrado de la señal corresponde a la operación matemática de convolución de ésta con $h[n]$. Este filtro elimina las componentes frecuenciales situadas por encima de la mitad del ancho de banda de la señal.

El análisis multirresolución resulta especialmente útil para el estudio de la información contenida en imágenes. Generalmente las estructuras que se desean analizar no poseen el mismo tamaño, motivo por el cual, la información puede ser organizada en conjuntos de detalles que pueden apreciarse en diferentes resoluciones. Dada una secuencia creciente de resoluciones $(r_j)_{j \in \mathbb{Z}}$, los detalles de una imagen para una resolución r_j vendrán definidos como la diferencia de información entre su aproximación en la resolución, y su aproximación en la resolución menor r_{j-1} .

La descomposición multirresolución permite obtener una interpretación invariante frente a la escala de la imagen. La escala de una imagen varía con la distancia entre la escena y el centro óptico de la cámara. Cuando se modifica la escala de la imagen, la interpretación de la misma no debe cambiar. Una representación multirresolución puede ser parcialmente invariante frente a la escala si la secuencia de los parámetros de resolución $(r_j)_{j \in \mathbb{Z}}$ varía exponencialmente.

Supongamos que existe un paso de resolución $\alpha \in \mathbb{R}$ tal que para todos los enteros $j, r_j = \alpha^j$. Si la cámara se aproxima en un factor α a la escena que se desea capturar, cada uno de los objetos de la escena es proyectado en un área α^2 veces mayor en el plano focal de la cámara. Es decir, los detalles de la imagen para el nuevo valor de resolución α^j se corresponden con los detalles de la imagen previa con una resolución α^{j+1} . La modificación de escala de la imagen por un factor α traslada los detalles de la imagen a lo largo del eje

de resolución. Si los detalles de la imagen son procesados de la misma forma para todas las resoluciones, la interpretación de la imagen percibida por el espectador no es modificada.

El análisis multirresolución ofrece una forma jerárquica de interpretar la información, así para diferentes resoluciones, los detalles de una imagen generalmente caracterizan diferentes estructuras físicas de la escena. Para resoluciones generales, se tendrá una percepción del contexto o entorno de la imagen, para lo cual se suele seguir un esquema que comienza el estudio con niveles de resolución menos precisos, para gradualmente aumentar la resolución utilizada. Este método de análisis, resulta especialmente útil en el reconocimiento de patrones.

Antes de comentar con mayor profundidad el desarrollo y funcionamiento del análisis multirresolución, se muestran algunas cuestiones sobre la notación empleada en esta sección. Z y R representarán el conjunto de números enteros y números reales respectivamente. $L^2(R)$ muestra el espacio de funciones unidimensionales $f(x)$ de cuadrado integrable. Dada $f(x) \in L^2(R)$ y $g(x) \in L^2(R)$, el producto interno de estas dos funciones se definirá como:

$$\langle g(u), f(u) \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} g(u)f(u)du \quad (2.39)$$

Por otro lado, la norma de una función $f(x)$ en $L^2(R)$ viene dada por:

$$\|f\|^2 = \int_{-\infty}^{\infty} |f(u)|^2 du \quad (2.40)$$

Para definir la convolución de dos funciones $f(x) \in L^2(R)$ y $g(x) \in L^2(R)$ emplearemos la expresión:

$$f(x) * g(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f(u)g(x-u)du \quad (2.41)$$

La transformada de Fourier de $f(x) \in L^2(R)$ escrita como $\hat{f}(w)$ se define como

$$\hat{f}(w) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)e^{-j\omega x} dx \quad (2.42)$$

2.4.2. Codificación de sub-bandas

La idea básica es la misma que se emplea en la CWT, es decir obtener una representación tiempo-escala de una señal usando técnicas de filtrado digital. La CWT puede interpretarse como una medida de similitud que existe entre la wavelet con diferentes escalas y la señal a estudiar, como ya se vio con anterioridad. Esta CWT se evalúa, modificando la escala de la ventana de análisis, desplazando la ventana en el tiempo, multiplicándola por la señal e integrándola en el tiempo. En el caso discreto, se utilizan filtros con diferentes frecuencias de corte para analizar la señal en las diferentes escalas, de modo que la señal se pasa a través de una serie de filtros paso alto para analizar las altas frecuencias y de filtros paso bajo para analizar las bajas frecuencias.

La resolución, que es una medida de la cantidad de detalle de la señal, varía por la operación de filtrado, mientras que la escala varía mediante operaciones de submuestreo

(interpolar, submuestrear), que consiste en reducir la tasa de muestreo o eliminar algunas muestra de la señal. El submuestreo por un factor n reduce el número de muestras de la señal n veces.

Interpolar una señal comprende el incremento la tasa de muestreo agregando nuevas muestras a la señal. Por ejemplo, interpolar por 2 significa agregar una nueva muestra, usualmente un cero o un valor interpolado entre dos muestras de la señal. Por lo tanto, interpolar una señal por un factor de n aumenta el número de muestras en la señal un factor n .

Aun cuando no es la única elección posible los coeficientes de la DWT comúnmente se calculan mediante una escala diádica, es decir, $s_0 = 2$ y $\tau = 1$, de manera que $s = 2^j$ y $\tau = k2^j$. Como la señal ahora es una función discreta en el tiempo, los términos función y secuencia se usarán indistintamente en este análisis y la señal se denotará como $x[n]$, donde n es un número entero.

El procedimiento para obtener la DWT comienza pasando la señal (secuencia) a través de un filtro digital de paso bajo y media banda con respuesta impulso $h[n]$, este proceso de filtrado consiste en realizar matemáticamente la convolución de la secuencia con la respuesta impulso del filtro, lo cual se define como:

$$x[n] * h[n] = \sum_{-\infty}^{\infty} x[k] \cdot h[n-k] \quad (2.43)$$

Un filtro paso bajo de media banda elimina todas las frecuencias que están por encima de la mitad de la mayor frecuencia de la señal. En señales discretas la frecuencia se expresa en radianes, por lo que la frecuencia de muestreo de la señal es igual a 2π en términos de la frecuencia radial. Es decir, la componente de mayor frecuencia que existe en la señal será de π radianes si el muestreo se realiza a la frecuencia de Nyquist, que corresponde al doble de la máxima frecuencia que existe en la señal; de este modo la frecuencia de Nyquist corresponderá a π rad/s. en el dominio discreto de la frecuencia.

Una vez que la señal ha pasado por el filtro paso bajo de media banda, la mitad de las muestras se pueden eliminar de acuerdo a la regla de Nyquist, ya que la señal ahora tiene la mayor frecuencia en $\pi/2$ radianes en vez de π radianes. Con este propósito se elimina una de cada dos muestras de la señal (submuestreo por 2) con lo cual se reduce el número de puntos a la mitad y la escala de la señal se duplica. De este modo, el filtrado paso bajo elimina la información de alta frecuencia, pero deja la escala invariable, puesto que solamente el proceso de submuestreo la altera.

Por otra parte, como la resolución está relacionada con la cantidad de información en la señal, ésta es alterada por las operaciones de filtrado, eliminando así la mitad de las frecuencias, lo que puede interpretarse como la pérdida de la mitad de la información. Por lo tanto, la resolución se reduce a la mitad después de la operación de filtrado. Sin embargo, el proceso de submuestreo luego del filtrado no afecta a la resolución, ya que al eliminar la mitad de las componentes espectrales la mitad del número de muestras se hacen redundantes también, de este modo la mitad de las muestras pueden eliminarse sin ninguna pérdida de información. Posteriormente la señal es submuestreada por dos, puesto que la mitad del número de muestras son redundantes, esta operación duplica la escala.

El procedimiento anterior matemáticamente puede expresarse como:

$$y[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} h[k] \cdot x[2n-k] \quad (2.44)$$

Por tanto si analizamos ahora el procedimiento de la DWT, se puede observar que la DWT analiza la señal descomponiéndola en una aproximación y en un detalle (nivel), considerando diferentes bandas de frecuencias con distintas resoluciones para cada nivel. Con este propósito se emplean dos conjuntos de funciones denominadas: funciones de escalamiento y funciones wavelets, las que están asociadas a filtros paso bajo y paso alto, respectivamente. La descomposición de la señal en diferentes bandas de frecuencia se obtiene mediante un sucesivo filtrado de paso bajo y paso alto, por lo que la señal original $x[n]$ se pasa a través de un filtro paso alto de media banda $g[n]$ y de un filtro paso bajo $h[n]$, después de lo cual pueden eliminarse la mitad de las muestras de acuerdo a la regla de Nyquist, ya que la señal ahora tiene una frecuencia superior de $\pi/2$ radianes en vez de π . De esta manera se ha constituido el primer nivel de descomposición, lo que matemáticamente puede expresarse como:

$$\begin{aligned} y_{\text{high}}[k] &= \sum_n x[n] \cdot g[2k-n] \\ y_{\text{low}}[k] &= \sum_n x[n] \cdot h[2k-n] \end{aligned} \quad (2.45)$$

En este caso las expresiones $y_{\text{high}}[k]$ e $y_{\text{low}}[k]$ son las salidas de los filtros paso alto y paso bajo ($g[n]$ y $h[n]$), respectivamente, después del submuestreo por 2.

Esta descomposición reduce a la mitad la resolución en el tiempo, como consecuencia de la reducción a la mitad del número de muestras originales que caracterizan a la señal. Sin embargo, esta misma operación duplica la resolución en frecuencia ya que ahora la banda de frecuencia de la señal abarca solamente la mitad de la banda de frecuencias anteriores, lo que efectivamente reduce la incertidumbre en la frecuencia a la mitad. El procedimiento anterior se denomina codificación de subbandas y puede repetirse para conseguir una mayor descomposición. De este modo, el filtrado y el submuestreo darán como resultado una disminución a la mitad del número de muestras y de la banda de frecuencias abarcada, duplicando así la resolución en frecuencia.

La siguiente figura muestra un ejemplo de este procedimiento, donde $x[n]$ es la señal original que se va a descomponer y $h[n]$ y $g[n]$ son los filtros paso bajo y paso alto, respectivamente. En cada nivel de descomposición el ancho de banda de la señal aparece señalado en la figura como **f**.

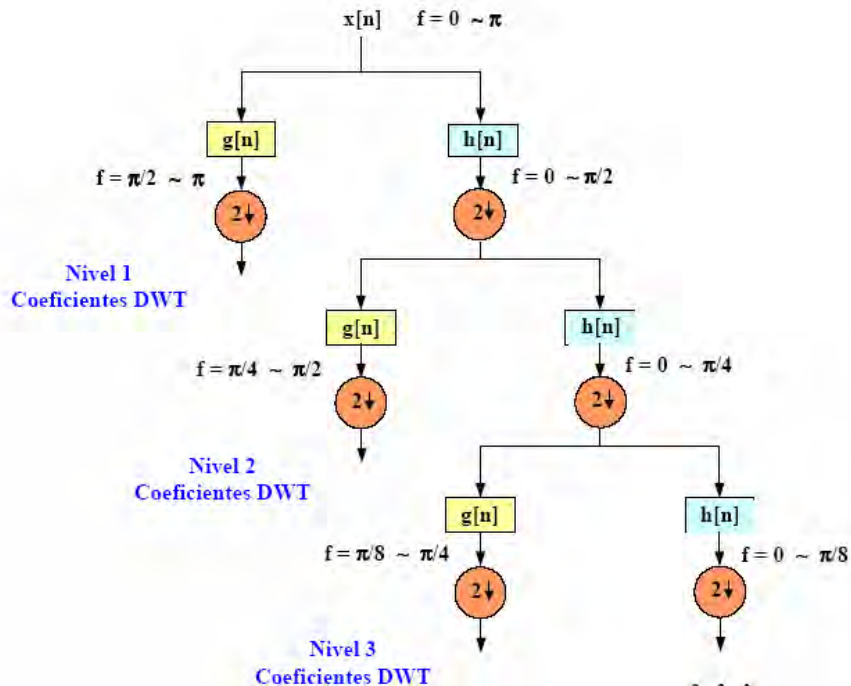


Figura 2-24 Esquema de codificación subbandas.

El proceso de descomposición continúa hasta que queden solamente dos muestras haciendo que las salidas de los filtros paso bajo sean nuevamente filtradas para una mayor descomposición. La DWT de la señal original se obtiene concatenando todos los coeficientes, comenzando desde el último nivel de descomposición, La DWT tendrá entonces el mismo número de coeficientes que la señal original.

Las frecuencias que son más dominantes en la señal original aparecerán como altas amplitudes en la región de la DWT que incluye esas frecuencias. La localización en el tiempo tendrá una resolución que dependerá del nivel en que aparezca, de este modo si la información principal contenida en la señal está en altas frecuencias, como sucede a menudo, entonces la localización en el tiempo de estas frecuencias será más precisa, puesto que estarán caracterizadas por un mayor número de muestras. Por otro lado, si la información principal está a muy bajas frecuencias entonces su localización en el tiempo no podrá ser muy precisa, dado que existirán muy pocas muestras para caracterizar la señal a estas frecuencias.

En resumen, el procedimiento descrito ofrece una buena resolución en el tiempo para las altas frecuencias y una buena resolución en frecuencia para las bajas frecuencias. Las bandas de frecuencia que no son muy dominantes en la señal $x[n]$ darán origen a coeficientes de la DWT muy pequeños, los cuales pueden despreciarse sin mayor pérdida de información, pero si con una importante reducción de los datos.

Una propiedad importante de la DWT es la relación entre las respuestas impulso de los filtros paso alto y paso bajo. Estos filtros no son independientes entre sí y están relacionados a través de la siguiente ecuación:

$$g[L-1-n] = (-1)^n \cdot h[n] \quad (2.46)$$

donde $g[n]$ es el filtro paso alto, $h[n]$ es el filtro paso bajo y L es la longitud del filtro expresada en número de puntos. La conversión de paso bajo a paso alto se hace a través del factor $(-1)^n$. Los filtros que cumplen la relación presentada en la expresión anterior son comúnmente utilizados en el tratamiento de señal y son conocidos como *Quadrature Mirror Filters (QMF)*.

Los dos filtrados y la operación de submuestreo pueden expresarse como:

$$\begin{aligned} (Gf)_k &= y_{\text{high}}[k] = \sum_n x[n] \cdot g[-n + 2k] \\ (Hf)_k &= y_{\text{low}}[k] = \sum_n x[n] \cdot h[-n + 2k] \end{aligned} \quad (2.47)$$

Estas ecuaciones representan el filtrado de la señal mediante los filtros digitales $h[n]$, $g[n]$. El factor $2k$ representa el submuestreo. Los operadores H y G corresponden a un paso en la descomposición wavelet, y suponen la forma más compacta de describir este proceso así como de representar los procesos para determinar los coeficientes wavelet.

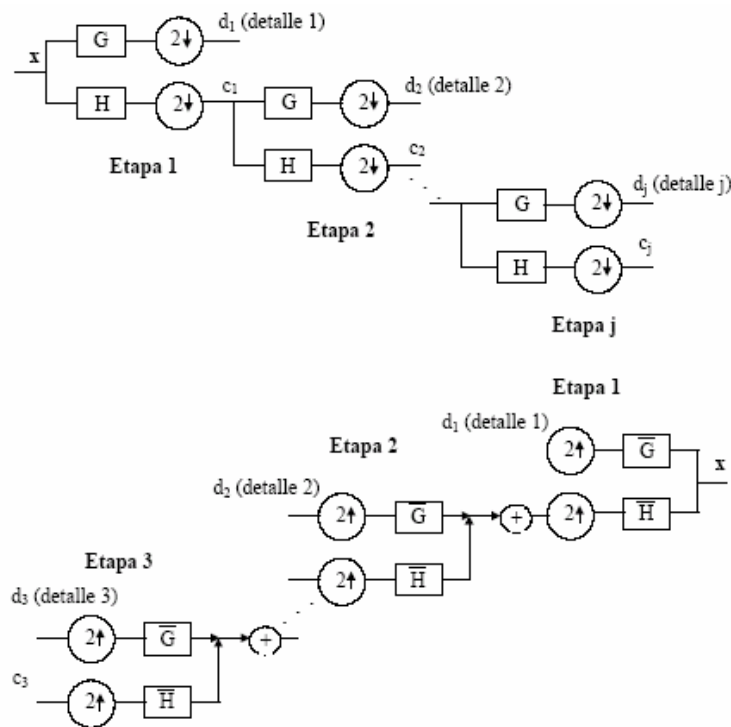


Figura 2-25 Algoritmo piramidal o codificación sub-banda con J etapas.

La parte superior de la figura, corresponde al análisis, siendo H el filtro paso bajo y G el filtro paso alto, mientras que la inferior es la síntesis o transformación inversa.

La DWT se puede resumir así en una única línea como:

$$x \rightarrow (Gx, GHx, GH^2x, \dots, GH^{j-1}x, H^jx) = (d^{(j-1)}, d^{(j-2)}, \dots, d^{(1)}, d^{(0)}, c^{(0)}) \quad (2.48)$$

donde $d^{(j-1)}, d^{(j-2)}, \dots, d^{(1)}, d^{(0)}$ se denominan coeficientes del detalle y $c^{(0)}$ coeficiente de la aproximación. Los detalles y aproximaciones se obtienen de forma iterativa como:

$$\begin{aligned} c^{(j-1)} &= Hc^{(j)} \\ d^{(j-1)} &= Gd^{(j)} \end{aligned} \quad (2.49)$$

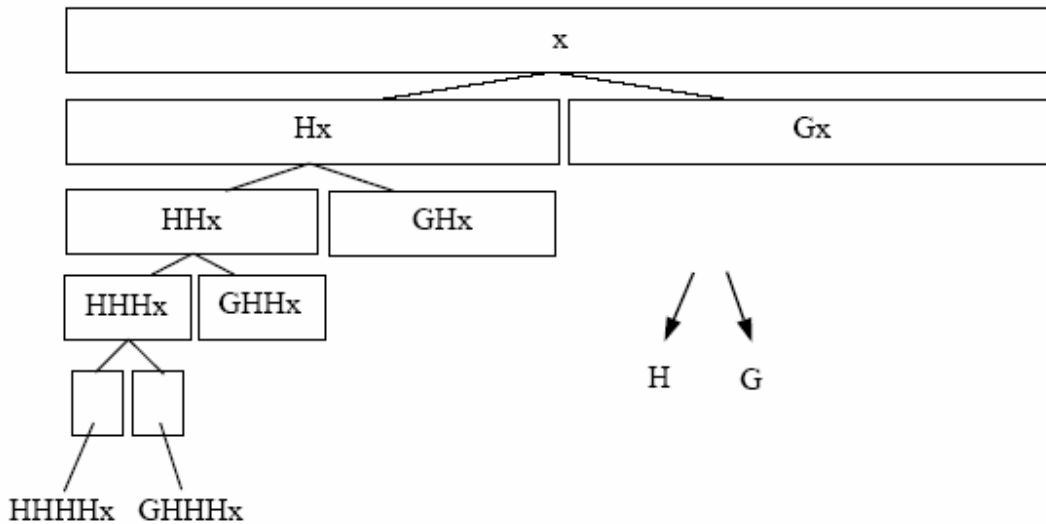


Figura 2-26 Esquema de la descomposición wavelet usando la notación de operadores.

Como se observa en cada nivel la señal de entrada se pasa por los filtros H y G . El resultado de la parte filtrada por G no es reexaminado, constituyendo los detalles del nivel de descomposición que se está aplicando, y el resultado del filtrado paso bajo se puede seguir descomponiendo, de manera que constituye la aproximación de la señal a cierto nivel.

La reconstrucción en este caso es muy simple, dado que los filtros de banda media forman una base ortonormal, debido a lo cual, el procedimiento anteriormente descrito se sigue en sentido inverso, de este modo la señal es interpolada por 2 y pasada a través de los filtros de síntesis $g'[n]$ y $h'[n]$, paso alto y paso bajo respectivamente, para posteriormente sumarse ambas salidas.

Un hecho interesante es que los filtros de análisis y síntesis son idénticos, sin embargo, si los filtros no son de banda media ideal la reconstrucción perfecta de la señal no puede conseguirse. Aun cuando no es posible realizar filtros ideales, bajo ciertas condiciones es posible encontrar filtros que permitan una reconstrucción perfecta de la señal. Los más famosos son los desarrollados por Ingrid Daubechies y que se conocen como las wavelets de Daubechies.

Un hecho importante de destacar es que al utilizarse un submuestreo sucesivo por 2 el número de muestras de la señal debe ser potencia de 2 o por lo menos un múltiplo de 2 de manera que el procedimiento de cálculo sea eficiente. La cantidad de muestras de la señal determina el número máximo de niveles de descomposición, por ejemplo si la señal

tiene 1024 muestras entonces es posible realizar hasta 10 niveles de descomposición ($2^{10}=1024$).

El proceso de reconstrucción es similar al de descomposición. La señal en cada nivel es interpolada por dos, pasada por dos filtros de síntesis representados por los operadores \bar{H}, \bar{G} (paso alto y paso bajo, respectivamente), y entonces las respectivas salidas son sumadas. Por tanto se definen dos operadores adjuntos \bar{H}, \bar{G} , como:

$$\begin{aligned} (\bar{H}x)_n &= \sum_k h(n-2k) \cdot x[n] \\ (\bar{G}x)_n &= \sum_k g(n-2k) \cdot x[n] \end{aligned} \quad (2.50)$$

La aplicación recursiva del procedimiento de cálculo, lleva a:

$$x = \sum_{j=0}^{n-1} (\bar{H})^j \bar{G}d^{(j)} + (\bar{H})^n c^{(0)} \quad (2.51)$$

Siendo al igual que se comento anteriormente $d^{(j)}$ los coeficientes de detalles, y $c^{(0)}$ la aproximación. Un ejemplo de descomposición se muestra en la siguiente figura, con la aproximación, detalles, y la señal original. Para un nivel de referencia J , existen dos tipos de detalles, los de $j \leq J$ que son los detalles finos o simplemente detalles, y los de $j > J$ que son la aproximación:

$$\begin{aligned} A_j &= \sum_{j>J} D_j \\ \text{señal} &= A_j + \sum_{j\leq J} D_j \end{aligned} \quad (2.52)$$

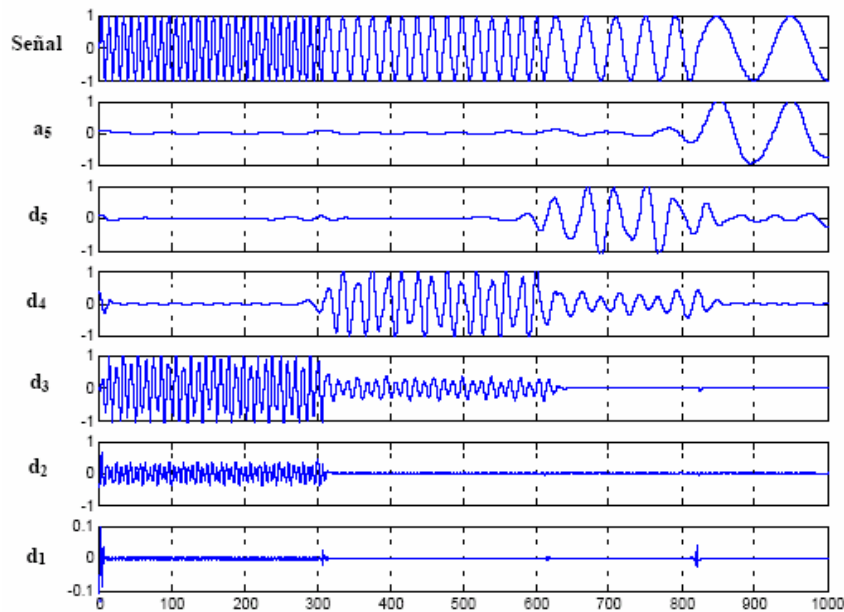


Figura 2-27 Ejemplo de descomposición DWT.

Los primeros dos detalles contienen principalmente ruido, mientras que los de mayor nivel aproximan la señal. En este ejemplo se ha utilizado la *wavelet Daubechies* 8, con un nivel de descomposición 5.

El área del procesamiento de imágenes es una de las que más puede beneficiarse de las propiedades de la transformada wavelet, puesto que las imágenes de gran resolución demandan una gran cantidad de espacio en disco, lo que puede reducirse significativamente gracias a la DWT. Para conseguir este resultado se evalúa la DWT de una imagen dada fila por fila, despreciando en cada una de éstas los coeficientes menores que un cierto umbral determinado, de manera que se almacenan solamente los coeficientes de cada fila que están sobre este umbral, cuando se requiera reconstruir la imagen original simplemente se rellenará cada fila con tantos “ceros” como número de coeficientes despreciados y usando la DWT inversa se reconstruye la imagen original. También se puede analizar la imagen en diferentes bandas de frecuencia y reconstruirla usando sólo los coeficientes que pertenecen a una banda en particular.

Otro hecho de interés es realizar la descomposición no solamente en el lado del filtro paso bajo sino en ambas salidas de los filtros. En otras palabras, el análisis se realiza de manera independiente tanto en las bandas de baja como alta frecuencia, lo que puede visualizarse como una estructura en árbol con dos laterales, uno correspondientes a las salidas de los filtro paso bajo y otra a la salida de los filtros paso alto. Esta manera de procesar la información se denomina “wavelet packet”.

2.5. Aplicación de la CWT y DWT

A continuación se presentan varios ejemplos de cómo se podría observar el resultado final de la aplicación de la transformada wavelet, tanto la CWT como la DWT, sobre una señal no estacionaria como la que se muestra en la siguiente figura y que se corresponde con la señal presentada en el apartado 2.2 de este capítulo.

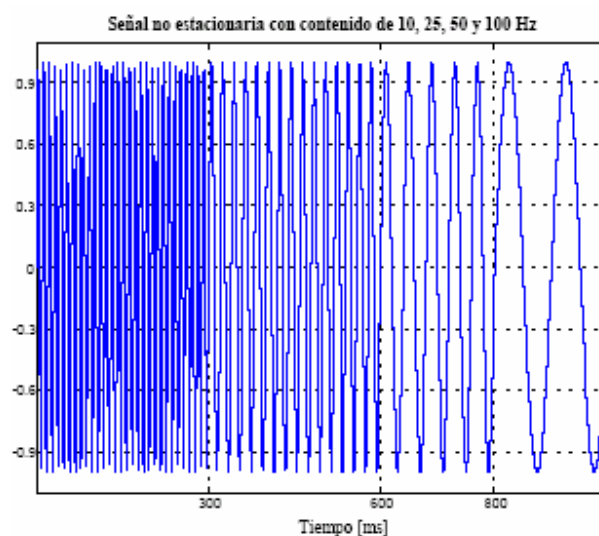


Figura 2-28 Señal no estacionaria de 10, 25, 50 y 100 Hz.

2.5.1. Aplicación de la CWT

En esta sección se explicará la ecuación que define la CWT (ecuación 2.5), siendo en este caso $f(t)$ la señal a analizar. La wavelet madre se elige entre un conjunto de funciones que se utilizan para este propósito (Morlet, sombrero mexicano, Daubechies, etc.), que cumplen en todo casi el papel de prototipo para todas las ventanas que participan en el proceso, puesto que todas estas ventanas son las versiones dilatadas (o comprimidas) y desplazadas de la wavelet madre.

Una vez que se ha elegido la wavelet madre el proceso de cálculo comienza con $s=1$ y la transformada wavelet continua se evalúa para todos los valores de s , menores y mayores que 1. Sin embargo, dependiendo de la señal, comúnmente no es necesario el cálculo completo de la transformada (todas las escalas), puesto que para la mayoría de los casos prácticos las señales tienen una banda limitada, por este motivo la evaluación de la transformada para un intervalo limitado de escalas es muchas veces suficiente.

Por razones de conveniencia, el proceso comienza a partir de la escala $s=1$ y continúa con valores crecientes de s , es decir el análisis parte desde las altas frecuencias hacia las bajas frecuencias. El primer valor de s corresponderá a la wavelet más comprimida y a medida que el valor de s se va incrementando la wavelet comenzará a dilatarse.

La wavelet se localiza al comienzo de la señal en el punto que corresponde a tiempo igual a 0. La función wavelet con escala $s=1$ se multiplica por la señal y se integra en todo el tiempo. El resultado de esta integración se multiplica luego por un valor constante $1/\sqrt{s}$; el fin de esta multiplicación es que la señal transformada tenga la misma energía en cada escala, por ello que esta constante actúa como normalización energética.

El resultado final de este proceso es el valor de la transformación, es decir, el valor de la transformada wavelet continua en el instante $t=0$ y para la escala $s=1$. En otras palabras, es el valor que corresponde para $\tau =0$ y $s=1$ en el plano tiempo-escala.

Posteriormente, la wavelet con escala $s=1$ es desplazada (τ) hacia la derecha hasta la localización $t=\tau$, y el proceso se repite a fin de obtener el valor de la transformada para $t=\tau$ y $s=1$ en el plano tiempo-frecuencia.

El procedimiento anterior se repite hasta que la wavelet alcanza el final de la señal, por lo tanto en esta etapa se habrá completado una fila de puntos en el plano tiempo-escala correspondiente a la escala $s=1$.

A continuación, se incrementa el valor de la escala s , como se está evaluando una transformada continua tanto τ como s deben incrementarse continuamente; sin embargo, si la transformada se evalúa por un computador entonces ambos parámetros se incrementan por un paso lo suficientemente pequeño, que corresponderá al muestreo del plano tiempo-frecuencia.

El proceso descrito anteriormente se repite para cada valor de s , con lo que se obtienen para cada s dado las correspondientes filas el plano escala-tiempo. Cuando el proceso se completa para todos los valores deseados de s la CWT de la señal ha sido finalmente obtenida. Las siguientes figuras muestran este proceso paso a paso.

En la primera figura se muestra la señal y la función wavelet para cuatro valores diferentes de τ (en el caso de las figuras la notación del desplazamiento es t_0). En este caso el valor de la escala es $s=0.0001$ que corresponde a la escala menor o a las frecuencias más altas. Es importante destacar lo compactas que son (figuras en rojo). Esta ventana debiera ser más angosta a medida que aumentan las componentes de alta frecuencia existentes en la señal. Las cuatro localizaciones distintas de la función wavelet se muestran en la figura en los instantes $\tau = 20$, $\tau = 500$, $\tau = 650$ y $\tau = 900$. En cada una de estas ubicaciones la función wavelet es multiplicada por la señal.

Obviamente, el producto es distinto de cero solamente en la zona de intersección entre la señal y la wavelet. Al desplazar la wavelet en el tiempo, la señal es localizada en el tiempo y al variar el valor de s la señal es localizada en escala (frecuencia). Si la señal tiene una componente espectral que corresponda a un determinado valor de s , el producto entre la wavelet y la señal en la localización donde existe esta componente espectral dará origen a un valor relativamente alto, por el contrario si la señal no tiene una componente espectral que corresponda a un determinado valor de s entonces este producto será prácticamente cero. La señal en la siguiente figura tiene componentes espectrales comparables con el ancho de las ventanas para $s = 0.0001$ y $t = 650$ ms.

La transformada wavelet continua de la señal reflejada en la siguiente figura, da como resultado valores altos para las escalas bajas en torno a los 600 ms. y valores pequeños en los demás casos. Por otro lado, para las escalas altas la transformada wavelet continua producirá valores altos para casi toda la duración de la señal, debido a la existencia de bajas frecuencias durante todo el tiempo.

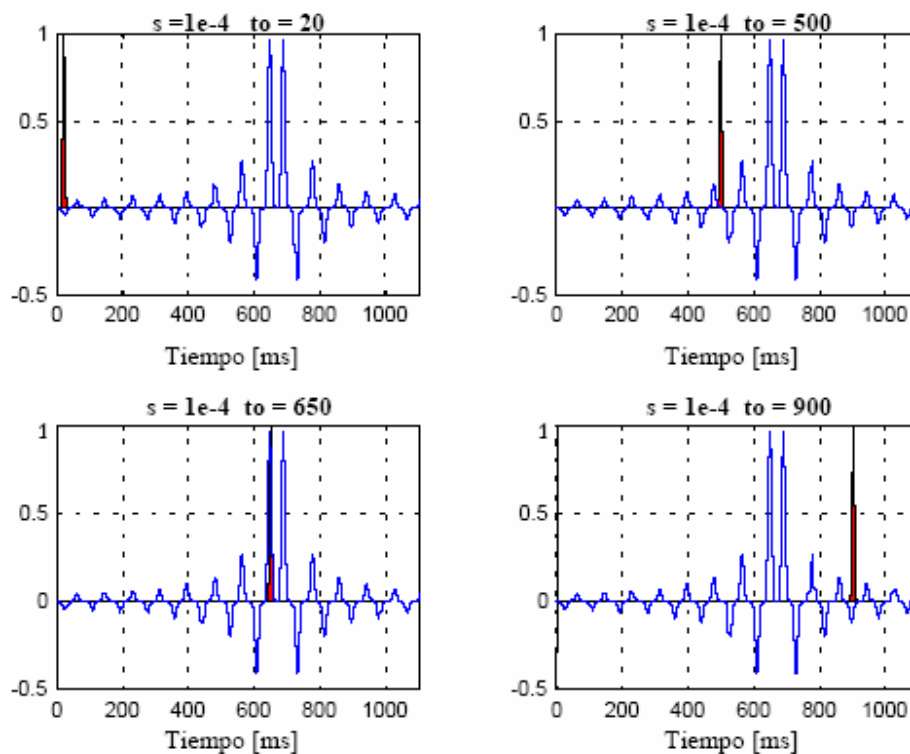


Figura 2-29 Forma de cálculo de la CWT para $s=0.0001$ y distintos valores de τ .

Las siguientes figuras muestran el mismo proceso para valores de s de 0.002 y 0.004, respectivamente. Se observa el cambio en el ancho de la ventana a medida que incrementa la escala (disminución de la frecuencia), al igual que al aumentar el ancho de la ventana, la transformada comienza a coger las componentes de bajas frecuencias.

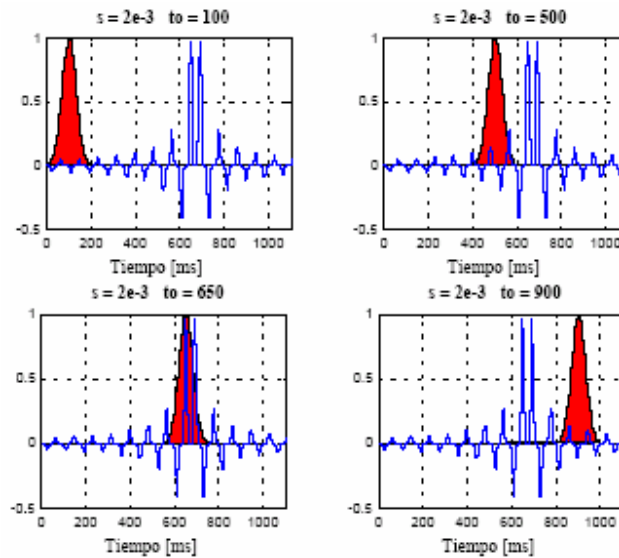


Figura 2-30 Forma de cálculo de la CWT para $s = 0.002$ y distintos valores de τ .

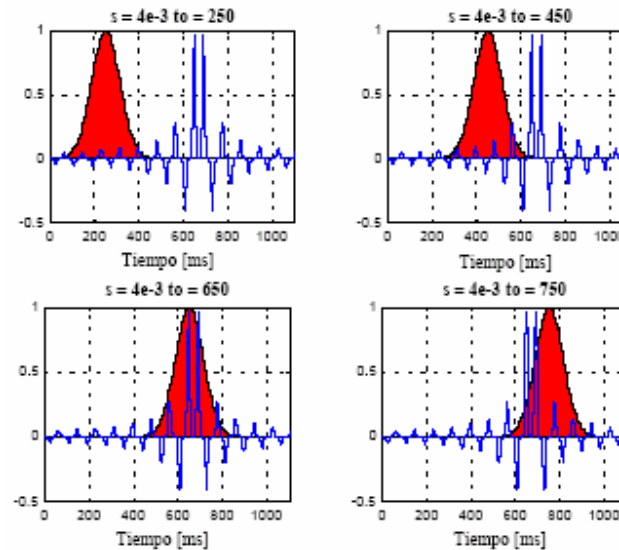


Figura 2-31 Forma de cálculo de la CWT para $s = 0.004$ y distintos valores de τ .

Como resultado, para cada escala y cada intervalo de tiempo se determina un punto del plano tiempo-escala. Los cálculos realizados con una escala dan origen a las filas del plano tiempo-escala y los cálculos realizados con diferentes escalas originan las columnas del plano tiempo-escala.

En la figura que se muestra a continuación (2.32), se muestra el resultado de la transformada wavelet continua de esta señal. Observe que los ejes están escalados y trasladados, no aparece el tiempo ni la frecuencia, pero la traslación está estrechamente ligada al tiempo, ya que indica donde está localizada la wavelet madre, considerando como tal, el tiempo que transcurre desde $t = 0$.

La escala se interpreta como el inverso de la frecuencia, es decir, todas las propiedades de la transformada wavelet respecto a la resolución en frecuencia aparecerán de manera inversa en las figuras que muestran la WT de una señal en el dominio del tiempo.

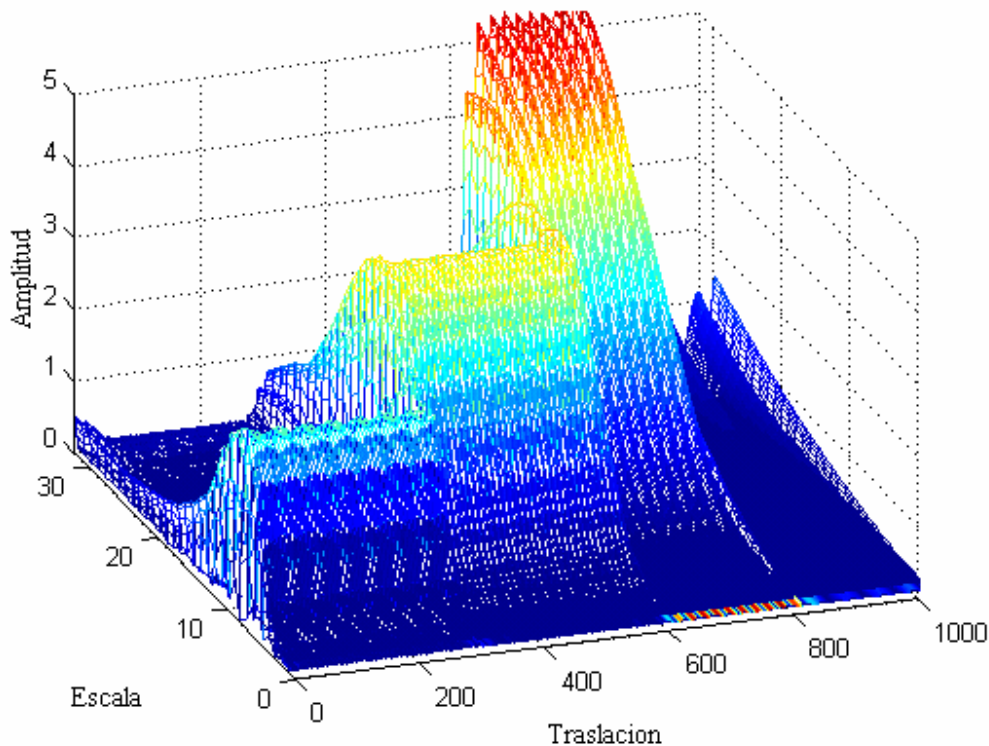


Figura 2-32 Transformada wavelet continua de la señal no estacionaria.

Además en esta figura, puede observarse que las escalas menores corresponden a frecuencias mayores, en otras palabras la frecuencia disminuye a medida que la escala aumenta, por lo tanto, las partes del gráfico con escalas cercanas a cero corresponderán a las altas frecuencias en el análisis y aquellas partes con escalas mayores corresponderán a frecuencias menores.

Nótese que la primera componente de la señal que tenía una frecuencia de 100 Hz. (la mayor frecuencia) aparece en las escalas menores y en una traslación entre 0 y 300, luego aparece la componente de 50 Hz. y así sucesivamente hasta la componente de 10 Hz. que aparece al final del eje de traslación y con altas escalas, es decir bajas frecuencias tal como se esperaba.

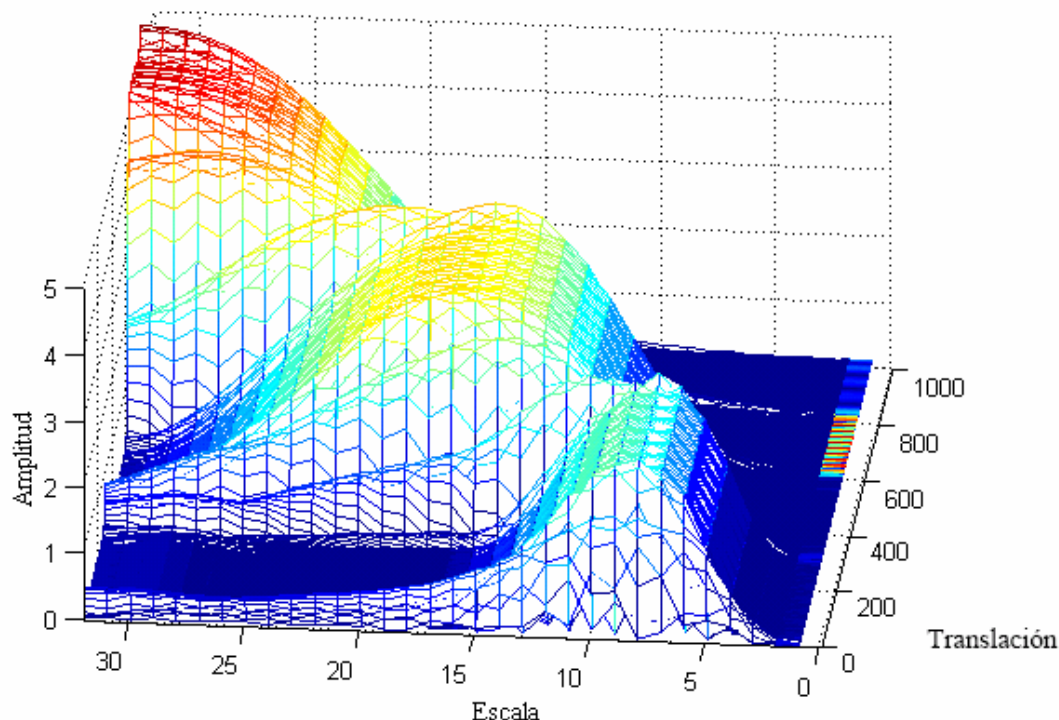


Figura 2-33 CWT de la señal girada para una mejor visualización.

Es posible interpretar estas propiedades de resolución de la siguiente manera. A diferencia de la STFT la que tiene una resolución constante para cualquier tiempo en frecuencia, la WT para las altas frecuencias tiene una buena resolución en el tiempo y una baja resolución en frecuencia, sin embargo para las bajas frecuencias sucede lo contrario, es decir la WT tiene una mala resolución en el tiempo y una buena resolución en frecuencia. En esta última figura, se observa que las escalas inferiores (altas frecuencias) tienen mejor resolución de escala, lo que corresponde a bajas resoluciones de frecuencia. Similarmente, las altas escalas tienen una resolución de frecuencia escalada, lo que contribuye a mejorar la resolución en frecuencias de las componentes de frecuencias más bajas.

2.5.2. Aplicación de la DWT

En este siguiente ejemplo, se observará gráficamente el proceso seguido en el desarrollo de la DWT. Supóngase que se desean obtener los coeficientes de la DWT a partir de 256 muestras de una señal muestreada a 10 MHz. Como la frecuencia de muestreo de la señal es de 10 MHz. la componente de mayor frecuencia que puede existir en la señal será de 5 MHz. En el primer nivel, la señal pasa a través de un filtro paso bajo $h[n]$ y un filtro paso alto $g[n]$ y a la salida de estos filtros se eligen uno de cada dos muestras de la señal lo que supone un submuestreo por 2. La salida del filtro paso alto es el primer nivel de los coeficientes de la DWT, que serán 128, la mitad de las iniciales, y representarán la señal entre [2.5, 5] MHz. Estas muestras, son las últimas 128 muestras calculadas. La salida del filtro paso bajo, que también tiene 128 muestras, pero abarcando la banda de frecuencias entre [0, 2.5] MHz., se sigue descomponiendo mediante los filtros $h[n]$ y $g[n]$. Así, la salida del segundo filtro paso alto es el nivel 2 de los coeficientes de la DWT y consta de 64

muestras que preceden los 128 coeficientes calculados en el nivel 1. Posteriormente, la salida del segundo filtro paso bajo se sigue descomponiendo usando una vez más los filtros $h[n]$ y $g[n]$, la salida del tercer filtro paso alto es el tercer nivel de los coeficientes de la DWT y consta de 32 muestras que preceden a los coeficientes de la DWT calculados en el nivel 2.

El proceso continúa hasta que solamente pueda evaluarse un único coeficiente de la DWT, en este caso en el nivel 9. Este último coeficiente es el primero que aparece registrado en el cálculo de la DWT, posteriormente estarían: 2 coeficientes del nivel 8, 4 coeficientes del nivel 7, 8 coeficientes del nivel 6, 16 coeficientes del nivel 5, 32 coeficientes del nivel 4, 64 coeficientes del nivel 3, 128 coeficientes del nivel 2 y finalmente 256 coeficientes del nivel 1. Observe que a medida que disminuye la frecuencia el número de muestras es cada vez menor, con lo cual la resolución en el tiempo disminuye, pero como el rango de frecuencias también se reduce, y la resolución en frecuencia aumenta. En la siguiente figura se visualiza gráficamente este procedimiento.

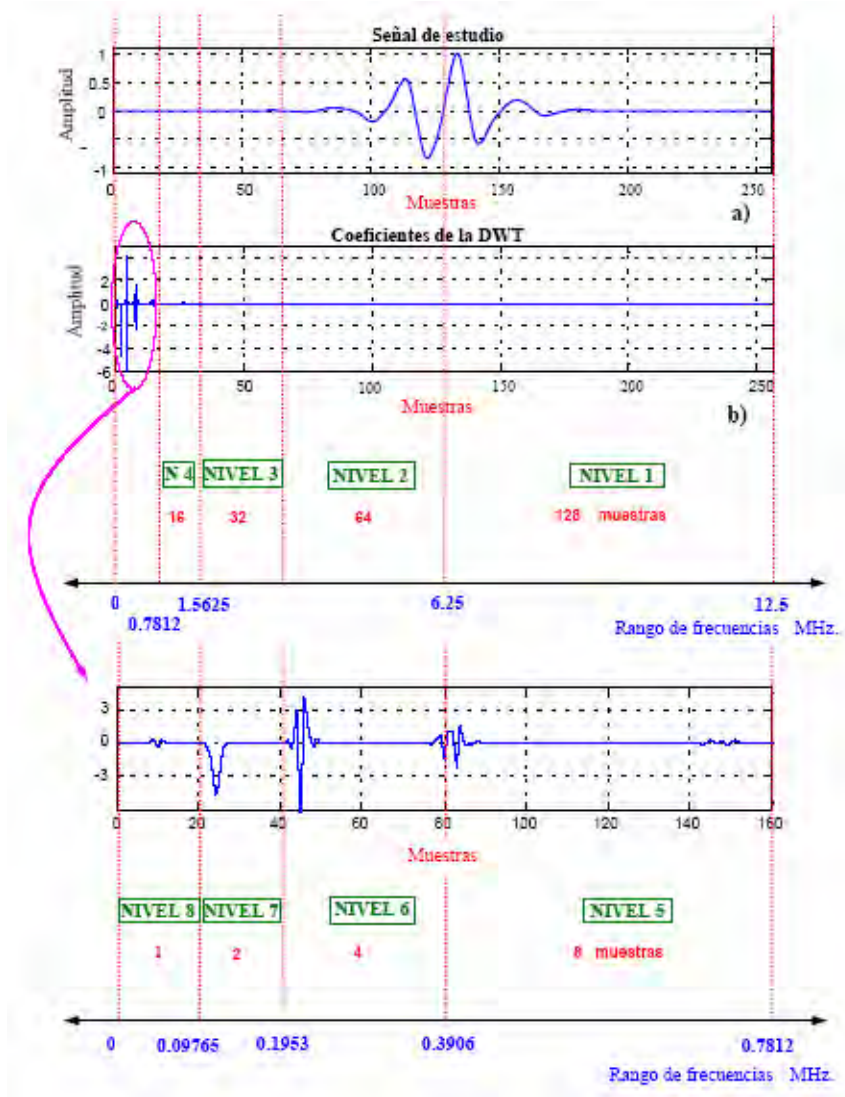


Figura 2-34 Ejemplo de interpretación de los coeficientes de la DWT.

En la parte **a** de la figura, se muestra la señal analizada la que consta de 256 muestras que han sido normalizadas a la unidad, el eje horizontal representa el número de muestras mientras que el eje vertical es la amplitud normalizada. La parte **b**, muestra los coeficientes de la DWT de la señal analizada, detallando los rangos de frecuencias correspondientes a cada nivel así como el número de muestras respectivo. Considerando el número máximo de niveles de descomposición; es decir 8 niveles ($2^8=256$), donde puede observarse que las últimas 128 muestras (nivel 1) corresponden a la banda de las mayores frecuencias de la señal, las 64 muestras (nivel 2) anteriores corresponden a las segundas mayores frecuencias y así sucesivamente hasta llegar al nivel 8 donde existirá una sola muestra. Es importante destacar el hecho que no es posible asociar un valor exacto de frecuencia a un determinado coeficiente de la DWT, sino que el razonamiento que se debe hacer es que al observar un determinado punto es posible asociar la banda de frecuencias en que aparece.

Para comprender mejor la representación de la DWT se describe a continuación el detalle de la señal real utilizada en ejemplo anterior, que corresponde a 256 muestras de una señal muestreada a 25 MHz., generada usando un transductor de 300 kHz., lo que por lo tanto constituye la principal componente del espectro de esta señal.

Las últimas 128 muestras (Nivel 1) que corresponden al rango de frecuencia entre [6.25, 12.5] MHz. indican, que no existe información en este intervalo, por lo tanto estas muestras pueden despreciarse, al igual que las 64 muestras (Nivel 2) que representan la señal entre los [3.125, 6.25] MHz., que tampoco tienen información significativa. Las siguientes 32 muestras (Nivel 3) representan la señal entre [1.5625, 3.125] MHz. como se observa tampoco existe información relevante, al igual que en las restantes 16 muestras (nivel 4) que corresponden al rango entre [0.7812, 1.5625] MHz. En el nivel 5 o en el rango de frecuencias [0.3906, 0.7812] se aprecian algunos coeficientes distintos de cero, que sin embargo podrían corresponder a ruido de alta frecuencia. Por lo tanto, se puede decir que la información útil de la señal está concentrada en los coeficientes de la DWT de los niveles 6 y 7, en otras palabras, la señal de 256 muestras se podría representar solamente con $4+2 = 6$ muestras, lo que significa una importante reducción de los datos que caracterizan a la señal.

A continuación se desarrolla otro ejemplo, con el objetivo de comparar los resultados obtenidos con la STFT aplicada a una señal no estacionaria de 10, 25, 50, 100 Hz., como la descrita en la **Figura 2.3**, y los que se obtienen de la aplicación de la DWT a esta misma señal.

En este caso la señal consta de 1024 muestras, muestreadas a una frecuencia de 1 KHz. La descomposición se realiza en 8 niveles. La figura muestra los coeficientes de la DWT, indicando las bandas de frecuencias de descomposición.

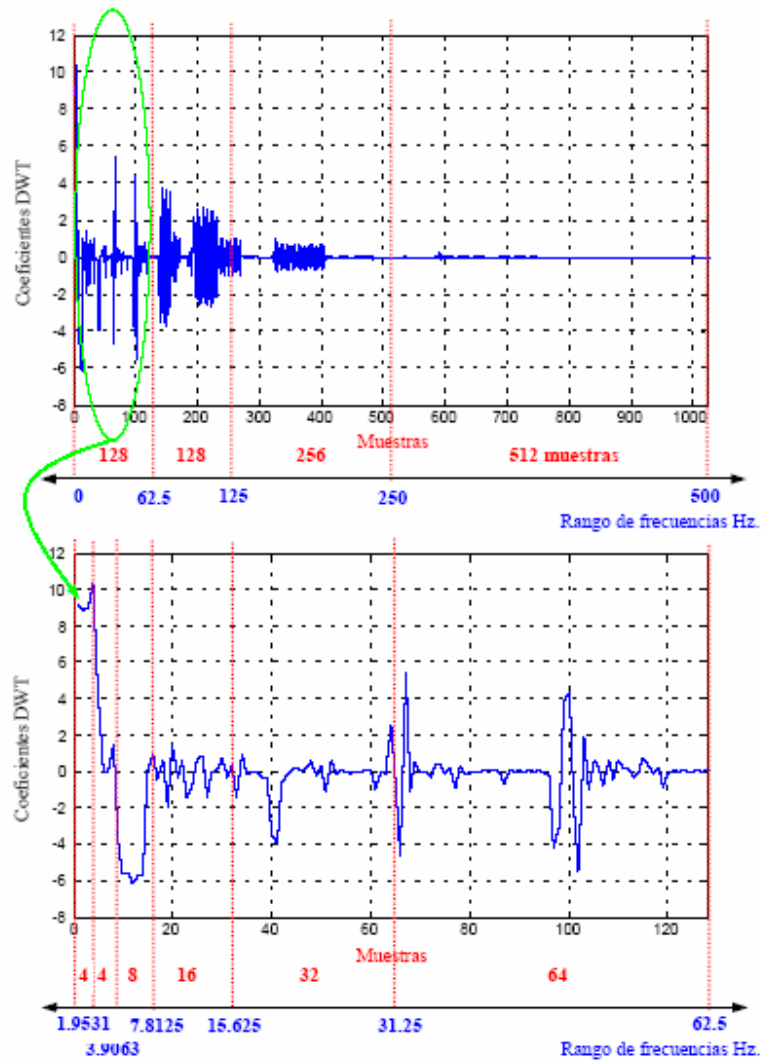


Figura 2-35 Coeficientes de la DWT de la señal no estacionaria.

En la siguiente figura se muestra el resultado de la DWT, donde puede observarse en primer lugar la señal original, a continuación la aproximación del nivel 8 y posteriormente los detalles correspondientes a cada uno de los 8 niveles considerados, a la derecha de los cuales se especifica el rango de frecuencias que aparecen en cada nivel. Como la señal tiene una frecuencia de muestreo de 1 kHz., la máxima frecuencia que se puede observar será de 500 Hz. (criterio de Shannon).

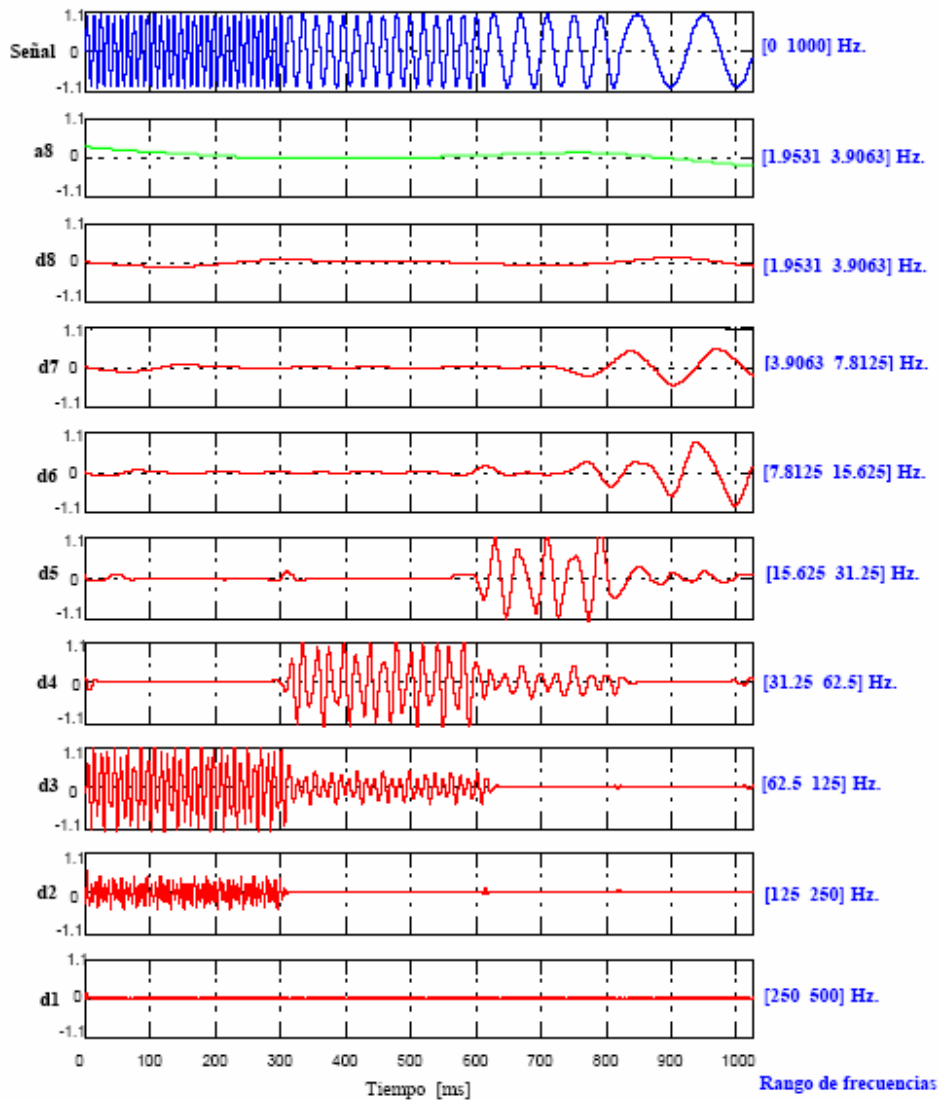


Figura 2-36 Detalles de la DWT de la señal no estacionaria.

Si pasamos a analizar la figura obtenida podemos deducir lo siguiente de cada uno de los niveles de resolución:

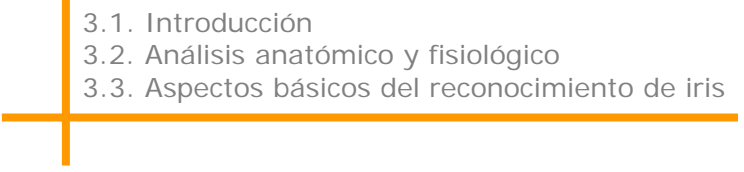
- El nivel 1 abarcará las frecuencias entre [250, 500] Hz., y tal como puede observarse en el detalle 1 no existe información relevante en este intervalo.
- El detalle 2 abarca las frecuencias entre [125, 250] Hz., donde se aprecian algunas magnitudes relativamente pequeñas, las que podrían corresponder al cambio brusco de frecuencias de la señal original.
- El detalle 3 abarca las frecuencias entre [62.5, 125], donde si se observa una magnitud importante en el rango temporal entre [0, 300] ms. puesto que en la señal original existe una componente de frecuencia de 100 Hz. en este intervalo.

- El detalle 4 abarca las frecuencias entre [31.25, 62.5] Hz. donde también puede observarse una magnitud importante en el rango entre [300, 600] ms. debido a la existencia en este intervalo de una componente de 50 Hz. en la señal original.
- En el detalle 5, que abarca las frecuencias entre [15.625, 31.25] Hz., se observa que entre los [600, 800] ms. existe una amplitud importante producto de la existencia de una componente de 25 Hz en la señal.
- Tal como era de esperar, en el detalle 6, que abarca las frecuencias entre [7.8125, 15.625] Hz., se aprecia que la señal tiene una componente importante de frecuencia en el intervalo entre [800, 1000] ms. que debiera corresponder a los 10 Hz. de la señal original.
- El nivel 7, [3.9063, 7.8125] Hz., parece mostrar una frecuencia importante en el último intervalo de tiempo de la señal, sin embargo, esto puede deberse a un problema de resolución debido a la cercanía con la componente de 10 Hz. de la señal original.
- Finalmente, en el detalle 8, que abarca las frecuencias entre [1.9531, 3.9063] Hz., no se observa ninguna amplitud importante.

Tal como se ha observado en el análisis de la figura, es posible realizar una interpretación tiempo-frecuencia con la información que entrega la DWT, es decir, conocer qué niveles de frecuencia existen en un determinado periodo de tiempo; sin embargo, como también se puede observar en la figura existe un problema de resolución, puesto que no es posible identificar un valor exacto de frecuencia en un intervalo de tiempo dado. Por ejemplo si se observa el detalle 3 se aprecia que en el intervalo de tiempo entre los [0, 300] ms. existe una componente de frecuencia en el rango entre los [62.5, 125] Hz. Pero no se puede conocer con exactitud el valor de esta frecuencia con la información de que se dispone (problema de resolución), sin embargo, si se muestreara la señal a una mayor frecuencia entonces sería posible descomponerla en un mayor número de niveles, para así obtener una mayor resolución en frecuencia y de este modo obtener un valor mas cercano a la componente real de frecuencia de la señal original, que en este caso era de 100 Hz.

Capítulo 3

Introducción a los sistemas de reconocimiento de iris

- 3.1. Introducción
 - 3.2. Análisis anatómico y fisiológico
 - 3.3. Aspectos básicos del reconocimiento de iris
- 

Capítulo 3 - Introducción a los sistemas de reconocimiento de iris

3.1. Introducción

En este trabajo se plantea el desarrollo de un sistema de reconocimiento de iris aplicaciones de reconocimiento de identidad en condiciones reales, para lo cual se trata de desarrollar un programa que haga un tratamiento de las imágenes de iris obtenidas en varias bases de datos.

Por esto tras haber obtenido una visión general tanto de los principios de funcionamiento de los sistemas biométricos, como de la teoría de tratamiento de señales que aborda la transformada wavelet, el siguiente punto consiste en abordar a fondo un estudio sobre el funcionamiento específico de los sistemas de reconocimiento biométrico de personas basados en el iris, desde el funcionamiento propio del iris como órgano, hasta la historia del reconocimiento de iris y sus fundamentos, tecnología y aplicaciones.

3.2. Análisis anatómico y fisiológico

En primer lugar, resulta necesario revisar convenientemente los fundamentos específicos del funcionamiento del iris como órgano en particular, además de conocer su disposición y misión dentro del órgano más complejo en el que se encuentra situado: el globo ocular.

El globo ocular, a través de sus estructuras recibe los estímulos luminosos externos, los codifica y transmite a través de la vía óptica al cerebro, lugar donde se produce el fenómeno de la visión. El ojo descansa sobre una cavidad ósea, en la mitad anterior de la órbita, rodeado de músculos extraoculares, grasa y tejido conectivo. Sólo está expuesta su parte más anterior, y está protegida por el reborde orbitario óseo.

Es un órgano esférico, de unos 7,5 g de peso. Su diámetro anteroposterior, transversal y vertical en el adulto normal es de unos 24 mm.; en los hipermetropes es menor, y mayor en los miopes. Estos diámetros varían con la edad; en el momento de nacer el eje anteroposterior del ojo mide unos 17 mm.

Capítulo 3 – Introducción a los sistemas de reconocimiento de iris

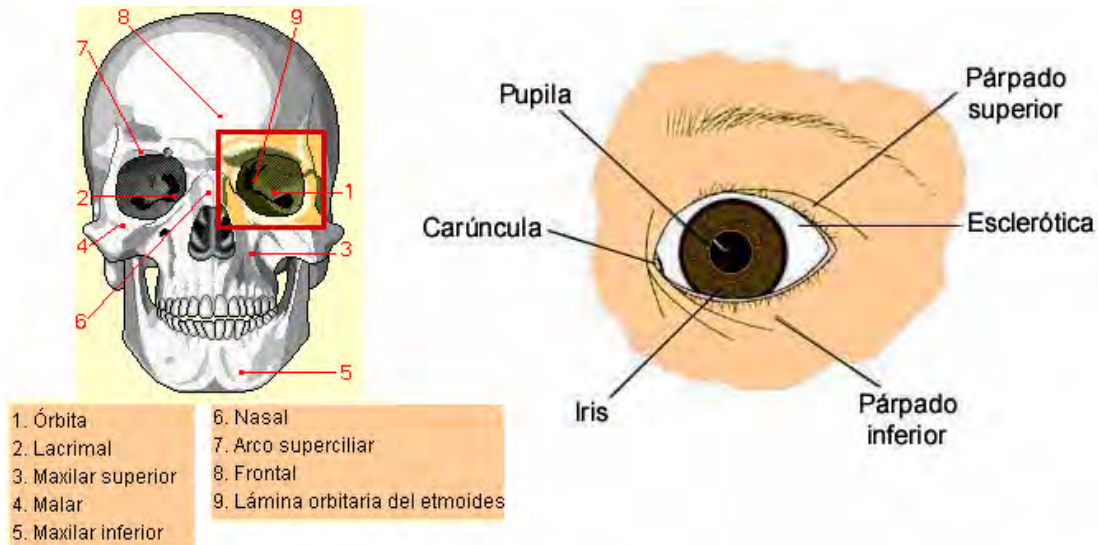


Figura 3-1 Localización en el cráneo del globo ocular [Lag00].

El diámetro anteroposterior del ojo normal, medido mediante ultrasonidos es de 22 a 26 milímetros de longitud.

La anatomía superficial se puede estudiar fácilmente por inspección directa, utilizando una linterna pequeña para iluminar y una lente de + 20 dioptrías para ampliar.

De forma irregularmente esferoidal, está formado por tres capas concéntricas tal y como se ve en la siguiente figura

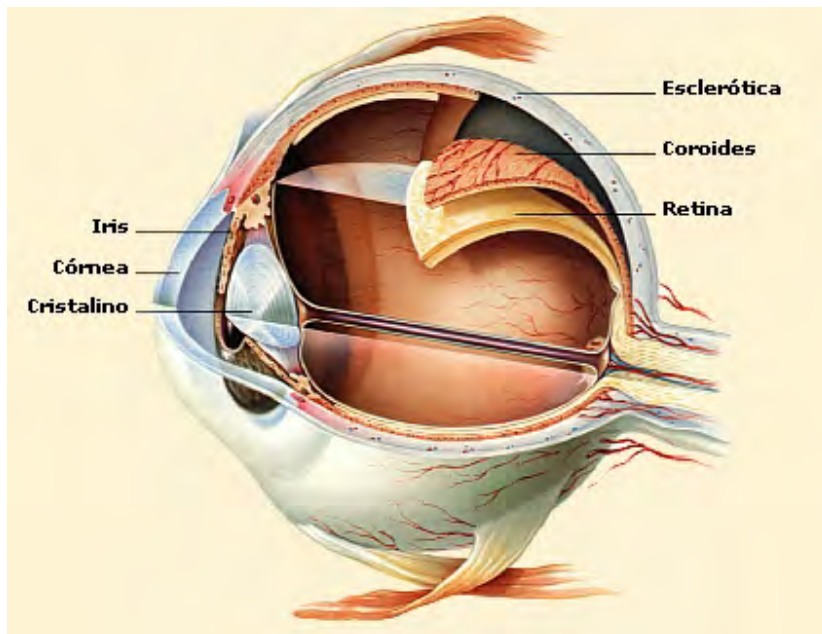


Figura 3-2 Capas del globo ocular [Lag00].

Capítulo 3 – Introducción a los sistemas de reconocimiento de iris

1. **Túnica externa:** formada por la córnea y la esclerótica.
2. **Túnica media o vascular:** úvea, formada por iris, cuerpo ciliar y coroides.
3. **Túnica interna:** formada por la retina.

En su interior se limitan unos compartimentos:

1. **Cámara anterior,** limitada por la cara posterior de la córnea por delante, y el diafragma iridopupilar por detrás. Está ocupada por humor acuoso y su volumen aproximado es de 0'2 ml.
2. **Cámara posterior:** Se encuentra entre el iris y la pupila por delante y la cara anterior del cristalino, con sus fibras zonulares (propias de la zona ciliar) por detrás, sin cuyo soporte el iris tiembla (iridodonesis), situación que se puede observar por ejemplo, en la afaquia y en las luxaciones cristalínicas. Está ocupada por humor acuoso (0'06 ml.).
3. **Cámara vítrea,** limitada por la cara posterior del cristalino, fibras posteriores de zónula y parte del cuerpo ciliar por delante y el resto por retina. Está ocupada por vítreo (4'5 ml.).

Su eje anteroposterior atraviesa una serie de estructuras transparentes cuya función es la de enfocar nítidamente las imágenes sobre la retina.

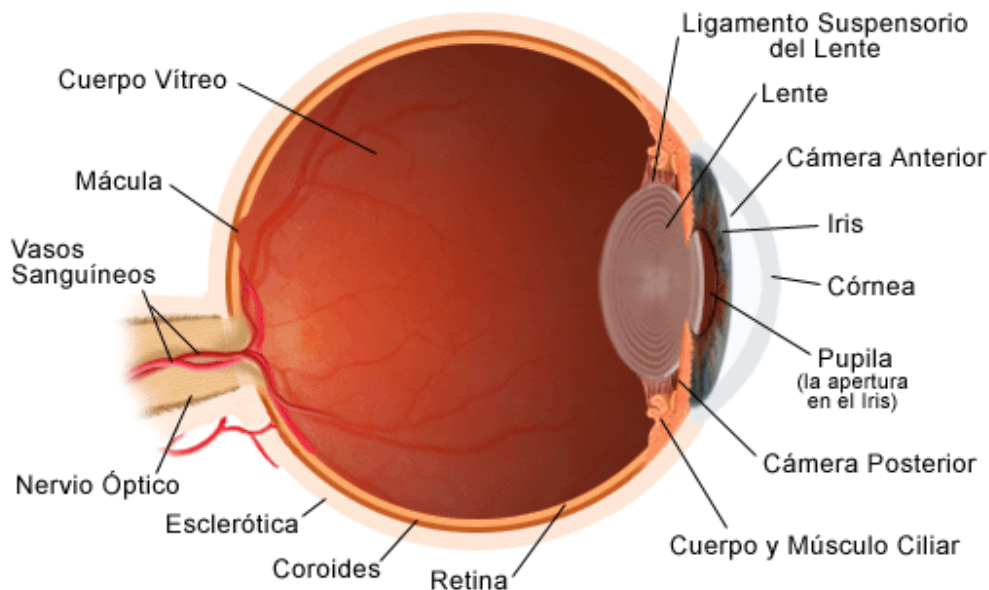


Figura 3-3 Sección del globo ocular.

Capítulo 3 – Introducción a los sistemas de reconocimiento de iris

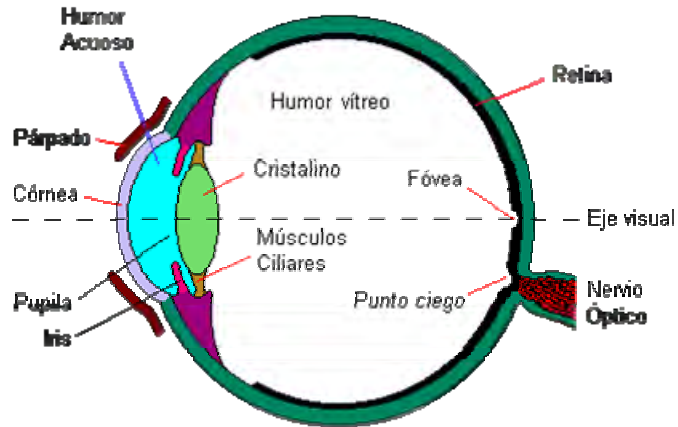


Figura 3-4 Esquema de la composición del globo ocular.

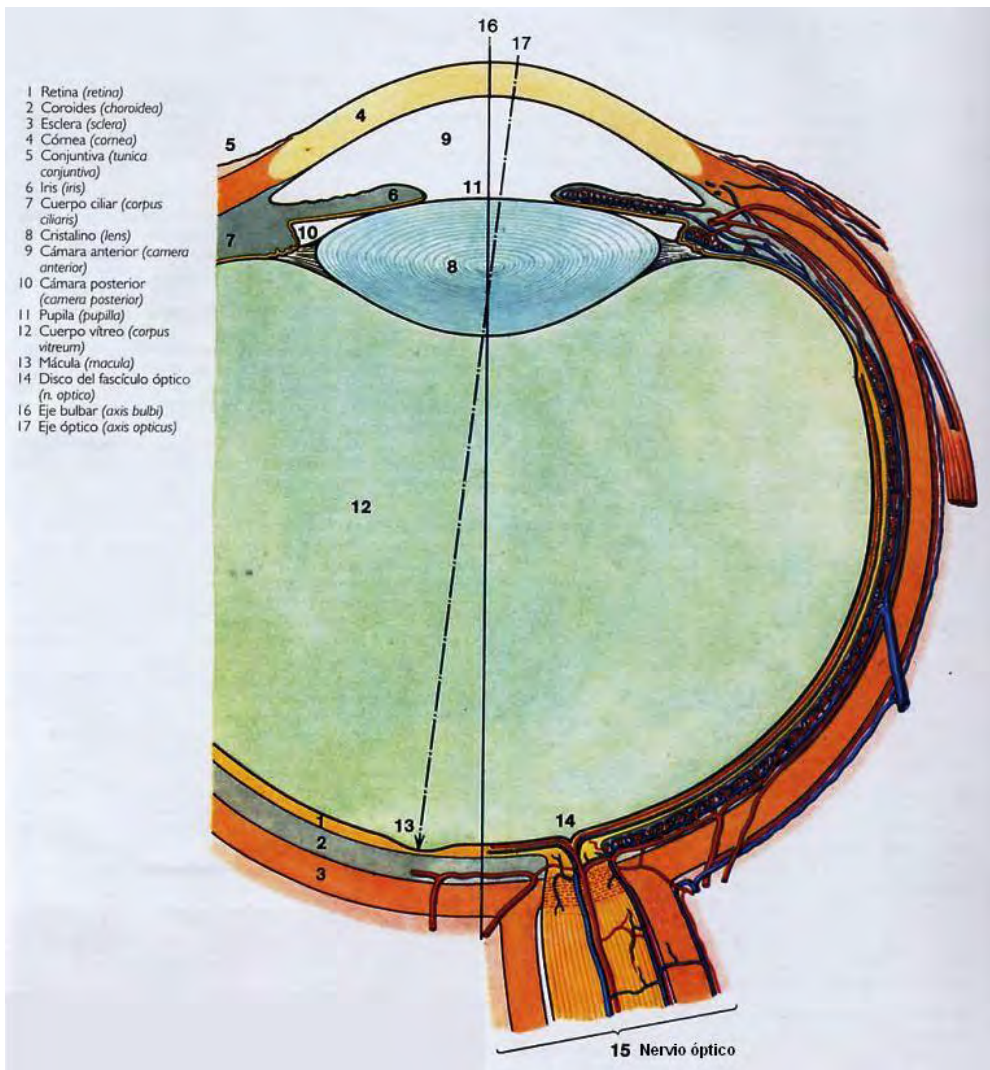


Figura 3-5 Corte horizontal del globo ocular.

3.2.1. Etapas de formación del Globo Ocular

Las etapas más significativas de la formación del ojo durante el desarrollo embrionario son las siguientes:

- 4 semanas (embrión de 6 mm. y 0,5 gramos aprox.): Se destacan ya las vesículas que darán lugar a los ojos.
- 5 semanas (embrión de 14 mm. aprox.): Los ojos comienzan a perfilarse.
- 2º mes (feto de 4 cm. y 5 gramos aprox.): Los ojos ya empiezan a destacarse, aunque no son más que unos pequeños huecos en el cráneo. Puede ya observarse la formación de los párpados, sobre el cristalino de los ojos, que a lo largo de los siguientes días, tomarán su forma ovalada. Los párpados superior e inferior están unidos y cerrados, no se abrirán hasta el séptimo mes.
- 5º mes (feto de 25 cm. y 250 gramos aprox.): Aparecen las cejas y las pestañas, que empiezan a cubrirse de un incipiente lanugo o vello.
- 7º mes (feto de 35 cm. y 1.200 gramos aprox.): Abre y cierra los ojos ya que los globos oculares están perfectamente formados y en disposición de cumplir sus funciones. Percibe la luz como un débil resplandor rojizo.
- 9º mes (feto de 45/50 cm. y 2.500/3.200 gramos aprox.): El proceso de formación anatómica ha concluido, y el dispositivo visual está completamente desarrollado, a excepción de la parte más importante de la Retina, que acaba su desarrollo a finales del primer año de vida del niño.



Figura 3-6 Vista general y detalle del globo ocular en el 2º mes del desarrollo embrionario [Lag00].

Capítulo 3 – Introducción a los sistemas de reconocimiento de iris

Este proceso de formación del globo ocular influye significativamente en la formación del iris y sus correspondientes características, que permiten el uso de este como rasgo biométrico.

El iris se forma a partir del borde de la copa de fibras ópticas primitiva, que brota durante el tercer mes de vida del embrión. El iris se estabiliza durante el octavo mes de gestación, y se mantiene estable durante la vida completa de una persona, con la salvedad de cambios producidos en la pigmentación, que implican un cambio de color pero en ningún caso estructural

Por esto, tras nacer, es característico el color del iris, que suele ser de un gris azulado, hasta alcanzar su coloración definitiva, durante el primer año, cuando las estructuras que aportan la unicidad característica del iris ya se han terminado de formar, y no cambiarán durante el resto del ciclo vital de la persona. Las estructuras formadas, son aleatorias y no responden a ningún patrón genético, ya que el único factor influido por la genética es la pigmentación del iris, factor que no influye en el desarrollo del sistema biométrico basado en las características propias del iris.

3.2.2. Descripción de las capas del Globo Ocular

Las diferentes capas que componen el globo ocular se encuentran agrupadas en 3 tónicas tal y como se aprecia en el siguiente esquema:

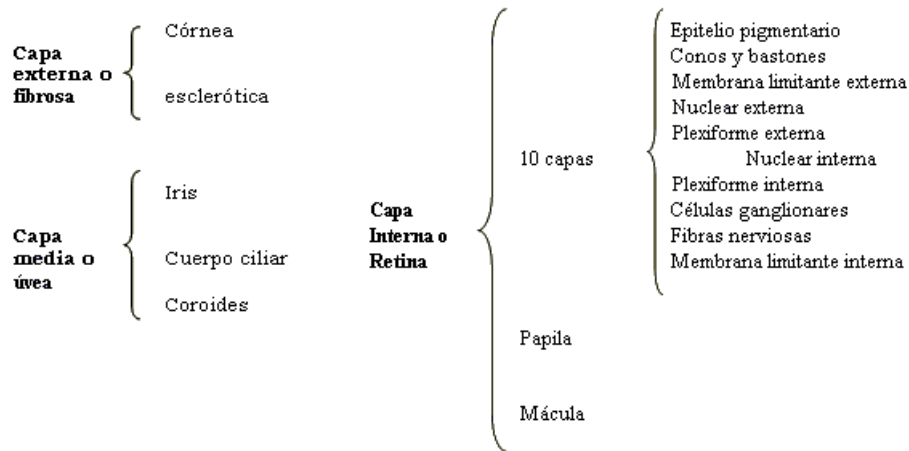


Figura 3-7 Esquema de la composición de las diferentes capas del globo ocular.

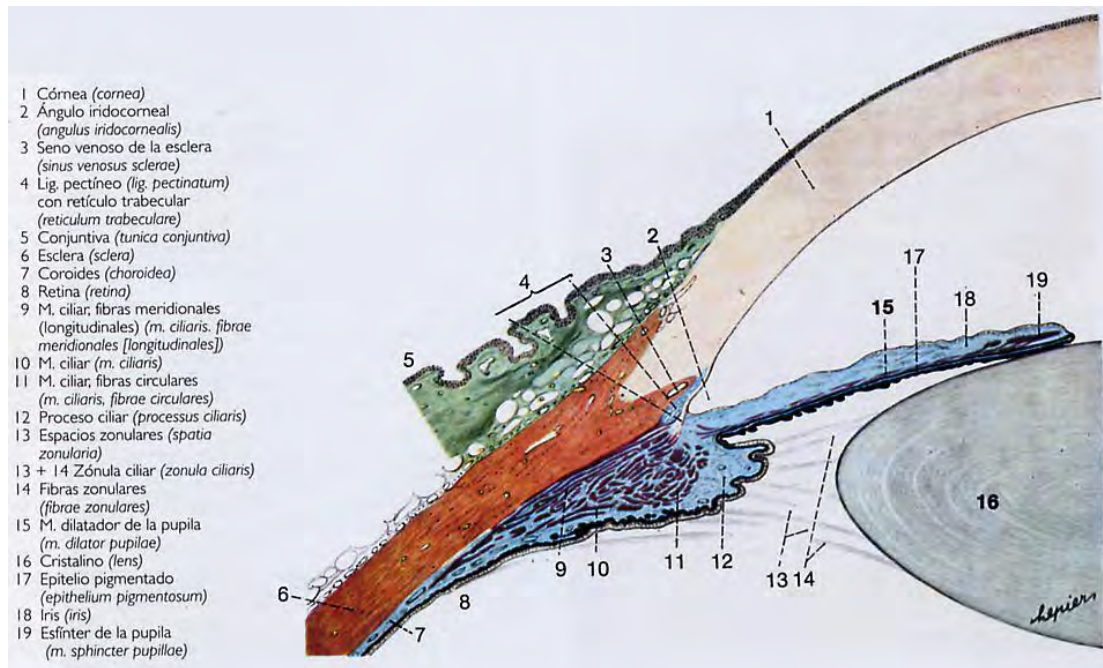


Figura 3-8 Corte del segmento anterior del ojo

3.2.2.1. Túnica externa o fibrosa

Esta túnica es la de mayor consistencia, dándole al globo ocular su forma constante y contribuyendo al mantenimiento de la presión intraocular. Está constituida por la córnea y la esclerótica.

Córnea

La córnea es un tejido transparente, casi invisible, que recubre la capa más anterior del ojo siendo la continuación de la esclera, cubriendo a su vez el iris del ojo y sus dos funciones son transmitir y refractar la luz que entra en el ojo.

Separa el aire con un índice de refracción de 1 y el humor acuoso con un índice de 1.33 constituyendo la principal estructura refractante del ojo, ya que proporciona gran parte del poder refractivo necesario para enfocar la luz en la retina, comportándose como una lente convergente con un poder refractivo de aproximadamente 42 dioptrías (unidad de medida del poder convergente de una lente, que corresponde a la distancia focal de un metro), constituyendo un total de dos tercios del poder refractivo necesario.

También actúa como estructura protectora de tejidos y humores intraoculares. Presenta una cara anterior convexa, recubierta constantemente por la película lagrimal, y una cara posterior bañada por el humor acuoso, que constituye la pared anterior de la cámara anterior del ojo.

Es ligeramente ovalada con un diámetro medio de 11 a 12 mm., y un grosor de unas 500 μm en su parte central y 670 μm , aproximadamente, en la periferia.

La constitución tisular de las cinco capas que componen la cornea, es de fuera adentro:

- **El epitelio anterior;** es plano, poliestratificado y no queratinizado. El estrato superficial renueva constantemente sus células. Es uno de los tejidos que se renueva más rápidamente, pudiéndose recuperar una erosión puntal en unas tres horas y una erosión más profunda en pocos días. La reparación de esta capa es siempre completa.
- **La membrana de Bowman;** es una capa constituida por fibras de colágeno y sustancia fundamental, que supone matriz translúcida que rodea a células y fibras conjuntivas. Este componente constituye un gel semisólido, bioquímicamente complejo y altamente hidratado. Su grosor medio oscila entre las 8 y 14 micras, siendo más delgada en su periferia. Posee escasa capacidad regenerativa, lo que produce en ocasiones la aparición de puntos secos y pequeñas rupturas, debido a la incapacidad del epitelio para ser humedecido adecuadamente por la película lagrimal.
- **El estroma;** con un grosor de 500 micras constituye el 85-90% del espesor total de la cornea. Está compuesto por laminillas de colágeno, sustancia fundamental y fibroblastos (queratocitos). La disposición de estos elementos es muy rigurosa, lo que contribuye a la transparencia corneal y a la alta calidad como superficie óptica junto con la tasa de hidratación y la ausencia total de vasos. El contenido normal de agua en la córnea es de un 78% en peso. Una rotura de las capas del epitelio o endotelio y/o sus membranas de soporte conduciría a la penetración de agua en el estroma y a la aparición de edema corneal. Un mecanismo activo de bombeo en las células del endotelio trabaja para eliminar dicha agua. El tejido estromal proporciona una gran elasticidad y resistencia.
- **La membrana de Descemet;** es una estructura acelular formada por fibras de colágeno dispuestas en estratos. Actúa como membrana basal, es decir una capa de naturaleza fundamentalmente colágena que se encuentra en la base de los epitelios y funciona como soporte y filtro fisiológico del endotelio. Su grosor aumenta con la edad y es la más resistente de las capas corneales.
- **El endotelio corneal;** está formado por una única capa de células hexagonales y aplanadas. Su sustitución se realiza por extensión de las células vecinas y no por división, motivo por el cual su número decrece con la edad, inflamaciones, cirugía y traumatismos. Su principal función es el transporte de sustancias osmóticamente activas y mantenimiento del balance hídrico junto al epitelio.

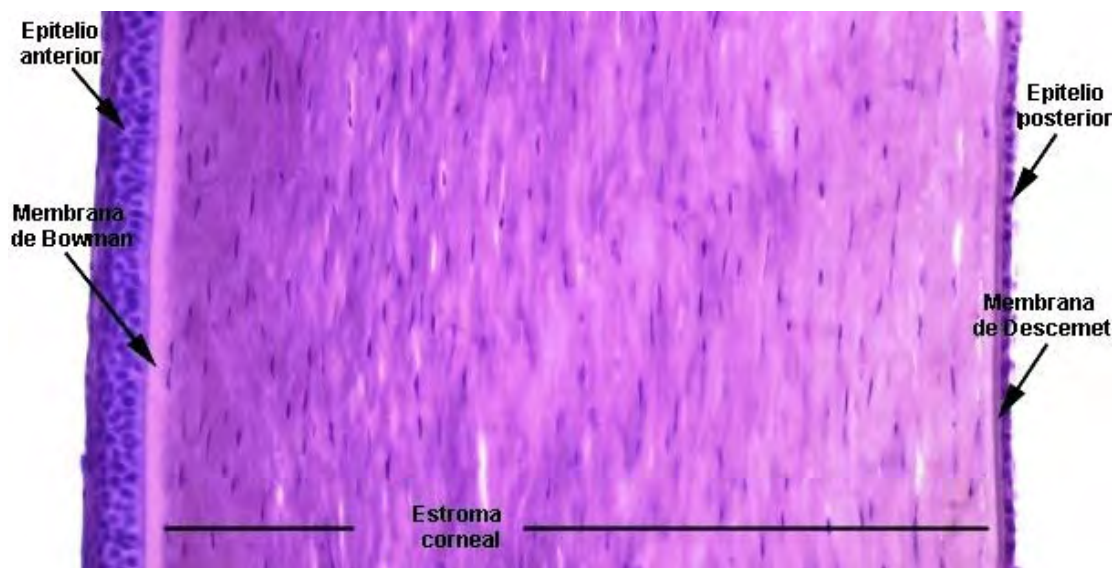
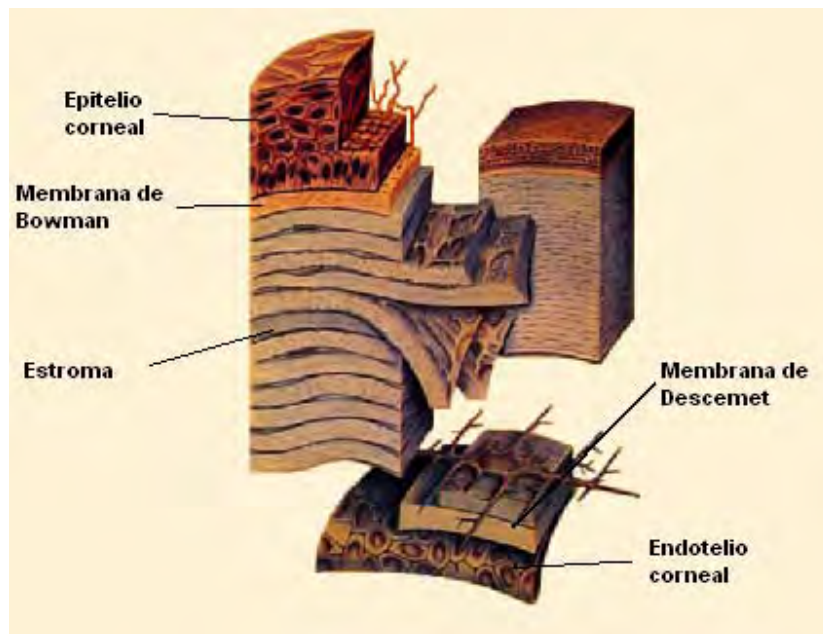


Figura 3-9 Esquemas de la composición de la córnea.

Esclerótica

La esclera (esclerótica), constituye las tres cuartas partes de la superficie del globo ocular. Es de color blanquecino y está formada por haces conjuntivos con fibras elásticas muy resistentes, a lo que debe el globo ocular su consistencia (cápsula protectora, el verdadero esqueleto del ojo). Es una membrana fibrosa muy resistente que protege los tejidos intraoculares. Soporta la tensión de los músculos intraoculares y contribuye a mantener la forma y tono muscular.

Está formada por:

- **Episclera**, capa de tejido conjuntivo situada en la parte más superficial de la esclerótica. Proporciona gran parte del suministro nutritivo, es permeable al agua, la glucosa y las proteínas. Es gruesa y muy vascularizada.
- **Estroma escleral**, es la más gruesa y realiza la función de protección. Está compuesta por haces colágenos que varían de tamaño.
- **Lámina fusca**, es una capa fibrosa de color marrón compuesta de pequeñas fibras de colágeno. Está situada en la parte posterior y es atravesada por un gran número de perforaciones, que permiten el paso de los filetes del nervio óptico y los vasos centrales de la retina.

Su espesor mínimo (0.3 mm.) se encuentra inmediatamente posterior a la inserción de los músculos rectos. Su radio de curvatura es de 13 mm. aproximadamente.

Su cara interna se encuentra separada de la membrana coroides por la lámina fusca, una capa de tejido conjuntivo laxo y pigmentado situado entre la esclerótica y la membrana coroides, y la epicoroides, constituida por tejido laxo situado entre la esclerótica y la coroides, más interiormente. Su cara externa, de aspecto blanquecino, presenta en su porción media la inserción de los músculos oculomotores. Su porción posterior se encuentra perforada por el nervio óptico y por la entrada y salida de los vasos sanguíneos y nervios ciliares cortos. En sus porciones laterales se encuentran las cuatro venas vorticosas y las arterias y venas ciliares anteriores. Finalmente, en su porción anterior se continúa con la córnea mediante una zona de transición: el limbo esclerocorneal.

La esclera se encuentra cubierta por una capa densa de tejido conjuntivo denominada cápsula de Tenon, con gran cantidad de fibras elásticas. Entre ambas se encuentra la episclera, tejido flojo muy vascularizado.

Está constituida por fibras de colágeno y fibras elásticas, agrupadas en fascículos en distintas direcciones que junto a la alta hidratación que posee hace que no sea transparente. La ordenación se va haciendo más regular a medida que llega al limbo esclerocorneal. Se nutre principalmente a partir de la episclera y coroides al ser avascular.

Como se comentó anteriormente, la episclera es un tejido laxo vascularizado que cubre la esclera, reaccionando intensamente a la inflamación de ésta. La vascularización posterior depende de los vasos ciliares posteriores cortos, mientras que la vascularización anterior que depende de las arterias ciliares anteriores forma una red formada por varios filamentos nerviosos y vasculares entrelazados, denominada plexo¹³ episcleral denso anterior a la inserción de los músculos extraoculares.

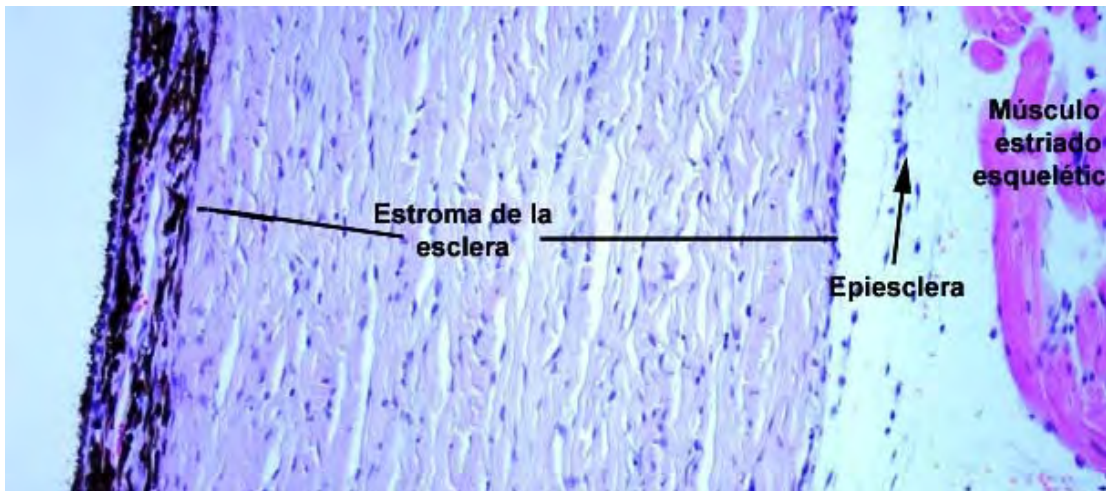


Figura 3-10 Esquema de la composición de la esclerótica.

Limbo esclero-corneal

Se trata de una zona especial de transición entre la esclera y la córnea, y forma la pared externa del ángulo que forman la córnea, el iris y la esclera en la periferia de la cámara anterior, denominado ángulo iridocorneal. A este nivel existen estructuras de drenaje de humor acuoso, además de ser zona de abordaje quirúrgico para determinadas técnicas.

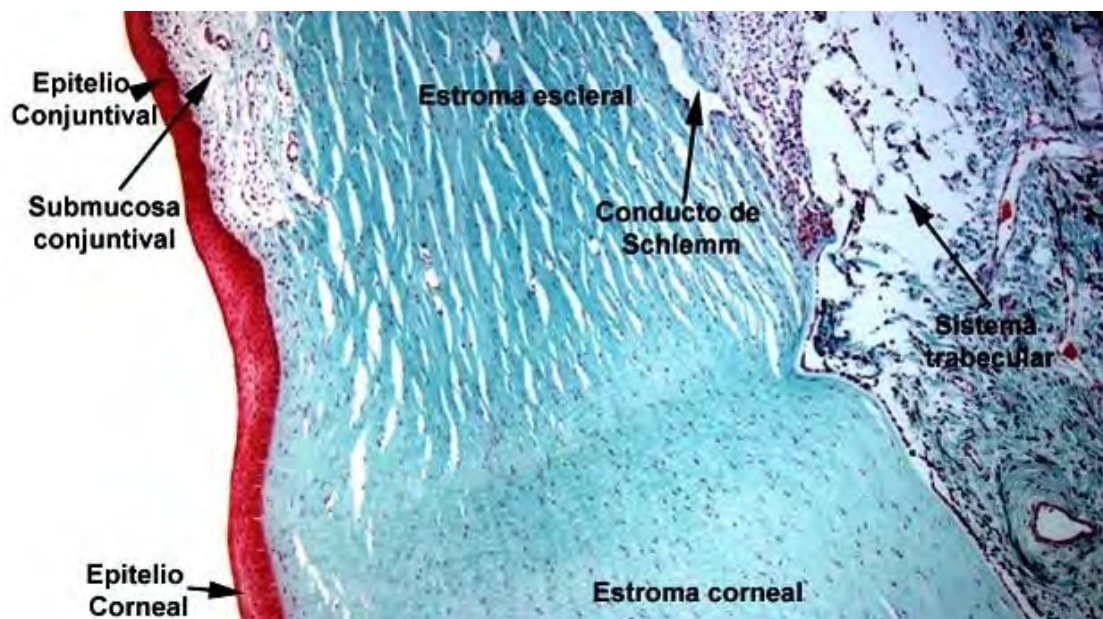


Figura 3-11 Esquema de la composición del limbo esclero-corneal.

3.2.2.2. Túnica media o vascular

Denominada úvea, consta de tres porciones bien diferenciadas:

- Iris.
- Cuerpo ciliar.
- Coroides.

Las dos primeras integran la úvea anterior, y la coroides constituye la úvea posterior.

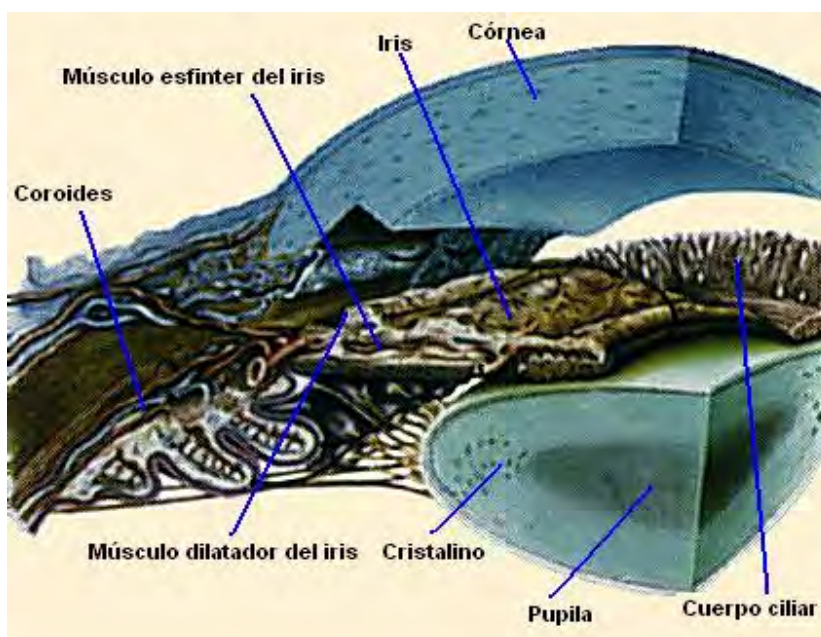


Figura 3-12 Esquema de las partes de la tónica media o vascular [Lag00].

Iris

Sin duda alguna la parte que más importancia tiene en el desarrollo del sistema que aborda este proyecto, la constituye la porción más anterior de la úvea: el iris. La primera parte del análisis de un sistema de reconocimiento de iris, implica conocer y entender el componente biológico de este órgano.

La anatomía del ojo imita fielmente al trabajo de una cámara, con el iris altamente pigmentado haciendo el papel de obturador y variando su apertura en función de la cantidad de luz, mayor o menor, necesaria en cada momento que atravesará la lente. Situada detrás de la córnea y el humor acuoso, el iris es un órgano interno, pero a la vez visible desde el exterior. A pesar de que los patrones detallados del tejido del iris varían de persona a persona, algunos rasgos anatómicos son comunes. Por ejemplo, en la zona media del iris aparece una región en zigzag, larga y circular, denominada *collarete*, un reborde circular que marca el sitio del círculo vascular menor del iris. Dispuesto alrededor del radio circular del iris y combinándose con el *collarete*, se encuentran a menudo dispuestas diversas *crestas* ligeramente elevadas. Finalmente encontramos algunas áreas oscuras de estructura

Capítulo 3 – Introducción a los sistemas de reconocimiento de iris

oval, y de relativamente profundo relieve, que se denominan *criptas de Fuchs*, que se forman en la red de colágeno del estroma, que sostiene la estructura global del iris.

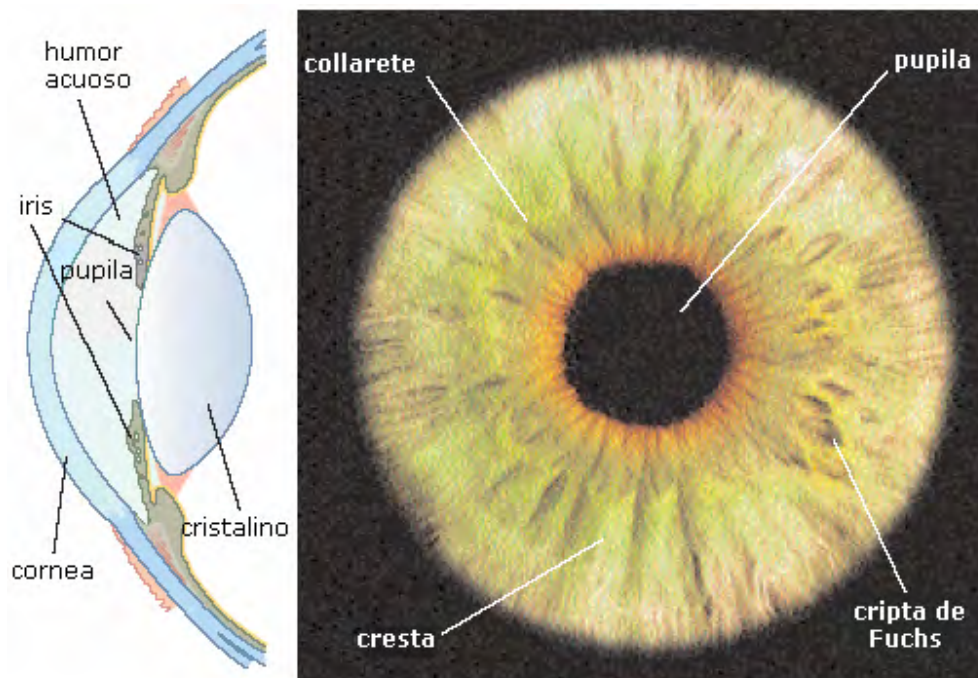


Figura 3-13 Anatomía de la zona y detalles de los rasgos anatómicos del iris.

De acuerdo con la Interactive Britannica encyclopedia del año 2000 el iris es:

“... una cortina de fibra muscular pigmentada situada en la parte frontal del ojo, entre la córnea y el cristalino, perforada por una apertura denominada pupila. El iris consta de dos láminas de músculo liso con propiedades contrarias de expansión y contracción. Estos músculos controlan el tamaño de la pupila y de este modo determinan la cantidad de luz que alcanza el tejido sensorial de la retina. El esfínter de la pupila es un músculo circular que estrecha la pupila en condiciones de luz brillante; el músculo dilatador de la pupila expande la abertura de la pupila al contraerse. La cantidad de pigmento contenido en el iris determina el color del ojo. Cuando hay poca cantidad de pigmentación, el ojo es azul, y a medida que aumenta la pigmentación acaba alcanzado niveles cromáticos marrones oscuros o incluso negros.”

El iris se localiza en el centro del ojo, limitado por la pupila y el limbo, justo dentro de la concentración circular de las arterias que confluyen en el ojo como se ve en esta figura:

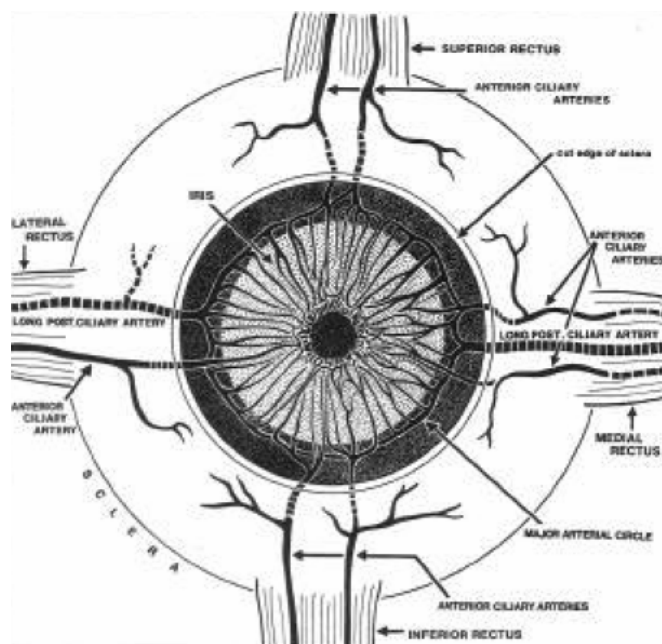


Figura 3-14 Anatomía muscular y situación del iris.

El iris no es un disco plano sino que tiene forma tridimensional, más concretamente se asemeja a un cono plano truncado. Esta forma se debe a su posición en el cristalino, que tiene forma convexa. No es una estructura simétrica, dado que la pupila se localiza ligeramente hacia la zona nasal respecto al centro de la cornea. Como se verá posteriormente este factor, es un punto importante dentro del análisis de las imágenes y concretamente en la localización de la zona propia del iris.

Se encuentra rodeado por el humor acuoso, por lo cual se produce un efecto en el que su dimensión parece ampliada en aproximadamente 8 veces su tamaño real cuando se mira de frente. El humor acuoso es un líquido de aspecto similar al agua con propiedades alcalinas, que ocupa las diferentes cámaras que se disponen entre las tunicas del ojo. Su composición es parecida a la del plasma de la sangre pero con una concentración mucho menor de proteínas, menos glucosa, más ácido láctico, y mucho más ácido ascórbico. Se produce mediante la filtración de sangre a través de la superficie posterior del iris y de la estructura muscular que controla la curvatura del cristalino. Sale del ojo a través de un tejido poroso hacia un pasillo en forma de anillo alrededor de la esquina exterior de la cámara anterior, desde el cual, el líquido entra en las venas.

Presenta la forma de un disco perforado en su centro por un orificio circular; la pupila, en situación perpendicular al eje anteroposterior del globo. Su cara anterior constituye con la pupila, la pared posterior de la cámara anterior del ojo. La superficie anterior del iris está dividida por el collarete en una zona pupilar central y una zona ciliar periférica.

En las siguientes figuras se pueden observar la disposición del iris dentro del globo ocular, así como sus límites y uniones, además de las partes diferenciadas del iris y un esquema de las capas del mismo y su composición.

Capítulo 3 – Introducción a los sistemas de reconocimiento de iris

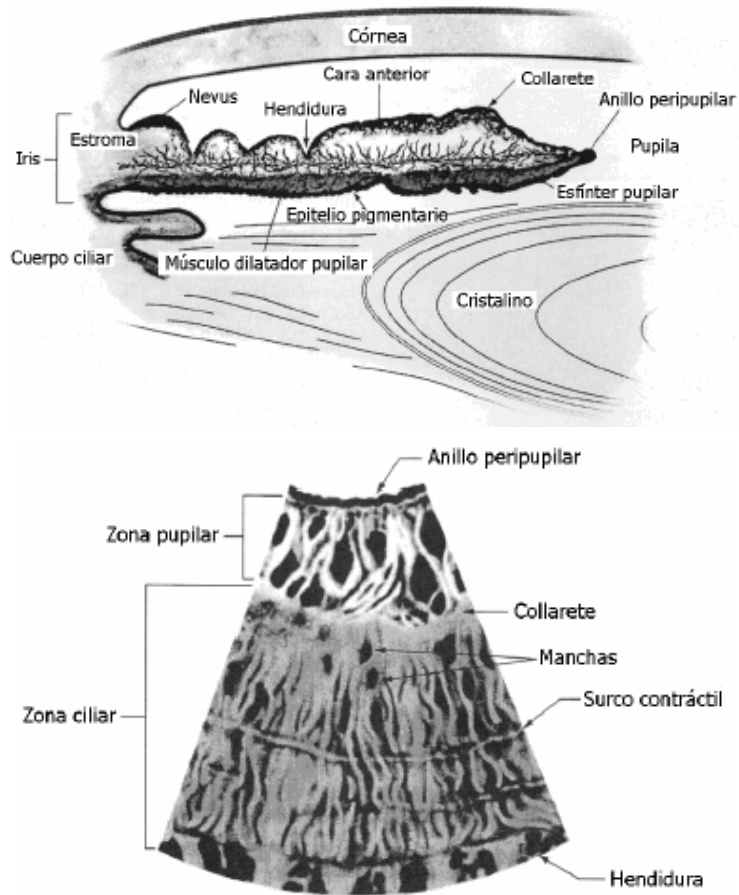


Figura 3-15 Corte transversal y vista superior (frontal).

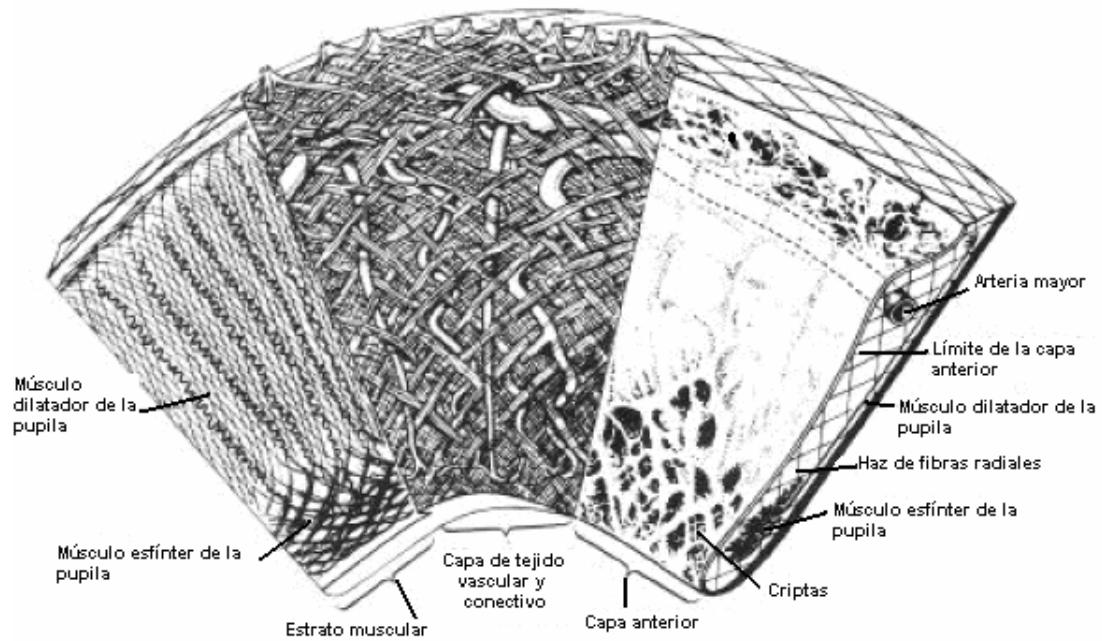


Figura 3-16 Esquema de la disposición de las diferentes capas del iris.

Capítulo 3 – Introducción a los sistemas de reconocimiento de iris

La pupila constituye un orificio de tamaño variable, cuyo diámetro normal se considera comprendido entre 2 y 4 mm., pudiendo alcanzar 8 mm. en dilatación (midriasis) máxima y 0.5 mm. en contracción (miosis) máxima, controlando así la cantidad de luz que penetra del ojo, actuando a modo de diafragma. La base o raíz del iris se inserta sobre el cuerpo ciliar, siendo a este nivel mínimo su espesor lo que explica la especial debilidad ante traumatismos que pueden provocar su desinserción (iridodialisis).

La función principal del iris es la de regular la cantidad de luz que permite alcanzar la pupila, para lo cual se ajusta el tamaño de la pupila, para lo cual el iris varía su tamaño desde completamente relajado, hasta completamente contraído. Cuando esta completamente contraído, es aproximadamente un 13%, de su tamaño normal en relajación. Estas acciones se producen cuando la cantidad de luz externa varía.

El iris contiene células pigmentadas y musculares y consta de cuatro capas:

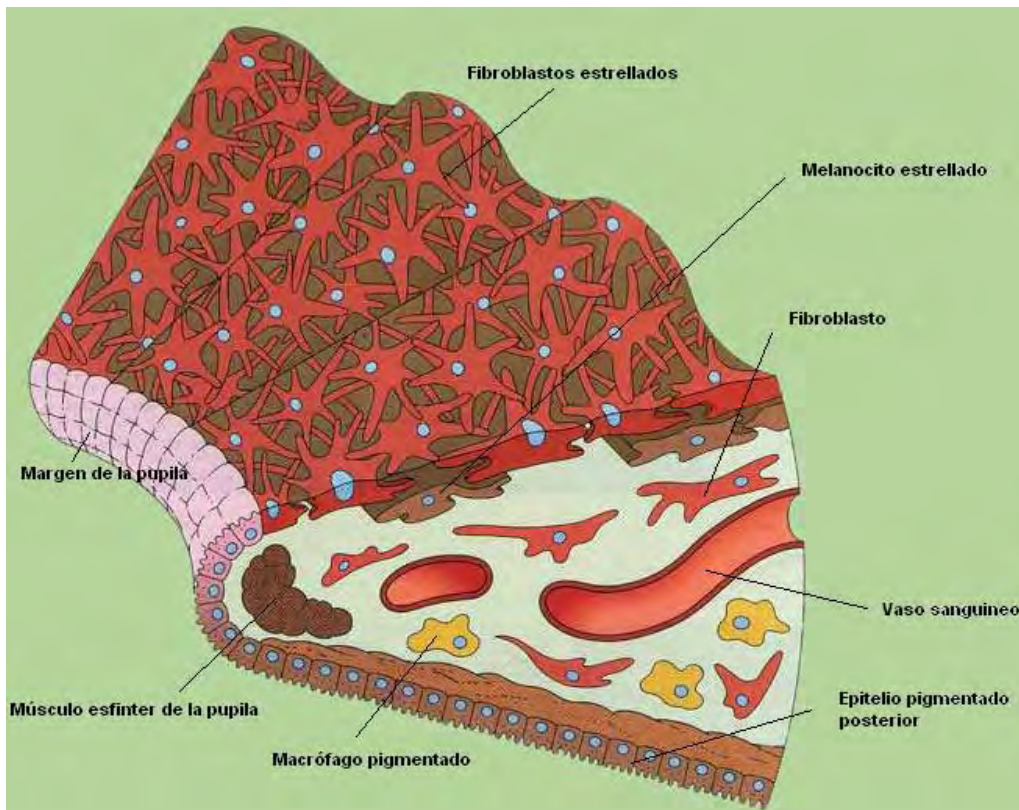


Figura 3-17 Esquema de las distintas capas del iris.

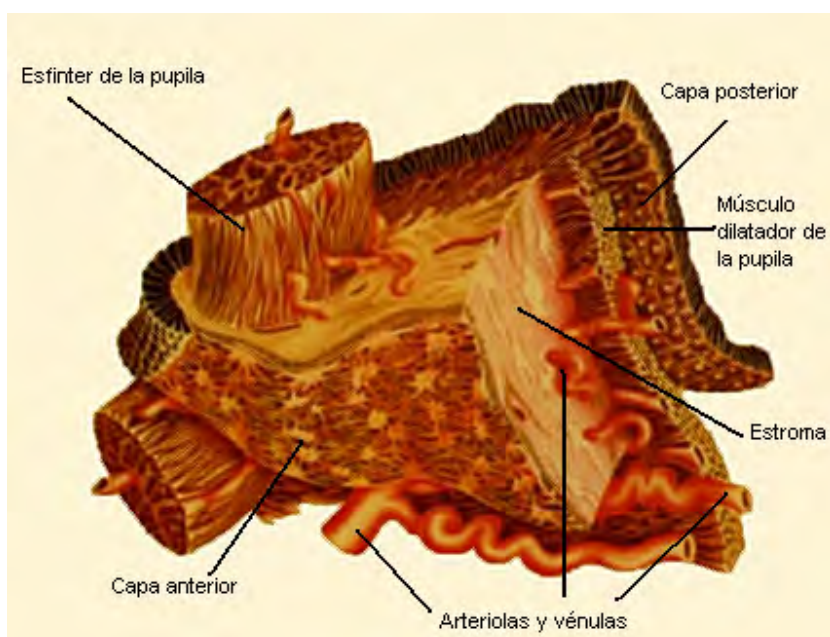


Figura 3-18 Composición del iris [Lag00].

- la **membrana limitante anterior** formada por fibroblastos y melanocitos con forma de estrella.
- el **estroma del iris**, una capa de tejido fibroso constituido por colágeno en su mayor parte donde se encuentra fibroblastos ahusados (células del estroma), capilares sanguíneos, nervios y macrófagos pigmentados. Alrededor de la pupila, el estroma termina en el músculo esfínter de la pupila. Los capilares del iris suelen estar radialmente dispuestos y disponen de numerosos canales anastomóticos.
- La capa de **músculo dilatador** (Membrana de Bruch), del iris se extiende desde la base del iris hasta el esfínter de la pupila.
- el **epitelio posterior pigmentado** está compuesto de dos capas de células pigmentadas con melanina. La melanina tiene por objeto absorber luz y reducir la distorsión óptica.

Anteriormente se pensaba que los movimientos del iris se controlaban mediante presión vascular, pero de acuerdo con recientes interpretaciones de diferentes evidencias anatómicas y fisiológicas, todos los movimientos se controlan única y exclusivamente mediante los músculos propios del iris. Estos músculos del iris soportan a la vez otras estructuras internas del iris de manera pasiva, estructuras estas, que pueden influir en estos movimientos, algunas por su gran cantidad, inercia, o flexibilidad, pero que no juegan un papel importante en la realización de estos movimientos.

El músculo dilatador de la pupila (Dilator pupillae), que se extiende radialmente sobre el iris, y el esfínter de la pupila (Sphincter pupillae), un anillo de fibras en el iris, son los responsables de estos movimientos del iris. La arteria oftálmica, permite proveer al iris del necesario flujo sanguíneo, que el círculo arterial mayor se encarga de repartir por las distintas partes del iris.

Capítulo 3 – Introducción a los sistemas de reconocimiento de iris

La vascularización corre a cargo de las arterias ciliares posteriores y anteriores, cuyas ramas se anastomosan a nivel de la raíz del iris, dando lugar al círculo mayor, y a nivel de la pupila formando el círculo menor. No se podrán desinsertar los cuatro músculos rectos en ningún programa quirúrgico ya que al ir por estos las arterias filiares su consecuencia sería una grave isquemia ocular.

Los vasos estromales son capilares que se disponen en forma radial y son de pared gruesa lo que hace que la circulación no se altere en la dilatación ni en la contracción de la pupila. Situado en el estroma del iris, se encuentra el músculo esfínter rodeando la pupila. Constituido por fibras lisas, está inervado por filetes nerviosos parasimpáticos que llegan a través de los nervios filiares. Cada terminación nerviosa acaba en una sola célula, y la contracción es simultánea.

La cara posterior del iris está integrada por fibras musculares lisas dispuestas de forma radial, que forman el músculo dilatador de la pupila, inervadas por filetes nerviosos simpáticos. Por detrás, cubriendo la cara posterior se encuentra el epitelio pigmentario posterior, rico en pigmento y glucógeno.

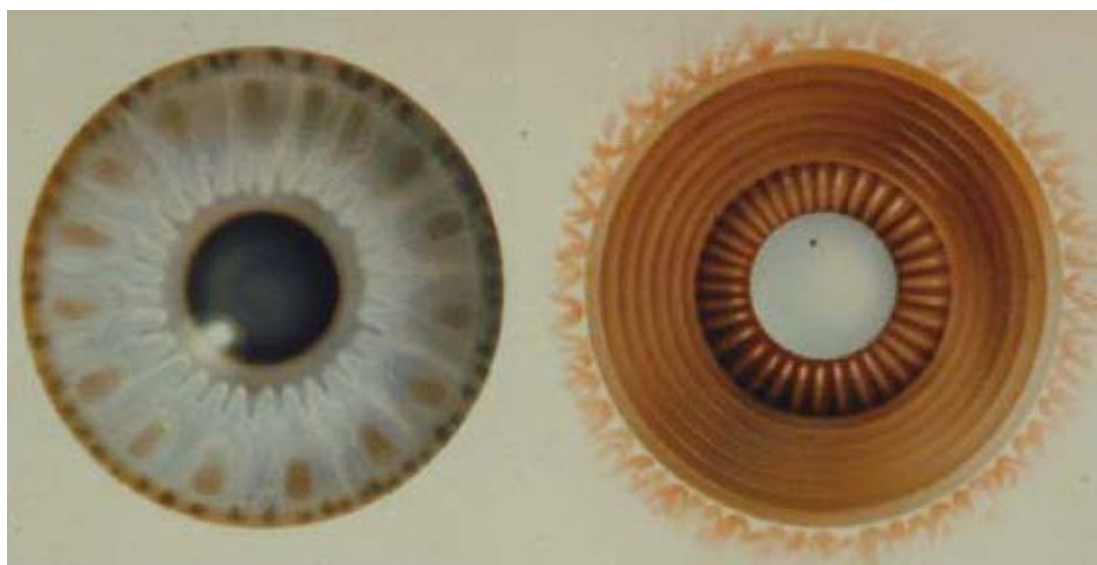


Figura 3-19 Cara anterior y posterior del iris.

La coloración del iris depende de la cantidad de melanina de esta capa posterior. Si es escasa, la reflexión del pigmento del epitelio pigmentario produce un color azulado, debido a la dispersión de los gránulos de pigmentación. En iris de color azulado se pueden observar contracciones concéntricas en su superficie que adopta una forma irregular y con criptas. Por otro lado, si la cantidad de melanina es moderada, el iris es de color avellana, mientras que si la cantidad de melanina es grande el iris tendrá un color marrón. La pigmentación disminuye con la edad. En los casos de albinismo, los fibroblastos pigmentados carecen de melanina y el iris aparece de color rojo debido a los capilares sanguíneos.

Mientras que la anatomía general, fisiología y color del iris se determinan de manera genética, los detalles más finos se desarrollan de manera totalmente aleatoria durante el periodo de gestación. Por ejemplo las pecas oscuras que aparecen en algunos

Capítulo 3 – Introducción a los sistemas de reconocimiento de iris

irises de color verde, no aparecen duplicadas en el otro ojo. A pesar de que en algunos casos el grado elevado de pigmentación de los ojos marrones, no permite distinguir a simple vista una estructura muy detallada, mediante el uso de cámaras con luz en el rango del infrarrojo, es posible desvelar estructuras ricas en detalles. Los gemelos por ejemplo, tienen patrones de iris no correlacionados. Es fácil demostrar el hecho de que los genes no especifican la textura de detalles distintiva del iris, simplemente observando las notables diferencias entre ambos ojos de una persona, que son sin duda genéticamente idénticos.

Los detalles de la estructura del iris así como el color, varían, en función del grado de congruencia genética. En la siguiente tabla, se pueden observar diferentes rasgos y su rango de coincidencia en hermanos gemelos y mellizos.

Característica	Número de coincidencias	
	Gemelos (monocigóticos) 73 pares	Mellizos (dicigóticos) 70 pares
Color del iris	72	25
Estructura del borde pupilar	70	17
Perfil y posición del collarete	65	11
Pigmentación	70	13
Número, tamaño y posición de las criptas	40	4
Número, tamaño y profundidad de los pliegues o crestas	50	8
Número y completitud de los surcos de contracción	54	14
Densidad de los vasos sanguíneos	66	19
Altura de los vasos (grosor del estroma)	68	39
Recorrido vascular	68	16

Tabla 3-1 Comparación de las similitudes en los detalles del iris entre gemelos y mellizos.

Como se puede observar los ojos de hermanos mellizos, al ser el resultado de la fertilización de dos cigotos diferentes, presentan muy poca coincidencia, tal y como lo harían los ojos de dos hermanos nacidos en diferentes periodos temporales. En cambio los ojos de hermanos gemelos, nacidos de la fertilización de un mismo cigoto presentan mayor índice de coincidencias en los rasgos estudiados, aunque no por esto presentan estructuras de iris completamente idénticas, sino similares.

Cuerpo Ciliar

Es una estructura muscular y fibrosa, situada alrededor del cristalino en forma de anillo, que limita por detrás con la coroides y por delante con el iris. Forma parte de la úvea; está constituido por el músculo ciliar, el músculo de Brücke y el músculo de Müller (fibras circulares). En su estructura se identifican dos porciones: la pars plicata o procesos ciliares (donde se produce el humor acuoso) y la pars plana.

Sus funciones son: contraer y dilatar sus fibras musculares, controlando así el espesor del cristalino (músculo ciliar), y segregar el humor acuoso, contribuyendo a su drenaje.

Está formado por:

- **Músculo ciliar**, es un reborde formado por fibras lisas dispuestas longitudinal y anularmente, que se insertan en el borde anterior de la esclerótica. Su contracción produce relajación del ligamento suspensorio del cristalino, con lo que éste adopta una forma abombada, proceso fundamental en la acomodación del ojo.
- **Porción epitelial:**
 - **Capa epitelial pigmentaria externa**, se continúa por detrás con el epitelio pigmentario retiniano.
 - **Capa epitelial interna**, no pigmentada. Son 70 u 80 pliegues delgados que emergen de la cara interna del cuerpo ciliar y se disponen radialmente alrededor del cristalino. Su misión es segregar el humor acuoso en la cámara posterior.

Desempeña un papel importante en la nutrición del segmento anterior y la secreción de humor acuoso, así como en la acomodación, que constituye la propiedad del ojo de modificar su poder de refracción de manera que los rayos de luz siempre sean enfocados sobre la retina, siendo así posible la visión a distintas distancias.

En el espesor del cuerpo ciliar, se encuentra el músculo ciliar responsable en gran medida de este proceso de acomodación. Constituido por fibras meridionales o circulares, cuya contracción relaja la zónula (se abomba el cristalino) y se produce la acomodación, lo que significa un mayor poder de refracción, y fibras radiales y longitudinales, cuya contracción tensa la zónula (se aplana el cristalino, con lo que se acomoda para la visión lejana) pudiendo retraer el espolón escleral y agrandar el canal de Schlemm, canal de drenaje del humor acuoso.

La vascularización está a cargo principalmente del círculo arterial mayor del iris.

Coroides

La úvea posterior o coroides, está situada entre la retina y la esclerótica, y llega por delante hasta el cuerpo ciliar. Es una membrana conjuntiva que reviste el globo ocular por dentro, y cuya riqueza en células pigmentarias de color negra y brillante le confiere un papel de pantalla a la luz, y su naturaleza vascular la hace fuente primordial de nutrición del ojo, así como una función reguladora de la temperatura ocular.

Su función principal es el aporte sanguíneo a las capas más externas de la retina. Las arterias de la membrana coroides son las ciliares, procedentes de la oftálmica.

Situada entre la esclerótica por fuera y la retina por dentro. De la esclerótica la separa un espacio virtual denominado espacio supracoroideo, que termina por delante en la inserción del músculo ciliar en el espolón escleral y por detrás a 4 o 5 mm de la pupila.

Por su cara interna, la coroides se adhiere al epitelio pigmentario retiniano a través de la membrana de Bruch, que constituye una capa interna y transparente de la membrana coroides que está en contacto con el epitelio pigmentario de la retina.

Los vasos de las capas más externas son de mayor calibre, siendo capilares los de la capa más interna. Estos capilares forman una tupida red en un único plano, denominada coriocapilar, que es el encargado de la nutrición de las capas más externas de la retina.

En condiciones normales, la coroides no es visible oftalmoscópicamente, salvo en albinos, donde no existe la pantalla del epitelio pigmentario retiniano, y en ancianos, debido a la atrofia progresiva de esta pantalla.

3.2.2.3. Túnica interna o neurosensorial

Retina

Es la capa más interna del globo ocular, y en la que realmente se realiza el proceso de la visión, ya que es tejido neuroepitelial, parte del sistema nervioso central, y está conectada con el cerebro por el nervio óptico, por tanto aquí se inicia el proceso de la visión, siendo la parte especializada del sistema nervioso destinada a recoger, elaborar y transmitir las sensaciones visuales.

La retina es una fina cutícula transparente, con un alto consumo de oxígeno, formada por tejido nervioso, que tapiza la cara interna de la membrana coroides y limita su superficie interna con el vítreo. Por delante termina integrada en el cuerpo ciliar a través de la ora serrata. En su parte central y anterior se distinguen mácula y papila del nervio óptico.



Figura 3-20 Imagen fotográfica de la retina.

La retina está compuesta por dos grupos de capas.

El epitelio pigmentario retiniano, está en contacto con la membrana coroides, y está compuesto por una sola capa de células, que se adhieren firmemente a la membrana coroides a través de la membrana de Bruch y que emiten finas prolongaciones entre los fotorreceptores adyacentes. Las funciones del epitelio pigmentario son: absorber radiaciones luminosas, proporcionar el intercambio metabólico entre coriocapilar y neuroepitelio, y contribuir a la renovación constante de los segmentos externos de los fotorreceptores.

Capítulo 3 – Introducción a los sistemas de reconocimiento de iris

El neuroepitelio está constituido por las siguientes nueve capas, de tejido nervioso, similar al del cerebro, y funcionalmente están formadas por tres grupos de neuronas muy especializadas: fotorreceptores (las más externas), bipolares (intermedias) y ganglionares (internas):

1. Capa de fotorreceptores.
2. Limitante externa.
3. Nuclear externa, capa de los núcleos de los conos y los bastones.
4. Plexiforme externa o capa de Henle, donde se efectúa la sinapsis entre las células bipolares y los fotorreceptores.
5. Nuclear interna, capa de núcleos de las células bipolares.
6. Plexiforme interna, donde se produce la sinapsis entre las células bipolares y las ganglionares.
7. Capa de células ganglionares.
8. Capa de fibras del nervio óptico.
9. Limitante interna.

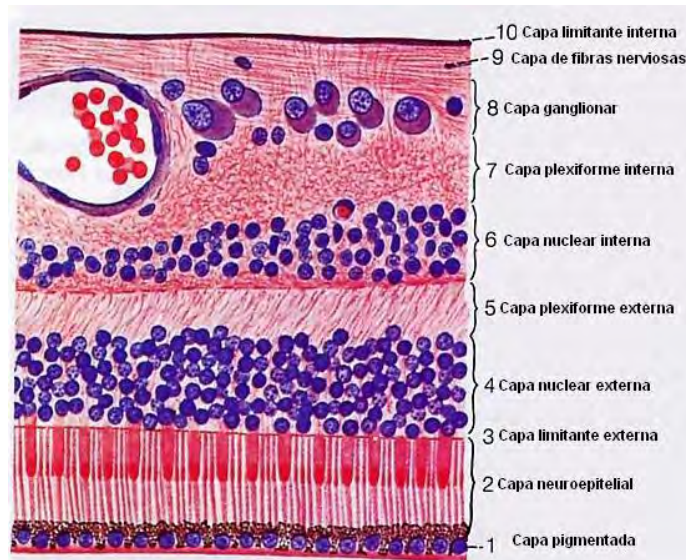


Figura 3-21 Corte de la retina

Los fotorreceptores son los responsables de la absorción de las radiaciones luminosas y su transformación en impulso bioeléctrico. Se distinguen dos tipos:

- Conos, encargados de la visión en ambientes iluminados (visión fotópica) y de los colores, muy abundantes en la fovea.
- Bastones, encargados de la visión en condiciones escotópicas, en las que el estímulo luminoso es de baja intensidad, más abundantes que los conos.

Las células bipolares representan la primera neurona de la vía óptica, y establecen sinapsis con los fotorreceptores y con las células ganglionares.

Las células ganglionares, segunda neurona cuyo axón, o prolongación en forma de hilo de una neurona, por la que ésta transmite impulsos nerviosos hasta una o varias células, termina en el cuerpo geniculado externo, formando parte de la capa de fibras del nervio óptico y del propio nervio óptico.

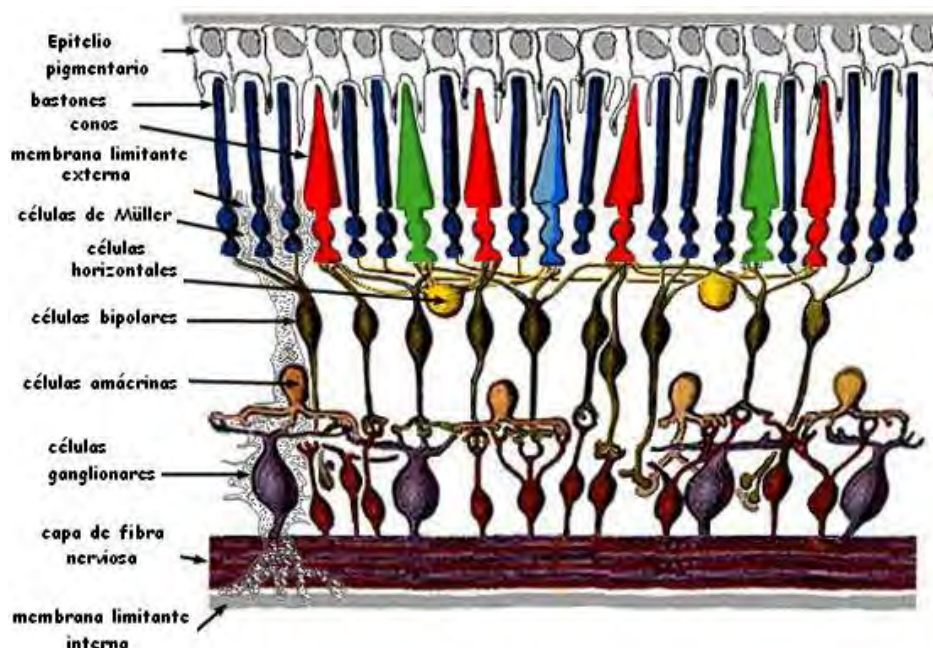


Figura 3-22 Detalle de la composición celular de las capas de la retina.

El fondo de ojo se puede observar mediante un instrumento especial, denominado oftalmoscopio. En él se destacan dos zonas de gran interés funcional y patológico: la papila, la mácula, la fovea y los vasos.

La fovea, es una depresión poco profunda de la retina, situada en el polo posterior del ojo en el centro de la mancha amarilla. Las diversas capas de la retina se van adelgazando progresivamente hacia el centro de la fovea, punto en el que existen solamente las cuatro primeras; es el asiento de la visión central. Es el área de la retina que proporciona la visión de más alta resolución y precisión.

La papila, o disco óptico, determina la mancha ciega en el campo visual. Es el rasgo más característico al observar el fondo de ojo. Es de color blanco amarillento con una forma redondeada bien definida, algo ovalada en sentido vertical, de un diámetro aproximado de 1,5 mm. Contiene la arteria y vena centrales de la retina. Corresponde al punto de entrada del nervio óptico en la retina y también el punto por el cual entran en el ojo las arterias retinianas y salen del ojo las venas retinianas. Esta formada exclusivamente por la capa de fibras nerviosas, los vasos sanguíneos, y carece de sensibilidad visual.

La mácula es la parte central de la retina. Se sitúa en el eje visual, donde se encuentra la mayor concentración de conos y la mejor discriminación de la forma y del color. Tiene un tamaño similar al del disco óptico y se encuentra en la zona temporal, a unos dos diámetros papilares de éste. En esta zona no hay vasos (zona avascular) y su nutrición depende de la membrana coroides.

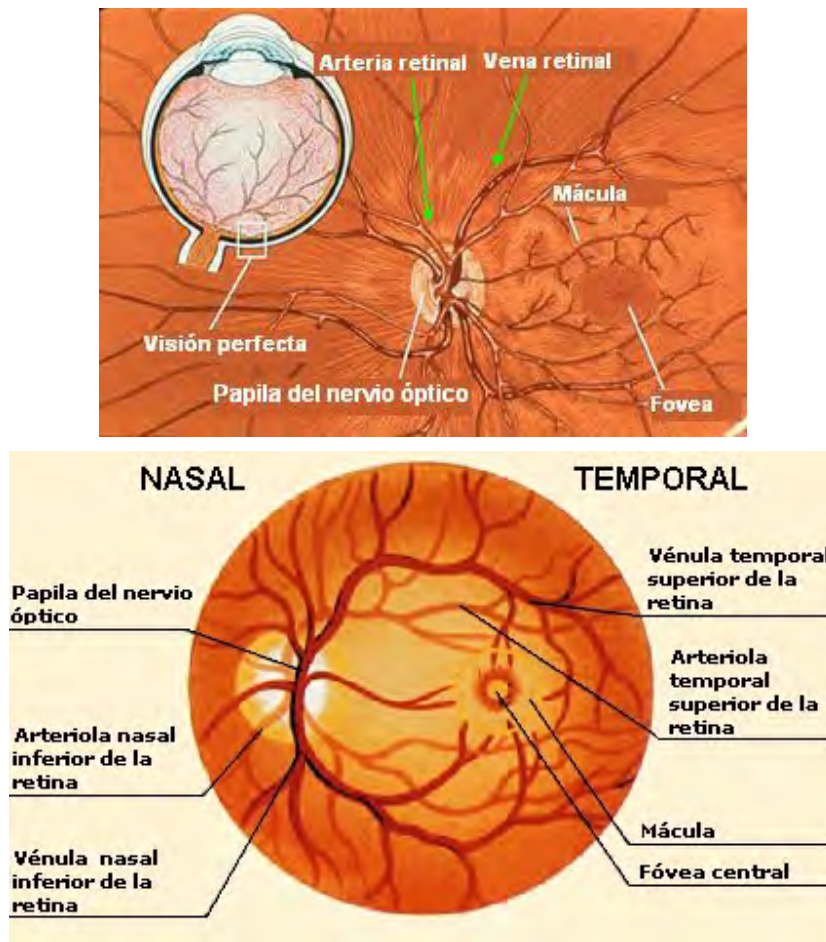


Figura 3-23 Detalles de la formación vascular del fondo de ojo.

3.2.2.4. Medios transparentes

Cuerpo vítreo

Es un material transparente, gelatinoso y avascular. Ocupa la cámara posterior del ojo, espacio comprendido entre la superficie interna de la retina, cara posterior del cristalino y cuerpo ciliar, y está recubierto por una membrana limitante llamada membrana hialoide.

Representa las 4/5 partes del volumen ocular. Está compuesto en un 99% por agua, colágeno y ácido hialurónico. Su viscosidad disminuye desde la periferia al centro, haciéndose menor con la edad.

Tiene unas zonas de adherencia que son: la base del vítreo, a nivel del cuerpo ciliar, el ligamento hialoideo-cristaliniano de Weiger, con la cara posterior del cristalino, y el área de Martegianani, alrededor de la papila del nervio óptico.

En el vítreo también pueden distinguirse:

- La hialodes, fina membrana que lo limita, formada por condensación periférica del propio vítreo.

- El córtex, porción periférica más densa.
- Vítreo central.

Cristalino

Se trata de una lente biconvexa, avascular, transparente e incoloro con poder de convergencia variable. Está ubicado por detrás del iris y por delante del humor vítreo, y queda sujeto al cuerpo ciliar mediante fibras llamadas zónulas de Zinn. Su diámetro es de 10 mm. y su espesor central, de 4 mm. participa del sistema dióptrico del ojo al contribuir a la convergencia de los rayos luminosos sobre la mácula.

En su estructura se diferencian:

- La cápsula o cristaloides: es una fina membrana elástica y semipermeable que envuelve totalmente al cristalino.
- El epitelio subcapsular. Ocupa la cara anterior y el ecuador.
- Las fibras del cristalino. Éstas se superponen las unas a las otras formando dos suturas, una anterior con forma de Y además de otra posterior con la misma forma invertida.
- La zónula o ligamento suspensorio. Se extiende desde los procesos ciliares al ecuador del cristalino, manteniéndolo en su lugar y transmitiéndole las contracciones del músculo ciliar. Con la edad disminuye en número y resistencia.

El cristalino es avascular y no posee inervación. Forma nuevas fibras a lo largo de toda la vida. Su principal función es la acomodación. Cuando el músculo ciliar se contrae, relaja las fibras zonulares, y el cristalino tiende a hacerse más convexo y de esta forma aumenta su potencia. La capacidad de acomodación se expresa en dioptrías y es máxima en la infancia, reduciéndose de forma fisiológica al disminuir la elasticidad del cristalino.



Figura 3-24 Estructura responsable del fenómeno de la acomodación.

3.3. Aspectos básicos del Reconocimiento de iris

3.3.1. Historia del Reconocimiento de iris

Como queda demostrado a lo largo de estas líneas, los ojos representan una fuente fiable de patrones biométricos, tanto mediante el análisis de la retina como de los patrones característicos del iris. Más allá de esto, el primer método biométrico basado en patrones oculares, fue un sistema basado en la retina patentado por Robert Hill en 1978, que hacía uso de imágenes oftalmológicas en primer plano de los patrones internos de distribución de la formación vascular del fondo del ojo.

A pesar de que el color característico del ojo de una persona fue usado como identificador en el siglo XIX, por el físico francés Alphonse Bertillon, la idea de que la compleja disposición de patrones del iris pudiera usarse como una especie de huella óptica, fue propuesta por primera vez por Frank Burch, un importante cirujano ocular y oftalmólogo de St. Paul, en el año 1936, quien sugirió en uno de sus discursos, dirigidos a sus colegas de profesión en el congreso anual de la American Academy of Ophthalmology. El concepto que se presentaba por aquel entonces, se reprodujo en diversos libros de texto, y la idea fue igualmente usada en películas de James Bond, y otras de ciencia ficción, pero no se produjo ningún progreso en más de medio siglo.

Fue en 1987, cuando dos oftalmólogos, Leonard Flom y Aran Safir, rescataron la idea patentándola y presentándosela dos años más tarde al profesor por aquel entonces de la Harvard University John G. Daugman, con el objetivo de crear los algoritmos necesarios para desarrollar correctamente un sistema eficaz de reconocimiento de iris. Pese a su reticencia inicial a participar en el proyecto, debido a su inmediato traslado a la universidad de Cambridge, los dos oftalmólogos consiguieron atraer la atención del profesor Daugman, presentando sus ideas a través de fotografías del iris de diversos pacientes recogidas en su clínica. En estas fotografías, los iris presentaban complejos patrones aleatorios, creados por ligamentos arqueados, surcos, criptas, anillos, diversidad de pecas, una corona y un característico zigzag denominado collarete.

Capítulo 3 – Introducción a los sistemas de reconocimiento de iris

United States Patent [19] [11] **Patent Number:** **4,641,349**
Flom et al. [45] **Date of Patent:** **Feb. 3, 1987**

[54] **IRIS RECOGNITION SYSTEM** 4,523,820 6/1985 Kashtan 351/206
 4,533,222 8/1985 Ishikawa 351/206

[6] **Inventors:** Leonard Flom, 1505 Post Rd., Fairfield, Conn. 06430; Aran Safir, 3 Ellsworth Ave., Cambridge, Mass. 02130

[21] **Appl. No.:** 703,312

[22] **Filed:** Feb. 20, 1985

[51] **Int. Cl.:** G06K 9/00

[52] **U.S. Cl.:** 382/2; 351/205; 351/206; 354/62; 382/6

[53] **Field of Search:** 382/2, 6; 351/206, 231, 351/208, 205, 354/62, 382/227, 231

[56] **References Cited**

U.S. PATENT DOCUMENTS

1,192,512	7/1916	Fitz	351/211
1,887,115	11/1932	Brazz	351/221
2,434,890	1/1948	Saunders	356/214
3,136,839	6/1964	Safir	351/211
3,366,786	1/1968	Delaunoy	362/231
3,473,888	10/1969	Young	351/210
3,482,904	12/1969	Volk	351/205
3,333,885	10/1970	Stark	351/206
3,533,684	10/1970	Stark et al.	351/206
3,598,107	8/1971	Ishikawa	351/200
3,600,298	8/1971	Mohrman	356/153
3,778,135	12/1973	Dianci	351/221
3,915,564	10/1975	Urban	351/206
3,936,364	2/1976	Masuzawa	356/62
3,966,310	4/1976	Lance	351/231
4,007,980	2/1977	Beacher	351/219
4,038,606	2/1977	Talvingus	356/64
4,033,057	5/1977	Wicks	230/313
4,106,237	4/1978	Hill	382/2
4,138,714	2/1979	Tsukihashi	362/231
4,172,632	10/1979	Holmes, Jr.	350/132
4,189,215	2/1980	Humphrey	351/39
4,233,654	11/1980	Tsukihashi	362/231
4,233,743	5/1981	Masuzawa	356/62
4,237,687	3/1981	Kobayakawa	356/62
4,266,861	5/1981	Sawa	351/206
4,309,082	1/1982	Morrison	351/39
4,375,330	5/1983	Saizumi	351/212
4,392,566	7/1983	Hill	382/2

OTHER PUBLICATIONS

The Visual Trace and its Endogenous Information, Hans Renky, editor, vol. 5, No. 3, Sep. 1965, pp. 630-633.

Optical Sign in 500-Lamp Microscopy, James H. Duggart, p. 27, (London: 1949).

"Diseases of the Uveal Tract," Duke-Elder and Perkins, in *System of Ophthalmology*, Duke-Elder, Sir Stewart, p. 5 (St. Louis: 1966).

J. Hecht, "Light Modulators Help Crunch Image Data", *High Technology*, (Jan. 1983), pp. 69-72.

C. Simon & I. Goldstein, "A New Scientific Method of Identification", vol. 35, No. 18, *Stare Journal*, (Sep. 1935), pp. 901-906.

Privacy Examiner—Leo H. Broadbent

Assistant Examiner—Joseph Mancuso

Attorney, Agent, or Firm—Oatolenik, Faber, Gerb & Soffen

ABSTRACT

[57] Methods and apparatus are disclosed for identifying an eye, especially a human eye, on the basis of the visible features of the iris and pupil. The eye is first illuminated until the pupil reaches a predetermined size, at which an image of the iris and pupil is obtained. This image is then compared with stored image information for identification. The stored image information is previously obtained from an eye, the pupil of which was similarly brought to the same predetermined size. The illumination of the iris may include oblique illumination from several positions around the circumference of the iris. The illumination from each position may be relatively monochromatic, so that the resulting shadow will lack the color of the light source at that position, providing better contrast for elevation-dependent features. A system for performing iris recognition may include a processor which controls an illumination control circuit and a camera to obtain images at several predetermined sizes of the pupil.

32 Claims, 12 Drawing Figures

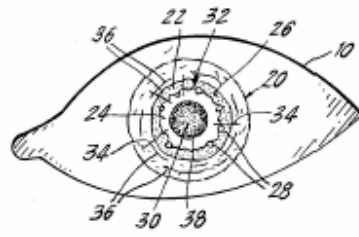


Figura 3-25 Extracto de la patente presentada por L. Flor y A. Safir en 1987.

Los trabajos realizados por Daugman, que se recogen parcialmente en su trabajo titulado “*High Confidence visual recognition by test of statistical independence*”, supusieron un avance definitivo en el campo de la identificación personal basada en patrones de iris. Los algoritmos que desarrollo posteriormente, fueron patentados en 1994 (“*Biometric Personal Identification System Based on Iris Analysis*”), sentando las bases de los actuales sistemas y productos de reconocimiento de iris.

Posteriormente, Aran Safir y Leonard Flor, fundaron conjuntamente con John Daugman la compañía *Iris Corporation*, poseedora de la patente y encargada distribuir las licencias, a las diferentes compañías desarrolladoras e integradoras de sistemas de reconocimiento, que quisiesen hacer uso del patrón del iris. Una de estas empresas es *Sensar Corporation*, que creó una cámara especial, capaz de obtener imágenes de iris en los cajeros automáticos. Estas dos compañías (*Iriscan Corp.* y *Sensar Corp.*) se unieron creando *Iridian Technologies*.

Agencias relacionadas con los cuerpos de seguridad y justicia, de los Estados Unidos, comenzaron a utilizar este tipo de dispositivos en 1994, siendo la prisión del estado de Lancaster (Pennsylvania), la pionera en el uso de esta tecnología para la identificación

de los reclusos. Otro ejemplo puede encontrarse en el condado de Berkshire, donde la prisión estatal utiliza sistemas de reconocimiento basados en iris para el control de acceso y seguridad de sus empleados.

En un entorno más comercial y enfocado al público general, se da en el aeropuerto internacional Charlotte/Douglas en Carolina del Norte o en el aeropuerto alemán de Frankfurt, donde se permite a los viajeros habituales registrar su patrón de iris con el objetivo de reducir lo máximo posible el tiempo necesario y la complejidad del proceso de embarque. También, dentro del campo de la seguridad aeroportuaria, tenemos los ejemplos de las instalaciones de los aeropuertos Schiphol en Ámsterdam, JFK en Nueva York, o Heathrow en Londres, donde son empleados tanto para realizar el embarque de viajeros como en los controles de pasaportes e inmigración.

Una de las aplicaciones relacionadas con los patrones de iris que está experimentando un estudio más exhaustivo, es la utilización de estos dispositivos en los cajeros automáticos. También se considera muy interesante la utilización de estos sistemas de reconocimiento biométrico para el control de acceso y seguridad en entornos domóticos.

Entre las empresas que desarrollan este tipo de dispositivos y sistemas pueden destacarse Panasonic, LG, Oki, British Telecom, Unisys, Siemens o IBM.

Como curiosidad relacionada con el iris, podemos resaltar, que existe una creencia popular de que los rasgos propios del iris pueden revelar el estado de salud de una persona, algo parecido a los fundamentos de la reflexoterapia, de modo que algunos puntos del ojo estarían asociados a ciertos órganos del cuerpo, de manera que se puedan usar para leer el futuro o determinar posibles problemas de salud. Estas creencias y prácticas, reciben el nombre de *iridología*, y ocasionalmente han sido tomadas en serio hasta el punto de realizar experimentos científicos que puedan dar credibilidad a estas ideas. Sin embargo la conclusión ha sido siempre la misma, resultando en un absoluto fracaso.

3.3.2. Fundamentos del Reconocimiento de iris

De todos los sistemas de reconocimiento de identidad existentes en la actualidad, descritos en el primer capítulo, son pocos los procedimientos no invasivos, entre los cuales se encuentra el reconocimiento mediante iris. En un mundo actual tan convulsionado y vulnerable, los sistemas de reconocimiento para aplicaciones de seguridad están cada día mejor vistos, en especial si su implantación no representa incomodidad para los usuarios, ni presentan métodos invasivos que representen algún peligro para la integridad de las personas.

El reconocimiento por iris se basa en los detalles que presenta la textura del iris, que por características inherentes a su morfología presenta grietas, criptas o estrías entre otras características que conforman una textura altamente rica en detalles. Esta textura formada en la etapa embrionaria es estocástica y posiblemente de generación caótica, lo cual determina que los fenotipos de dos iris con el mismo genotipo, conjunto tal como gemelos idénticos y siameses, presenten detalles no correlacionados.

La cantidad de información que presenta este indicador biométrico es tan considerable que permite la identificación de individuos con procedimientos no invasivos y que adicionalmente se desarrolla a distancias prudenciales y sin restricciones ambientales,

con resultados muy confiables, lo que permite la implementación de sistemas de verificación de identidad aplicables a condiciones reales; en estos sistemas se debe dar gran importancia a los algoritmos de preprocesado y procesamiento como tal, debido a que la información efectiva con que se cuenta para lograr el proceso de reconocimiento de identidad es mucho menor a la conseguida en sistemas similares con imágenes bajo condiciones controladas de prueba y evaluación.

En un sistema que funciona bajo condiciones reales deben ser tomadas en cuenta ciertas consideraciones, por ejemplo que dos imágenes del mismo iris pueden estar ubicadas de manera diferente en la imagen, o con pequeñas rotaciones entre ambas, o adicionalmente pestañas y párpados pueden interferir en la información efectiva del iris, siendo éste un parámetro muy importante a considerar, sobre todo en nichos de población como el asiático, donde es más pronunciado este efecto, debido los característicos ojos rasgados.

Las variaciones de la imagen introducidas por las fuentes de luz, que pueden ser disminuidas con los sistemas de adquisición actuales, aunque pueden representar dificultades sustanciales en el proceso de verificación de identidad.

El iris es un tejido conectivo, que al igual que la vasculatura retinal tiene una estructura única por individuo que forma un sistema muy complejo, de modo que la probabilidad de encontrar posibilidad de encontrar dos irises idénticos es de 1 entre 10^{78} , inalterable durante toda la vida de la persona, este es el factor que propicia el que el iris sea un rasgo de elevadas prestaciones en los sistemas biométricos. Adicionalmente encontramos el factor de que esta estructura contiene gran cantidad de información, muy propicia para el análisis biométrico ya que contiene alrededor de 266 características distintivas, entre las que se encuentra el retículo trabecular, que conforma un tejido que da la sensación de dividir el iris radialmente, así como estriaciones, anillos, surcos, pecas y la corona característica, de las cuales la tecnología de reconocimiento de iris hace uso de cerca de 170.

La identificación basada en el reconocimiento de iris se viene utilizando para la autenticación de usuarios desde hace ya varios años. Para llevar a cabo el proceso, se hace uso de una cámara de elevada precisión, que permite obtener imágenes de alta resolución en blanco y negro del ojo del usuario, en un entorno correctamente iluminado. Generalmente esto se hace mirando a través del lente de una cámara fija, la persona simplemente se coloca frente a la cámara y el sistema automáticamente localiza los ojos, los enfoca y captura la imagen del iris, ésta imagen se somete a deformaciones pupilares (el tamaño de la pupila varía enormemente en función de factores externos, como la luz) y de ella se extraen patrones, que a su vez son sometidos a transformaciones matemáticas hasta obtener una cantidad de datos (típicamente 256 KBytes) suficiente para los propósitos de autenticación. Esa muestra, denominada IrisCode (en la figura se muestra una imagen de un iris humano con su IrisCode asociado) es comparada con otra tomada con anterioridad y almacenada en la base de datos del sistema, de forma que si ambas coinciden el usuario se considera autenticado con éxito; la probabilidad de una falsa aceptación es la menor de todos los modelos biométricos.

El uso por parte de un atacante de órganos replicados o simulados para conseguir una falsa aceptación es casi imposible con análisis infrarrojo, capaz de detectar con una alta probabilidad si el iris es natural o no.

El iris del ojo como un identificador es quizás uno de los métodos más ajenos para las personas, ya que entre nosotros no nos reconocemos por la apariencia del iris. Es este misterio lo que seguramente haya hecho de este método uno muy utilizado en las películas de espionaje. Este identificador es uno de los más precisos entre los sistemas biométricos. Algunos factores que han afectado su proliferación lo son la poca aceptación entre sus usuarios y el precio muy caro de la tecnología.

Los sistemas de reconocimiento biométrico basados en iris presentan las siguientes ventajas:

- Sistema no invasivo. El usuario debe situarse frente al sistema de captura pero no es necesario mantener contacto con él.
- El sistema es invariable al uso de lentes de contacto o gafas, ya que estos elementos no modifican la estructura de ojo. También se trata de un sistema invariable a las lentes de contacto de colores, al no responder el color del ojo a ningún grado de libertad dentro del sistema.
- Presentan elevadas tasas de reconocimiento.

Los inconvenientes relacionados con el reconocimiento de patrones de iris son los que ahora se presentan:

- Elevado coste.
- Requiere determinadas condiciones de iluminación en la fase de captura de la imagen del iris, para que ésta se válida durante la creación del patrón correspondiente.
- Existen enfermedades que pueden afectar negativamente al reconocimiento de las características del iris.
- Resulta complicado el reconocimiento de los ojos oscuros.

3.3.2.1. Partes del sistema de reconocimiento basado en el iris

En el primer capítulo, se detallaron las diferentes etapas que forman un sistema de identificación biométrica. Ahora pasaremos a distinguir estas etapas para el caso concreto del iris.

La primera de éstas sería la adquisición de la imagen del iris. Posteriormente se lleva a cabo una etapa de preprocesado de la imagen, en la que se localiza y aísla la estructura del iris, detectando sus límites exterior e interior (frontera con la esclerótica y la pupila respectivamente). También se procederá a la normalización del tamaño de la imagen durante esta etapa del sistema, porque como ya comentamos, una distancia distinta entre el ojo y la cámara puede resultar en diferentes tamaños de imagen para el ojo de un mismo individuo.

El paso siguiente será realizar la extracción de características de la imagen del iris preprocesada, con el objetivo de determinar una muestra correcta, que posteriormente será comparada con el patrón almacenado en la fase de reclutamiento.

El sistema de reconocimiento finalizará con la etapa de comparación, en la que se pueden aplicar diferentes algoritmos, como por ejemplo los basados en la mínima distancia entre el patrón de almacenado y los modelos obtenidos en cada una de las capturas realizadas cuando un individuo utiliza el sistema.

Proceso de adquisición de la muestra

La captura de la imagen del ojo del individuo no es un proceso sencillo, debido al reducido tamaño del iris. En esta captura de la imagen del ojo de una persona deberán ser tenidos en consideración algunos aspectos, como la distancia entre el sujeto y el dispositivo de captura, o las condiciones de iluminación existentes. Una mala iluminación o una distancia errónea entre la persona a identificar y la cámara con la que se realiza la captura, puede derivar en la toma de una imagen del iris con una calidad insuficiente para poder conseguir extraer unas características viables del mismo que permitan realizar un correcto reconocimiento. A pesar de que la luz natural también se puede usar con este propósito, los iris con pigmentos más oscuros revelan mayor complejidad de sus patrones si se tratan con la luz adecuada.

La imagen del iris se captura desde una distancia de entre 10 y 20 cm., es decir de manera no invasiva para el usuario, mediante una cámara de alta resolución, que tras un proceso preliminar de enfoque del objetivo y un posterior descarte de las reflexiones debidas a las gafas de un usuario, obtiene la imagen digital del iris. Las posibles variaciones de la pupila, debidas a la luz usada, no interfieren en ningún caso en la aleatoriedad o unicidad de los patrones de iris, más allá de esto, estas posibles variaciones pueden ser de utilidad, a la hora de confirmar que el iris es real y no una copia, en la cual la pupila no sufriría dilataciones o contracciones.

La imagen capturada en un primer momento contiene partes útiles, obviamente el iris, que serán utilizadas en el proceso de identificación y otros componentes irrelevantes para el sistema (por ejemplo, la pupila, los párpados, etc.).

Estas características como por ejemplo, el hecho de que el iris esté cortado en parte por los parpado, las pestañas o por gafas o lentes de contacto, pueden sin embargo, aumentar la complejidad del escaneo. Además, incluso en ausencia de estos obstáculos, el proceso completo de adquisición de la imagen del iris con propósitos de reconocimiento, requiere cámaras de alta precisión dado que el iris es una porción relativamente pequeña, de aproximadamente 1 cm., con movimiento, y localizado bajo una superficie curva, mojada y altamente reflectante.

Es necesario tener por tanto dos puntos fundamentales en cuenta. El primero, el factor de iluminación usado para el proceso, ya que en condiciones de iluminación con luces infrarrojas, incluso los iris de color muy oscuro revelan fácilmente sus patrones, mientras que haciendo uso de cámaras con iluminación en el rango del visible, el resultado dependerá de la pigmentación del iris. El segundo punto comprende la disposición del usuario, ya que en este caso el nivel de aceptación del usuario suele ser menor que en el uso de otros rasgos biométricos, debido a que los usuarios suelen sentir incomodidad durante el proceso de reclutamiento, principalmente debido al hecho de no tener claro hacia donde enfocar la mirada en la cámara.

Extracción de características

La primera tarea en este apartado, consiste en determinar la situación geométrica exacta del iris dentro de la imagen recogida. Para ello es necesario determinar puntos como el centro del iris y el de la pupila, ya que los últimos estudios revelan que ambos círculos no son concéntricos. Asimismo es necesario determinar los límites de los párpados, y excluir la pupila y las pestañas de la imagen, creando de este modo un iris invariante al tamaño, distancia, ampliaciones o posibles movimientos naturales de la pupila. El siguiente paso, consiste en crear el *IrisCode*, que consiste en un número de hasta 2048 bits, mediante el uso de algoritmos desarrollados a tal efecto, y que se almacenará en una plantilla, en la que se hacen uso de 256 bytes para el *IrisCode* además de otros 256 de máscara.

Esto permite almacenar la información en bases de datos locales o remotas, o incluso en dispositivos portátiles como smart cards o tokens. La plantilla pese a presentar hasta un 80% menos de información, que el *IrisCode* original, no deteriora en ningún caso la validez de los procesos estadísticos de toma de decisiones, llevados a cabo posteriormente.

Comparación de plantillas

Ambos procesos de verificación o identificación, implican el tener que tomar una imagen en vivo del iris del usuario, y comparar el resultado con la plantilla específica almacenada, en el caso de la verificación, o con N plantillas guardadas en la base de datos, en el caso de la identificación. El proceso de cotejar ambas plantillas, se puede realizar mediante una comparación bit a bit de ambas (operador lógico OR Exclusivo), a través de un proceso muy rápido de cálculo de la distancia Hamming entre ambos códigos, además de mediante otras posibles medidas de distancias similares, o incluso métodos de medida de la correlación entre las dos imágenes del iris

Proceso de decisión

Como en el caso de los demás sistemas biométricos, el proceso de comparación produce un resultado que se utilizará posteriormente en el proceso de decisión, que compara el resultado específico, con un umbral de decisión ajustado a la aplicación. En el caso del reconocimiento de iris, este umbral puede calcularse de manera ajustada para determinar un porcentaje de 0 aceptaciones erróneas, independientemente del número de entradas de la base de datos, en el caso de la identificación, y asegurando igualmente unas tasa mínimas de rechazos falsos.

3.3.3. Parámetros de un sistema de reconocimiento de iris

Los principales parámetros de los sistemas de reconocimiento biométrico, ya fueron presentados y expuestos de forma genérica en el primer capítulo. En este caso repasaremos estos parámetros, atendiendo a las características específicas del sistema de reconocimiento biométrico basado en patrones de iris, tratando así de evaluar en base a estos criterios el potencial de este tipo de sistemas.

Universalidad

Tal y como se describió anteriormente, este factor mide cualitativamente, la posibilidad de extraer las características de un individuo, necesarias para el buen funcionamiento del sistema.

El nicho de población, que tiene la posibilidad de hacer uso de estos sistemas es muy amplio, dado que muy pocas personas carecen de ambos ojos a la vez, o aquellas personas que padecen aniridia o ausencia de iris en su ojo, siendo solamente necesario tener un iris de los dos en buen estado para poder llevar a cabo tanto los procesos de identificación como el de reclutamiento.

Las personas con problemas de ceguera pueden en muchos casos hacer uso de estos sistemas, aunque en otros la falta total de la zona del iris hace imposible reclutarlos. Por otro lado las personas mayores, desarrollan en ocasiones círculos blancos alrededor del iris, lo que tiene que ser tomado en cuenta, a la hora de hacer uso del sistema.

Se puede considerar por tanto, que la universalidad de los sistemas de reconocimiento biométrico basados en patrones de iris es muy alta.

Unicidad

Esta es una de las principales características que debe cumplir un sistema de identificación basado en iris. La unicidad, se puede considerar según lo expuesto anteriormente uno de los baluartes de este tipo de sistemas, ya que evalúa la probabilidad de que dos individuos posean las mismas características, en este caso concreto, que dos personas tengan un mismo patrón de iris, factor que como ya se ha visto anteriormente es muy poco probable, dado que este factor del ojo humano no está determinado genéticamente (lo que implica también que los dos ojos de un mismo individuo tienen patrones de iris no relacionados). La posibilidad de encontrar dos iris idénticos es de 1 entre 10^{78} , lo que hace de estos un rasgo muy apropiado para llevar a cabo procesos de identificación biométrica.

Estas ideas, se recogen en varios de los estudios llevados a cabo por el profesor J. Daugman [Dau00] [Dau01] [Dau01.2] [Dau02] [Dau03] [Dau03.2] [Dau04] [Dau85] [Dau92] [Dau93] [Dau94] [Dau95], donde se indica que los patrones de iris presentan un alto grado de aleatoriedad, poseyendo alrededor de 244 grados de libertad, que permite diferenciar distintos patrones de iris, de modo que es completamente factible la utilización de estas características biométricas en sistemas de identificación personal en tiempo real, con unos niveles de fiabilidad muy elevados. Este valor de 244 grados de libertad debe considerarse como un valor de referencia, ya que depende en todo caso de los métodos de cálculo desarrollados, estos estudios determinan un posible rango de valores de grados de libertad comprendido entre 227 y 262.

Otro aspecto relacionado con la unicidad de los patrones de iris, es la medida del grado de correlación entre los iris de ojos genéticamente idénticos. Una fuente de iris genéticamente idénticos, es la de una persona y sus dos ojos derecho e izquierdo. Estos dos iris tendrán la misma relación genética, como la tendrá los cuatro patrones de iris que se pueden obtener de gemelos monocigóticos o las $2N$ muestras que se obtendrían de N clones. En el estudio, de John Daugman y Cathryn Downing, *Epigenetic randomness, complexity and singularity of human iris patterns* [Dau01.2], se indica que los detalles de

los patrones de iris obtenidos de ojos genéticamente idénticos son incorrelados. Este grado de independencia es similar al presente entre los ojos de individuos sin ningún tipo de relación genética.

Este factor de alto grado de unicidad, deberá ser considerado a la hora del desarrollo y utilización del sistema de identificación, ya que la captura de la imagen del iris deberá realizarse para uno de los dos ojos de un usuario de manera específica, al no ser los patrones de ambos ojos intercambiables.

La textura del iris del ojo es considerada la característica fenotípica, visible en el rostro de una persona que presenta una mayor unicidad.

Como resultado del elevado nivel de unicidad que presentan las características extraídas de una imagen de iris, este tipo de sistemas presentan un grado de fiabilidad muy alto.

Estabilidad

El desarrollo y aparición de las estructuras que configurarán el patrón del iris, que queda determinado durante la última etapa del desarrollo embrionario, constituye una estructura estable a lo largo de la vida, si no tenemos en cuenta posibles accidentes u operaciones quirúrgicas, si descontamos los posibles cambios en la pigmentación que no repercuten de ninguna manera en el buen funcionamiento del sistema, ya que la extracción de características se realiza en base a una imagen en escala de grises, por lo que este cambio de color no es significativo.

Otra característica que proporciona una gran estabilidad al iris, es la protección y el aislamiento frente a agentes externos, gracias a su situación tras la cornea y el humor acuoso.

Facilidad de Captura

La captura del patrón de iris, es un proceso relativamente sencillo, en cuanto a las acciones requeridas por parte del usuario. Esta captura se realiza de forma no invasiva utilizando para ello una cámara de alta resolución, con una iluminación cercana al infrarrojo, aunque también se puede llevar a cabo con una cámara fotográfica convencional, una cámara fotográfica digital, o incluso mediante capturas de una cámara de vídeo.

Rendimiento

El rendimiento de un sistema de reconocimiento biométrico viene definido por las tasas de acierto y error. A la hora de evaluar este aspecto de un sistema, se tienen en cuenta los cuatro ratios determinados en el apartado relativo a las *Características técnicas de un sistema biométrico*: FAR, FRR, FTE y EER.

Estos criterios variarán en base sobre todo al umbral de decisión definido en el módulo de comparación de diferentes patrones, y que puede ser modificado de forma que se optimice el rendimiento del sistema.

Cabe observar que la utilización de una de estas características de manera independiente para evaluar el desarrollo del sistema resultaría inútil. El objetivo buscado es encontrar unos criterios de decisión que permitan maximizar el rendimiento del sistema, reduciendo al mínimo e incluso buscando unas probabilidades de error nulas.

Los sistemas de reconocimiento de iris presentan niveles de rendimiento muy elevados, pudiendo tenerse tasas de falsa aceptación muy bajas, incluso nulas, para valores de falso rechazo reducidos.

Aceptación por los usuarios

Como ya se definió anteriormente este es un factor clave para poder concluir el éxito o fracaso del sistema. A la hora de considerar el asunto de la privacidad y el consentimiento del usuario, es importante hacer hincapié, que el proceso de reclutamiento requiere en cualquier caso, que el usuario realice este proceso de manera voluntaria, teniendo en cuenta que una imagen realizada sin el consentimiento del usuario, saldría movida o borrosa, y no sería de gran calidad, dificultando en exceso el proceso tanto en el reclutamiento como en el proceso de identificación.

En un principio, los usuarios de este tipo de sistemas presentaban algunas dudas en su utilización, debido a las reticencias que presentan las personas a aquellas circunstancias relacionadas con sus ojos. Sin embargo el desarrollo de nuevos dispositivos de captura, así como la forma no intrusiva en la que ésta se realiza (al existir una distancia prudencial entre el sujeto y las cámaras utilizadas para tomar la imagen del iris), ha derivado en una creciente aceptación popular a la hora de utilizar estos sistemas de reconocimiento.

La información recopilada mediante este proceso, no debe ser usada en ningún caso con otro propósito diferente a la identificación o verificación de la identidad de la persona, como podría ocurrir en sistemas de vigilancia.

Robustez frente a la burla del sistema

La robustez que presentan los sistemas de reconocimiento de iris, frente a posibles ataques en los que se intenta falsear los rasgos de entrada, es muy elevada. En un primer momento cuando la tecnología estaba en sus primeros años de desarrollo, los sistemas comerciales de reconocimiento de iris podían ser engañados mediante el uso de fotos de un iris de alta calidad impreso en papel. La tecnología se ha ido desarrollando, para permitir diferenciar un iris vivo de otro falso, mediante el estudio de la variación del diámetro de la pupila, experimentado frente a diferentes condiciones de iluminación, en imágenes tomadas consecutivamente, gracias al uso de cámaras que permitan variar dinámicamente el nivel de luz de la imagen.

La pupila es un órgano dinámico, y su tamaño, como ocurre con otras medidas biológicas, también experimenta variaciones a lo largo del tiempo. Estas variaciones, pueden darse bajo condiciones de iluminación constantes. Este comportamiento recibe el nombre de *hippus*, y permite la evaluación de sujeto vivo sin que sea necesaria la modificación de las condiciones de captura de la imagen, lo que supone menor complejidad a la hora de realizar estos trabajos. Las variaciones en el tamaño de la pupila debido al *hippus* pueden comprenderse entre unos niveles típicos desde 0.3 mm hasta 1.5mm. Este hecho puede añadir unas modificaciones medias en el cálculo del diámetro de la pupila de unos 0.5mm.

Además de utilizar los cambios en el tamaño de la pupila, también se puede utilizar una iluminación en el rango de infrarrojos para determinar la presencia de un espécimen vivo. Este tipo de luz permitirá el desarrollo de técnicas que estudien el flujo sanguíneo del ojo del individuo bajo estudio.

Por otro lado, la modificación de la estructura del iris mediante cirugía, resulta muy arriesgada, pudiendo provocar daños permanentes en la visión del sujeto sometido a la operación.

Coste

Este es sin lugar a duda, uno de los principales inconvenientes de este tipo de sistemas. Sin embargo, la reducción experimentada en el precio de las cámaras fotográficas digitales en la actualidad, está permitiendo que los costes necesarios para el desarrollo e implementación de dispositivos y sistemas para el reconocimiento de iris sean cada vez más competitivos.

Conclusión

El reconocimiento biométrico de iris, cumple muy bien en los siete pilares básicos de los sistemas biométricos. Todos los humanos (incluida la gente ciega), poseen iris (*universalidad*), con excepción de algunos casos particulares y poco frecuentes. Los patrones de iris son *distintivos* lo que se basa en explicaciones científicas. Los patrones son también *permanentes* desde la infancia hasta la edad adulta, a excepción de aquellas personas que sufran alguna enfermedad ocular. Los sensores existentes (cámaras infrarrojas de alta resolución) son capaces de recolectar imágenes de alta calidad, a pesar de que pueden llegar a ser necesarias diversas tomas. Los sistemas de reconocimiento de iris, ofrecen un *perfecto rendimiento*, incluso en funciones de identificación, con grandes bases de datos de usuarios, sin embargo el *coste* de la infraestructura necesaria sigue siendo elevado. La *aceptabilidad* del reconocimiento de iris es hoy en día relativamente baja. Finalmente, a pesar de que los primeros sistemas eran fáciles de engañar, simplemente con una foto de un iris colocado correctamente, los nuevos sistemas desarrollados son más costosos, pero más *difíciles de burlar*.

3.3.4. Estado del desarrollo de la tecnología, mercado, aplicaciones y tendencias futuras

La tecnología usada en el reconocimiento de iris, tiene un nivel de madurez adecuado para su uso comercial, a pesar de que casi todas las patentes de relevante importancia pertenecen a una misma compañía (Iridian), lo que implicará problemas en cuanto a futuros procesos de innovación de esta tecnología.

De todos modos, sigue habiendo investigaciones en curso, principalmente en Asia, aunque cada vez más en Europa, acerca de métodos alternativos. Los sistemas trabajan con buenos resultados en modo de identificación y requieren en pocas ocasiones repetir el proceso de reclutamiento para un mismo usuario, en comparación con otras tecnologías, haciendo de este tipo de sistemas biométricos ideales para sistemas de identificación a gran escala.

Puede ser además interesante su aplicación con propósitos legales como pueden ser documentos de identidad electrónica o controles de acceso en fronteras, y también es extremadamente eficiente en aplicaciones de verificación como controles de acceso físico o controles temporales de asistencia, y en el proceso de convergencia de la sociedad de las telecomunicaciones se pueden encontrar aplicaciones en las que sea de gran utilidad, como

acceso a terminales móviles o aplicaciones wireless, una vez que los costes de este tipo de sistemas y dispositivos se hayan mejorado.

Todos los sistemas de reconocimiento actuales hacen uso de los algoritmos desarrollados por John Daugman. Los sistemas de escaneo de iris que se encuentran actualmente en el mercado, son relativamente rápidos, flexibles en términos de condiciones de operabilidad, y muy eficientes. Trabajan en un rango de entre 10 y 20 cm., aunque existen incluso sistemas en proceso que llegan a operar en distancias tales como 5 m. El tiempo de verificación puede ser muy corto, por ejemplo, el tiempo necesario para hacer una búsqueda en una base de datos de 1 millón de *IrisCodes* en un PC trabajando a 2,2 GHz puede ser de aproximadamente 1,7 segundos.

3.3.4.1. Retos relativos a la tecnología

El cálculo de un *IrisCode* se puede llevar a cabo en un tiempo de menos de 10 milisegundos, y el proceso de reclutamiento de un usuario suele acarrear alrededor de 2-3 minutos. De todos modos, el proceso de reclutamiento en un sistema biométrico basado en el iris, puede ser el menos confortable de los llevados a cabo en los diferentes sistemas biométricos, debido a la necesidad de mantener la vista fija y evitar parpadear en el momento de la toma de la imagen.

Sin embargo presenta la ventaja de ser un proceso no invasivo, por el hecho de que el ojo no debe tocar ninguna superficie ni debe ser manipulado, y la iluminación usada con una longitud de onda cercana al infrarrojo, no produce en ningún caso malestar al usuario, y suele ser la usada comúnmente, dado que produce los mejores resultados en los reconocimientos de usuarios con una pigmentación alta del iris (ojos marrones), cuyo porcentaje es el mayor, entre toda la población del mundo. No existe evidencia alguna, de que este tipo de iluminación, produzca daño alguno a los ojos del usuario, sin embargo, esto debería seguir siendo estudiado, para corroborar esta hipótesis.

Otro problema común, en el uso de estos sistemas, es la aparición de imágenes de un ojo desenfocado, lo que produce un incremento notable del ruido de la imagen, y en el cálculo posterior del *IrisCode*. Por otro lado, este problema se traduce en una ventaja, ya que predispone la necesidad de que el usuario consienta en el proceso de reclutamiento.

El nicho de población, que tiene la posibilidad de hacer uso de estos sistemas es muy amplio, lo que implica un alto nivel de universalidad, dado que muy pocas personas carecen de ambos ojos simultáneamente. Las personas con problemas de ceguera pueden en muchos casos hacer uso de estos sistemas, aunque en otros la falta total de la zona del iris (aniridia) hace imposible reclutarlos. Por otro lado las personas mayores, desarrollan en ocasiones círculos blancos alrededor del iris, lo que tiene que ser tomado en cuenta, a la hora de hacer uso del sistema.

La complejidad combinatoria asociada a la variabilidad de los patrones característicos del iris es tan alta, que hace posible la toma de decisiones con un nivel de confianza alto, incluso en sistemas aplicados a grandes bases de datos y en modo de identificación.

La tecnología asociada a este sistema, sirve tanto para usarlo en modo de identificación como de verificación de identidades, lo que implica que esta aplicación tiene un gran potencial en uso a gran escala. Sin embargo los requisitos de uso en modo de

identificación son mucho más exigentes que los que permiten la verificación de personas, sin embargo al no existir actualmente aplicaciones a gran escala, no se ha podido probar su aplicabilidad, y ambos modos operan de manera exacta en aplicaciones de pequeña escala.

Otro de los grandes problemas a los que se enfrenta esta tecnología, supone el almacenamiento de la información procedente del análisis de un iris, y que debe ser protegida ante posibles robos o pérdidas que comprometan la seguridad en cualquier caso.

Esta tecnología, esta perfectamente adaptada para el uso combinado con tarjetas inteligentes, dado el relativamente pequeño tamaño de la plantilla resultante (512 bytes).

3.3.4.2. Especificaciones de mercado

La iniciativa mundial antiterrorista implica como claro objetivo el reforzar la seguridad en las aduanas y aeropuertos. El reconocimiento biométrico de iris se utiliza en diversos aeropuertos, ya sea puramente por motivos de seguridad, o por motivos conjuntos de comodidad y seguridad, como por ejemplo en el Schirpol Airport, (Países Bajos), donde los pasajeros pueden hacer uso de su iris como tarjeta de entrada en el control de inmigración, con lo cual se evitan la espera de largas colas.

El crecimiento del mercado inducido por el uso de los rasgos biométricos en los documentos de identidad no parece tener gran repercusión en la tecnología biométrica de reconocimiento de iris, dado que en este plano el reconocimiento facial y el de huellas dactilares ocupan los primeros puestos de uso.

Iridian, es actualmente el líder de mercado en cuanto a tecnología de reconocimiento de iris, además de poseer la mayor y más importante parte de las patentes relacionadas con esta tecnología. Los competidores más cercanos son LG y OKI. Entre estas compañías, proveen actualmente un total del 2% del mercado biométrico de control de acceso, aspirando a conseguir una cuota de mercado del 12% para el año 2008.¹²¹

Debido a los altos costes y a la poca aceptación que el usuario tiene de este tipo de sistemas biométricos, la tecnología de reconocimiento de iris continúa siendo una solución de nicho para grandes empresas.

3.3.4.3. Aplicaciones

Algunas de las aplicaciones del reconocimiento de iris son actualmente: control de inmigración y de paso de fronteras (haciendo uso de los métodos de verificación, identificación y búsqueda en listas), seguridad en aviación, control de acceso en áreas restringidas, casas u otros edificios, acceso de usuarios a bases de datos.

Hay un amplio abanico de posibles usos de esta tecnología en programas de ayuda social, acceso y puesta en marcha de vehículos, aplicaciones forenses y policiales, y en general cualquier otra operación que vincule secretos o claves con la identificación personal.

El uso más extendido actualmente, se encuentra en los 17 puntos de entrada (por mar, aire y tierra), de los Emiratos Árabes Unidos. En el Control de Inmigración, se examinan e identifican a todos los pasajeros, en relación a una base de datos de cerca de 420000 IrisCodes, de personas que se encuentran expulsadas de este país. Después de 3 años en operativo, y con una media de 6500 pasajeros accediendo cada día, lo que hace un

total de 2,1 millones de pasajeros identificados, se obtuvieron cifras de alrededor de 9500 personas identificadas dentro de la lista de personas con acceso no permitido, que hacían uso de identidades falsas para tratar de colarse, describiéndose el sistema como de gran eficacia y rapidez (Daugman, 2004). Este mismo sistema, fue puesto a prueba de manera efectiva en el aeropuerto de Schiphol (Países Bajos), el aeropuerto de Frankfurt (Alemania), y diversos aeropuertos de Canadá y del Reino Unido, durante el año 2004. Más allá de esto, en la frontera entre Pakistán y Afganistán, la Comisión de refugiados de las Naciones Unidas (United Nations High Commission for Refugees, UNHCR), hizo uso de sistemas basados en el reconocimiento de iris para la identificación anónima de refugiados afganos que retornaban a su país.

En términos de aceptación de usuarios, queda claramente definido que este sistema no conlleva las connotaciones negativas de los sistemas biométricos basados en huellas dactilares. Por otra parte, el proceso de reclutamiento, no conlleva ningún contacto, y hace uso de tecnología de video y fotografía, más familiar para el público en general. Sin embargo, los primeros usuarios del sistema declararon en su momento, que este procedimiento creaba una situación incómoda para el usuario, y que la calidad de la imagen obtenida es un punto crítico para el éxito de la posterior fase de reconocimiento.

El uso de la tecnología en estos procesos de reconocimiento, para tratar de minimizar el uso y acceso fraudulento, puede llegar a crear sin embargo un estigma social similar al creado en el reconocimiento de las huellas dactilares.

3.3.4.4. Tendencias futuras

Como en el caso de la mayoría de los sistemas biométricos, la representación de información objetiva y fiable es limitada. De todos modos, la precisión de este tipo de sistemas es sin ninguna duda la mejor en comparación con otras modalidades, si se asumen que el sistema funciona de manera correcta. Recientes trabajos de campo y estudios en laboratorios, han obtenido resultados de ningún falso positivo en 9,1 millones de comparaciones (Daugman 2003).

Uno de los factores que debería mejorarse es la elección del umbral de manera automática, sin intervención humana, minimizando así la probabilidad de fallo de usuario.

A pesar de los elevados niveles de eficacia presentados, lo que supone un punto básico en cualquier aplicación de seguridad, y la falta de connotaciones negativas, los elevados costes de desarrollo de la tecnología así como las posibles incomodidades que un usuario pueda presentar, son algunos de los problemas que la tecnología de los sistemas de reconocimiento de iris debe afrontar, con el fin de que su desarrollo y el de su mercado sea positivo en un futuro.

3.3.5. Reconocimiento de iris: Falsificaciones y medidas para evitarlas

La medida de la eficacia y unicidad de un sistema biométrico, son tan solo parte de la medida de su fiabilidad [Jan02]. Si examinamos a fondo la seguridad de un sistema biométrico, debemos diferenciar al menos tres aspectos importantes:

1. Medidas de precisión estadísticas clásicas: Ej.: el EER, medidas de disimilaridad, distancias entre clases, etc.,...
2. La arquitectura e implementación del sistema: Ej.: Los sistemas que envían la información a través de redes son más propensos a sufrir ataques por parte de terceros.
3. La resistencia a las falsificaciones. Asumiendo que un impostor puede tratar de romper la seguridad de un sistema biométrico, la pregunta es ¿cuanto le costará en términos de tiempo y dinero?

El primero de estos puntos es fácil de responder si se atiende a datos significativos y conjuntos aceptados de medidas.

Atendiendo a la arquitectura del sistema, el concepto resulta más complejo. A pesar de que existen procedimientos capaces de evaluar la seguridad del concepto en sí y de su implementación de manera estándar, como puede ser el denominado Common Criteria.

Finalmente la resistencia contra posibles ataques es necesario de un determinado rasgo biométrico tiene que ser estimada. Es quizás el punto más crítico de los tres descritos, ya que es posible determinar si un sistema puede ser engañado, pero es mucho más complicado probar que en ningún caso puede serlo.

Independientemente de la precisión de un sistema en términos estadísticos, tales como el EER, este hecho no previene al sistema de ser vulnerable contra posibles ataques, lo que sin duda alguna es de vital importancia para la seguridad del sistema. Es por tanto necesario determinar la viabilidad y el coste de suplantar el rasgo biométrico de una persona y así vulnerar un sistema, así como determinar las medidas necesarias para evitar esto.

Para definir las posibles amenazas a las que se enfrenta un determinado sistema, es necesario hacer una definición más específica, de lo que realmente supone una amenaza para un sistema biométrico. No se trata pues, de problemas con el hardware o el software propios del sistema, el único objeto que valida la definición de falsificación, es el que supone presentar al sensor de entrada del sistema biométrico, un rasgo falsificado del mismo modo que se haría durante una operación legítima llevada a cabo con el sistema, por ejemplo poner un dedo de goma con la huella dactilar impresa.

Para determinar el esfuerzo necesario que supone conseguir falsear el rasgo biométrico en cuestión, es necesario atenerse a tres cuestiones claves.

En primer lugar, hay que analizar el coste de adquirir la copia del rasgo biométrico. Esta cuestión se puede responder sin tener en cuenta el rasgo biométrico del sistema utilizado. Obviamente el usuario que sufre en proceso de falsificación no lo hace de manera cooperativa, ya que ni siquiera esta al tanto del proceso, lo que incrementa el riesgo de descubrir el engaño, al existir la necesidad de acercarse al usuario para copiar el rasgo.

La siguiente tabla compara los diferentes rasgos en función del coste que supone hacer una copia de la característica, proceso que implica recoger toda la información biométrica necesaria, y no solo producir una copia física, en el caso de rasgos estáticos.

Capítulo 3 – Introducción a los sistemas de reconocimiento de iris

<i>Característica</i>	<i>Sensor/Método</i>	<i>Riesgo de ser descubierto</i>	<i>Coste de la copia</i>
ADN	Electroforesis	Bajo	Alto
Cara	Óptico, infrarrojo	Bajo, bastaría una foto publicada	Bajo
Huella dactilar	Óptico, termal o capacitivo	Muy bajo	Muy bajo
Iris	Óptico, infrarrojo	Medio, asumiendo bajo nivel de cooperación	Medio/Alto
Retina	Luz coherente	Alto, necesario alto nivel de cooperación	Alto/Muy alto

Tabla 3-2 Tabla comparativa de los métodos y costes de copia de distintos rasgos biométricos.

Si consideramos el iris, que es el rasgo que se trata en este proyecto, la pregunta sería: ¿cómo es un proceso de copia de un iris?. El objetivo es capturar la mayor cantidad de información necesaria para la identificación biométrica. Asumiendo que tan solo es necesaria la apariencia visual del iris del usuario, una buena foto instantánea del ojo sería suficiente. Si tenemos en cuenta factores como la microestructura tridimensional del iris, quizás fuesen necesarias varias imágenes en diferentes direcciones y tomadas bajo iluminaciones diferentes. Además de esto, la pupila deberá estar contraída, para procurar que aparezca la mayor área posible de iris en la foto. Estos son los requisitos básicos para recolectar la suficiente información acerca de este rasgo. Consecuentemente, la adquisición de una copia del iris, haría necesario tener un sensor óptico, como una cámara CCD, y la oportunidad apropiada para obtener imágenes nítidas del iris.

Un caso interesante, es el de la chica afgana que apareció hace 20 años fotografiada por Steve McCurry, en la revista Nacional Geographic, lo que años más tarde, en el 2002, dio lugar a un estudio [Geo02] sobre el iris de esta chica a quien se creyó encontrar de nuevo 17 años más tarde, durante los ataques de Estados Unidos en esta zona. En este caso la copia del rasgo biométrico, en forma de una simple instantánea, permitió verificar la identidad de la chica con una probabilidad de error muy baja.



Figura 3-26 Fotografías de la chica afgana publicadas en el estudio de Nacional Geographic acerca de los sistemas biométricos basados en el iris.

Capítulo 3 – Introducción a los sistemas de reconocimiento de iris

Este ejemplo no debe llevar a la creencia de que una simple foto permitiría engañar al sistema biométrico, ya que es sin duda necesario imitar otros aspectos relativos al uso del propio sistema que mediante esta simple fotografía no sería posible llevar a cabo. Si observamos la siguiente figura, podemos determinar que existen diferencias apreciables en el espectro de Fourier de una imagen de iris real y una falsa.

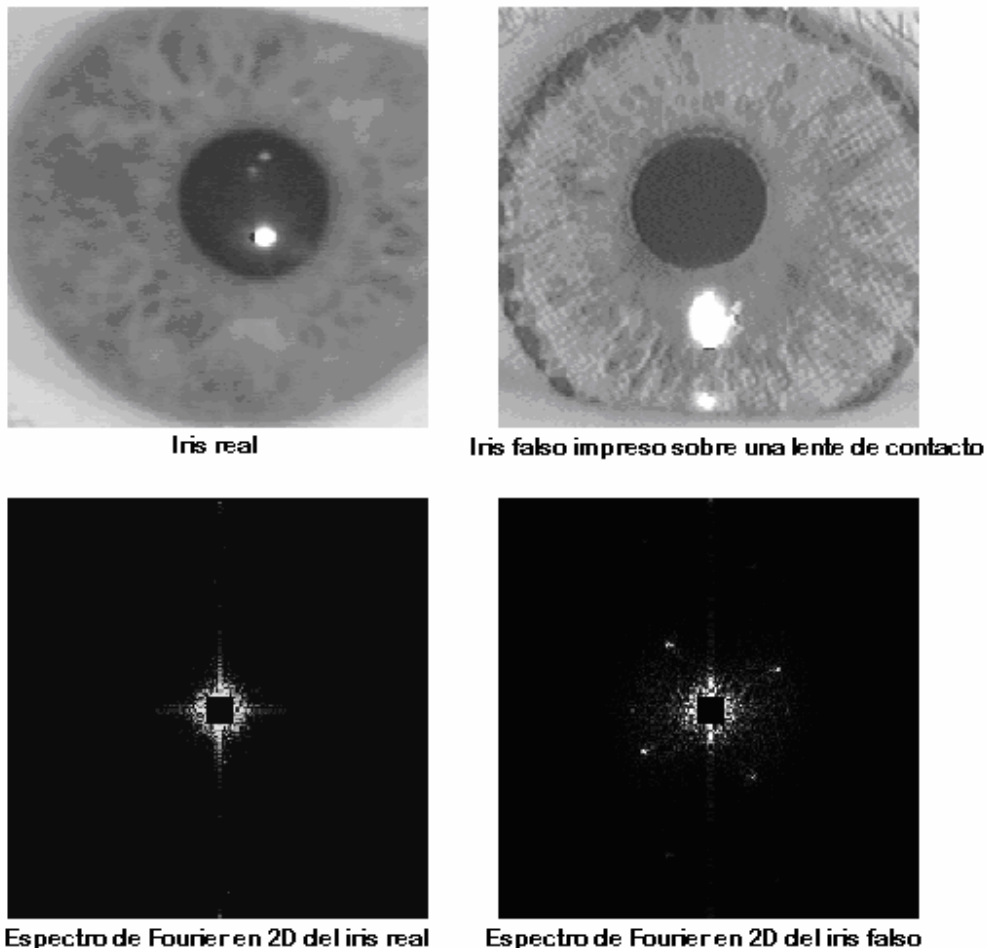


Figura 3-27 Comparativa de los espectros de Fourier de un iris real y otro falso.

En segundo lugar, es necesario determinar la manera de conseguir que el rasgo obtenido sea compatible con el sensor biométrico del sistema. Suponiendo que se posee toda la información biométrica necesaria, es necesario afrontar la posibilidad de que el sensor de entrada del sistema acepte o no la señal que se ha creado. Hay que considerar que los dispositivos biométricos usados en sistemas de reconocimientos de iris son habitualmente cámaras que hacen uso de sensores de luz visible o de infrarrojos. Al contrario que los sensores táctiles que hacen necesario el contacto, en estos sistemas tan solo es necesario mantener contacto visual con el sensor.

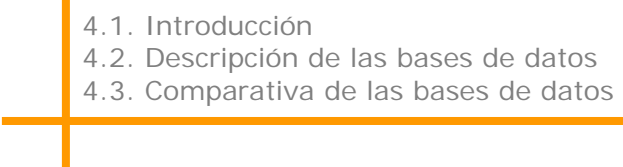
En último lugar hay que analizar la dificultad que implica engañar al sistema, de manera que acepte el rasgo falsificado. De acuerdo con lo argumentado anteriormente, todo sistema biométrico es susceptible de ser engañado mediante una copia del rasgo, y lo único que se interpone en este proceso de falsificación, son los costes derivados de llevar a cabo la falsificación, por lo que el fabricante del sistema debe procurar que este coste, en tiempo y dinero, sea lo más elevado posible, de manera que el sistema este diseñado con la protección necesaria contra cualquier posible ataque que pueda sufrir, es decir ha de estar un escalón por encima de los posibles impostores. Por otro lado, si nos posicionamos en el lado de la persona con el objetivo de engañar al sistema, se cuenta con la ventaja de que si existe tan solo un ataque contra el que no esté protegido el sistema, este lo hará totalmente vulnerable.

Una vez obtenidos los datos necesarios para engañar al sistema, es el momento de observar las posibilidades del sistema de rechazar este tipo de ataques. Estos métodos para denegar el ataque, se pueden definir en varias categorías:

- **Propiedades pasivas:** Propiedades de la entrada del sistema o de la fuente propia del rasgo. Por ejemplo la propiedad de dilatación y contracción de la pupila, lo que hace variar el área del iris.
- **Métodos reactivos:** Hardware adicional que permite obtener reacciones involuntarias del propio usuario, y estímulos característicos del rasgo. En este caso una luz infrarroja variable hace que la pupila varíe su tamaño permitiendo diferenciar un ojo vivo de otro que no lo está.
- **Participación activa:** Se trata del mismo concepto, que los métodos reactivos pero con reacciones voluntarias del usuario. Por ejemplo hacer al usuario seguir un recorrido prefijado con los ojos que la cámara capta.

Capítulo 4

Bases de datos

- 4.1. Introducción
 - 4.2. Descripción de las bases de datos
 - 4.3. Comparativa de las bases de datos
- 

Capítulo 4 - Bases de datos

4.1. Introducción

Durante el proceso de prueba de los algoritmos desarrollados para el sistema de reconocimiento de iris, se han contrastado los resultados obtenidos en el uso de diferentes bases de datos de carácter público de iris. La carencia de algoritmos de uso público para realizar pruebas sobre estas bases de datos es sin duda un obstáculo para el desarrollo actual de la tecnología de reconocimiento biométrico de iris.

Es necesario hacer una descripción de estas bases de datos, con el fin de determinar las características de cada una, con lo que se pudieran sacar conclusiones en relación a las ventajas o fallos de los algoritmos desarrollados, de modo que sea más sencillo advertir los posibles cambios que permitan mejorar estos.

Las bases de datos utilizadas son:

- CASIA Iris Database. (China)
- Palacky University Iris Database. (República Checa)
- University of Bath Iris Image Database. (Inglaterra)
- GBTNI. (Madrid)

Igualmente en la página donde se obtuvo la base de datos de la University of Bath de Inglaterra (<http://www.bath.ac.uk/elec-eng/pages/sipg/irisweb/>), se realiza una breve descripción del proceso llevado a cabo para la toma de muestras, de modo que se ha tomando esta como ejemplo y haciendo un resumen de la misma, para posteriormente describir el proceso que en la actualidad está llevando a cabo el GBTNI (Grupo de Biometría y Tratamiento Numérico de la Información), en el desarrollo de una nueva base de datos de iris, con lo que se permite obtener y comparar las diferentes versiones acerca del funcionamiento de este tipo de procesos.

Además aunque no se han probado los algoritmos, también se ha estudiado la CUHK Iris Database (Hong Kong), que debido a que pertenece a los estudios realizados en el Computer Vision Laboratory, del Department of Automation and Computer-Aided Engineering de la Chinese University of Hong Kong, sobre visión artificial, presenta unas características diferentes a las de una base de datos orientada al reconocimiento biométrico de iris, que la hace menos apta para los objetivos de este proyecto. Por esto se ha incluido una descripción de esta base de datos entre las demás analizadas.

Como resumen final se lleva a cabo un cuadro comparativo de las diferentes bases de datos, con el fin de tener una referencia, necesaria para el análisis de los datos obtenidos con los diferentes algoritmos.

4.2. Descripción de las Bases de Datos

4.2.1. CASIA Iris Database

Nombre de la Base de datos: CASIA Iris Database

Rasgo biométrico: Iris.

País: China.

Realizado por: The Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences.

Web de referencia: <http://www.cbsr.ia.ac.cn/Iris%20Database.htm>

Número de sesiones: 2.

Muestras por sesión: 3 en la primera, y 4 en la segunda, en total 7.

Número de ojos diferentes: 108.

Número de personas utilizadas: 80.

Número de imágenes capturadas por persona: ----

Número total de muestras: 756

Porcentaje de sujetos masculinos: -----

Porcentaje de sujetos femeninos: -----

Rango de edad: -----

Intervalo entre sesiones: 1 mes

Tamaño total de la base de datos (MB): 65,5

Tipo de sensor: Prototipo.

Tipo de dispositivo de captura: Escáner de iris.

Descripción del sensor: Sensor óptico digital diseñado por National Laboratory of Pattern Recognition (NLPR).

Rasgo capturado: Iris con luz infrarroja y buen nivel de contraste.

Formato del fichero de imagen: BMP

Entorno de captura: ----

Resolución: 320x280.

Comentarios adicionales: Imágenes en escala de gris. Ojos rasgados debido al nicho de población usado en la muestra.

Las imágenes de la base de datos de iris CASIA, son en su gran mayoría de personas de raza asiática. Como es bien sabido, la característica propia de este nicho de población son los ojos rasgados, factor que influye de manera notable a la hora del tratamiento de las imágenes de iris debido a los posibles cortes de la zona de procesado debido a los parpados y pestañas más caídos.

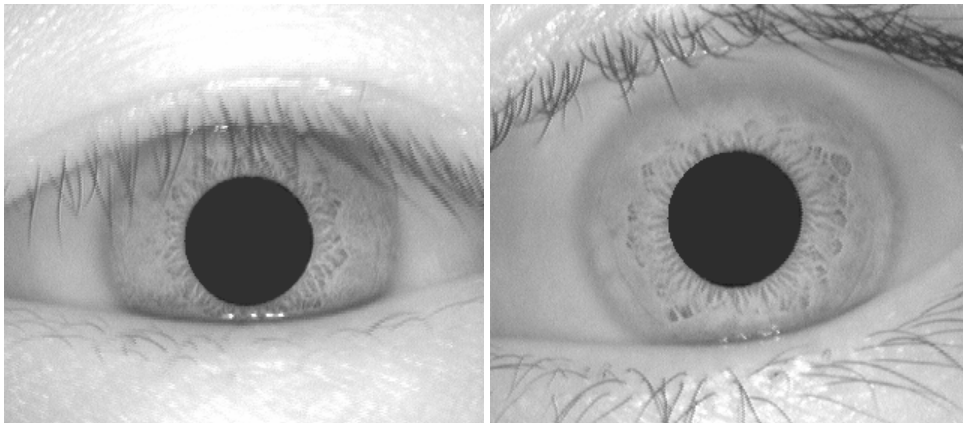


Figura 4-1 Muestras de la base de datos de patrones de iris *Casia*.

De cada clase de iris se capturaron imágenes en dos sesiones diferentes, con un intervalo de 1 mes.

Originalmente las imágenes vienen comprimidas y archivadas en carpetas de la siguiente manera, XXX\S\XXX_S_Y.bmp, siendo:

- XXX: el identificador único del número de muestra desde 000 a 108
- S: El índice representativo del número de sesión de la muestra (1 ó 2).
- Y: El índice de la imagen dentro de la sesión, esto es en la sesión 1 el rango será de 1 a 3 y en la sesión 2 el rango será de 1 a 4.

De este modo 045_1_2.bmp, implica la segunda imagen tomada en la primera sesión de la muestra número 45.

La base de datos se puede descargar gratuitamente desde la dirección indicada, tras rellenar un formulario, y la aceptación de las condiciones que se mencionan en la página.

4.2.2. Palacky University Iris Database

Nombre de la Base de datos: Palacky University Iris Database “*Phoenix*”.

Rasgo biométrico: Iris

País: Republica checa.

Realizado por: Michal Dobeš y Libor Machala, Palacky University.

Web de referencia: <http://phoenix.inf.upol.cz/iris/>

Número de sesiones: 1.

Muestras por sesión: 3 de cada ojo de un mismo usuario.

Número de ojos diferentes: 128, 64 muestras de ojos derechos y 64 de ojos izquierdos.

Número de personas utilizadas: 64.

Número de imágenes capturadas por persona: 6

Número total de muestras: 584

Porcentaje de sujetos masculinos: -----

Porcentaje de sujetos femeninos: -----

Rango de edad: -----

Intervalo entre sesiones: -----

Tamaño total de la base de datos (MB): 170

Tipo de sensor: SONY DXC-950P 3CCD.

Tipo de dispositivo de captura: Cámara digital TOPCON TRC50IA.

Descripción del sensor: Dispositivo óptico conectado a la cámara.

Rasgo capturado: Imágenes de iris de los dos ojos de un mismo usuario.

Formato del fichero de imagen: PNG

Entorno de captura: -----

Resolución: 24 bit - RGB, 576 x 768 píxeles.

Comentarios adicionales: La base de datos está en color, a diferencia de las demás que se encuentran en escala de grises. Se hace uso de un marco en forma de círculo truncado en la parte superior e inferior, y con una muesca aproximadamente a 60° (ver imágenes de muestra).

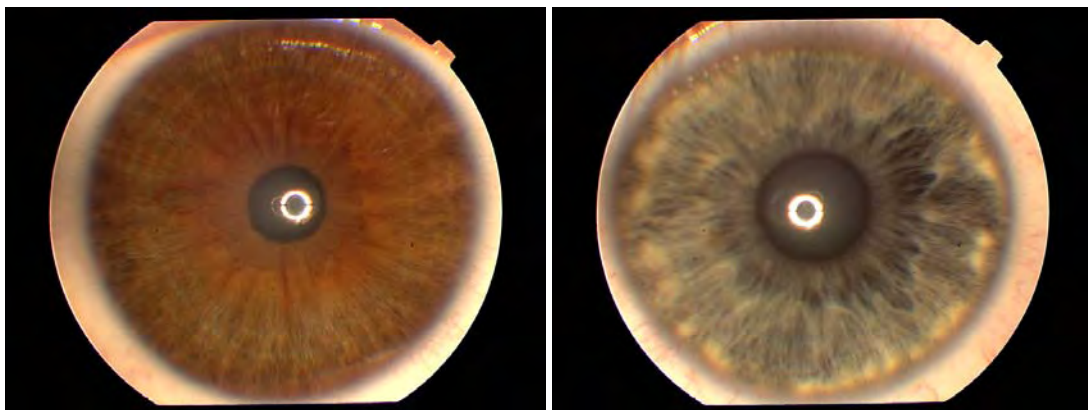


Figura 4-2 Muestras de la base de datos de patrones de iris *Phoenix*.

El marco que anteriormente se ha comentado, se superpone a la imagen original del patrón de iris, enfocando en el centro la imagen del ojo del usuario, y permitiendo que información redundante exterior, no influya en el posterior procesado de la imagen.

4.2.3. University of Bath Iris Image Database

Nombre de la Base de datos: University of Bath Iris Image Database.

Rasgo biométrico: Iris

País: Bath, Inglaterra.

Realizado por: Signal and Image Processing Group (SIPG), Department of Electronic and Electrical Engineering de la University of Bath.

Web de referencia: <http://www.bath.ac.uk/elec-eng/pages/sipg/irisweb/>

Número de sesiones: 1.

Muestras por sesión: 20 de cada ojo de un mismo usuario.

Número de ojos diferentes: 400, 200 muestras de ojos derechos y 200 de ojos izquierdos.

Número de personas utilizadas: 200.

Número de imágenes capturadas por persona: 40

Número total de muestras: 8000.

Porcentaje de sujetos masculinos: -----

Porcentaje de sujetos femeninos: -----

Rango de edad: -----

Intervalo entre sesiones: -----

Tamaño total de la base de datos (MB): 146 MB-

Tipo de sensor: ISG LightWise LW-1.3-S-1394.

Tipo de dispositivo de captura: Cámara digital de alta resolución.

Rasgo capturado: Iris.

Formato del fichero de imagen: J2C.

Entorno de captura: Ver más adelante.

Resolución: 1280x960, imágenes en escala de gris.

Comentarios adicionales: La base de datos viene originalmente con las imágenes comprimidas.

Al descargar la base de datos de la página web de la Bath University, esta contiene las imágenes comprimidas mediante JPEG200, a 0,5 bits por píxel, de modo que las muestras originales que se encuentran en formato BMP, pasan a estar en formato J2C. Mediante el software *Advanced Batch Converter v. 3.9* (también es posible usar el software *Irfanview 3.98*), se pasaron las imágenes a formato JPG, por dos motivos; en primer lugar debido a que entre las extensiones de archivos de imágenes compatibles con *Matlab*, no se encuentra la mencionada J2C, y en segundo lugar para procurar una extensión diferentes a las de las demás bases de datos con las que se trabaja, de modo que se pueda observar la influencia de este factor en los resultados.

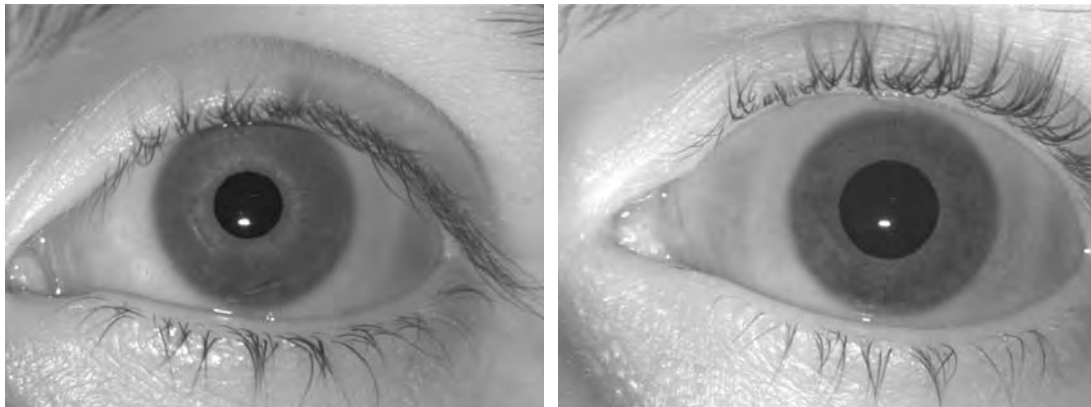


Figura 4-3 Muestras de la base de datos de patrones de iris *Bath University*.

Adicionalmente con la base de datos se pueden descargar dos ficheros de *Matlab*, mediante los cuales se puede llevar a cabo el proceso de normalización de las imágenes (**Normalizar.m**), y el procesamiento de las mismas (**IrisPreprocessor.p**), gracias al software desarrollado por este mismo laboratorio.

El programa de capturas de iris, llevado a cabo por este grupo de investigación, se lleva en colaboración con la empresa Smart Sensors Ltd. (<http://www.idcraft.com/>), de Inglaterra, obteniendo uno resultados de alta calidad.

En la página web de este grupo de investigación viene detallado el proceso de captura de las imágenes el cual a modo de ejemplo, se revisa aquí:

Organización del sistema:

La plataforma de captura, se compone de una cámara de alta resolución Machine Vision, montada sobre un soporte especial para cámaras de altura ajustable, equipada con una plataforma para posicionar la barbilla del usuario.



Figura 4-4 Vista del sistema de captura de imágenes de iris de la *Bath University*.

Un array de LEDs infrarrojos, se encuentran dispuestos detrás de la cámara, en un ángulo tal que sus reflejos se restrinjan a la zona de la pupila, de modo que no se pierda zona alguna de la textura propia del iris debido a estos reflejos.

Igualmente dispone de un filtro que tan solo permite el paso de la luz infrarroja, mediante el cual se evita la luz natural del entorno y otros posibles reflejos en el iris.

Durante la captura, se ha procurado que no se repita la toma de muestras de un mismo individuo mediante el uso de un identificador único tal como el número de identificación de estudiante de la Universidad de Bath o el número de pasaporte.

Procedimiento:

El procedimiento típico de captura, consiste en la colocación de la cabeza del usuario en la plataforma destinada a tal efecto, y el posicionamiento correcto de la cámara de manera que esta quede enfocada al ojo en cuestión. Se dispara una secuencia de 20 fotogramas, de los cuales se seleccionan los 20 mejores para formar parte de la base de datos.

Se requieren 10 minutos para capturar las imágenes de ambos ojos de un mismo usuario, de modo que es posible capturar la información de 6 usuarios en una hora. De este modo las previsiones son de conseguir una base de datos con información de 800 personas, en aproximadamente 6 meses.

Cámara:

La cámara usada es un modelo *ISG LightWise LW-1.3-S-1394*³. La empresa de fabricación de esta cámara y de los sensores y software de uso es Imaging Solutions Group (ISG)⁴.

³ Descripción detallada de la cámara en http://www.isgchips.com/Templates/t_lw-1.3-r-1394.htm

⁴ Página web de la empresa: <http://www.isgchips.com/index2.html>



Figura 4-5 Imágenes de la cámara digital utilizada en la *Bath University*.

Esta cámara, dispone de un sensor de imagen CMOS de 1,3 Megapíxel, lo que permite obtener una alta calidad de video y una excelente respuesta, con una velocidad de captura de video de 30 FPS (Frames per second) para imágenes de resolución 1280 x 1024, que es el caso de uso, y de FPS para VGA, además de tener una bajo coste y gran facilidad para su integración. La respuesta espectral de esta cámara en la región cercana al infrarrojo, que supone una de sus características más favorables, se puede observar en la siguiente figura:

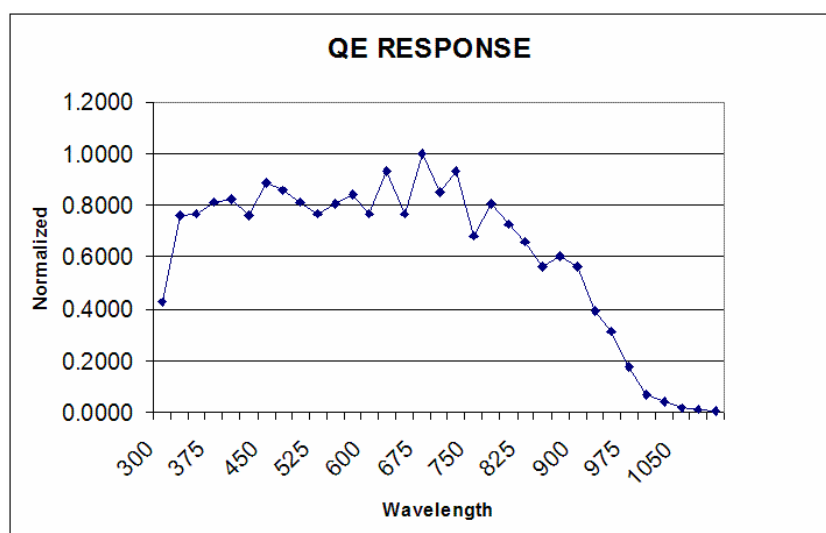


Figura 4-6 Respuesta espectral del sensor de la cámara

Cuenta también con una resolución de 10 bits. Además integra un procesado de imagen, desarrollado por que permite, interpolación de color, equilibrado de color, exposición tanto manual como automática, y calibración y corrección automática.

Lente:

Con el objetivo de maximizar el uso de toda la resolución aportada por la cámara, se hace uso para la captura de iris de una lente *Pentax C-3516 M⁵*, de 35 mm. Con dos anillos de extensión. Se trata de una lente focal de 35 mm, con un rango de enfoque menor a 0,4 m.

⁵ Detalles de la lente <http://www.bath.ac.uk/elec-eng/pages/sipg/irisweb/pentax-C3516-m.pdf>



Figura 4-7 Lente *Pentax C-3516 M*

El conjunto de la cámara y la lente se monta a una distancia de 10 cm. del ojo del usuario de modo que el ojo ocupe toda la pantalla. Para obtener una imagen de alto contraste del iris, se enfoca la lente en el iris y no en ninguna otra parte del ojo, y teniendo en cuenta que debido a la curvatura propia del iris, el más mínimo desvío en el enfoque provocará una elevada pérdida de información acerca de la textura del iris.

Iluminación:

Como se ha mencionado antes se hace uso de una iluminación infrarrojo, lo que permite obtener una mejor textura del iris, que con el uso de luz en el rango del visible. Del mismo modo es necesario disponer de luz necesaria para estrechar al máximo la zona ocupada por la pupila, lo que conlleva además el beneficio de proteger la cornea mediante la restricción de la cantidad de luz que entra en el ojo.

El dispositivo utilizado es un flash *DLI/VarioFlash IR12*⁶, compuesto por 12 LEDs infrarrojos, con una luz de 870 nm. de longitud de onda.



Figura 4-8 Dispositivo de iluminación *DLI/VarioFlash IR12*.

Con el objetivo de prevenir la aparición de sombras en el iris debido a las pestañas principalmente, se dispone la luz en un ángulo por debajo de la cámara, lo que además permite evitar la aparición de puntos brillantes en la zona del iris ya que la luz recae en la zona de la pupila.

Filtro:

Se usa un filtro que evita el paso de la luz natural que pueda estar presente en el entorno, para evitar también los reflejos causados por esta y otras fuentes de luz. Por otro

⁶ Detalles en <http://www.1394imaging.com/en/products/accessories/lighting/dlivarioflashir12/specification/>

lado la respuesta del filtro al paso de luz infrarroja es total, de modo que esta pasa sin ninguna atenuación y de este modo se retiene en la imagen. Para conseguir esto es necesario que la radiación por debajo de 780 nm. se filtre completamente, por lo que se elige un filtro **RM-90 IR**, el cual tiene una respuesta espectral que se muestra en el siguiente gráfico:

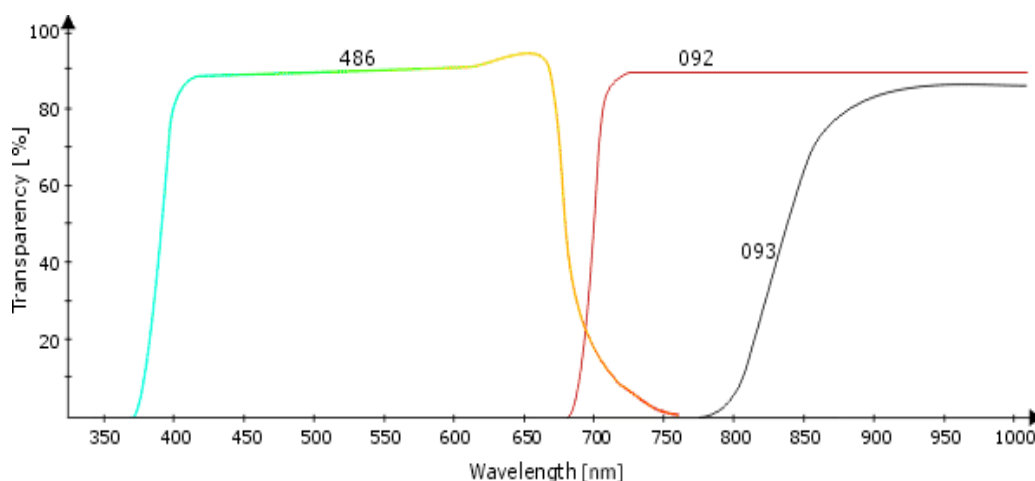


Figura 4-9 Respuesta del filtro usado

Software:

Se hace uso de un interfaz entre el PC y la cámara, gobernado mediante el software National Instrument Vision Assistant 7.1 con los drivers **IMAQ 1394 2.0**.⁷ La cámara se conecta al PC mediante un cable de 6 pines IEEE 1394, que permite la entrada simultánea de datos control y alimentación.

LA cámara se conecta y maneja mediante los drivers gracias a las opciones del programa de Labview's MAX Explorer. El programa Vision Assistant, se usa para ver y registrar las secuencias de imágenes, mediante diversas funciones de preprocesado además de opciones básicas de captura. La resolución inicial antes de comprimir las imágenes se estableció en 1280x960, para la salida de 7.5 fps, en capturas de 200 imágenes en un tiempo de 30 segundos.

4.2.4. Base de datos de iris del GBTNI

La base de datos realizado en el año 2000, ha servido para el desarrollo y prueba de diversos algoritmos relativos a la biometría de iris, sin embargo, la necesidad de incrementar el número de muestras y la creciente calidad de los sistemas de adquisición de las mismas, ha hecho necesario la realización de una nueva y actualizada base de datos. Por lo tanto se describe en primer lugar la base de datos de iris antigua, para posteriormente describir la nueva base de datos, que se encuentra en proceso de desarrollo, acompañada de

⁷ Información detallada en <http://www.ni.com/vision/software.htm>

una descripción del procedimiento que se ha llevado a cabo para la obtención de las muestras.

4.2.4.1. Base de datos antigua GBTNI I(año 2000)

Nombre de la Base de datos: GBTNI.

Rasgo biométrico: Iris

País: Madrid, España.

Realizado por: Grupo de Biometría y Tratamiento Numérico de la Información.

Web de referencia: ----

Número de sesiones: ----

Muestras por sesión: ----

Número de ojos diferentes: ----

Número de personas utilizadas: ----

Número de imágenes capturadas por persona: ----

Número total de muestras: 50

Porcentaje de sujetos masculinos: ----

Porcentaje de sujetos femeninos: ----

Rango de edad: ----

Intervalo entre sesiones: ----

Tamaño total de la base de datos (MB): 7,3

Tipo de sensor: ----

Tipo de dispositivo de captura: Cámara digital modelo Kodak Professional DCS 315.

Descripción del sensor: ----

Rasgo capturado: Iris.

Formato del fichero de imagen: TIF

Entorno de captura: ----

Resolución: Variable, en torno a 400x400

Comentarios adicionales: A la imagen tomada del ojo del usuario se le superpone una máscara, de la forma que se adjunta en la figura siguiente.

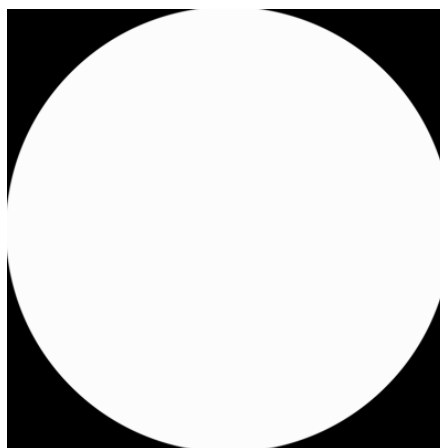


Figura 4-10 Máscara superpuesta a las imágenes del patrón de iris

Para la etapa de captura se utilizaron los trabajos desarrollados por Raúl Sánchez-Reillo, que se recogen con un mayor grado de detalle en su tesis doctoral [Rei00].

El primer paso necesario, fue elegir el dispositivo de captura con el que se realizarían las imágenes. Se pensó en la utilización de una cámara fotográfica convencional, una cámara fotográfica digital, o una cámara de vídeo. También se estudió la posibilidad de utilizar iluminación en el rango de infrarrojos.

Para tomar la decisión final sobre el método de captura se tuvieron en cuenta diferentes factores. El primero de ellos fue el coste y facilidad de compra, así como la posibilidad de reutilizar el equipo adquirido para su utilización en otras aplicaciones, como podría ser la captura de una imagen de la cara de un individuo para el posible desarrollo de un sistema de reconocimiento basado en el rostro. Este hecho llevó a la elección de una iluminación en el rango visible en lugar de la utilización de una luz infrarroja. La cámara de vídeo fue desechada debido a la inferior calidad de las imágenes obtenidas, respecto a las adquiridas por una cámara fotográfica. Finalmente se decidió utilizar una cámara fotográfica digital, por la ventaja que presentaba frente a una cámara convencional, al no tener que llevar a cabo el revelado de la película fotográfica, y su posterior digitalización con un escáner.

Hay que tener en cuenta que en esta decisión influyó mucho, el momento actual de desarrollo de las tecnologías de captura de imágenes, ya que en estos momentos el desarrollo tecnológico en esta área es mucho mayor y sería impensable llevar a cabo una base de datos de iris con estos dispositivos.

Igualmente debido al escaso desarrollo de la teoría y los fundamentos que existían sobre la biometría en general y en el campo del iris en particular, algunos detalles como la resolución necesaria para tener unas buenas imágenes, eran aspectos sobre los que había que tomar decisiones, y para los cuales no existía una guía específica como puede ocurrir en la época actual. Algunas de las decisiones tomadas al respecto fueron las siguientes:

- La cámara debía poseer una resolución elevada, con el objetivo de obtener imágenes del patrón de iris de alta calidad.
- Se debía aprovechar al máximo la resolución ofrecida por el dispositivo, para poder tener una imagen en la que únicamente apareciese el ojo de la persona a identificar.
- La distancia entre el sujeto y la cámara tenía que ser suficientemente grande como para que el sistema de captura pudiese considerarse no invasivo, y no supusiese una molestia para el usuario.
- La imagen tomada, a la distancia seleccionada en el paso anterior, debía permitir obtener una calidad suficiente para conseguir unos patrones de iris correctos.

Tras la evaluación de estos importantes aspectos, se adoptó la cámara fotográfica digital profesional *Kodak Professional DCS 315*, como dispositivo de captura. Uno de los rasgos característicos de esta cámara es que no posee un tamaño compacto, lo que permite la utilización de cualquier objetivo comercial *Nikon*. Por otro lado, también se adquirió una tarjeta flash PCMCIA en la que almacenar las imágenes tomadas. La elección de este dispositivo vino determinada por la posibilidad de ser utilizado en cualquier ordenador portátil, y en ordenadores de sobremesa equipados con un lector de tarjetas PCMCIA. La resolución que se puede obtener con esta cámara es de 1.5 millones de puntos, capturando imágenes con un tamaño de 4490 Kilobytes.



Figura 4-11 Imágenes de la cámara digital Kodak Professional DCS 315 (modelo nuevo).

Se ha comentado anteriormente que se buscaba poder utilizar la cámara a una distancia prudencial entre ésta y el individuo, pero que al mismo tiempo permitiese tener una imagen con suficiente calidad. Para poder conseguir el nivel de zoom necesario, se utilizó un objetivo *Micro-Nikkor 105mm f/2.8D*. Este objetivo está recomendado por el fabricante para la micro-fotografía. Permite acercamientos de hasta 31cm, ofreciendo altos rendimientos de enfoque tanto para distancias cercanas como para distancias lejanas.



Figura 4-12 Imagen del objetivo usado para la captura de imágenes de iris.

Tras elegir el dispositivo de captura se pasó al diseño del entorno en el que se realizaría la fotografía del iris. La cuestión relativa a la distancia entre la cámara y el sujeto, fue resuelta en la etapa anterior, por lo que el objetivo era decidir el tipo de iluminación a utilizar durante la captura de imágenes, para poder tener fotografías del iris con la calidad requerida. En este instante apareció el problema de las reflexiones de luz en la córnea. Ésta posee una superficie lisa y lubricada que refleja todo rayo de luz que le llega. Con el objetivo de evitar este problema se utilizaron algunas de las recomendaciones sugeridas en [Dau93] y [Wil97], utilizando un foco de iluminación localizado y polarizado. Este foco fue situado en la parte inferior de la cámara fotográfica, de modo que la iluminación se produjese de abajo hacia arriba, con lo que el reflejo de luz se localizaba en el cono inferior del iris. Esta luz fue polarizada, para evitar el mencionado reflejo, mediante la utilización de láminas polarizadoras. Un polarizador colocado en cuadratura con el emisor de la luz,

situado en el objetivo de la cámara, eliminó en la imagen el reflejo comentado. La utilización de este filtro polarizador en el objetivo de la cámara, resta luminosidad que entra en el mismo, lo que deriva en una pérdida de sensibilidad de la cámara. La apertura y velocidad de la cámara deben seleccionarse teniendo en cuenta la velocidad con la que se mueve el iris, ya que por ejemplo, una velocidad demasiado lenta puede provocar la obtención de una imagen del iris borrosa. Con el objetivo de solventar esta situación se propusieron dos formas para aumentar la iluminación del entorno de captura. La primera de ellas era incrementar la intensidad del foco utilizado, pero esta propuesta provocó un alto rechazo por parte de los usuarios del sistema debido al calor y la elevada cantidad de luz recibida. La segunda fue la utilización del flash disponible en la cámara. Éste provocaba un reflejo en el centro de la pupila, que al ser una de las partes no deseadas de la imagen del ojo, podía ser fácilmente eliminado.

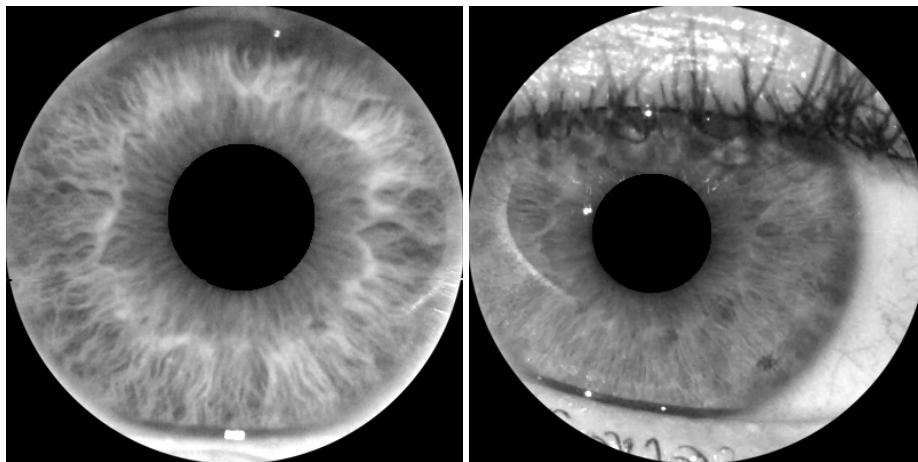


Figura 4-13 Muestras de la base de datos de patrones de iris *GBTNI I*

4.2.4.2. Base de datos nueva *GBTNI II*(año 2005-06)

Nombre de la Base de datos: *GBTNI v.2.*

Rasgo biométrico: Iris

País: Madrid, España.

Realizado por: Grupo de Biometría y Tratamiento Numérico de la Información, ETSI de Telecomunicación, Universidad Politécnica de Madrid.

Web de referencia: -----

Número de sesiones: 2.

Muestras por sesión: 25 ó 35 dependiendo de las condiciones del usuario.

Número de ojos diferentes: (en evolución)

Número de personas utilizadas: -----

Número de imágenes capturadas por persona: 50 ó 70 dependiendo de las condiciones del usuario

Número total de muestras: -----

Porcentaje de sujetos masculinos: -----

Porcentaje de sujetos femeninos: -----

Rango de edad: -----

Intervalo entre sesiones: mínimo 2 semanas, máximo 4 meses.

Tamaño total de la base de datos (MB): -----

Tipo de sensor: SONY ICX-285 Progressive Scan CCD Sensor.

Tipo de dispositivo de captura: Cámara digital BASLER A102-f.

Descripción del sensor: Sensor CCD.

Rasgo capturado: Iris.

Formato del fichero de imagen: BMP.

Entorno de captura: Ver más adelante.

Resolución: 1392x1040, imágenes en escala de gris.

Comentarios adicionales: Se hace distinción entre usuarios de lentillas (ver detalles más adelante). A los usuarios con gafas, se les retiran para la toma de muestras con el objetivo de evitar reflexiones.

La nueva base de datos se realiza atendiendo a nuevos procedimientos y haciendo uso de nuevas tecnologías de captura de imágenes más avanzadas y con una mayor precisión, característica muy importante a la hora de obtener imágenes aptas para el desarrollo de un sistema biométrico.

En particular el procedimiento consiste en la utilización de un dispositivo de captura de imágenes formado por un trípode, una cámara digital de alta definición, un dispositivo de iluminación, anillos de extensión y un filtro.

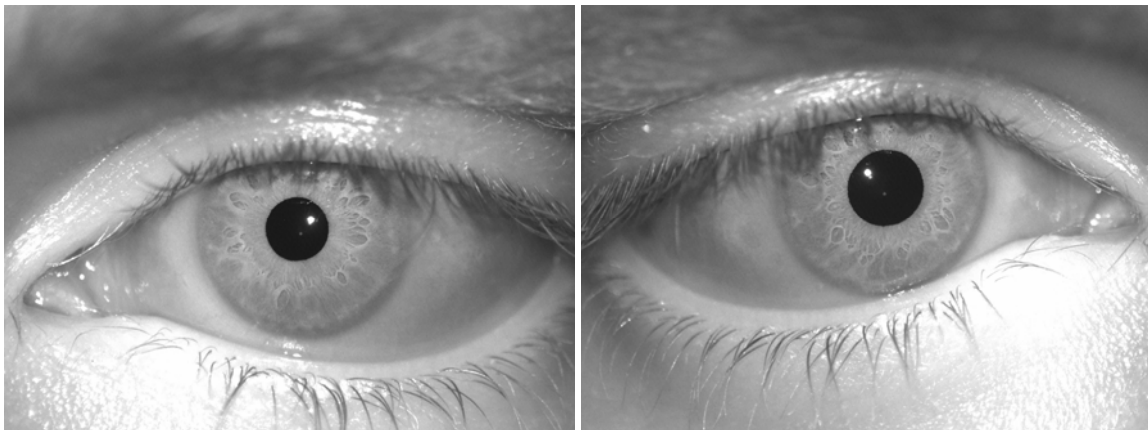


Figura 4-14 Muestras de la base de datos de patrones de iris *GBTNI II*

Cámara:

La cámara utilizada, es un modelo *BASLER A102-f*, fabricada por Basler Vision Technologies⁸.

⁸ Referencia: <http://www.baslerweb.com>

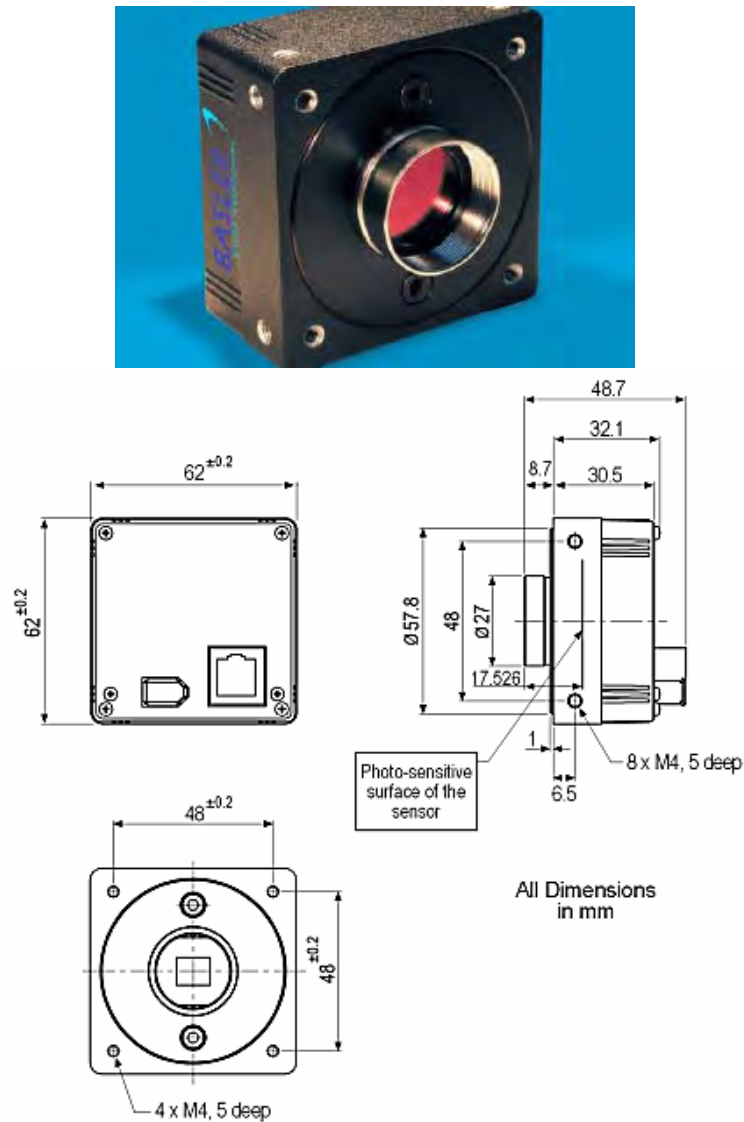


Figura 4-15 Imagen y esquema de dimensiones de la cámara BASLER A102-f

Esta cámara, dispone de un sensor *SONY ICX-285 Progressive Scan CCD*, con una alta calidad de las imágenes obtenidas de resolución 1392 x 1040. La respuesta espectral de esta cámara, siendo este modelo monocromo, se puede observar en la siguiente figura:

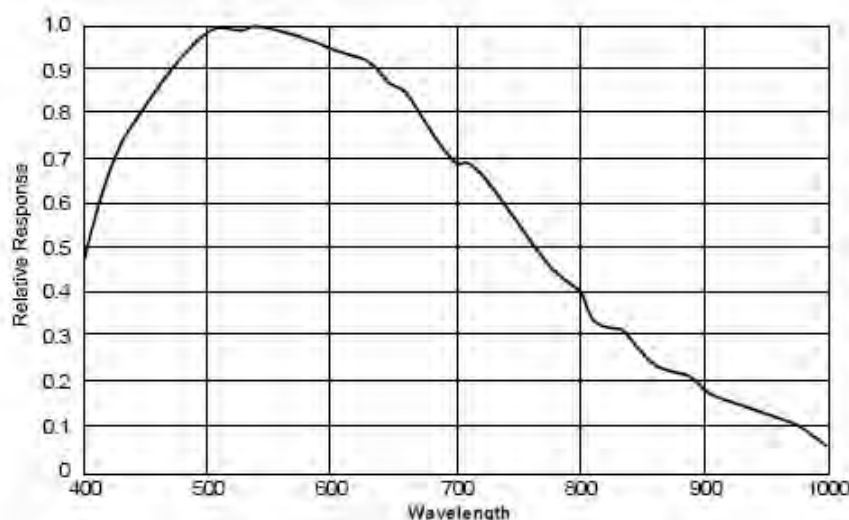


Figura 4-16 Respuesta espectral del sensor *SONY ICX-285 Progressive Scan CCD* de la cámara

Iluminación:

Con el objetivo de obtener una mejor textura del iris que con el uso de luz en el rango del visible, se hace uso de un dispositivo *SPOT20* de la marca DCM⁹ de iluminación infrarroja.

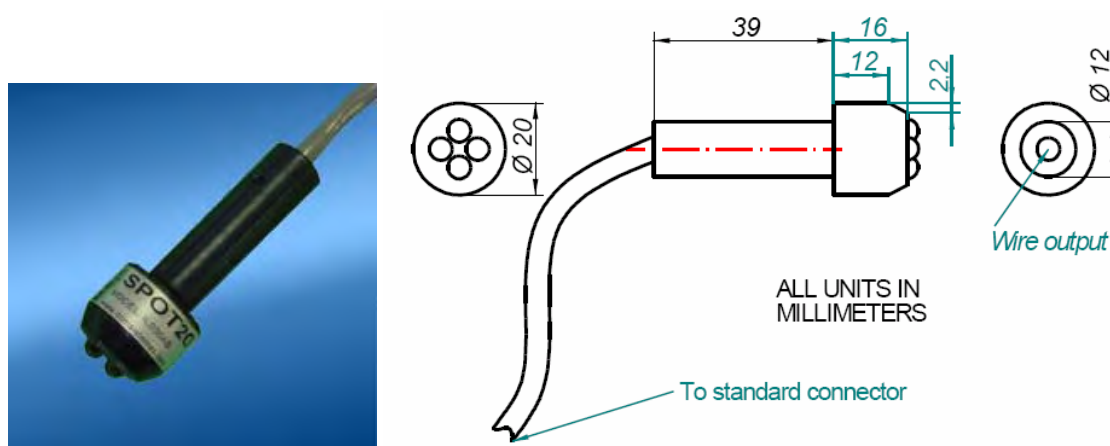


Figura 4-17 Imagen y esquema de dimensiones del dispositivo de iluminación SPOT20

La luz producida por el array de leds alcanza directamente el objetivo. Produce un alto contraste, de manera que se enfatizan, las texturas, relieves y fisuras del objeto iluminado, debido a que cualquier detalle por pequeño que sea produce una sombra altamente definida.

El ángulo de incidencia de la luz determinará en todo caso el grado de proyección del relieve en particular, sin embargo incluso para ángulos muy pequeños la luz produce

⁹ Referencia: <http://www.dcmsistemas.com>

sombras que aportan información de la textura del objeto. Para ángulos cercanos a los 90° con la horizontal, las sombras solo serán visibles en grandes relieves.

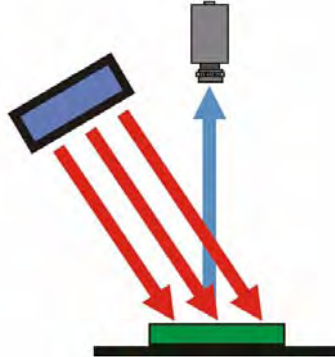


Figura 4-18 Esquema del grado de incidencia de la luz en el objeto.

El uso de este dispositivo es ideal para la detección de piezas y objetos y para el emplazamiento correcto de bordes, roturas o fisuras en determinadas direcciones

Filtro y anillos de extensión:

Con el objetivo de evitar en su mayor parte el paso de luz natural proveniente del entorno, se hace uso de un filtro, consiguiendo igualmente evitar posibles reflejos causados por esta y otras fuentes de luz, sobre todo en objetos brillantes. Por otro lado la respuesta del filtro al paso de luz infrarroja es total, de modo que esta pasa sin ninguna atenuación y de este modo se retiene en la imagen.

Por otra parte mediante los anillos de extensión se utilizan para enfocar zonas más pequeñas a menor distancia de la que permite la óptica estándar, permitiendo así una variación continua del aumento, de manera que el ajuste de la imagen es el requerido por el usuario en cada situación particular. Se trata de tubos metálicos que se montan entre el objetivo y el cuerpo de la cámara para aumentar la distancia entre aquel y la película en trabajo de acercamiento. Por lo general se usan juegos de tres que pueden montarse en cualquier combinación.



Figura 4-19 Imágenes de los anillos de extensión y de un filtro de polarización

Software:

Todo este dispositivo acoplado, realiza la captura de la imagen deseada, en este caso de una imagen de iris, y la envía a un ordenador, donde mediante software específico de

tratamiento de imágenes se gestionan y almacenan. En este caso el software utilizado es el programa *Irfanview*, que permite convertir las imágenes recibidas a otros formatos, e incluso realizar compresiones de las mismas.

4.2.5. CUHK Iris Database

Nombre de la Base de datos: CUHK Iris Database.

País: Hong Kong.

Realizado por: Computer Vision Laboratory, Department of Automation & Computer-Aided Engr., The Chinese University of Hong Kong, Hong Kong.

Web de referencia: <http://www2.acae.cuhk.edu.hk/~cvi/>

Número de sesiones: 1.

Muestras por sesión: 6.

Número de ojos diferentes: -----

Número de personas utilizadas: 36.

Número de imágenes capturadas por persona: 40

Número total de muestras: 216.

Porcentaje de sujetos masculinos: -----

Porcentaje de sujetos femeninos: -----

Rango de edad: -----

Intervalo entre sesiones: -----

Tamaño total de la base de datos (MB): 26,5 MB

Tipo de sensor: -----

Tipo de dispositivo de captura: Cámara.

Descripción del sensor: -----

Rasgo capturado: Iris.

Formato del fichero de imagen: BMP.

Entorno de captura: -----.

Resolución: Variable. En torno a los 300x300

Comentarios adicionales: Imágenes de baja calidad en la que no se han cuidado factores como la iluminación o los reflejos en zonas de iris, ya que el está dedicada a la visión artificial y al entrenamiento de sistemas para la búsqueda de patrones.

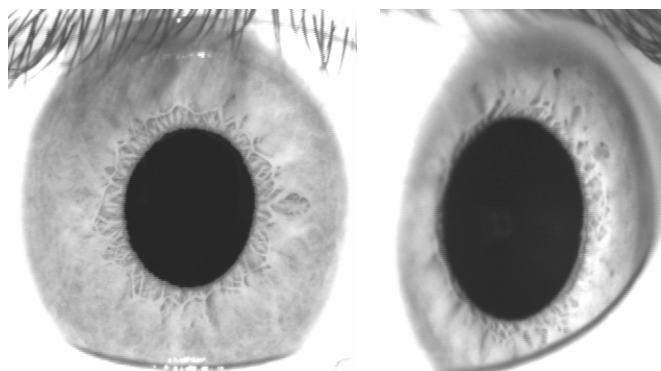


Figura 4-20 Muestras de la base de datos de la CUHK Iris Database.

Como se puede observar en las imágenes de muestra de la base de datos, la calidad y enfoque de las mismas no es la óptima dado que el objetivo de las imágenes es diferente que el propio de una base de datos para fines biométricos, aunque las imágenes obtenidas permiten en todo caso probar los algoritmos de reconocimiento de iris, en casos raros de rotación, mala colocación del iris en la imagen y otros casos, que aunque no tan probables, si que son posibles en el funcionamiento normal del sistema.

4.3. Comparativa de las Bases de Datos

Con el objetivo de comparar de manera somera las distintas bases de datos de patrones de iris existentes, se ha desarrollado esta tabla comparativa, con algunos de los aspectos más importantes, lo que permite obtener información adicional tras la prueba de los distintos algoritmos con cada una de las bases de datos, como puede ser la influencia de la resolución o del formato de la imagen, o la importancia de la elección de una buena fuente de iluminación y otros aspectos sin duda importantes en el desarrollo del sistema completo de identificación biométrica.

Base de datos	Procedencia	Resolución	Nº de muestras	Formato de la imagen	Dispositivo de captura	Iluminación	Color	Máscara
CASIA	China	320x280	756	BMP	Escáner	Infrarroja	Escala de grises	No
Phoenix	República Checa	576x768	584	PNG	Cámara digital	-----	RGB	Si
Bath	Inglaterra	1280x960	8000	J2C ¹⁰	Dispositivo digital avanzado	Infrarroja	Escala de grises	No
GBTNI I	Madrid (España)	Variable en torno a 400x400	~50	TIF	Cámara digital	Natural	Escala de grises	Si
GBTNI II	Madrid (España)	1392x1040	En evolución	BMP	Dispositivo digital avanzado	Infrarroja	Escala de grises	No
CUHK	Hong Kong	Variable en torno a 300x300	216	BMP	Cámara digital	-----	Escala de grises	No

Tabla 4-1 Comparativa de las distintas bases de datos de iris.

¹⁰ Convertida para su uso en Matlab al formato JPG

Capítulo 5

Diseño del sistema de reconocimiento biométrico de iris

- 5.1. Introducción
 - 5.2. Reconocimiento de patrones
 - 5.3. Etapa de adquisición de las muestras
 - 5.4. Etapa de preprocesado
 - 5.5. Etapa de extracción de características
 - 5.6. Etapa final
-

Capítulo 5 - Diseño del sistema de reconocimiento biométrico de iris

5.1. Introducción

A lo largo de los capítulos anteriores se ha tratado de desarrollar la parte teórica sobre la que se sustenta el diseño del sistema biométrico basado en el análisis del iris de una persona que se trata de llevar a cabo en este proyecto.

El objetivo primero es determinar las características necesarias para el correcto funcionamiento de un sistema como el que tratamos de desarrollar, y la explicación detallada de cada una de las etapas del mismo. En este sentido es necesario en algunos casos, volver la vista atrás y recordar conceptos tales como las diferentes etapas de un sistema biométrico general, para pasar a particularizar en el caso que estamos tratando. Estas etapas se pueden observar en la siguiente figura:

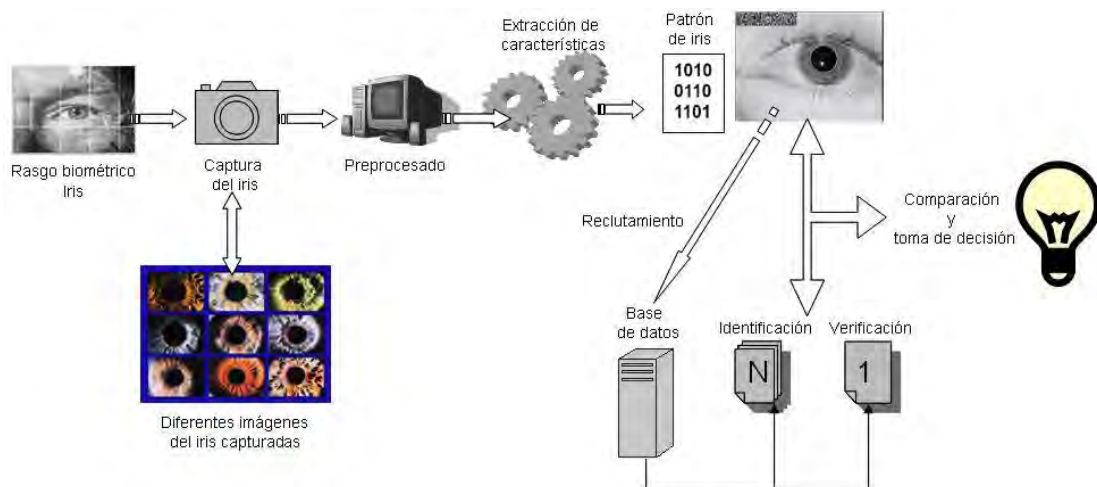


Figura 5-1 Etapas del sistema de reconocimiento de iris.

Etapas:

1. Adquisición de la muestra biométrica: En este caso que se describe se trata del iris del usuario.
2. Preprocesado de la muestra: Que comprende la localización de los bordes y otros elementos característicos que permiten delimitar la zona de estudio que comprende el iris dentro del ojo del usuario.

3. Extracción de características: Que tras delimitar la zona de estudio, y aplicar los algoritmos de procesamiento matemático de la señal unidimensional que se obtiene de la imagen seleccionada, permite recoger la información única del iris, que comprende la plantilla característica del usuario.
4. Etapa final: Dependiendo del uso en cuestión, que se le dé en cada caso al sistema biométrico: reclutamiento, verificación o identificación. En cada caso el proceso será diferente.
5. En el caso de la verificación e identificación es necesario definir una medida de disimilaridad que permita llevar a cabo el proceso de comparación.

Es por esto que sin duda el aspecto más importante es detallar cuales son los algoritmos de preprocesado de las imágenes de iris, de extracción de características (incluyendo el uso de la transformada wavelet) y los procesos de toma de decisión.

Todos estos algoritmos están programados en Matlab, y los códigos usados quedan reflejados en [Apa05] [Mar01].

Tras la captura y preprocesado de la imagen, se realiza la extracción de características del iris correspondiente. Esta operación permitirá obtener una señal 1-D que denominamos *Firma de Iris* o *Iris Signature (IS)*. El paso siguiente será calcular la transformada Wavelet de la *IS*, para diferentes valores de escala. Posteriormente se realiza un análisis de los cruces por cero de esta transformada, para cada valor de éstas, y en otros intentos de desarrollar un modelo similar, se utiliza un estudio de los módulos de esta señal. Finalizadas estas etapas del sistema, obtenemos un patrón del iris que estamos estudiando en cada caso concreto, que pasaremos a comparar con los patrones o modelos de referencia, que previamente habían sido obtenidos y almacenados en la memoria de nuestro sistema.

Además de ser invariante a la traslación y cambios de escala, se mostrarán en este capítulo diversos métodos, para conseguir invariancia frente a la rotación, en el momento de la extracción de las características del iris.

5.2. Reconocimiento de Patrones

Para realizar la identificación del individuo, como ya ha sido comentado, se compararán las características extraídas con los patrones que han sido previamente almacenados en la memoria del sistema.

Esta comparación se realizará haciendo uso de métodos de comparación y discriminación, relacionados con el reconocimiento de patrones. Algunas referencias al respecto de este tipo de procesos de reconocimiento de patrones son: [Dud73], [Esc71], [Han81], [Sch96] o [The89].

Los estudios relacionados con la clasificación y el reconocimiento de patrones, suelen comenzar con una introducción a la teoría de Bayes, en la que se establecen las reglas de la probabilidad condicionada de pertenencia a una determinada clase, dentro de todas las clases pertenecientes a un espacio de muestras. Para mayor profundidad acerca del tema, es conveniente consultar [Pee93].

El incremento experimentado en la utilización de los ordenadores y otros dispositivos electrónicos, ha impulsado el estudio y la utilización de estas técnicas de reconocimiento de patrones. En concreto, los dispositivos de adquisición de datos y los conversores analógico-digital (A/D), permiten introducir en el ordenador datos correspondientes al mundo real, permitiendo el almacenamiento y posterior recuperación de esta información para poder establecer una correspondencia entre observaciones realizadas en diferentes instantes de tiempo, que viene a determinar en cierto modo el patrón de comportamiento de los sistemas de reconocimiento biométrico.

Las aplicaciones en las que el reconocimiento de patrones puede ser utilizado son muy amplias, por lo que es necesario estudiar diversos factores para determinar la elección de una u otra forma de reconocimiento de patrones. Algunos de estos factores son:

- La naturaleza de los patrones a estudiar: caracteres escritos, dibujos, imágenes médicas...
- Los requerimientos del sistema, especialmente el tiempo de respuesta. Algunos métodos de reconocimiento pueden tener elevadas tasas de éxito, pero quizá no sea fiable su utilización en la práctica.
- Factores económicos. La utilización de sistemas muy potentes y robustos, quizá suponga una serie de gastos que el usuario no pueda afrontar.

Un patrón no es más que un punto en el espacio de representación de los patrones, el cual es un espacio de dimensionalidad determinada por el número de variables (X_1 , X_2) que sean consideradas, pudiéndose definir estas como el conjunto de todos los valores posibles que puede adoptar un determinado patrón. Los patrones pertenecientes a una misma clase (m_1 , m_2) se encontrarán en posiciones cercanas dentro del espacio de representación, mientras que aquellos patrones que pertenezcan a clases diferentes deberían encontrarse en distintas regiones del mencionado plano.

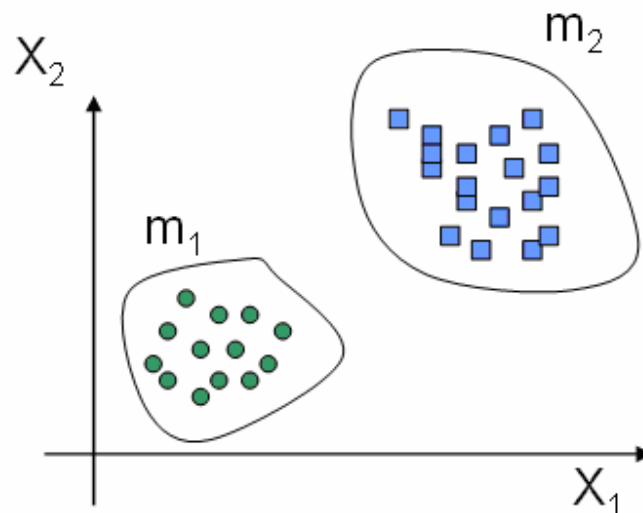


Figura 5-2 Distribución de las diferentes clases dentro del espacio de representación

El principal objetivo de un sistema de reconocimiento de patrones es asignar una etiqueta a cada patrón de entrada. Dos patrones distintos deberían ser asignados a una misma clase si son similares, mientras que serán asignados a clases diferentes en caso de no serlo. La idea clave es la definición de una medida de similitud entre patrones.

Si se tuviese un sistema de adquisición perfecto, tendríamos que:

- La adquisición repetida de un mismo patrón debería dar como resultado la misma representación en el espacio de patrones.
- Dos patrones diferentes, deberían proporcionar dos representaciones perfectamente distinguibles.
- La aplicación de una pequeña distorsión sobre el patrón, provocará una pequeña variación de su representación en el espacio de patrones.

Si las representaciones de dos patrones se encuentran muy próximas en el espacio de representación, entonces esos dos patrones presentarán un alto grado de similitud. Por el contrario, no puede afirmarse de forma rotunda que a mayor distancia mayor grado de disimilitud, ya que la medida de la distancia dependerá de la escala en la que se cuantifiquen las variables asociadas al patrón.

Los sistemas de adquisición perfectos, no son más que una suposición teórica. En la práctica, todo sistema de adquisición introduce cierta cantidad de ruido y distorsión, que provocará una variación en la representación de los patrones. Esta distorsión podrá ser controlada, en mayor o menor medida, realizando un correcto calibrado de los sistemas, pero existirán otras fuentes de variación asociadas a la propia naturaleza de los patrones que pueden provocar que, incluso patrones de una misma clase, difieran significativamente.

Comentamos anteriormente, que el objetivo es etiquetar (clasificar de algún modo) de forma automática los patrones de los cuales no se conoce la clase a la que pertenecen. En primer lugar deben seleccionarse las etiquetas que se utilizarán, o lo que es lo mismo, que salidas queremos que ofrezca el sistema. En algunas ocasiones es recomendable incluir en este conjunto una clase de rechazo, para aquellos patrones en los que no se dispone certeza alguna para poder englobarlos dentro de las clases definidas.

Una vez elegidas y construidas las clases necesarias, se pasará a desarrollar el clasificador. La construcción de este clasificador incluiría una serie de etapas como:

- Elección del modelo.
- Aprendizaje, entrenamiento del clasificador.
- Verificación de los resultados obtenidos.

Aunque estas etapas aparecen en un orden determinado, no debe verse de forma secuencial, pues en algún momento de la utilización del sistema, puede ser necesaria la vuelta atrás para poder replantearse alguna de las opciones elegidas o incluso para modificar el conjunto de clases.

Como ya se ha indicado, los patrones pertenecientes a una misma clase pueden presentar un cierto grado de variabilidad. De todos modos, éstos se encontrarán relativamente cerca entre sí, y relativamente distanciados respecto a los patrones pertenecientes a una clase distinta. En el caso ideal, la separación entre los agrupamientos

de clases diferentes podrá ser fácilmente distinguible, pudiendo asociar regiones disjuntas a cada una de las clases definidas.

Sin embargo, en los problemas reales, los agrupamientos que se crean no representan clases puras. Normalmente suelen aparecer agrupamientos solapados. Estos solapamientos pueden provocar equivocaciones a la hora de realizar el reconocimiento.

El acierto en la elección de las fronteras entre las clases solapadas determinará el número de equivocaciones que se producirán al tomar una decisión concreta.

En la siguiente figura, en el caso (a) podemos ver una representación en la que los agrupamientos relacionados con cada clase pueden distinguirse sin problemas (caso ideal). Para la gráfica (b), puede observarse un ejemplo en el que los agrupamientos se encuentran solapados, lo que dificultará el reconocimiento de los patrones. Por esto, es necesario que las distancias entre clases diferentes, sea mayor que la distancias entre elementos de una misma clase, ya que de otro modo el clasificador diseñado no sería de utilidad práctica.

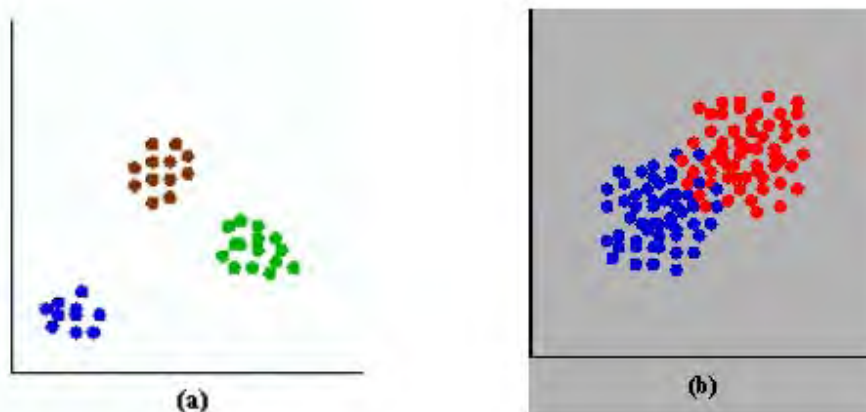


Figura 5-3 (a) Agrupamientos ideales. (b) Agrupamientos solapados

Durante la construcción del clasificador, el proceso de aprendizaje podrá ser:

- Aprendizaje supervisado: para el que se necesita disponer de un conjunto de patrones del que se conoce su clase, conjunto que se denominará de entrenamiento.
- Aprendizaje no supervisado: se realiza a partir de un conjunto de patrones del que no se conoce su clase.

La partición del espacio de características en clases, no es por tanto un problema sencillo, ya que es una tarea que puede abordarse de distintas formas. La opción más utilizada, en lo referente a los sistemas de reconocimiento biométricos de iris, se basa en la elección de un centroide, como patrón de referencia, para posteriormente delimitar un área de influencia determinando así una frontera a partir de una medida de distancia. En este caso esta medida se lleva a cabo mediante la distancia de Hamming y la distancia euclídea. Cuando el sistema de reconocimiento está siendo utilizado en autenticación, en lugar de en modo clasificación, el espacio quedará limitado únicamente al del usuario que indica su identidad al sistema.

5.3. Etapa de adquisición de las muestras

Tal y como se ha explicado en el capítulo anterior, en este proyecto se ha hecho uso de bases de datos de diferentes fuentes, como fuente de las muestras utilizadas en la etapa de adquisición de las muestras. En este mismo capítulo se detalla, el proceso de obtención de estas muestras que en todo caso es semejante al que se utilizaría en un sistema biométrico de uso normalizado en el que la imagen resultante de la captura, pasaría directamente a la etapa de procesado en lugar de ser almacenada para un uso posterior, mediante la selección de la misma para su análisis.

De este modo los programas de acceso al sistema biométrico, realizan búsquedas de las imágenes en emplazamientos definidos, de los cuales se obtiene imágenes que para poder ser utilizadas en el programa Matlab (bmp, tiff, jpg), de modo que en algún caso como el de la base de datos de la Universidad de Bath, cuyas imágenes se encuentran inicialmente en formato .j2c, por lo que para su uso en el programa Matlab se hizo necesario convertir las imágenes a formato .bmp, mediante el programa DMMD Visere.

5.4. Etapa de preprocesado

La etapa de preprocesado en los sistemas de reconocimiento biométricos en general, y en el caso del iris en particular, posee una gran importancia. El objetivo del preprocesado es adaptar la imagen y la señal a los requisitos que posteriormente serán necesarios durante la extracción de características. Durante esta etapa se realizan los siguientes trabajos:

- Localización del iris dentro de la imagen del ojo.
- Detección de los bordes o fronteras del iris. En su parte exterior el iris limita con la esclerótica, mientras que en su parte interior limita con la pupila. Así como de elementos ajenos al iris que puedan encontrarse en la zona propia de este, tales como los párpados o las pestañas.
- En algunos casos se sugiere una normalización de las imágenes obtenidas, ya que dependiendo de la precisión de los algoritmos de análisis de los datos de estas imágenes, aspectos tales como la distancia entre el usuario y el sistema, la postura relativa del usuario con respecto al dispositivo de captura, o la dilatación y contracción de la pupila, pueden resultar determinantes a la hora de desarrollar de manera efectiva el análisis del rasgo biométrico. Otros aspectos como la iluminación, que pueden producir variaciones de la pupila o incluso interferencias en la imagen capturada, deben resolverse de manera independiente a los algoritmos de preprocesado y de extracción de características.

Para esta primera etapa es necesario trabajar con las imágenes en formato escala de grises, requisito que cumplen todas las bases de datos utilizadas, a excepción de la base de datos Phoenix (República Checa), que como ya se explicó, se creó con otros objetivos distintos a los del reconocimiento biométrico, por lo que para su uso es necesario pasar las imágenes a escalas de grises.

En una primera etapa del preprocesado de la imagen se lleva a cabo la localización de los bordes propios del iris, tanto el externo, aquel que es fronterizo con la esclerótica

(limbo), como el interno que limita con la pupila. Mediante técnicas digitales de análisis de imagen y de detección de bordes, haciendo uso de umbrales de nivel de escala de grises, es posible diferenciar las zonas más oscuras, tales como las pestañas y el conjunto de pupila e iris, de las zonas más claras, delimitando así las zonas requeridas para el estudio de la muestra del iris, y estableciendo posteriormente puntos de referencia dentro de la imagen, como los centros del iris y de la pupila, que como se explica en [Dau93], son puntos diferentes, dado que la pupila tiende a estar desplazada hacia abajo y hacia la nariz, pudiendo encontrarse desplazamientos de hasta el 15%, no siendo por tanto concéntricos estos dos elementos del globo ocular, de modo que estos datos permiten establecer una referencia, que podría permitir incluso desarrollar algoritmos protegidos frente a las rotaciones de la imagen del iris del usuario.

Igualmente estos procedimientos permiten obtener el radio exterior del iris e igualmente el interior, que coincide en todo caso con el radio de la pupila dentro de la imagen, aspecto que sin duda permite establecer una referencia a la hora de normalizar el área utilizada de iris, ya que es posible que los cambios acusados de tamaño de la pupila puedan en algún caso afectar a la posterior extracción de características del iris si no se tiene en cuenta este cambio de tamaño y de escala en el desarrollo siguiente.

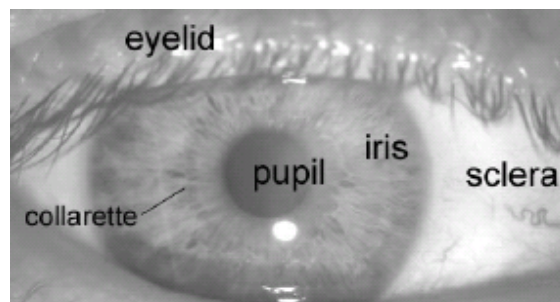


Figura 5-4 Rasgo biométrico en el que se basa el sistema [Lye02].

Para llevar a cabo la localización del iris, se procura la búsqueda del disco que compone el conjunto del iris y la pupila, mediante el uso de una máscara circular de radio inicial inferior al del iris. Este disco se moverá por toda la imagen, y de acorde con la siguiente ecuación:

$$S = \sum_{\theta=0}^{2\pi} I(x + r \cos\theta, y + r \sin\theta) \quad (5.1)$$

donde x e y son las coordenadas del centro de la circunferencia y r el radio de la misma, calculará el valor total S , en base a los valores $I(x,y)$, que se corresponden con la intensidad de la imagen en un punto, que comparado con un umbral, permitirá determinar, sin este círculo se encuentra centrado en el centro propio del iris y encaja correctamente en el radio de este. Si no sucediera así, se incrementaría el radio de la máscara circular y se continuaría el proceso hasta adaptar esta de manera correcta al iris.

Mediante el proceso descrito se posibilita la localización del iris y su separación de otras partes que pudiesen aparecer tras establecer en la imagen original un umbral.

Igualmente otro proceso análogo, definido en [Fle92], consiste en establecer una cuadrícula en cuyos puntos se sitúan los centros que se utilizarán en el algoritmo de detección de bordes. Aquel punto que determine el mejor borde, se tomará como el centro del iris. De este modo tendremos de forma simultánea la localización del iris y la detección del borde externo.

En este caso, a partir del punto obtenido, (x_0, y_0) que tomamos como centro, se muestreará la imagen tomando puntos sumando un incremento radial Δr , y un incremento angular $\Delta\theta$ al punto original. Se buscará un múltiplo n de Δr que maximiza el valor de un parámetro denominado D que vendrá definido por

$$D = \sum_m \sum_{k=1}^5 (I_{n,m} - I_{n-k,m}) \quad (5.2)$$

donde

$$I_{i,j} = I(x_0 + i\Delta r \cos(j\Delta\theta), y_0 + i\Delta r \sin(j\Delta\theta)) \quad (5.3)$$

siendo $I(x,y)$, los valores de intensidad de imagen.

Tras encontrar el punto en el que se maximiza el valor de D , se construye una nueva cuadrícula con mayor resolución. En este momento repetimos el proceso que se acaba de describir, con el objetivo de obtener un centro más preciso, aprovechando la mejora experimentada por la resolución, al utilizar en cada uno de los sucesivos pasos del proceso cuadrículas de menor tamaño. Una vez determinado el valor del centro, se disminuye el valor de Δr , para poder calcular la distancia entre el borde externo y el centro del iris.

Ya detectado el borde externo del iris, se realizarán los cambios necesarios para determinar la posición del centro del iris en la imagen original, que si recordamos, era de un tamaño cuatro veces superior al de la imagen utilizada para la aplicación del algoritmo de detección de los límites del iris. Finalizada la conversión, se recorta la imagen obteniendo un cuadrado en el que se encontrará el iris detectado

Para detectar el borde interno lo intuitivo es pensar en utilizar el centro anteriormente hallado y aplicar el mismo algoritmo de detección, considerando que la pupila y el iris son concéntricos, sin embargo, como ya se comentó, esta última consideración no es cierta, y se puede comprobar estudiando las imágenes disponibles en la base de datos. Por este motivo, antes de aplicar el anterior procedimiento a la nueva imagen, se toma una cuadrícula a partir del centro encontrado que abarque el 20% del iris. Por tanto será necesario estudiar las variaciones de intensidad de la zona de la pupila, que dado su color, permite diferenciarla claramente del iris.

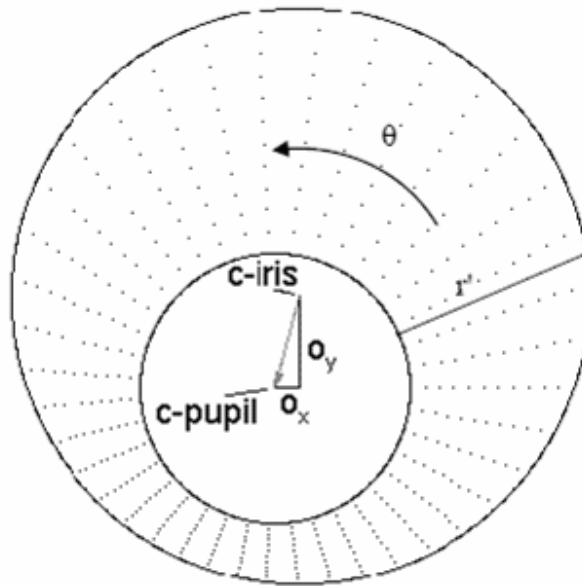


Figura 5-5 Esquema de la disposición geométrica del iris y la pupila [Lib03].

Como resultado, se tendrá un nuevo centro (x_p, y_p) , junto con la distancia existente entre este punto y el borde interno del iris. Todos los puntos comprendidos dentro de esta circunferencia son eliminados, ya que forman parte de la pupila, de la cual no se desean extraer características.

Un último paso a tener en cuenta es el que se refiere a las variaciones de tamaño del iris y la dilatación o contracción de la pupila. Para paliar los efectos de este fenómeno se realiza una transformación, de forma que los datos que se tengan en la nueva etapa del sistema de identificación posean un mismo tamaño, independientemente de las variaciones en la dimensión del iris y de la pupila.

En la siguiente representación se muestra un esquema gráfico de las tareas realizadas durante esta etapa.

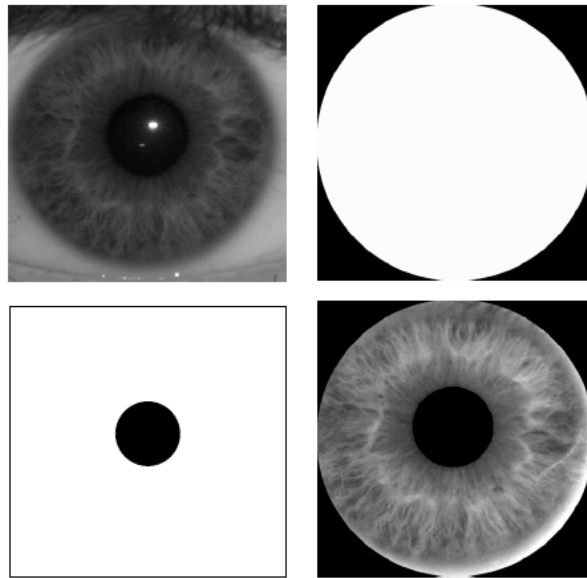


Figura 5-6 Imágenes de las diferentes etapas del proceso [Apa05].

En la imagen superior izquierda podemos ver la imagen tomada a un usuario, ya convertida a blanco y negro, al no ser el color del iris un aspecto determinante para realizar el reconocimiento. En la imagen superior derecha se observa la máscara externa que se aplica a la imagen anterior una vez detectado el borde externo de iris. Al igual que se hace con la frontera existente entre el iris y la esclera, se determina el borde interno entre el iris y la pupila, y se aplica una nueva máscara (que puede verse en la imagen inferior izquierda), con el objetivo de eliminar aquellas partes de la imagen del ojo del individuo, que no serán necesarias en etapas posteriores.

Finalmente, en la fotografía inferior derecha, puede observarse la apariencia que tendrá una imagen una vez concluida la etapa de pre-procesado.

5.5. Etapa de extracción de características

Uno de los aspectos más importantes a tener en cuenta, en la etapa de extracción de características, supone la obtención de procesos invariantes frente a la rotación dado que a pesar de que en los procesos de reclutamiento si es posible especificar al usuario la postura para llevar a cabo la captura, en el funcionamiento normal del sistema es necesario permitir al usuario una cierta libertad de modo que sea el propio algoritmo sistema el que determine los pasos necesarios para que la variación de posiciones del usuario no afecte al proceso.

En este sentido existen estudios [Pin02] acerca de posibles puntos de referencia tales como la posición relativa de ambos iris de un mismo usuario, lo que haría necesario una foto mas amplia del mismo o el uso de dos cámaras, y posteriores procesos de obtención de referencia, ayudados siempre de la característica del conjunto de iris y pupila que no es concéntrico.

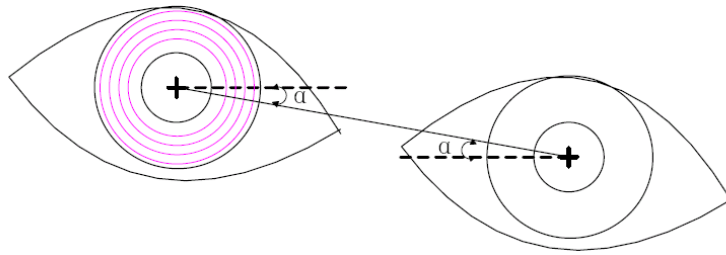


Figura 5-7 Posible método de referencia para el desarrollo de procesos invariantes frente a la rotación.

5.5.1. Obtención de la firma de iris

Una vez que se ha procesado la imagen del ojo, y se ha aislado el iris, en la anterior etapa, se pasa a la obtención de la señal 1-D que constituirá la firma de iris (Iris Signature *IS*). Esta *IS* permitirá determinar la plantilla o patrón de referencia del iris del usuario del sistema durante la fase de *reclutamiento* del mismo, y el patrón que se comparará con los almacenados en la memoria durante en la fase de *utilización*.

Para obtener esta firma, se recogen datos de la imagen del iris de la anterior etapa, en base al algoritmo adoptado, que puede variar desde la utilización de las zonas de conos laterales, tal como se hace referencia en [San00], y en otros trabajos, o llevando a cabo la adquisición de muestras mediante coronas concéntricas circulares.

En el primer caso las regiones laterales del iris permiten obtener, previa correcta localización de la zona del iris, zonas de características totalmente limpias de información ajena al iris, como podría suceder por interferencia de los párpados (aspecto muy acusado en la base de datos CASIA), y/o de pestañas.

En todo caso y con el propósito de no tomar datos dentro de la zona correspondiente a la pupila, el radio de la primera circunferencia virtual que deberá ser como mínimo igual al radio de la pupila mas un margen de seguridad, (ya que se podría añadir un margen de seguridad) la distancia comprendida entre el centro del iris y de la pupila, y centrada en el punto de referencia del centro del iris, ya que de este modo se asegura que todo la zona de la pupila quede en la parte interior de la circunferencia y no interfiera en ningún caso en los datos que se extraen para determinar la señal procedente del análisis del iris del usuario.

$$r_{inicial} = r_{pupila} + d \quad (5.4)$$

donde

$$d = \sqrt{(x_{iris} - x_{pupila})^2 + (y_{iris} - y_{pupila})^2} \quad (5.5)$$

Para tratar de explicar esto, se puede determinar que las diferencias entre las coordenadas x e y de los centros de la pupila y el iris siempre formarán un triángulo isósceles, tal y como se muestra en la figura (poner referencia), de modo que la mayor distancia se encuentra en el lado de la hipotenusa que es el mínimo que añadimos al radio de la pupila para que la zona sea la correcta.



Figura 5-8 Esquema de la circunferencia de radio inicial para el proceso de extracción de características

Este radio podría tomarse perfectamente como radio de la máscara a utilizar en la localización de la zona del iris, para delimitar la parte perteneciente a la pupila.

La opción de crear la serie de circunferencias virtuales, define un proceso tal y como se describe a continuación.

Se toman 32 circunferencias virtuales concéntricas al iris a partir del radio inicial descrito anteriormente, y del mismo modo se toman 64 ángulos distintos, en este sentido, al trabajar con algoritmos protegidos frente a la rotación comenzaremos en el mismo ángulo θ inicial, y los ángulos elegidos en cada caso serán tales que $\Delta\theta = \frac{2\pi}{64}$. Cada

circunferencia incrementa un valor Δr respecto a la anterior, que vendrá definido en parte por la diferencia existente entre el radio del iris y el radio inicial. De este modo para poder tomar 32 circunferencias virtuales y admitiendo un margen de seguridad sobre el radio del iris se define el incremento radial como:

$$\Delta r = \frac{r_{seguro} - r_{inicial}}{32} \quad (5.6)$$

donde $r_{seguro} = r_{iris} \cdot (mseg)$, siendo $mseg$, el margen de seguridad utilizado, expresado en tanto por ciento. Por ejemplo si admitimos que el iris no tiene interferencias en un 75% de la región, entonces $r_{seguro} = r_{iris} \cdot 75\%$.

De este modo se obtendrían en la imagen del iris 2048 (64x32), puntos de características que permitirían obtener una imagen unidimensional de los valores de gris comprendidos entre 0 y 255, de cada uno de los puntos estudiados.

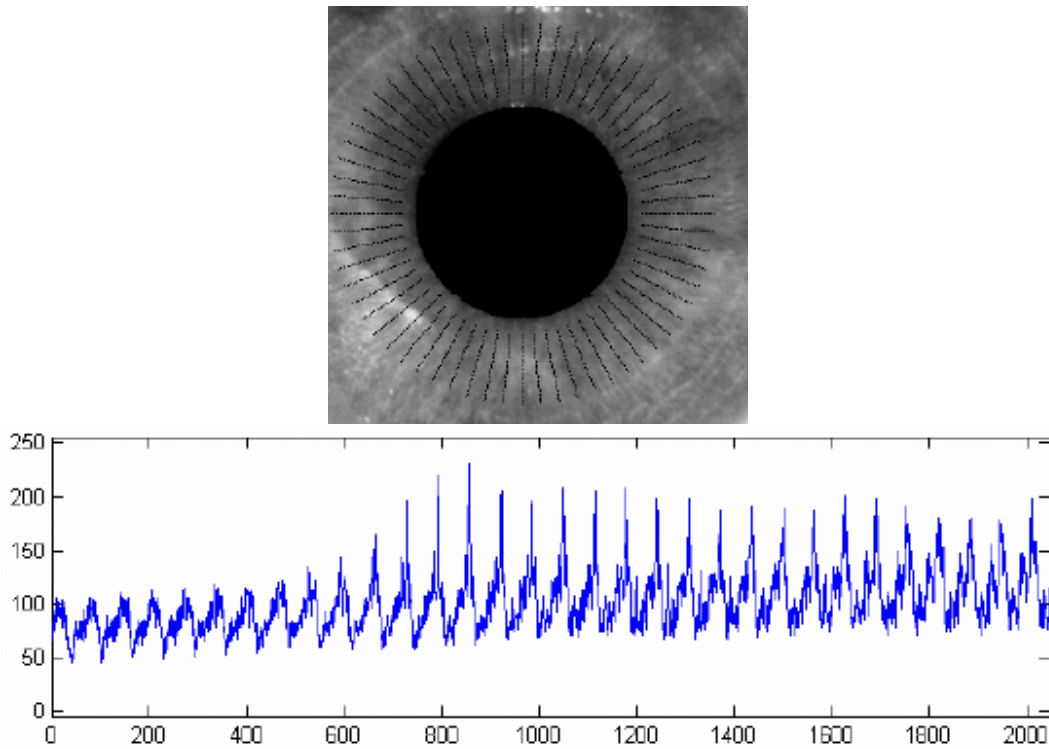


Figura 5-9 Imagen de los puntos tomados del iris y su respectiva señal de valores de escala de gris de estos puntos.

Para permitir que el proceso sea invariante frente a la rotación es posible obtener como punto de referencia, aquel en el que la recta formada por los centros del iris y la pupila corta a la circunferencia virtual de radio inicial. De este modo dado que los puntos de los centros del iris y la pupila varían este punto solo cambiaría en momentos en los que la pupila se dilatase o contrajese, sin embargo en esos casos la variación sería en todo caso radial lo que permitiría obtener puntos muy cercanos a los de otros casos y siempre dentro de la misma recta, que se definiría de la siguiente manera:

$$recta = \begin{cases} x = p_1 + \lambda d_1 \\ y = p_2 + \lambda d_2 \end{cases} \quad (5.7)$$

donde $\vec{d} = (d_1, d_2)$, compone el vector direccional de la recta que forma los puntos del centro del iris y la pupila.

Igualmente se puede realizar este método tomando como referencia el centro del iris hallado y el centro de la imagen tal y como se detalla en [Apa05].

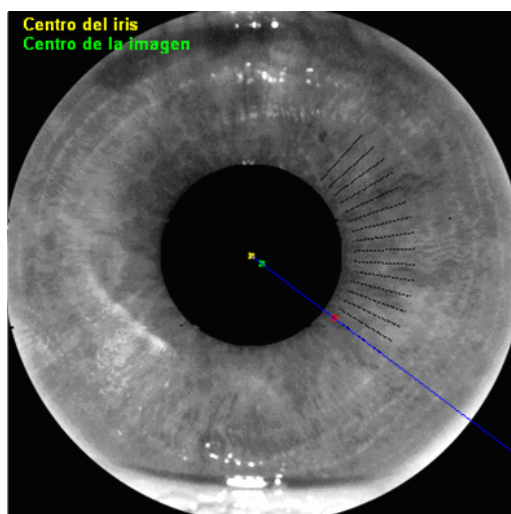


Figura 5-10 Esquema del proceso de extracción de características [Apa05].

En esta imagen se puede observar en amarillo el centro del iris y a continuación desplazado hacia abajo a la derecha el centro de la imagen, en verde, que determinan juntos la línea azul de referencia, y el punto rojo que marca el punto de comienzo de extracción de características

Con este método, se programa directamente el primer ángulo a partir del cual comenzarán a dibujarse las circunferencias virtuales, de modo que, hacemos que la firma de iris de un usuario determinado empiece a crearse en un ángulo concreto, y no en el ángulo que *Matlab*, escogería de forma aleatoria en la imagen.

Determinada la recta que pasa por los dos puntos antes mencionados (centro del iris y centro de la imagen pre-procesada), se calcula el punto de corte con la circunferencia de radio inicial y se le añade un pequeño incremento para evitar encontrarse demasiado cerca de una zona sin información y que pudiera interferir en el proceso.

En todo caso la señal unidimensional obtenida tendrá 2048 puntos con valores comprendidos entre 0 y 255 como se había explicado antes.

5.5.2. Cálculo de la Transformada Diádica Wavelet de la firma de iris

Una vez obtenida la señal unidimensional correspondiente a la firma de iris, pasaremos al cálculo de la transformada wavelet, calculando en este proceso su transformada Diádica Wavelet Discreta.

Para un mejor entendimiento de las operaciones realizadas en este apartado, y tras la presentación teórica de estos procedimientos, realizada en el capítulo 2 de esta memoria, se realiza una breve presentación de este tipo de transformada Wavelet.

Para el desarrollo de los algoritmos necesarios para esta etapa del sistema, se siguieron los trabajos realizados por Mallat y Zhong [Mal92].

En estos trabajos se especifica, que es necesario definir una “función suavizadora”

$\phi(x)$ a partir de la cual obtendremos la función wavelet $\psi(x)$.

Si imponemos que la transformada de Fourier de esta 'función suavizadora' se pueda escribir como un producto infinito tendremos:

$$\hat{\phi}(\omega) = e^{-j\omega} \prod_{p=1}^{+\infty} H(2^{-p}\omega) \quad (5.8)$$

donde el parámetro ω es la muestra de desplazamiento, que depende únicamente de $\psi(x)$. Esta muestra se ajusta con el objetivo de que $\phi(x)$ sea simétrica respecto a 0, y $H(\omega)$ es una función diferenciable de periodo 2π tal que:

$$\text{Propiedades} \Rightarrow \begin{cases} |H(\omega)|^2 + |H(\omega + \pi)|^2 \leq 1 \\ |H(0)| = 1 \end{cases} \quad (5.9)$$

En el caso de la transformada wavelet diádica, es posible imponer variaciones en cuanto al cambio de escala de la función, dentro de los valores de la escala diádica $(2^j)_{j \in \mathbb{Z}}$. Siendo la Wavelet una función $\psi(x)$, podremos expresar la dilatación de ésta por un factor de 2^j como:

$$\psi_{2^j}(x) = \frac{1}{2^j} \psi\left(\frac{x}{2^j}\right) \quad (5.10)$$

En la siguiente gráfica podemos ver $\psi(x)$, y la dilatación de ésta con escala diádica 2^j con $j=2$ ($\psi_{2^2}(x)$):

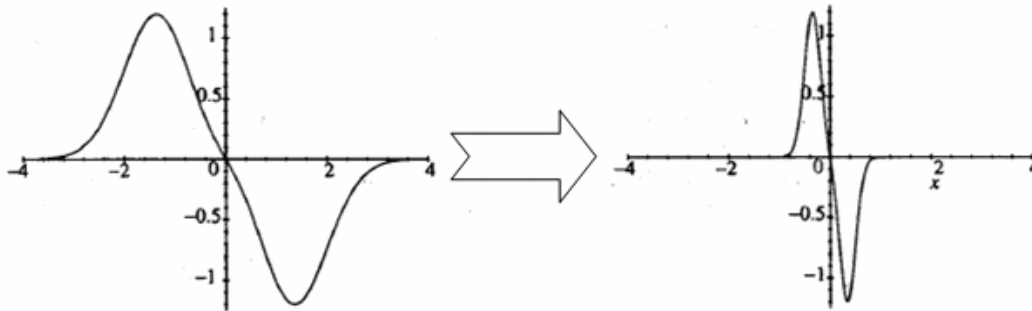


Figura 5-11 Gráfica de la función $\psi(x)$ y su dilatación.

La transformada Wavelet de una función $f(x)$ para la escala 2^j en la posición x , es definida por la operación de convolución:

$$W_{2^j}(x) = f * \psi_{2^j}(x) \quad (5.11)$$

Al hablar de la transformada Diádica Wavelet, nos referimos a la secuencia de funciones definidas por

$$Wf = (W_{2^j} f(x))_{j \in \mathbb{Z}} \quad (5.12)$$

donde W es el operador de la transformada Diádica.

Estas condiciones permiten afirmar que la función suavizadora definida, pertenece al espacio de Hilbert $L^2(R)$, de funciones 1-D de cuadrado integrable, lo que implica que:

$$\hat{\phi}(2\omega) = e^{-j\omega} H(\omega) \hat{\phi}(\omega) \quad (5.13)$$

Cumpliendo igualmente las condiciones del mencionado artículo definimos una función wavelet cuya transformada de Fourier cumple:

$$\hat{\psi}(2\omega) = e^{-j\omega} G(\omega) \hat{\phi}(\omega) \quad (5.14)$$

siendo $G(\omega)$ una función periódica de periodo 2π .

Las transformadas de Fourier de la Wavelet, la función suavizadora y la wavelet de reconstrucción, $\hat{\psi}(w)$, $\hat{\phi}(w)$ y $\hat{X}(w)$ respectivamente, deben satisfacer:

$$\hat{\psi}(2w) \hat{X}(2w) = \left| \hat{\phi}(w) \right|^2 - \left| \hat{\phi}(2w) \right|^2 \quad (5.15)$$

Además se impone que la transformada de la Wavelet de reconstrucción pueda ser escrita como:

$$\hat{X}(2w) = e^{-j\omega} K(w) \hat{\phi}(w) \quad (5.16)$$

siendo $K(w)$ otra función periódica de periodo 2π .

Utilizando las expresiones 5.13 y 5.16, en la expresión de relación 5.15, obtenemos:

$$\left| H(w) \right|^2 + G(w) K(w) = 1 \quad (5.17)$$

ecuación que permitirá definir $K(w)$, de tal forma que la transformada de Fourier de la Wavelet de reconstrucción, $\hat{X}(w)$, satisfaga

$$\sum_{j=-\infty}^{+\infty} \hat{\psi}(2^j w) \hat{X}(2^j w) = 1 \quad (5.18)$$

A modo de ejemplo, imaginemos que queremos obtener una wavelet $\psi(x)$ igual a la derivada de orden 1 de una función suavizadora $\theta(x)$. Este hecho implica que $\hat{\psi}(x)$, la transformada de Fourier de $\psi(x)$, debe tener un cero de orden 1 en $w=1$. Como $\left| \hat{\phi}(0) \right| = 1$, la expresión 5.14 nos lleva a que $G(w)$ debe tener también un cero de orden 1 en $w=1$. La elección de $H(w)$ se realizará de tal forma que se pueda obtener una Wavelet $\psi(x)$, que sea antisimétrica, y regular en la medida de lo posible, y que tenga un soporte compacto.

Una familia de funciones periódicas de periodo 2π ; $H(w)$, $G(w)$ y $K(w)$ que satisfacen estas condiciones son:

$$\begin{aligned}
 H(w) &= e^{jw/2} (\cos(w/2))^{2n+1} \\
 G(w) &= 4je^{jw/2} \text{sen}(w/2) \\
 K(w) &= \frac{1 - |H(w)|^2}{G(w)}
 \end{aligned}
 \tag{5.19}$$

De las expresiones anteriores de la transformada de Fourier de la función suavizadora ($\hat{\phi}(\omega)$) y de $\hat{\psi}(\omega)$, tendremos en este caso:

$$\begin{aligned}
 \hat{\phi}(w) &= \left(\frac{\text{sen}(w/2)}{w/2} \right)^{2n+1} \\
 \hat{\psi}(w) &= jw \left(\frac{\text{sen}(w/4)}{w/4} \right)^{2n+2}
 \end{aligned}
 \tag{5.20}$$

Obteniendo finalmente, que la transformada de Fourier de la función suavizadora primitiva $\theta(x)$ sea:

$$\hat{\theta}(w) = \left(\frac{\text{sen}(w/4)}{w/4} \right)^{2n+2}
 \tag{5.21}$$

En la siguiente figura se muestra una Spline cuadrática de soporte compacto y derivada continua (figura 6(a)), que es la derivada de la función Spline cúbica $\theta(x)$ (figura 6(b)). Para la realización de esta representación se ha tomado el valor $n = 1 \rightarrow 2n + 1 = 3$.

Para conseguir una wavelet antisimétrica respecto a cero y una función $\phi(\omega)$ simétrica respecto a este mismo valor, el parámetro de desplazamiento ω utilizado en la expresión 5.13 es igual a $1/2$.

La segunda parte de la expresión 5.20, referente a $\psi(w)$, prueba que la función $\psi(x)$ es una spline cuadrática con soporte compacto, mientras que $\theta(x)$ es una spline cúbica, del modo que se aprecia en la siguiente figura.

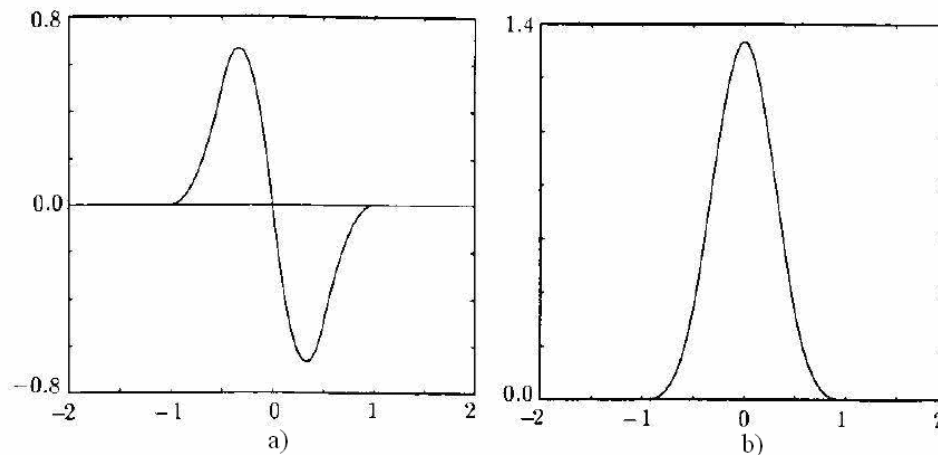


Figura 5-12 (a) Spline cuadrática; (b) Spline cúbica

Como se mostró anteriormente, estas funciones $H(\omega)$ y $G(\omega)$ se pueden ver como las funciones de transferencia de los filtros discretos con respuesta finita al impulso, utilizados en el análisis multirresolución. Las respuestas al impulso de estos filtros para una wavelet de spline cuadrático, para distintos valores de n , vienen dadas en la tabla siguiente:

n	H	G	K
-1	0,125	-----	0.171875
0	0,375	-2.0	-0.171875
1	0,375	2.0	-0.054685
2	0,125	-----	-0.0078125

Tabla 5-1 Respuesta finita al impulso de los filtros H, G y K correspondientes a la Spline cuadrática mostrada en la figura 6(a).

Estos filtros se utilizan en los algoritmos de cálculo rápido de la transformada wavelet, tal y como vamos a ver en el apartado siguiente.

5.5.3. Algoritmos rápidos de cálculo de la DDWT para señales unidimensionales

En este apartado revisaremos el algoritmo para el cálculo de la transformada wavelet diádica discreta (DDWT).

Suponemos que la wavelet $\psi(x)$ está caracterizada por tres filtros discretos H y G descritos en el apartado anterior y K en el artículo [Mal92], que no se ha descrito por utilizarse sólo para reconstrucción de la señal. Si llamamos H_p , G_p y K_p a los filtros discretos obtenidos de los anteriores introduciendo $2^p - 1$ ceros entre cada uno de los coeficientes de los filtros H, G y K. Sus funciones de transferencia serán, respectivamente, $H(2^p \omega)$, $G(2^p \omega)$ y $K(2^p \omega)$. Llamaremos \tilde{H}_p al filtro cuya función de transferencia es la compleja conjugada de $H(2^p \omega)$, es decir $\overline{H(2^p \omega)}$. Llamaremos también, como es habitual “*” al operador convolución, en este caso de dos señales discretas.

El siguiente algoritmo calcula la transformada wavelet discreta de la señal $S_1^d f$ que es también discreta. Para cada escala 2^j , el algoritmo descompone $S_{2^j}^d f$ en $S_{2^{j+1}}^d f$ y en $W_{2^{j+1}}^d f$.

```

j=0
while (j<J)

$$W_{2^{j+1}}^d f = \frac{1}{\lambda_j} S_{2^j}^d f * G_j$$


$$S_{2^{j+1}}^d f = S_{2^j}^d f * H_j$$

j=j+1
end of while
    
```

Capítulo 5 – Diseño del sistema de reconocimiento biométrico de iris

Debido a la discretización, el módulo máximo de la wavelet de un borde en escalón no tiene la misma amplitud en todas las escalas como en el modelo continuo. Las constantes λ_j sirven para compensar este efecto. Los valores de estas constantes correspondientes a los filtros de la tabla anterior, se dan en la siguiente tabla:

j	1	2	3	4	5
λ_j	1,50	1,12	1,03	1,01	1,00

Tabla 5-2 Valores de K para j

Las convoluciones han de tener en cuenta la periodización realizada para solventar el problema de los bordes [10]. La complejidad de este algoritmo es $O(N \cdot \log(N))$, y su constante de complejidad es proporcional al número de coeficientes distintos de cero en las respuestas al impulso de los filtros H. Como ejemplo vamos a ver la siguiente figura, donde la señal superior (en negro) es la señal original (los valores de escala de grises de la circunferencia virtual), y las tres siguientes son la transformada diádica ondicular discreta de esa señal, con un spline cuadrático y para las escalas desde 1 hasta 3.

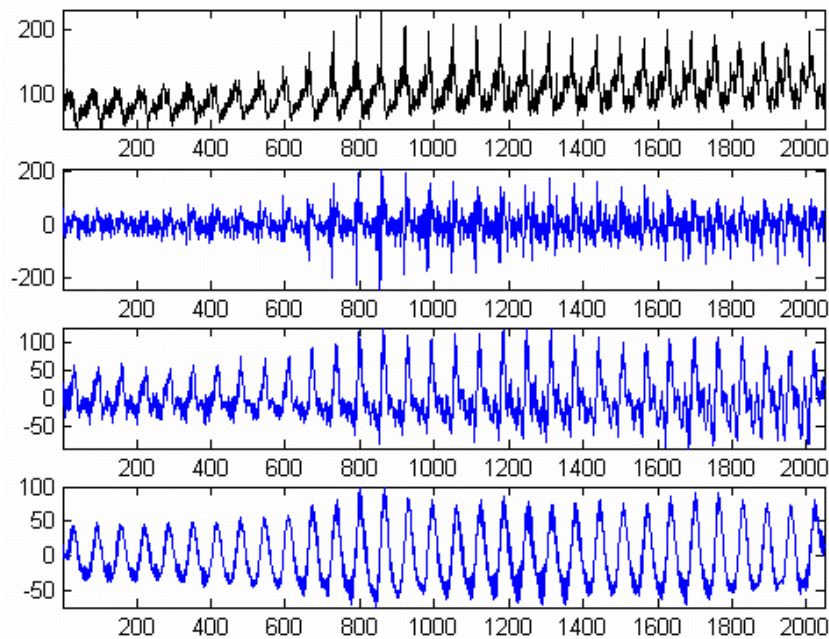


Figura 5-13 Firma del iris (en negro) y su transformada Diádica Wavelet para los valores de escala 3, 4 y 5 [Apa05].

5.5.4. Diferentes métodos de representación de la información obtenida de la aplicación de la transformada wavelet diádica a la firma de iris

5.5.4.1. Representación de los cruces por cero de los patrones de iris

Cuando una señal incluye estructuras importantes pertenecientes a diferentes escalas, es muy útil reorganizar la información de la señal en conjuntos del mismo nivel de detalle y de tamaño variable [Mal91]. Este procedimiento se utiliza con frecuencia en las técnicas de reconocimiento de patrones. Es fundamental que la representación de cruces por cero sea completa y estable, para conseguir este objetivo, primero hemos de intentar que no se elimine información importante con esta nueva representación, y además debemos considerar los cruces por cero de la transformada wavelet diádica discreta, en lugar de considerar todo el espectro continuo de escalas. Por tanto en este caso se restringirá el proceso a las escalas diádicas, guardando el valor de la transformada wavelet entre cada pareja de cruces por cero.

En la práctica, la señal de entrada unidimensional proveniente del reprocesado, tiene una resolución finita que impone una escala fina al calcular la transformada diádica, y no nos permite calcular la transformada wavelet para toda escala 2^j , con j variando desde menos infinito a infinito. Estamos limitados por la máxima escala que ha de ser finita, y por la mínima que ha de ser distinta de cero. En este caso, y con el propósito de normalizar, la escala más fina va a ser 1, y que la más basta será 27. Entonces, podemos calcular la transformada wavelet diádica discreta (DDWT) de la firma del iris, IS (Iris Signature), que será:

$$\{S_{2^j} IS, (W_{2^j} IS)_{1 \leq j \leq J}\} \quad (5.22)$$

donde $S_{2^j} IS$ es la señal en la escala más alta y $(W_{2^j} IS)_{1 \leq j \leq J}$ puede ser interpretado como los detalles a escala 1, que desaparecerán a escala 2^j [Mal98].

Los cruces por cero de $(W_{2^j} IS)_{1 \leq j \leq J}$ se obtienen de los cambios de signo de las muestras. La posición de cada uno de ellos se estima mediante interpolación lineal entre las dos muestras de diferente signo. Por tanto, la firma del iris (IS) tiene N muestras distintas de cero; y puesto que hay al menos $N \cdot \log(N)$ muestras en su transformada wavelet discreta, el número de operaciones para calcular la representación de cruces por cero va a ser $O(N \cdot \log(N))$. Resulta evidente que si utilizamos la transformada diádica wavelet discreta, sólo vamos a poder calcular la representación de cruces por cero a lo largo de las escalas 2^j para $1 \leq 2^j \leq 2^J$. De este modo, vamos a considerar la representación de cruces por cero de la IS como el conjunto de señales

$$\{(W_{2^j} IS)_{1 \leq j \leq J}\} \quad (5.23)$$

donde hemos excluido el nivel más burdo para conseguir una representación robusta en un entorno con ruido, además de reducir el número de cálculos necesarios. Además, la información en los niveles de resolución finos se ve afectada por los errores debidos al

ruido y por los errores de cuantificación, que son debidos al uso de rejillas rectangulares en las imágenes digitales [Tie97].

Debido a todo lo anterior, y para reducir los efectos no deseados mencionados anteriormente, en la representación de cruces por cero se utilizan sólo unos pocos niveles de resolución, a partir del segundo más burdo y afinando en cada nivel. La función wavelet que vamos a utilizar aquí es un spline cuadrático [Mal92]. La ventaja de usar esta función es que tiene soporte (anchura) finito y además tiene menos coeficientes que la segunda derivada de una función “suavizadora” [Mal91]

Con el fin de que la representación de cruces por cero sea estable, vamos a guardar también el valor de la integral de la transformada wavelet entre dos cruces por cero consecutivos.

Sea $f(x)$ una señal dada $((W_{2^j} f(x))_{j \in \mathbb{Z}})$ su transformada wavelet diádica discreta. Para cualquier par de cruces por cero consecutivos de la transformada cuyas abscisas sean respectivamente (z_{n-1}, z_n) guardaremos el valor de la siguiente integral

$$e_n = \int_{z_{n-1}}^{z_n} W_{2^j} f(x) dx \quad (5.24)$$

Teniendo en cuenta que $W_s f(x)$ es proporcional a la segunda derivada de $f(x)$ suavizada por $\theta_s(x)$

$$W_{2^j} f(x) = 2^{2j} \frac{d^2}{dx^2} (f * \theta_{2^j})(x) \quad (5.25)$$

introduciendo 5.24 en 5.25, tenemos que:

$$e_n = 2^{2j} \left(\frac{d}{dx} (f * \theta_{2^j})(z_n) - \frac{d}{dx} (f * \theta_{2^j})(z_{n-1}) \right) \quad (5.26)$$

La integral e_n es proporcional entonces a la diferencia entre dos extremos consecutivos de la derivada de $f(x)$ suavizada en la escala 2^j . Este valor da una estimación del tamaño de la estructura que está entre los dos bordes localizados en z_{n-1} y z_n .

Para cualquier función $W_{2^j} f(x)$ la posición de los cruces por cero y los valores de la integral e_n , pueden ser representados por una función definida a trozos con valores constantes para cada trozo,

$$Z_{2^j} f(x) = \frac{e_n}{z_n - z_{n-1}}, \rightarrow x \in [z_n, z_{n-1}] \quad (5.27)$$

como es lógico, la función $Z_{2^j} f(x)$ tiene los mismos cruces por cero y los mismos valores de la integral que $W_{2^j} f(x)$. Definimos por tanto la representación de cruces por cero de una

señal (Zf) como la secuencia de funciones definidas a trozos constantes tal que:

$$Zf = (Z_{2^j} f(x))_{j \in \mathbb{Z}} \quad (5.28)$$

Para aclarar todos estos conceptos vamos a ver un pequeño ejemplo. Para empezar, mostramos la señal que utilizaremos, que se observa en la siguiente figura [Mar01]:

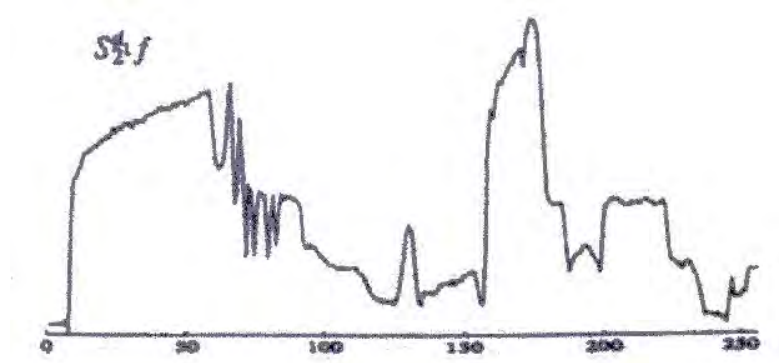


Figura 5-14 Señal de 256 muestras.

La trataremos con la wavelet denominada de “sombrero mexicano”, que se muestra a continuación:

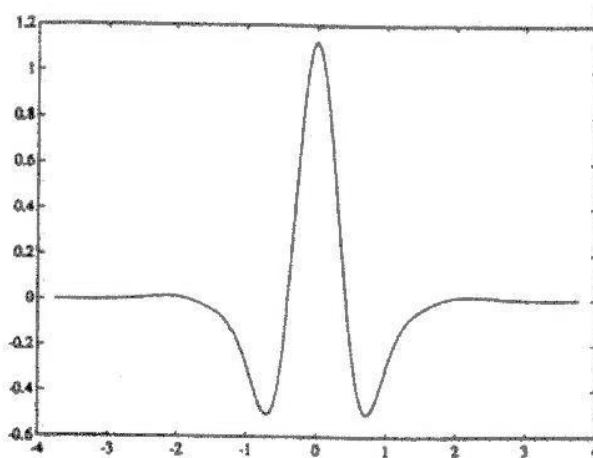


Figura 5-15 Wavelet madre (sombrero mexicano).

De este modo calculamos la transformada diádica wavelet discreta de la señal mostrada, cuya representación es:

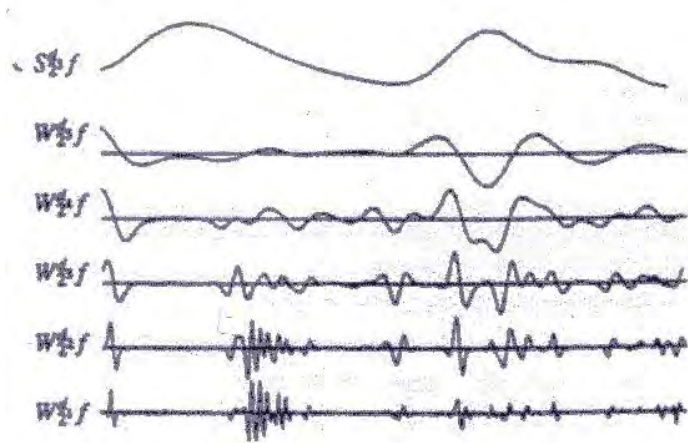


Figura 5-16 DDWT a diferentes escalas y residuo.

Las curvas de las figuras anteriores, lógicamente no son continuas, si no que son interpolaciones lineales entre las muestras de cada señal. Como la wavelet usada es la segunda derivada de una función suavizadora, la representación de cruces por cero indica los puntos de variación más puntiaguda en cada escala. La siguiente figura indica los cruces por cero y los valores de la integral.

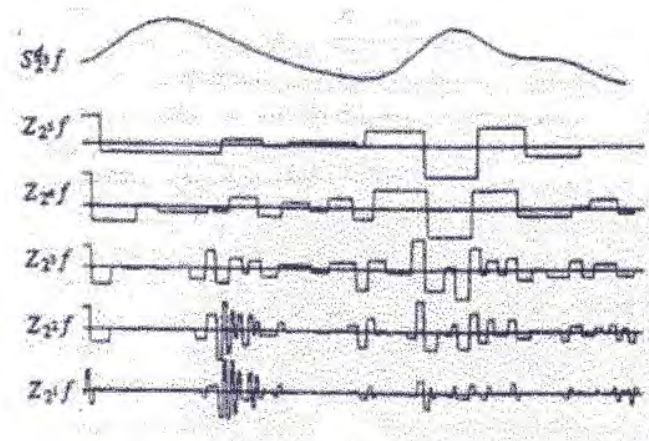


Figura 5-17 Representación de cruces por cero a diferente resolución.

En resumen, vamos a generar la representación de cruces por cero de la firma del iris proveniente del preprocesado. Esta firma del iris normalizada no es más que la transformada wavelet diádica de una potencia de dos (en este caso 256) de valores obtenidos en escala de grises, lo que implica valores de entre 0 y 255, de una circunferencia virtual que recorre el iris.

Esta firma de iris es periódica, con periodo N , y lógicamente la representación de cruces por cero también va ser periódica. Esto indica que nuestra representación es independiente del punto de inicio de la circunferencia virtual, lo cual nos proporciona la invariancia del método frente a rotación de la figura del iris.

Con el objetivo de usar los patrones del iris para identificación es importante elegir

una representación adecuada para extraer la información del iris de imágenes del ojo humano. En esta línea, hemos introducido un algoritmo para extraer las características únicas del iris a partir de las imágenes preprocesadas.

En esta figura se observan tres representaciones de cruces por cero de la transformada diádica ondicular discreta que vimos en el ejemplo del apartado anterior, haciendo uso igualmente de las tres escalas anteriores.

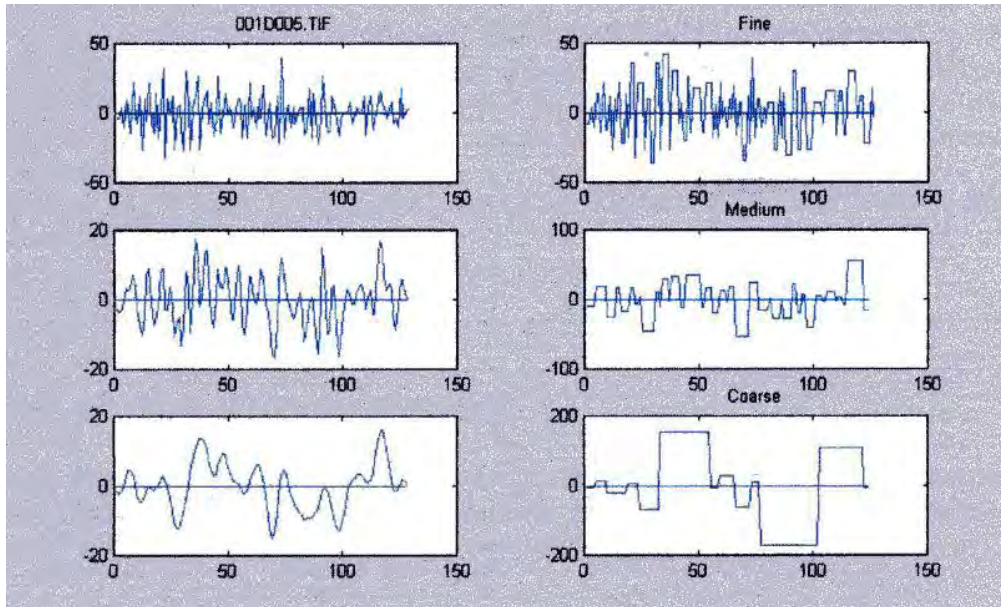


Figura 5-18 Cruces por cero de DDWTs a tres niveles de resolución.

Aplicación del algoritmo de eliminación de falsos cruces por cero por FFRn

La distorsión producida en nuestra representación de cruces por cero debida a ruido blanco es muy reducida en los niveles de resolución bajos, sin embargo, en algunas posiciones críticas con niveles altos de resolución, pueden aparecer y desaparecer cruces por cero. Los puntos de inflexión de la transformada wavelet son algunos de esos puntos. Como resultado de este suceso, dos iris idénticos pueden tener distintas representaciones de cruces por cero, si uno de ellos está en un entorno que contiene ruido.

Afortunadamente, tal y como apuntan Tieng y Boles en su artículo [Tie97], si comparamos el número de cruces por cero de la representación del iris desconocido (en entorno con ruido), con el número de cruces por cero de la representación de nuestro modelo (en un entorno libre de ruido) al mismo nivel de resolución, podremos aplicar un algoritmo a ambos patrones suponiendo que se tratan del mismo iris.

Como la representación es periódica, el número de cruces por cero debe de ser par. Por tanto a la hora de eliminar falsos cruces, ha de hacerse de dos en dos. El algoritmo de actuación que se propone es el siguiente:

Con el rango de resolución predeterminado y empezando por el nivel más grueso de resolución L, y terminando con el nivel más fino, K, seguir los siguientes pasos:

1. Si el número de cruces por cero es el mismo, pasar al paso 4, si no, ir al paso 2

2. Modificar la representación que tenga mayor número de cruces por cero de la siguiente forma:
 - Calcular el área algebraica de los pulsos rectangulares entre cada pareja de cruces por cero consecutivos
 - Eliminar el pulso que tenga el menor valor absoluto del área.
 - Unir los dos cruces por cero contiguos al eliminado para formar un nuevo pulso. El área del nuevo pulso se calcula siguiendo la siguiente ecuación: $A_{nueva} = A_{n+1} + A_n + A_{n-1}$, donde A_n es el área algebraica del pulso eliminado. Las dos posiciones de los cruces por cero del nuevo pulso están definidas por las posiciones izquierda y derecha de los cruces por cero de los vecinos izquierdo y derecho del pulso eliminado,
3. Repetir el paso 2 hasta que el número de cruces por cero del modelo y del candidato coincidan
4. Pasar al siguiente nivel de resolución más fino, y volver al paso 1.

5.5.4.2. Representación y cálculo de los módulos de los patrones de iris

Este aspecto de la extracción de características del sistema desarrollado resulta bastante novedoso, por lo que las referencias de autores y de bibliografía al respecto, son muy escasas.

Una vez calculada la transformada Wavelet de la firma de iris del sujeto bajo estudio, para diferentes valores de escala (fina, media y gruesa), se estudian estas señales con el objetivo de obtener las posiciones en las que se produce o localiza un máximo local estricto en módulo, así como el valor del mismo. El objetivo es determinar una serie de puntos característicos, propios de cada iris, que permitan crear un patrón con el mayor nivel de unicidad posible.

En este proceso se perderá una pequeña cantidad de información, ya que en aquellas posiciones de la transformada de la firma de iris, en las que no se encuentra un máximo local estricto en módulo, se sustituye el valor de la transformada por cero. Como se mostrará más adelante, esta pérdida de información no impide en ningún caso el correcto funcionamiento del sistema de identificación.

En la siguiente figura se muestra el resultado de la obtención de los módulos de la transformada Wavelet de una firma de iris (de 2048 muestras), correspondiente a uno de los ojos disponibles en la base de datos GBTNI I. Puede comprobarse, que al igual que la transformada se realizaba para tres niveles diferentes de escala, el cálculo de los módulos se repite para todos ellos.

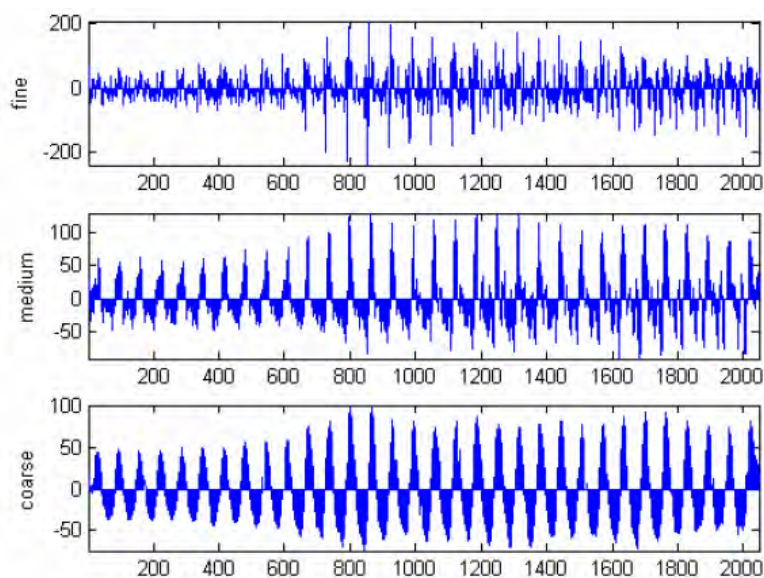


Figura 5-19 Representación de los módulos de la transformada Diádica Wavelet para los valores de escala 3, 4 y 5 de la IS.

Las discontinuidades que se observan en las gráficas para los tres valores de escala utilizados (3, 4, y 5), se deben a las muestras convertidas en cero, como ya se indicó, al calcular los máximos relativos en módulo de la transformada de la IS.

5.6. Etapa final

5.6.1. Comparativas

Para poder realizar la comparación que permitirá llevar a cabo la identificación o verificación de un individuo concreto, se hará uso de las transformadas diádicas wavelet de las firmas de iris calculadas en etapas anteriores del sistema, independientemente de si esta se ha llevado a cabo mediante el método de cruces por cero o por el estudio de los módulos.

En el caso de los procesos de reclutamiento, las representaciones, denominadas modelos o patrones de iris, correspondientes a cada uno de los usuarios serán almacenadas en un dispositivo de memoria o base de datos, lo que permitirá que posteriormente, estos patrones, sean utilizados en los distintos procesos de identificación y verificación, que se llevarán a cabo durante el ciclo de uso de un sistema biométrico.

La función que se realiza en esta parte del sistema es por tanto, la comparación entre los patrones obtenidos durante el proceso de extracción de características, correspondientes a los usuarios que hacen uso del sistema, y los modelos o patrones almacenados. Para poder realizar este reconocimiento es necesario que el sistema pase previamente por una fase de aprendizaje y una de clasificación.

En la fase de aprendizaje, o lo que antes hemos denominado fase de reclutamiento, se construirán los modelos o patrones de iris a partir de la captura de una imagen del ojo del usuario en un entorno libre de ruido. En la segunda fase, o fase de clasificación, se

construirá como se ha indicado en apartados anteriores, la estructura con los datos e información correspondientes a un usuario desconocido, lo que derivará dependiendo del uso específico del sistemas en un proceso de verificación o de identificación.

En el caso de proceder a la verificación de un usuario, se comparará el patrón obtenido con un único modelo determinado, de manera que se permita comprobar que el usuario es quien dice ser.

Por otro lado en el caso de procesos de identificación, el patrón obtenido se compara con todos y cada uno de los patrones de la base de datos, haciendo corresponder al usuario con la identidad del patrón que presente un menor grado de disimilaridad.

Para esto será necesario, tanto en el proceso de identificación como de verificación, definir una serie de distancias que permitan medir la diferencia, entre los patrones del usuario y los recogidos en la base de datos del sistema. Estas distancias, permiten establecer una medida de disimilaridad entre el patrón obtenido y los demás patrones, delimitando por tanto la posible relación de este patrón con los demás, de modo que a medida que esta medida resulta más exacta, permitirá medir con mayor precisión la diferencia del patrón con los demás de modo que la distancia existente con patrones diferentes se hará mucho más apreciable que la que corresponda con el patrón propio del usuario.

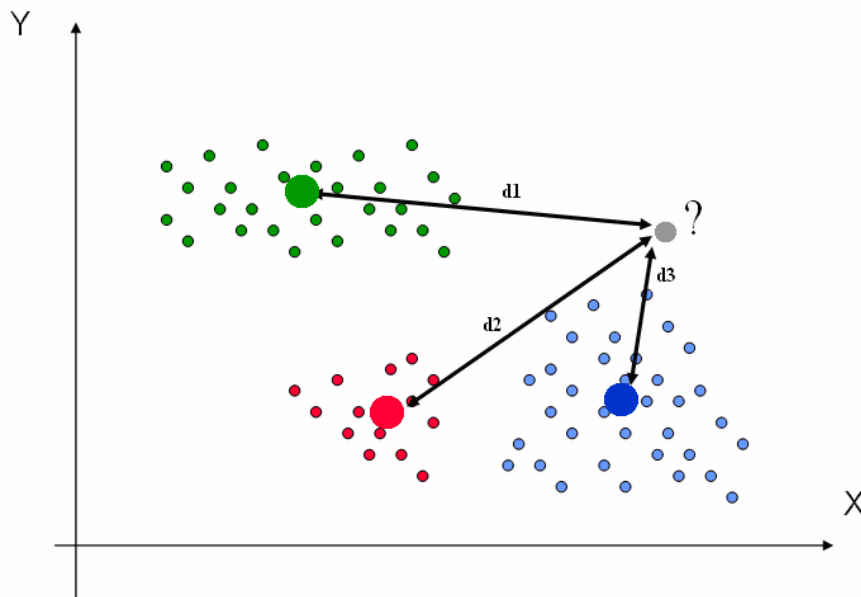


Figura 5-20 Medida de las diferentes distancias.

El trabajo *Biometric Decisión Landscapes* de John Daughman [Dau00], aborda en profundidad esta fase de los sistemas de reconocimiento de iris.

Siguiendo este y algunos otros trabajos de diferentes autores como Sánchez-Reillo [Rei00], se observa que el uso de la distancia de Hamming permite obtener buenos resultados en estos sistemas biométricos.

5.6.2. Diferentes distancias usadas para los algoritmos de clasificación

5.6.2.1. Distancia Euclídea

El método de la distancia euclídea, centra la clase en un patrón de características resultado de la medida del número de muestras inicialmente tomadas. La distancia de una de las muestras al centro calculado vendrá determinada por la expresión:

$$d_E = \sqrt{\sum_{i=1}^L (x_i - t_i)^2} \quad (5.29)$$

En esta expresión, L representa la dimensión del vector de características, x_i indica la i -ésima componente del mencionado vector, mientras que t_i será la componente i -ésima del modelo o patrón. La determinación del umbral que indicará la pertenencia a una clase o a otra, vendrá dada por el valor de la distancia que marca el límite entre estas clases.

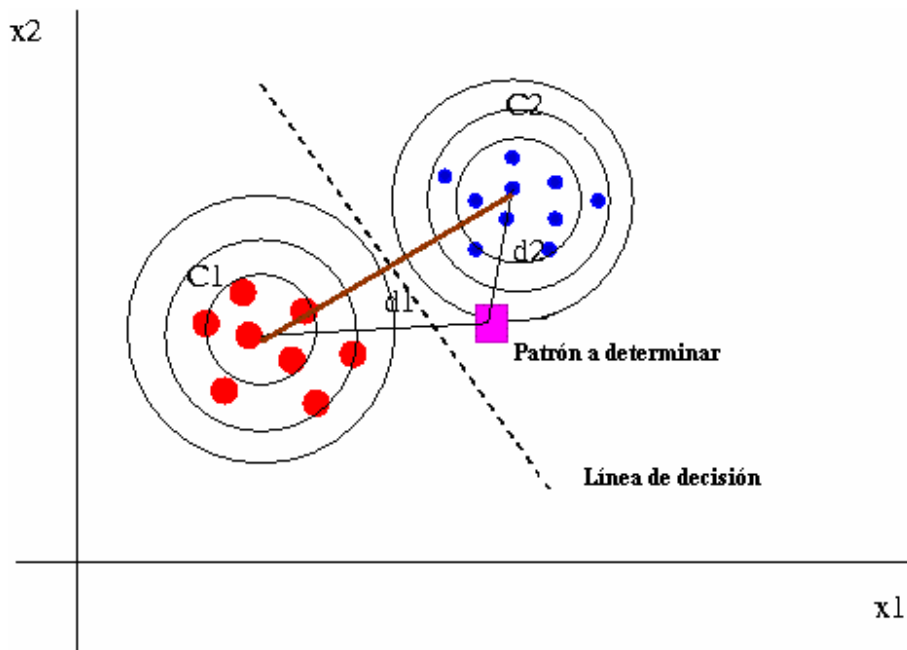


Figura 5-21 Diagrama de trabajo en la distancia euclídea.

5.6.2.2. Distancia de Hamming

A diferencia de lo indicado para la distancia euclídea, la distancia de Hamming se mide como el número de componentes de la muestra y del patrón que son distintos, sin importar el valor de la diferencia obtenida entre ambos.

Podemos distinguir dos casos bien diferenciados, aquel en el que las componentes del vector de características son valores binarios, y el caso en el que las componentes de este vector no toman valores binarios.

Capítulo 5 – Diseño del sistema de reconocimiento biométrico de iris

Para la primera situación, la distancia de Hamming, comúnmente notada simplemente d_H , viene determinada por la expresión:

$$d_H = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L x_i \oplus t_i \quad (5.30)$$

siendo L la longitud del vector de características, x_i la i -ésima componente del mencionado vector, t_i la componente i -ésima del modelo o patrón, y \oplus representa la operación binaria XOR.

En los códigos que hacen uso de estructuras en bloques de n bits cada uno, cada bloque se diferencia de otro de acuerdo con la distancia que exista entre ellos. Como lo muestra la siguiente figura:

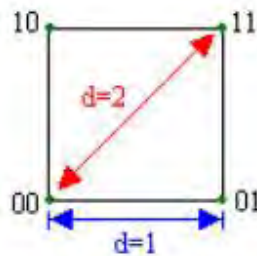


Figura 5-22 Posibles distancias Hamming para códigos de 2 bits.

En estos casos la distancia Hamming se cuenta como la cantidad de bits que cambian de un bloque a otro. El cubo ayuda a representar la distancia Hamming para un código de bloque de tres bits.

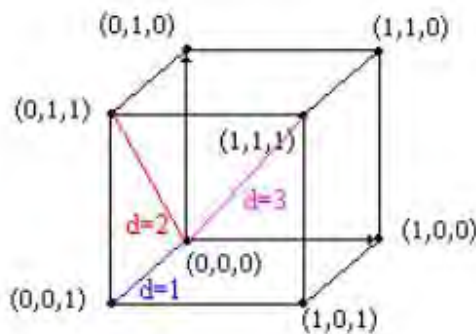


Figura 5-23 Posibles distancias Hamming para códigos de 3 bits.

En general para un código no recurrente (es decir de bloques de n bits), la distancia Hamming se calcula comparando bit a bit. En el ejemplo la palabra resultante tiene 4 1's, tras la operación XOR, entonces la distancia Hamming entre estas dos palabras es $d^H=4$.

$$\begin{array}{r} 10010110101 \\ \oplus 11001110100 \\ \hline 01011000001 \quad d=4 \end{array}$$

Figura 5-24 Ejemplo de operación XOR con dos códigos.

En el caso en el que las componentes del vector de características no sean valores binarios, para cada una de ellas se establecerá un valor umbral, de modo que las componentes que superen el umbral definido se contarán como componentes distantes del patrón. El número de estas componentes determinará la distancia entre la muestra y el patrón.

Si para establecer el umbral se utiliza la desviación típica de la componente dentro de los vectores de características obtenidos en el reclutamiento, entonces el patrón se forma como el conjunto de una medida de las distintas muestras, más las desviaciones típicas de cada una de las componentes. En este caso la distancia de Hamming para valores no binarios viene determinada por la expresión:

$$d_H^b(x_i, t_i^m) = \#\{i \in \{1, \dots, L\} / |x_i, t_i^m| > t_i^\sigma\} \quad (5.31)$$

donde L indica la longitud del vector de características, $\#$ el número de casos se dan, x_i la i -ésima componente del mencionado vector, t_i^m la media de la componente i -ésima del modelo o patrón, y t_i^σ la desviación típica de la componente i -ésima del patrón.

Tras calcular la distancia de Hamming, se comprobará si ésta ha superado un determinado umbral elegido con anterioridad para determinar la correspondencia o no, entre el patrón y la muestra.

5.6.2.3. Distancia de Boles

Finalmente, describiremos una distancia directamente relacionada con la representación de cruces por cero de una señal 1-D [Bol97]. En este caso la denominaremos distancia de Boles (2) modificada, para posteriores apartados de comparación. La distancia de Boles (1) modificada, se detalla en [referencias].

Sea $Z_j p$ la representación de cruces por cero de un objeto p en un nivel de resolución j ; y sea $X_j = \{x_j(r); r = 1, \dots, R_j\}$ el conjunto que contiene las posiciones de los cruces por cero en el nivel j , donde R_j es el número de cruces por cero de la representación en ese nivel.

Así, la representación de $Z_j p$ puede expresarse de forma unívoca mediante un conjunto de números complejos cuyas partes imaginaria, $[\rho_j]_p$, y real, $[\mu_j]_p$ indican las posiciones y amplitudes de los cruces por cero de $Z_j p$ entre dos puntos de cruce por cero consecutivos, respectivamente. Así, consideraremos la siguiente distancia de disimilaridad que permite comparar un objeto desconocido y con el modelo candidato p en el nivel de

resolución j ,

$$d_j(y, p) = \frac{\sum_{i=1}^{R_j} \left\{ [\mu_j(r)]_y [\rho_j(r)]_y - \Gamma [\mu_j(r)]_p [\rho_j(r)]_p \right\}^2}{\Gamma \sum_{i=1}^{R_j} \left| [\mu_j(r)]_y [\rho_j(r)]_y \right| \left| [\mu_j(r)]_p [\rho_j(r)]_p \right|} \quad (5.32)$$

siendo Γ un factor de escala igual a la razón entre la razón media del modelo candidato y la del objeto desconocido. Es interesante observar que en esta distancia sólo intervienen los puntos que son cruces por cero. El valor de disimilaridad total entre un objeto desconocido y el modelo candidato en el intervalo de resoluciones $[K, M]$, será la media de las distancias de disimilaridad calculadas en cada nivel de resolución del citado intervalo, esto es:

$$D_z(y, p) = \sum_{j=K}^M \frac{d_j(y, p)}{K - M - 1} \quad (5.33)$$

Capítulo 6

Resultados

- 6.1. Introducción
- 6.2. Resultados del algoritmo de cruces por cero
- 6.3. Resultado del algoritmo por módulos
- 6.4. Estudio y comparativa de diferentes algoritmos

Capítulo 6 - Resultados

6.1. Introducción

En el presente capítulo se presentan los resultados obtenidos tras el uso del sistema de reconocimiento de iris tanto en los procesos de identificación como en procesos de verificación.

En este sentido se ha tratado de recopilar la información relativa a diferentes procesos y algoritmos usados en las diferentes bases de datos descritas en el capítulo 4. Se observa sin embargo que aún queda bastante trabajo, en cuanto a la comparación de los resultados de diferentes bases de datos, lo que puede derivar en conclusiones acerca de la conveniencia del uso de diferentes algoritmos o respecto a los formatos y resoluciones óptimas para el uso en este tipo de sistemas. Algunos de estos aspectos son sin duda necesarios a la hora de perfeccionar la tecnología en los sistemas de reconocimientos de iris.

Los diferentes resultados se agruparán dependiendo de los algoritmos usados, dentro de cada cual se distinguirá en cada caso la distancia utilizada para realizar el proceso de verificación, ya sea distancia euclídea o de Hamming descritas en el capítulo anterior, y dentro de cada una de ellas, se presentarán los diferentes resultados obtenidos según fuese considerada o no la invariancia frente a la rotación en la etapa de adquisición de datos del iris para construir la firma de iris correspondiente a cada individuo, donde proceda.

En la parte referentes a los procesos de verificación de usuarios, el sistema funciona en base a la respuesta a la pregunta *¿es este sujeto la persona que dice ser?*, a diferencia del modo de funcionamiento de identificación, en este caso, el individuo que se encuentra utilizando el sistema debe indicar al mismo cual es su identidad, de forma que el sistema únicamente tenga que comparar las muestras obtenidas con el patrón del usuario indicado, y comparar la diferencia de ambas muestras en función de un umbral de decisión.

En el caso de la identificación del usuario, los resultados se presentan en función de los porcentajes de acierto obtenidos. Al no utilizar un umbral, el usuario del sistema será identificado con el patrón con el cual se obtiene una menor distancia en la comparación con las muestras obtenidas. Sin embargo el uso de un umbral en la toma de decisiones es un aspecto de vital importancia, a la hora de obtener las prestaciones de un determinado sistema tal y como se explicó en el primer capítulo.

De este modo, los resultados se expresan en función de dos tasas de error: la primera de ellas es la Tasa de Falso Rechazo o *False Rejection Rate* (FRR), el otro índice utilizado para evaluar el rendimiento del sistema es la Tasa de Falsa Aceptación o *False Acceptance Rate* (FAR). Con la primera de las tasas se calcula la probabilidad que existe de que usuario sea rechazado, cuando al comparar sus características con su patrón correspondiente, no se supere el valor de un umbral anteriormente establecido. Es decir, se

mide el porcentaje de ocasiones en las que un usuario legítimo es rechazado por el sistema al no superar satisfactoriamente el proceso de comparación. En el segundo caso, se mide el porcentaje de ocasiones en las que un intruso ha podido ser identificado como un usuario autorizado.

Los valores de estas tasas dependerán del umbral seleccionado para realizar la comparación entre las muestras obtenidas y los patrones almacenados. Por otro lado también se calcula la Tasa de Igual Error o *Equal Error Rate* (ERR), tasa que como ya se explicó, corresponde al punto donde la FRR y la FAR tienen el mismo valor.

Para presentar los resultados se exhibe en primer lugar el algoritmo usado, especificando la base de datos utilizada, y posteriormente se especifica el tipo de proceso que se ha llevado a cabo, donde se detalla, si el proceso es de verificación o de identificación, si el proceso es invariante frente a la rotación y también la distancia utilizada en el algoritmo de comparación.

En la última parte de este capítulo se revisaran los resultados obtenidos en otros estudios, sobre los algoritmos descritos [Apa05] [Mar01,] en comparación con otros algoritmos desarrollados.

6.2. Resultados del algoritmo de cruces por cero

6.2.1. Resultados en identificación

Para analizar el rendimiento del sistema trabajando con el algoritmo de cruces por cero en modo de identificación o reconocimiento de usuarios, se trabaja sobre la base de datos GBTNI I. Para este proceso, se hace uso de varias distancias, tal y como se describió en el anterior capítulo. En el proyecto de David de Martín Roche, se hace uso de estas distancias a las que se hace referencia (Hamming y distancia euclídea) y además se describe y hace uso de dos distancias específicas denominadas distancia de Boles (1) modificada y distancia de Boles (2) modificada. Estas dos distancias vienen definidas en el artículo de Tieng y Boles titulado “Recognition of 2D Object Contours Using the Wavelet Transform Zero-Crossing Representation” [Tie97], por lo que se remite a este artículo para mayor definición de estas. Como se observará en esta tabla de resultados, estas dos últimas distancias no presentan mejoras en el rendimiento del sistema, y al suponer mayor cantidad de cálculos, si que suponen un incremento en el tiempo de proceso del sistema.

Es por esto que en sucesivas mejoras de los algoritmos, solo se han tenido en cuenta, las distancias euclídea y de Hamming, siendo esta última la que mejores resultados presenta. Por otro lado la distancia euclídea, presenta la ventaja de la sencillez.

Los resultados presentados por el uso de las diferentes distancias, atendiendo igualmente al uso de algoritmos invariantes frente a la rotación o no se presentan en la siguiente tabla (los datos reflejados están referidos al tanto por ciento de aciertos):

Distancia	Invariancia frente a la rotación	
	Si	No
<i>Hamming</i>	72,3	97,9
<i>Euclídea</i>	72,3	93,6
<i>Boles (1)</i>	89,4	95,7
<i>Boles (2)</i>	70,2	-----

Tabla 6-1 Tabla de resultados del algoritmo de cruces por cero en proceso de identificación.

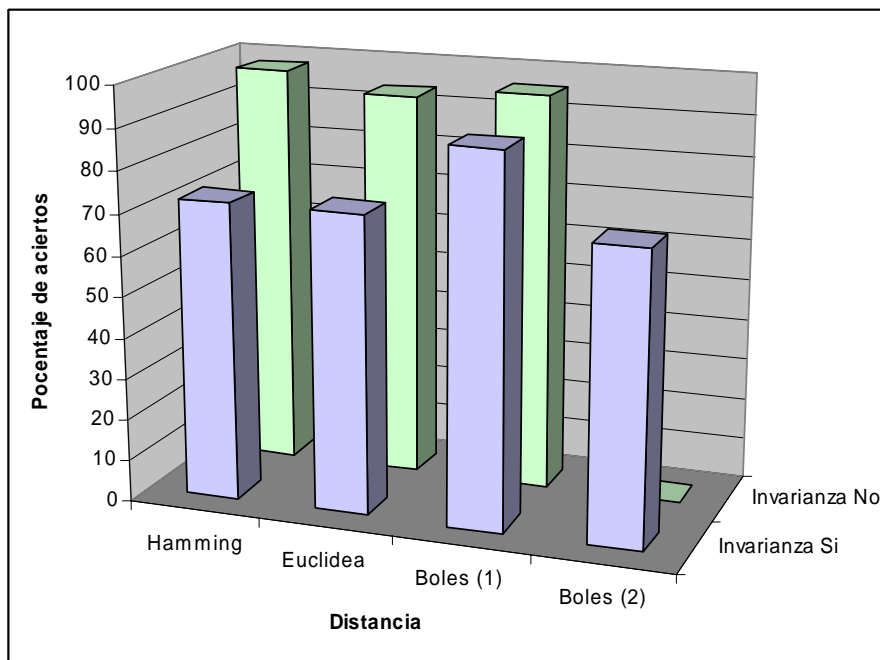


Figura 6-1 Gráfica comparativa de resultados del algoritmo de cruces por cero en proceso de identificación.

Como se puede observar, los resultados obtenidos al aplicar los algoritmos de invariancia frente a la rotación, son peores, dado que en el algoritmo utilizado trata de ordenar la salida de la señal tras la extracción de características en base al máximo de esta, por lo que, las representaciones de cruces por cero resultantes son muy parecidas entre sí, más aun al adaptarlas para que sirvan como entrada a la distancia de Hamming binaria.

La distancia de Hamming binaria, utilizada presenta un tiempo de ejecución de 18 segundos para llevar a cabo el cálculo de los patrones de las 47 muestras que componen la base de datos, de modo que son necesarios alrededor de 0,383 segundos para llevar a cabo la comparación de cada uno de los iris con el patrón desconocido.

Por otro lado la distancia euclídea presenta un tiempo de comparación por iris de aproximadamente un segundo, por lo que se incrementa de manera significativa el tiempo utilizado en la distancia Hamming que tan solo ha de realizar una simple operación XOR.

La distancia de Boles (1) modificada, presenta una carga de cálculo mucho mayor al hacer uso de operaciones más complicadas con todos los cruces por cero de la señal. Los tiempos rondan alrededor de los 5-6 segundos por comparación. Por otro lado los resultados obtenidos han sido muy buenos, lo que ya aseguraba Boles (referencia).

En la versión (2) de la distancia de Boles modificada, es necesario el uso del algoritmo frente a la rotación, ya que se hace necesario reordenar la señal para conseguir un número de cruces por cero par, razón por la cual no se presentan los datos sin algoritmo de invariancia. Para llevar a cabo el proceso, se han usado 3,3 segundos por comparación, tiempo menor que en la anterior versión debido principalmente a que no se hace necesario utilizar toda la señal sino únicamente los puntos en los que se encuentran los cruces por cero. Sin embargo el tiempo sigue siendo elevado, dado que el algoritmo de eliminación de falsos cruces por cero consume tiempo de proceso, y que el número de cruces por cero es bastante elevado.

Distancia	Tiempo de proceso (seg. por comparación)
<i>Hamming</i>	0,383
<i>Euclídea</i>	~1
<i>Boles (1)</i>	5-6
<i>Boles (2)</i>	3,3

Tabla 6-2 Tabla de tiempos del algoritmo de cruces por cero en proceso de identificación.

Como comentario, cabe resaltar que la distancia que mejores resultados ha dado, es la distancia de Hamming, curiosamente la más sencilla de implementar.

Finalmente si comparamos los resultados con los obtenidos mediante el método definido por R. Sánchez [Liu05] [San00] [San05], que hace uso de filtros de Gabor, vemos que se obtenía para este método una tasa de éxito del 98,3%, haciendo uso de la distancia de Hamming en el proceso de comparación, que aunque es una tasa un poco mayor, requería unos tiempos de cálculo ligeramente superiores.

6.2.2. Resultados en verificación

Para llevar a cabo el proceso de verificación o autenticación del usuario mediante el algoritmo de cruces por cero, se ha usado tan solo la distancia de Hamming en el proceso de comparación, dado que ha sido esta la que mejores resultados ha dado en el proceso de identificación.

En este caso los tiempos de ejecución han estado en torno a los 0,2 segundos, unos tiempos muy buenos para una aplicación de este tipo.

Respecto a las tasas obtenidas que permiten medir las prestaciones del sistema, se han obtenido los resultados que se muestran en la siguiente tabla. Para presentar estos resultados, hay que detallar que el proceso completo, incluye la verificación de 10 modelos contra la base de datos GBTNI I, que contiene 47 muestras, realizada con cada uno de los umbrales detallados.

Umbral	15	20	25	30	31	32	33	34	35	40
FRR	6,2%	3,4%	2,6%	0,43%	0,43%	0,21%	0,21%	0,21%	0,21%	0,0%
FAR	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,21%	2,6%
Tiempo(s)	99	115	121	98	98	98	110	110	95	98

Tabla 6-3 Tabla de resultados del algoritmo de cruces por cero en proceso de verificación.

Como se observa en la tabla el valor EER es de 0,21%, porcentaje para el cual ambos valores, FRR y FAR, son iguales. Este caso se obtiene para un valor del umbral de 35.

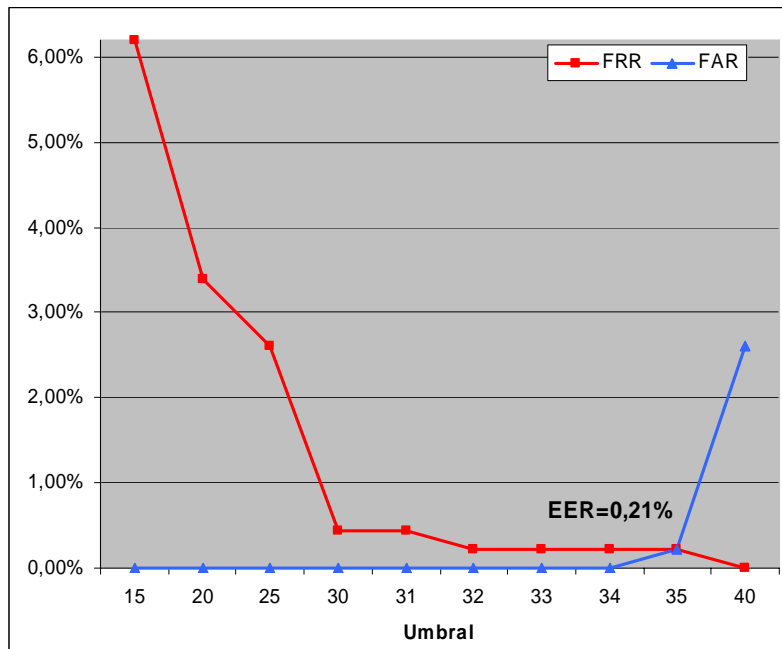


Figura 6-2 Gráfica comparativa de resultados del algoritmo de cruces por cero en proceso de verificación.

Para concluir el análisis del uso del algoritmo de cruces por cero, podemos determinar que los umbrales 33 y 34 que presentan una FAR nula, lo que indica que el sistema no permitirá en ningún caso el acceso de un usuario que no esté registrado en la base de datos, lo que permite su uso en entornos con necesidades de seguridad muy altas. Asimismo la tasa de FRR, es muy baja, tan sólo del 0,21%, lo que supondría un rechazo equivocado a un usuario legítimo cada 500 usos aproximadamente.

Si comparamos nuevamente los resultados obtenidos con los mostrados en [Liu05] [San00] [San05], basado en filtros de Gabor, se observa que el algoritmo de cruces por cero es superior en cuanto a prestaciones, dado que además de ser más rápido, en el caso de los filtros de Gabor se obtuvo un EER=5% y un valor de FAR nula para un FFR del 15%.

6.3. Resultado del algoritmo de módulos

6.3.1. Resultados en identificación

Como ya se hiciera con el anterior algoritmo, en este se trabaja a partir de la base de datos GBTNI I, lo que supone en este caso 52 imágenes, ya que se añadieron algunas muestras nuevas a la base de datos original descrita en el capítulo 4.

Sin embargo dado que en el anterior apartado se comprobó que haciendo uso de las distancias de Boles modificadas, se obtenían menores prestaciones, en este caso, tan solo se estudiarán los casos de uso de las distancias de Hamming y euclídea. Los resultados obtenidos se reflejan en la siguiente tabla:

Distancia	Invariancia frente a la rotación	
	Si	No
<i>Hamming</i>	98,1	98,1
<i>Euclídea</i>	78,8	92,3

Tabla 6-4 Tabla de resultados del algoritmo de módulos en proceso de identificación.

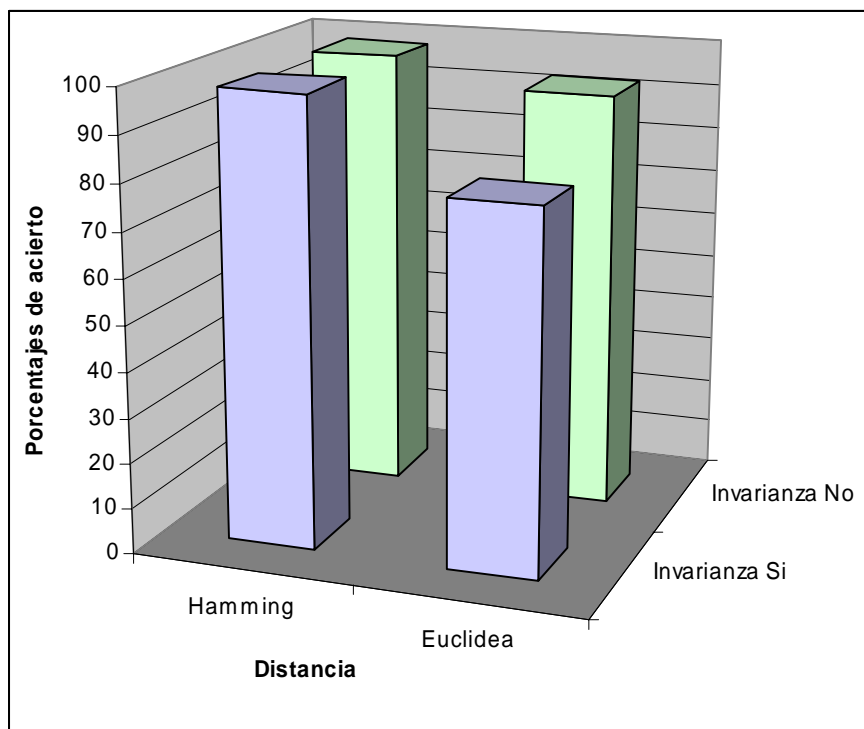


Figura 6-3 Gráfica comparativa de resultados del algoritmo de módulos en proceso de identificación.

Como se puede derivar de estos resultados, la utilización de la distancia de Hamming ha ofrecido mejores resultados que la distancia euclídea.

En este proceso, el algoritmo de invariancia frente a la rotación consiste en el cálculo del grado que forma la recta que une los centros del iris y la pupila, con una recta que corta la imagen por el centro, que posteriormente se almacena junto a los datos del usuario, para hacer uso de este dato en caso de que no coincida al tomar nuevas muestras, rotando la imagen el ángulo necesario. Para la obtención de los porcentajes de acierto, se calculó la distancia de Hamming para las tres escalas utilizadas en cada imagen, tomándose como distancia final la media de las tres.

Al considerar la invariancia frente a la rotación a la hora de tomar las muestras del iris del individuo, y realizar el reconocimiento con la distancia de Hamming, para las 52 comparaciones se empleó un total de 33 segundos aproximadamente, lo que equivale a un tiempo de 0,63 segundos por comparación.

En el caso de la distancia Hamming, sin el proceso de invariancia frente a la rotación, los tiempos empleados para realizar el reconocimiento en este caso, fueron algo superiores, ya que el proceso se llevó a cabo en aproximadamente 28 segundos, por lo que al hacer uso de 52 muestras el tiempo por muestra es de 0,54 segundos.

La utilización de la distancia euclídea en lugar de la distancia de Hamming para usar el sistema de identificación en modo de reconocimiento, ofrece a la vista de los resultados, prestaciones algo más bajas.

Cuando fue utilizada la distancia euclídea y las muestras tomadas, haciendo uso de los algoritmos con invariancia frente a la rotación, se obtuvieron los peores resultados de todos los observados, en cuanto a tasa de acierto. El tiempo empleado en el proceso, para comparar las 52 muestras, variaba entre los 10 y los 11 segundos, lo que supone un tiempo medio por comparación de aproximadamente 0,2 segundos. Con la distancia Euclídea las comparaciones son más rápidas al no tener que adaptar la señal, ya que no es necesario convertir los módulos de las transformadas de la firma de iris en valores binarios.

En el caso del uso del proceso sin aplicar el método de invariancia frente a la rotación, los tiempos empleados para realizar cada una de las comparaciones son prácticamente idénticos a los indicados en el caso anterior.

En la siguiente tabla se resumen los tiempos de proceso de los distintos casos:

Distancia	Invariancia frente a la rotación	
	Si	No
<i>Hamming</i>	33 s – 0,63 s/modelo	28 s – 0,54 s/modelo
<i>Euclídea</i>	10-11 s – 0,2 s/modelo	10-11 s – 0,2 s/modelo

Tabla 6-5 Tabla de tiempos del algoritmo de módulos en proceso de identificación.

Lo más destacable de estos resultados, son las buenas tasas de acierto obtenidos con la distancia de Hamming, tanteen los procesos invariantes como en los que no se hacía uso de este método. Los resultados obtenidos para la distancia Euclídea sin invariancia frente a la rotación del sistema también fueron bastante buenos sobre todo en los tiempos de proceso, aunque en cuanto a tasa de aciertos los porcentajes fueron menores.

6.3.2. Resultados en verificación

En el proceso de verificación mediante el uso del algoritmo de módulos, se trabajó igualmente con las 52 muestras de la base de datos GBTNI I modificada. Sin embargo y a diferencia del algoritmo de cruces por cero, si se ha hecho el estudio de la verificación para el uso de la distancia euclídea, en el proceso de comparación.

6.3.2.1. Resultados en verificación con distancia Hamming

Los resultados obtenidos para la distancia Hamming se muestran a continuación:

Distancia	Invariancia	FRR	FAR	EER	Valores umbral
Hamming	NO	0,38%	0,19%	0,38%	471-476
	SI	0,38%	0%	0,19%	487-491

Tabla 6-6 Tabla de resultados del algoritmo de módulos en proceso de verificación con distancia Hamming.

Como ya se mencionó anteriormente, la utilización de la distancia de Hamming ofrece los mejores resultados. En este caso, trabajando a partir de los algoritmos de módulos, en modo de verificación, es también con la distancia de Hamming con la que se obtienen las mejores tasas de error.

En la siguiente figura se observa el valor de FFR y FAR, para distintos valores del umbral de decisión, en el proceso sin invariancia frente a la rotación:

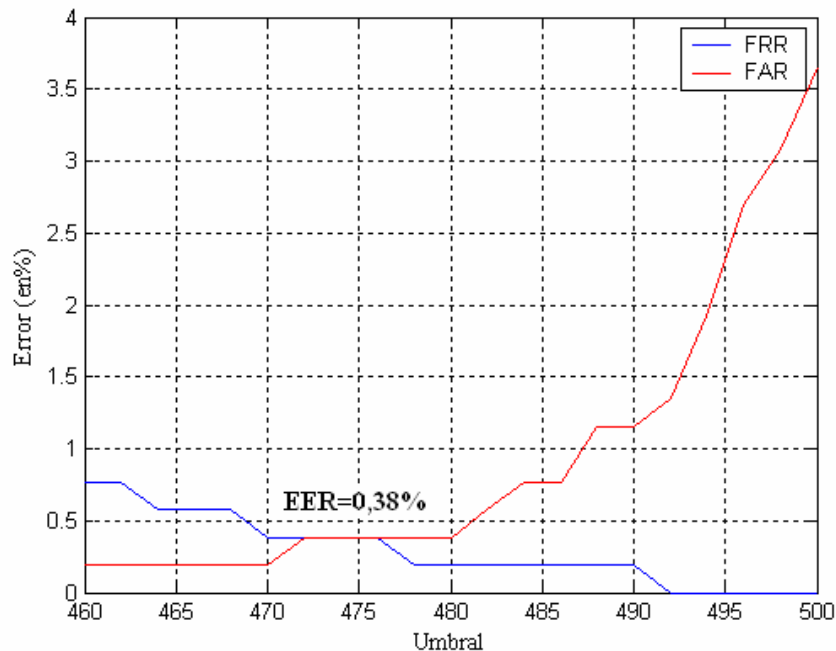


Figura 6-4 Resultados del algoritmo de módulos en proceso de verificación con distancia Hamming sin invariancia frente a la rotación.

En este caso, puede observarse, que el valor de la EER obtenido es igual a 0.38%. Esta ERR se consigue para los valores de umbral comprendidos entre 471 y 476, ambos incluidos. Sin embargo, observando con detenimiento la gráfica obtenida, podemos ver que para un umbral igual a 470 se tiene una FAR igual a 0.19% manteniéndose la FRR =0.38%. Este sería el valor de umbral para el cual se tendría un rendimiento óptimo en la autenticación de los usuarios, ya que este valor permitiría la utilización del sistema en entornos en los que fuese necesario cumplir requisitos de seguridad bastante estrictos.

En el proceso del sistema de reconocimiento de iris, que hace uso del algoritmo de módulos, lleva a cabo paralelamente, el cálculo de los tiempos, empleados en cada uno de las etapas del proceso completo. En la siguiente tabla se muestran los tiempos transcurridos durante el pre-procesado, la extracción de características, la adaptación de la señal 1-D, de manera que se obtienen los valores binarios de los módulos para calcular la distancia, y la comparación entre las muestras obtenidas y el patrón del usuario correspondiente, obtenido como promedio de cinco verificaciones distintas.

Etapa	Preprocesado	Extracción de características	Adaptación de la señal	Comparación	Total
Tiempo (seg.)	0,070	0,026	0,343	0,012	0,451

Tabla 6-7 Tiempos empleados en las diferentes etapas de la verificación con distancia Hamming sin invariancia frente a la rotación.

Por otro lado para este proceso se obtiene la siguiente figura:

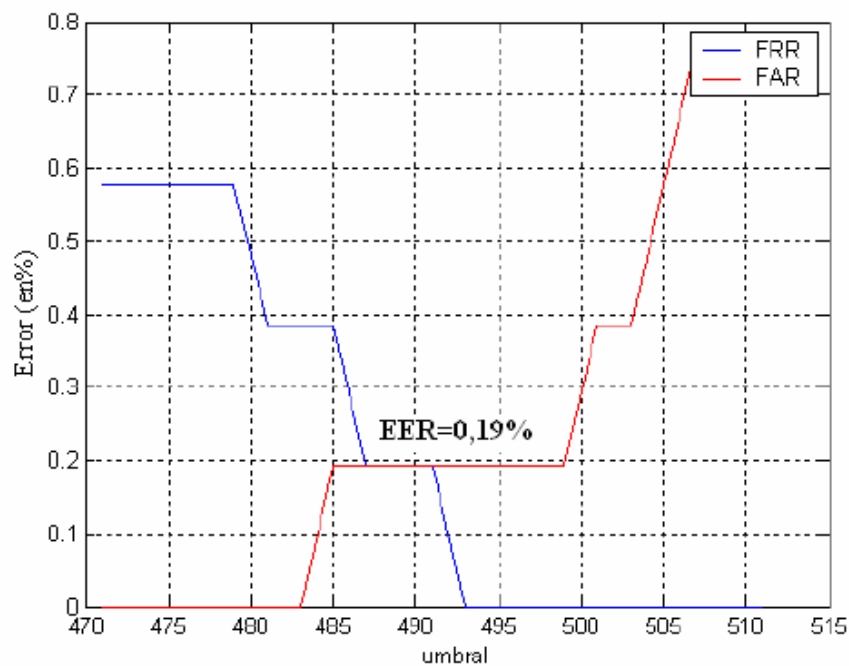


Figura 6-5 Resultados del algoritmo de módulos en proceso de verificación con distancia Hamming con invariancia frente a la rotación.

Sin duda a la vista de la gráfica los resultados son los mejores obtenidos en este proceso de verificación. Como se puede observar, para los umbrales comprendidos entre 487 y 491, ambos incluidos, se tiene una tasa EER=0,19%. Además, si se utiliza el valor de umbral 482, se consigue tener una FAR nula, siendo FRR=0.38%, resultado que demuestra que el sistema podría ser utilizado en entornos en los que altos niveles de seguridad.

En este caso, los tiempos de cálculo empleados por la aplicación para realizar la verificación, detallando cada una de las etapas se recogen y resumen en la siguiente tabla.

Etapa	Preprocesado	Extracción de características	Adaptación de la señal	Comparación	Total
Tiempo (seg.)	0,066	0,024	0,305	0,010	0,405

Tabla 6-8 Tiempos empleados en las diferentes etapas de la verificación con distancia Hamming con invariancia frente a la rotación.

Ya se comentó en el modo de funcionamiento de reconocimiento, que con la distancia de Hamming con invariancia frente a la rotación, se observaba una mejora en los resultados.

6.3.2.2. Resultados en verificación con distancia euclídea

Los resultados conseguidos en Autenticación con la distancia euclídea no fueron tan buenos como los ya mostrados para la distancia de Hamming, al igual que sucedía cuando el sistema se encontraba trabajando en modo Reconocimiento.

Distancia	Invariancia	FRR	FAR	EER	Valores umbral
<i>Euclídea</i>	NO	----	----	3,27%	10,2
	SI			6,54%	7,9

Tabla 6-9 Tabla de resultados del algoritmo de módulos en proceso de verificación con distancia euclídea.

En la siguiente figura se observa el valor de FFR y FAR, para distintos valores del umbral de decisión, en el proceso sin invariancia frente a la rotación:

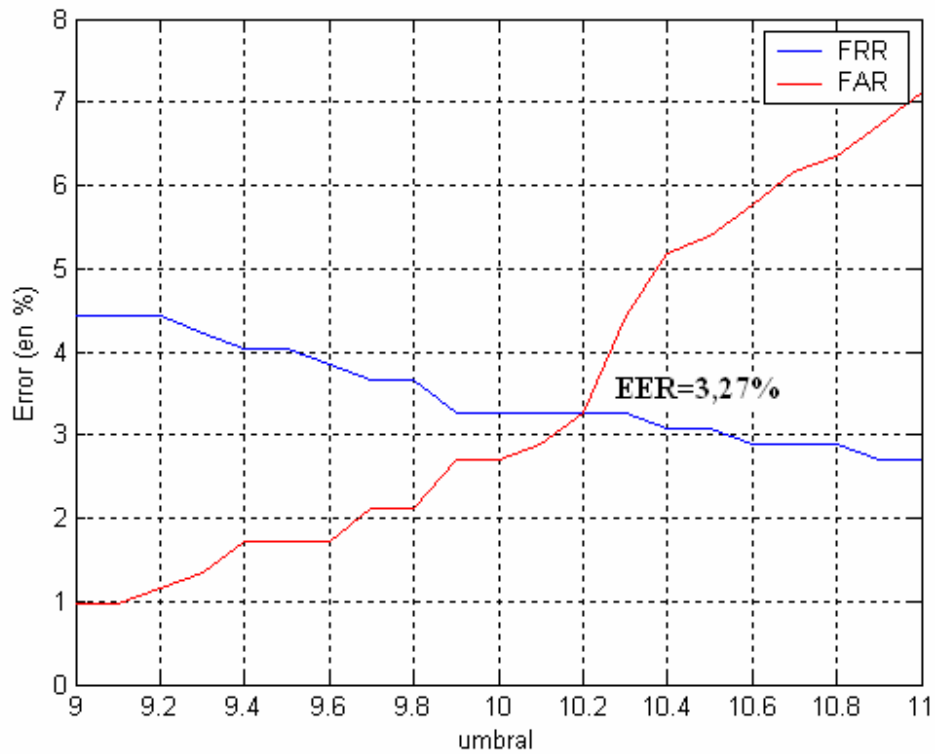


Figura 6-6 Resultados en verificación con distancia Euclídea sin invariancia frente a la rotación.

Como puede verse en esta figura, el valor de la EER es bastante más elevado que el obtenido con la utilización de Hamming, ya que se obtiene un valor de 3,27 %, para un umbral de 10,2.

Igualmente, en la siguiente tabla, pueden verse los tiempos empleados, en cada una de las etapas que forman el sistema, para llevar a cabo este proceso. Se comprueba que el tiempo total empleado en realizar la verificación en el caso de utilizar la distancia euclídea es menor que el empleado al usar la distancia de Hamming. El motivo es claro, ya que en este caso no es necesario adaptar la señal 1-D para que tome valores binarios, porque la distancia se calcula directamente empleando los valores de los máximos en módulo previamente obtenidos. Los tiempos que se muestran a continuación suponen la media de 5 comparaciones distintas llevadas a cabo en las mismas condiciones.

Etapas	Preprocesado	Extracción de características	Comparación	Total
Tiempo (seg.)	0,068	0,028	0,014	0,110

Tabla 6-10 Tiempos empleados en las diferentes etapas de la verificación con distancia euclídea sin invariancia frente a la rotación.

Al trabajar con la distancia euclídea, pero empleando el método de invariancia frente a la rotación, ofrecía los peores resultados de todas las técnicas empleadas, en cuanto a tasas de error, tal y como se observa en la siguiente figura.

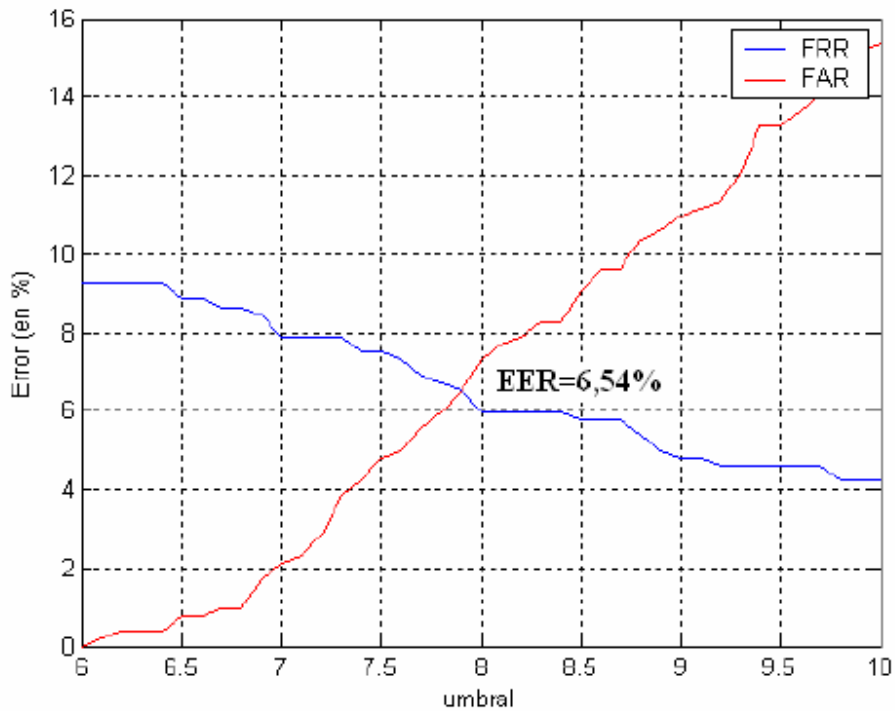


Figura 6-7 Resultados en verificación con distancia Euclídea con invariancia frente a la rotación.

En este caso se repite la misma situación, que en el caso anterior. Al observar la figura, comprobamos que el valor de la tasa ERR encontrado es mayor que en los procesos que hacían uso de la distancia Hamming. La tasa de error EER hallada en este caso, es de 6,54% para un umbral igual a 7,9.

Por otro lado, en la siguiente tabla se resumen los tiempos transcurridos en las diferentes etapas del sistema durante este proceso de verificación, utilizando distancia euclídea y con invariancia frente a la rotación.

Etapa	Preprocesado	Extracción de características	Comparación	Total
Tiempo (seg.)	0,064	0,026	0,010	0,100

Tabla 6-11 Tiempos empleados en las diferentes etapas de la verificación con distancia euclídea, con invariancia frente a la rotación.

A la vista de los resultados obtenidos en este caso de uso de distancia euclídea, se observa que los rendimientos en cuanto a tasas de error son netamente inferiores, lo que indicaría que sería conveniente hacer uso de la distancia Hamming, incluso a pesar de los peores resultados temporales, porque aunque en el caso de la distancia euclídea los tiempos son cuatro veces menores, debido principalmente a la etapa de adaptación de la señal, el objetivo de un sistema de seguridad es sin duda el de procurar los menores errores posible con las más altas prestaciones, y dado que aunque mayores, los tiempos de proceso de la distancia Hamming no llegan al segundo, es conveniente el uso de esta distancia en el

proceso de comparación, como ya se destacó en el anterior proceso que hacía uso de la distancia Hamming.

6.4. Estudio y comparativa de diferentes algoritmos

6.4.1. Algoritmo de filtros de Gabor

Como ya se mencionó con anterioridad, se han realizado diferentes trabajos, acerca de posibles algoritmos, que puedan ser utilizados en un sistema de reconocimiento de iris.

En este sentido uno de los trabajos que aportan una visión diferente a la mostrada en este proyecto, es el realizado por Raúl Sánchez Reillo, en su tesis doctoral “*Mecanismos de autenticación biométrica mediante tarjeta inteligente*” [Rei00], en la que se desarrolla, un algoritmo basado en el uso de filtros de Gabor, que se describe en mayor profundidad en la referencia [San03]. Los resultados que se aportan de este estudio, en base al uso de estos algoritmos, y la utilización de la distancia Hamming en la etapa de comparación, son los siguientes:

- *Resultados en identificación:* Se hicieron diferentes pruebas con filtros de Gabor, utilizando tres longitudes diferentes de los vectores de características (256, 992 y 1860 bits), para los cuales se consiguen los siguientes resultados:

Longitud del patrón	Porcentaje de éxito
256 bits	94,7%
992 bits	98,3%
1860 bits	98,4%

Tabla 6-12 Tabla de resultado de los procesos de identificación mediante uso de filtros de Gabor.

- *Resultados en verificación:* Igualmente para las diferentes longitudes del patrón de características se lleva a cabo el proceso de verificación obteniéndose los resultados que se adjuntan a continuación, y que también se pueden observar en la gráfica conjunta:




Longitud del patrón	Color	FAR → FRR	EER	Valor umbral
256 bits		0% 16%	7,5%	0,39
992 bits		0% 12,5%	5%	0,4125
1860 bits		0% 3,5%	3,5%	0,4325

Tabla 6-13 Tabla de resultado de los procesos de verificación mediante uso de filtros de Gabor.

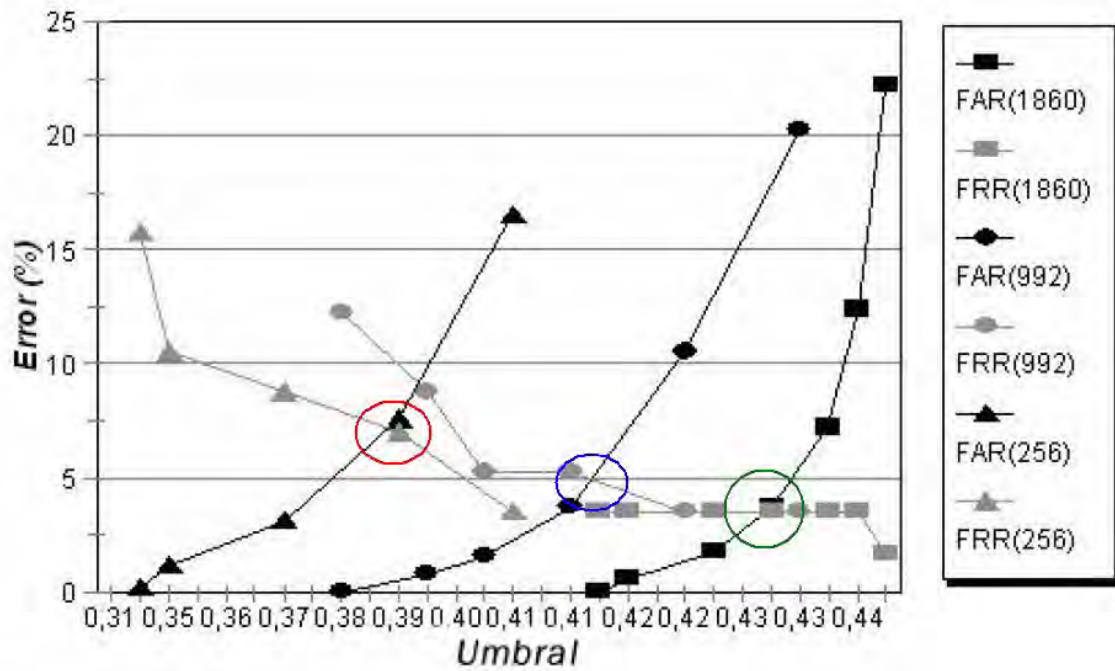


Figura 6-8 Resultado de los procesos de verificación mediante uso de filtros de Gabor.

En esta misma referencia [San03], también se pueden consultar algunos datos relativos al uso del algoritmo de cruces por cero haciendo uso de las distancias Hamming, euclídea, y una distancia denominada D_z , que se corresponde con la distancia de Boles (2) modificada, citada anteriormente.

A modo de resumen, en estos casos los datos resultantes son para el proceso de identificación:

Distancia	Porcentaje de éxito
Euclídea	96,2%
Hamming	100%
D_z (Boles (2) modificada)	95,8%

Tabla 6-14 Tabla de resultado de los procesos de identificación mediante uso de filtros de cruces por cero.

Y para el proceso de verificación:

Distancia	Color	FAR → FRR		EER	Valor umbral
Euclídea		0%	3,25%	2,5%	47
Hamming		0%	0,2%	0,12%	89
D_z (Boles (2) modificada)		1,5%	2,9%	2,1%	51

Tabla 6-15 Tabla de resultado de los procesos de verificación mediante uso de filtros de cruces por cero.

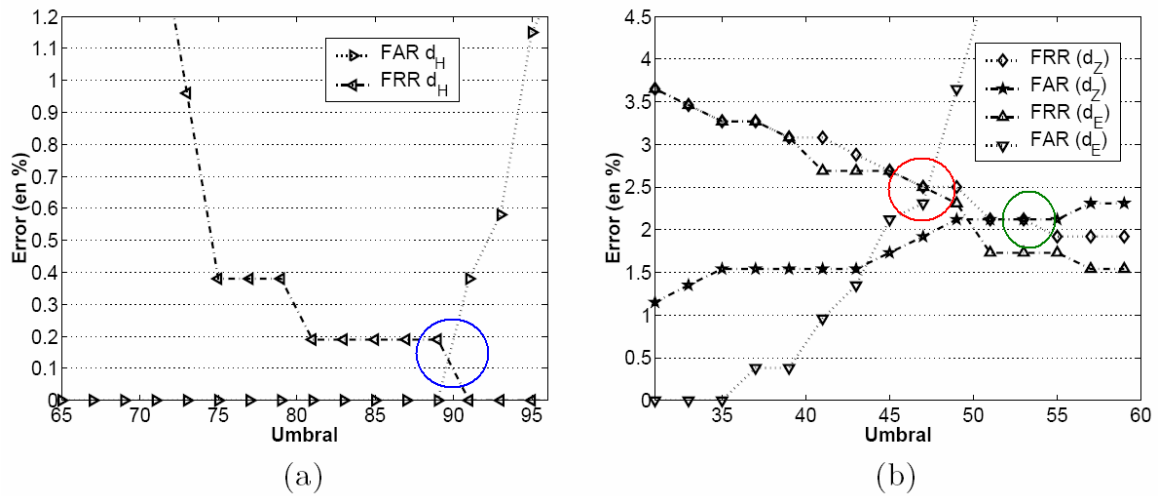


Figura 6-9 Resultado de los procesos de verificación mediante uso de cruces por cero.

Analizando los tiempos que se recogen en este estudio, teniendo en cuenta que los procesos se llevaron a cabo utilizando un PC con un procesador trabajando a 500 MHz, y haciendo uso de vectores de características de 1860 bits, obtenemos para ambos algoritmos los siguientes tiempos medios:

Algoritmo	Extracción de características	Comparación	Total
<i>Filtros de Gabor</i>	646,8 ms.	3,6 ms.	650,5 ms.
<i>Cruces por cero</i>	229,5 ms.	2,3 ms.	231,8 ms.

Tabla 6-16 Tiempos empleados en los diferentes algoritmos de verificación.

En este caso la etapa de tiempo denominada de extracción de características, comprende desde la imagen de entrada con su tratamiento de preprocesado, hasta la extracción del patrón de características de la imagen inicial. En ambos casos se hizo uso de la distancia Hamming, que es a la vista de todos los resultados obtenidos, la más apropiada para su uso en este tipo de sistemas.

Como puede comprobarse, el sistema basado en la representación a varias escalas de los cruces por cero de la firma del iris consume menos tiempo que el sistema basado en la

utilización de filtros de Gabor (para un vector de 1860 bits) con la ventaja adicional de obtener resultados óptimos.

Para una mayor información acerca de estos procesos, es conveniente consultar las referencias [San03] [San05]

6.4.2. Estudio comparativo de diferentes algoritmos

Es posible también encontrar otros estudios que tratan de llevar a cabo comparaciones de los algoritmos desarrollados por diferentes autores, determinando los resultados de uso de estos en diferentes entornos, en este caso determinados por las bases de datos utilizadas. En este caso el artículo “Comparison of Iris Recognition Algorithms” [Vat04], hace una comparativa de los resultados obtenidos, tras llevar a cabo los procesos de identificación y reconocimiento haciendo uso de la base de datos CASIA, a la que se hizo referencia y se describió en profundidad en el cuarto capítulo de este proyecto.

En este artículo se llevan a cabo comparaciones de 4 algoritmos diferentes, los cuales se podría determinar, que son los algoritmos de referencia en la actualidad, aunque no se puede olvidar que algunos otros autores como Wildes, o Boles. Estos son los algoritmos de los siguientes autores: Carmen Sánchez Ávila, Raúl Sánchez Reillo y David de Martín Roche [San01]; Li Ma, Yunhong Wang y Tieniu Tan [Lim02] [Lim03]; Christel-Loïc Tisse, Lionel Martin, Lionel Torres y Michel Robert [Tis02]; y John Daugman [Dau01]. Para definir de manera más específica el nombre de cada algoritmo, se hace uso de los siguientes nombres: Avila (1), Li Ma (2), Tisse (3) y Daugman (4).

Antes de pasar a ver los resultados obtenidos en base a cada algoritmo, es interesante repasar, uno por uno, los algoritmos estudiados, con el fin de tener un mayor conocimiento de sus bases y fundamentos.

6.4.2.1. Algoritmos “Avila”

Sin duda de los cuatro algoritmos, este es del que más conocimiento tenemos, ya que se han comentado diversos aspectos de su funcionamiento a lo largo de anteriores momentos en esta memoria. Sin embargo en este apartado, se explica en más detalle el proceso que se lleva a cabo en cada una de las etapas de este sistema.

La idea principal del algoritmo es la de presentar, las características propias del iris, mediante aproximaciones, desde distintos niveles de resolución, basado en la transformada diádica wavelet discreta, y su representación de los cruces por cero.

La señal resultante unidimensional, se compara atendiendo al uso de las diferentes distancias, que se describen en capítulos anteriores de esta misma memoria. Antes de obtener esta señal se llevan a cabo el preprocesado de la imagen y la extracción de características, mediante procesos de tratamiento de imágenes.

En primer lugar la imagen obtenida, independientemente del método, que como ya se mencionó anteriormente, provenían de la base de datos CASIA [CASIA], se convierte a escala de grises (innecesario en este caso), para pasar después al proceso de tratamiento de la imagen, mediante el cual se obtienen como resultados, diversos datos de referencia de la imagen, como el centro del iris y los bordes exteriores e interiores del mismo. Una vez

obtenidos estos datos, toda la demás información de la imagen se suprime. Las etapas del proceso completo de preprocesado, se observan en la siguiente figura

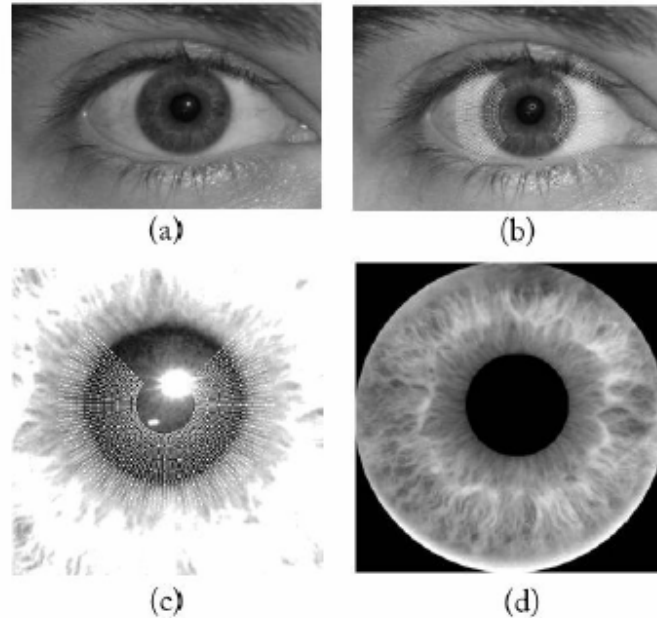


Figura 6-10 Etapas del proceso de preprocesado (a) Muestra del iris, (b) Detección de borde exterior, (c) Detección de borde interno y (d) Imagen del iris aislado.

Es importante detallar, que las dimensiones del iris resultante son escaladas, de modo que el diámetro se mantenga constante independientemente de la imagen original, de este modo se obtiene invariancia frente al escalado.

El siguiente paso consiste en mantener como punto de referencia el centroide de la pupila, de modo que, a partir de este se extraigan las características del iris, mediante la extracción de los valores de la escala de gris de diferentes puntos del iris contenidos en un círculo virtual centrado en este punto de referencia, y de este modo crear una señal unidimensional de 256 bits, a la que nos referiremos como *firma del iris*.

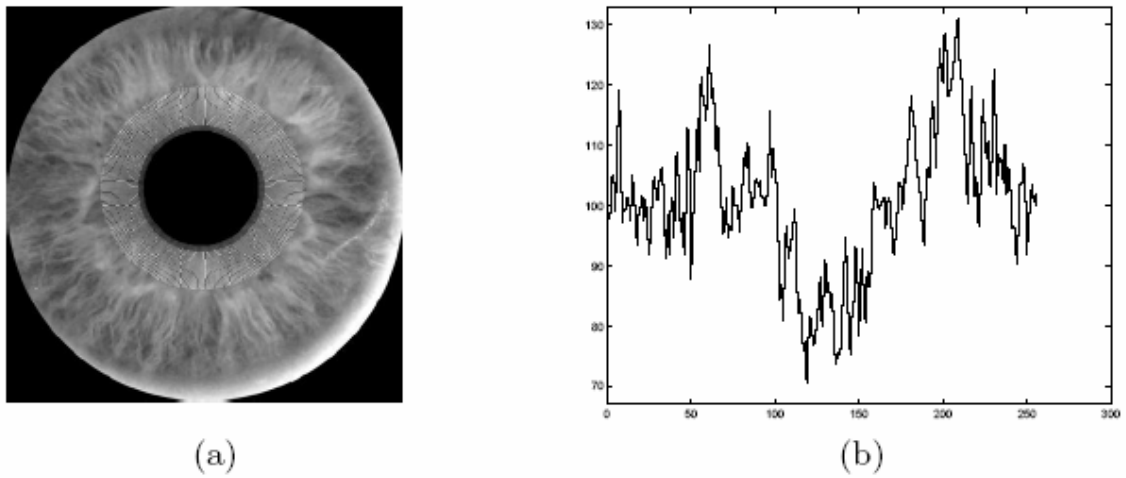


Figura 6-11(a) Región anular considerada para hallar la firma del iris que se muestra en (b).

Tras la obtención de esta señal, se pasa al proceso de extracción de características mediante el ya mencionado uso de la transformada diádica wavelet discreta, a distintas escalas, cuyo funcionamiento se detalla en el capítulo 5 de esta memoria.

En la etapa siguiente, se trata la firma de iris obtenida, mediante el uso de la transformada wavelet a 4 escalas diferentes, obteniendo los valores detallados de los cruces por cero de estas transformadas, y posteriormente registrando estos valores de cruce por cero, de manera que sea posible aplicar posteriormente la distancia binaria de Hamming al vector de características obtenido, definiendo para ello el código de la firma del iris como una secuencia binaria obtenida de la forma siguiente: para cada escala, se considera que el valor de esta secuencia binaria es 1 si el valor de la representación de cruces por cero de la firma del iris en esa escala es positivo o nulo, y es 0 en otro caso. En las siguientes figuras se puede observar en mayor detalle el proceso explicado.

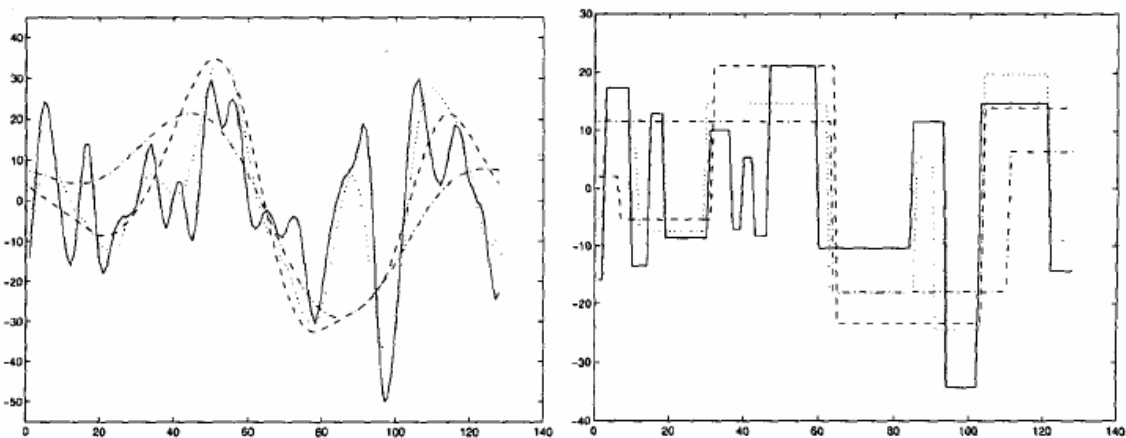


Figura 6-12 (a) Transformada wavelet diádica discreta (3 niveles de resolución, $3 < j < 5$) de la firma del 6.11 (b), y (b) representación multiescala de cruces por cero correspondiente.



Figura 6-13 Código de la firma del iris.

6.4.2.2. Algoritmos “Li Ma”

Este algoritmo consiste en tres grandes etapas: preprocesado de la imagen, extracción de características y diseño del clasificador (etapa de comparación). Sin embargo en este caso se hace uso de filtros circulares simétricos, con el fin de capturar características locales del iris, para formar un vector de características de longitud fija [Lim03] [Lim04]. El proceso de comparación del iris, se hace uso de una aproximación eficiente, denominada Nearest feature line (NFL) [Zli99] [Zon00], a la que se han añadido algunas restricciones sobre el método original, para mejorar las prestaciones que este método de clasificación de patrones puede aportar al sistema de reconocimiento de iris.

Como en el caso anterior el algoritmo de preprocesado de la imagen original, trata de evitar las partes no necesarias para llevar a cabo el proceso de reconocimiento de iris. Por esto, y para evitar otros factores como la iluminación no uniforme, o la variación en el escalado de la región del iris de un mismo usuario, es necesario llevar a cabo esta etapa.

Para lograr este objetivo, primeramente se localiza el iris siguiendo dos pasos. En primer lugar se localiza aproximadamente la región de interés tanto horizontal como verticalmente la imagen del iris, y seguidamente se utilizan métodos de detección de bordes y la transformada de Hough [Cha94] [Kes99] [Nib88], en la región aproximada anteriormente, para delimitarla correctamente.

Seguidamente se procede a la normalización del iris, ya que las deformaciones y variaciones producidas por el cambio de tamaño del iris de un mismo usuario, pueden afectar al resultado final del proceso. Para compensar estos cambios, se despliega, en sentido contrario a las agujas del reloj y de dentro hacia fuera del iris, el anillo formado por el iris, en un bloque rectangular de dimensiones fijas de 64x512 píxeles, mediante un mapeado lineal de las zonas del iris. De este modo, puede ser igualmente reducida, la distorsión producida por los cambios de tamaño de la pupila.

Finalmente y para acabar el preprocesado de la imagen, se procede a realzar y filtrar el ruido de la imagen rectangular, a partir de una estimación de la iluminación aproximada de la imagen, y utilizando para ello un estudio de las variaciones localizadas (en zonas de 16x16 píxeles), de la intensidad en la imagen. Esta estimación es seguidamente interpolada, para obtener una imagen como la original, mediante una interpolación bicúbica.

Para llevar a cabo el proceso de realce y limpieza de parte del ruido, se procede a una ecualización del histograma, eliminando a su vez los ruidos en frecuencias altas, mediante un filtrado de la imagen con un filtro paso bajo Gaussiano.

En las siguientes imágenes se puede observar el proceso completo de preprocesado de la imagen:

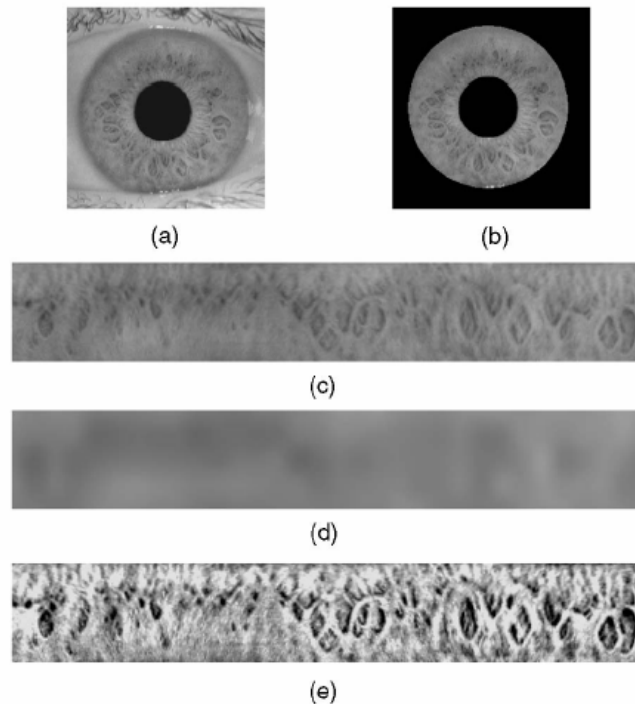


Figura 6-14 Preprocesado de la imagen (a) imagen original, (b) región de interés localizada (c) imagen normalizada (d) iluminación de fondo estimada y (e) imagen normalizada después del realce.

En la siguiente etapa, se extraen las características del bloque rectangular previamente obtenido, a partir de métodos que permitan capturar información local subyacente en el iris. Desde la visión del análisis de textura, los patrones espaciales de un iris incluyen información de su la orientación y la frecuencia. Dado que la orientación de las zonas del iris, pasa de ser radial en la imagen original, a vertical en el rectángulo obtenido, este aspecto parece ser menos relevante que las frecuencias, que ofrecen las diferentes zonas, de modo que el estudio de esta información de las frecuencias variables, permitirá reflejar en mayor medida la estructura local del iris.

Por tanto se diseña un banco de filtros, para obtener esta información en el dominio espacial, dado que los coeficientes de la imagen filtrada, permitirán obtener de manera efectiva la distribución de frecuencias de la imagen. Estos filtros se basan en una adaptación de los filtros de Gabor [Dau85] [Cla00] [Jai00] [Lee96] [Zha02], ya que estos filtros se modulan mediante funciones sinusoidales orientadas, mientras que los filtros utilizados en los sistemas, se modulan mediante funciones sinusoidales circulares simétricas. Se puede definir el núcleo de una de estos filtros como:

$$G(x, y, f) = \frac{1}{2\pi\delta_x\delta_y} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x^2}{\delta_x^2} + \frac{y^2}{\delta_y^2}\right)\right] M_i(x, y, f); i = 1, 2.$$

$$M_1(x, y, f) = \cos\left[2\pi f\left(\sqrt{x^2 + y^2}\right)\right]$$

$$M_2(x, y, f) = \cos\left[2\pi f(x\cos\theta + y\sin\theta)\right]$$
(6.1)

de modo que M_i representan las funciones de modulación que en el caso de los filtros de Gabor, se define como M_2 , y en el caso de los filtros simétricos se define como M_1 . Por otro lado, f representa la frecuencia, (δ_x, δ_y) se definen como constantes espaciales de la envoltura Gaussiana, tanto en el plano x como en el y , y cuyas desigualdades $(\delta_x \leq \delta_y, \delta_x = \delta_y, \delta_x \geq \delta_y)$, permiten obtener información más detallada de las orientaciones x e y , y la variable θ representa la orientación del filtro de Gabor.

En la siguiente figura se puede observar, las diferencias de los filtros de Gabor y los filtros diseñados.

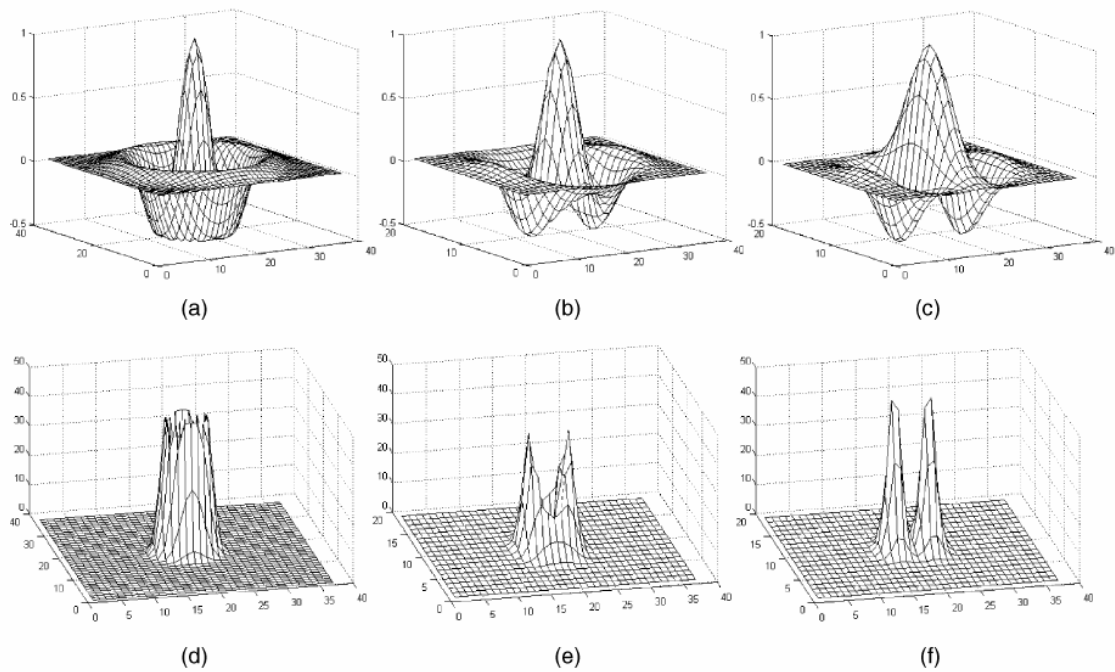


Figura 6-15 Respuesta de los filtros (a) filtro simétrico con $\delta_x = \delta_y$, (b) filtro simétricos con $\delta_x > \delta_y$ y (c) filtro de Gabor. (d), (e) y (f) son los espectros de Fourier de (a), (b) y (c), respectivamente.

El proceso de filtrado se lleva a cabo tan solo en la parte superior del rectángulo obtenido tras el preprocesado, en lo que se viene determinar ROI (Region Of Interest), dado que es esta la que mayor información contiene al ser la más cercana a la pupila, y evitando así de paso problemas tales como las pestañas o los párpados.

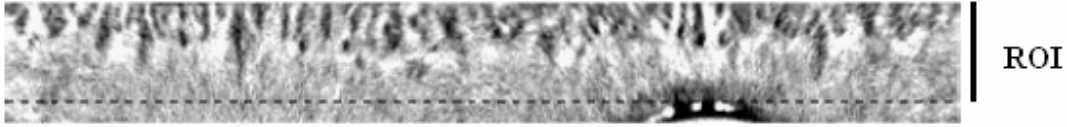


Figura 6-16 Región de Interés (Region Of Interest ROI).

Se definen dos canales diferentes para los filtros, en el primero $\delta_x = 3,5$ y $\delta_y = 1,5$, y en el segundo $\delta_x = 4,5$ y $\delta_y = 1,5$. Tras pasar las ROI por los filtros definidos, se obtiene la siguiente salida:

$$F_i(x, y) = \iint I(x_1, y_1) G_i(x - x_1, y - y_1) dx_1 dy_1; \quad i = 1, 2. \quad (6.2)$$

donde G_i determina el canal i que se utiliza en el filtro, $I(x_1, y_1)$ es la ROI de la imagen y $F_i(x, y)$ es la imagen filtrada.

Tras obtener estas dos imágenes filtradas, se extraen rasgos estadísticos de bloques de 8x8 píxeles, de cada una de ellas, por lo que se extraen un total de 768 bloques $((48 \times 512) / (8 \times 8) \times 2)$. De este modo se obtiene de cada uno de estos bloques 2 valores, obteniendo así un total de 1536 valores, de los cuales la mitad corresponden al valor medio m de cada uno de los bloques extraídos, y la otra mitad a los valores de la desviación media absoluta σ de estos mismos bloques.

$$m = \frac{1}{n} \sum_w |F_i(x, y)|; \quad \sigma = \frac{1}{n} \sum_w \left| |F_i(x, y)| - m \right| \quad (6.3)$$

donde w es cada uno de los bloques de 8x8 en las imágenes filtradas, n el número de píxeles de cada una de los bloques w , y m el valor medio de el bloque concreto.

Todos los datos de este estudio estadístico se recogen en un vector de características de de longitud 1536 de la siguiente forma:

$$V = [m_1, \sigma_1, m_2, \sigma_2, \dots, m_{768}, \sigma_{768}]^T \quad (6.4)$$

En la última etapa, y para poder realizar la correspondencia de iris, se procede en primer lugar a procesar este vector mediante una función lineal discriminante de Fisher [Bel97] [Liu02], con el fin de reducir la longitud del vector, mejorando así la eficiencia computacional del proceso.

Como último paso, se procede a la clasificación mediante el algoritmo NFL antes mencionado, y cuyo proceso se puede ver detallado en [Zli99] [Zon00].

Cabe destacar que este método lleva a cabo un proceso invariante frente a la traslación y el escalado, mediante la normalización que se lleva a cabo en la etapa de preprocesado. Igualmente se puede obtener una aproximación válida que permita protegerlo frente a la rotación posible del iris, admitiendo que la rotación puede oscilar entre -9 y 9 grados, entre los cuales se pueden obtener 7 vectores diferentes (-9,-6,-3,0,3,6,9), realizando después el estudio de estos, y aproximando la distancia de comparación, al valor mínimo obtenido entre las 7.

6.4.2.3. Algoritmos “Tisse”

El grupo francés, propone un sistema de reconocimiento de iris que se basa en el uso combinado de la transformada de Hough [Ben99] de gradiente descompuesto y otros operadores integro-diferenciales en la etapa de localización del iris (preprocesado), y en el posterior uso del concepto de “imagen analítica” desarrollado en base a la transformada en 2D de Hilbert [Hav97], para la etapa de adquisición de características de la textura del iris.

En este algoritmo podemos encontrar 4 etapas claramente diferenciadas: (1) localización del iris en la imagen, (2) transformación de cartesianas a polares de la imagen del iris, (3) extracción de rasgos locales y (4) comparación de patrones.

En la primera etapa, como ya se ha mencionado, se hace un uso combinado de operadores integro-diferenciales y de la transformada Hough, mediante el cual es posible evitar posibles errores en la localización de los límites de la pupila, que pueden suceder al utilizar únicamente los operadores integro-diferenciales en situaciones en las que aparezcan reflejos debido a fallos en la iluminación.

Este método consiste en el uso primeramente de una técnica de detección de bordes para aproximar la posición global del ojo en la imagen, obteniendo la referencia del centro de la pupila, para después procesar la imagen mediante los operadores diferenciales de modo que se calculen de manera más precisa tanto los límites de la pupila, como el centro y los límites del iris. En este sentido se hace uso de una variante de la transformada Hough, que permite aplicar este método a la detección de formas circulares. A partir de la ecuación simple de una circunferencia $(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = r^2$, siendo r el radio de la misma y el punto (x_0, y_0) su centro, se expresan este punto en función de sus dos componentes de primer orden del gradiente (G_x y G_y), como se muestra en la siguiente ecuación.

$$\begin{aligned} x_0 &= x \pm \frac{r}{\sqrt{1 + \frac{G_y^2}{G_x^2}}} \\ y_0 &= y \pm \frac{r}{\sqrt{1 + \frac{G_x^2}{G_y^2}}} \end{aligned} \tag{6.5}$$

Estos dos valores, se calculan durante el preprocesado de la imagen, de modo que el problema se reduce al incremento de ocurrencias de cada uno de los puntos registrados en dos acumuladores X_0 e Y_0 , y determinar el punto (x_0, y_0) donde aparece un máximo en estos acumuladores.

$$\begin{aligned} X_0(x_0) &= \sum_x \sum_y \sum_{r=r_{\min}}^{r_{\max}} \text{nbre.occurences}.x_0 \\ Y_0(y_0) &= \sum_x \sum_y \sum_{r=r_{\min}}^{r_{\max}} \text{nbre.occurences}.y_0 \end{aligned} \tag{6.6}$$

Para ello es necesario definir un umbral mínimo para los valores del gradiente, así como el tomar en consideración el signo de los mismos para evitar que el valor del centro calculado sea un punto fuera de la imagen.

La siguiente etapa consiste en la transformación cartesiana a polar de la referencia, propuesta inicialmente por John Daugman. De este modo y al igual que en el algoritmo anteriormente descrito se evitan posible errores debido al incremento del tamaño de la pupila o de cambios de escala en la imagen, así como de facilitar el uso de la información de frecuencias contenida en la zona circular del iris en el siguiente apartado de extracción de características. De este modo se evita también problema que supone el hecho de que las circunferencias de iris y pupila no sean concéntricas. A partir de este proceso, se hace una conversión de $I(x(\rho, \theta), y(\rho, \theta)) \rightarrow I(\rho, \theta)$, en base a las siguientes ecuaciones:

$$\begin{cases} x(\rho, \theta) = (1 - \rho) * x_p(\theta) + \rho * x_i(\theta) \\ y(\rho, \theta) = (1 - \rho) * y_p(\theta) + \rho * y_i(\theta) \end{cases}$$

$$\text{With: } \begin{cases} x_p(\theta) = x_{p0}(\theta) + r_p * \cos(\theta) \\ y_p(\theta) = y_{p0}(\theta) + r_p * \sin(\theta) \end{cases} \quad (6.7)$$

$$\begin{cases} x_i(\theta) = x_{i0}(\theta) + r_i * \cos(\theta) \\ y_i(\theta) = y_{i0}(\theta) + r_i * \sin(\theta) \end{cases}$$

donde r_p y r_i son los radios de la pupila y el iris y $(x_p(\theta), y_p(\theta))$ y $(x_i(\theta), y_i(\theta))$, los valores del centro de la pupila y el iris en la dirección θ .

De este modo queda definida la zona de interés para el proceso de la siguiente etapa, tal y como se observa en la siguiente figura:



Figura 6-17 Representación rectangular del iris según el algoritmo “Tisse”.

El siguiente paso consiste en la extracción de características, que se fundamenta en un nuevo concepto de la fase-instantánea y/o la frecuencia-emergente, basado en los trabajos de J. P. Havlicek [Hav97], acerca de la transformada Hilbert multidimensional.

En este proceso, que se puede ver en detalle desarrollado en [Tis02], se trabaja con una señal analítica, obtenida mediante la aplicación de la transformada Hilbert a la señal tras el preprocesado. Este concepto introducido por Gabor en 1946 [Gab46] [Gab53], permite determinar que para cualquier señal real, es posible determinar su señal compleja, a partir de la transformada Hilbert, tal y como resume la siguiente ecuación:

$$z_x(t) = x(t) + j.H \{x(t)\} \quad (6.8)$$

Los valores obtenidos de la fase-instantánea y la frecuencia-emergente, depende de la señal en su totalidad en tanto en cuanto la transformada Hilbert es de carácter global, obteniendo estos valores en cada una de las posiciones (ρ, θ) , de la imagen: Los valores de cada uno de estas dos variables quedan definidos en las siguientes ecuaciones:

$$\phi_i(\rho, \theta) = \arctan \frac{\text{Im}(z_i(\rho, \theta))}{\text{Re}(z_i(\rho, \theta))}; \quad |\Delta\phi Di(\rho, \theta)| = \arccos \left[\frac{z(\rho, \theta+1) + z(\rho, \theta-1)}{2z(\rho, \theta)} \right] \quad (6.9)$$

En base a la parte imaginaria de la primera variable, y la parte real de la segunda, es posible generar hasta nueve imágenes a partir de la imagen original. Tal y como se observa en la siguiente figura los resultados obtenidos a partir de la señal una vez preprocesada, son los que se muestran a continuación:

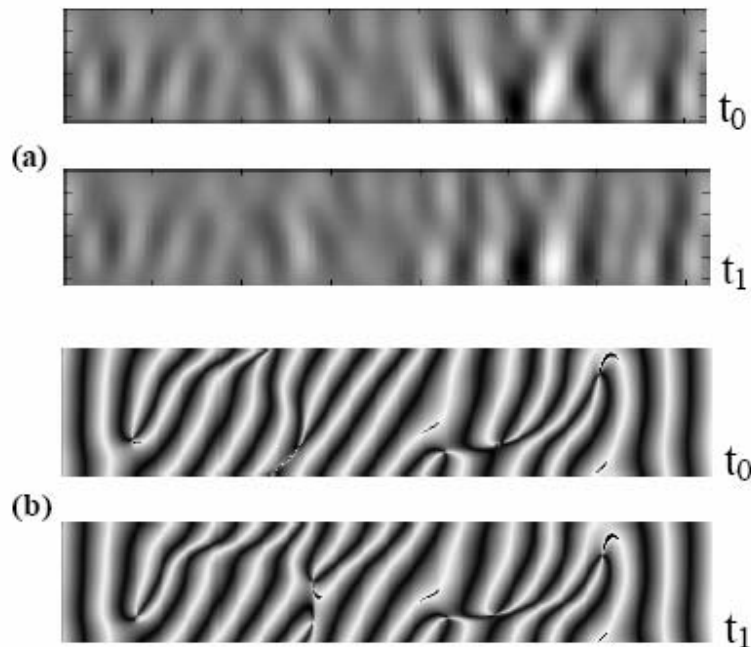


Figura 6-18 (a) Función de la fase instantánea, (b) Función de la frecuencia emergente.

Para evitar posible errores producidos por reflejos o por los parpados y pestañas, es conveniente trabajar a partir de zonas con menor riesgo de introducir ruido en la señal, tal y como se aprecia en la siguiente figura:

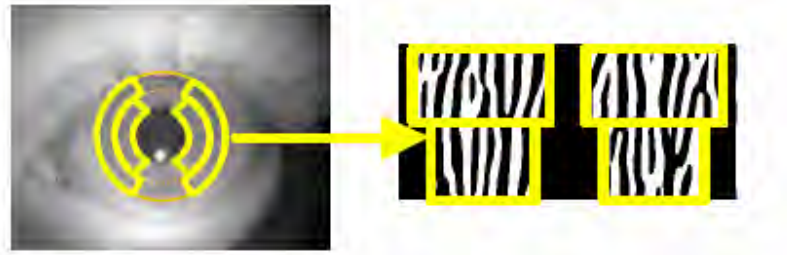


Figura 6-19 Generación del código de iris.

Trabajando a partir del código del iris de un usuario, en base a las imágenes obtenidas, es posible pasar a la etapa de comparación, que hace uso de la ya detallada distancia Hamming, pero en este caso trabajando con los valores de la imagen del código de iris generada.

6.4.2.4. Algoritmos “Daugman”

Sin duda alguna uno de los máximos exponentes en cuanto al desarrollo de sistemas de reconocimiento biométrico de iris, es John Daugman, cuyos innumerables trabajos, casi desde el comienzo del desarrollo de este tipo de sistemas, han supuesto sin lugar a dudas una referencia para los siguientes estudios. Pese a ser cronológicamente el primer desarrollo, puesto que en el estudio los resultados vienen determinados en cuarta posición, se ha preferido detallar este algoritmo en último lugar.

El sistema desarrollado por J. Daugman, sigue las directrices de cualquier sistema de este tipo, de modo que las diferencias en el funcionamiento, se basan como en otros casos, en los diferentes métodos de localización del iris, extracción de características y de métodos de comparación.

En el caso de este algoritmo, la etapa de aislamiento de la región de interés, esta propuesta define en primer lugar algunas de las condiciones fundamentales para la captura de la imagen del iris, aspecto que en este caso ya se ha detallado en anteriores apartados y que se puede consultar en [Dau01].

La estrategia de este algoritmo, es la de utilizar métodos de localización de los límites del iris que permitan obtener una elevada precisión, lo que determine con la mayor exactitud los centro del iris y la pupila, y sus radios respectivos. En este caso se hace uso del operador integro-diferencial que se adjunta a continuación:

$$\max_{(r,x_0,y_0)} \left| G\sigma(r) * \frac{\partial}{\partial r} \oint_{r,x_0,y_0} \frac{I(x,y)}{2\pi r} ds \right| \quad (6.10)$$

donde $I(x,y)$, determina la imagen de estudio y $G(r) = (1/\sqrt{2\pi}\sigma) e^{-((r-r_0)^2/2\sigma^2)}$, es una función suavizadora Gaussiana de escala σ .

Este operador, busca en toda la extensión de la imagen, un máximo de la derivada parcial, en relación al incremento del radio r , de la integral normalizada del contorno de $I(x,y)$, a lo largo de un arco ds , con radio r y centrado en el punto (x_0, y_0) . El símbolo $*$,

denota convolución. El operador completo tiene un efecto de detector de bordes circulares, que busca de manera iterativa los máximos de posibles contornos en radios incrementales y a escalas más finas.

Mediante este operador es posible encontrar tanto los límites internos del iris con la pupila, como los externos. Una vez hallados estos, es posible definir una línea de trabajo similar para determinar los bordes curvilíneos propios de los párpados. De este modo es posible determinar la zona de estudio tal y como se observa en la siguiente figura:

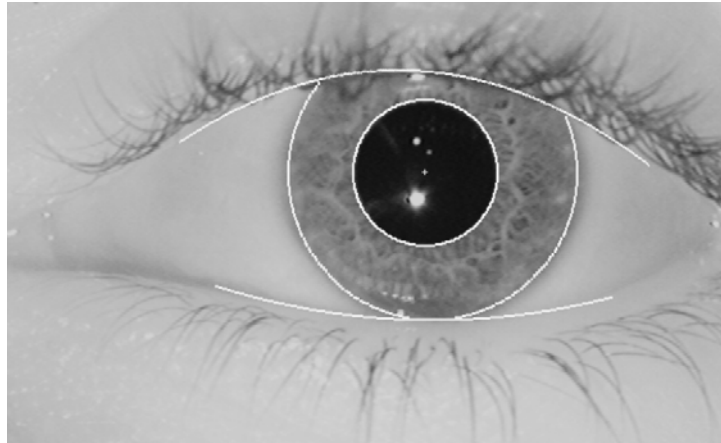


Figura 6-20 Delimitación de la zona de estudio a partir del algoritmo “Daugman”.

La siguiente etapa determina la extracción de características de esta región. Para lograr este objetivo, el patrón de iris aislado se remodula, para extraer su información de fase, usando wavelets 2D de Gabor en cuadratura. Este proceso se ilustra en la siguiente figura:

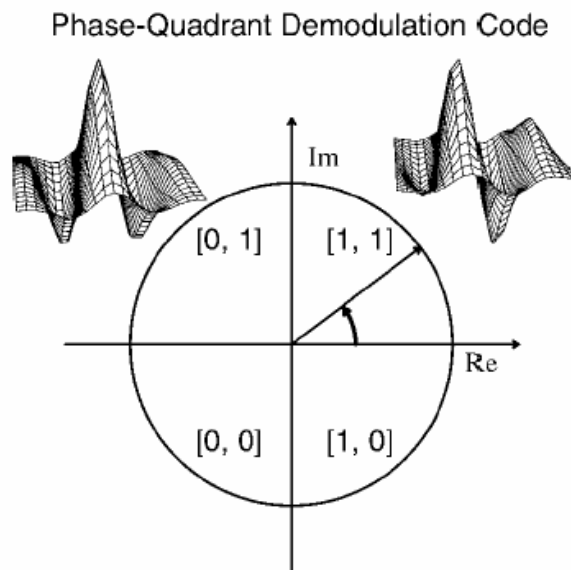


Figura 6-21 Proceso de modulación de la imagen del iris.

Este método supone una fase de cuantificación del patrón de iris, a través de la identificación del cuadrante del plano complejo al que pertenece cada valor, resultante de proyectar cada área de la imagen sobre la siguiente wavelet 2D de Gabor de valores complejos:

$$h_{\{Re,Im\}} = \text{sgn} \int_{\rho} \int_{\theta} I(\rho, \phi) e^{-iw(\theta_0 - \phi)} \times e^{-(r_0 - \rho)^2 / \alpha^2} e^{-(\theta_0 - \phi)^2 / \beta^2} \rho d\rho d\phi \quad (6.11)$$

donde $h_{\{Re,Im\}}$, puede considerarse, como un bit de valor complejo, cuya parte real e imaginaria pueden ser 1 ó 0, dependiendo del signo de la integral en 2D. En este caso $I(\rho, \phi)$, es la imagen en bruto del iris en un sistema de coordenadas polar, que es invariante tanto al cambio de escala como a la traslación. Otros aspectos de este operador se detallan en [Dau01].

Esta información compleja acerca del cuadrante se codifica en una secuencia de bits, que resulta en el *iriscode* propio de cada iris.

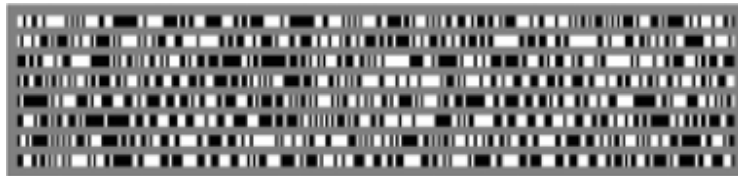


Figura 6-22 *Iriscode* generado tras la extracción de características del iris.

Esta secuencia, permite resolver la etapa de comparación mediante el uso de lo que se denomina “*test de independencia estadística*”, que de manera contraria a la habitual, de manera que si se comparan 2 códigos de distintos modelos de iris, el resultado sea positivo, mientras que 2 modelos iguales determinarían un fallo en el test.

Esta prueba se implementa mediante un simple operador booleano XOR \otimes , que se aplica a los dos vectores de cada iris a los que se les añade (AND \cap) una máscara, para prevenir la influencia de factores ajenos a la zona del iris tales como pestañas, reflejos y otros. De este modo mediante el uso entre dos códigos de iris de la fórmula:

$$HD = \frac{\|(\text{codeA} \otimes \text{codeB}) \cap \text{maskA} \cap \text{maskB}\|}{\|\text{maskA} \cap \text{maskB}\|} \quad (6.12)$$

es posible determinar una distancia Hamming fraccional, que evalúe la disimilaridad entre estos dos patrones.

Estos procedimientos detallados en mayor medida, así como otros aspectos relevantes en el desarrollo de un sistema biométrico de iris, se pueden observar en los diversos trabajos desarrollados por John Daugman [Dau00] [Dau01] [Dau01.2] [Dau02] [Dau03] [Dau03.2] [Dau04] [Dau85] [Dau92] [Dau93] [Dau94] [Dau95].

6.4.2.5. Resultados del estudio

Como ya se mencionó anteriormente el objetivo de desarrollar los diferentes algoritmos, tiene como fin comprender los resultados que se detallan en el artículo: “*Comparison of Iris Recognition Algorithms*” [Vat04], y que mediante el uso de la base de datos de iris CASIA [CASIA], lleva a cabo diversas pruebas para obtener los siguientes resultados:

Algoritmo	FAR/FRR	Precisión
Avila	0,03/2,08	97,89%
Li Ma	0,02/1,98	98%
Tisse	1,84/8,79	89,37%
Daugman	0,01/0,09	99,9%

Tabla 6-17 Resultados de los procesos llevados a cabo con los 4 algoritmos descritos.

Estos datos se reflejan en las siguientes gráficas, para poder observar mejor los resultados obtenidos:

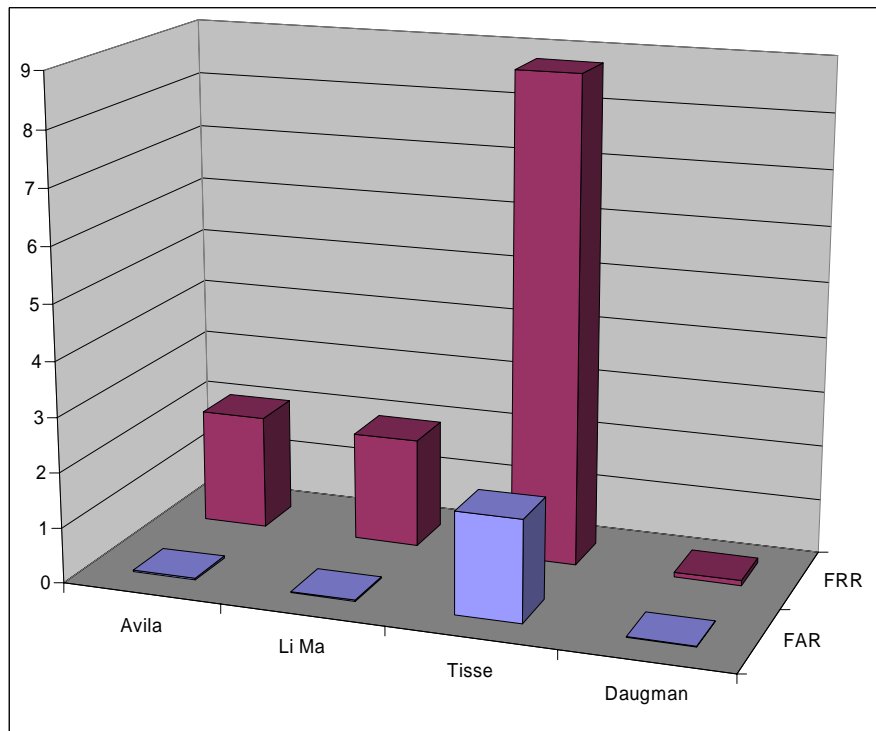


Figura 6-23 Gráfica comparativa de los resultados FAR/FRR de los 4 algoritmos.

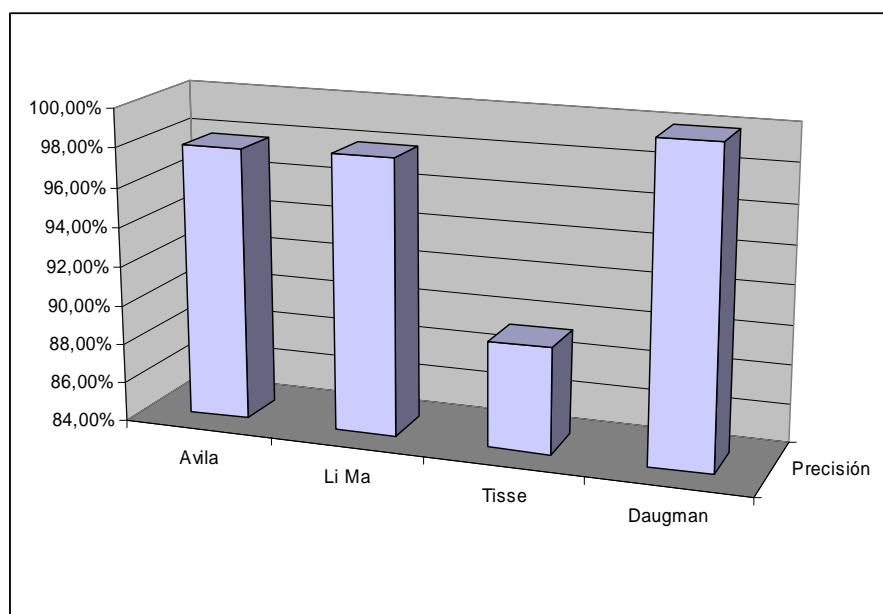


Figura 6-24 Gráfica comparativa de los resultados de precisión de los 4 algoritmos.

Como se puede observar en los resultados obtenidos, los algoritmos “Daugman”, presentan los mejores resultados, sin embargo los algoritmos “Avila” y “Li Ma”, tienen las presentaciones necesarias para implementar con ellos un sistema de reconocimiento de iris, con las garantías en el funcionamiento que este tipo de sistemas debe presentar. Estos dos algoritmos presentan, a pesar de los resultados similares obtenidos, un modo de funcionamiento claramente diferenciado, ya que el algoritmo “Avila”, determina una señal unidimensional mediante el estudio de los niveles de gris de ciertos píxeles escogidos, tras la localización de la zona del iris, mientras que “Li Ma”, trabaja con la representación rectangular de la región de interés del iris, extrayendo de esta las características necesarias.

Sin duda el que peor resultados obtiene es el algoritmo “Tisse”, pudiéndose achacar esta diferencia de prestaciones al hecho de que el resultado del proceso sea una imagen cuyo tratamiento en el proceso de comparación presenta sin dudas mayores problemas que los propios del tratamiento comparativo de un vector de datos o de bits.

Sin duda de los 4 algoritmos el único que presenta esta singularidad en cuanto al trabajo con una señal unidimensional, es “Avila”, proceso que si se hiciese una comparativa temporal de cada uno de los 4 procesos, puede determinar una mejora considerable en la etapa de selección de zonas de estudio, además de permitir almacenar la información de interés del iris, para su posterior tratamiento, en espacios más reducidos al tratarse de una señal y no de una imagen como en el resto de los casos.

Igualmente, y en lo relativo al espacio ocupado en memoria, tanto el algoritmo “Avila”, como “Daugman”, presentan la característica de generar una secuencia de bits como resultado del proceso, lo que permite sin duda usar esta información reducida en sistemas de capacidad limitada, pero con otras características más adaptadas al usuario, tales como portabilidad (permite el uso de smart cards), coste (menor memoria), y el no estar relacionada directamente esta secuencia con la imagen original, como si lo están los resultados de los procesos de “Li Ma” y “Tisse”, factor de gran importancia ya que de este

modo es imposible recuperar la señal original del usuario, evitando así que esta pueda ser obtenida y utilizada por personas no deseadas.

6.4.2.6. Otros algoritmos

Sin embargo, existen otros trabajos en relación a diferentes desarrollos de sistemas de reconocimiento biométrico de iris, llevados a cabo por autores como R. Wildes, o W. Boles, que son igualmente importantes, y que merecen, aunque sea de manera somera, una pequeña revisión, para conocer su funcionamiento.

Como ya se ha comentado con anterioridad, una de las variaciones más llamativas de los algoritmos desarrollados por W. Boles [ref.], consiste en el desarrollo de unas funciones propias de medida de la disimilaridad de los códigos de iris, utilizadas en la etapa de comparación, que se detallan en [Bol97]. Por otra parte al igual que se comentó en el algoritmo “Avila”, se hace uso de una señal unidimensional extraída de la región del iris, previamente preprocesada mediante técnicas de tratamiento digital de la imagen que incluyen el uso del operador integro-diferencial $|\nabla G(x, y) * I(x, y)|$, donde $I(x, y)$ es la

señal original, $\nabla \equiv (\partial/\partial x, \partial/\partial y)$ y $G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{2\sigma^2}}$.

A la señal obtenida de evaluar los valores de la escala de gris de la zona de estudio, se le aplica una transformada wavelet, estudiando posteriormente los cruces por cero del resultado obtenido, basados en los desarrollos de S. G. Mallat [Mal91].

El sistema desarrollado por R. Wildes [Wil97], tiene la singularidad principal, de proponer una revisión de las 2 posibilidades diferentes para el desarrollo de sistemas de captura, que presentan tanto él como Daugman, y que se pueden observar en la siguiente figura, y cuyo funcionamiento se detalla en [Wil94][Wil97]. Este sistema de Tildes fue incluso patentado en su momento [Wil96].

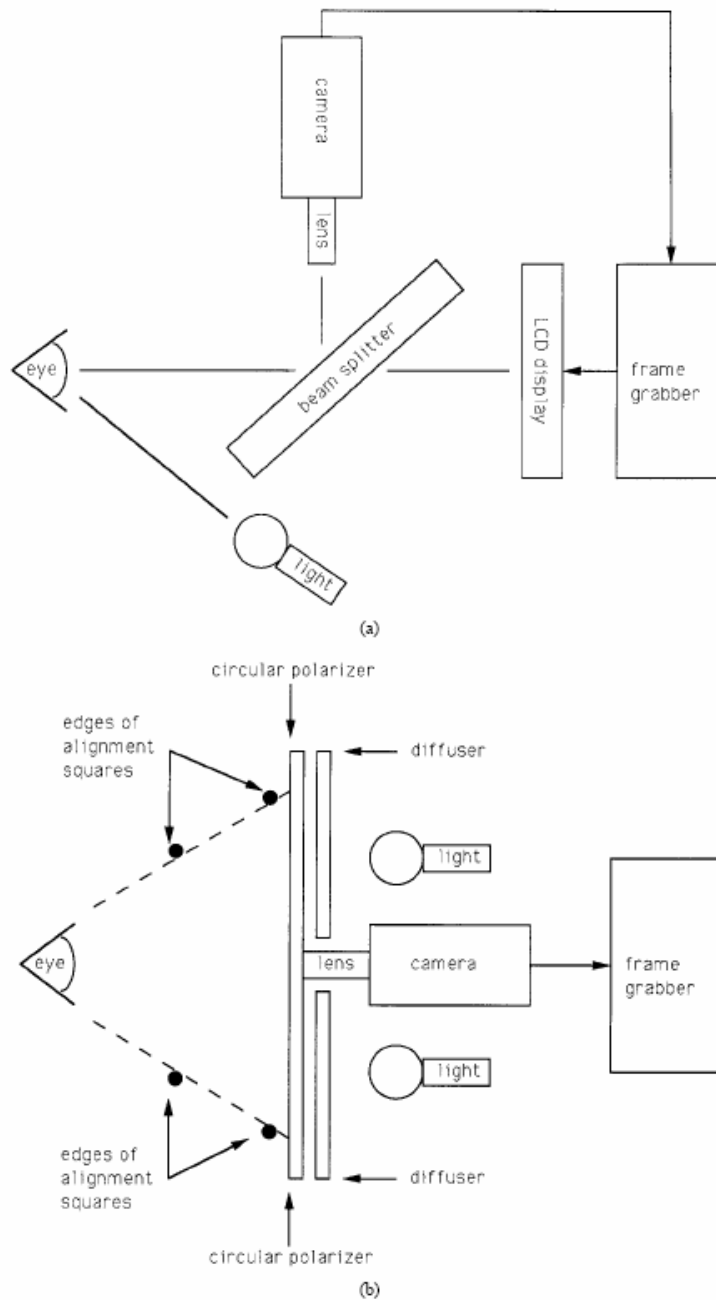


Figura 6-25 Equipos de captura de imágenes para reconocimiento biométrico de iris según Boles (a) Diagrama esquemático del equipo de Daugman. (b) Diagrama esquemático del equipo de Wildes *et al.*.

Indudablemente, en la actualidad, existen multitud de estudios, proyectos de investigación, y demás, relacionados con estos sistemas de reconocimiento biométrico de iris. Algunos de estas ideas, pueden observarse en las siguientes referencias:[Ali03][Bas05][Bon04][Chu03][Chu03.2][Cui04][Han05][Kri04][Lib02][Lim01][Liu03][Mon05][Pan05][Tan04][Wen03][Wen05][Wi196][Yin05][Zai05][Zhu00].

Capítulo 7

Conclusiones

- 7.1. Introducción
- 7.2. Aspectos relevantes relativos al desarrollo de la tecnología de reconocimiento biométrico de iris
- 7.3. Líneas futuras de actuación

Capítulo 7 - Conclusiones

7.1. Introducción

Sin duda alguna, al hablar de biometría, sobre todo en el ámbito español, estamos hablando de una tecnología emergente, hasta ahora poco conocida por la sociedad en general, pero que en otros países alcanza ya cotas de madurez muy elevadas, y está plenamente asentada dentro de la vida diaria de las personas.

Este claro desequilibrio en la evolución de estas tecnologías, en los diferentes países, se debe claramente a la falta de definición de los aspectos fundamentales que permiten el desarrollo de unos sistemas que para la sociedad actual, se encuentran más cercanos a la ciencia ficción y a las películas, que a un desarrollo de tecnología propio de nuestro siglo. Otra de las trabas que encontramos, es la escasez de disposición al estudio e investigación en este campo, cuyas múltiples aplicaciones, permitirían resolver multitud de problemas de seguridad existentes.

Sin embargo sería injusto no decir, que a pesar de su poca magnitud el empeño de algunos grupos de investigación de distintas universidades, así como la lenta pero continua aparición de empresas relacionadas con esta tecnología, esta consiguiendo impulsar el desarrollo y la implantación de estos nuevos e innovadores sistemas.

Es por esto que iniciativas como el “*Libro Blanco de Grupos de Investigación en Reconocimiento Biométrico de Personas*” [Fau05], permite poco a poco definir, y conocer a los agentes que realizan una labor de investigación (grupos universitarios y centros de investigación), aunque también de desarrollo (empresas), en el sector.

Es importante que dado el amplio espectro de actuación de estos sistemas, desde el punto de vista de desarrollo de estos sistemas, que abarca parcelas tales como: el tratamiento digital de señales e imágenes, análisis estadísticos, desarrollo hardware y software, diseño de sistemas de seguridad y sus protocolos,..., los avances sugeridos producidos por el esfuerzo en la investigación y desarrollo de la tecnología biométrica, sea un aliciente más para conseguir la aceptación e implantación de estos sistemas de seguridad en cuantas aplicaciones pueda abarcar, claro está siempre desde el respeto y el cumplimiento de las normas existentes de preservación de la intimidad y de la privacidad de las personas.

Pese a todo, el potencial evolutivo de esta tecnología es todavía muy grande, dada la necesidad de definir aún protocolos de actuación, y estándares varios que permitan el funcionamiento correcto de los sistemas, como puede ocurrir con cualquier otra tecnología en uso a nivel mundial. Es por esto que es necesario hacer un esfuerzo para que el conocimiento sobre el funcionamiento y las aplicaciones de estos sistemas, de manera que se alcance un espectro mucho mayor de gente, que ayude al crecimiento y a la aceptación de estos sistemas, en una sociedad que día a día reclama mejores sistemas de seguridad.

7.2. Aspectos relevantes relativos al desarrollo de la tecnología de reconocimiento biométrico de iris

7.2.1. El mercado de los sistemas biométricos y sus tendencias

La industria de la biometría y su mercado, están compuestos de diversos segmentos diferenciados, cada uno de ellos formado por sus propias limitaciones, impulsos y oportunidades de crecimiento. Las clasificaciones elementales de este sector, de acuerdo con la visión más amplia del mismo son: la **tecnología**, que engloba el hardware y software que hace posibles los procesos de identificación y reconocimiento de personas, **aplicaciones** horizontales, incluyendo los usos y funcionalidades que estos sistemas permiten, **segmentos de mercado** verticales, entre lo que encontramos los diferentes entornos y sectores en los que es posible desplegar la biometría. Cada una de estas tres clasificaciones, es sin duda crítica a la hora de entender de manera global el mercado de la biometría. Las aplicaciones, representan a un nivel fundamental, los problemas que esta tecnología permite resolver, en su caso la tecnología determina el modo de hacer posible esas aplicaciones, y los diferentes segmentos de mercado, marcan el destinatario último de estas soluciones.

Aplicaciones	Tecnología	Segmentos de mercado
<ul style="list-style-type: none"> - Control de accesos / asistencia - Identificación civil - Identificación criminal - Autenticación en comercio electrónico y telefonía - Seguridad informática (redes empresariales, ordenadores personales,...) - Autenticación en servicios de comercio (tiendas, cajeros automáticos,...) - Vigilancia 	<ul style="list-style-type: none"> - Sistemas automáticos de identificación de huellas (AFIS, Live-Scan) - Reconocimiento facial - Huellas dactilares y geometría de la mano - Reconocimiento de iris - Middleware (conexión entre aplicaciones) - Biometría multimodal - Verificación de la voz, firma,... 	<ul style="list-style-type: none"> - Gobierno - Cumplimiento de la ley - Salud pública - Sector financiero - Viajes y transporte - Aduanas y fronteras

Tabla 7-1 El mercado de la biometría.

Sin duda esta tabla permite adivinar los puntos clave de desarrollo del mercado de la biometría, cuyo punto clave la evolución y maduración de sistemas efectivos, y que cumplan los objetivos y funciones a los que están dirigidos.

Los datos y cifras relativos al sector pueden encontrarse en [GBM05].

En cuanto a la tecnología de reconocimiento biométrico de iris, que es sin duda el objetivo de esta memoria, los resultados referentes a la proyección de ingresos de este mercado se puede observar en el siguiente gráfico.

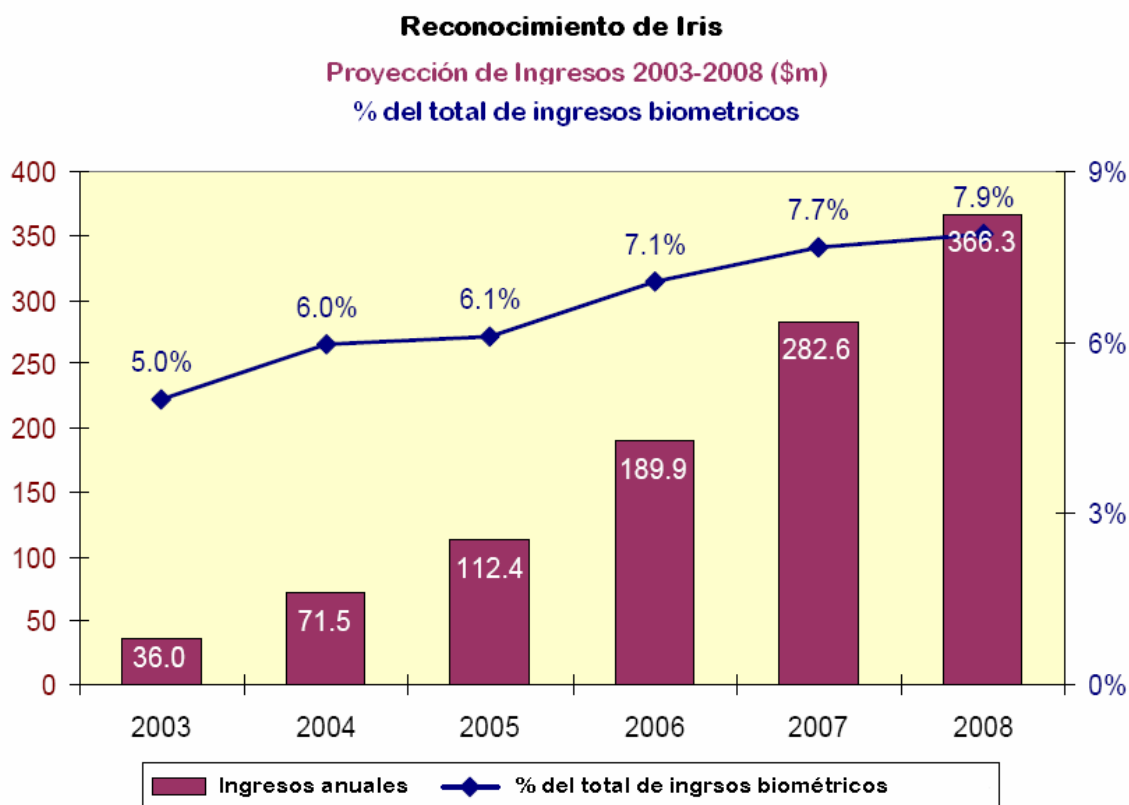


Figura 7-1 Cifras de mercado de la tecnología de reconocimiento de iris [GBM05].

Por otro lado según este mismo informe [GBM05], las tendencias de este mercado de reconocimiento de iris son las siguientes:

- El reconocimiento de iris se convertirá en una tecnología dominante y referente dentro del mercado, dado su uso en importantes programas de gobiernos de países como Reino Unido, Canadá, Japón y otros. Los Estados Unidos, se encontraran entre los que adopten la tecnología más tarde, debido a la continua insistencia en el uso de tecnología de reconocimiento de huella, usada sobre todo en sistemas de gestión de aduanas y fronteras y otras aplicaciones de control de acceso al país.
- Los procesos de prueba de estos sistemas serán paulatinamente más y más rigurosos e independientes, y se llevaran a cabo bajo el control de organizaciones civiles y comerciales. Estas pruebas, demostrarán la existencia de una mayor susceptibilidad al error por parte de estos sistemas, que la que se cree en la actualidad. De todos modos, el uso creciente de los dos patrones de iris simultáneamente, para llevar a cabo los procesos de identificación, permitirá la mejora sustancial de lo que se puede considerar una tecnología biométrica de alta precisión.

- El reconocimiento de iris pasará de tener un carácter propietario, a estar poco a poco más estandarizado. Este factor está basado en el hecho de que una de las empresas referente del sector, Iridian [Iri], va a seguir la decisión estratégica de compartir ciertos elementos de su propiedad intelectual, para permitir el desarrollo de estándares de interoperabilidad con imágenes y patrones. Esta decisión permitirá eliminar una barrera al despliegue de aplicaciones a gran escala.
- Una amplia variedad de dispositivos, tales como teléfonos móviles, PDAs con aplicaciones de video,..., desarrollarán aplicaciones de reconocimiento de iris, de modo que sea posible utilizarlas en procesos de seguridad y acceso, así como en otras aplicaciones.
- A medida que las cámaras de alta resolución vayan evolucionando, y asentándose su uso en diversas aplicaciones civiles, la tecnología de reconocimiento de iris, será menos dependiente del uso del infrarrojo, con lo que aumentará sus prestaciones, y reducirá sus costes.
- Los ataques a estos sistemas, más frecuentes a medida que se utiliza más y más esta tecnología, irán poco a poco siendo más fuertes, revelando así las deficiencias de estos sistemas, lo que permitirá hacerlos evolucionar.
- Aparecerán sistemas alternativos a los actuales de autenticación basada en iris, lo que permitirá hacer uso de sistemas propios no ligados a las patentes existentes, lo que se traducirá en el desarrollo de sistemas menos costosos.

7.2.2. Los estándares biométricos

La evolución continuada de los sistemas biométricos, y de las aplicaciones y tecnología que los componen, hacen necesaria la puesta en escena de los estándares técnicos necesarios para permitir el intercambio de datos y la interoperabilidad de los sistemas, lo que es sin duda un signo de la madurez de este mercado. Ciertamente es que aunque los trabajos acerca de esta estandarización comenzaron antes del 11-S, los esfuerzos por acelerar la creación de estos estándares biométricos se han multiplicado después de esta fatídica fecha. Es sin duda un aspecto crítico para el desarrollo del mercado de la biometría.

La importancia de estos estándares técnicos radica en el soporte en procesos de intercambio e interoperabilidad, antes mencionado, que mediante estos se proporciona. Este hecho permite facilitar la integración de sistemas y la sustitución y actualización de las tecnologías relativas. Esto puede producir un incremento en el rango de disponibilidad de productos biométricos.

Los primeros estándares biométricos, se desarrollaron en el área del cumplimiento de la ley, donde la necesidad de intercambiar datos de huellas dactilares, llevó en 1986 al US National Bureau of Standards (ahora el NIST), a publicar el primer estándar sobre este asunto, lo que se convirtió en el precursor de los actuales estándares de intercambio de huellas, que se usan en distintas partes del mundo en la actualidad. Desde entonces, diversos estándares comerciales han emergido, produciéndose en estos una continua expansión y evolución.

Existen dos tipos de estándares diferenciados: formales e informales.

Los *formales*, también conocidos como “organizaciones de jure”, se compone de organismos nacionales oficiales y organismos internacionales reconocidos. Algunos ejemplos de organismos oficiales naciones son: American National Standards Institute (ANSI), British Standards Institute (BSI) y el Japanese Industrial Standards Committee (JISC). Estos organismos pueden o no, estar respaldados por el gobierno. Las organizaciones internacionales que desarrollan estándares (Standards Development Organizations, SDOs), incluyen: la International Organization for Standardization (ISO), la International Electro-Technical Commission (IEC) y la International Telecommunications Union (ITU)

Los organismos encargados de los estándares *informales*, conocidos como “organizaciones de facto”, generalmente están compuestos por consorcios industriales, en los que las estructuras y leyes varían de manera mucho más rápida. Entre estos se encuentran: IETF, W3C y OASIS. Algunos organismos, que se encuentran específicamente ligados al sector de la biometría son: el BioAPI Consortium, el JavaCard Forum y el Voice XML Forum.

En esta misma memoria y como Anexo A, se ha incluido un listado de los estándares aprobados y publicados de los distintos organismos mencionados.

7.2.2.1. ISO/IEC JTC1 y SC37 [JTC1]

En 1987, la Organización Internacional de Estandarización (ISO) y la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC), formaron la Comisión Técnica Mixta 1 (Joint Technical Comité JTC1), para los estándares relativos a las tecnologías de la información (Information Technology IT). El objetivo de este es el de desarrollar y promover la estandarización en el ámbito de las tecnologías de la información, y de este modo conocer las necesidades existentes en las empresas, organizaciones y usuarios de este sector. En la actualidad existen 17 subcomités (SC) del JTC1, que cubren un rango amplio de temas relacionados con las ITs, entre los cuales se pueden encontrar algunos como: lenguajes de programación, telecomunicaciones, técnicas de seguridad o identificación personal, entre otros. Diversos expertos de la industria, universidades, y organismos de estandarización, llevan a cabo trabajos conjuntos, para alcanzar consenso en la aproximación a diversos problemas y situaciones relacionadas con cada tema, y el resultado de estos consensos deriva en la creación de estándares internacionales.

En Junio del año 2002, el JTC1 creó el subcomité 37 (SC37), con el fin de desarrollar estándares genéricos en el ámbito de la Biometría, cuyo campo se enmarcaba en la estandarización de las diferentes tecnologías biométricas para permitir la interoperabilidad y el intercambio de datos entre las distintas aplicaciones. Dentro de este subcomité hay 6 grupos de trabajo (Working Groups, WG):

Grupo de trabajo	Nombre
JTC1 SC37 WG 1	Lenguaje biométrico armonizado (Harmonized biometric vocabulary) <i>Representante de la SCC (Canadá)</i>
JTC1 SC37 WG 2	Interfaces técnicas biométricas (Biometric technical interfaces) <i>Representante de la KATS (República de Corea)</i>
JTC1 SC37 WG 3	Formatos biométricos de intercambio de datos (Biometric data interchange formats) <i>Representante de la DIN (Alemania)</i>
JTC1 SC37 WG 4	Arquitecturas funcionales biométricas y perfiles relacionados (Biometric functional architecture and related profiles) <i>Representante de la ANSI (Estados Unidos)</i>
JTC1 SC37 WG 5	Pruebas biométricas y reporte de resultados (Biometric testing and reporting) <i>Representante de la BSI (Reino Unido)</i>
JTC1 SC37 WG 6	Aspectos sociales y de competencias de la biometría (Cross-Jurisdictional and Societal Aspects of Biometrics) <i>Representante de la UNI (Italia)</i>

Tabla 7-2 Grupos de trabajo de la JTC1 SC37.

En la actualidad, 16 países son miembros participantes del subcomité 37 de la JTC1, y 4 son observadores.

Dentro de ISO, hay otros comités técnicos y subcomités relacionados con temas cercanos al funcionamiento de la biometría y sus aplicaciones, por ejemplo: TC68 (Servicios Financieros), JTC1 SC17 (Smart Cards e identificación personal) y SC27 (Seguridad en las Tecnologías de la Información). El grupo de biometría SC37, tiene una relación de contacto con cada uno de estos grupos mencionados, con el fin de coordinar esfuerzos en esta área.

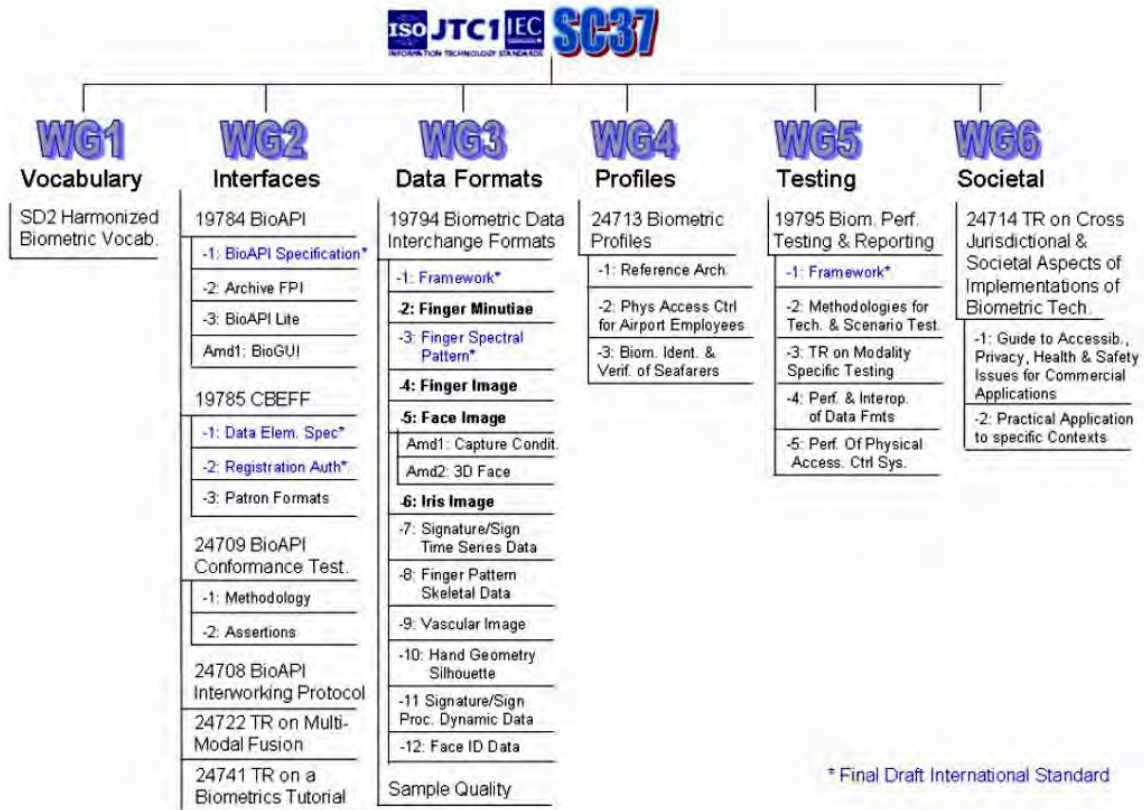


Figura 7-2 Esquema de organización de la JTC1 SC37

7.2.2.2. ANSI INCITS M1 [INCITS]

El International Committee for Information Technology Standards (INCITS), supone la mayor organización de estandarización de Estados Unidos, y es responsable del desarrollo de los estándares relativos a las tecnologías de la información y las comunicaciones (TIC).

El INCITS, fue fundado originalmente, como Accredited Standards Committee X3, en el año 1961, y operaba bajo las reglas del American National Standards Institute (ANSI). Más de 1700 compañías y organizaciones participan en el INCITS, cuyo cuartel general se encuentra en Washington.

El INCITS M1, es el comité técnico, responsable del sector de la biometría, y se estableció en Noviembre de 2001, inmediatamente después de los atentados del 11-S. La misión de este comité, es la de asegurar el rápido desarrollo y la aprobación de los estándares formales en Estados Unidos, y los genéricos a nivel internacional, para propósitos tales como: prevención de robos de identidad, seguridad en aduanas y fronteras y otra serie de aplicaciones biométricas tanto gubernamentales como comerciales.

Este comité está acreditado por la ANSI (American National Standards Institute, <http://www.ansi.org>), y conforma el grupo técnico consultivo (Technical Advisory Group, TAG), para el subcomité ISO/IEC JTC1 SC37 anteriormente mencionado, de modo que el M1 está organizado para vigilar y reflejar las actividades de SC37.

Hay 6 grupos de trabajo en este comité, que tiene objetivos similares a los de JTC1 SC37. Además, en el M1, existen los denominados grupos Ad Hoc (AHGs), que se centran en otras áreas de interés, tales como los sistemas biométricos multimodales o la tarea de garantizar el cumplimiento de los estándares desarrollados.



Figura 7-3 Esquema de organización del INCITS M1.

7.2.2.3. BIOAPI [BAPI]

La más conocida de las organizaciones de estandarización informal en la comisión BIOAPI. Este grupo fue formado en Abril de 1998, con la misión de desarrollar, interfaces de programación comunes para el desarrollo de sistemas biométricos, que permitan la comunicación de las aplicaciones software con las tecnologías biométricas, con independencia del dispositivo utilizado. En el año 2001, este grupo desarrollo una especificación (BIOAPI 1.1), que fue posteriormente adoptada como un estándar ANSI, en el año 2002.

7.2.3. Ética en los procesos y sistemas biométricos

Desde que se entró en vigor la Carta Magna de la Carta de los Derechos Fundamentales de la Unión Europea, el respeto al cuerpo y a la dignidad, han sido componentes básicos del ser humano, y se han convertido en condiciones fundamentales para la libertad y la igualdad. La evolución de las tecnologías de la información, resultará

probablemente, en hacer que la interdependencia entre el hombre y las tecnologías sea mucho más fuerte. A medida que los dispositivos de identificación biométrica se hacen cada vez más penetrantes, estas pueden comprometer la privacidad de manera más intensa y rigurosa, revelando de este modo rasgos de una persona que van más allá de su simple identidad.

En este caso, y para conseguir que el sector se desarrolle de manera correcta, es necesario afrontar ciertos aspectos fundamentales relacionados con este problema, tales como:

- Revisar las evidencias científicas de la biometría con particular hincapié en lo referente a la privacidad.
- Revisar la implementación de las leyes y políticas existentes al respecto, y hacerlas evolucionar en función de las necesidades existentes.
- Desarrollar estrategias que permitan implementar modelos de futuro, mediante los cuales se puedan anticipar los problemas más importantes en lo concerniente a la biometría y la privacidad, aportando igualmente métodos de alerta temprana para anticipar la aparición de nuevos temas éticos, sociales y legales, en lo referente a este sector.

Todas estas líneas de actuación tiene como objetivo prioritario actuar sobre cuestiones e incógnitas planteadas en lo referente al funcionamiento correcto, ya no en términos técnicos, sino en lo que al entorno de actuación y sus implicaciones se refiere, y tratar de encontrar la respuesta a incertidumbres tales como:

- ¿Es el uso de los sistemas biométricos compatible con la privacidad de cada persona?
- Biometría, seguridad y respeto, ¿permitirá la biometría tener un espectro simultáneo de visión de estos dos aspectos tan críticos?
- Biometría y privacidad: retos actuales y políticas de presente y futuro a seguir.
- ¿Puede garantizarse la privacidad, a aquellas personas que son más reacias a dar su consentimiento hacia el uso de la biometría?
- ¿Pueden los patrones biométricos estar relacionados con características de comportamiento, o predisposiciones médicas? ¿Bajo qué condiciones puede hacer mal uso la información biométrica?
- ¿En qué situaciones de relevancia bioética, pueden los potenciales riesgos del uso de la biometría ser mayores que los beneficios?

Una de las opiniones más extendidas acerca de la biometría, es sin duda el hecho de que los aspectos no técnicos de estas tecnologías, son el verdadero problema, que es sin duda difícil de resolver, aunque necesario, para que su uso sea aceptado por la sociedad.

Algunos de estos aspectos son

- Factores médicos.
- Factores legales sobre la privacidad.
- Factores éticos.

- Factores sociales.
- Factores psicológicos.

Una errónea valoración de estos aspectos no técnicos, puede determinar una actitud poco cooperativa en el uso de estos sistemas, lo que conlleva sin duda a un decremento en las prestaciones de los mismos.

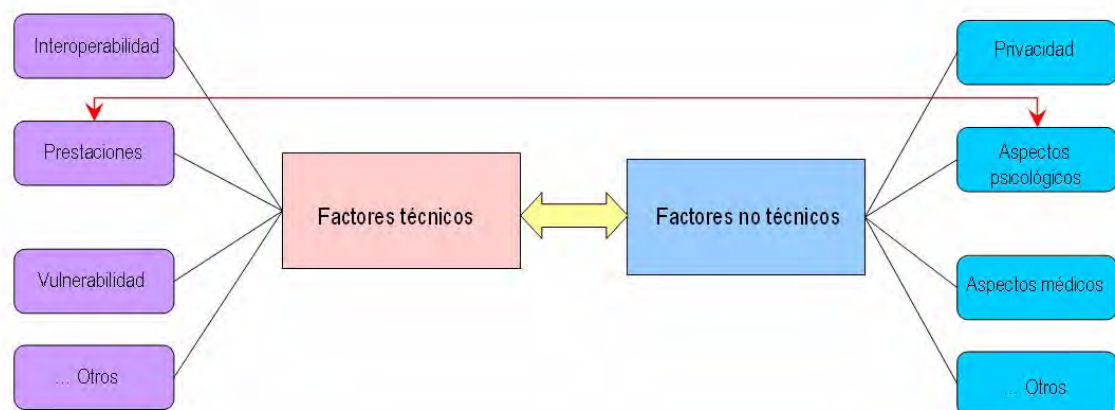


Figura 7-4 Relación entre aspectos técnico y no técnicos de los sistemas biométricos.

En este sentido, una valoración poco apropiada de las normativas vigentes, por ejemplo en temas de preservación de la seguridad, pueden acarrear consecuencias graves, llegando incluso a provocar problemas en la implantación de la biometría.

Sin duda alguna uno de los proyectos más ambiciosos en este sentido es el que esta llevando a cabo BITE (Biometric Identification Technology Ethics) [BITE].

El propósito de BITE es el de dar lugar a la introducción de un debate público acerca del aspecto bioético de la tecnología biométrica. El número de dispositivos biométricos en uso en Europa, ha crecido de 8550 en 1996 a más de 150000 en 2005, y las expectativas que manejan las empresas del sector apuntan a que estas cifras se tripliquen en los próximos dos años. Pero a pesar del auge en el crecimiento de esta tecnología en estos años, la falta de un debate público, acerca de los beneficios e inconvenientes de su uso, es quizás uno de los puntos más alarmantes. Es por esto que el proyecto BITE, trata de lanzar este debate.

La biometría suscita diversas inquietudes de carácter social, legal y éticas, que en todo caso están basadas en una amplia variedad de factores, que incluyen entre otros el miedo a la centralización de los datos relativos a la identificación biométrica, y el uso incorrecto de estos. Desde 1998 hasta 2003, la Comisión Europea, ha financiado 28 proyectos de investigación sobre biometría, en el ámbito de sus diversos programas relativos a las TICs (Tecnologías de la Información y las Comunicaciones). La mayoría de ellos, resaltan la necesidad de llevar a cabo investigación en el campo de la ética de las implicaciones biomédicas de la biometría. La principal estrategia de impacto del proyecto BITE, es la de iniciar este estudio.

Las competencias del proyecto BITE son:

1. Definir y considerar los diversos aspectos bioéticos, que surgen del desarrollo y uso de las tecnologías de identificación biométrica emergentes.
2. Analizar el actual campo de investigación, en particular, para repasar:
 - a. Las pruebas que evidencian la importancia del uso de las tecnologías de identificación biométrica, para fines de seguridad en el campo biomédico.
 - b. Evidenciar, igualmente, la importancia de adoptar estas tecnologías para evitar el uso ilícito de ayudas médicas y sociales.
 - c. Las bases, para relanzar el uso de tecnologías biométricas como fuente de información biomédica de las personas.
3. Considerar las aplicaciones potenciales de las tecnologías de identificación biométrica, y el riesgo de hacer mal uso tanto de sus funciones como de la información relativa a estos sistemas.
4. Considerar:
 - a. La ética relativa a la “informatización del cuerpo”.
 - b. Las implicaciones éticas de la aplicación de la biometría para verificar y autenticar identidades en el sector médico y de cuidado social.
 - c. El impacto ético del uso de tecnologías biométricas en grupos vulnerables (niños, gente con problemas psicológicos, inmigrantes,...).
 - d. El impacto, en líneas generales, de la biometría en aquellas personas con características físicas relevantes y necesidades especiales.

7.3. Líneas futuras de actuación

Sin lugar a dudas el desarrollo que ha tenido lugar en el sector de la biometría, a raíz de los atentados ocurridos en Nueva York el 11 de Septiembre de 2001, punto clave en el lanzamiento de esta tecnología como una de las más eficientes, en cuanto a seguridad, pero también en otros aspectos como el de vigilancia.

Sin abordar los problemas no técnicos anteriormente mencionados, la evolución de la biometría, en todas y cada una de sus posibles características (mano, iris, huellas, cara, etc....), es a largo plazo, no solo necesaria, sino también muy posible.

Aspectos tales como la mejora de los dispositivos que comprenden los sistemas o el desarrollo de programas más eficaces, en tiempo y en rendimiento, son puntos que sin duda es necesario mejorar, para permitir que estos sistemas gocen de la fiabilidad necesaria, para que tanto las empresas públicas como privadas, y los usuarios de a pie, depositen su confianza en esta tecnología.

En lo que se refiere a la tecnología de iris, en esta memoria se ha presentado un sistema de reconocimiento biométrico basado en la utilización del patrón de iris humano. Si nos atenemos a los resultados indicados en capítulos anteriores, podemos resumir que este tipo de sistemas, puede ser utilizado para llevar a cabo el control de acceso en entornos en los que son necesarios estrictos niveles de seguridad. Especialmente interesante sería su

utilización en sistema de control de acceso en entornos domóticos (casas inteligentes), tecnología que igualmente, esta siendo en los últimos años especialmente desarrollada, y que permitiría desarrollar aplicaciones como la seguridad de recintos a pequeña escala, u otras de interés particular como la adecuación de distintos elementos del hogar al uso de cada uno de los distintos usuarios del mismo.

Las bases de datos descritas en el capítulo 4, aunque suficientes para un estudio como este, se antojan insuficientes para la investigación del funcionamiento de estos sistemas a gran escala, por lo que la construcción de bases de datos de iris, de mayor tamaño, cuyo uso fuese permitido, bajo las pertinentes medidas de confidencialidad y buen uso, para los diferentes grupos de investigación y empresas que desarrollan trabajos en esta área.

Algunas mejoras y trabajos, que conllevarían un mejor funcionamiento de estos sistemas son:

- Mejoras de los sistemas de captura de la imagen, que permitan una alta resolución, y el filtrado de ruidos procedentes de la iluminación del entorno, sin hacer uso de dispositivos que produzcan reflejos en la imagen.
- Desarrollo y prueba, de algoritmos que permitan determinar si la imagen tomada corresponde a un sujeto vivo, o si por el contrario, se está intentando burlar el sistema utilizando algún tipo de prótesis u otro elemento.
- Implementación y desarrollo de nuevos y más efectivos métodos para la delimitación de la región de estudio, así como para la adquisición de datos que formarán la firma de iris del usuario.
- Mejora y/o desarrollo de técnicas para poder implementar la invariancia frente a la rotación del sistema, como por ejemplo el uso simultaneo de 2 cámaras que actúen sobre cada uno de los ojos del usuario, permitiendo establecer más puntos de referencia [Pin02].
- Utilización de distintas formas de ordenación de datos, como árboles binarios, y uso de técnicas de compresión y descompresión de datos para optimizar el almacenamiento de los mismos en la memoria del sistema, lo que sin duda repercutiría en el uso de tarjetas inteligentes y otros dispositivos de almacenamiento que podrían permitir el registro de estos datos en tarjeteas de banco, DNI,....

En lo que se refiere a los distintos métodos utilizados, podemos decir que actualmente existe una gran variedad de sistemas estudiados, lo que sin duda es la línea que es necesario seguir para completar el desarrollo de un sistema utópicamente perfecto.

Anexo A

Listado de Estándares

ANEXO A – LISTADO DE ESTÁNDARES [BS106]

ISO/IEC

- ISO/IEC 19794-2, Information Technology – Biometric Data Interchange Format – Part 2: Finger Minutiae Data
- ISO/IEC 19794-4, Information Technology – Biometric Data Interchange Format – Part 4: Finger Image Data
- ISO/IEC 19794-5, Information Technology – Biometric Data Interchange Format – Part 5: FACE Image Data
- ISO/IEC 19794-6, Information Technology – Biometric Data Interchange Format – Part 6: Iris Image Data
- ISO/IEC 7816-11:2004, Identification cards – Integrated circuit cards – Part 11: Personal verification through biometric methods

ICAO [ICAO]

- ICAO Doc 9303, “Machine Readable Travel Documents”, 5th Edition, March 2003
 - “Biometrics Deployment of Machine Readable Travel Documents”, Technical Report, Version 2.0, May 21, 2004
 - “Machine Readable Travel Documents, Technical Report, Development of a Logical Data Structure – LDS – for Optional Capacity Expansion Technologies”, Technical Report, Version 1.7, May 18, 2004

INCITS

- ANSI/INCITS 358-2002, “The BioAPI Specification”, February 13, 2002
- ANSI/INCITS 377-2004, “Finger Pattern-Based Format for Data Interchange”, January 23, 2004
- ANSI/INCITS 378-2004, “Finger Minutiae Format for Data Interchange”, February 20, 2004
- INCITS 381-2004, “Finger Image Format for Data Interchange”, May 13, 2004
- ANSI/INCITS 385-2004, “Face Recognition Format for Data Interchange”, May 13, 2004

- ANSI/INCITS 394-2004, “Application Profile for Interoperability, Data Interchange and Data Integrity of Biometric-Based Personal Identification for Border Management”, October 5, 2004
- ANSI/INCITS 395-2005, “Signature/Sign Format (for Data Interchange)”, August 12, 2005
- ANSI/INCITS 396-2005, “Hand Geometry Format for Data Interchange”, May 12, 2005
- ANSI/INCITS 398-2005, “Common Biometric Exchange Formats Framework (CBEFF)”, February 7, 2005

ANSI

- ANSI X9.84-2003, “Biometric Information Management and Security for the Financial Services Industry”, June 2003
- ANSI/NIST-ITL 1-2000, “Data Format for the Interchange of Fingerprint, Facial, & Scar Mark & Tattoo (SMT) Information”, July 27, 2000

OASIS [OASIS]

- “XML Common Biometric Format (XCBF)”, Version 1.1, August 2003, Organization for the Advancement of Structured Information Standards

Otros

- NISTIR 7151, “Fingerprint Image Quality”, August 19, 2004
- IAFIS-DOC-01078-7, “Electronic Fingerprint Transmission Specification (EFTS)”, Version 7.1, May 2, 2005, Federal Bureau of Investigation, Criminal Justice Information Services Division
- IAFIS-IC-0010(V3), “Wavelet Scalar Quantization (WSQ) Grayscale Fingerprint Image Compression Specification”, December 19, 1997 (Federal Bureau of Investigation)

Bibliografía

BIBLIOGRAFÍA

- [Ali03] Jafar M.H.Ali, Aboul Ella Hassanien,
An Iris Recognition System to Enhance E-security Environment Based on Wavelet Theory,
Advanced Modeling and Optimization,
Vol. 5, no. 2, pp. 93-104, 2003.
- [Anato] Félix Jesús Alañón Fernández, Manuela Cárdenas Lara,
Miguel Ángel Alañón Fernández, Ana Martos Aguilera
Anatomía Y Fisiología Del Aparato Ocular,
Laboratorios Esteve
http://www.esteve.es/EsteveArchivos/1_8/Ar_1_8_44_APR_18.pdf
- [Anil] Anil K. Jain,
Biometric Authentication based on Keystroke Dynamics,
<http://biometrics.cse.msu.edu>
- [Apa05] Santiago Aparicio Redondo,
Diseño y Desarrollo de un Sistema de Identificación Biométrica Basado en el Análisis Multiresolución del Patrón de Iris. Aplicación al control de accesos en entornos domóticos e inmódicos,
Proyecto Fin de Carrera, E.T.S.I. Telecomunicación – U.P.M., Marzo 2005.
- [BAPI] **BIOAPI**
<http://www.bioapi.org>
- [Bas05] Basit, A., Javed, M.Y., Anjum, M.A.,
Iris Recognition Using Single Feature Vector,
First International Conference on Information and Communication Technologies,
2005. ICICT 2005.
pp.126 – 128, 27-28 Aug. 2005.
- [Bel97] Peter N. Belhumeur, Joao P. Hespanha, David J. Kriegman,
Eigenfaces vs. Fisherfaces: Recognition Using Class Specific Linear Projection,
IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence,
Vol. 19, no. 7, pp. 711-720, July 1997.
- [Ben99] D.E.Benn, M.S.Nixon, J.N.Carter,
Robust eye extraction using Hough Transform,
Proceedings of Proceedings of 1st Int. Conf. on Audio- and Video-Based
Biometric Person Authentication, AVBPA'99.

- [BIOV] **BIOVISION**
<http://biovision.pharmabc.com/Index.htm>
- [BITE] **BITE Biometric Identification Technology Ethics**
<http://www.biteproject.org/>
- [Bog01] Albert Boggess, Francis J. Narcowich,
A First Course in Wavelets and Fourier Analysis,
Pentice Hall, January 2001.
- [Bol97] W. W. Boles,
A Security System Based on Human Iris Identification Using Wavelet Transform,
IEEE First International Conference on Knowledge-Based Intelligent Electronic
Systems, KES'97
Vol. 2, pp. 533 - 541, 21-23 May 1997.
- [Bon04] Bonney, B., Ives, R., Etter, D., Yingzi Du,
Iris pattern extraction using bit planes and standard deviations,
Conference Record of the Thirty-Eighth Asilomar Conference on Signals,
Systems and Computers, 2004.
Vol. 1, pp.582 - 586, 7-10 Nov. 2004.
- [BSt06] Cathy Tilton, VP Standards and Technology DAON (<http://www.daon.com>)
Biometrics Standards – An Overview
[http://www.daon.com/downloads/standards/
Biometric Standards White Paper Jan 06.pdf](http://www.daon.com/downloads/standards/Biometric%20Standards%20White%20Paper%20Jan%2006.pdf)
- [CASIA] **CASIA Iris Image Database**,
Center for Biometrics and Security Research (CBSR)
<http://www.cbsr.ia.ac.cn/Iris%20Database.htm>
- [Cha94] Dingding Chang, Shuji Hashimoto,
An inverse voting algorithm for Hough Transform,
IEEE International Conference Image Processing, 1994. Proceedings. ICIP-94.,
Vol. 1, pp. 223 – 227, 13-16, Nov. 1994
- [Chu03.2] Chul-Hyun Park, Joon-Jae Lee, Sang-Keun Oh, Young-Chul Song,
Doo-Hyun Choi, Kil-Houm Park,
Iris Feature Extraction and Matching Based on Multiscale and Directional Image
Representation
Lecture Notes on Computer Science
Scale Space Methods in Computer Vision: 4th International Conference, Scale
Space 2003 Isle of Skye, UK, Proceedings
pp. 576 – 583, June 10-12, 2003.

- [Chu03] Chul-Hyun Park, Joon-Jae Lee, Mark J. T. Smith, Kil-Houm Park,
Iris-Based Personal Authentication Using a Normalized Directional Energy Feature,
Lecture Notes on Computer Science
Audio- and Video-Based Biometric Person Authentication: 4th International
Conference, AVBPA 2003 Guildford, UK, Proceedings
pp. 224 – 232, June 9-11, 2003
- [Cla00] David A. Clausi, M. Ed Jernigan,
Designing Gabor Filters for Optimal Texture Separability,
Pattern Recognition,
vol. 33, Issue 11, pp. 1835-1849, 2000.
- [Cui04] Jiali Cui, Yunhong Wang; JunZhou Huang, Tieniu Tan, Zhenan Sun,
An iris image synthesis method based on PCA and super-resolution,
Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition, 2004.
ICPR 2004.
Vol. 4 pp. 471 - 474, 23-26 Aug. 2004.
- [Dau00] John Daugman,
Biometric Decision Landscapes,
Technical Report No. TR482, University of Cambridge Computer Laboratory,
January 2000.
<http://www.cl.cam.ac.uk/TechReports/UCAM-CL-TR-482.pdf>
- [Dau01.2] John G Daugman, Cathryn Downing,
Epigenetic randomness, complexity, and singularity of human iris patterns,
Proceedings of the Royal Society,
B, 268, Biological Sciences, pp 1737 – 1740, 2001.
- [Dau01] John G. Daugman
*Statistical Richness of Visual PhaseInformation: Update on Recognizing Persons
by Iris Patterns*,
International Journal of Computer Vision,
Vol. 45, no. 1, pp. 25 – 38, 2001.
- [Dau02] Joh G.Daugman ,
Gabor wavelets and statistical pattern recognition,
The Handbook of Brain Theory and Neural Networks,
2nd ed., MIT Press, pp 457-463, 2002.
- [Dau03.2] Daugman J (2003) "Demodulation by complex-valued wavelets for stochastic
pattern recognition."
Int'l Journal of Wavelets, Multi-resolution and Information Processing,
Vol. 1, no. 1, pp 1-17, 2003

- [Dau03] John G. Daugman
The importance of being random: statistical principles of iris recognition,
Pattern Recognition,
Vol. 36, Issue 2, pp. 279-29, 1 February 2003.
- [Dau04] John G. Daugman,
How iris recognition works,
Circuits and Systems for Video Technology, IEEE Transactions on
Volume 14, Issue 1, pp. 21-30, Jan. 2004.
- [Dau85] John G. Daugman,
*Uncertainty Relation for Resolution in Space, Spatial Frequency, and
Orientation Optimized by Two-Dimensional Visual Cortical Filters*,
J. Opticl Soc. of Am. A,
Vol. 2, pp. 1160-1169, 1985.
- [Dau92] John G. Daugman,
High confidence personal identification by rapid video analysis of iris texture,
Security Technology, 1992. Crime Countermeasures, Proceedings. Institute of
Electrical and Electronics Engineers 1992 International Carnahan Conference on
pp. 50 – 60, 14-16 Oct. 1992
- [Dau93] J. Daugman,
High Confidence Visual Recognition by Test of Statistical Independence,
IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,
Vol. 15, Issue 11, pp. 1148-1161, Nov. 1993.
- [Dau94] John G. Daugman, , Cathryn Downing,
Recognizing iris texture by phase demodulation,
IEE Colloquium on Image Processing for Biometric Measurement,
pp. 2/1 - 2/8, 20 Apr 1994.
- [Dau95] John G. Daugman,
High confidence recognition of persons by rapid video analysis of iris texture,
European Convention on Security and Detection, 1995,
pp. 244 – 251, 16-18 May 1995.
- [Dau98] John G. Daugman
Recognizing people by their iris patterns,
Information Security Technical Report,
Vol. 3, Issue 1, pp. 33-39, 1998.
- [DTB03] Documento de trabajo sobre biometría
ARTÍCULO 29 - GRUPO DE PROTECCIÓN DE DATOS
1 Agosto 2003
http://europa.eu.int/comm/justice_home/fsj/privacy/docs/wpdocs/2003/wp80_es.pdf

- [Dud73] R.O. Duda, P.E. Hart,
Pattern Classification and Scene Analysis,
John Wiley & Sons. E.E.U.U. 1973
- [Dun03] Mary Dunker,
Don't Blink: Iris Recognition for Biometric Identification,
SANS Security Essentials,
July 2003.
- [ECHR] **Convention on Human Rights and Biomedicine**
<http://conventions.coe.int/Treaty/EN/Treaties/Html/164.htm>
- [Eri00] Erik Bowman,
Everything You Need to Know About Biometrics,
Identix Corporation, January 2000.
- [Esc71] L. F. Escudero,
Reconocimiento de Patronos,
Paraninfo, Madrid. 1977
- [Fau05] Marcos Faúndez Zanuy,
Libro Blanco de Grupos de Investigación en Reconocimiento Biométrico de Personas,
Ediciones Técnicas Marcombo, 2005.
- [Fie05] Julián Fierrez Aguilar
Verificación de Firma Escrita y Nuevos Enfoques de Autenticación Multibiométrica,
ATVS - Laboratorio de Investigación Biométrica
<http://atvs.ii.uam.es>
Escuela Politécnica Superior, Universidad Autónoma de Madrid, SPAIN
2005
- [Fle92] M. M. Fleck,
Some Defects in Finite-Difference EdgeFinders,
IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence
Vol. 14, no. 3, pp. 337-345, Mar 1992
- [Fro05] Institute for Prospective Technological Studies (IPTS),
Biometrics at the Frontiers: Assessing the Impact on Society
For the European Parliament Committee on Citizens' Freedoms and Rights,
Justice and Home Affairs (LIBE),
Joint Research Centre, European Commission
2005
<http://www.jrc.es/home/pages/detail.cfm?prs=1235>

- [Gab46] D. Gabor,
Theory of communication,
Journal inst. Elect. Eng. London,
Vol. 93, n° III, 1946.
- [Gab53] Gabor, D.,
Communication theory, past, present and prospective,
IEEE Transactions on Information Theory,
Volume 1, Issue 1, pp. 2 - 4, Feb 1953.
- [GBM05] *Global Biometric Market and Industry Report*
International Biometric Group
<http://www.biometricgroup.com/>
- [Geo02] Cathy Newman,
A Life Revealed,
National Geographic, April 2002 Issue, pp. 2 - 9.
- [Gra95] Amara Graps,
An introduction to wavelets
Computational Science and Engineering, IEEE [see also Computing in Science
& Engineering]
Vol. 2, Issue 2, pp. 50-61, Summer 1995.
- [Han05] Ching-Han Chen; Chia-Te Chu;
Low complexity iris recognition based on wavelet probabilistic neural networks,
Proceedings. 2005 IEEE International Joint Conference on Neural Networks,
2005. IJCNN '05.
Vol. 3, pp. 1930 - 1935, 31 July - 4 Aug. 2005.
- [Han81] P. J. Hand,
Discrimination and Classification,
John Wiley & Sons. E.E.U.U. 1981
- [Hav97] Joseph P. Havlicek , John W. Havlicek , Alan C. Bovik,
The analytic image,
International Conference on Image Processing, 1997. Proceedings,
Volume 2, pp. 446 - 449, 26-29 Oct. 1997.
- [ICAO] **ICAO MRTD**
International Civil Aviation Organization, Machine Readable Travel Documents
<http://www.icao.int/mrtd>
- [Ilo03] Jarmo Ilonen
Keystroke Dynamics
2003.

- [INCITS] **ANSI INCITS M1**
<http://m1.incits.org/>
- [Iri] Iridian Technologies
<http://www.iridiantech.com/>
- [Jai00] Anik K. Jain, Salil Prabhakar, Lin Hong, Sharath Pankanti,
Filterbank-Based Fingerprint Matching,
IEEE Trans. Image Processing,
Vol. 9, no. 5, pp. 846-859, 2000.
- [Jam98] James L. Wayman,
A Generalized Biometric Identification System Model,
Conference Record of the Thirty-First Asilomar Conference on Signals, Systems
& Computers, 1997,
Vol. 1, pp.291 – 295, 2-5 Nov. 1997.
- [Jan02] Jan Ernst
Counterfeits and Countermeasures
The Iris Recognition Homepage
<http://www.iris-recognition.org/>
2002
- [JTC1] **ISO/IEC JTC1 SC37 Biometrics**
Referencia Web:
[http://www.iso.org/iso/en/stdsdevelopment/tc/tclist/
TechnicalCommitteeDetailPage.TechnicalCommitteeDetail?COMMID=5537](http://www.iso.org/iso/en/stdsdevelopment/tc/tclist/TechnicalCommitteeDetailPage.TechnicalCommitteeDetail?COMMID=5537)
Workspace:
[http://isotc.iso.org/livelink/
livelink?func=ll&objId=2262372&objAction=browse&sort=name](http://isotc.iso.org/livelink/livelink?func=ll&objId=2262372&objAction=browse&sort=name)
- [Kei03] Keith A. Rhodes,
Information Security, Challenges in Using Biometrics,
United States General Accounting Office,
GAO-03-1137T, Septiembre 2003.
- [Kes99] Anastasios L. Kesidis, Nikos Papamarkos,
On the inverse Hough transform,
IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,
Vol. 21, Issue 12, pp. :1329 – 1343, Dec. 1999.
- [Kri04] Krichen, E., Mellakh, M.A., Garcia-Salicetti, S., Dorizzi, B.,
Iris identification using wavelet packets,
Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition, 2004.
ICPR 2004.
Vol. 4, pp. 335 – 338, 23-26 Aug. 2004.

- [Lag00]** Dra. Berta L. Laguna Mena,
Anatomía del Ojo,
Consulta Oftalmológica Virtual Dra. Laguna
http://www.e-oftalmologia.com/area_formacion/anatomia/index.html
Marzo, 2000.
- [Lee96]** T. Lee,
Image Representation Using 2D Gabor Wavelets,
IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence,
Vol. 18, no. 10, pp. 959-971, Oct. 1996.
- [Lib02]** Libor Machala, Jaroslav Pospíšil
Biometric Verification and Biometric Identification of a Person by Methods of Statistical Analysis of Digitized Iris Images,
Acta Univ. Palacki. Olomuc. Fac. Rer. Nat. (2001-2002),
Physica 40-41, April 2002.
<http://publib.upol.cz/~obd/fulltext/Physica-40-41/acta12.pdf>
- [Lib03]** Libor Masek,
Recognition of Human Iris Patterns for Biometric Identification
<http://www.csse.uwa.edu.au/~pk/studentprojects/libor/index.html>
- [Lim01]** Shingyounh Lim, Kwanyoung Lee, Okhwan Vellón, Taiyun Kim
Efficient Iris Recognition through Improvement of Feature Vector Classifier,
Electronics and Telecommunications Research Institute (ETRI) Journal,
Vol. 23, no. 2, pp. 61-70, June 2001.
- [Lim02]** Li Ma; Yunhong Wang; Tieniu Tan;
Iris recognition using circular symmetric filters,
Proceedings of the 16th International Conference on Pattern Recognition, 2002.
Vol. 2, pp. 414 – 417, 11-15 Aug. 2002.
- [Lim03]** Li Ma, Tieniu Tan, Yunhong Wang; Dexin Zhang,
Personal identification based on iris texture analysis,
IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,
Vol. 25, Issue 12, pp. 1519 - 1533, Dec. 2003.
- [Lim04]** Li Ma; Tieniu Tan; Yunhong Wang; Dexin Zhang,
Efficient iris recognition by characterizing key local variations,
IEEE Transactions on Image Processing,
Vol. 13, Issue 6, pp. 739 – 750, June 2004.
- [Liu02]** Chengjun Liu, Harry Wechsler,
Gabor Feature Based Classification Using the Enhanced Fisher Linear Discriminant Model for Face Recognition,
IEEE Trans. on Image Processing,
Vol. 11, no. 4, pp. 467-476, 2002.

- [Liu03] Yuanning Liu, Senmiao Yuan, Xiaodong Zhu, Qingliang Cui,
A practical iris acquisition system and a fast edges locating algorithm in iris recognition,
Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2003. IMTC '03.
Proceedings of the 20th IEEE
Volume 1, 20-22 May 2003 Page(s):166 – 168
- [Liu05] Judith Liu-Jimenez, Raul Sánchez Reíllo , Carmen Sánchez Ávila
Full Hardware Solution for Processing Iris Biometrics
39th Annual 2005 International Carnahan Conference on Security Technology,
2005. CCST '05.
pp. 157 – 163, 11-14 Oct. 2005
- [Lye02] Lye Wil Liam, Ali Chekima, Liau Chung Fan, Jahmal Ahmad Dargham,
Iris Recognition Using Self-Organizing Neural Network,
IEEE Student Conference on Research and Development Proceedings, SCORed
2002.
pp. 169-172, 16-17 July 2002.
- [Mal89] Stephane G. Mallat,
A Theory for Multiresolution Signal Decomposition: The wavelet Representation
IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,
Vol. 11, No.7, pp. 674-693, July 1989.
- [Mal91] Stephane G. Mallat,
Zero-Crossings of a Wavelet Transform,
IEEE Transactions on Information Theory,
Vol. 37, no. 4, pp 1019-1033, July 1991.
- [Mal92] S. Mallat, S. Zhong,
Characterization of signal from multiscale edges,
IEEE Transactions on Pattern Analysis And Machine Intelligence,
Vol. 14, No. 7, pp.710-732, July 1992.
- [Mal98] Stephan Mallat,
A Wavelet Tour of Signal Processing,
Academic Press, 1998.
- [Mar01] David de Martín Roche,
Reconocimiento de iris mediante la representación de cruces por cero de la transformada Wavelet,
Proyecto Fin de Carrera, E.T.S.I. Telecomunicación – U.P.M., Mayo 2001.

- [Mon05] Monro, D.M., Zhang, Z.,
An effective human iris code with low complexity,
IEEE International Conference on Image Processing, 2005. ICIP 2005.
Volume 3, pp. III - 277-80, 11-14 Sept. 2005.
- [NBTC] National Biometric Test Center,
Collected Works,
San Jose University
- [Nib88] Wayne Niblack, Dragutin Petkovic,
On improving the accuracy of the Hough transform: theory, simulations, and experiments,
Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition,
1988. Proceedings CVPR '88.
Page(s):574 – 579, 5-9 June 1988.
- [OASIS] **OASIS XML Common Biometric Format (XCBF) TC**
http://www.oasis-open.org/committees/tc_home.php?wg_abbrev=xcbf
- [Ort04] Dr. Javier Ortega García
Identificación Biométrica de Personas: Estado del Arte, Líneas de Futuro y Limitaciones,
Laboratorio de Identificación Biométrica, Área de Tratamiento de Voz y Señales,
Escuela Politécnica Superior, Universidad Autónoma de Madrid, 2004
<http://www.atvs.diac.upm.es>
- [Pan05] GU Hong-ying , ZHUANG Yue-ting , PAN Yun-he
An iris recognition method based on multi-orientation features and Non-symmetrical Support Vector Machine,
Journal of Zhejiang University SCIENCE, 2005
<http://www.zju.edu.cn/jzus>
- [Pau03] Paul Reid
Biometrics for Network Security,
Pentice Hall PTR, December 2003
- [Pee93] Peyton Z. Peebles Jr,
Probability, random variables, and random signal principles,
McGraw-Hill, Inc. 1993.
- [Pin02] Ya-Ping Huang, Si-Wei Luo, En-Yi Chen,
An Efficient Iris Recognition System,
IEEE Proceedings of the first International Conference on Machine Learning and Cybernetics, Beijing, 2002,
pp. 450-454, 4-5 November 2002

- [Polik] R. Polikar,
Wavelets Analysis: The Wavelet Tutorial,
<http://users.rowan.edu/~polikar/WAVELETS/WTtutorial.html>
- [Por03] Javier Portillo,
Sistemas de Identificación Biométrica,
Centro de Difusión de Tecnologías, Diciembre 2003,
<http://www.ceditec.etsit.upm.es/biometria.php?pagina=12>
- [Rei00] Raúl Sánchez Reíllo,
Mecanismos de autenticación biométrica mediante tarjeta inteligente,
Tesis Doctoral, E.T.S.I. Telecomunicación – U.P.M., 2000.
- [RETIN] **RETINALTECH**
<http://www.retinaltech.com>
- [Rob94] Robi Polikar
The Wavelet Tutorial,
1994
<http://users.rowan.edu/~polikar/WAVELETS/WTtutorial.html>
- [Rob99] Robi Polikar,
The story of wavelets,
Physics and Modern Topics in Mechanical and Electrical Engineering, (ed. Mastorakis, N), World Scientific and Eng. Society Press,
pp. 192-197, 1999.
- [San00] C. Sánchez Ávila, R. Sánchez-Reíllo, A. Gonzalez Marcos,
Improving Access Control Security using Iris Identification,
IEEE 34th Annual International Carnahan Conference on Security Technology,
2000. Proceedings,
pp. 56 – 59, 23-25 Oct. 2000.
- [San01] C. Sánchez Ávila , R. Sánchez Reíllo, D. de Martin-Roche
Iris recognition for biometric identification using dyadic wavelet transform zero-crossing,
Proceedings of IEEE 35th International Carnahan Conference on Security Technology, 2001
pp. 272 -277, 16-19 Oct. 2001.
- [San03] C. Sánchez Ávila y R. Sánchez Reíllo
Sistemas de identificación biométrica mediante patrón de iris utilizando representación multiescala e información de fase,
Actas del Segundo Congreso Iberoamericano de Seguridad Informática CIBSI '03 (Octubre 2003)
http://www.criptored.upm.es/guiateoria/gt_m279a.htm

- [San05] C. Sánchez Avila, R. Sánchez Reíllo,
Two different approaches for iris recognition using Gabor filters and multiscale zero-crossing representation,
Pattern Recognition,
Vol. 38, Issue 2, pp 231-240, February 2005.
- [SCA02] Smart Card Alliance,
Smart Cards and Biometrics in privacy-Sensitive Secure Personal Identification Systems, A Smart Card Alliance White Paper,
Mayo 2002
<http://www.smartcardalliance.org>
- [Sch96] J. Schürmann,
Pattern Clasification: A Unified View of Statistical and Neuronal Approaches,
John Wiley & Sons, Inc. Nueva York (E.E.U.U.) 1996
- [SIBIS] **Statistical Indicators Benchmarking the Information Society**
<http://www.sibis-eu.org/>
- [Sim01] Simon Liu, Mark Silverman,
A Practical Guide to Biometric Security Technology,
IT Professional,
Vol. 03, no. 1, pp. 27-32, Jan/Feb 2001.
- [Tan04] Zhenan Sun, Yunhong Wang; Tieniu Tan, Jiali Cu,
Robust direction estimation of gradient vector field for iris recognition,
Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition, 2004.
ICPR 2004.
Vol. 2, pp. 783 – 786, , 23-26 Aug. 2004.
- [The89] C.W. Therrien,
Decision, Estimation and Classification,
John Wiley & Sons, Inc. Nueva York (E.E.U.U.) 1989
- [Tie97] Q.M. Tieng, W. W. Boles,
Recognition of 2D Object Contours Using the Wavelet Transform Zero-Crossing Representation,
IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,
Vol. 19, no. 8, pp 910-916, August 1997.
- [Tis02] Christel-Loïc Tisse, Lionel Torres, Michel Robert,
Person Identification Technique Using Human Iris Recognition,
Proceedings of the 15th International Conference on Vision Interface (2002).
Section 6-1, pp. 294-299, 27-29 May 2002.

- [Vat04] Mayank Vatsa, Richa Singh, P. Gupta,
Comparison of iris recognition algorithms,
Proceedings of International Conference on Intelligent Sensing and Information Processing, 2004,
pp. 354 – 358, 2004.
- [Wen03] Wen-Shiung Chen, Shang-Yuan Yuan,
A novel personal biometric authentication technique using human iris based on fractal dimension features,
IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2003. Proceedings. (ICASSP '03). 2003
Vol. 3 pp. III - 201-204, 6-10 April 2003.
- [Wen05] Wen-Shiung Chen, Kun-Huei Chih, Sheng-Wen Shih, Chih-Ming Hsieh,
Personal identification technique based on human iris recognition with wavelet transform,
IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2005. Proceedings. (ICASSP '05).
Vol. 2 pp. ii/949 - ii/952, 18-23 March 2005
- [Wil94] Wildes, R.P., Asmuth, J.C., Green, G.L., Hsu, S.C., Kolczynski, R.J., Matey, J.R., McBride, S.E.,
A system for automated iris recognition,
Proceedings of the Second IEEE Workshop on Applications of Computer Vision, 1994.,
pp. 121 – 128, 5-7 Dec. 1994.
- [Wil96] R. P. Wildes, J. C. Asmuth, S. C. Hsu, R. J. Kolczynski, J.R. Matey, and S. E. McBride,
Automated, noninvasive iris recognition system and method,
U.S. Patent 5 572 596, 1996.
- [Wil96] Gerald O. Williams,
Iris recognition technology,
30th Annual 1996 International Carnahan Conference Security Technology,
Page(s):46 – 59, 2-4 Oct. 1996.
- [Wil97] Wildes, R.P.
Iris recognition: an emerging biometric technology,
Proceedings of the IEEE
Vol. 85, Issue 9 pp.1348 - 1363, Sept. 1997.
- [Yin05] Yingzi Du, Bonney, B., Ives, R., Etter, D., Schultz, R.,
Analysis of partial iris recognition using a 1D approach,
IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2005. Proceedings. (ICASSP '05).
Vol. 2, pp. ii/961 - ii/964, 18-23 March 2005.

- [Zai05] Zaim, A.,
Automatic segmentation of iris images for the purpose of identification,
IEEE International Conference on Image Processing, 2005. ICIP 2005.
Vol. 3, pp.: III - 273-6, 11-14 Sept. 2005.
- [ZEFYR] ZEFYR Technologies,
<http://www.zefyr.com>
- [Zha02] Jianguo Zhang, Tieniu Tan
Brief Review of Invariant Texture Analysis Methods,
Pattern Recognition,
vol. 35, no. 3, pp. 735-747, 2002.
- [Zhu00] Yong Zhu, Tieniu Tan, Yunhong Wang,
Biometric Personal Identification Based on Iris Patterns,
15th International Conference on Pattern Recognition, 2000. Proceedings.
Vol. 2, pp.801 - 804, 3-7 Sept 2000.
- [Zli99] Stan Z. Li, Juwei Lu,
Face recognition using the nearest feature line method,
IEEE Transactions on Neural Networks,
Vol. 10, Issue 2, pp. 439 - 443, March 1999.
- [Zon00] Zonglin Zhou, Stan Z. Li, Kap Luk Chan,
A theoretical justification of nearest feature line method,
Proceedings of the 15th International Conference on Pattern Recognition, 2000.
Volume 2, pp. 759 – 762, 3-7, Sept 2000.

Presupuesto

PRESUPUESTO

En la elaboración del presupuesto de este proyecto, se han considerados los puntos:

- Gastos de material.
- Costes mano de obra.
- Gastos sociales.

En los siguientes apartados se muestra una descripción más detallada de los aspectos que acaban de ser mencionados.

Gastos de Material

La relación de los gastos de material asociados a la elaboración de este proyecto es:

- Material de oficina (hojas y otros consumibles): 300 €
- Equipo Hardware:
 - Ordenador completo (CPU, pantalla, teclado y ratón): 1200 €
 - Impresora: 200 €
- Equipo Software:
 - Microsoft: Windows XP Profesional: 150 €
 - Microsoft Office XP Professional: 200 €
 - Licencia y software Matlab 6.5: 2000 €
 - Adobe Acrobat Professional 7.0: 450 €
- **Subtotal Gasto de Material:** 4500 €

Costes Mano de Obra

Relación de salarios:

Para la elaboración de este proyecto es necesaria la intervención de dos personas, un ingeniero de Telecomunicación, y una persona que se encargará de la mecanografía de la memoria y documentación necesaria. Los sueldos estimados para cada uno de ellos son:

- Ingeniero de Telecomunicación: 2000 €/mes.
- Mecanógrafo: 900 €/mes.

Relación de tiempos involucrados

En el estudio de los tiempos involucrados en la realización del proyecto, se han considerado jornadas de 40 horas semanales, con medio día libre por semana trabajada. Los tiempos invertidos por cada una de las personas relacionadas con este trabajo son:

- Ingeniero de Telecomunicación: 12 meses.

- Mecanógrafo: 1 mes.

De este modo, con los datos de tiempos y salarios dependiendo de la categoría profesional, tenemos:

- Coste del trabajo realizado por el ingeniero: 24000 €
- Coste del trabajo realizado por el mecanógrafo: 900 €
- **Subtotal Gastos de Mano de Obra:** **24900 €**

Gastos Sociales

A la hora de configurar este presupuesto, se considera la siguiente relación de obligaciones sociales:

- Vacaciones retribuidas: 8,5%.
- Abono de días festivos: 9%.
- Ayudas familiares: 3%.
- Gratificaciones: 9%.
- Seguro laboral: 2%
- Otros conceptos: 5%.
- **Total Cargas Sociales:** 36.5%.
- **Total Gastos Sociales: 36.5% de 24900 =** 908,5 €

Coste Total del Proyecto

Con los datos calculados para los gastos de material, los costes de la mano de obra y los gastos relacionados con las obligaciones sociales, se obtiene el siguiente presupuesto final para la elaboración del proyecto:

- Gastos de material: 4500 €
- Costes mano de obra: 24900 €
- Gastos sociales: 9088,5 €
- **Coste Total de la Ejecución del Proyecto:** 38488,5 €
- I.V.A. (16%): 6158,16€
- **Total Presupuesto:** **44646,66 €**

El presupuesto final del presente proyecto asciende a la cantidad de: cuarenta y cuatro mil seiscientos cuarenta y seis euros con sesenta y seis céntimos.

Madrid a 26 de Mayo de 2006

Fdo: Rafael Coomonte Belmonte

Ingeniero de Telecomunicación.