



Universidad
Carlos III de Madrid

TESIS DOCTORAL

Mecanismos de Captura y Procesado de Imágenes de Venas para Identificación Personal

Autor:

D. José Enrique Suárez Pascual

Directores:

Dr. D. Raúl Sánchez Reillo

Dr. D. Michael V. García Lorenz

DEPARTAMENTO TECNOLOGÍA ELECTRÓNICA

Leganés, Julio 2011

Tesis Doctoral

Mecanismos de Captura y Procesado de Imágenes de Venas para Identificación Personal

Autor: D. José Enrique Suárez Pascual

Directores: Dr. D. Raúl Sánchez Reillo
Dr. D. Michael V. García Lorenz

Firma del tribunal calificador:

Nombre y Apellidos

Firma

Presidente:

Vocal:

Vocal:

Vocal:

Secretario:

Calificación:

Leganés, 2011

Hasta aquí hemos llegado ...

.... que no es poco

Agradecimientos

La presente investigación se ha realizado bajo la dirección de los profesores Raúl Sánchez Reíllo y Michael V. García Lorenz, a quienes quiero expresar mi más sincero agradecimiento por su ayuda y consejos prestados.

Un agradecimiento muy especial a mi mujer, Cristina, y a mis hijos, Mario y Candela, por robarles tantas horas de tardes, noches, fines de semana y vacaciones junto al PC, y por la paciencia de aguantarme en esos momentos.

También deseo manifestar mi gratitud a todas aquellas personas, sin cuya colaboración con manos y muñecas reales este trabajo no se hubiera podido llevar a cabo y sin las que no hubiese podido realizar las cientos de pruebas necesarias: mi familia (Cristina, Mario y Candela), mis padres (Quique y Pili), mis hermanos (David y Alejandro), mis tíos (Alfonso y Mari Carmen), mis cuñadas (Silvia y Susana), mi familia política (Mila, Celso, Tania, Iñaki, Juanjo, Rosa y Fernando), mis amigos (David, José Luis, Jaime, Mario, Javier del Rey, Rebeca, Gloria y Javier Chacón), mis alumnos de ESO del IES Julio Verne en Leganés en los cursos 2008-2010 y mis alumnos de ESO y Bachillerato del IES Isabel la Católica en Madrid en el curso 2010-2011.

Tengo que citar igualmente a mis compañeras del IES Julio Verne (Olga y Maribel) y a mis compañeros del IES Isabel la Católica (Vicente, Manuel, Alberto, José Manuel y Maria Ángeles), por soportarme a mí y a mis “cachivaches” de prueba en los departamentos durante estos 4 años. También un agradecimiento especial a mi compañero de trabajos vasculares del departamento GUTI, Jaime de Uriarte, por su inestimable ayuda con el MATLAB cada vez que me quedaba atascado en algún punto.

Por último agradecerle a mi fuerza de voluntad por no haberme dejado abandonar el trabajo las muchas veces que el cuerpo me lo pedía, cuando me sentía frustrado por no conseguir los resultados deseados después de semanas y semanas de pruebas y trabajo, y cuando me preguntaba para qué tanto esfuerzo si realmente ya no era necesario.

Actualmente la identificación biométrica para el acceso a recintos o servicios está cobrando bastante importancia. La biometría es una tecnología que, además de realizar funciones de reconocimiento, aporta mayores niveles de seguridad que otros métodos de identificación externos, al llevar intrínsecamente la información en el cuerpo. La identificación biométrica vascular ofrece un futuro muy prometedor en ambos aspectos. La mayoría de los sistemas biométricos se basan en sistemas hardware (HW) para la captura de muestras del usuario más una solución software (SW) para el procesado de las mismas.

La tarea de la investigación en biometría vascular hoy en día es crear sistemas fiables y seguros para obtener soluciones aplicables. En esta Tesis, hemos propuesto dos importantes contribuciones a la identificación mediante esta modalidad biométrica:

1. Un sistema hardware novedoso y económico para la captura de patrones y muestras del usuario, tanto de palma como de muñeca, que ofrece imágenes de una calidad suficiente para su procesado posterior. Además, a diferencia de los trabajos previos realizados, las especificaciones y diseño de este sistema se ofrecen abiertamente a la comunidad científica.
2. Un sistema de procesamiento de las imágenes de las venas extraídas, basado en las conocidas función Gaussiana y función de Convolución, y un nuevo sistema de toma de decisiones, basado en una comparación orientable de las líneas extraídas apoyado con el dato obtenido del ancho de la muñeca de cada usuario. Esto también se ofrece a la comunidad científica, mostrando todas las fases del proceso, al contrario de lo que ocurre con las escasas publicaciones existentes que se analizarán a lo largo del presente documento.

Resumen

Para demostrar la viabilidad de esta propuesta se ha desarrollado e implementado un sistema HW y SW completo, y se ha probado finalmente con 100 usuarios de diferentes edades, razas y sexo, obteniendo los resultados mostrados al final de esta Tesis que confirman la viabilidad futura de la solución propuesta. Finalmente se indican las líneas de investigación futuras para mejorar la solución y obtener mejores resultados, así como para obtener una mayor comodidad a la hora de la captura de muestras del usuario.

Biometric identification for the compartment or service access is more and more important nowadays. Biometrics is a technology which brings higher security levels than other external identification methods because the information is inherently inside the human body, apart from providing recognition functions. Vascular biometric identification offers a very hopeful future in both subjects. Most of the biometric systems are based on hardware systems (HW) in order to take user samples in addition to software systems (SW) so as to process these ones.

The investigation task in vascular biometrics is focused on creating reliable and secure systems at this moment to obtain relevant solutions. We propose in this PhD thesis two important contributions for the identification using the above mentioned biometric modality:

1. A novel and economic hardware system in order to capture user patterns and samples, palm and wrist both, which offers images with enough quality for its further processing. Furthermore, unlike the previous found works, the design and specifications of this system are available openly to the scientific community.
2. An image processing system for the extracted veins images, based on the well-known Gauss and Convolution functions, and a novel decision making system, based on an orientation comparison of the extracted lines with the support of the wrist width value obtained for every user. All of this is also available to the scientific community, explaining every step in the whole process, unlike what happens with the limited existing scientific publications, which will be discussed along the present document.

A complete HW and SW system has been designed and developed so as to demonstrate the viability of these works, and this one has been finally tested

Abstract

with 100 users from different ages, races and sex, obtaining the results shown at the end of this PhD thesis, which confirm the future viability of the proposed solution. Finally, future investigation points are given to enhance the solution and to get better results, as well as to obtain a major comfort for the user sample captures.

1	Introducción.....	1
2	Sistemas biométricos.....	7
2.1	Introducción	7
2.2	Reclutamiento, autenticación e identificación	8
2.3	Diagrama de bloques de un sistema biométrico	9
2.4	Parámetros de medida y curvas de un sistema biométrico.....	10
2.4.1	Tasas de falsos negativos (FNMR/FRR).....	10
2.4.2	Tasas de falsos positivos (FMR/FAR).....	10
2.4.3	Tasa de igual error (EER/CER)	11
2.4.4	Curvas EER	11
2.4.5	Curvas ROC y DET	12
2.4.6	Curvas de distribución de probabilidad	13
2.5	Factores a cumplir por un sistema biométrico	13
2.6	Modalidades biométricas	14
2.7	Conclusiones	16
3	Biometría vascular	17
3.1	Introducción	17
3.2	Biometría vascular	17
3.3	Estado de la técnica en captura de muestras	18
3.4	Estado de la técnica en preprocesado.....	19
3.5	Revisión de las propuestas de extracción de características.....	20
3.6	Algoritmos de comparación propuestos en la bibliografía.....	25
3.7	Conclusiones	28
4	Sistema de captura de imágenes	31
4.1	Introducción	31
4.2	Fundamento del sistema de iluminación.....	31
4.2.1	Principio del sistema de iluminación NIR	32
4.2.2	Sistemas de captura de imágenes de partida	36
4.3	Sistema de captura de imágenes con iluminación superior	39
4.3.1	Resultados obtenidos con este sistema.....	42
4.4	Sistema de captura de imágenes reducido con iluminación superior	43
4.4.1	Resultados obtenidos con este sistema.....	45

Índice

4.5	Sistema de captura de imágenes final con iluminación prismática	47
4.5.1	Resultados obtenidos con este sistema.....	50
4.6	Sistema de captura de imágenes final con iluminación por bóveda	52
4.6.1	Resultados obtenidos con este sistema.....	55
4.6.2	Sistema final de fijación para la muñeca.....	57
4.7	Medidas de calidad de las imágenes de los sistemas de iluminación ...	61
4.7.1	Medidas de calidad utilizadas.....	62
4.7.2	Resultados obtenidos	65
4.8	Conclusiones	67
5	Preprocesado y extracción de características	69
5.1	Introducción	69
5.2	Extracción de la región de interés en las imágenes.....	70
5.2.1	Extracción de la región de interés en los patrones del reclutamiento.....	70
5.2.2	Extracción de la región de interés en las muestras para el reconocimiento.....	74
5.2.3	Resultados obtenidos	75
5.3	Extracción de características de la ROI	77
5.3.1	Función básica utilizada para la extracción.....	77
5.3.2	Funciones adicionales necesarias para su adaptación a sistemas vasculares	79
5.3.3	Resultados obtenidos	81
5.4	Conclusiones	85
6	Métodos de comparación para el reconocimiento.....	87
6.1	Introducción	87
6.2	Método de comparación basado en el diferente ancho de la muñeca... 88	
6.2.1	Resultados obtenidos	89
6.3	Método de comparación basado en la comparación orientable completa de imágenes.....	90
6.3.1	Descripción	91
6.3.2	Resultados obtenidos	92
6.3.3	Variante con traslaciones y rotaciones.....	96
6.4	Conclusiones	101
7	Optimización de la solución propuesta	103
7.1	Introducción	103
7.2	Parámetros óptimos para el sistema de captura de imágenes	103
7.3	Parámetros óptimos para el preprocesado de las imágenes	108

7.4	Parámetros óptimos para la extracción de características.....	109
7.5	Parámetros óptimos para los métodos de comparación.....	116
7.6	Conclusiones	118
8	Resultados obtenidos	119
8.1	Introducción	119
8.2	Resultados con el sistema primitivo de fijación, sin traslaciones ni rotaciones	121
8.3	Resultados con el sistema final de fijación	124
8.3.1	Sin traslaciones ni rotaciones, prueba para ajustar el parámetro RECRUIT_DIL	124
	A) Con el parámetro RECRUIT_DIL = 3	124
	B) Con el parámetro RECRUIT_DIL = 6, 9, 12 y 15	126
8.3.2	Sin traslaciones ni rotaciones, pruebas adicionales	131
8.3.3	Con traslaciones y rotaciones	133
8.4	Resultados con el sistema primitivo de fijación, con traslaciones y rotaciones	136
8.5	Resultados temporales	140
8.6	Conclusiones	142
9	Conclusiones y líneas de investigación futuras	145
9.1	Conclusiones generales.....	145
9.2	Líneas de investigación futuras	146
10	Referencias bibliográficas	149
	Anexo: Plataforma de pruebas	155
A.1	Introducción	155
A.2	Estructura y convenciones a adoptar.....	156
A.2.1	Sistema de carpetas.....	156
A.2.2	Convenios generales a adoptar con la plataforma de pruebas.....	158
A.2.3	Diagrama de bloques	162
A.3	Parte general reutilizable de la aplicación Matlab.....	164
A.3.1	Descripción de los bloques generales.....	164
A.3.2	Ajustes a realizar en la parte general por el investigador	165
A.3.3	Acciones a realizar en la parte general por el investigador	165
A.4	Parte específica de cada investigador de la aplicación Matlab.....	169

Índice

A.5	Bloque de resultados generados por la plataforma de pruebas.....	171
A.5.1	Documentación generada por la plataforma de pruebas	171
A.5.2	Ejemplos de la documentación generada por la plataforma de pruebas	173

Índice de tablas

Tabla 1	Comparativa final de resultados para los sistemas de iluminación	66
Tabla 2	Ejemplo de anchos de muñeca para 1.520 identificaciones y 80 autenticaciones	90
Tabla 3	Resultados del estudio de calidad para los parámetros del sistema de iluminación	108
Tabla 4	Tiempos de ejecución para los algoritmos con cada prueba	142
Tabla 5	Comparativa final de resultados para el sistema biométrico completo	143

Índice de figuras

Figura 1	Diagrama de bloques general de un sistema biométrico	9
Figura 2	Ejemplo de curvas EER	11
Figura 3	Ejemplo de curvas ROC y DET	12
Figura 4	Ejemplo de curvas de distribución de probabilidad	13
Figura 5	Tipos de sistemas biométricos	16
Figura 6	Imágenes de venas utilizando cámaras térmicas	19
Figura 7	Imagen de venas utilizando cámaras CCD e iluminación por infrarrojos	19
Figura 8	Método para obtener la ROI	20
Figura 9	Método para la extracción de características	22-23
Figura 10	Espectro electromagnético	32
Figura 11	Curva de respuesta para un sensor CCD	33
Figura 12	Interacción radiación-piel	34
Figura 13	Coeficiente de absorción espectral de los componentes de la piel	34

Índice de figuras

Figura 14	Diferencia entre los niveles de absorción espectral de la hemoglobina oxigenada (HbO ₂) y desoxigenada (Hb)	35
Figura 15	Sistema de captura de imágenes en [TIS95]	36
Figura 16	Imágenes obtenidas por el sistema de captura de imágenes en [TIS95]	37
Figura 17	Sistema de captura de imágenes en [BAH04]	37
Figura 18	Imágenes obtenidas por el sistema de captura de imágenes en [BAH04]	38
Figura 19	Imágenes obtenidas por el sistema de captura de imágenes en [NFI06]	38
Figura 20	Sistema de captura de imágenes en [EHV08]	38
Figura 21	Imágenes obtenidas por el sistema de captura de imágenes en [EHV08]	39
Figura 22	Principio de funcionamiento del sistema de captura de imágenes con iluminación superior	40
Figura 23	Sistema de captura de imágenes con iluminación superior	41
Figura 24	Diferentes vistas del sistema de captura de imágenes con iluminación superior	41
Figura 25	Imágenes de buena calidad obtenidas con el sistema de captura con iluminación superior	42
Figura 26	Imágenes de baja calidad obtenidas con el sistema de captura con iluminación superior	42
Figura 27	Principio de funcionamiento del sistema de captura de imágenes reducido con iluminación superior	44
Figura 28	Sistema de captura de imágenes reducido con iluminación superior	44
Figura 29	Diferentes vistas del sistema de captura de imágenes reducido con iluminación superior	45
Figura 30	Imágenes de buena calidad para las palmas obtenidas con el sistema de captura reducido con iluminación superior	46

Índice de figuras

Figura 31	Imágenes de baja calidad para las palmas obtenidas con el sistema de captura reducido con iluminación superior	46
Figura 32	Imágenes para las muñecas obtenidas con el sistema de captura reducido con iluminación superior	46-47
Figura 33	Principio de funcionamiento del sistema de captura de imágenes con iluminación prismática	48
Figura 34	Sistema de captura de imágenes con iluminación prismática	49
Figura 35	Diferentes vistas del sistema de captura de imágenes con iluminación prismática	49
Figura 36	Imágenes para las palmas obtenidas con el sistema de captura con iluminación prismática	50
Figura 37	Imágenes para las muñecas obtenidas con el sistema de captura con iluminación prismática	51
Figura 38	Sistema de iluminación por bóveda DOM	52
Figura 39	Principio de funcionamiento del sistema de captura de imágenes con iluminación por bóveda	53
Figura 40	Sistema de captura de imágenes con iluminación por bóveda y el sistema primitivo de fijación para la muñeca	54
Figura 41	Diferentes vistas del sistema de captura de imágenes con iluminación por bóveda	54
Figura 42	Imágenes obtenidas con el sistema de captura con iluminación por bóveda (Ganancia 260, Gamma 40 / Ganancia 260, Gamma 60)	56
Figura 43	Imágenes obtenidas con el sistema de captura con iluminación por bóveda (Ganancia 260, Gamma 100 / Ganancia 300, Gamma 40)	56
Figura 44	Imágenes obtenidas con el sistema de captura con iluminación por bóveda (Ganancia 300, Gamma 60 / Ganancia 300, Gamma 100)	56
Figura 45	Sistema final de fijación para la muñeca	58

Índice de figuras

Figura 46	Diferentes vistas del sistema de captura de imágenes con iluminación por bóveda y el sistema final de fijación para la muñeca	58
Figura 47	Principio de funcionamiento del sistema final de fijación para la muñeca	59
Figura 48	Imágenes obtenidas con el sistema de iluminación por bóveda y el sistema primitivo de fijación	60
Figura 49	Imágenes obtenidas con el sistema de iluminación por bóveda y el sistema final de fijación	61
Figura 50	Imagen de un patrón del reclutamiento	70
Figura 51	Imagen del patrón tras la ampliación de histograma	71
Figura 52	Imagen del patrón tras la reconstrucción morfológica ...	72
Figura 53	Diagrama de bloques del algoritmo de eliminación de píxeles interiores	72
Figura 54	Imagen del patrón tras la eliminación de píxeles interiores erróneos	73
Figura 55	Procedimiento para obtener la ROI de un patrón	74
Figura 56	Procedimiento para obtener la ROI de una muestra	75
Figura 57	Ejemplo de ROIs extraídas	76
Figura 58	Principio de funcionamiento del proceso completo de extracción de características	79
Figura 59	Principio de funcionamiento de la función de eliminación de líneas y puntos erróneos	81
Figura 60	Proceso completo de extracción de características	82-84
Figura 61	Ejemplo de patrones extraídos (todavía sin dilatar)	84
Figura 62	Decisión de aceptación potencial con el método de análisis basado en el diferente ancho de la muñeca	89
Figura 63	Decisión de rechazo con el método de análisis basado en el diferente ancho de la muñeca	89
Figura 64	Principio de funcionamiento del método de comparación orientable completa de imágenes	91

Índice de figuras

Figura 65	Decisión de aceptación para el método de análisis basado en la comparación orientable completa de imágenes	92-93
Figura 66	Decisión de rechazo para el método de análisis basado en la comparación orientable completa de imágenes	94-95
Figura 67	Curva de distribución de probabilidad de los resultados obtenidos con el método de comparación orientable completa al comparar un usuario con los 22 usuarios de la base de datos	95
Figura 68	Decisión de rechazo errónea por desviación en las imágenes de muestra y patrón	96
Figura 69	Principio de funcionamiento gráfico de las traslaciones y rotaciones realizadas por la variante del algoritmo	97
Figura 70	Principio de funcionamiento del método de comparación orientable completa de imágenes con la variante de traslaciones y rotaciones	99
Figura 71	Curva de distribución de probabilidad de los resultados obtenidos al aplicar el algoritmo de traslaciones y rotaciones	100
Figura 72	Imágenes obtenidas con diferentes valores para el parámetro de la alimentación de la cámara	105
Figura 73	Imágenes obtenidas con diferentes valores para el parámetro de la exposición del software de la cámara .	106
Figura 74	Imágenes obtenidas con diferentes valores para el parámetro Gamma del software de la cámara	107
Figura 75	Ajustes para la extracción de características: N1=9; N2=5; SS=1,8; SD=0,5	110
Figura 76	Ajustes para la extracción de características: N1=20; N2=30; SS=1,8; SD=0,5	111
Figura 77	Ajustes para la extracción de características: N1=20; N2=30; SS=6,8; SD=3,5	112
Figura 78	Ajustes para la extracción de características: N1=20; N2=30; SS=6,8; SD=4,5	113

Índice de figuras

Figura 79	Patrón con valores diferentes de RECRUIT_DIL	114-116
Figura 80	Curvas de distribución de probabilidad de las comparaciones intraclase e interclase con el sistema primitivo de fijación, sin utilizar ni traslaciones ni rotaciones	122
Figura 81	Curvas EER para los resultados con el sistema primitivo de fijación, sin utilizar ni traslaciones ni rotaciones	122
Figura 82	Fallos típicos con el sistema primitivo de fijación, sin utilizar ni traslaciones ni rotaciones	123
Figura 83	Curvas de distribución de probabilidad de las comparaciones intraclase e interclase con el sistema final de fijación, sin utilizar ni traslaciones ni rotaciones y RECRUIT_DIL = 3	125
Figura 84	Curvas EER para los resultados con el sistema final de fijación, sin utilizar ni traslaciones ni rotaciones y RECRUIT_DIL = 3	125
Figura 85	Curvas de distribución de probabilidad de las comparaciones intraclase e interclase con el sistema final de fijación, sin utilizar ni traslaciones ni rotaciones y RECRUIT_DIL = 6	126
Figura 86	Curvas de distribución de probabilidad de las comparaciones intraclase e interclase con el sistema final de fijación, sin utilizar ni traslaciones ni rotaciones y RECRUIT_DIL = 9	127
Figura 87	Curvas de distribución de probabilidad de las comparaciones intraclase e interclase con el sistema final de fijación, sin utilizar ni traslaciones ni rotaciones y RECRUIT_DIL = 12	127
Figura 88	Curvas de distribución de probabilidad de las comparaciones intraclase e interclase con el sistema final de fijación, sin utilizar ni traslaciones ni rotaciones y RECRUIT_DIL = 15	128
Figura 89	Curvas EER para los resultados con el sistema de final de fijación, sin utilizar ni traslaciones ni rotaciones y RECRUIT_DIL = 6	128

Índice de figuras

Figura 90	Curvas EER para los resultados con el sistema final de fijación, sin utilizar ni traslaciones ni rotaciones y RECRUIT_DIL = 9	129
Figura 91	Curvas EER para los resultados con el sistema final de fijación, sin utilizar ni traslaciones ni rotaciones y RECRUIT_DIL = 12	129
Figura 92	Curvas EER para los resultados con el sistema final de fijación, sin utilizar ni traslaciones ni rotaciones y RECRUIT_DIL = 15	130
Figura 93	Curvas de distribución de probabilidad de las comparaciones intraclase e interclase con el sistema final de fijación, sin utilizar ni traslaciones ni rotaciones, DIL = 6 y 100 usuarios	132
Figura 94	Curvas EER para los resultados con el sistema final de fijación, sin utilizar ni traslaciones ni rotaciones, DIL = 6 y 100 usuarios	132
Figura 95	Curvas de distribución de probabilidad para los resultados con el sistema final de fijación, utilizando traslaciones y rotaciones, DIL = 6 y 100 usuarios, para el primer método de comparación y autenticaciones	134
Figura 96	Curvas de distribución de probabilidad para los resultados con el sistema final de fijación, utilizando traslaciones y rotaciones, DIL = 6 y 100 usuarios, para el primer método de comparación, autenticaciones e identificaciones	135
Figura 97	Curvas EER para los resultados con el sistema final de fijación, utilizando traslaciones y rotaciones, DIL = 6 y 100 usuarios, para el segundo método de comparación	135
Figura 98	Curvas de distribución de probabilidad para los resultados con el sistema primitivo de fijación, utilizando traslaciones y rotaciones, para el primer método de comparación y autenticaciones	138
Figura 99	Curvas de distribución de probabilidad para los resultados con el sistema primitivo de fijación, utilizando traslaciones y rotaciones, para el primer método de comparación, autenticaciones e identificaciones	138

Índice de figuras

Figura 100	Curvas de distribución de probabilidad de las comparaciones intraclase e interclase con el sistema primitivo de fijación, utilizando traslaciones y rotaciones, para el segundo método de comparación ..	139
Figura 101	Curvas EER para los resultados con el sistema primitivo de fijación, utilizando traslaciones y rotaciones, para el segundo método de comparación ..	139
Figura 102	Diagrama de bloques de la plataforma de pruebas	163
Figura 103	Ejemplo de documentación BMP - Archivo "User_00013_R_00M_ROI.bmp"	174
Figura 104	Ejemplo de documentación BMP - Archivo "User_00013_R_00M_RECRUITMENT.bmp"	174
Figura 105	Ejemplo de documentación BMP - Archivo "User_00013_R_00M_RECRUITMENT_BIN_45.bmp" .	174
Figura 106	Ejemplo de documentación BMP - Archivo "User_00013_R_00M_RECRUITMENT_BIN_90.bmp" .	175
Figura 107	Ejemplo de documentación BMP - Archivo "User_00013_R_00M_RECRUITMENT_BIN_135.bmp" .	175
Figura 108	Ejemplo de documentación BMP - Archivo "User_00013_R_00M_RECRUITMENT_BIN_TOTAL.bmp"	175
Figura 109	Ejemplo de documentación BMP - Archivo "User_00013_R_00M_RECRUITMENT_TOGETHER.bmp"	176
Figura 110	Ejemplo de documentación BMP - Archivo "User_00013_R_004_AUTHENTICATION.bmp"	176
Figura 111	Ejemplo de documentación BMP - Archivo "User_00013_R_004_AUTHENTICATION_BIN_45.bmp"	176
Figura 112	Ejemplo de documentación BMP - Archivo "User_00013_R_004_AUTHENTICATION_BIN_90.bmp"	177
Figura 113	Ejemplo de documentación BMP - Archivo "User_00013_R_004_AUTHENTICATION_BIN_135.bmp"	177

Índice de figuras

Figura 114	Ejemplo de documentación BMP - Archivo "User_00013_R_004_AUTHENTICATION _TOTAL.bmp"	177
Figura 115	Ejemplo de documentación BMP - Archivo "User_00013_R_004_AUTHENTICATION_ TOGETHER.bmp"	178
Figura 116	Ejemplo de documentación BMP - Archivos "User_00013_R_004_IDENTIFICACION_AGAINST _USER_X..bmp"	178
Figura 117	Ejemplo de documentación TXT - Archivo "User_00013_L_00M_ROI.txt"	179
Figura 118	Ejemplo de documentación TXT - Archivo "User_00013_L_004_ROI.txt"	179
Figura 119	Ejemplo de documentación TXT - Archivo "User_00013_L_004_AUTHENTICATION.txt"	179
Figura 120	Ejemplo de documentación TXT - Archivo "User_00013_R_004_IDENTIFICACION_AGAINST _USER_00010.txt"	180
Figura 121	Ejemplo de documentación XLS - Archivo "Results_ROI.xls" -> Hoja "ROI_Data_Recruitment"	180
Figura 122	Ejemplo de documentación XLS - Archivo "Results_ROI.xls" -> Hoja "ROI_Data_Autentication" ...	181
Figura 123	Ejemplo de documentación XLS - Archivo "Results_ROI.xls" -> Hoja "ROI_Data_Identificacation"	181
Figura 124	Ejemplo de documentación XLS - Archivo "Results_Authentication.xls" -> Hoja "User_13_Right" ..	182
Figura 125	Ejemplo de documentación XLS - Archivo "Results_Identification.xls" -> Hoja "Results_Identification"	182
Figura 126	Ejemplo de documentación XLS - Archivo "Results_Identification.xls" -> Hoja "Results_Overview"	183
Figura 127	Ejemplo de documentación en consola de MATLAB - Con el reclutamiento individual, por ejemplo, de la muestra derecha del usuario 00001	183

Índice de figuras

Figura 128	Ejemplo de documentación en consola de MATLAB - Con el reclutamiento múltiple, por ejemplo, de los 3 usuarios de la base de datos de usuarios	184
Figura 129	Ejemplo de documentación en consola de MATLAB - Con la autenticación individual, por ejemplo, de la muestra 4 izquierda del usuario 00003	185
Figura 130	Ejemplo de documentación en consola de MATLAB - Con la autenticación múltiple, por ejemplo, de las 4 muestras izquierdas del usuario 00001	186
Figura 131	Ejemplo de documentación en consola de MATLAB - Con la identificación individual o múltiple, por ejemplo, de las 4 muestras izquierdas del usuario 00002 frente a los 3 usuarios de la base de datos de usuarios	187

Acrónimos

ADN	Ácido Desoxirribonucleico
CCD	Charge-Coupled Device (Dispositivo de Carga Acoplada)
CENIT	Consortios Estratégicos Nacionales de Investigación Tecnológica
CER	Cross-over Error Rate (Tasa de Cruce de Error)
DET	Detection Error Trade-off (Correlación de Detección de Error)
DOM	Sistema de Iluminación Domo
EER	Equal Error Rate (Tasa de Igual Error)
FNMR	False Non-Match Rate (Tasa de Falsos Negativos)
FRR	False Rejection Rate (Tasa de Falso Rechazo)
FMR	False Match Rate (Tasa de Falsos Positivos)
FAR	False Acceptance Rate (Tasa de Falsa Aceptación)
FW	Finger Width (Ancho de Dedo)
GoA	Global Approach (Aproximación Global)
GUTI	Grupo Universitario de Tecnologías de Identificación
HW	Hardware
IC	Imaging Capture (Captura de Imágenes)
IR	Infrared (Infrarrojo)
LED	Light-Emitting Diode (Diodo Emisor de Luz)
LoA	Local Approach (Aproximación Local)
NIR	Near Infrared (Infrarrojo Cercano)
PC	Personal Computer (Ordenador Personal)
PIBES	Perfeccionamiento de la Identificación Biométrica y Evaluación de su Seguridad
ROC	Receiver Operating Characteristic (Curva de Funcionamiento del Receptor)
ROI	Region of Interest (Región de Interés)
SAX	Sistema de Iluminación Axial
SW	Software
TXT	Archivo de texto sin formato
USB	Universal Serial Bus (Bus Serie Universal)
VWLIP	Variation of the Wide Line Integrated Profile (Variación del Perfil Integrado de Línea Ancha)
WLIP	Wide Line Integrated Profile (Perfil Integrado de Línea Ancha)
XLS	Archivo de Excel

Introducción

La identificación biométrica por las venas del ser humano, y en concreto por las de determinados apéndices, como las manos o los dedos, es una de las modalidades más recientes y de mayor potencial. Existen en el mercado tres sistemas comerciales de tecnologías dispares: TechSphere [TEC07] utiliza el dorso de la mano, Fujitsu [FUJI06] utiliza la palma de la misma, e Hitachi [HITA06] utiliza el dedo. Sin embargo, desde el punto de vista científico, existen pocas publicaciones con detalles de esta modalidad biométrica, ya que casi todas ellas están sujetas al secreto de sus patentes (esto se puede apreciar en el apartado de referencias bibliográficas). Sólo se pueden encontrar algunas comunicaciones a nivel de congreso, con determinados datos parciales, pero por desgracia poca información de relevancia está disponible como para implementar un sistema de estas características basándose en dichos textos. Esta falta de información al inicio de los trabajos de esta Tesis está reflejada en el capítulo 2.

La presente Tesis Doctoral arranca de los resultados obtenidos en diversos proyectos previos del Grupo de Investigación GUTI. En especial, de lo indicado en el proyecto TEC2006-12365 PIBES, donde se trabajó en perfeccionar muchos aspectos de la identificación biométrica que permitieron progresar en el estado de la técnica y facilitar su aplicación práctica. Dicho proyecto PIBES recomendó líneas futuras de investigación, entre las que se cuentan:

- Crear prototipos funcionales cercanos a las aplicaciones finales (escenarios reales), que pongan a prueba la viabilidad de la tecnología de identificación y autenticación disponible.

- Mejorar las prestaciones y el coste de los dispositivos hardware, mientras se incrementa su seguridad.
- Desarrollar nuevos sistemas de identificación biométrica que sean más robustos y potentes en hardware y software.
- Profundizar en la metodología de evaluación de los sistemas de identificación biométrica.

Esta Tesis se enmarca dentro de estos objetivos, con especial énfasis en los tres primeros, mediante el desarrollo de una nueva solución de identificación completa, basada en el estudio de la estructura vascular del sujeto, especialmente centrado en las venas de la mano, y con especial aplicación a la muñeca.

A lo largo del proyecto PIBES, miembros del Grupo de Investigación donde se enmarca esta propuesta han evaluado en detenimiento el rendimiento de algunos sistemas de biometría vascular, obteniendo conclusiones muy esperanzadoras sobre la mejora de estos dispositivos. A su vez, gracias al proyecto CENIT Secur@, se ha trabajado parcialmente en la captura de las imágenes de venas de la mano, tanto en palma como en dorso (parte de los trabajos aquí presentados se han desarrollado dentro del marco de dicho proyecto). Los resultados obtenidos permiten abrir una puerta a la obtención de un sistema de captura de altas prestaciones, bajo coste y especificaciones abiertas (algo que actualmente no es posible conseguir con los sistemas comerciales actuales), incluyendo también la opción de la muñeca.

Al mismo tiempo, la participación del Grupo de Investigación GUTI en distintos eventos públicos de diseminación de la investigación, como la Semana de la Ciencia o la Feria de Madrid es Ciencia, ha servido para comprobar que la aceptación social de la tecnología es extremadamente alta, sin encontrarse casos de rechazo por vinculaciones de salud o policiales.

Partiendo de todos estos precedentes, esta Tesis Doctoral parte de cero en cuanto a trabajos desarrollados previamente en el grupo de Investigación GUTI, aunque se ha partido del análisis previo de la poca documentación

técnica existente sobre tecnología vascular en los documentos y de artículos técnicos que se irán citando a lo largo de este documento, y que se pueden consultar en las referencias bibliográficas.

Su objetivo final será la de diseñar los mecanismos necesarios para crear un sistema completo de identificación vascular, tanto a nivel de algoritmo como a nivel del dispositivo de captura. Los mecanismos diseñados se probarán desarrollándolos por completo, creando un sistema fiable, robusto y abierto, manteniendo en mente durante su desarrollo todas las líneas comentadas anteriormente indicadas en el proyecto PIBES, y así proporcionar desde el inicio las garantías de seguridad necesarias a esta nueva modalidad.

Como se ha mencionado, este sistema incluirá un primer dispositivo de captura de imágenes vasculares de calidad y con bajo coste, mediante la utilización del espectro infrarrojo adecuado, y una plataforma de pruebas software adicional abierta que sea capaz de procesar dichas imágenes, comprobar su funcionamiento mediante algún algoritmo de extracción de características de venas sencillo y proporcionar unos resultados de reconocimiento (autenticación e identificación) aceptables. Dicha plataforma de pruebas se diseñará de tal manera que sea aplicable a otros algoritmos para su utilización por cualquier investigador de sistemas biométricos vasculares, y por tanto aumentar su reutilización en el futuro.

Para ello, se plantea una metodología basada en el estudio inicial del Estado de la Técnica y el paulatino desarrollo de los diversos módulos que compondrán el sistema de identificación vascular completo. El primer paso será el de trabajar en encontrar un sistema de captura de imágenes vasculares que sea capaz de obtener buenas imágenes y de calidad, intentando homogeneizar la iluminación de la misma. Una vez obtenidas estas imágenes vasculares con la suficiente calidad, se investigará en métodos de extracción de características de la estructura vascular del usuario, decidiendo por uno de ellos para validar el sistema y seguir con el sistema software.

Los algoritmos software para la fase de reconocimiento serán elegidos por su sencillez para evitar altos tiempos de ejecución, ya que el objetivo primordial es obtener un sistema completo fiable y operativo, que sirva de base para futuros trabajos por otros investigadores, ya sean dentro del Grupo de Investigación GUTI o internacionalmente. La plataforma de pruebas se desarrollará en paralelo a todos estos trabajos y completándose paulatinamente según surjan las necesidades de investigación, consiguiéndose finalmente un sistema totalmente abierto y reutilizable. Finalmente, todo el sistema se irá probando en cada fase con las diferentes imágenes vasculares obtenidas paulatinamente por el sistema de captura desarrollado.

La estructura de este documento está dividida de la siguiente manera:

- El capítulo 1 es una breve introducción del trabajo, explicando los objetivos perseguidos, la metodología utilizada y la estructura de todo el documento
- En el capítulo 2 se describen las características y los conceptos más importantes de los sistemas biométricos, necesarios para comprender el trabajo realizado en esta Tesis Doctoral.
- Con la finalidad de dar una visión general sobre la literatura existente, en el capítulo 3 se revisa la literatura disponible sobre los sistemas biométricos vasculares.
- En el capítulo 4 se presenta el sistema de captura de imágenes vasculares finalmente obtenido, explicando los diferentes dispositivos probados hasta llegar a la solución definitiva, y se presentan los resultados finales en imágenes y en medidas de calidad.
- El capítulo 5 trata sobre los métodos de procesamiento de las imágenes vasculares obtenidas utilizados con la plataforma software desarrollada para esta Tesis Doctoral, mientras que el capítulo 6 versa sobre los algoritmos utilizados para la toma de decisiones en el reconocimiento.
- En el capítulo 7 se indican los parámetros óptimos para todo el sistema, tanto a nivel hardware como a nivel software

- El capítulo 8 presenta los resultados obtenidos por la plataforma software con las imágenes vasculares del sistema de captura final descrito en el capítulo 4, el cual permite validar el sistema completo.
- Finalmente, el capítulo 9 está dedicado a proporcionar las conclusiones más importantes, así como a mencionar las posibles mejoras y líneas de investigación futuras, basándose en los resultados obtenidos por esta Tesis Doctoral.

Sistemas biométricos

2.1 Introducción

Antes de comenzar con la exposición de la Tesis, sus algoritmos y conclusiones, se va dar en este capítulo una visión general sobre los sistemas biométricos y la biometría en general, explicando sus características y parámetros más importantes, necesarios para la comprensión del trabajo descrito en este documento.

La biometría es la ciencia que trata de reconocer a una persona utilizando para ello sus características físicas o de comportamiento [BPI99]. Dichas características se pueden medir por métodos manuales y/o automáticos y se pueden medir parámetros físicos, de comportamiento o ambos.

Identificar a personas por sus parámetros físicos o de comportamiento es tan antiguo como el hombre. Esto, que parece tan sencillo para el cerebro humano, está resultando realmente complejo de automatizar. Los dos objetivos fundamentales buscados por la biometría automática son principalmente tres: realizar la identificación en entornos donde no se puede tener a una persona para realizar esta operación, evitar el riesgo de fallos por cansancio humano y proporcionar medios de autenticación de personas más familiares y cercanos al comportamiento humano. La biometría empieza a surgir como “ciencia” en cuanto se necesita constatar objetivamente esa identidad. Nace inicialmente la firma manuscrita, la huella dactilar o las medidas corporales, pero en los últimos tiempos existen nuevas técnicas como la identificación por iris, retina, facial, ADN, etc., y más recientemente la identificación vascular. En esta Tesis se plantea un nuevo método automático de identificación biométrica vascular basado en las venas de las muñecas.

2.2 Reclutamiento, autenticación e identificación

Tal como se indica en [TIS95], todos los sistemas biométricos requieren que cada usuario autorizado sea reclutado. Esto significa que cada usuario muestre su parte física relevante o ejecute el comportamiento adecuado frente al sistema una o varias veces, para así crear uno o varios **patrones** (también denominados como **referencias biométricas**). Este patrón se debe guardar en una base de datos para su posterior elaboración. Cuando el usuario quiera acceder al sistema, deberá hacer lo mismo que en el reclutamiento (mostrar la misma parte física o ejecutar el mismo comportamiento) para generar lo que a partir de ahora denominaremos como **muestra**, y el sistema se encargará de compararlas y reconocer su grado de coincidencia para emitir una decisión positiva o negativa en función de un umbral de comparación previamente establecido.

Atendiendo a la comparación, el **reconocimiento biométrico** puede realizarse de dos maneras diferentes.

- Se puede tratar de responder a la pregunta “¿Eres tú quien dices ser?”. En este caso se compara la muestra obtenida del usuario con el patrón almacenado de la persona supuesta y se toma una decisión. Este tipo de reconocimiento se denomina **autenticación** o **verificación** y sólo necesita realizar una única comparación, con lo que su tiempo de decisión es bajo. Para ello, el sistema tiene que permitir al usuario que declare su identidad de alguna manera (a través de un número de usuario, una tarjeta, etc.). Se conoce también como comparación 1:1.
- O se puede intentar reconocer a una persona dentro de un grupo previamente reclutado. En este caso se compara la muestra obtenida del usuario con los patrones almacenados de todos los usuarios. Este tipo de reconocimiento biométrico se denomina **identificación** y requiere que se realicen muchas comparaciones, con lo que su tiempo de decisión es relativamente alto en función del número de usuarios del sistema. Se conoce también como comparación 1:N, siendo N el número de usuarios reclutados en el sistema.

2.3 Diagrama de bloques de un sistema biométrico

Independientemente de que el reconocimiento sea del tipo autenticación o identificación, todos los sistemas biométricos cumplen siempre con un mismo diagrama de bloques general, que luego se puede particularizar para cada sistema. Hay muchos diagramas de bloques generales que podrían ser válidos para cualquier sistema con escasas adaptaciones, por ejemplo, los indicados en [GSS06], [BVU04] o [CHW10], pero a lo largo de esta Tesis, se va a utilizar el mostrado en la figura 1.

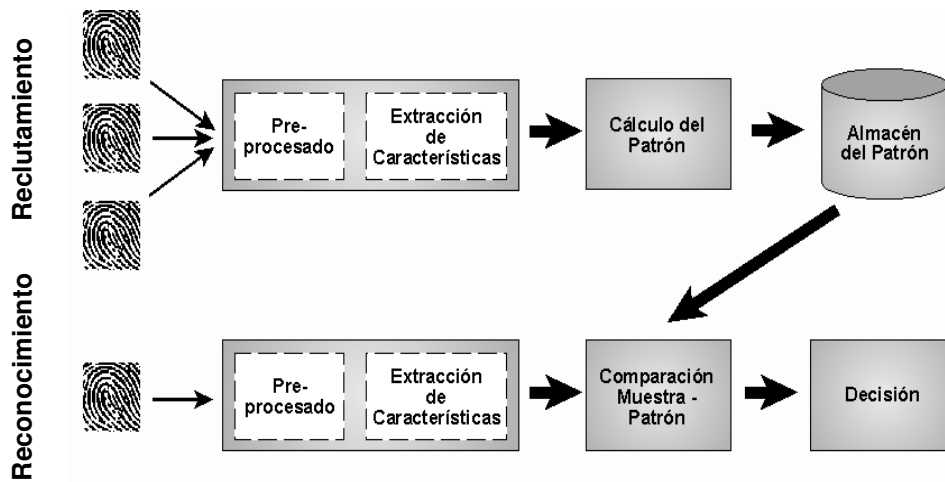


Figura 1: Diagrama de bloques general de un sistema biométrico [REI06a]

En dicha figura se pueden ver las diferentes fases de un sistema biométrico. Primero se realiza el reclutamiento con la toma de la muestra o muestras del usuario, se preprocesan para mejorar su calidad, se extraen las características más importantes y finalmente se obtiene el patrón del usuario guardándose para posteriores comparaciones. Cuando un usuario deba ser reconocido (autenticación o verificación), se vuelve a tomar una o varias muestras del usuario, se preprocesa, se extraen las características de dicha muestra y finalmente se compara ésta última con el patrón guardado anteriormente para tomar una decisión de reconocimiento.

Este modelo ha sido la base utilizada para el desarrollo del sistema de captura de imágenes indicado en el capítulo 4, del preprocesado y extracción de características del capítulo 5, del método de análisis para el reconocimiento del capítulo 6 y de la plataforma de pruebas indicada en el anexo.

2.4 Parámetros de medida y curvas de un sistema biométrico

Sin embargo, tal como indica el Dr. Raúl Sánchez Reíllo en [REI06a], la probabilidad de que dos imágenes tomadas del mismo sujeto sean idénticas es prácticamente nula y/o la probabilidad de que dos vectores de características obtenidos de dos imágenes del mismo sujeto sean iguales es muy baja.

Por tanto, al no ser iguales, hay que realizar “mediciones de parecido” o “medidas de calidad del sistema biométrico”. Usando técnicas matemáticas, hay que establecer umbrales que indiquen cuándo dicho parecido es razonable y cuándo no lo es. Para ello se utilizan las denominadas tasas de error y curvas representativas de la estadística que envuelven esas medidas de parecido.

En [IBG10] y [VSI94] se pueden consultar casi todas ellas, de entre las que destacan las utilizadas en esta Tesis para dar resultados, por ser las más aceptadas por los investigadores y que se explican brevemente a continuación.

2.4.1 Tasas de falsos negativos (FNMR/FRR)

Las tasas de falsos negativos son fundamentalmente dos: *False Non-Match Rate* (FNMR) y *False Rejection Rate* (FRR). La primera expresa el porcentaje de veces en las que el algoritmo de comparación da como no iguales dos muestras del mismo usuario. La segunda indica el porcentaje de veces que un usuario válido es rechazado por el sistema. En el caso de que el sistema esté diseñado para tomar la decisión final basada en un único intento, FNMR y FRR son equivalentes. Hay que intentar siempre que se acerquen lo más posible a cero.

2.4.2 Tasas de falsos positivos (FMR/FAR)

Las tasas de falsos positivos son dos: *False Match Rate* (FMR) y *False Acceptance Rate* (FAR). La primera expresa el porcentaje de veces en las que el algoritmo de comparación da como iguales dos muestras de usuarios distintos. La segunda indica el porcentaje de veces que ocurre que un intruso es reconocido por el sistema o que un usuario es erróneamente identificado. De la misma forma, hay que intentar que se acerquen lo más posible a cero.

2.4.3 Tasa de igual error (EER/CER)

Las dos tasas de error anteriores son complementarias. Jugando con los parámetros del sistema se puede forzar la calidad de un sistema biométrico, intentando que uno de los dos sea cero, pero a costa de que el otro probablemente suba. Ambos, sin embargo, por sí solos no dan una idea clara de dicha calidad, por lo que se suelen fundir en un nuevo parámetro, *Equal Error Rate* (EER) o tasa de igual error, también denominado *Cross-over Error Rate* (CER) o tasa de cruce de error, que indica el punto en el que FAR y FMR tienen el mismo valor. Este parámetro da una primera idea del rendimiento del sistema, aunque no es totalmente determinante, ya que el sistema puede que se configure para que trabaje en un punto distinto del EER, ya bien sea para aumentar la usabilidad (disminuyendo el FRR) o para aumentar la seguridad (disminuyendo el FAR).

2.4.4 Curvas EER

Estos tres parámetros se pueden representar gráficamente en las llamadas curvas EER, para lo cual se dibuja la curva FNMR (o la FRR si se está trabajando a nivel de sistema) y la curva FMR (o la FAR si se está trabajando a nivel de sistema) tomando sus respectivos valores en función de diferentes valores de umbral. Donde se crucen las curvas, se tiene el valor EER. El sistema biométrico será tanto mejor cuanto más separadas estén las curvas y cuanto más cerca de cero esté el valor EER. Un ejemplo de estas curvas se muestra en la figura 2.

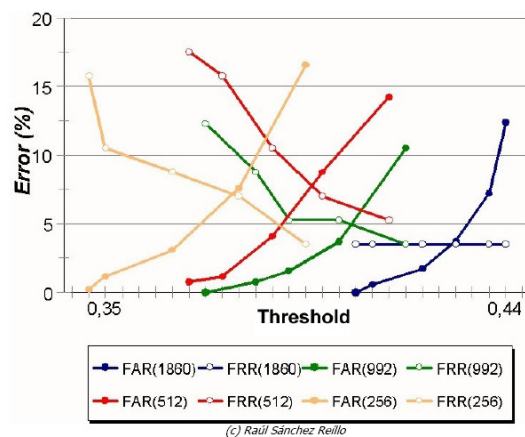
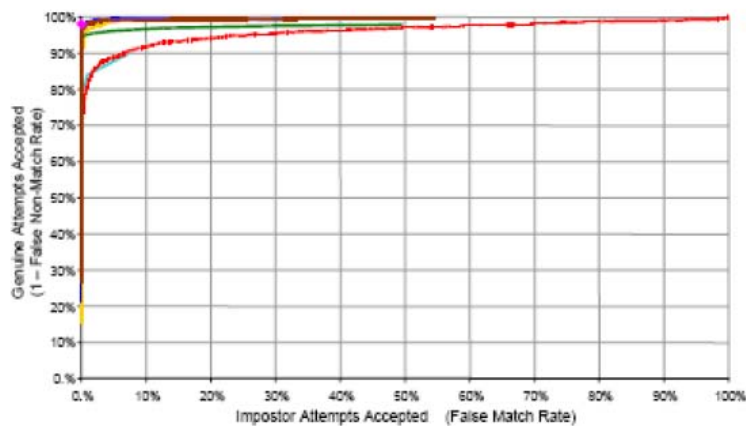


Figura 2: Ejemplo de curvas EER [REI06a]

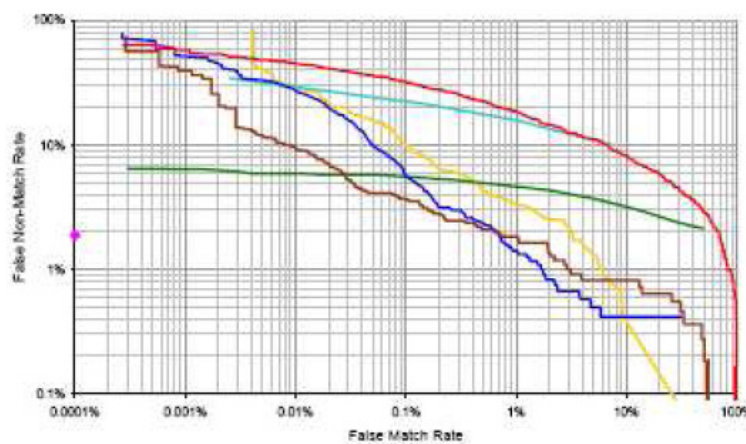
2.4.5 Curvas ROC y DET

Otras curvas que se utiliza para representar los mismos tres parámetros anteriores son las curvas ROC (*Receiver Operating Characteristic*) o DET (*Detection Error Trade-off*).

En las curvas ROC se representa una curva logarítmica con ejes en los valores de FNMR (eje de ordenadas) y FMR (eje de abscisas), de forma que el valor EER es el punto de la diagonal con pendiente 1. En las curvas DET se hace básicamente lo mismo pero se utiliza una escala de desviación normal en ambos ejes. El sistema biométrico será tanto mejor cuanto más se pegue la curva al vértice superior izquierdo (curva ROC) o al vértice superior derecho (curva DET). A continuación, se muestra un ejemplo de curvas DET y ROC en la figura 3.



Curvas ROC



Curvas DET

Figura 3: Ejemplos de curvas ROC y DET [BPI02]

2.4.6 Curvas de distribución de probabilidad

Las curvas ERR, ROC y DET dan una idea muy buena de la calidad, pero no deben tomarse como un factor determinante para la misma. Hay otro tipo de curva que también se debe utilizar para esta tarea y que complementa a las curvas anteriores. Es la llamada curva de distribución de probabilidad. En estas curvas se representan normalizadas las curvas de distribución de probabilidad de los parámetros FAR y FRR, de forma que el sistema será tanto mejor cuanto más separadas estén las curvas de distribución de probabilidad y menor sea el área de intersección de las mismas. Si existe intersección entre las curvas FAR y FRR, para cada umbral se puede conocer el valor de sus valores. La figura 4 muestra un ejemplo general de curvas de distribución de probabilidad para FAR y FRR en la que se pueden observar sus valores para un umbral seleccionado.

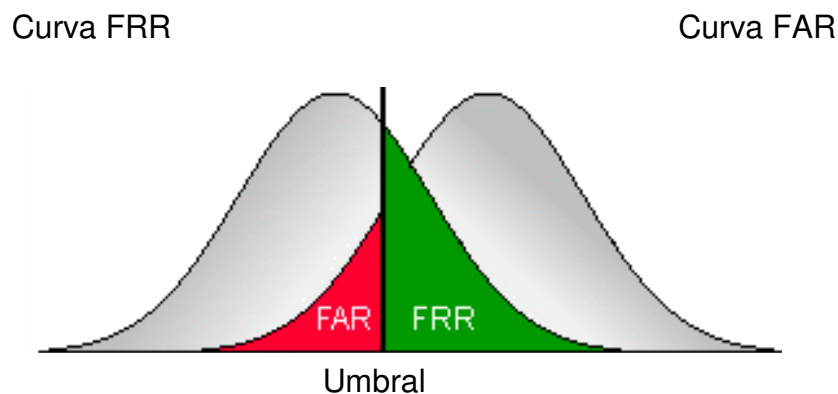


Figura 4: Ejemplo de curvas de distribución de probabilidad

2.5 Factores a cumplir por un sistema biométrico

Los parámetros observables en las anteriores curvas pueden dar una primera idea de la idoneidad del sistema biométrico. Sin embargo, tal como se cita en [BVU04], hay otra serie de factores que pueden influenciar en la popularidad, aplicación y rendimiento de un sistema de identificación biométrica (aparte de los parámetros de medida biométrica), por lo que no es sorprendente que no haya ninguna técnica que sea capaz de cumplir con todo lo indicado en [VSI94]. Los más importantes son los indicados en [REI06a] y el sistema desarrollado en esta Tesis intenta cumplir con la mayoría de ellos:

- **Universalidad:** El porcentaje de sujetos potenciales de pertenecer a un sistema de identificación, de los que se podría extraer un patrón o una muestra. Hay que intentar que sea lo mayor posible.
- **Unicidad:** La probabilidad de que dos muestras de dos sujetos distintos tengan las mismas características. Nunca debería haber dos vectores de características iguales de usuarios diferentes.
- **Estabilidad:** Si las características utilizadas permanecen inalteradas respecto al tiempo, a enfermedades, a edad, a profesión laboral, etc. En el caso de que se alteren, se debe determinar o minimizar dicha variabilidad. Harían falta más estudios sobre ello.
- **Facilidad de captura:** Los mecanismos de toma de patrones y muestras deben ser lo más cómodos posibles para evitar el rechazo del usuario.
- **Robustez frente al fraude:** Detección de sujeto vivo, detección de sujeto amenazado, etc. Debe implementarse en paralelo a los sistemas para evitar el rechazo por parte del usuario.
- **Coste:** Tanto de los equipos hardware y del software, así como el coste de implantación. Deberían ser lo más bajos posible.
- **Aceptación por parte del usuario:** Puede resultar sorprendente, pero si no se tiene en cuenta la aceptación del sistema por parte del usuario, los sistemas que cumplan con todos los demás factores no podrán ser utilizados. Los usuarios pueden rechazar el uso del sistema por muchos motivos: temor a sufrir daños colaterales (“real” (retina) o por total desconocimiento (iris)), por implicaciones legales (huella), por implicaciones “laborales”, por tasas de error “elevadas”, por desidia o cansancio (voz), por falta de comodidad, etc.

2.6 Modalidades biométricas

Finalmente, aunque ya se han mencionado en la introducción de este capítulo, indicar que existen muy variados sistemas de identificación biométrica basados en distintas modalidades. Muchos de ellos pueden usarse

potencialmente, pero sólo algunos están suficientemente desarrollados como para una implantación real. A continuación se citan las modalidades más importantes sobre las que se están realizando estudios de investigación conocidos. Las ventajas y desventajas de cada una de ellos se pueden consultar en [REI06b] o [LPR04]:

- **ADN:** Se analizan las muestras orgánicas de un individuo a nivel microscópico. Es la única técnica válida hoy en día a nivel legal, con un grado de confianza que prácticamente se puede considerar del 100%.
- **Firma manuscrita:** Se toman muestras de la firma del sujeto (o de cómo firma) y se analizan sus características.
- **Huella dactilar:** Se obtiene una imagen de la huella dactilar del sujeto (de uno o varios de sus dedos) y se extraen sus minucias.
- **Voz:** Se toman muestras de voz del usuario mediante un micrófono y se extrae su vector de características.
- **Cara:** Se obtiene una foto de la cara del sujeto, ya sea en 2 o en 3 dimensiones, y se obtienen las características más relevantes.
- **Geometría de la mano:** Se toma una imagen de la mano del sujeto, en un entorno controlado y se analiza su morfología.
- **Iris:** Se obtiene una foto o una secuencia de video del ojo del sujeto, se aísla el iris y se extraen las características del mismo.
- **Retina:** Se toma una imagen del fondo del ojo y se analiza la capilaridad existente en la pared de la retina.
- **Vascular:** Se obtiene una imagen de la mano/muñeca/dedo con iluminación por infrarrojos o una cámara térmica, sacando la disposición de las venas interiores y analizando sus características. Este es el tipo biométrico desarrollado en esta Tesis, cuyo Estado de la Técnica se describe en el siguiente capítulo.

A priori no se puede decir que una técnica sea mejor que otra, depende de la aplicación y del objetivo perseguido. Incluso sería deseable mezclar

varias entre sí. La figura 5 ilustra cada una de las modalidades mencionadas anteriormente.

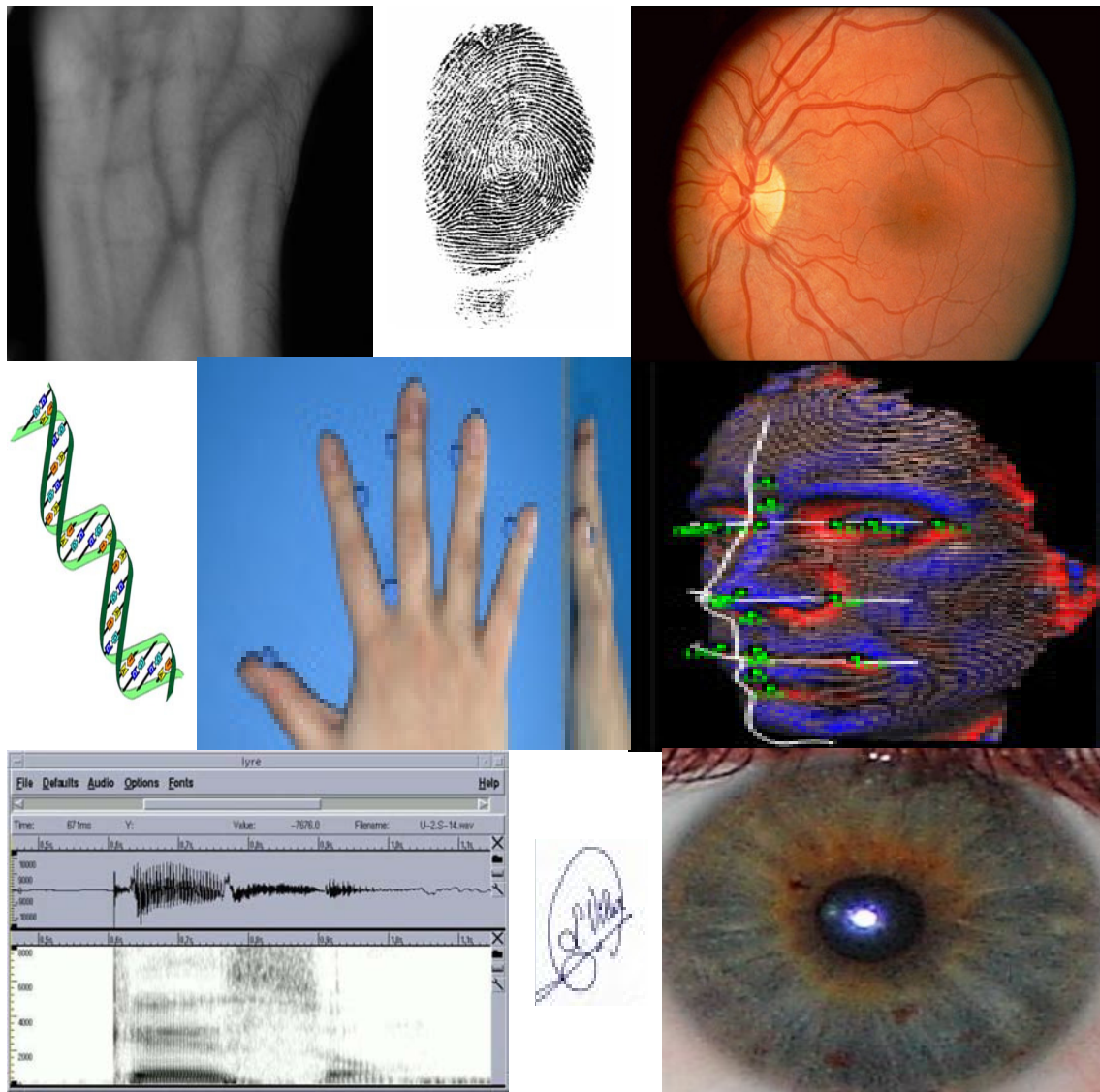


Figura 5: Tipos de sistemas biométricos

2.7 Conclusiones

A lo largo de este capítulo se ha intentado dar una visión general sobre los sistemas biométricos, con el objetivo de facilitar al lector la comprensión de los capítulos posteriores y aportándole un conocimiento base que le permita entenderlos de manera más completa. Evidentemente este capítulo es sólo un resumen de la literatura técnica disponible sobre los sistemas biométricos que, entre otros documentos, se encuentran reflejados en las referencias bibliográficas.

Biometría vascular

3.1 Introducción

Dentro de todas las modalidades biométricas existentes actualmente y explicadas en el punto 2.6, la biometría vascular es la modalidad más novedosa. En el presente capítulo se va a explicar en detalle en qué consiste esta modalidad y se van a exponer las distintas tecnologías existentes antes de iniciar esta Tesis.

Al final del capítulo, se indican las conclusiones obtenidas tras el análisis de toda la literatura existente y que sirvieron de base inicial para los sistemas y algoritmos expuestos e implementados en este documento.

3.2 Biometría vascular

Esta modalidad intenta determinar la identidad de una persona analizando la estructura vascular de una parte del cuerpo, la cual se define como la red completa de venas que están colocadas debajo de la piel de cada persona.

La forma de las venas en la misma parte del cuerpo se ha comprobado que es distinta en cada persona [BPI99] y es muy estable durante un periodo de tiempo largo ya que, fisiológicamente, está muy asociada al resto del cuerpo desde el nacimiento y no le afecta la edad, salvo en la primera etapa adolescente durante el crecimiento.

Tal como se indica en [VBS07], debido a que el elemento biológico usado en esta técnica para la identificación es interno y no completamente visible (con condiciones de iluminación estándar), la seguridad conseguida es

realmente elevada porque esta modalidad es mucho más difícil de falsificar que otras ya descritas.

Trabajos previos, como los realizados por el grupo “International Biometrics Group” [IBG10] han revelado un gran potencial en esta modalidad con tasas de error realmente bajas (parecidas a las obtenidas con el iris) y una buena aceptación por parte del usuario. También advierte que debido a que se necesita constantemente que la sangre fluya por la venas para obtener los patrones y muestras, intrínsecamente se dispone de un mecanismo de detección de sujeto vivo.

Estas propiedades de unicidad, estabilidad, robustez frente al fraude y aceptación por parte del usuario hacen que esta modalidad tenga un potencial grande para el futuro y ofrezca seguridad y fiabilidad en la identificación de personas. Partiendo de estas ideas, hay varios autores que han investigado en biometría vascular. Tal como se ha comentado en el capítulo 1 de esta Tesis, la información técnica disponible es muy escasa y parcial, a pesar de lo cual se va a hacer una presentación del Estado de la Técnica, explicando brevemente para ello lo que propone cada uno de los autores para cada uno de los bloques del diagrama mostrado en la figura 1.

3.3 Estado de la técnica en captura de muestras

Las venas forman parte de la estructura interna del cuerpo humano. Por eso, si se quiere obtener información sobre su localización se pueden utilizar en principio técnicas médicas que obtienen muy buenos resultados. Pero este tipo de técnicas suelen ser invasivas, caras e incómodas para el usuario, por lo que las técnicas como los rayos X, scanners ultrasónicos o resonancias magnéticas se descartan para la biometría vascular.

Básicamente, para obtener esta información de manera no invasiva se pueden utilizar 2 métodos: Cámaras térmicas, como las utilizadas en los trabajos [GSS06], [BVU04], [THV05] y [UTI04] que obtienen imágenes de gran calidad pero que son realmente caras, o cámaras CCD con iluminación por LEDs infrarrojos, cuyas imágenes no son tan buenas pero son mucho más económicas. Trabajos con este último tipo de sistemas de captura de muestras

se pueden consultar en [TIS95], [NFI06], [BAH04], [AIS04], [IVT05], [MFE06a], [MFE06b] y [FEH06]. En el capítulo 4 se explicará con más detalle esta técnica. La figura 6 muestra ejemplos de imágenes vasculares captadas con cámaras térmicas, mientras que la figura 7 muestra una imagen vascular captada con una cámara de infrarrojos.

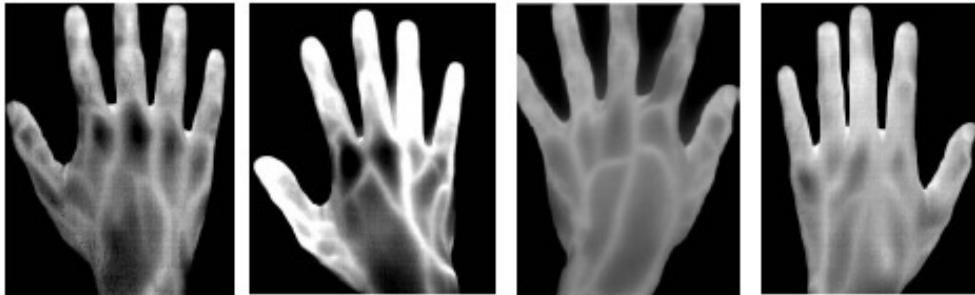


Figura 6: Imágenes de venas utilizando cámaras térmicas [GSS06]



Figura 7: Imagen de venas utilizando cámaras CCD e iluminación por infrarrojos [VBS07]

3.4 Estado de la técnica en preprocesado

Una vez que se ha obtenido la imagen deseada, normalmente se aplica un preprocesado para mejorarla y/o descartar partes que no son relevantes para los siguientes pasos del sistema y así obtener la llamada Región de Interés (a partir de ahora denominada ROI, de su acrónimo en inglés “*Region of Interest*”).

Las técnicas de preprocesado para obtener la ROI deberían ser normalmente fáciles de implementar ya que la luz emitida por los LEDs o la cámara térmica, sólo refleja el tejido orgánico, siendo el resto negro/blanco o casi negro/blanco (dependiendo del tipo de cámara utilizada). Utilizando algoritmos de valores límite se puede discernir claramente la

mano/muñeca/dedo del fondo y obtener así la ROI deseada. Ningún artículo describe este paso salvo en [BVU04], donde se propone extraer el contorno de la mano y obtener la ROI a partir de los espacios interdigitales. En [RE100] se explican también algunas opciones para poder extraer esos espacios y otros puntos singulares de la imagen, basado en estudios biométricos de la geometría de la mano. La figura 8 muestra el método de preprocesado indicado anteriormente.

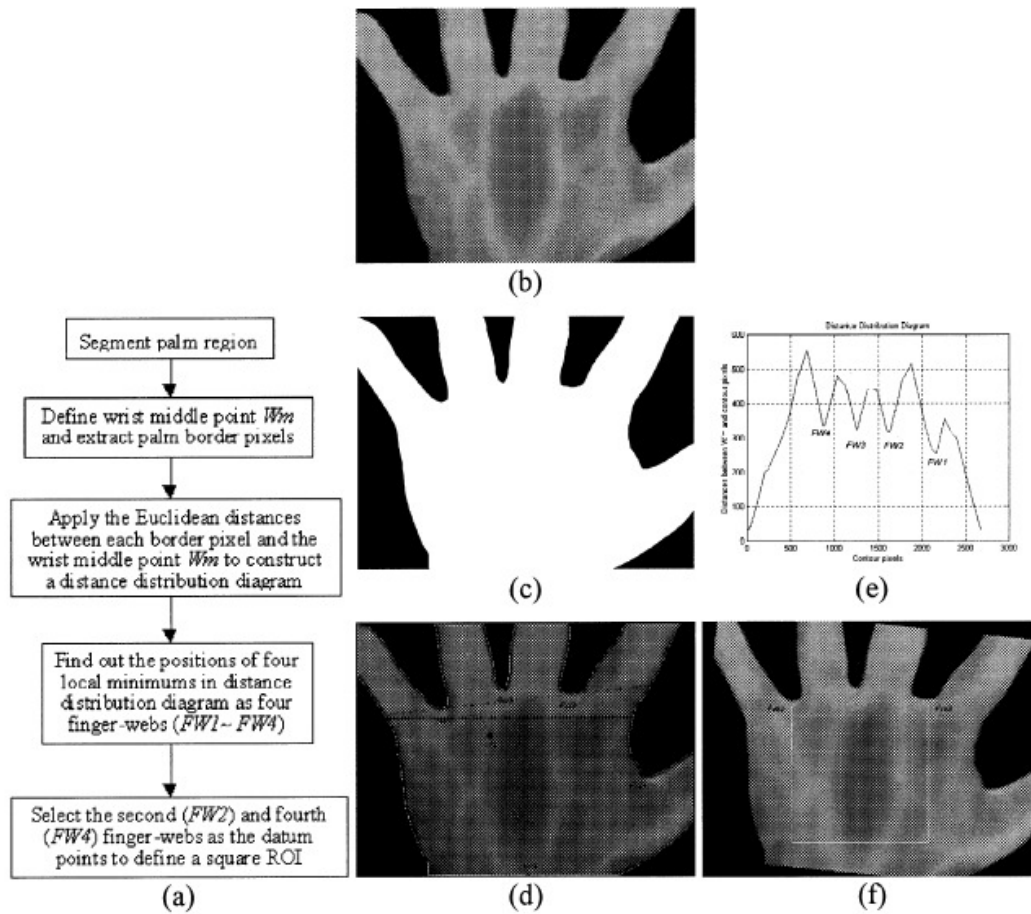


Figura 8: Método para obtener la ROI [BVU04]

3.5 Revisión de las propuestas de extracción de características

Las técnicas de extracción de características a partir de la ROI son muy variadas. Algunas aplican otro preprocesado adicional para mejorar la calidad de la imagen (operaciones morfológicas, detección de valores límite, eliminación de ruido, análisis de multiresolución, filtros, etc.), mientras que otras obtienen directamente las características sin ninguna elaboración posterior

(Watershed). A continuación se mencionan algunas de las técnicas analizadas en las referencias bibliográficas para extraer las características de las venas.

- En [GSS06] se utiliza una aproximación morfológica, obteniendo el patrón vascular utilizando el algoritmo Watershed (este algoritmo se explica en más en detalle, por ser el primero mencionado, pero para casi todos los demás se propone al lector que consulte cada una de las referencias bibliográficas indicadas). El algoritmo Watershed consiste en visualizar las imágenes en 3 dimensiones. Se basa en simular el proceso de inmersión en un líquido y consiste en discernir los puntos de misma altitud en una superficie, metiendo dicha superficie dentro de un líquido y viendo cómo se inunda a través de unos agujeros que se han colocado previamente de forma estratégica. Matemáticamente se implementa con ayuda de la distancia geodésica y de la zona de influencia geodésica. La distancia geodésica entre 2 píxeles X e Y en A es la longitud ínfima de las rutas P que unen X e Y y están completamente en A:

$$d_A(x,y) = \min \{l(p)\},$$

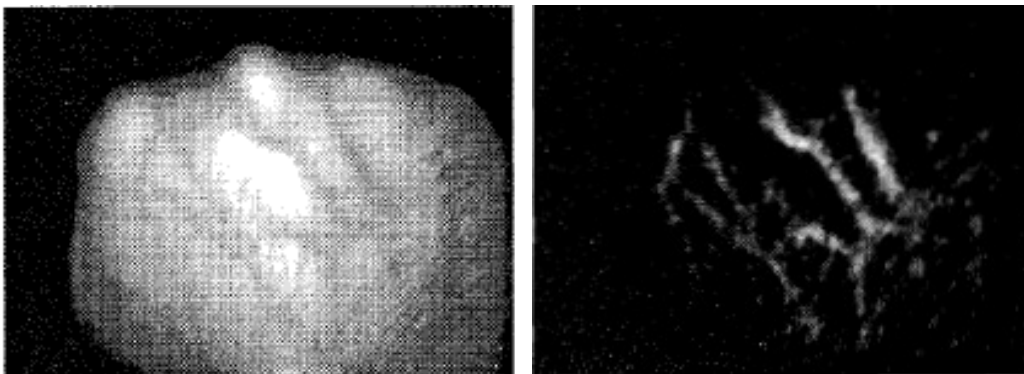
mientras que la zona de influencia geodésica se puede definir así: Suponiendo que A contiene un conjunto B que consta de varios componentes conectados B_1, B_2, \dots, B_k , la zona de influencia geodésica $iz_A(B_i)$ de un componente B_i de B en A es el lugar geométrico de los puntos de A cuya distancia geodésica de B_i sea inferior que su distancia geodésica con cualquier otro componente de B:

$$iz_A(B_i) = \{p \in A, \forall j \in [1,k]/\{i\}, d_A(p,B_i)\}.$$

Partiendo de estas 2 fórmulas matemáticas, se obtienen los Watershed (cuencas) de las imágenes en escala de grises mediante un método recursivo aplicado a cada zona de la imagen. Es decir, lo que hace este método es discernir exactamente las zonas blancas de las venas a diferencia del fondo de la palma,

pero de manera directa y sin preprocesado. Pero si se aplica este algoritmo directamente a las imágenes en escala de grises, se obtienen ramas inexistentes debido al ruido de la imagen y otras irregularidades. Para que finalmente se obtenga el esqueleto correcto de las venas, se propone implementar operaciones de aperturas y cierres morfológicos para eliminar imperfecciones.

- En [THV05] se proponen filtros para la mejora de la imagen y un algoritmo de esqueletización para obtener las líneas de las venas.
- Zhang, Ma y Han recomiendan un método basado en técnicas de multiresolución basadas en Curvelets [MFE06a], Wavelets [MFE06b] o Ridgelets [FEH06].
- En [IVT05] se utiliza una aproximación de multiresolución para obtener el patrón vascular, utilizando un filtro paso alto Butterworth y luego aplicar métodos de análisis de multiresolución basados en la energía local de la imagen.
- En [TIS95] se propone un algoritmo de extracción de características basado en la mejora de la calidad de la imagen a través de filtros y un algoritmo de podado final. En la figura 9 se muestra de forma visual el método utilizado en [TIS95], partiendo de la imagen inicial y mostrando los pasos de mejora en la calidad de la imagen para obtener finalmente la imagen vascular aplicando el podado final.



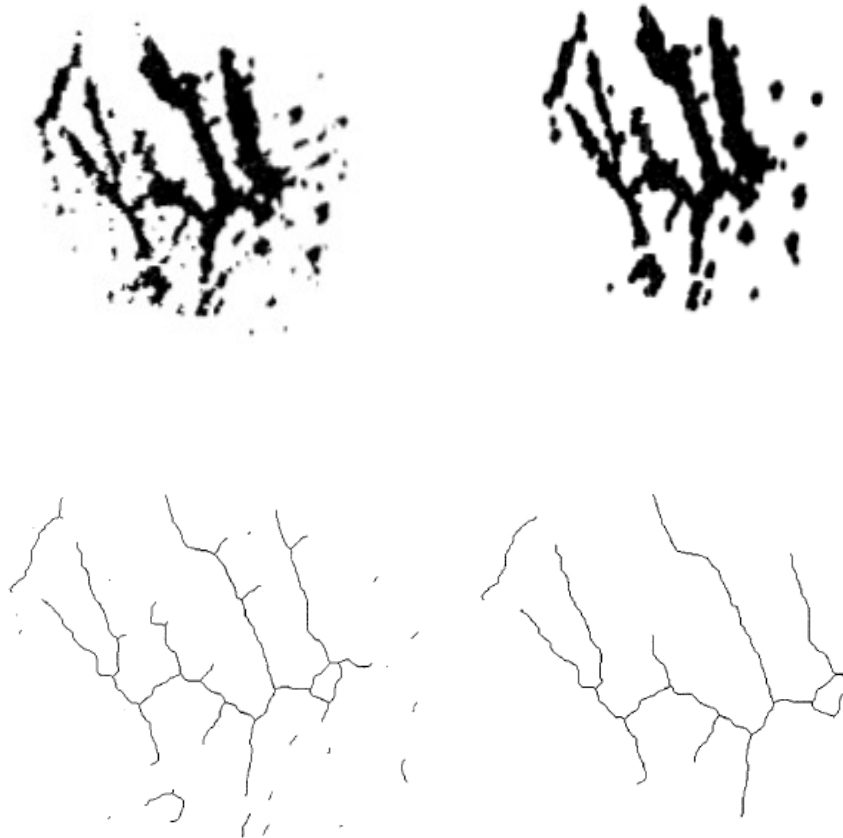


Figura 9: Método para la extracción de características [TIS95]

- En [IVP00] se utiliza un filtro paso bajo Gaussiano, luego otro filtro con una máscara espacial que mejora el efecto de redondeo en el contorno, a continuación un filtro de paso alto local y finalmente un umbral local.
- En [BVU04] se recomienda un análisis/representación con filtros multiresolución múltiples para extraer puntos dominantes en base a umbrales seleccionados.
- En [BAH04] se propone una normalización de la intensidad de la imagen y se mejoran sus límites usando máscaras. A continuación se reduce el tamaño y se realiza una enfatización del contraste.
- En [AIS04] se aplica una normalización del brillo de la imagen y luego una reducción del tamaño de la misma.

Las referencias para sistemas vasculares son bastante escasas por lo que también se han analizado algunas otras técnicas utilizadas para la extracción de las características de las líneas o de la geometría de la mano (también conocidas como “palmprint”), que también se podrían utilizar con ligeras adaptaciones para los sistemas vasculares.

- En [HPI02] se propone el filtro Sobel y operaciones morfológicas para extraer los puntos característicos de las líneas de la palma.
- En [HIU00] se utilizan las funciones “wide line integrated profile (WLIP)”, “variation of the wide line integrated profile” (VWLIP) y “finger width” (FW) en imágenes de los dedos. A partir de aquí, se aplican funciones de correlación y distancias euclídeas para extraer las características.
- En [NFV06] se proponen los algoritmos Local Approach (LoA) y Global Approach (GoA) para extraer las líneas de las venas, asumiendo que las venas son lineales, y se miden sus bifurcaciones a partir de sus asimetrías.

Durante el desarrollo de esta Tesis Doctoral también han ido apareciendo otros métodos, muchos de ellos mezclando diversas técnicas biométricas como se recomienda en el punto 1.6, algunos de los cuales se enuncian a continuación.

- En [NFV09] se utiliza un método de umbral para obtener los puntos iniciales de la imagen de las venas de los dedos, luego se utiliza el algoritmo “line tracking” para obtener un mapa de probabilidad y un mapa de grises. Finalmente se utiliza el análisis “directional neighborhood” para extraer el patrón vascular.
- En [LFE04] se propone la extracción de las líneas de la palma de la mano utilizando la función Gaussiana, su primera y su segunda derivada en diversas direcciones espaciales, realizando luego una superposición de todas las imágenes obtenidas.

- En [NAB09] se muestra un método para la extracción de las líneas de la mano y sus intersecciones, utilizando para ello un algoritmo de vectorización que aplica el concepto MIC (círculo inscrito máximo).
- En [FLF09] se utiliza el detector de límites SUSAN [SUS97] para detectar las líneas y su orientación. Más tarde se aplican operaciones morfológicas para eliminar puntos o líneas erróneas.
- En [FPP09] se proponen unas nuevas funciones llamadas “Laplacianpalm” y “Locality Preserving Projections” (LPP) para extraer las características conjuntas de las líneas y venas de la palma de la mano.
- En [PAU09] se utiliza una igualación de histograma adaptativa, luego el operador “Mexican hat”, a continuación un algoritmo de esqueletización y finalmente una eliminación del ruido superfluo.

3.6 Algoritmos de comparación propuestos en la bibliografía

Tal como se muestra en el diagrama de bloques general de la figura 1, el último paso para completar el sistema sería analizar las características de las muestras y de los patrones de los usuarios, comparándolas entre sí para emitir una decisión de reconocimiento positivo o negativo. Al igual que en las técnicas de extracción de características, los métodos de análisis son también muy variados y dispares. Algunos de los analizados en las referencias bibliográficas se muestran a continuación, tanto para sistemas vasculares como para sistemas de líneas de la mano. Es importante destacar que algunas de las referencias dan resultados, pero otras simplemente indican el método utilizado sin dar más información adicional.

- En [THV05] se recomienda utilizar las distancias y métricas Hausdorff para comparar los patrones vasculares de las venas. Eligiendo los parámetros adecuadamente se puede llegar a obtener $FNMR = FMR = 0$ (figura 6 de la página 64 de la publicación de dicha referencia). Pero estos resultados se

consiguen con una base de datos de usuarios muy pequeña de 12 usuarios y obtenida con condiciones muy controladas de temperatura y humedad, que hace que las imágenes sean siempre buenas. Por tanto este método es bueno en principio para grupos pequeños y cuando las condiciones para la adquisición de las muestras sean las mismas, pero el autor duda de sus propios resultados con más usuarios y con condiciones que provoquen imágenes no tan claras.

- Zhang, Ma y Han utilizan redes neuronales para el reconocimiento en [MFE06a], [MFE06b] y [FEH06]. Han hecho experimentos con 3.200 imágenes de dedos en [MFE06a] con un EER = 0,128% (figura 7 de la página 4 de la publicación de dicha referencia), 3.200 imágenes de dedos en [MFE06b] con un EER = 0,130% (figura 6 de la página 1084 de dicha referencia) y 120 imágenes de manos [FEH06] con un EER = 0,130% (figura 4 de la página 874 de dicha referencia). El método y los autores son los mismos en los tres artículos, usando técnicas de multiresolución, pero diferenciándose en la función de transformación utilizada; en [MFE06a] se basa en Curvelets, en [MFE06b] se basa en Wavelets y en [FEH06] se basa en Ridgelets.
- En [IVT05] se utilizan las distancias Manhattan para comparar los patrones vasculares. Los resultados se obtienen con 1.000 imágenes y proporcionan un EER aproximado del 3% mostrados en forma de curvas EER (figura 3a de la página 551 y figura 3b de la página 552 de dicha referencia).
- En [TIS95] se propone un método de comparación parcial de las imágenes de la muestra y del patrón mediante la superposición de las mismas, pero también proponen técnicas de lógica borrosa para desarrollos posteriores. No dan resultados definitivos por el pequeño número de muestras analizadas, pero sí tablas de comparación para los 20 usuarios empleados para ver los porcentajes de comparación (tabla 1 y 2 de las páginas 30 y 31 de

la publicación de dicha referencia) . En dichas tablas se observa que eligiendo un umbral de 70% y 60% para los 2 métodos mostrados, se puede llegar a obtener un FRR del 5%.

- En [BVU04] se recomienda un método basado en el radio de variación Inter-to-Intra y en una matriz de pesos de las propiedades múltiples de los puntos dominantes hallados para cada resolución. Al final, a una determinada resolución, cada palma de la mano va a tener un vector de pesos individual basado en las propiedades de sus características múltiples y un vector de características de los puntos dominantes. Multiplicando ambos, se obtiene el valor integrado de las características múltiples. Finalmente se integra toda la información utilizando funciones booleanas. Lo prueban con 20 imágenes y obtienen un EER de 2,3%.
- En [BAH04] se propone un método de correlación de fases para realizar las comparaciones entre las diferentes imágenes. Han hecho experimentos con 25 personas y los resultados los ofrecen en forma de curvas de distribución de probabilidad (figura 3 y tabla 1 de la página 251 de la publicación de dicha referencia). En estas curvas se observa que con un umbral del valor de correlación de 0,6 se obtienen FAR = 8% y FMR = 9%, con un umbral del valor de correlación de 0,61 se obtienen FAR = 12% y FMR = 2,1%, y con un umbral del valor de correlación de 0,62 se obtienen FAR = 20% y FMR = 1,09%.
- En [PAU03] se utiliza una comparación de imágenes, utilizando una función de correlación normalizada y redes neuronales para realizar el reconocimiento. En esta publicación no se proporcionan resultados.
- En [HPI02] se aplica la energía de la palma de la mano para después utilizar una identificación de tipo “grano grueso”. Tampoco se ofrecen resultados claros.

- En [HIU00] se utiliza un motor de inferencia borroso basado en medidas de similitud/diferencias para realizar el reconocimiento.
- En [DMS99] se extraen las características de la forma de la mano, se aplica ahora una técnica de comparación deformable y luego se definen diferentes distancias para evaluar las similitudes entre las formas.
- En [TNC99] se aplican las denominadas “datum point-invariant characteristics” y luego una técnica de comparación de líneas.
- En [CVB98] se utiliza una función de correlación normalizada para determinar las similitudes de personas diferentes.

3.7 Conclusiones

Tal como se desprende de los puntos anteriores, existen muy diversas técnicas para cada uno de los pasos a desarrollar en un sistema completo, tal como pretende esta Tesis Doctoral. Sin embargo no aparece ninguna publicación que recoja la descripción de uno completo y que, por tanto, relacione unos bloques con otros. Analizado el Estado de la Técnica, se decidió inicialmente por desarrollar las siguientes ideas:

- Para el sistema de captura de imágenes, utilizar cámaras CCD con iluminación por infrarrojos, descartando las cámaras térmicas por su elevado coste. En principio se decidió utilizar imágenes de la palma, pero más adelante se cambió a imágenes de la muñeca por no haber ningún artículo o Tesis Doctoral preliminar sobre ellas y para resolver los problemas encontrados inicialmente con las imágenes de las palmas, como se describirá en el capítulo 4.
- Para el preprocesado, desarrollar un nuevo método de obtención de ROI para la muñeca, diferente al único encontrado y propuesto en el punto 2.3 y que además sólo sirve para las palmas de la mano.

- Para la extracción de características, utilizar alguno de los métodos no utilizados todavía en los artículos propuestos para los sistemas vasculares, pero sí utilizados en otros sistemas, realizando las adaptaciones necesarias para su utilización y así obtener un método novedoso aplicado a la biometría vascular.
- Como algoritmos de comparación, utilizar una técnica de comparación orientable similar a las utilizadas en algunas de las referencias dadas en el punto 3.5, por su simplicidad y adecuación perfecta a la venas de la muñeca (ya que en la mayoría de los casos no disponen de tantos puntos de intersección como en la palma y los métodos de análisis de puntos e intersecciones utilizados en la mayoría de las referencias de dicho punto 3.5 no se podrían aplicar a estas imágenes).
- Finalmente, al no existir ni encontrar nada parecido en la literatura técnica, también se decidió crear una plataforma de pruebas abierta y reutilizable para otros investigadores, que completase el sistema biométrico vascular, permitiendo desarrollar cualquier algoritmo y proporcionar los parámetros y curvas biométricas indicados en el punto 2.4, y así poder comparar los resultados de manera objetiva con los sistemas futuros desarrollados en el Grupo de Investigación GUTI.

Sistema de captura de imágenes

4.1 Introducción

A partir de este capítulo se van a empezar a exponer los estudios y trabajos desarrollados en esta Tesis Doctoral, basándose en las conclusiones del Estado de la Técnica descritas en el capítulo anterior.

Este capítulo trata sobre el sistema de captura de imágenes para el sistema completo. Primero se explicará el principio físico en el que se fundamenta, a continuación se mostrarán los sistemas encontrados en la literatura técnica y finalmente se expondrán los sistemas implementados para el sistema completo de esta Tesis, indicando para cada uno de ellos su principio de funcionamiento y resultados obtenidos. Al final del capítulo se exponen las medidas de calidad de cada sistema y se indican las conclusiones sobre el sistema final escogido.

4.2 Fundamento del sistema de iluminación

Se pueden utilizar diferentes partes del cuerpo para desarrollar los sistemas biométricos vasculares, pero la mayoría de ellos se centran en la palma de la mano o los dedos, debido a la simplicidad de la captura y a la aceptación del método por parte del usuario. A pesar de ello, hemos comprobado que este tipo de sistemas no funcionan todavía bien con todos los tipos de manos porque les puede afectar en algunos casos propiedades como el espesor de la piel o la profundidad de las venas. Más adelante se mostrará algún ejemplo observado en el desarrollo de esta Tesis. Por eso, la zona de estudio será la muñeca y no la mano. Sus imágenes son de mejor calidad que las de las palmas o dorso porque las venas están mucho más superficiales.

Tal como se ha explicado en el punto 3.7, el sistema de captura de imágenes propuesto en esta Tesis Doctoral está basado en cámaras CCD de bajo coste con iluminación por infrarrojos, en particular centrado en la iluminación por infrarrojos cercano (iluminación NIR “Near Infrared”) en la zona de 850 nm de longitud de onda.

4.2.1 Principio del sistema de iluminación NIR

Tal como se observa en la figura 10, el espectro electromagnético se divide en diferentes zonas en función de la frecuencia o de la longitud de onda de cada radiación. El rango visible es muy estrecho (400-750 nm aproximadamente) mientras que el rango infrarrojo está situado justo en la banda superior siguiente del espectro (750 – 10⁶ nm aproximadamente). De este rango infrarrojo sólo interesará para el sistema de captura de imágenes la zona NIR (750 – 1100 nm aproximadamente).

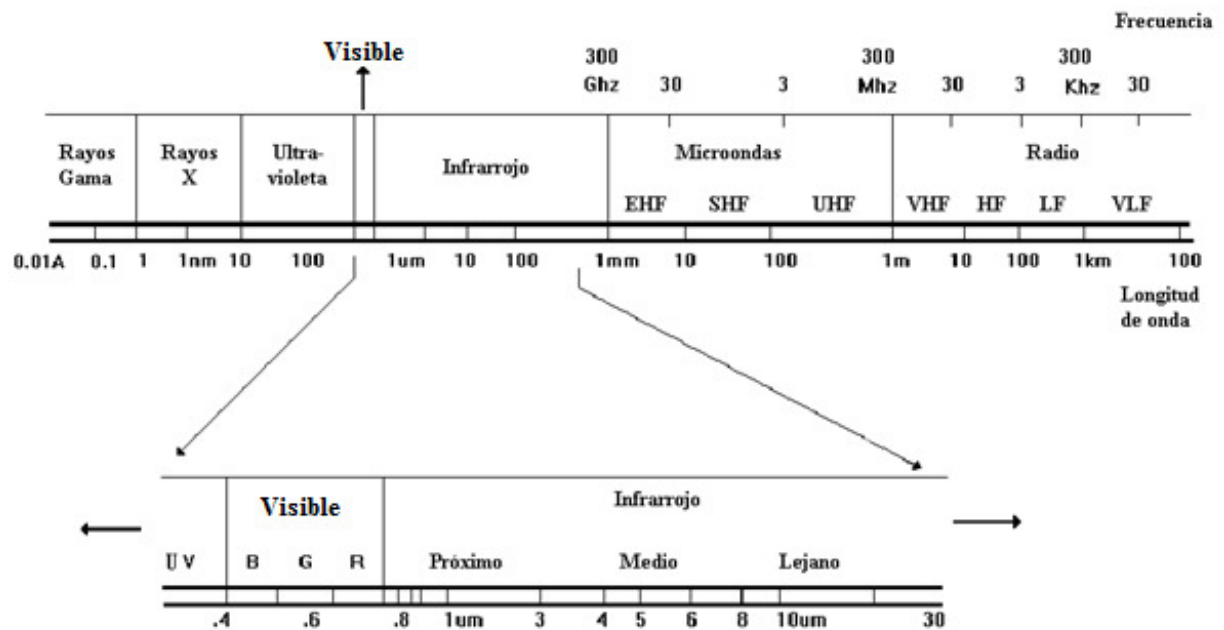


Figura 10: Espectro electromagnético [EAS09]

Según se explica en [NF106], utilizando la zona de iluminación NIR es posible capturar el patrón vascular superficial de la mano, dedos o muñeca. Es un método no invasivo y de bajo coste que no requiere la inserción de ningún agente extraño en la sangre.

Primeramente se va a exponer un breve resumen de la justificación teórica de este tipo de sistemas. Información más detallada al respecto se puede encontrar en [EAS09], [NFI06], [BVU04], [HOB02] y [TIS95].

El ojo humano solo es capaz de detectar la luz visible, la cual está dentro de un rango muy estrecho de todo el espectro electromagnético. La visibilidad de las venas debajo de la piel es muy baja en condiciones de luz normal. Sin embargo, esto se puede resolver utilizando la zona infrarroja cercana (NIR) (entre 800 y 950 nm). En la figura 11 se observa que los sensores CCD utilizados para la captura de las imágenes son precisamente más sensibles cuando la luz que incide sobre ellos tiene una longitud de onda entre 600 y 900 nm, es decir, la zona alta del espectro visible y la zona baja del espectro infrarrojo (o sea, la zona NIR).

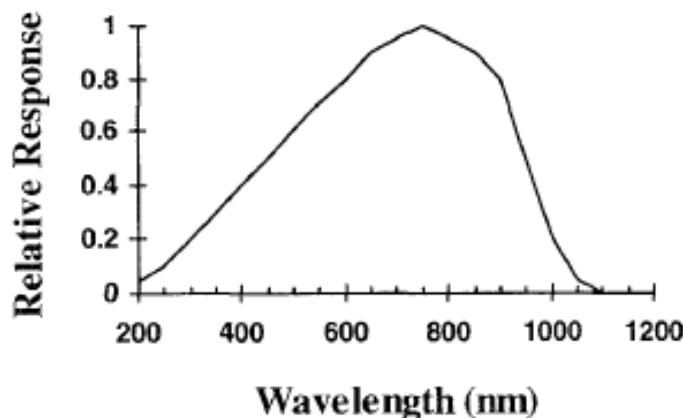


Figura 11: Curva de respuesta para un sensor CCD [TIS95]

Además, tal como se indica en [TIS95], existen tres propiedades especiales que poseen la radiación infrarroja, la materia orgánica y las venas de las personas, las cuales permiten desarrollar métodos de captura de imágenes:

- 1) Tal como se representa en la figura 12, de toda la radiación que incide en la muñeca/mano/dedo hay parte que se refleja, otra parte que se dispersa y otra parte que realmente se absorbe. Pero en cualquier caso, la incidencia de la luz infrarroja puede penetrar aproximadamente 3 mm

dentro de la materia orgánica.

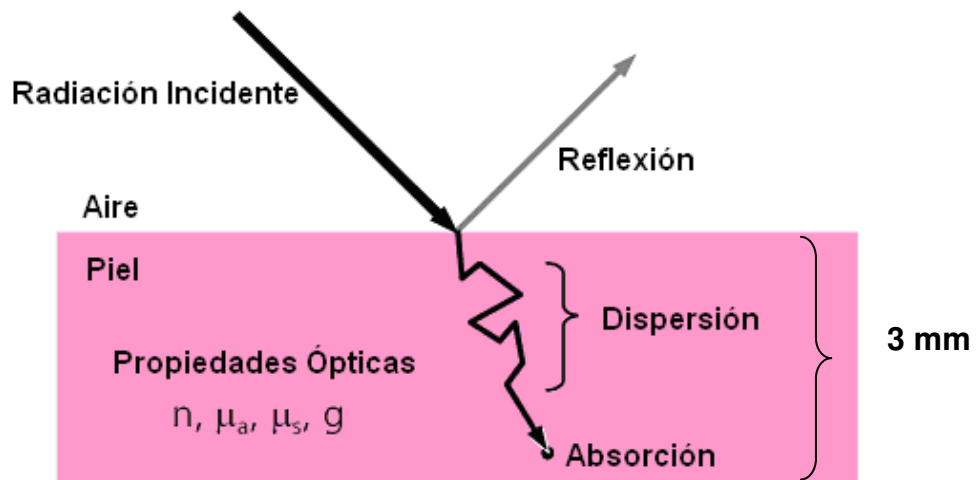


Figura 12: Interacción radiación-piel [EAS09]

2) La figura 13 muestra el coeficiente de absorción de los diferentes componentes de la piel en función de la longitud de onda. La zona sombreada, entre 630 y 1300 nm, indica la región donde el coeficiente de absorción del conjunto de componentes de la piel es menor. En la literatura se refieren a esta región como la ventana óptica de la piel ya que es donde más refleja la luz. Por tanto, la zona NIR es una zona con máximo reflejo de luz, cualidad deseable para el sistema de captura de imágenes.

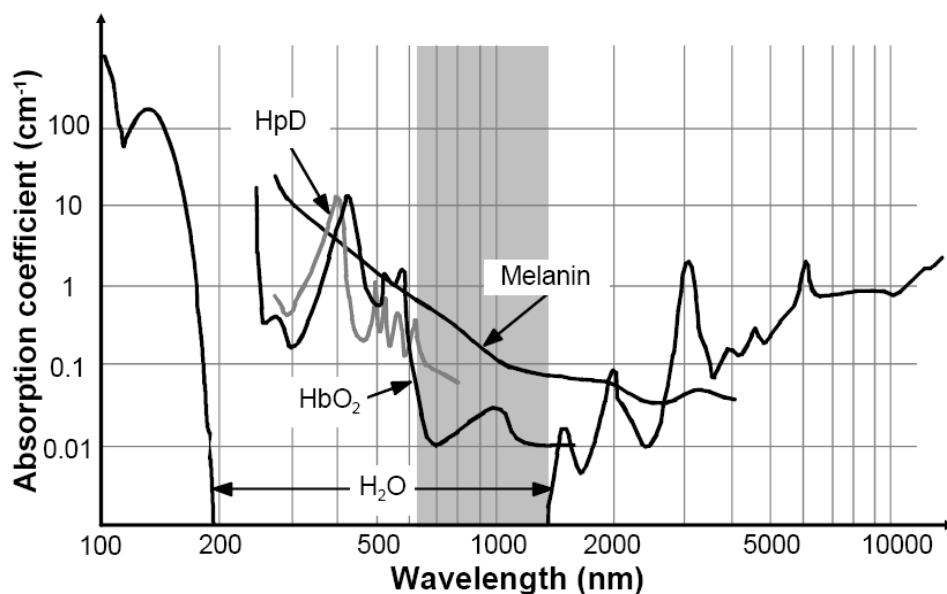


Figura 13: Coeficiente de absorción espectral de los componentes de la piel [EAS09]

3) La reducción de hemoglobina en la sangre de las venas tiene menos coeficiente de absorción que la materia de alrededor, por eso se utilizan en el sistema de captura las imágenes de las venas y no de las arterias. Esta afirmación se puede observar en la figura 14. En ella se muestra en detalle el espectro de absorción para los dos tipos de hemoglobina (oxigenada y desoxigenada). La absorción de radiación por la hemoglobina variará en función de si se trata de hemoglobina oxigenada que llevan las arterias (HbO_2) o la hemoglobina desoxigenada que llevan las venas (Hb), siendo esta variación la que provoca la diferencia de color entre ambas y que el coeficiente de la absorción en la zona NIR sea menor para venas que para arterias.

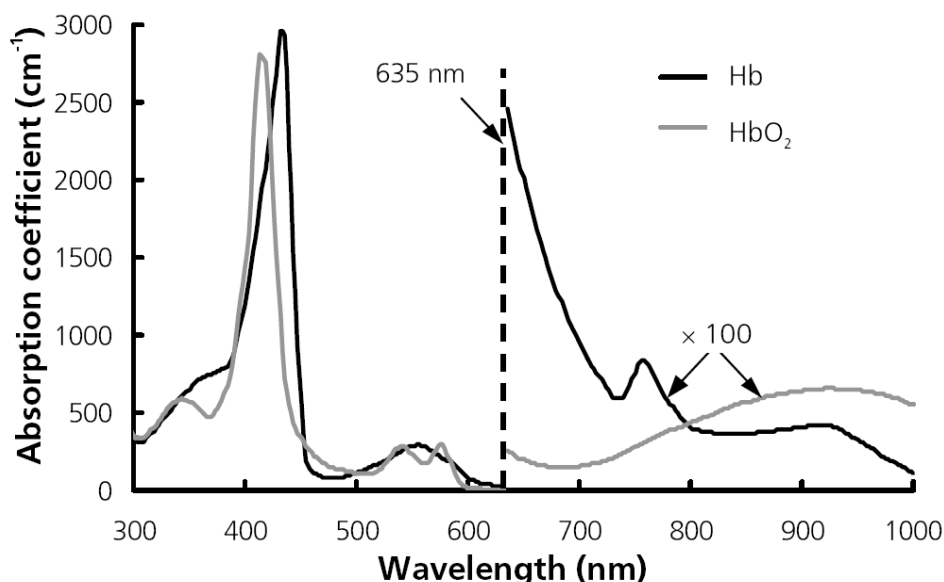


Figura 7.-

Figura 14: Diferencia entre los niveles de absorción espectral de la hemoglobina oxigenada (HbO_2) y desoxigenada (Hb) [EAS09]

La consecuencia de estas 3 propiedades es que si se proyecta con luz infrarroja NIR en la parte deseada del cuerpo (en el caso de esta Tesis, la muñeca), se puede capturar la imagen de sus venas utilizando simplemente una cámara CCD con el filtro de IR adecuado que limite el resto de radiación que no sea de esa longitud de onda. En la imagen obtenida, el patrón vascular aparecerá más oscuro que la carne que lo rodea y será fácilmente discernible.

Se demuestra en [HOB02] que si se utiliza una longitud de onda de aproximadamente 850-900 nm para la luz infrarroja, los resultados son mucho mejores y se evitan muchas interferencias indeseables de la radiación IR emitidas por el cuerpo humano y el ambiente (fundamentalmente de origen térmico).

4.2.2 Sistemas de captura de imágenes de partida

Antes de describir los sistemas de captura de imágenes investigados en esta Tesis, se van a mostrar brevemente los escasos sistemas encontrados en los trabajos de otros investigadores al comenzar el estudio, los cuales fueron la base más tarde para algunos de los sistemas desarrollados, y algunas de las imágenes obtenidas por ellos, dejando al lector la posibilidad de encontrar todos los detalles en las referencias bibliográficas indicadas.

En [TIS95] se propone el siguiente sistema: Cámara CCD monocromo, filtro IR HOYA RM90, matriz de LEDs infrarrojos de 880 nm. Este sistema se muestra en la figura 15 y un ejemplo de imagen obtenida por él se muestra en la figura 16.

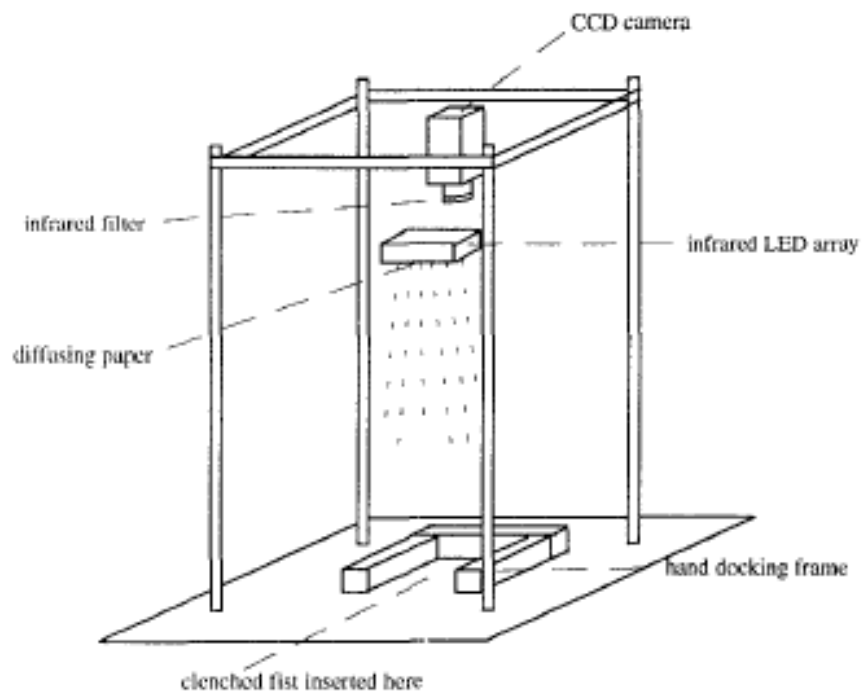


Figura 15: Sistema de captura de imágenes en [TIS95]

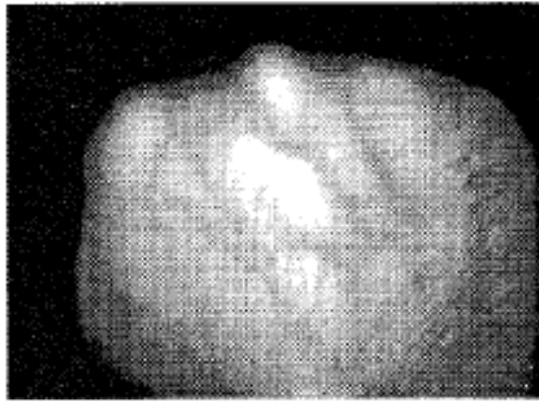


Figura 16: Imágenes obtenidas por el sistema de captura de imágenes en [TIS95]

En [BAH04] se propone el siguiente sistema: Cámara CCD monocromo CV-15H, 2 matrices de LEDs infrarrojos SANYO SLR931A. Este sistema se muestra en la figura 17 y un ejemplo de imagen obtenida por él se muestra en la figura 18.

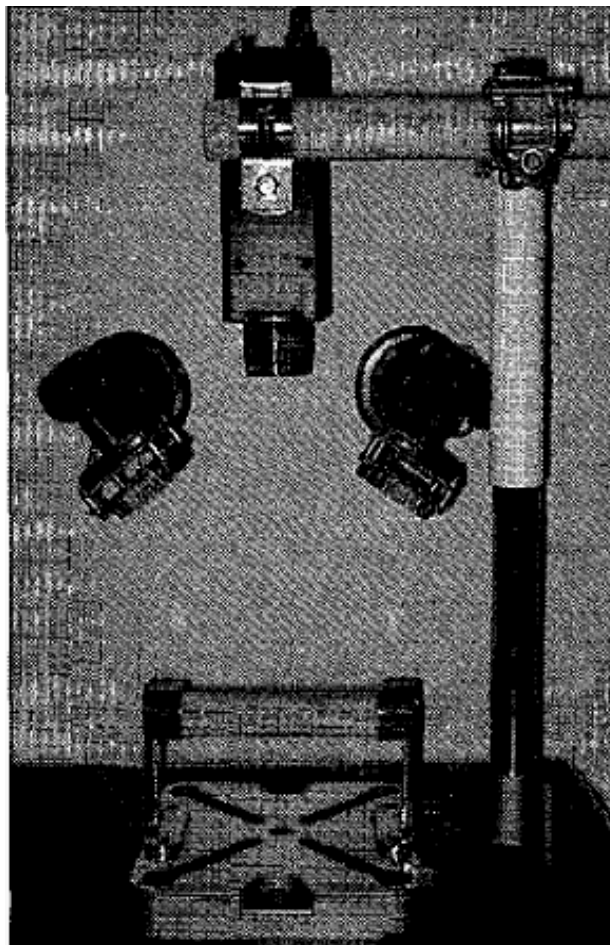


Figura 17: Sistema de captura de imágenes en [BAH04]

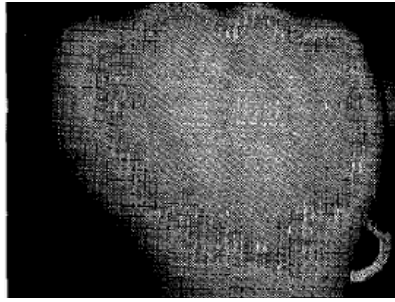


Figura 18: Imágenes obtenidas por el sistema de captura de imágenes en [BAH04]

En [NF106] se propone el siguiente sistema: Cámara térmica Hitachi KP-F2A, filtro IR HOYA RM80, 2 matrices de LEDs infrarrojos. Un ejemplo de imágenes obtenidas con este sistema se muestra en la figura 19.

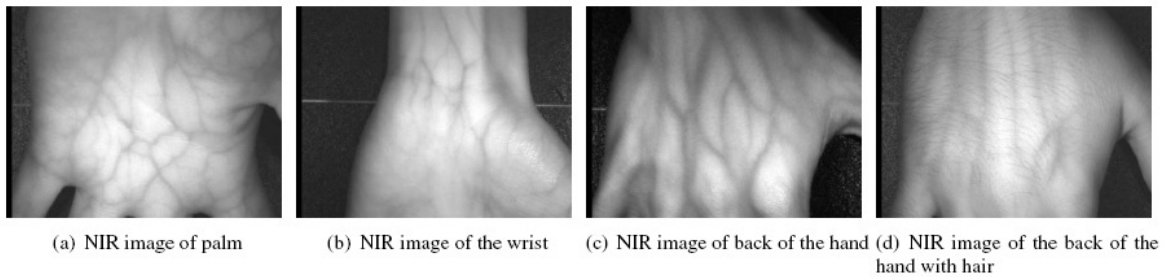


Figura 19: Imágenes obtenidas por el sistema de captura de imágenes en [NF106]

En [EHV08] se propone el siguiente sistema: Cámara térmica, filtro IR, 3 matrices de LEDs infrarrojos, papel difusor. Este sistema se muestra en la figura 20 y un ejemplo de imagen obtenida por él se muestra en la figura 21.

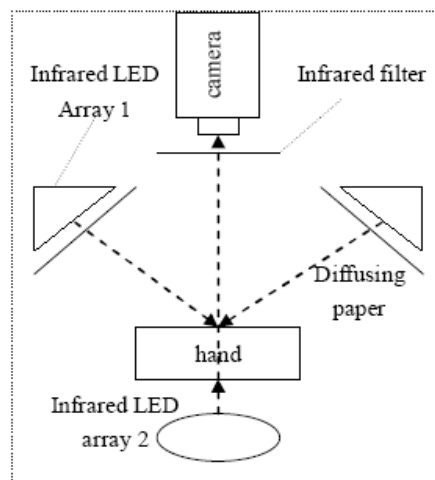


Figura 20: Sistema de captura de imágenes en [EHV08]

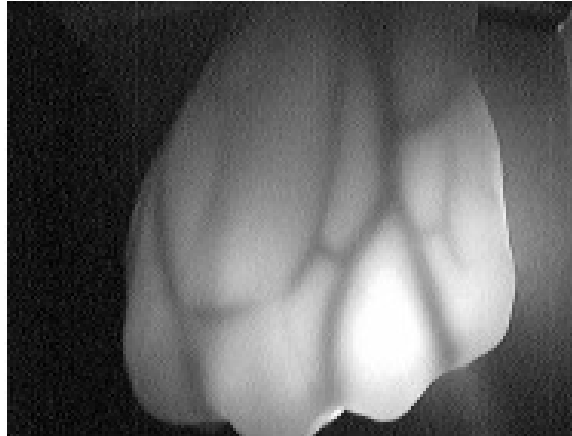


Figura 21: Imágenes obtenidas por el sistema de captura de imágenes en [EHV08]

Como se puede apreciar fácilmente por las imágenes obtenidas de cada uno de los sistemas, las imágenes capturadas con los dos últimos son de bastante buena calidad, pero utilizan cámaras térmicas (más caras), mientras que los 2 primeros sistemas utilizan cámaras CCD monocromo mucho más económicas, pero que obtienen peores resultados.

Para crear un sistema de captura de imágenes con un mejor comportamiento que los dos primeros sistemas mostrados y cuya calidad se acerque a los dos últimos, se han desarrollado paulatinamente cuatro sistemas de prueba para finalmente obtener el sistema final presentado en esta Tesis Doctoral.

4.3 Sistema de captura de imágenes con iluminación superior

El primer sistema de captura de imágenes creado para esta Tesis intentaba imitar a los 2 primeros sistemas presentados en el punto 4.2.2 para comprobar si las imágenes eran parecidas a las presentadas por sus investigadores. El sistema constaba de dos matrices de 36 LED IR (modelo de LED: OSRAM SFH 4450, 850 nm [OSR08a] y [OSR08a]), una cámara CCD monocromo de bajo coste (Imaging Source DM 21BU054 [IMS08]), un objetivo (EYSEO TV8570 1/3" [EYS08]), 2 filtros IR colocados uno sobre otro (B+W 52 092 y B+W 52 093 [B+W08]) y papeles difusores para la matriz de LEDs. El sistema completo disponía de una tapa negra de protección para evitar la luz infrarroja del ambiente.

El principio de funcionamiento de este primer sistema de captura se muestra en el diagrama de bloques de la figura 22. La mano se coloca debajo en el sistema de fijación, haciendo que la mano que fija apoyada en 3 pernos para sujetar los espacios interdigitales de la misma. La luz IR incide en la palma de la mano desde las dos matrices de LED (previamente homogeneizada por los papeles difusores) y su imagen reflejada es grabada por la cámara CCD, previo filtrado de parte del espectro mediante los 2 filtros IR colocados delante del objetivo.

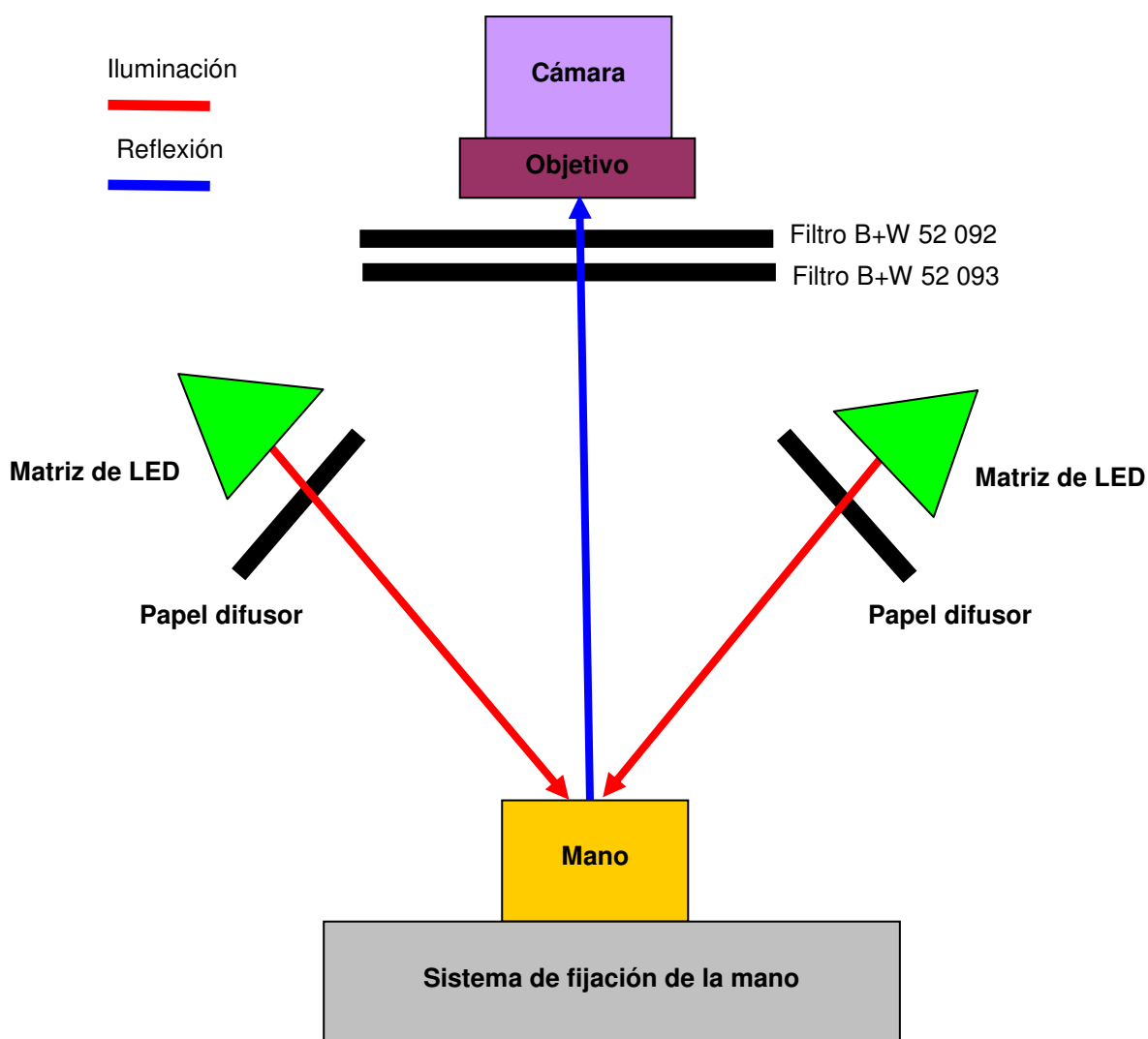


Figura 22: Principio de funcionamiento del sistema de captura de imágenes con iluminación superior

La figura 23 muestra la construcción del prototipo para este primer sistema basándose en el principio de funcionamiento de la figura 22. La figura

24 muestra diferentes vistas del mismo prototipo (alzado, planta y perfil) junto con el sistema completamente cubierto con la tapa de protección.

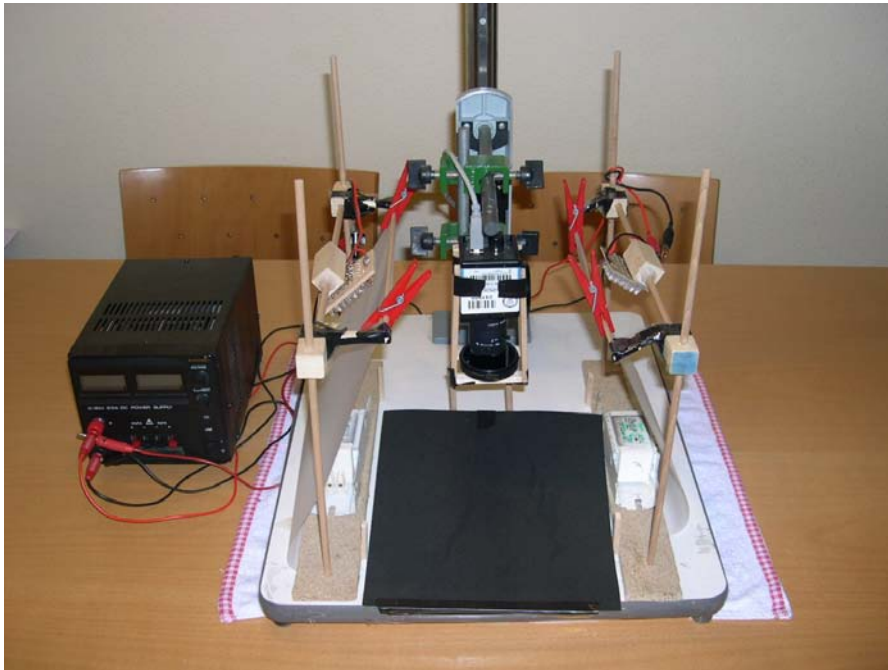


Figura 23: Sistema de captura de imágenes con iluminación superior

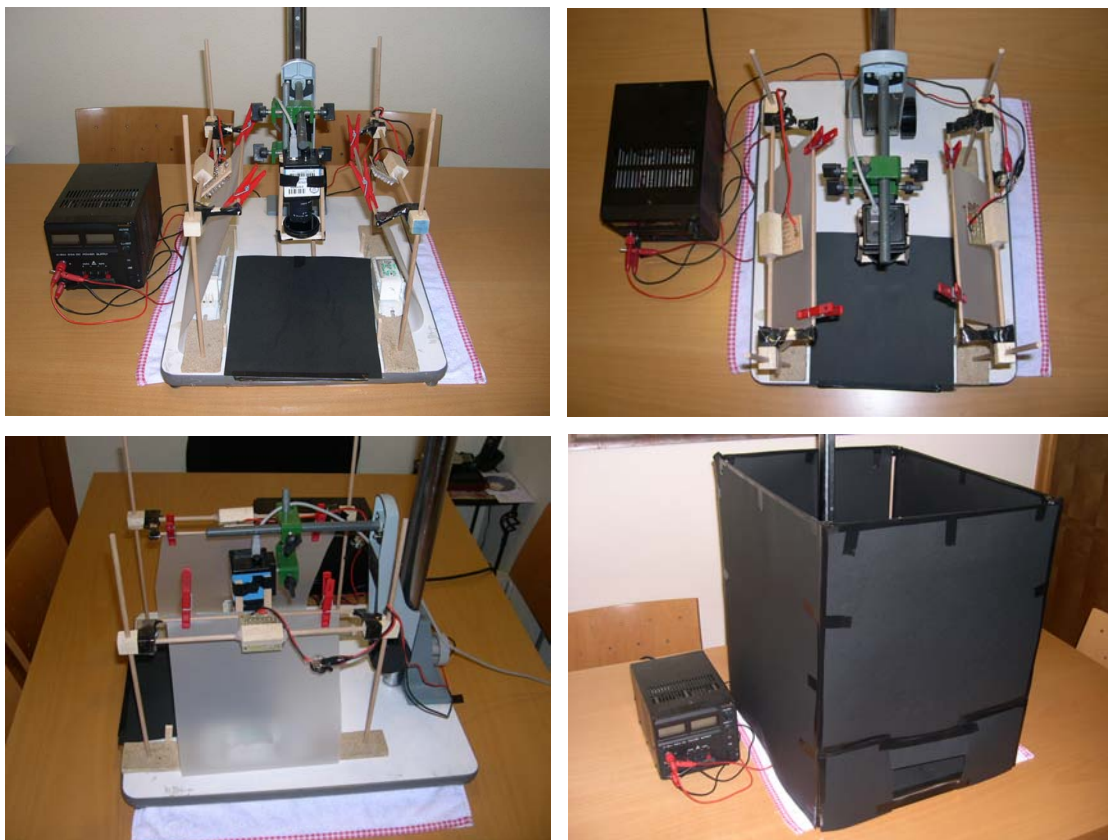


Figura 24: Diferentes vistas del sistema de captura de imágenes con iluminación superior

4.3.1 Resultados obtenidos con este sistema

Para mostrar los resultados obtenidos con este primer sistema de captura, es preciso detallar primero las condiciones empleadas en las pruebas:

- Imágenes tomadas: 20 (10 personas, palma izquierda y derecha)
- Ajustes de los parámetros la cámara: Ganancia: 300, Exposición: 1/50, Gamma: 100

Las mejores imágenes se muestran en la figura 25 (palma izquierda del usuario 1, palma derecha del usuario 9), sin embargo, hay palmas en las que las venas apenas se ven (figura 26, palma derecha del usuario 10, palma izquierda del usuario 7).

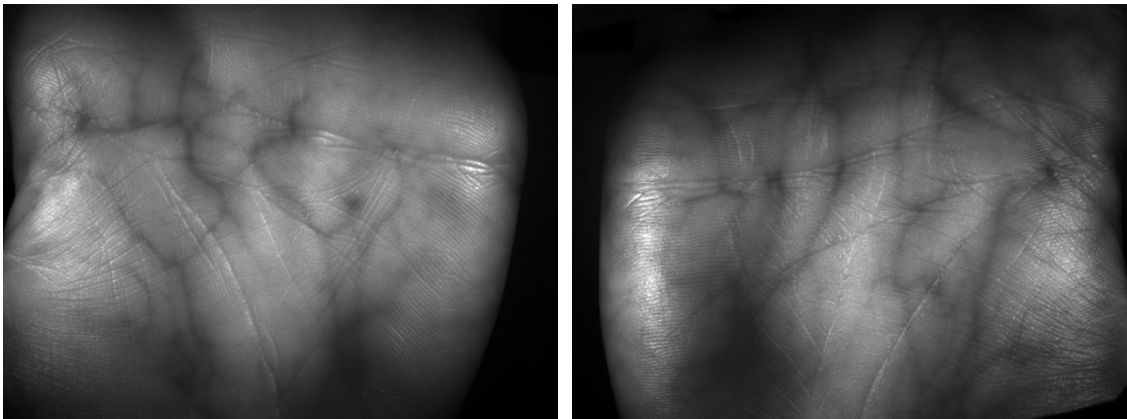


Figura 25: Imágenes de buena calidad obtenidas con el sistema de captura con iluminación superior

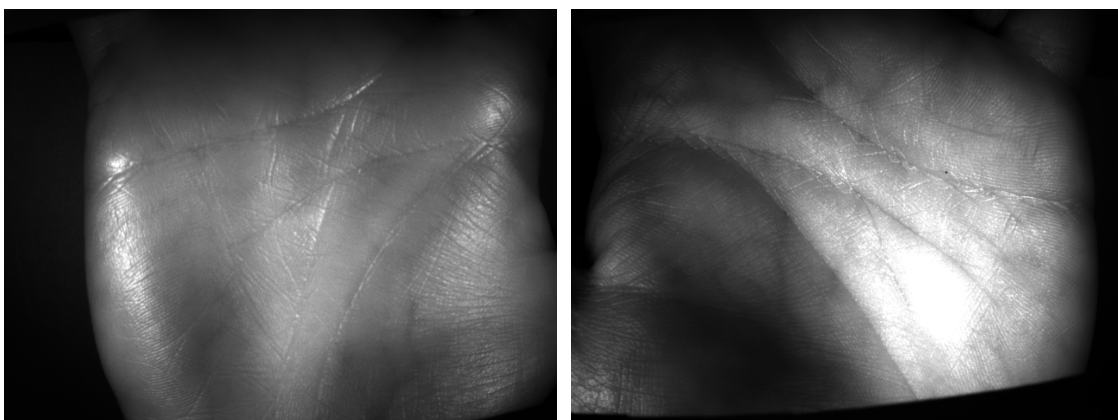


Figura 26: Imágenes de baja calidad obtenidas con el sistema de captura con iluminación superior

Este sistema se utilizó inicialmente para tomar imágenes de las palmas de las manos pero los resultados obtenidos no obtenían la calidad deseada, tal como se puede ver en las figuras 25 y 26. Esta falta de calidad se puede ver en la escasa homogeneización en la luz de las imágenes capturadas que provocaba además un exceso de brillos en algunas zonas mientras que otras se mostraban sombras que ocultaban la información vascular. Esta falta de calidad se cuantificará más adelante el punto 4.7 mediante las medidas utilizadas. En un primer análisis sobre el posible motivo de esta falta de calidad, se supuso que el problema provenía de que la distancia entre la mano, las matrices de LED y la cámara era excesiva (aprox. 20 cm). Por eso se propuso la siguiente idea para mejorar este primer sistema.

4.4 Sistema de captura de imágenes reducido con iluminación superior

El segundo sistema de captura de imágenes fue creado a partir del primero para intentar corregir los fallos encontrados e indicados en el punto anterior. Los componentes hardware son los mismos (excepto la eliminación del objetivo, que ya no era necesario), pero la disposición es completamente diferente. La posición de la cámara ha sido invertida y está colocada en la parte inferior del sistema, de forma que la mano o muñeca se coloca sobre ella. En el primer sistema la cámara se colocaba en la parte superior y la mano o muñeca se colocaba debajo.

El principio de funcionamiento de este segundo sistema de captura se muestra en el diagrama de bloques de la figura 27. La mano se coloca encima, pero ahora sin sistema de fijación exacto. La luz IR incide en la palma de la mano desde las dos matrices de LED (previamente homogeneizada por los papeles difusores) y su imagen reflejada es grabada por la cámara CCD, previo filtrado de parte del espectro realizado por los filtros IR colocados delante del objetivo.

En este caso la distancia entre las matrices de LED y la cámara es de apenas 5 cm y también se dispone de una tapa negra de protección para evitar la luz infrarroja del ambiente.

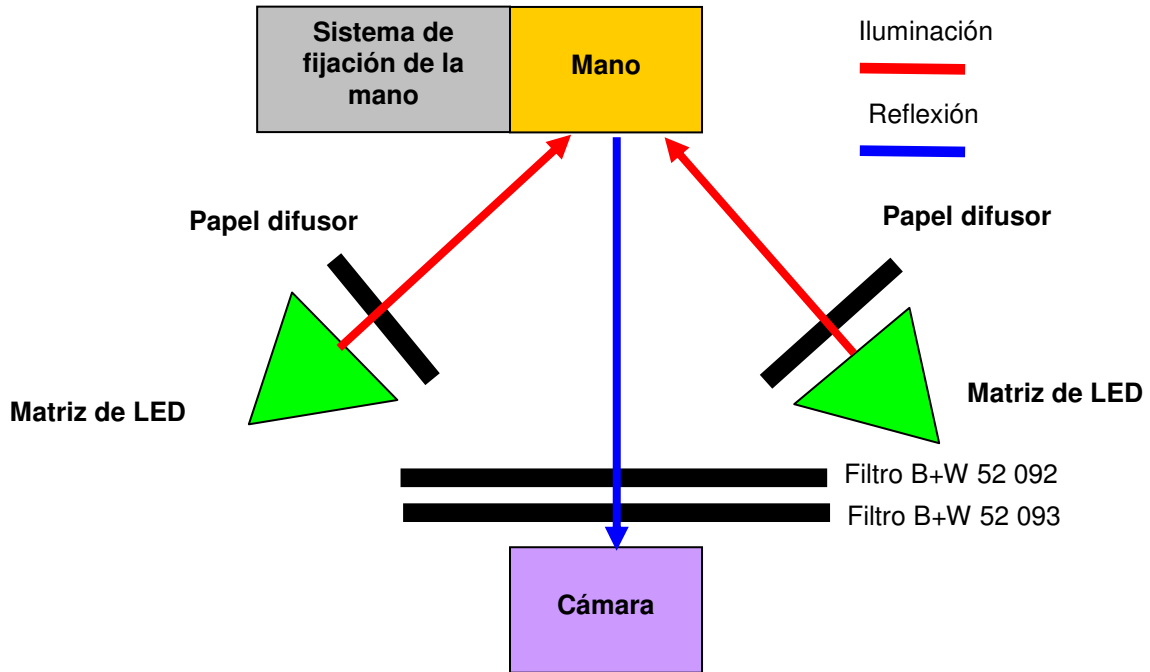


Figura 27: Principio de funcionamiento del sistema de captura de imágenes reducido con iluminación superior

La figura 28 muestra la construcción del prototipo para este segundo sistema basándose en el principio de funcionamiento de la figura 27. La figura 29 muestra diferentes vistas del mismo prototipo (alzado, planta y perfil) junto con el sistema completamente cubierto con la tapa de protección.



Figura 28: Sistema de captura de imágenes reducido con iluminación superior

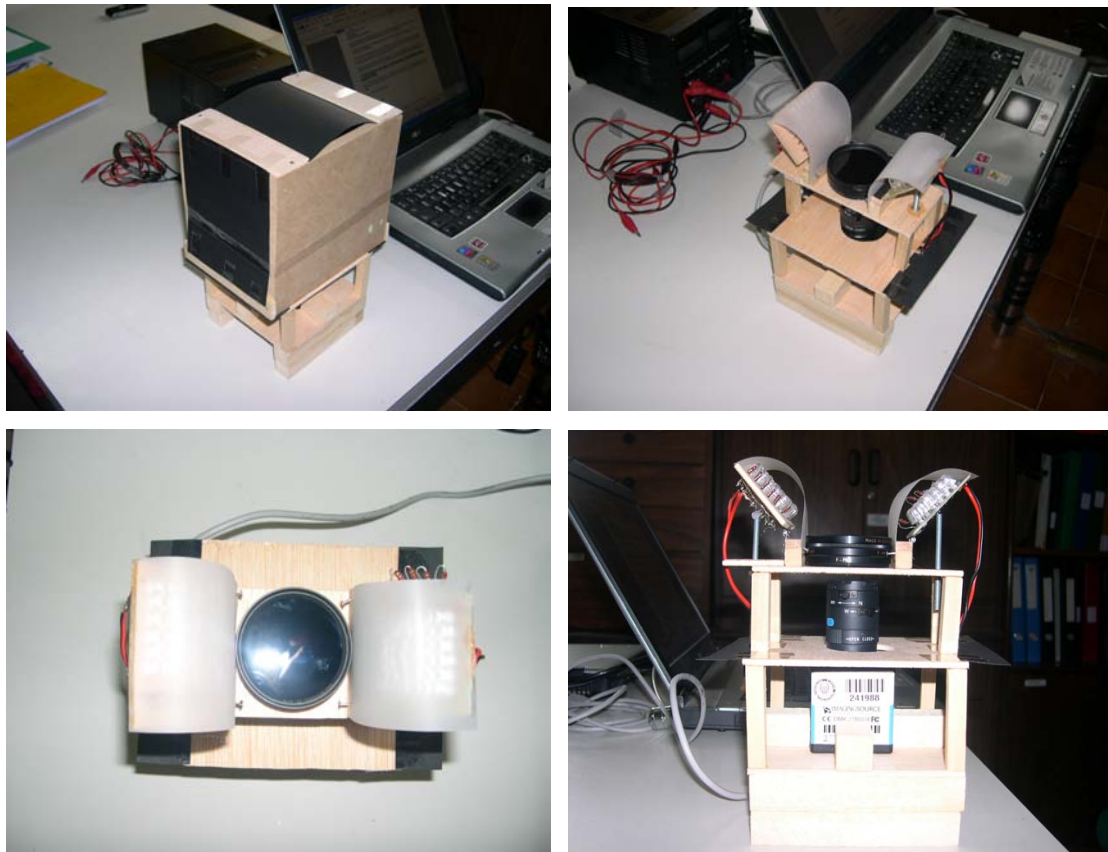


Figura 29: Diferentes vistas del sistema de captura de imágenes reducido con iluminación superior

4.4.1 Resultados obtenidos con este sistema

Las condiciones empleadas en las pruebas para obtener los resultados de este prototipo son las siguientes:

- Imágenes tomadas: 40 (10 personas, palma izquierda y derecha, muñeca izquierda y derecha)
- Ajustes de los parámetros la cámara: Ganancia: 300, Exposición: 1/40, Gamma: 100

La figura 30 muestra las mejores imágenes de las palmas (palma izquierda del usuario 1, palma izquierda del usuario 7), sin embargo, sigue habiendo palmas en las que las venas apenas se ven (palma izquierda del usuario 3, palma derecha del usuario 3), tal como se observa en la figura 31.

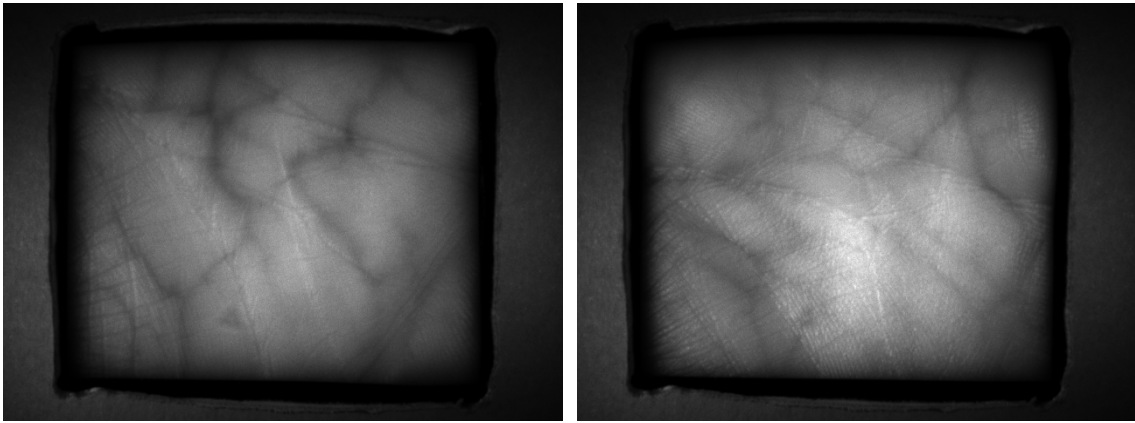


Figura 30: Imágenes de buena calidad para las palmas obtenidas con el sistema de captura reducido con iluminación superior

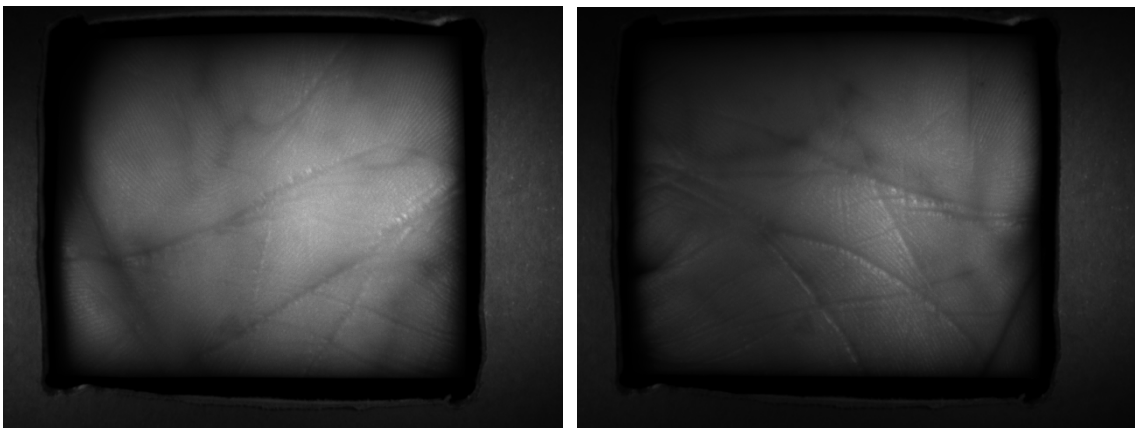
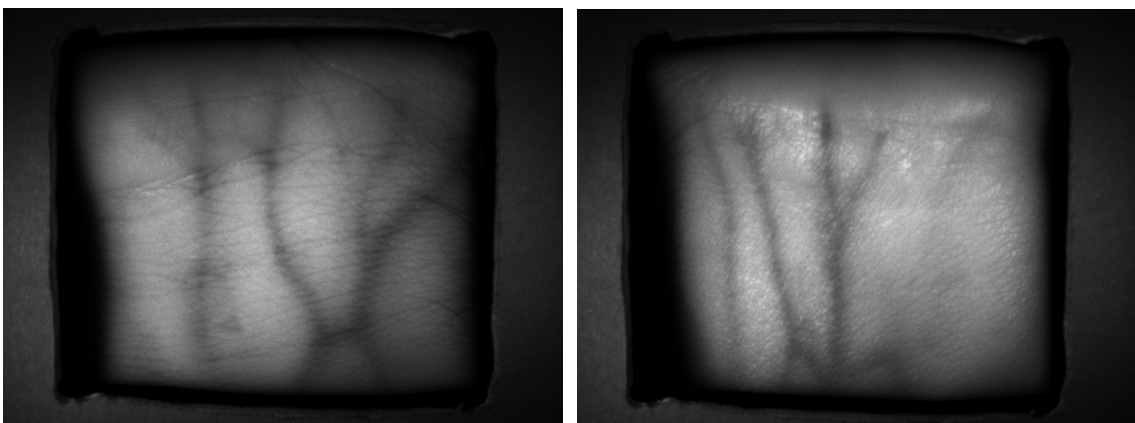


Figura 31: Imágenes de baja calidad para las palmas obtenidas con el sistema de captura reducido con iluminación superior

La figura 32, por el contrario, muestra 4 imágenes obtenidas para las muñecas.



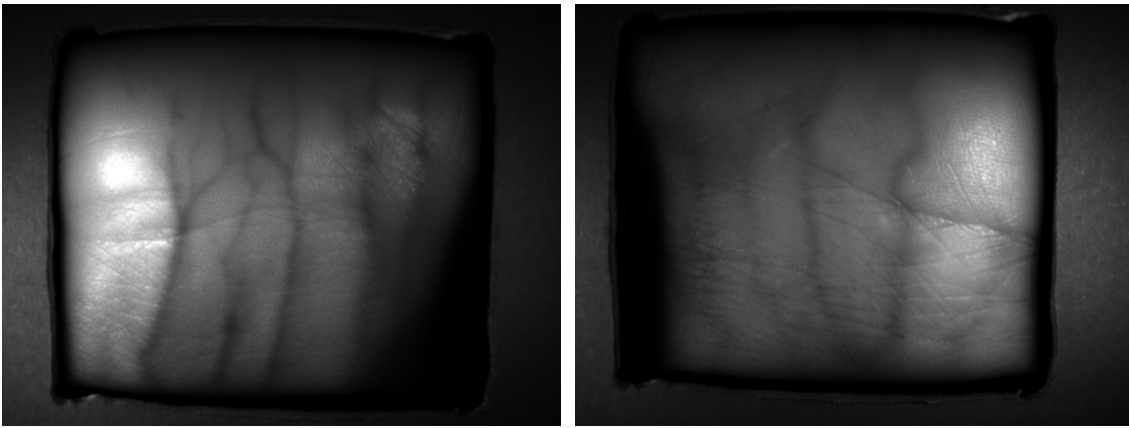


Figura 32: Imágenes para las muñecas obtenidas con el sistema de captura reducido con iluminación superior

Tal como se observa y se demostrará numéricamente en el punto 4.7, los resultados parecen mejores que con el primer sistema, sobre todo en las imágenes de las venas de las muñecas, pero todavía aparece una falta de homogenización de la luz, apareciendo todavía muchas zonas muy oscuras y otras demasiado claras, al contrario de lo que se pensaba que iba a ocurrir, pero ya se observa que las imágenes de las venas de las muñecas son más claras que las de las palmas en muchos casos.

Esto hace que todavía no se pueda dar validez a este sistema para su utilización en el sistema de identificación biométrico vascular completo y se siguieran buscando otras soluciones alternativas.

4.5 Sistema de captura de imágenes final con iluminación prismática

El tercer sistema de captura de imágenes fue creado buscando, sobre todo, la homogenización de la imagen y la eliminación de brillos y sombras.

El sistema constaba de una cámara CCD monocromo de bajo coste (Imaging Source DM 21BU054), 2 filtros IR colocados uno sobre otro (B+W 52 092 y B+W 52 093) y un sistema de iluminación prismática DCM SYSTEMS SAX 0505 (LEDS IR, 880 nm) [DCM08]. Con este sistema de iluminación prismática se suponía que los resultados deberían ser mucho mejores en cuanto a calidad. Este tipo de sistemas de iluminación se conocen como

“beam-splitter” y técnicamente consisten en emitir la luz infrarroja sobre un cristal polarizado inclinado que dirige la luz sólo hacia arriba (nunca hacia abajo) y su reflejo permite que se dirija completamente hacia abajo donde se sitúa la cámara.

El principio de funcionamiento de este tercer sistema de captura se muestra en el diagrama de bloques de la figura 33. La mano se coloca encima del sistema de fijación. Al utilizar un sistema de iluminación prismática, la luz IR incide lateralmente en el espejo polarizado del dispositivo SAX, desviándose hacia arriba donde está colocada la mano o muñeca, para reflejarse después en la cámara situada en la parte inferior del sistema, previa primera homogeneización de la luz por parte del espejo polarizado y el siguiente filtrado de parte del espectro realizado por los filtros IR colocados delante de la cámara.

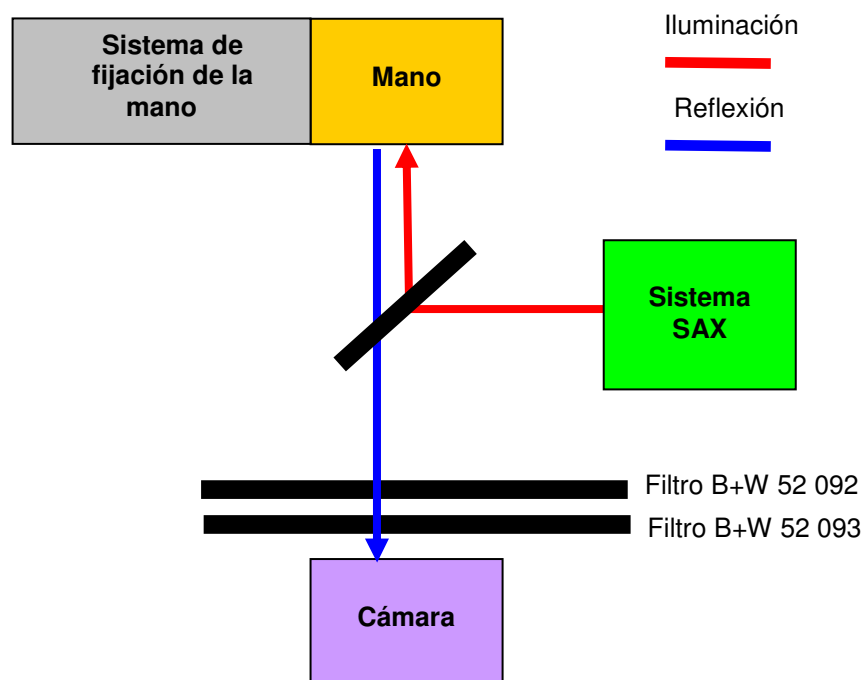


Figura 33: Principio de funcionamiento del sistema de captura de imágenes con iluminación prismática

La figura 34 muestra la construcción del prototipo para este tercer sistema basándose en el principio de funcionamiento de la figura 33. La figura 35 muestra diferentes vistas del mismo prototipo (alzado y perfil).



Figura 34: Sistema de captura de imágenes con iluminación prismática



Figura 35: Diferentes vistas del sistema de captura de imágenes con iluminación prismática

4.5.1 Resultados obtenidos con este sistema

Los resultados obtenidos se obtuvieron con las siguientes condiciones:

- Imágenes tomadas: 40 (10 personas, palma izquierda y derecha, muñeca izquierda y derecha)
- Ajustes de los parámetros la cámara: Ganancia: 260, Exposición: 1/30, Gamma: 100

La figura 36 muestra las imágenes de los mismos usuarios para las palmas que las mostradas en las figuras 30 y 31.

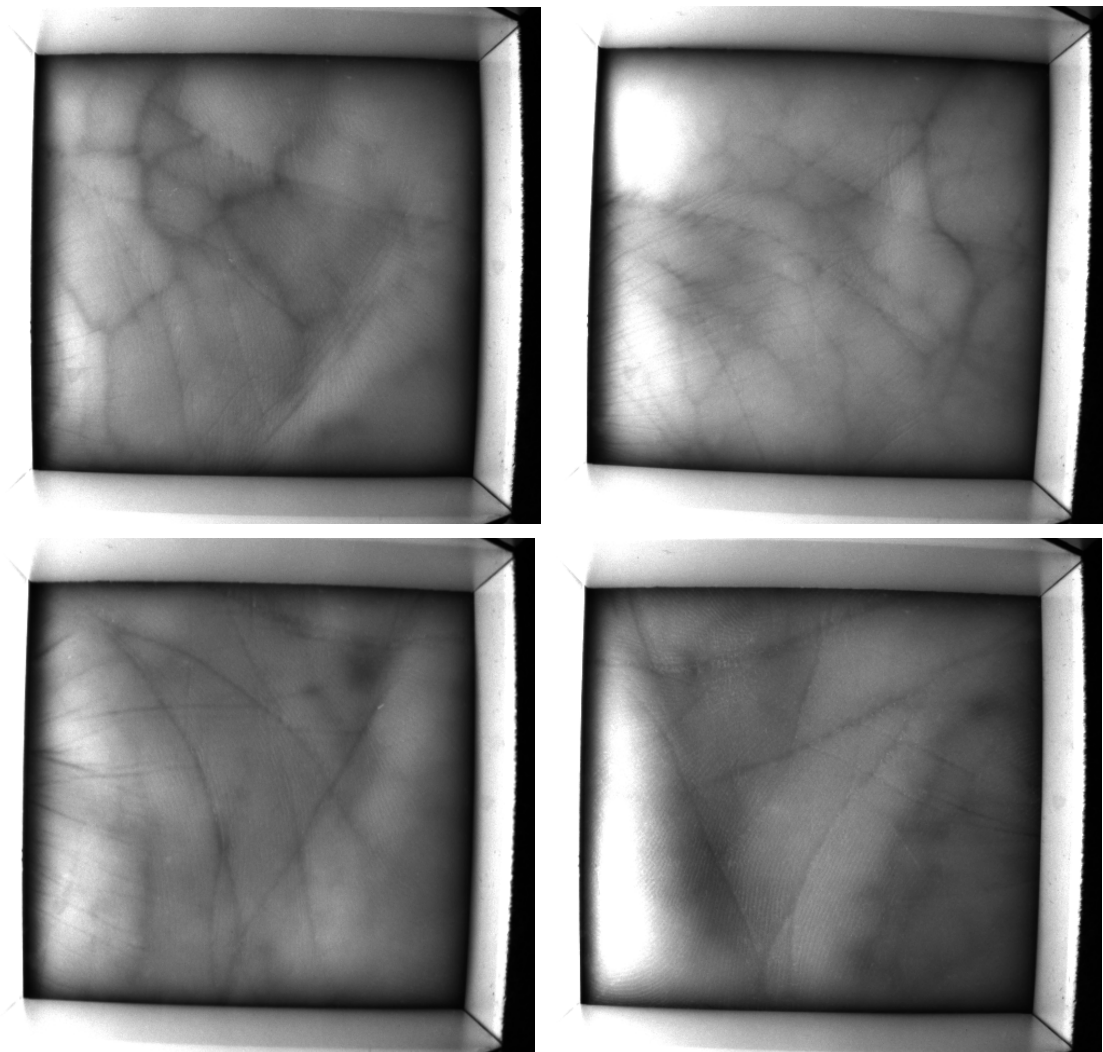


Figura 36: Imágenes para las palmas obtenidas con el sistema de iluminación prismática

La figura 37 muestra las imágenes de los mismos usuarios para las muñecas que las mostradas en la figura 32.

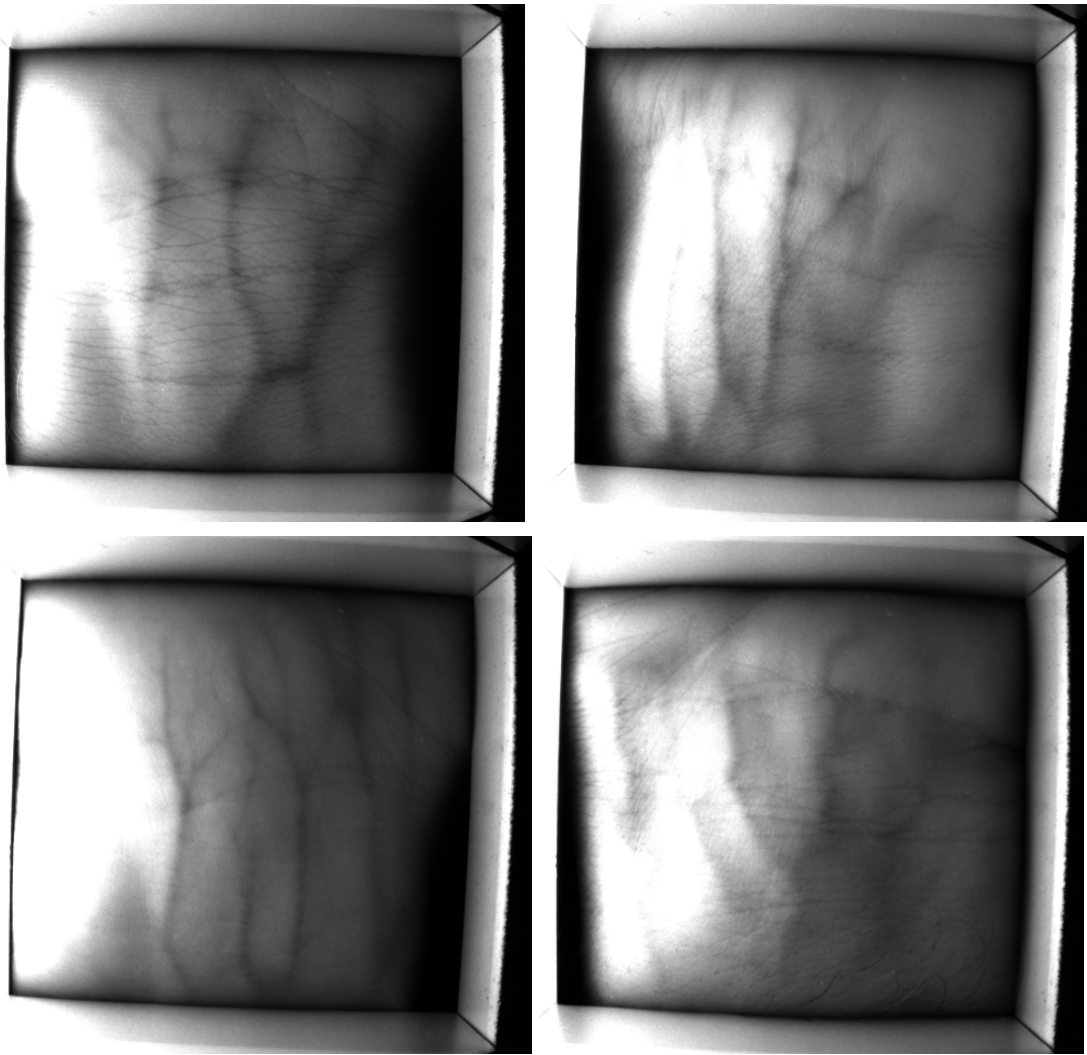


Figura 37: Imágenes para las muñecas obtenidas con el sistema de iluminación prismática

Tal como se puede observar a simple vista, los resultados obtenidos con este sistema no mejoran a los dos primeros ni se resuelve el problema fundamental de brillos, sombras y homogeneización para las imágenes capturadas. Tal como se indicó en el diagrama de bloques general de la figura 1, la captura de la imagen es el primer paso del sistema biométrico completo, de forma que cuanto mejor calidad tenga (es decir, mayor sea la diferencia entre las venas y la carne de alrededor y menos brillos y sombras presente), más sencillos serán los algoritmos de preprocesado y extracción de características y el sistema total debería presentar tiempos de ejecución más pequeños. Por eso se decide probar con otro tipo de iluminación para conseguir este objetivo y se descarta totalmente ese sistema que ni siquiera se incluye en las pruebas de calidad del punto 4.7 a la vista de lo observado.

4.6 Sistema de captura de imágenes final con iluminación por bóveda

El cuarto sistema de captura de imágenes fue creado teniendo en cuenta los fallos encontrados anteriormente. Consta de una cámara CCD monocromo de bajo coste (Imaging Source DM 21BU054), 2 filtros IR colocados uno sobre otro (B+W 52 092 y B+W 52 093) y un sistema de iluminación por bóveda DCM SYSTEMS DOM 1410 (LEDS IR, 880 nm) [DCM08].

La figura 38 muestra en detalle el dispositivo DOM utilizado y su principio de funcionamiento. El sistema de iluminación se denomina así debido a su forma de semiesfera o bóveda. Está diseñado para iluminar un objeto en todas direcciones con luz difusa a través la matriz de LED IR colocados en su circunferencia superior, produciendo un efecto de iluminación uniforme y resolviendo el problema encontrado en los 3 primeros sistemas (sombras, brillos y falta de homogeneización). Este efecto se denomina iluminación “cloudy day”.

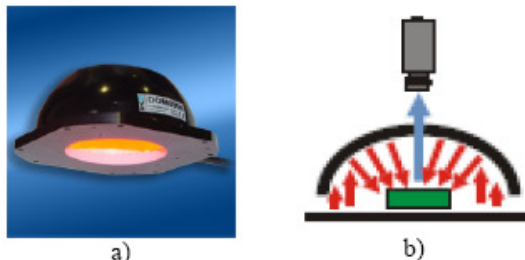


Figura 38: Sistema de iluminación por bóveda DOM [DCM08]

El sistema de iluminación DOM finalmente utilizado es una semiesfera rodeada de 112 LED IR de 850 nm y una alimentación máxima de 24V DC. Para el sistema de captura de imágenes finalmente utilizado sólo se necesita una alimentación de 11V DC debido a la sensibilidad de la cámara CCD utilizada y a las distancias entre cada uno de los componentes (no más de 5 cm entre la cámara y la muñeca).

El principio de funcionamiento de este cuarto sistema de captura se muestra en el diagrama de bloques de la figura 39. La mano se coloca encima sin un sistema de fijación exacto para la muñeca (a partir de ahora llamado

sistema primitivo de fijación). La luz del sistema DOM incide en la bóveda y se distribuye uniformemente iluminando la mano o muñeca en la parte superior, para finalmente reflejarse en la cámara situada en la parte inferior, previo filtrado de parte del espectro realizado por los filtros IR colocados delante de la cámara.

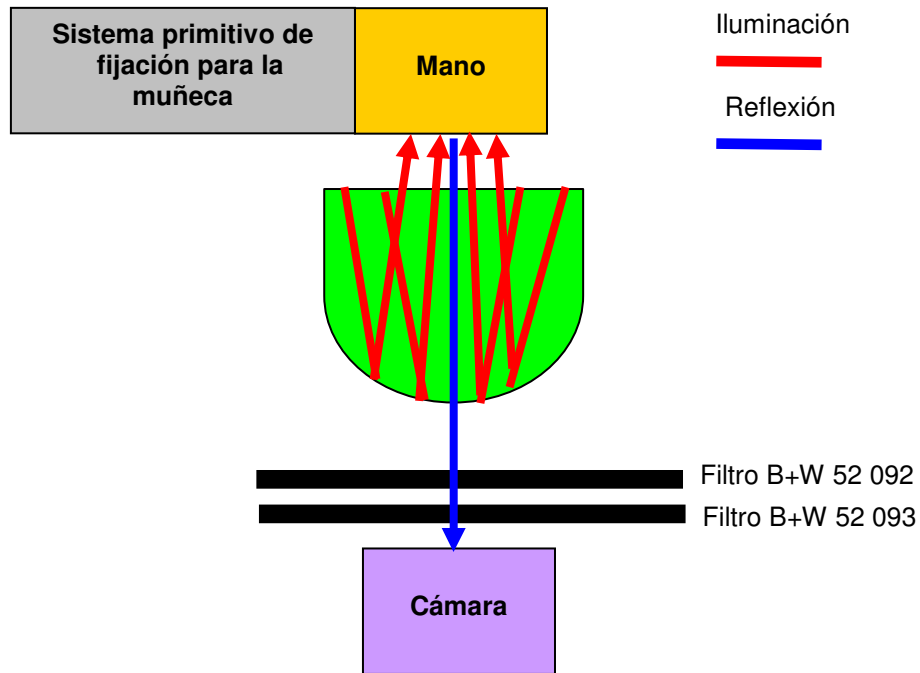


Figura 39: Principio de funcionamiento del sistema de captura de imágenes con iluminación por bóveda

Este cuarto sistema no dispone de cubierta para protegerse de la iluminación IR ambiental, como ocurría en los 3 primeros, por quedar la cámara casi completamente tapada al colocar la mano o muñeca sobre el sistema, pero sí dispone de un primer sistema primitivo de fijación para la muñeca sin ninguna precisión para guiar al usuario en la colocación de la misma. Como en el resto de sistemas, la cámara se conecta al PC vía USB para poder obtener las imágenes con el software IC Capture V2.0 (suministrado con la cámara) y siempre graba imágenes de 640 x 480 píxeles con 256 niveles de escala de grises.

La figura 40 muestra la construcción del prototipo para este cuarto sistema en base al principio de funcionamiento de la figura 39 y el sistema primitivo de fijación de la muñeca. La figura 41 muestra diferentes vistas del mismo prototipo (planta, alzado y varios perfiles).

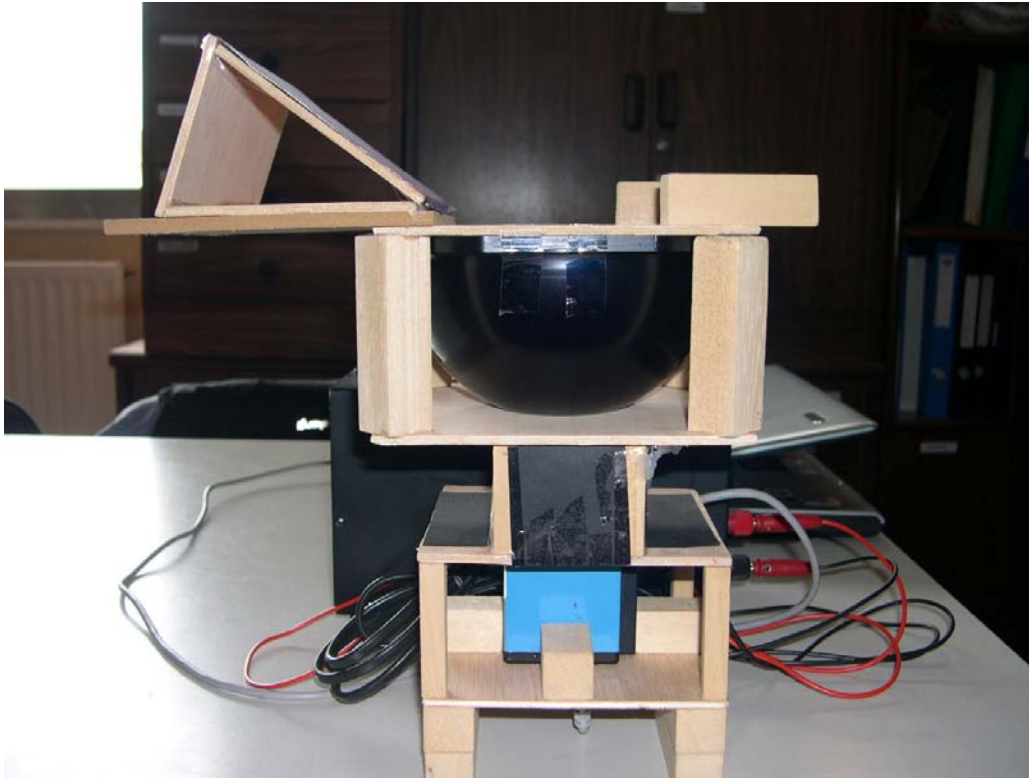


Figura 40: Sistema de captura de imágenes con iluminación por bóveda y sistema primitivo de fijación para la muñeca

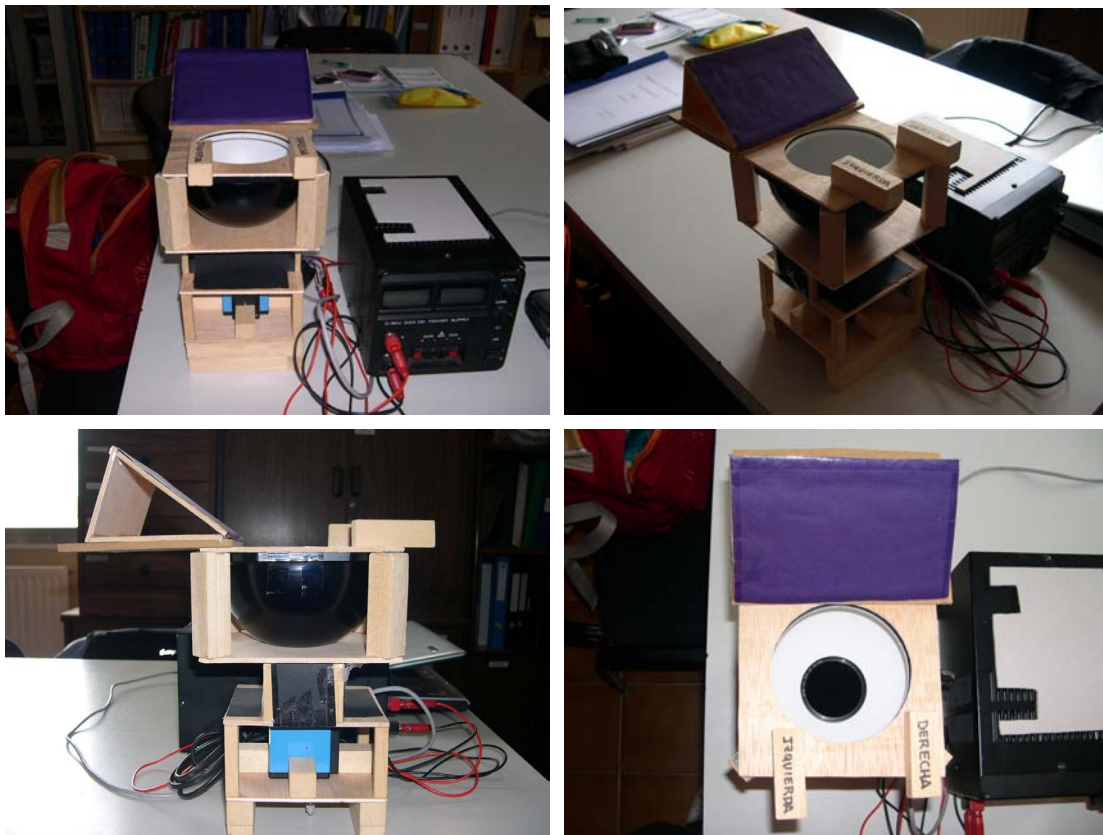


Figura 41: Diferentes vistas del sistema de captura de imágenes con iluminación por bóveda

4.6.1 Resultados obtenidos con este sistema

Una vez descrito el funcionamiento del sistema final implementado, se van a exponer los resultados logrados, los cuales fueron obtenidos bajo las siguientes condiciones:

- Imágenes tomadas: 180 (30 personas, 3 imágenes de la muñeca izquierda y 3 imágenes de la muñeca derecha).
- Ajustes de los parámetros la cámara: Ganancia: 260/300, Exposición: 1/30, Gamma: 40/60/100

Los parámetros de la cámara se han modificado en las imágenes, para así probar diferentes opciones en las imágenes con los parámetros de los algoritmos explicados en el capítulo 5 (preprocesado y extracción de características).

Este nuevo hardware permite capturar toda la muñeca y reconocer muy fácilmente los bordes de la misma. Esta propiedad, junto con el sistema final de fijación explicado en el punto 4.6.2, es la utilizada para poder obtener una ROI con un método muy simple, que simplifica el diagrama de bloques completo del sistema mostrado en la figura 1.

Los resultados de las imágenes obtenidas para un mismo usuario con diferentes parámetros de la cámara se muestran como ejemplo en las siguientes figuras, siendo muy similares en cuanto a calidad respecto a las del resto de usuarios:

- Figura 42 -> Ganancia = 260, Gamma = 40 para la imagen izquierda
Ganancia = 260, Gamma = 60 para la imagen derecha
- Figura 43 -> Ganancia = 260, Gamma = 100 para la imagen izquierda
Ganancia = 300, Gamma = 40 para la imagen derecha
- Figura 44 -> Ganancia = 300, Gamma = 60 para la imagen izquierda
Ganancia = 300, Gamma = 100 para la imagen derecha

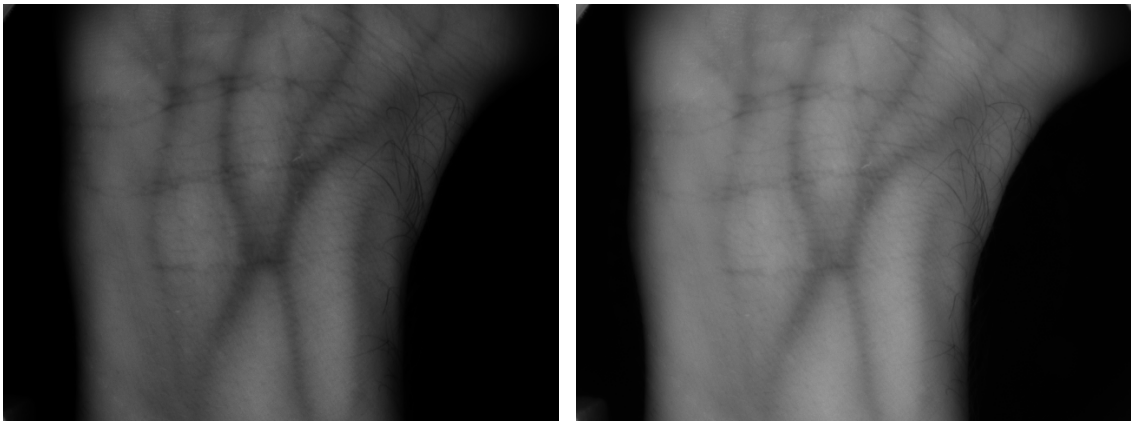


Figura 42: Imágenes obtenidas con el sistema de captura con iluminación por bóveda
(Ganancia 260, Gamma 40 / Ganancia 260, Gamma 60)

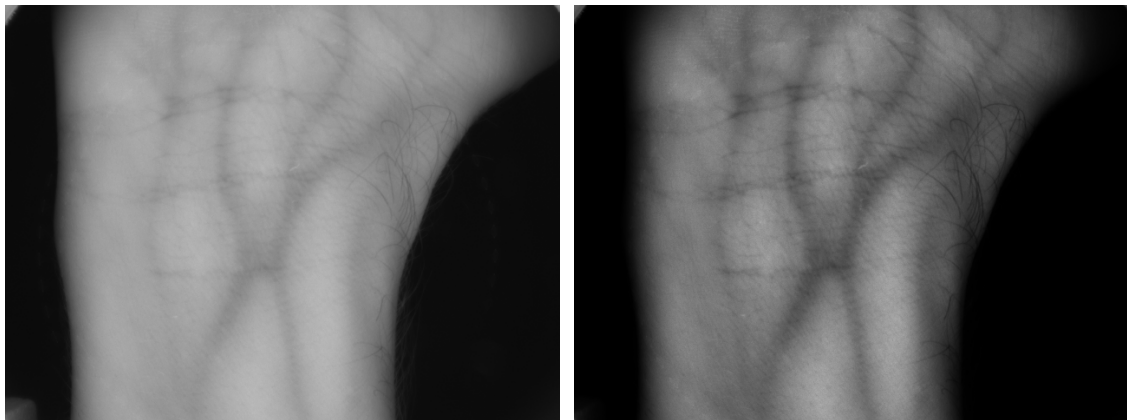


Figura 43: Imágenes obtenidas con el sistema de captura con iluminación por bóveda
(Ganancia 260, Gamma 100 / Ganancia 300, Gamma 40)

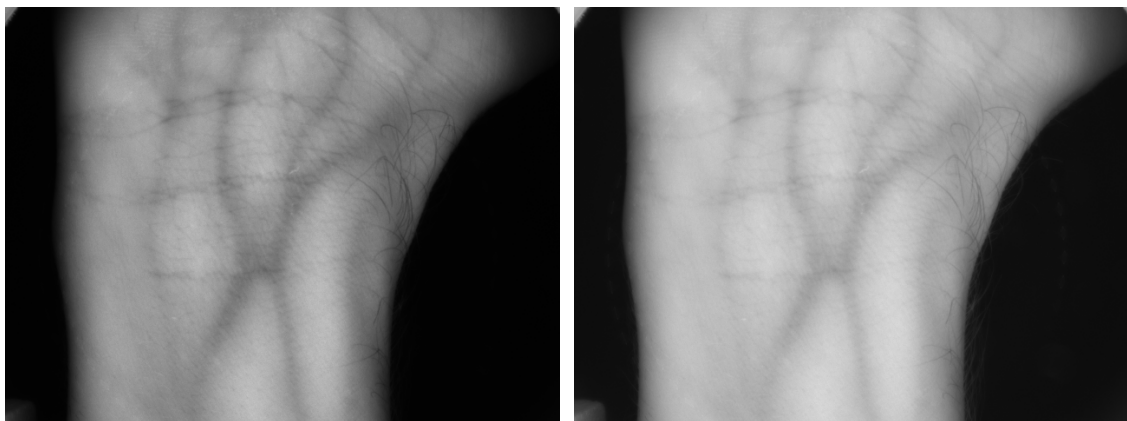


Figura 44: Imágenes obtenidas con el sistema de captura con iluminación por bóveda
(Ganancia 300, Gamma 60 / Ganancia 300, Gamma 100)

Tal como se observa, los resultados de este sistema sí mejoran los de los sistemas anteriores, presentando la luz una buena homogeneización y reduciéndose considerablemente las sombras y reflejos de las imágenes.

Además la distinción entre las venas y la carne de alrededor es suficientemente clara para los algoritmos software del capítulo 5, independientemente de los parámetros elegidos para la cámara. Todo esto se confirmará con las pruebas de calidad mostradas en el punto 4.7.

4.6.2 Sistema final de fijación para la muñeca

Por necesidades de los métodos de análisis de reconocimiento utilizados en el capítulo 6, el sistema primitivo de fijación de la muñeca mostrado en las figuras 40 y 41 no era preciso y dejaba demasiados grados de libertad al usuario, de forma que las imágenes de las muñecas tenían demasiada desviación, lo que hacía que el algoritmo mencionado no funcionase bien.

Por eso, se diseñó posteriormente un sistema de fijación mucho más preciso que elimina la gran mayoría de los grados de libertad del usuario a la hora de colocar la mano en el sistema y provoca que todas las muestras y patrones obtenidos de cada usuario sean casi idénticas, lo cual es un requisito absolutamente necesario para que el algoritmo de reconocimiento obtenga buenos resultados.

La figura 45 muestra el sistema final de fijación para la muñeca. El sistema dispone de varios puntos de fijación de diversas partes de la mano (dedo pulgar (3), dedo índice (5 y 6), dedo meñique (8 y 9), palma inferior (1) y antebrazo (2, se ve en la figura 46)), con varias reglas métricas en los puntos de fijación para el reconocimiento por parte del usuario de la posición elegida y así poderla repetir exactamente en las siguientes muestras (4, 7, 10 y 12).

La figura 46 muestra dicho sistema de fijación implementado sobre el sistema de captura de imágenes con iluminación por bóveda desde diferentes vistas (planta, alzado y perfil), formando el sistema final con el que se han obtenido la mayoría de los resultados mostrados en el capítulo 8, aunque otros resultados se han dado con el sistema primitivo.

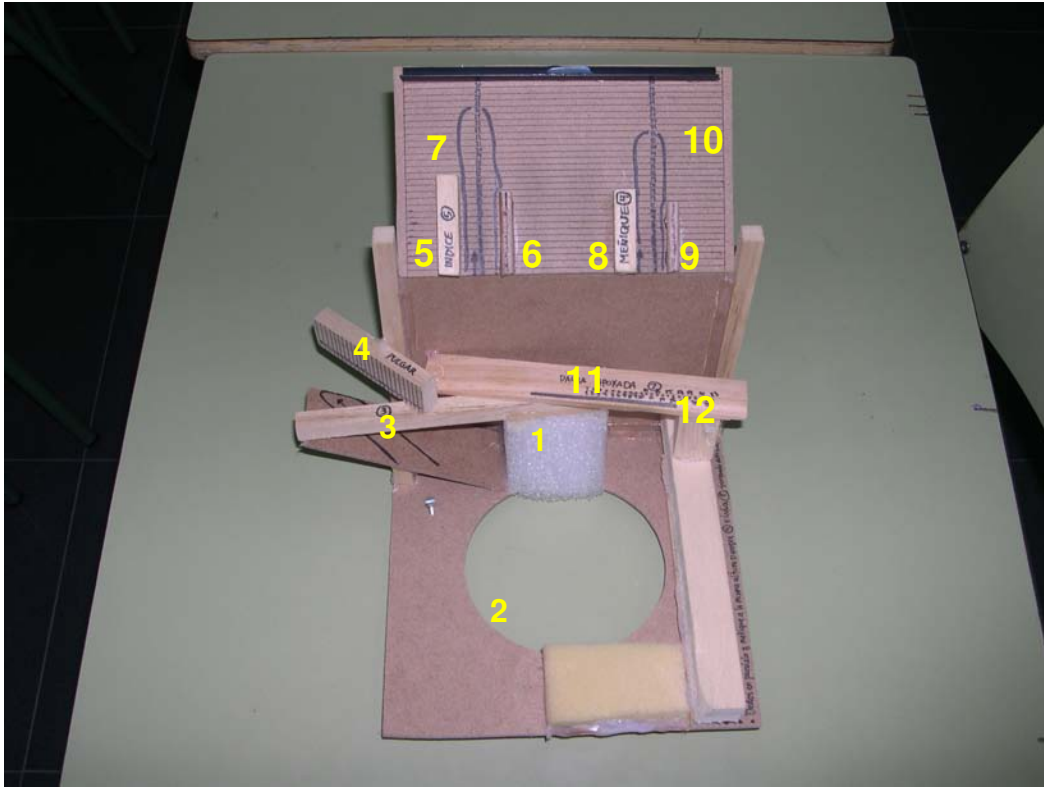


Figura 45: Sistema final de fijación para la muñeca

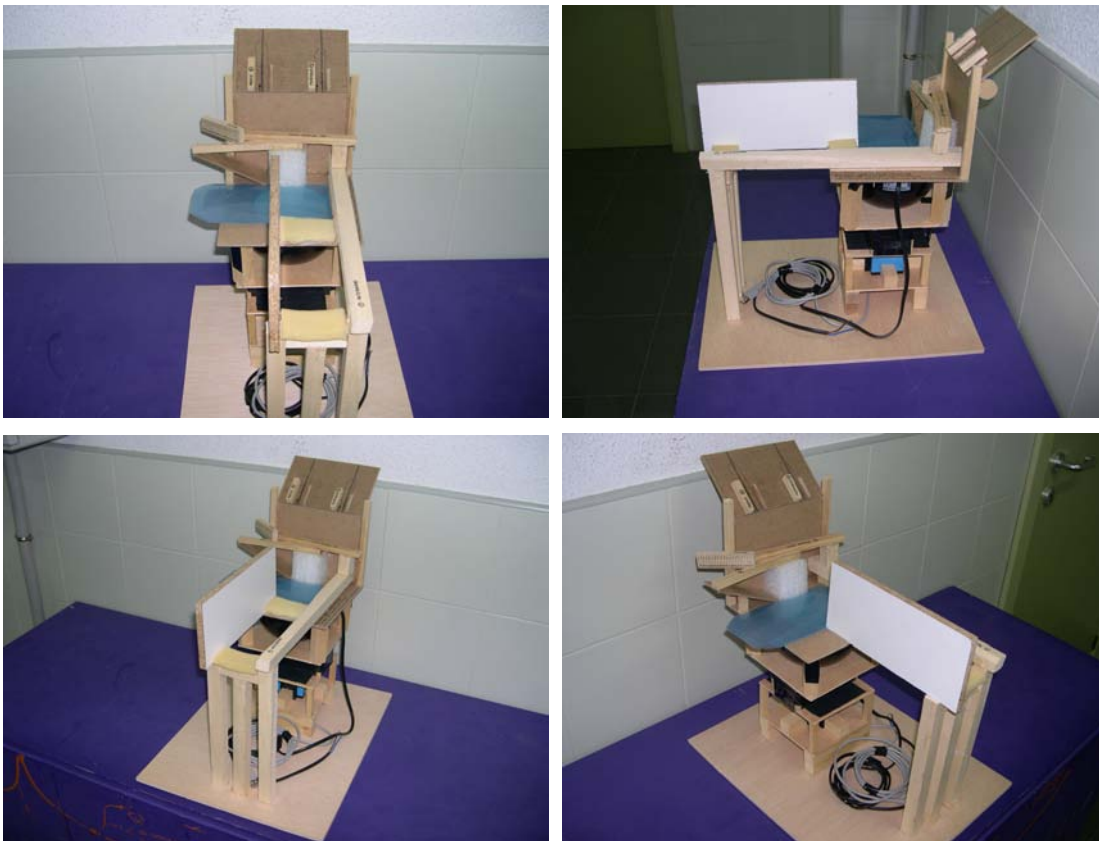


Figura 46: Diferentes vistas de sistema de captura de imágenes con iluminación por bóveda y el sistema final de fijación para la muñeca

A continuación, se explica el procedimiento que hay que seguir para fijar exactamente la muñeca en cada una de las tomas de muestras. La idea de este sistema de fijación consiste en fijar 6 puntos de la mano para eliminar casi completamente cualquier grado de libertad al usuario a la hora de colocar la mano y obtener imágenes casi idénticas para cada muestra y patrón. En la figura 47 se muestran gráficamente los puntos de los pasos descritos a continuación para tomar cada muestra y patrón.

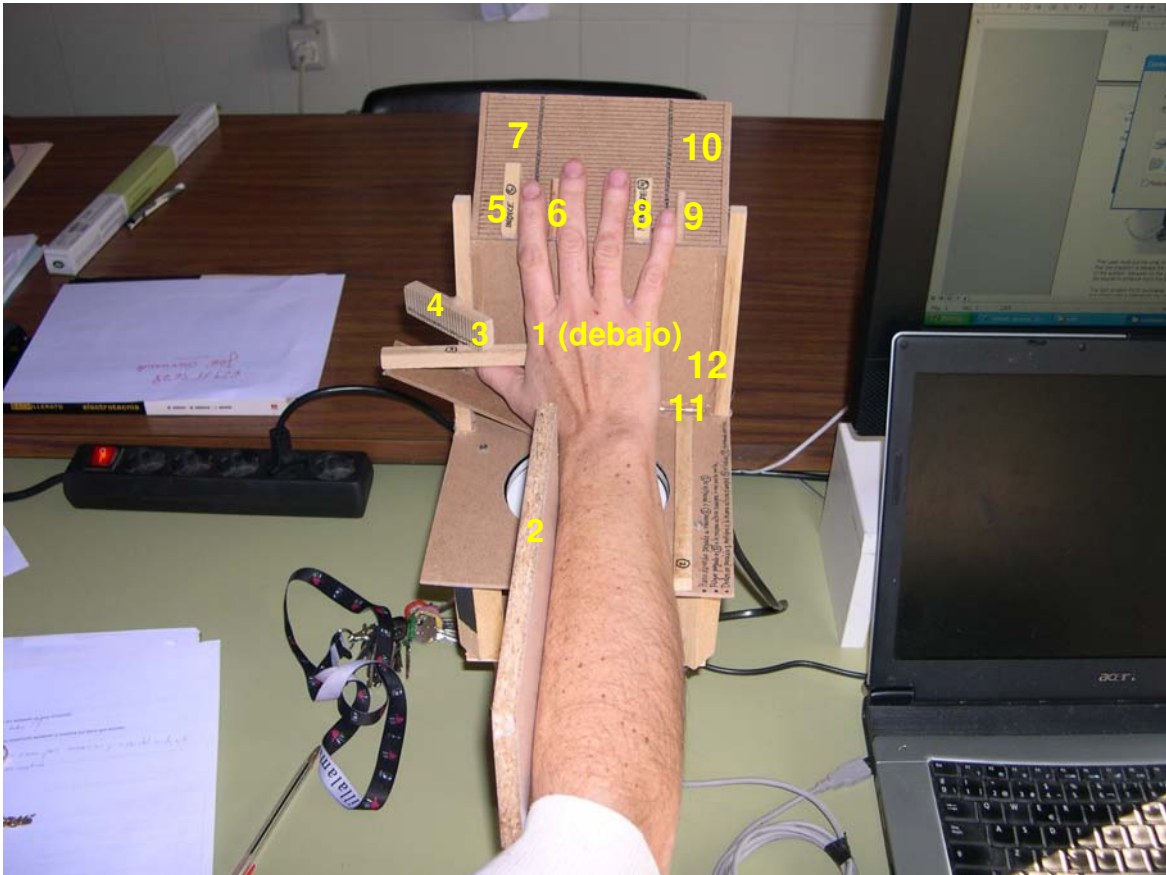


Figura 47: Principio de funcionamiento del sistema final de fijación para la muñeca

El procedimiento a seguir en función de los puntos indicados en la figura 47 está basado en que el usuario debe colocar la mano sobre el sistema de fijación para la mano/muñeca siguiendo los pasos siguientes:

- Apretar a tope sobre 1 y pegar el antebrazo en 2.
- Colocar el pulgar debajo de 3 y mirar la colocación final del dedo sobre la regla en 4 para tenerlo en cuenta en las próximas muestras.

- Colocar el dedo índice entre 5 y 6 y mirar la colocación final del dedo sobre la regla en 7 para tenerlo en cuenta en las próximas muestras.
- Colocar el dedo meñique entre 8 y 9 y mirar la colocación final del dedo sobre la regla en 10 para tenerlo en cuenta en las próximas muestras.
- Apoyar la palma en 11 y mirar la colocación del borde de la misma sobre la regla en 12 para tenerlo en cuenta en las próximas muestras.

Utilizando este procedimiento para la toma de todas las muestras y patrones, se obtienen imágenes muy parecidas, lo que simplifica enormemente los algoritmos explicados en los capítulos 5 y 6. Por último mostrar la diferencia entre las imágenes obtenidas por el sistema de iluminación por bóveda con el sistema primitivo y con el sistema final de fijación. La figura 48 muestra las imágenes obtenidas para 4 muestras diferentes de un mismo usuario utilizando el sistema primitivo de fijación las figuras 40 y 41. La figura 49 muestra las imágenes obtenidas para 4 muestras diferentes del mismo usuario usando el sistema final de fijación de las figuras 45, 46 y 47.

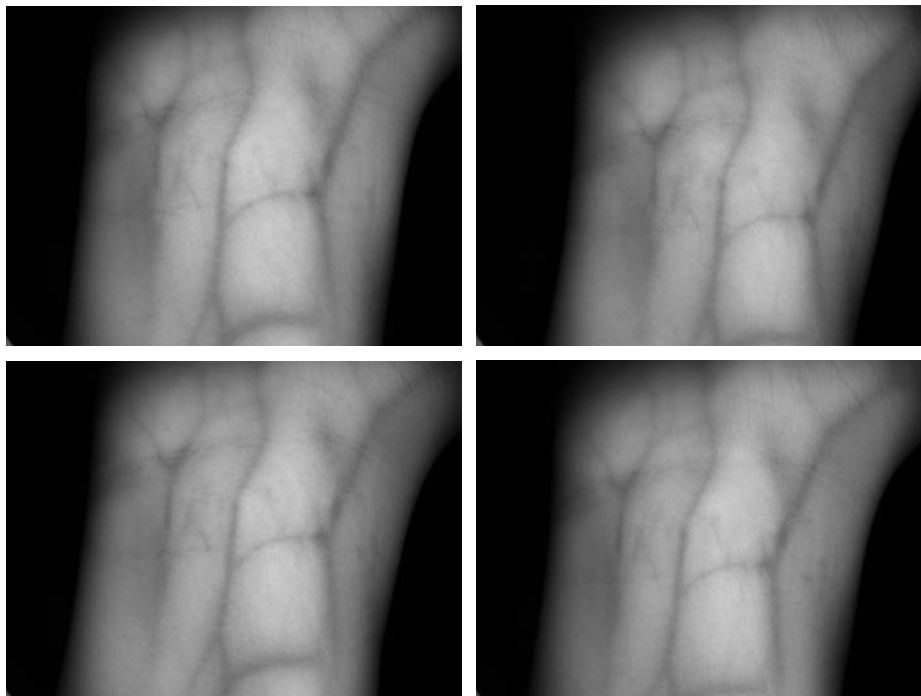


Figura 48: Imágenes obtenidas con el sistema de iluminación por bóveda y el sistema primitivo de fijación

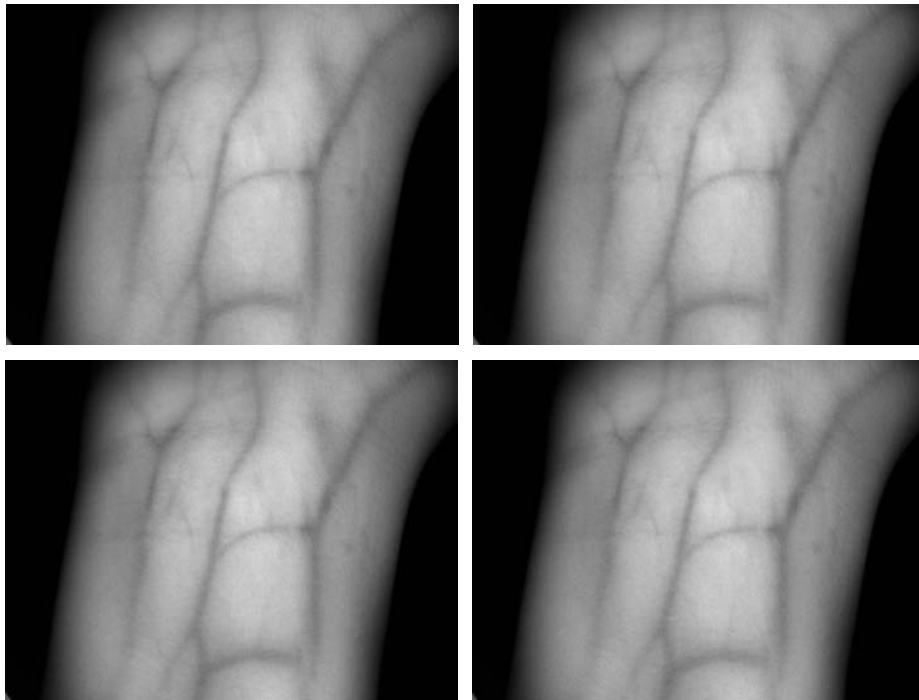


Figura 49: Imágenes obtenidas con el sistema de iluminación por bóveda y el sistema final de fijación

Tal como se observa, las imágenes de la figura 49 son casi idénticas por la reducción casi absoluta de los grados de libertad para el usuario, mientras que en la figuras 48 se observan diferencias en la posición de las muñecas, que provocarían una complicación en los algoritmos utilizados en los capítulos 5 y 6. Por eso se decidió tomar la base de datos de muestras de más usuarios utilizando el sistema de posicionamiento de las figuras 45, 46 y 47 y desarrollar los algoritmos en función de estas imágenes.

4.7 Medidas de calidad de las imágenes de los sistemas de iluminación

Para confirmar lo indicado en los resultados cualitativos de las imágenes obtenidos directamente por observación de las mismas, se han utilizado algunas métricas/medidas de calidad objetivas que constaten lo indicado. Se han realizado para el primer, segundo y cuarto sistema, ya que el tercer sistema se descartó directamente al observar simplemente las imágenes obtenidas, tal como se indicó en el punto 4.5. Se ha realizado sobre 10 imágenes de cada uno de los 3 prototipos elegidas al azar.

4.7.1 Medidas de calidad utilizadas

La primera medida hace relación al contraste entre las venas y la carne de cada una de las imágenes. El procedimiento realizado para las 10 imágenes de cada prototipo es el siguiente:

1. Se elige una región de interés central cuadrada (ROI) con el mismo tamaño para cada imagen.
2. Se resaltan manualmente las líneas de las venas en cada una de las imágenes pintándolas de color rojo.
3. Se crean 2 conjuntos diferentes: Conjunto V con todos los píxeles de las venas, y conjunto C con todos los píxeles de la carne.
4. Se hace el cálculo medio del valor de todos los píxeles que pertenecen a la vena en una imagen, mediante la siguiente ecuación:

$$X_V = \sum_x \sum_i p_V(x_i, y_i) / \sum(x_i, y_i),$$

donde $p_V(x_i, y_i)$ es el valor del píxel (x_i, y_i) perteneciente a la vena, valor $\in (0, 256)$

5. Se hace el cálculo medio del valor de todos los píxeles que pertenecen a la carne en una imagen, mediante la siguiente ecuación:

$$X_C = \sum_x \sum_i p_C(x_i, y_i) / \sum(x_i, y_i),$$

donde $p_C(x_i, y_i)$ es el valor del píxel (x_i, y_i) perteneciente a la carne, valor $\in (0, 256)$

6. Se calcula la diferencia de ambos valores en cada imagen z:

$$D_{\text{imagen } z} = X_V - X_C$$

7. Finalmente se calcula el valor medio de todos los valores $D_{\text{imagen } z}$ de las 10 imágenes del mismo prototipo, mediante la siguiente ecuación

$$D_{A_{\text{prototipo}}} = \sum D_{\text{imagen } z} / 10$$

Este procedimiento calcula finalmente el contraste medio entre los píxeles que pertenecen a la carne y los píxeles que pertenecen a las venas para comprobar la diferencia entre ellas, siendo mejor el sistema cuanto mayor sea su valor.

La segunda medida de calidad es la variación máxima media entre los píxeles que pertenecen a la carne de cada imagen. El procedimiento realizado para las 10 imágenes de cada prototipo es el siguiente:

1. Se elige una región de interés central cuadrada (ROI) con el mismo tamaño para cada imagen que la primera medida de calidad.
2. Se resaltan manualmente las líneas de las venas en cada una de las imágenes pintándolas de color rojo.
3. Se crean 2 conjuntos diferentes: Conjunto V con todos los píxeles de las venas, y conjunto C con todos los píxeles de la carne. Se descarta el conjunto V y se sigue trabajando con el conjunto C.
4. Se hace el cálculo del valor máximo de todos los píxeles que pertenecen a la carne en una imagen, mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Max}_C = \text{Max} (p_C(x_i, y_i)),$$

donde $p_C(x_i, y_i)$ es el valor del píxel (x_i, y_i) perteneciente a la carne, valor $\in (0, 256)$

5. Se hace el cálculo del valor mínimo de todos los píxeles que pertenecen a la carne en una imagen, mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Min}_C = \text{Min} (p_C(x_i, y_i)),$$

donde $p_C(x_i, y_i)$ es el valor del píxel (x_i, y_i) perteneciente a la carne, valor $\in (0, 256)$

6. Se calcula la diferencia de ambos valores en cada imagen z:

$$D_{\text{imagen } z} = \text{Max}_C - \text{Min}_C$$

7. Finalmente se calcula el valor medio de todos los valores $D_{\text{imagen } z}$ de las 10 imágenes del mismo prototipo, mediante la siguiente ecuación

$$DB_{\text{prototipo}} = \sum D_{\text{imagen } z} / 10$$

Este procedimiento calcula finalmente si la homogeneización de las zonas blancas es buena, es decir, mide si hay muchos brillos y sombras en las imágenes, siendo mejor el sistema cuanto menor sea su valor.

La última medida de calidad es la distribución de la luz en la imagen. Si la luz se distribuye uniformemente, la energía media por píxel debería ser similar en todos los bloques reducidos de la ROI ya que las venas y la carne se distribuyen de manera aleatoria por la muñeca y la selección de una ROI relativamente grande haría que los valores medios de cada bloque reducido de la ROI tengan que ser muy parecidos. El procedimiento realizado para las 10 imágenes de cada prototipo es el siguiente:

1. Se elige una región de interés central cuadrada (ROI) con el mismo tamaño para cada imagen que la primera y segunda medida de calidad.
2. Se divide dicha ROI en 9 cuadrados iguales (3 x 3) para tener zonas reducidas pero suficientemente grandes, a los que llamaremos bloques.
3. Se hace el cálculo de la energía de cada uno de los bloques de la ROI extraídos en el paso 2, mediante la siguiente ecuación:

$$E_{\text{block } z} = \sum_x \sum_i (p(x_i, y_i))^2 / x * y,$$

donde $p(x_i, y_i)$ es el valor del píxel (x_i, y_i) perteneciente al bloque z , valor $\in (0, 256)$; $(p(x_i, y_i))^2$ es el valor de la energía del píxel (x_i, y_i) perteneciente al bloque z , valor $\in (0, 65536)$; x e y son los valores de filas y columnas del bloque seleccionado

4. Se calcula el valor máximo de todos los valores de energía de cada bloque, mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Max}_E = \text{Max} (E_{\text{block } z})$$

5. Se calcula el valor mínimo de todos los valores de energía de cada bloque, mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Min}_E = \text{Min} (E_{\text{block } z})$$

6. Se calcula la diferencia de ambos valores en cada imagen z :

$$D_{\text{Imagen } z} = \text{Max}_E - \text{Min}_E$$

7. Finalmente se calcula el valor medio de todos los valores $D_{\text{Imagen } z}$ de las 10 imágenes del mismo prototipo, mediante la siguiente ecuación

$$DC_{\text{prototipo}} = \sum D_{\text{Imagen } z} / 10$$

Este procedimiento calcula finalmente si la distribución de la luz es buena en las imágenes, siendo mejor el sistema cuanto menor sea su valor.

4.7.2 Resultados obtenidos

Para realizar estas medidas se creó una plataforma de pruebas específica para este propósito con las condiciones indicadas en la introducción del punto 4.7.

Los resultados mostraron que, con la primera medida de calidad, el contraste de las imágenes con el segundo sistema es un 11,44 % superior de media al obtenido en el primero. Para el cuarto sistema se comprueba que el contraste es un 5,80 % superior de media respecto al segundo.

Por otra parte, con la segunda medida de calidad, la variación en las imágenes con el segundo sistema es un 11,06 % inferior de media que las que se obtuvieron con el primero, mientras que la variación en las imágenes con el cuarto sistema es un 51,06 % inferior de media respecto al segundo.

Por último, la media de la variación máxima de energía por píxeles en las imágenes del primer sistema era de 15.503,95 (en una escala de 0 a 65.536 para niveles de gris), mientras que en las imágenes del segundo sistema era de 17.628.01 (un 13,71% superior al primer sistema). El valor obtenido para las imágenes del cuarto sistema era de 8.752.83 (un 51,24% inferior que el primer sistema).

La tabla 1 muestra un resumen comparativo de los resultados comentados anteriormente para cada uno de los parámetros de medida de calidad descritos, pero de manera más ordenada y que demuestran claramente que el sistema de iluminación por bóveda tiene mucha mejor calidad que los primeros (seleccionados sus resultados totales en verde). Por eso se eligió como sistema final para el resto de la Tesis, y cuyos resultados se contrastaron más tarde con los resultados del sistema completo mostrados en el capítulo 8.

Tabla 1: Comparativa final de resultados para los sistemas de iluminación

Medidas de calidad		Primer sistema: Sistema con iluminación superior	Segundo sistema: Sistema reducido con iluminación superior	Cuarto sistema: Sistema con iluminación por bóveda
Primera medida de calidad: Diferencia de contraste medio vena- carne	D _{Imagen 1}	14,73	10,82	13,65
	D _{Imagen 2}	13,23	12,20	12,99
	D _{Imagen 3}	5,64	2,23	14,31
	D _{Imagen 4}	14,23	10,64	18,08
	D _{Imagen 5}	11,68	9,17	7,67
	D _{Imagen 6}	12,72	13,14	14,05
	D _{Imagen 7}	10,82	13,96	9,4
	D _{Imagen 8}	19,98	17,20	11,25
	D _{Imagen 9}	4,02	5,10	12,38
	D _{Imagen 10}	-3,20	21,27	8,66
	DA _{Prototipo}	10,385	11,573	12,244
% variación frente al valor inmediatamente inferior		11,44	5,80	
Segunda medida de calidad: Diferencia de contraste medio carne- carne	D _{Imagen 1}	218	185	83
	D _{Imagen 2}	255	197	68
	D _{Imagen 3}	255	198	107
	D _{Imagen 4}	253	197	73
	D _{Imagen 5}	245	243	130
	D _{Imagen 6}	254	246	131
	D _{Imagen 7}	255	229	117
	D _{Imagen 8}	239	255	108
	D _{Imagen 9}	200	164	103
	D _{Imagen 10}	204	201	115
	DB _{Prototipo}	237,8	211,5	103,5
% variación frente al valor inmediatamente superior		-11,06	-51,06	
Tercera medida de calidad: Diferencia de energía media	D _{Imagen 1}	15.283	13.356	4.611
	D _{Imagen 2}	16.747	16.326	3.842
	D _{Imagen 3}	12.539	12.099	7.234
	D _{Imagen 4}	18.292	18.981	11.190
	D _{Imagen 5}	15.634	21.013	12.593
	D _{Imagen 6}	11.305	26.882	12.255
	D _{Imagen 7}	15.326	14.617	8.571
	D _{Imagen 8}	23.082	30.046	1.327
	D _{Imagen 9}	11.607	7.537	4.787
	D _{Imagen 10}	15.215	15.423	9.188
	DE _{Prototipo}	15.503	17.628	7.560
% variación frente al valor inmediatamente superior	-12,05		-51,24	

4.8 Conclusiones

En este capítulo se ha explicado el proceso seguido para obtener finalmente un sistema de captura de imágenes con una calidad suficiente para ser utilizado por el sistema biométrico vascular completo y que mejora aparentemente los sistemas expuestos en el punto 4.2.2 que utilizan cámaras CCD IR, a la vista de los resultados que se observan en las figuras 42, 43, 44, 48 y 49. Hay que tener en cuenta que para estar plenamente seguro de lo afirmado aquí, habría que analizar las imágenes de dichos sistemas con las medidas de calidad del punto 4.7 y constatarlo numéricamente. Sin embargo esto no es posible, al no disponer de dichas imágenes originales.

Los valores obtenidos por las medidas de calidad prueban que la distribución de la luz, la homogeneidad de la misma y la diferencia entre vena y carne son mucho mejores en el sistema de iluminación por bóveda, eligiéndose este para tomar la base de datos de usuarios necesaria para probar en el capítulo 8 todo el sistema biométrico propuesto en esta Tesis.

Sin embargo, el sistema de captura de imágenes tiene algunos puntos susceptibles de mejora en investigaciones futuras.

1. En el sistema de captura habría que desarrollar un método de posicionamiento de la muñeca más comercial y más cómodo para el usuario, basándose en la idea indicada en el punto 4.6.2. Un punto fundamental del sistema actual es la necesidad de limitar en buen grado los grados de libertad del usuario para garantizar la similitud de las muestras y simplificar el sistema de reconocimiento basado en la comparación orientable completa, lo que provoca una cierta incomodidad para el usuario a la hora de la adquisición.
2. Pero si se desarrolla un sistema con más grados de libertad y que no exija un posicionamiento tan estricto, que sería un punto a mejorar en el futuro, las imágenes ya no serán tan similares y habría que complicar y mejorar los algoritmos descritos en los capítulos 5 y 6.

Preprocesado y extracción de características

5.1 Introducción

En el capítulo anterior se ha explicado el sistema de captura de imágenes utilizado en esta Tesis Doctoral, es decir, la parte HW del sistema biométrico vascular completo, pero falta la parte SW, es decir, la parte de preprocesado de las imágenes, la extracción de características y los métodos de análisis para el reconocimiento. Toda esta parte SW se ha realizado implementando la plataforma de pruebas abierta mostrada en el anexo. A partir de este punto se van a tratar cada uno de estos aspectos.

Este capítulo se centra en particular en las etapas de preprocesado y extracción de características, que son los primeros pasos a realizar por la plataforma de pruebas una vez que se tienen las imágenes de las muestras y patrones de cada usuario, tal como se observa en el diagrama de bloques de la figura 1. Todo ello, teniendo en cuenta los puntos de partida mencionados en las conclusiones del punto 3.7.

En el algoritmo desarrollado en esta Tesis, el preprocesado sólo comprende la extracción de la ROI, ya que no hace falta ninguna mejora de la calidad de la imagen porque, tal como se ha indicado en el capítulo 4, ésta es suficientemente buena para no realizar ningún paso posterior que complique el sistema total y alargue innecesariamente los tiempos de ejecución del sistema.

Una vez extraída la ROI, se extraen directamente las características del patrón vascular y se guardan en una base de datos para posteriormente aplicar los algoritmos correspondientes.

5.2 Extracción de la región de interés en las imágenes

Gracias a la enorme diferencia de luminosidad entre la muñeca y el fondo en las imágenes (completamente negro) y a que las muestras de cada usuario son muy similares unas con otras gracias al sistema final de fijación, el método propuesto para obtener la ROI en esta Tesis Doctoral es más sencillo que el único encontrado en la documentación y mostrado en la figura 8.

Es importante destacar que hay una ligera variación entre la ROI de los patrones obtenidos en el reclutamiento, y la ROI de las muestras obtenidas en el proceso de reconocimiento. A continuación se detalla la extracción de la ROI en ambos casos.

5.2.1 Extracción de la región de interés en los patrones del reclutamiento

El método para extraer la ROI de las muestras usadas para el reclutamiento (llamadas patrones a partir de ahora) se va a explicar con ayuda de un ejemplo. La figura 50 es la imagen de un patrón de la base de datos final tomada para las pruebas.

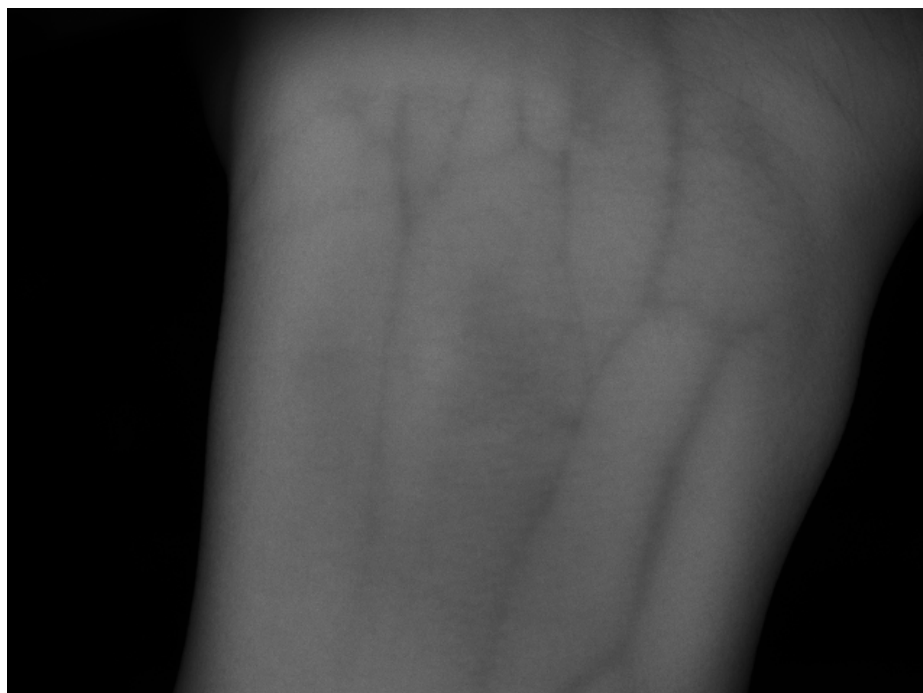


Figura 50: Imagen de un patrón del reclutamiento

1. En primer lugar se hace una ampliación de histograma de la imagen para aumentar al máximo la diferencia entre el fondo de la imagen y la muñeca, seleccionando previamente los valores para los cuales el contraste entre el fondo y la muñeca va a ser máximo. El resultado para el ejemplo de la figura 50 se muestra en la figura 51.



Figura 51: Imagen del patrón tras la ampliación de histograma

2. A continuación se aplica una función de reconstrucción morfológica, en este caso una función global de máximos/mínimos para discernir entre las zonas de mayor o menor luminosidad (muñeca o fondo) en función de un parámetro umbral heurístico adecuado según la iluminación de las imágenes (parámetro EDGE_ROI del algoritmo). De esta manera se convierte la imagen en escala de grises (256 valores) en una imagen binaria con 0 para los valores de píxel inferiores al parámetro umbral seleccionado y 1 para los valores de píxel superiores a dicho parámetro umbral. El resultado para el ejemplo de la figura 51 se muestra en la figura 52.

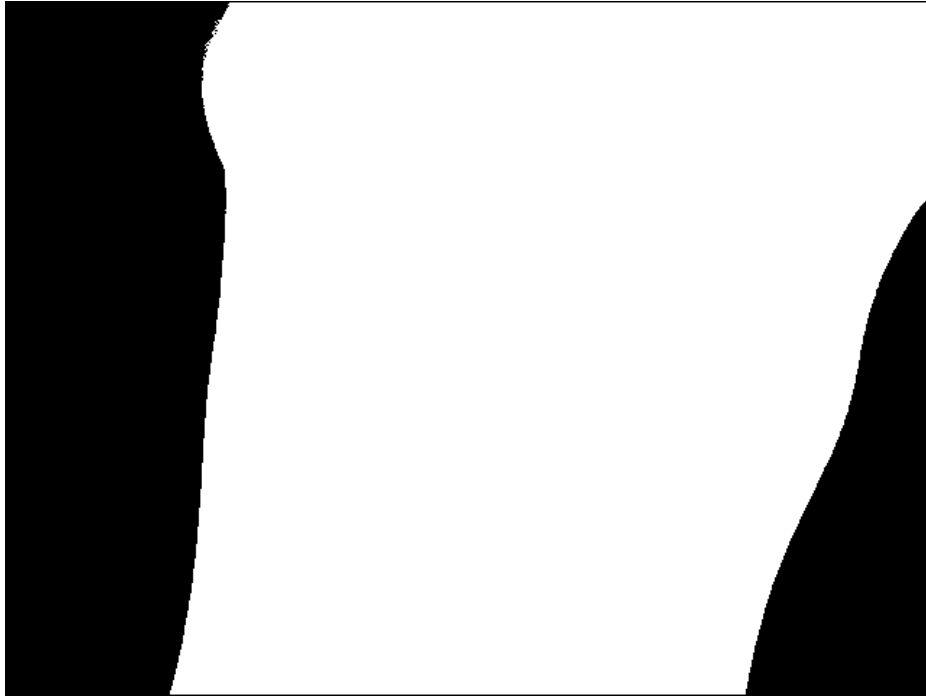


Figura 52: Imagen del patrón tras la reconstrucción morfológica

3. El tercer paso consiste en utilizar un algoritmo propio que elimina aquellos píxeles que quedan dentro de la zona blanca (muñeca), para evitar errores en los pasos siguientes. El algoritmo es el mostrado en el diagrama de bloques de la figura 53:

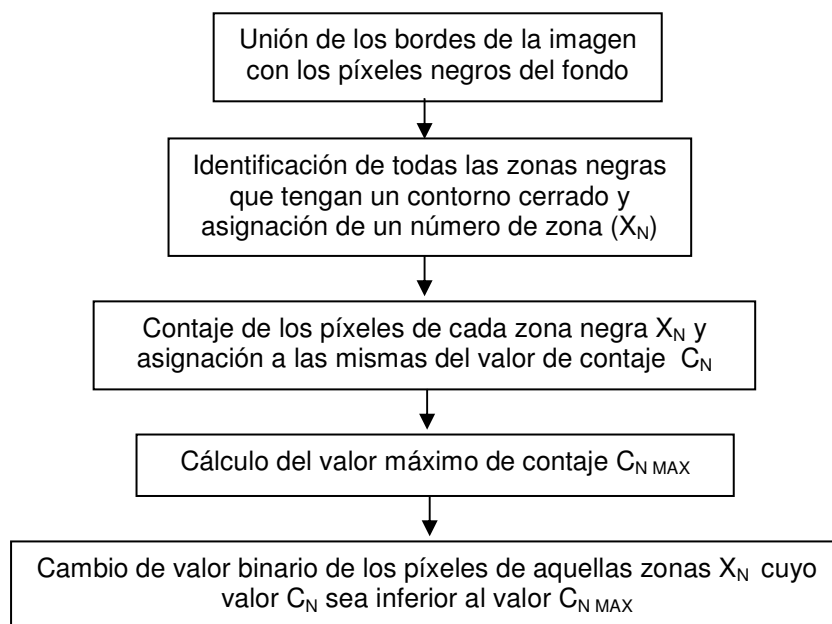


Figura 53: Diagrama de bloques del algoritmo de eliminación de píxeles interiores

La figura 54 muestra un detalle del resultado de aplicar a la figura 52 el algoritmo mencionado en la figura 53.

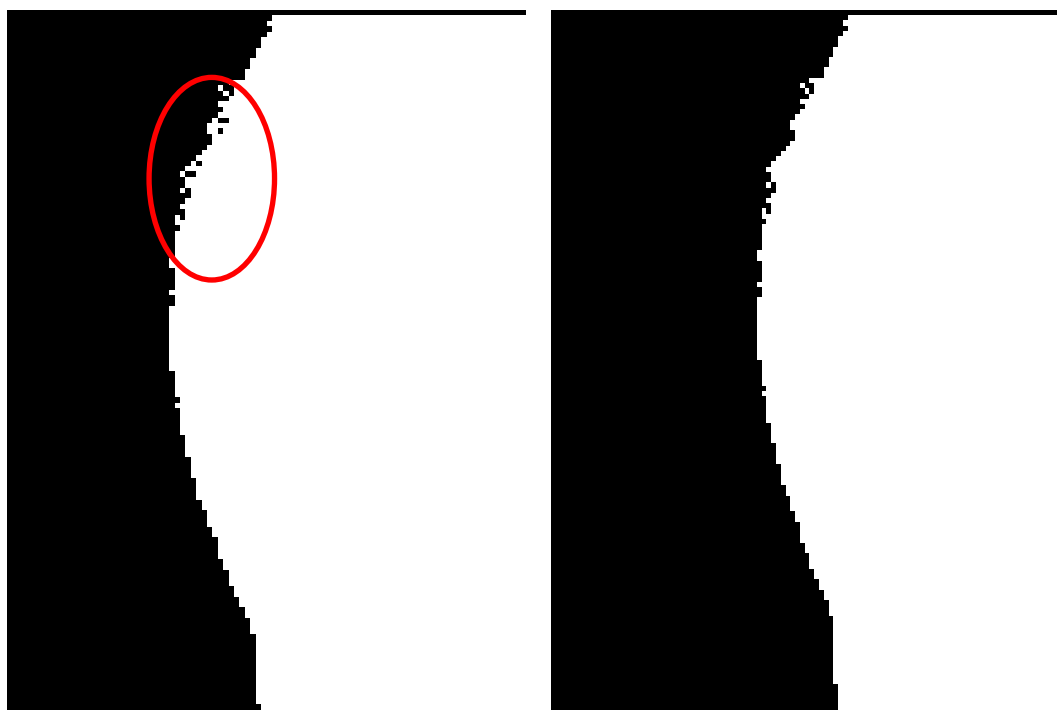


Figura 54: Imagen del patrón tras la eliminación de píxeles interiores erróneos

4. El cuarto paso es calcular los valores x_1 y x_2 de los píxeles de intersección entre una línea horizontal seleccionada por un parámetro heurístico (parámetro ROW_ROI del algoritmo) y la imagen sin puntos interiores erróneos calculada en el paso 3, para a continuación calcular su diferencia $d_{M\text{ patron}}$ ($d_{M\text{ patron}} = x_1 - x_2$).
5. El quinto paso es aplicar unos valores heurísticos (d_1 y d_2 , de forma que $d_1 = d_2$) que reduzcan la distancia $d_{M\text{ patron}}$ y obtener el valor de lado $d_{C\text{ patron}}$ ($d_{C\text{ patron}} = d_{M\text{ patron}} - d_1 - d_2$) de la ROI cuadrada ($d_{C\text{ patron}} \times d_{C\text{ patron}}$) que asegure que toda la información contenida en la ROI cuadrada quede dentro de la zona de la imagen de la muñeca evitando en lo posible zonas de fondo.
6. Finalmente se recorta la imagen con estos valores para obtener la ROI y guardarla en el PC, así como todos los valores calculados anteriormente

que van a ser necesarios más tarde en pasos posteriores. La figura 55 muestra el procedimiento completo descrito de forma gráfica.

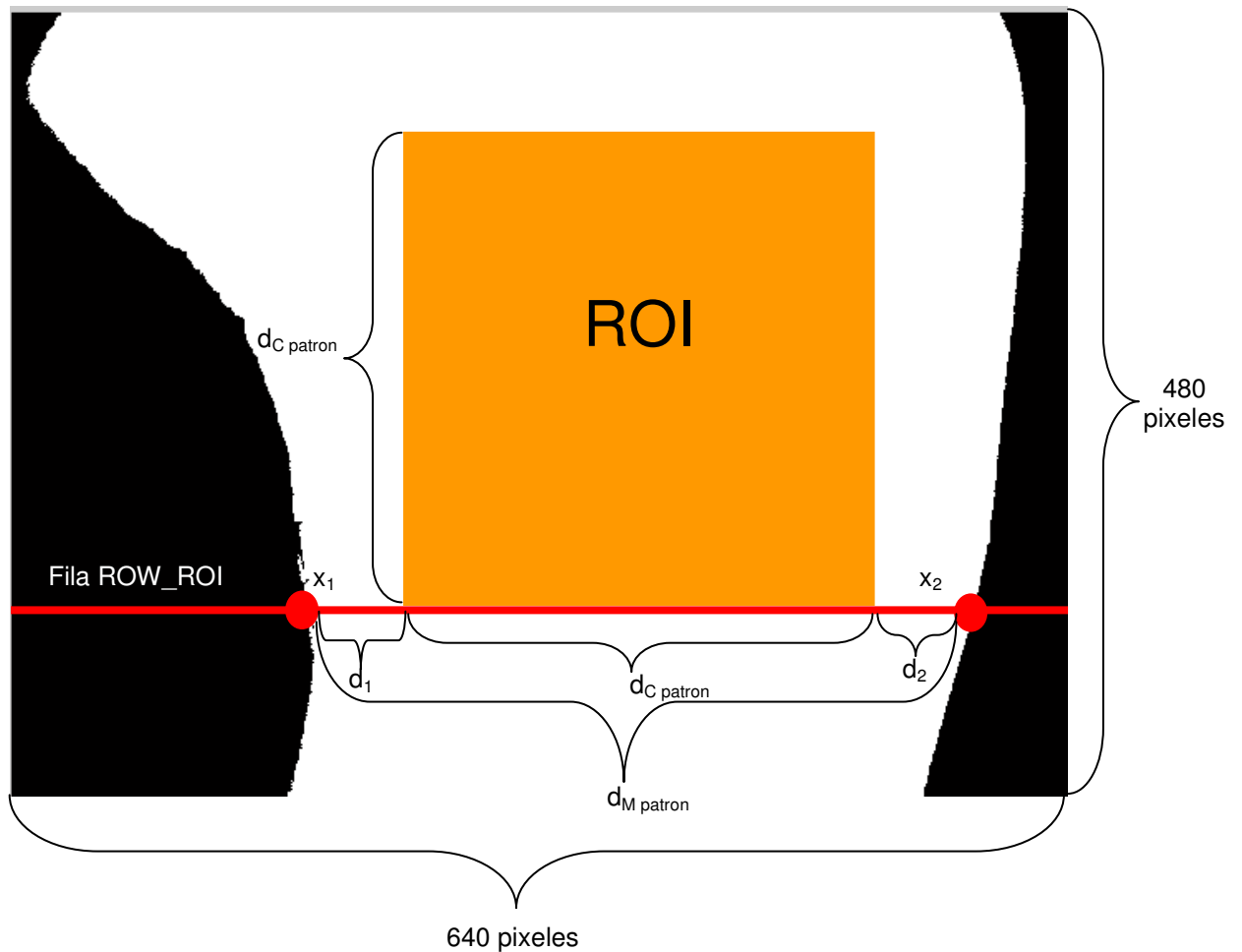


Figura 55: Procedimiento para obtener la ROI de un patrón

5.2.2 Extracción de la región de interés en las muestras para el reconocimiento

En el caso de obtener la ROI de una muestra que se utilice para el reconocimiento (llamadas muestras a partir de ahora), el procedimiento es básicamente el mismo, pero con dos modificaciones:

- La distancia de la ROI de las muestras debe tener el mismo tamaño que la ROI de los patrones, para más tarde aplicar los métodos de reconocimiento explicados en el capítulo 6. Por tanto, $d_{C \text{ muestra}} = d_{C \text{ patron}}$.

- Los valores d_1 y d_2 que reducen la distancia $d_{M \text{ muestra}}$ para obtener una ROI cuadrada ($d_{C \text{ muestra}} \times d_{C \text{ muestra}}$) ya no son heurísticos sino que se calculan de la siguiente manera:

$$d_1 = d_2 = (d_{M \text{ muestra}} - d_{C \text{ patron}})/2$$

La figura 56 muestra el procedimiento descrito de forma gráfica, en el que se ven las diferencias con el procedimiento descrito en la figura 55.

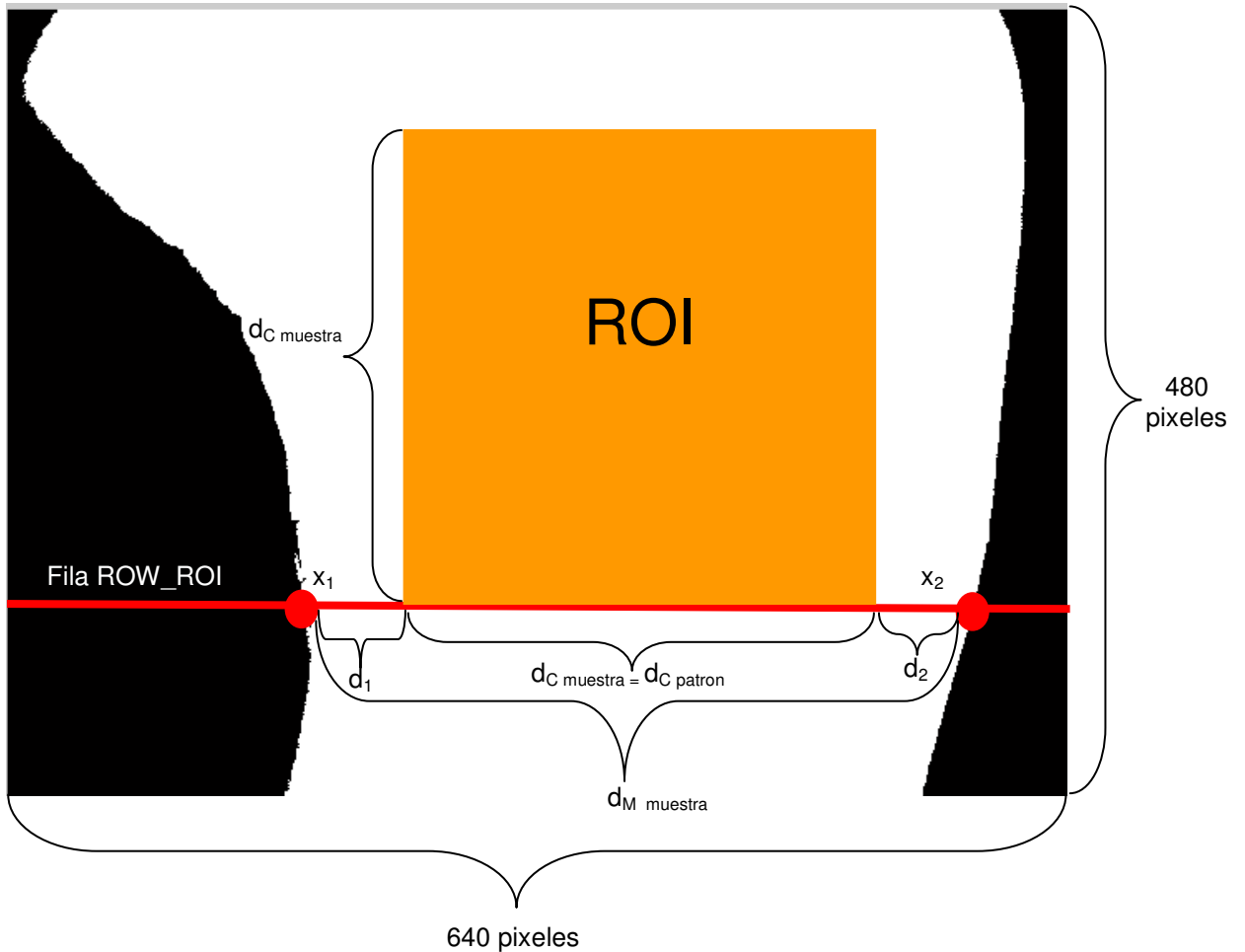
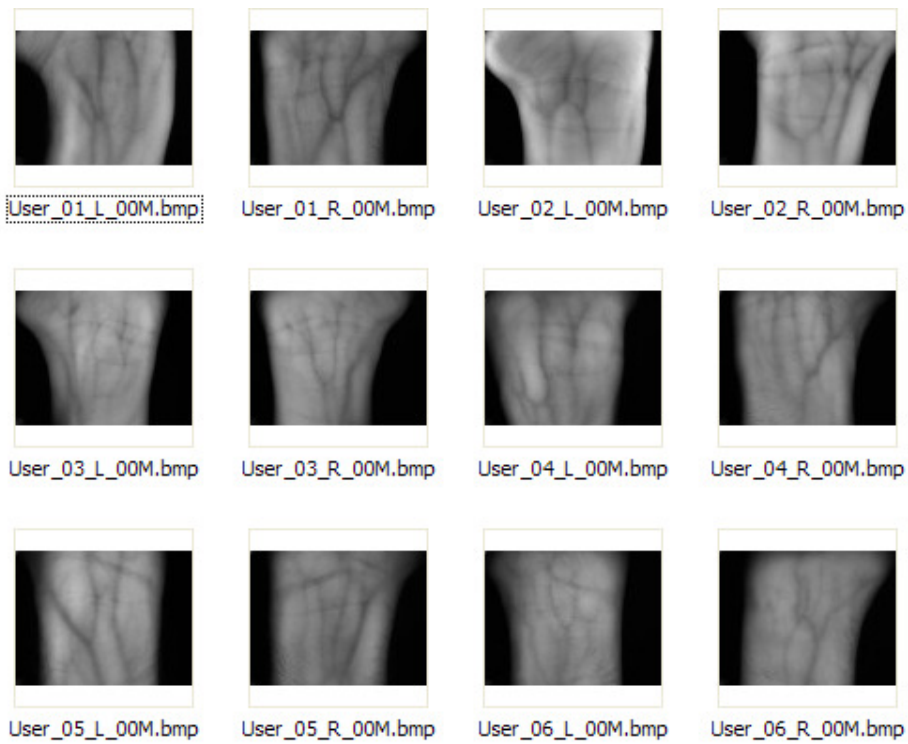


Figura 56: Procedimiento para obtener la ROI de una muestra

5.2.3 Resultados obtenidos

La figura 57 muestra en su parte superior 12 imágenes originales de los patrones obtenidos con el sistema de captura para realizar las pruebas finales que se presentan en el capítulo 8, y en su parte inferior sus 12 ROI extraídas.

Imágenes originales



ROIs extraídas

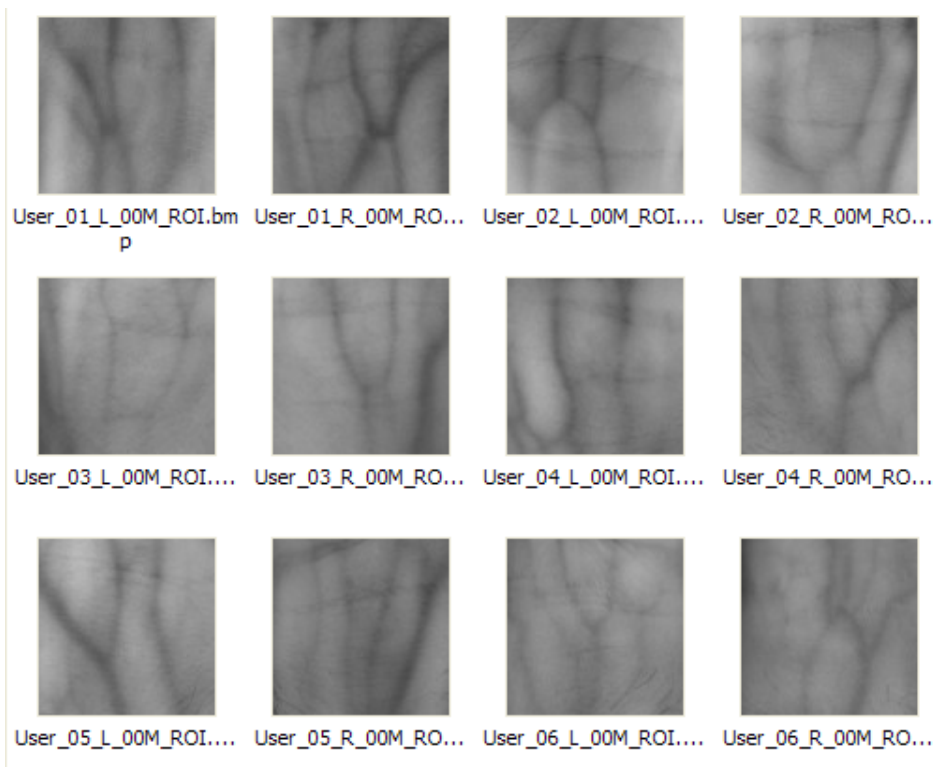


Figura 57: Ejemplo de ROIs extraídas

5.3 Extracción de características de la ROI

Una vez que se tiene la ROI de muestras y patrones, el siguiente paso mostrado en el diagrama de bloques de la figura 1 es la extracción de las características de las venas. Esto consiste normalmente en la eliminación de la imagen de todo lo que no sea venas y quedarse con su esqueleto. Para la extracción de características, tal como se comenta en el punto 3.7, se ha decidido no utilizar ningún método de los artículos propuestos para los sistemas vasculares, y buscar uno utilizado para otros sistemas, realizando las adaptaciones necesarias para su utilización en biometría vascular. A continuación se detalla el método propuesto en esta Tesis Doctoral.

5.3.1 Función básica utilizada para la extracción

La fase de la extracción de características de la ROI parte del algoritmo explicado detalladamente en [LFE04] para la extracción de las líneas de la palma de mano, en la que se utiliza la función Gaussiana 1-D ($G = 1/(\sigma\sqrt{2\pi}) * \exp(-(x^2/2*\sigma^2))$), su primera derivada ($G' = -x/(\sigma^3*\sqrt{2\pi}) * \exp(-(x^2/2*\sigma^2))$) y su segunda derivada ($G'' = (x^2-\sigma^2)/(\sigma^5*\sqrt{2\pi}) * \exp(-(x^2/2*\sigma^2))$) formadas a partir de N1 puntos (para G) y N2 puntos (para G' y G''). El fundamento teórico se resume brevemente, aunque en [LFE04] se puede consultar la descripción completa:

Suponiendo que $I(x,y)$ representa una imagen y G_{σ_s} es la función Gaussiana 1-D con varianza σ_s , la diferencia entre las líneas y la carne se puede acentuar multiplicando ambas, de forma que:

$$I_S = I * G_{\sigma_s},$$

donde * es la operación de convolución

La primera y segunda derivada en la dirección vertical (I' e I'') se pueden calcular mediante la convolución de I_S con la primera derivada (G'_{σ_d}) y segunda derivada (G''_{σ_d}) de G_{σ_s} con varianza σ_d :

$$I' = I_S * (G'_{\sigma_d})^T = (I * G_{\sigma_s}) * (G'_{\sigma_d})^T = I * (G_{\sigma_s} * (G'_{\sigma_d})^T) = I * H_1^0$$

$$I'' = I_S * (G''_{\sigma_d})^T = (I * G_{\sigma_s}) * (G''_{\sigma_d})^T = I * (G_{\sigma_s} * (G''_{\sigma_d})^T) = I * H_2^0$$

donde $H_1^0 = G_{\sigma_s} * (G'_{\sigma_d})^T$, $H_2^0 = G_{\sigma_s} * (G''_{\sigma_d})^T$, T es la operación transposición y * la operación de convolución

H_1^0 y H_2^0 se denominan detectores de línea horizontal (detectores en la dirección de 0°). Las líneas horizontales de la palma (y las venas) se pueden obtener ahora buscando los puntos de paso por cero de I' en la dirección vertical (90°), mientras que su contraste son los valores de dichos puntos en I'' . Matemáticamente se expresa de la siguiente manera:

$$L_0^1(x,y) = I''(x,y), \text{ si } I'(x,y) = 0 \text{ o bien } I'(x,y) \times I'(x+1,y) < 0$$

$$L_0^1(x,y) = 0 \text{ en cualquier otro caso}$$

Además también se puede saber si cada punto es valle o pico viendo el signo de $L_0^1(x,y)$. Valores positivos indican valles y valores negativos indican picos. Las líneas de las palmas (y de las venas) son valles, por lo que los valores negativos se descartan, quedando finalmente la siguiente expresión:

$$L_0^2(x,y) = L_0^1(x,y), \text{ si } L_0^1(x,y) > 0$$

$$L_0^2(x,y) = 0 \text{ en cualquier otro caso}$$

Como las líneas de las palmas (y las venas) no tienen direcciones fijas, hace faltan más detectores de línea en otras direcciones. Estos detectores de línea en cualquier dirección θ se pueden obtener simplemente rotando H_1^0 y H_2^0 el ángulo θ . Las líneas en la dirección θ se pueden obtener buscando los puntos de paso por cero en la dirección $\theta+90$.

Para obtener la imagen final en todas las direcciones simplemente hay que superponer todas ellas con una operación OR, tal como se indica:

$$L(i,j) = \text{OR } L_\theta(i,j),$$

donde OR es la operación OR de las imágenes parciales

Las direcciones propuestas para la extracción son 0° , 45° , 90° y 135° , pero para la extracción de las venas se elimina la dirección de 0° , ya que tras las primeras pruebas con venas se observa que no aportan ninguna información adicional. El problema de adaptar este método a las imágenes de las ROI mostradas en la figura 57 es que los valores de σ_s y σ_d propuestos en

el artículo [LFE04] dan unos resultados absolutamente defectuosos y absurdos, por lo que hay que adaptarlos de manera heurística realizando pruebas en campo con todas las imágenes. Los parámetros óptimos se explican con detalle en el capítulo 7.

5.3.2 Funciones adicionales necesarias para su adaptación a sistemas vasculares

Además, para extraer con precisión las líneas de las venas hace falta implementar alguna función adicional a la función básica explicada en el punto anterior, de forma que el algoritmo completo de extracción de características a partir de la ROI se muestra en la figura 58 (para muestras y patrones).

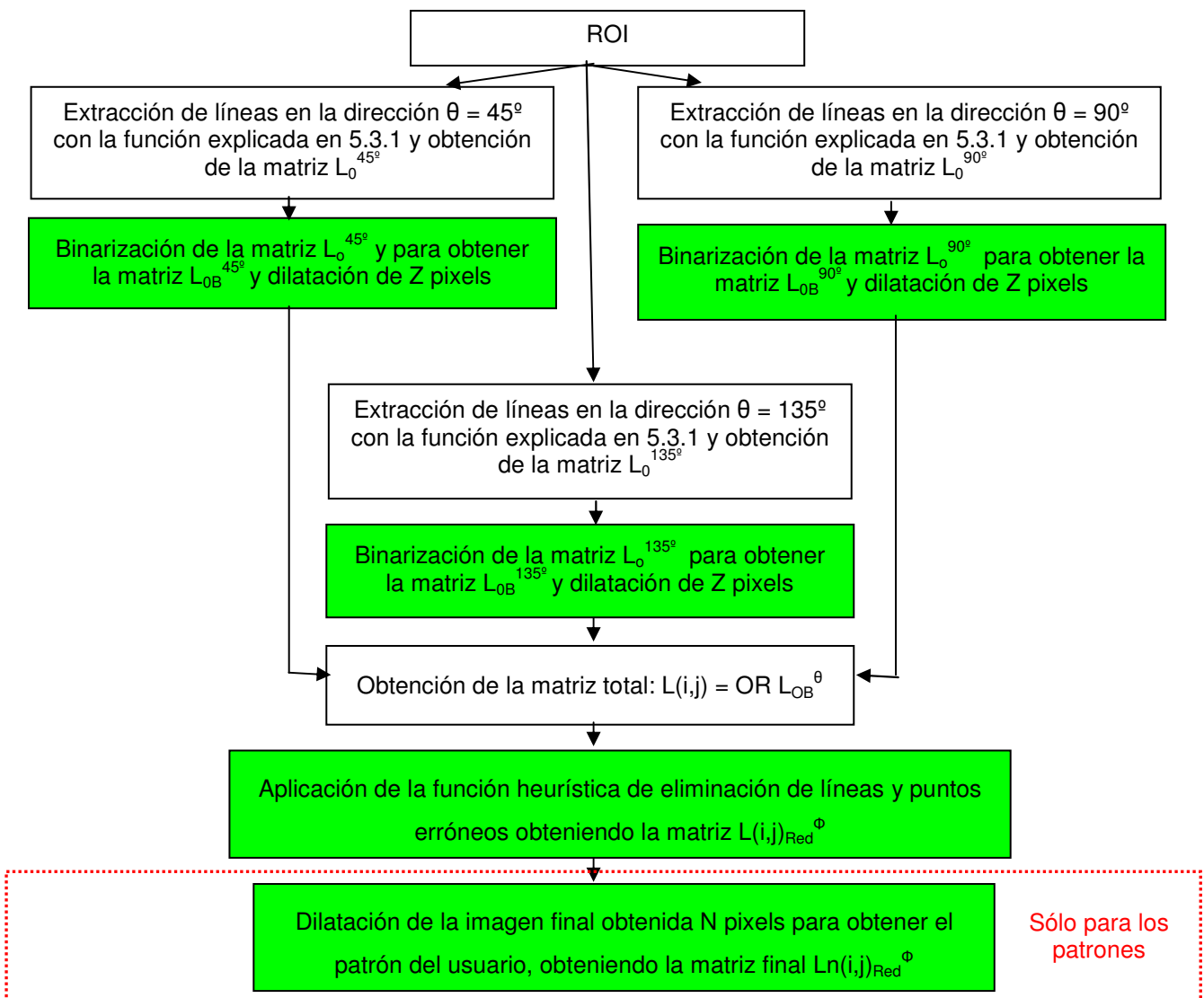


Figura 58: Principio de funcionamiento del proceso completo de extracción de características

A continuación se explican las funciones utilizadas en el proceso completo, marcadas en verde dentro del diagrama de bloques de la figura 58.

- **Binarización de la matriz L_0^Φ :**

Esta función es absolutamente trivial, y parte del hecho de que el proceso explicado en el punto 5.3.1 da como resultado un valor 0 para los píxeles de la carne (blanco) y un valor diferente de cero para los píxeles que pertenecen a las venas, con lo que simplemente la función ajusta el valor 1 a estos píxeles según la siguiente fórmula.

$$L_{0B}(x,y)^\Phi = 0 \text{ si } L_0(x,y)^\Phi = 0$$
$$L_{0B}(x,y)^\Phi = 1 \text{ en cualquier otro caso}$$

La binarización es necesaria realizarla para luego aplicar el método de comparación orientable explicado en el capítulo 6.

- **Dilatación de Z píxeles antes de aplicar la operación OR y de N píxeles para obtener finalmente la matriz $L_{n(i,j)_{Red}}^\Phi$:**

La función de dilatación es también trivial y simplemente dilata las líneas el parámetro Z/N que se le indique. Hay que dilatar Z píxeles después de obtener la matriz L_{0B}^Φ porque el método indicado en 5.3.1 obtiene las líneas de las venas pero deja a veces varios píxeles entre medias de ellas. Con esta dilatación se garantiza la continuidad de las líneas. Finalmente hay que dilatar N píxeles la matriz $L_{(i,j)_{Red}}^\Phi$ para obtener la matriz final $L_{n(i,j)_{Red}}^\Phi$ y tener así el patrón con las líneas anchas de cada usuario. Este último paso sólo es necesario para obtener las características de los patrones, no para obtener las características de las muestras, tal como se explicará en el capítulo 6. Los valores de N y Z se han probado de manera heurística dado los mejores resultados con Z = 4 píxeles y N = 6 píxeles.

- **Eliminación de líneas y puntos erróneos para obtener la matriz $L_{(i,j)_{Red}}^\Phi$:**

Esta función es absolutamente necesaria, ya que el método explicado en

el punto 5.3.1, que los autores defienden que funciona muy bien con líneas de la palma de la mano, no obtiene unos resultados tan buenos al aplicarlo a imágenes con venas ya que aparecen muchos puntos y líneas pequeñas incorrectas, a pesar de haber ajustado los parámetros σ_s y σ_d de manera heurística para obtener imágenes bastante correctas (como se observa en la figura 60). El principio de funcionamiento de esta función se muestra en la figura 59.

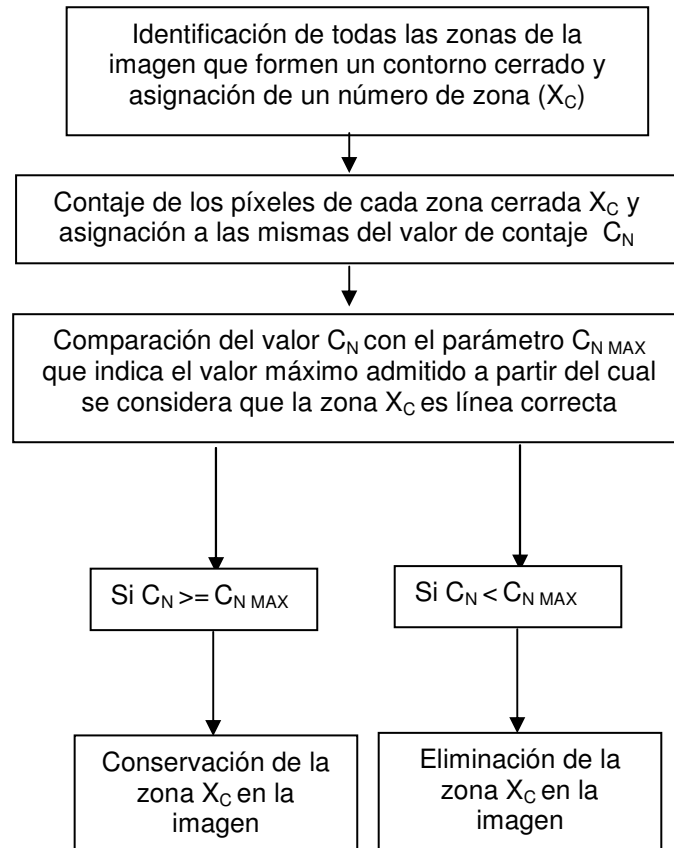
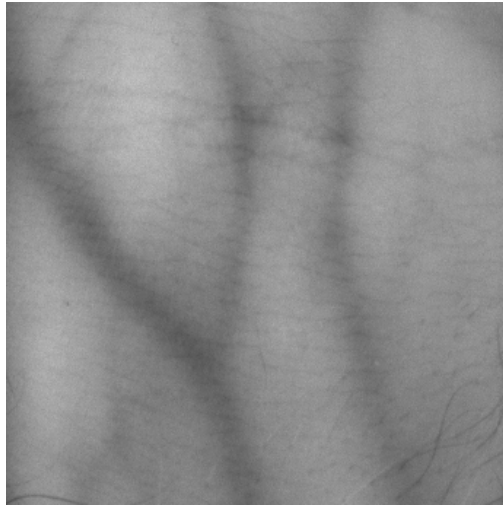


Figura 59: Principio de funcionamiento de la función de eliminación de líneas y puntos erróneos

El mejor ajuste para el parámetro $C_{N \text{ MAX}}$ a partir de la cual se eliminan líneas se explica en el capítulo 8.

5.3.3 Resultados obtenidos

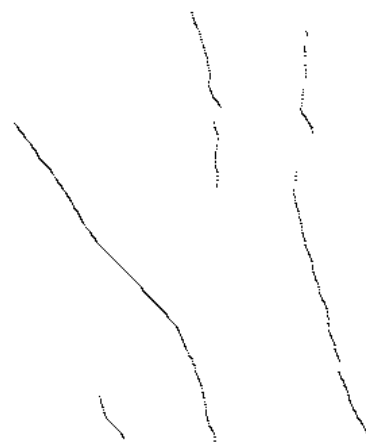
La figura 60 muestra un ejemplo del proceso completo de extracción de características, según lo indicado en el diagrama de bloques de la figura 58, para una de las imágenes obtenidas con el sistema de captura con las pruebas finales que se presentan en el capítulo 8.



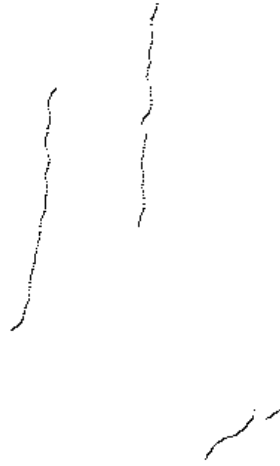
a) ROI extraída



b) Matriz $L_{0B}^{90^\circ}$ y la aplicación de la dilatación $Z = 4$ píxeles



c) Matriz $L_{0B}^{45^\circ}$ y la aplicación de la dilatación $Z = 4$ píxeles



d) Matriz $L_{OB}^{135^\circ}$ y la aplicación de la dilatación $Z = 4$ píxeles



e) Matriz total $L(i,j)$



f) Aplicación de la función de eliminación de líneas y puntos erróneos y obtención de la matriz $L(i,j)_{Red}^\phi$



g) Matriz $\text{Ln}(i,j)_{\text{Red}}^{\oplus}$ con dilatación $N = 4$ píxeles (sólo para patrones)

Figura 60: Proceso completo de extracción de características

La figura 61 muestra algunos ejemplos de patrones de características sin dilatar, extraídos para algunas de las imágenes obtenidas con el sistema de captura con las pruebas finales que se presentan en el capítulo 8, y la superposición sobre sus ROI realizado por la plataforma de pruebas.

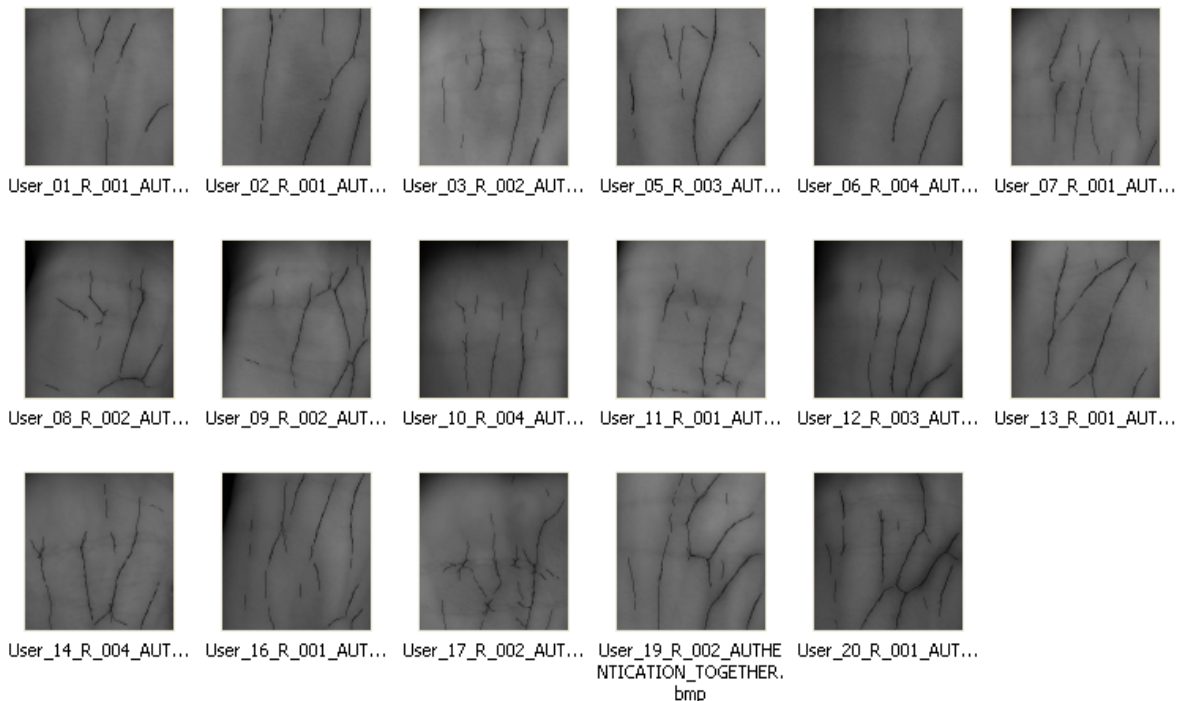


Figura 61: Ejemplo de patrones extraídos (todavía sin dilatar)

5.4 Conclusiones

En este capítulo se ha explicado el proceso seguido para ejecutar el preprocesado y la extracción de características de las imágenes obtenidas por el sistema de captura. El proceso de preprocesado y extracción de la ROI es totalmente novedoso en sistemas vasculares y especialmente adecuado para el sistema de esta Tesis Doctoral, ya que las imágenes obtenidas para muestras y patrones son muy parecidas, con lo que las ROI lógicamente también lo son.

La extracción de características se reduce a la extracción de las venas de la ROI y el método se basa en un sistema ya utilizado para las palmas de las manos [LFE04], pero por primera vez adaptado a imágenes de venas y obteniendo resultados bastante buenos tal como se observa en la figura 61.

Sin embargo, los algoritmos utilizados en este capítulo tienen algunos puntos susceptibles de mejora en investigaciones futuras.

1. Si se desarrolla un sistema con más grados de libertad, el sistema de extracción de ROI sería igualmente válido, pero los algoritmos de comparación del capítulo 6 ya no valdrían, por lo que habría que añadir un paso adicional que buscara las zonas reducidas en la ROI de máxima información vascular y luego aplicar los métodos de comparación del capítulo 6 para dichas zonas reducidas.
2. Habría que realizar más pruebas con nuevos usuarios para ajustar los parámetros de extracción de características mencionados en el punto 5.3, especialmente el parámetro $C_{N \text{ MAX}}$, que ha sido elegido completamente de manera heurística y podría ajustarse con más detalle en cada muestra, haciendo un análisis previo más exacto de la misma.

Una vez que se han explicado estos métodos, en el siguiente capítulo se mostrarán los algoritmos de comparación propuestos para esta Tesis Doctoral.

Métodos de comparación para el reconocimiento

6.1 Introducción

Una vez que se tienen las características de las muestras (en este caso, la imagen de las venas extraídas según los procedimientos indicados en el capítulo 5), el último paso del sistema biométrico vascular completo es realizar la comparación para el reconocimiento. Tal como ya se ha explicado en el punto 2.2, se puede realizar una autenticación (es decir, comprobar la muestra de un usuario con su patrón guardado en el PC y decidir si el porcentaje de coincidencia es adecuado para su validación – identificación 1:1), o bien realizar una identificación (es decir, comprobar la muestra de un usuario con todos los patrones guardados en el PC de todos los usuarios y decidir si el porcentaje de coincidencia es adecuado para alguno de ellos – identificación 1:N).

En el punto 3.6 se presentaron los distintos algoritmos de comparación utilizados en las distintas referencias bibliográficas existentes. Por la forma ya explicada de extraer las ROI, por la dilatación realizada en las venas durante el proceso de extracción de características para los patrones y habiendo comprobado que los patrones de las venas de la muñeca no presentan muchos puntos de intersección, el método más adecuado para el sistema propuesto en esta Tesis Doctoral sería aquel que intente comparar de forma orientable directamente las venas obtenidas de las muestras con las venas obtenidas de los patrones.

Pero, aparte de este método y debido a que las muestras y patrones de un mismo usuario son muy parecidas gracias al sistema final de fijación explicado en el capítulo 4, también se implementa otro método adicional que realiza la medición geométrica del ancho de la muñeca y que servirá de primer método eliminatorio para una posible reducción de los tiempos de ejecución del sistema biométrico vascular completo. En este capítulo se explican dichos métodos desarrollados.

6.2 Método de comparación basado en el diferente ancho de la muñeca

En este primer método simplemente se mide el ancho de la muñeca (valor $d_{M \text{ muestra}}$ de la figura 56) en cada una de las muestras durante la etapa de preprocesado para la extracción de la ROI y se compara con el ancho de la muñeca (valor $d_{M \text{ patron}}$ de la figura 55) que se tiene guardado de cada patrón en el reclutamiento, realizando finalmente su resta y obteniendo el valor R1 para el reconocimiento.

$$R1 = d_{M \text{ muestra}} - d_{M \text{ patron}}$$

Se establece una cierta tolerancia en la variación de la anchura de las muñecas (denominada `MAX_WIDTH_DIFFERENCE` en el algoritmo). El valor de esa tolerancia se obtiene de manera heurística obtenida a través del análisis de las imágenes de la base de datos. Si $R1 > \text{MAX_WIDTH_DIFFERENCE}$, se ofrece directamente un resultado negativo de la comparación, evitando ejecutar el siguiente método de comparación y ahorrando por tanto tiempo de ejecución. Pero si $R1 < \text{MAX_WIDTH_DIFFERENCE}$, no se puede tomar ninguna decisión y hay que ejecutar el segundo método de comparación para tomar la decisión. En las pruebas presentadas en el capítulo 8, se ha comprobado que siempre que el ancho es superior a 12 píxeles, la decisión (autenticación o identificación) debe ser negativa y no hace falta seguir verificando, porque en ningún proceso de autenticación se obtiene nunca un valor superior para las distintas muestras de un mismo usuario de la base de datos completa obtenida. Es importante volver a repetir que este método no es determinante para establecer un reconocimiento positivo, simplemente se puede usar como método de descarte.

6.2.1 Resultados obtenidos

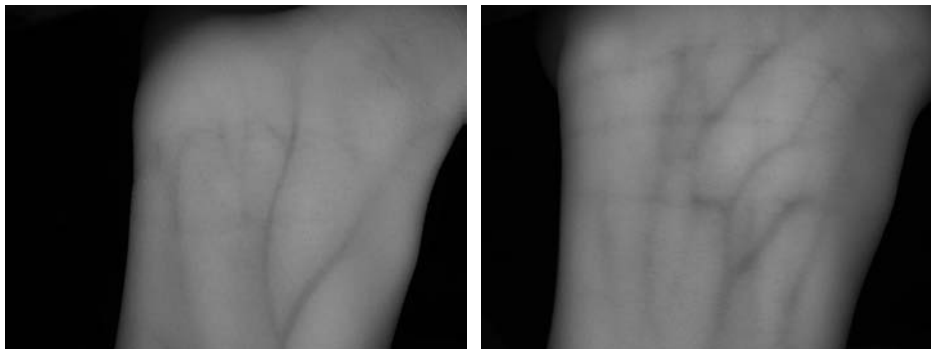
La figura 62 muestra el ejemplo de una autenticación decidida como usuario potencialmente correcto (muestra 3 del usuario 19 comparado con su mismo patrón) y la figura 63 muestra un ejemplo de una autenticación decidida como usuario erróneo (muestra 1 de usuario 5 comparado con el patrón del usuario 19)



Ancho de la muestra 3 del usuario 19 = **421 píxeles**
Ancho del patrón del mismo usuario 19 = **418 píxeles**
Diferencia de anchos = **3 píxeles**

Decisión: **USUARIO POTENCIALMENTE CORRECTO**

Figura 62: Decisión de aceptación potencial con el método de análisis basado en el diferente ancho de la muñeca



Ancho de la muestra 1 del usuario 5 = **387 píxeles**
Ancho del patrón del usuario 19 = **418 píxeles**
Diferencia de anchos = **31 píxeles**

Decisión: **USUARIO ERRONEO**

Figura 63: Decisión de rechazo con el método de análisis basado en el diferente ancho de la muñeca

La tabla 2 muestra los resultados obtenidos al comparar 4 muestras de 20 usuarios todos entre sí (80 comparaciones de autenticación y 1.520 comparaciones de identificación). Los resultados gráficos completos con sus curvas de distribución de probabilidad se pueden consultar con más detalle en el capítulo 8.

Tabla 2: Ejemplo de anchos de muñeca para 1.520 identificaciones y 80 autenticaciones

Max. value in pixels for the first authentication method in case of the identification of same users		10
Max. value in pixels for the first authentication method in case of the identification of different users	Pixel distance	Total
	0-10	230
	10-20	256
	20-30	212
	30-40	159
	40-50	126
	50-60	150
	60-70	134
	70-80	118
	80-90	87
	90-100	44
> 100	4	

Como se ha comentado en la introducción del punto 6.2, se ha comprobado que siempre que R1 es superior a 12 píxeles, la decisión (autenticación o identificación) debe ser negativa, porque en ningún proceso de autenticación se obtiene nunca un valor superior (en la figura se constata este dato ya que el máximo valor R1 para las 80 muestras de autenticación es 10). Para asegurarnos de que los resultados van a ser siempre correctos, se le puede añadir la tolerancia que se desee (por ejemplo un 100% en este caso), es decir, si se ajusta MAX_WIDTH_DIFFERENCE = 20, sólo habría que seguir verificando 486 comparaciones de identificación (230+256) con el método explicado en el punto 6.3, pero en las otras 1.034 comparaciones (1.520-486) ya se podría decidir que los usuarios son erróneos (aprox. 70% de las comparaciones) y así reducir los tiempos de ejecución totales.

6.3 Método de comparación basado en la comparación orientable completa de imágenes

Este segundo método está basado en el mecanismo de reconocimiento indicado en [TIS95], pero adaptado convenientemente al sistema vascular diseñado, ampliándolo con la variante de rotaciones y traslaciones explicada a continuación.

6.3.1 Descripción

El método es el mostrado en el diagrama de bloques de la figura 64. La imagen vascular binaria obtenida de cada muestra con el método descrito en el punto 5.3 se solapa directamente con la imagen dilatada de los patrones de los usuarios guardados en el PC y se calcula el número de píxeles que coinciden. Si este valor es superior a un valor ajustado, el usuario es aceptado, en caso contrario se rechaza.

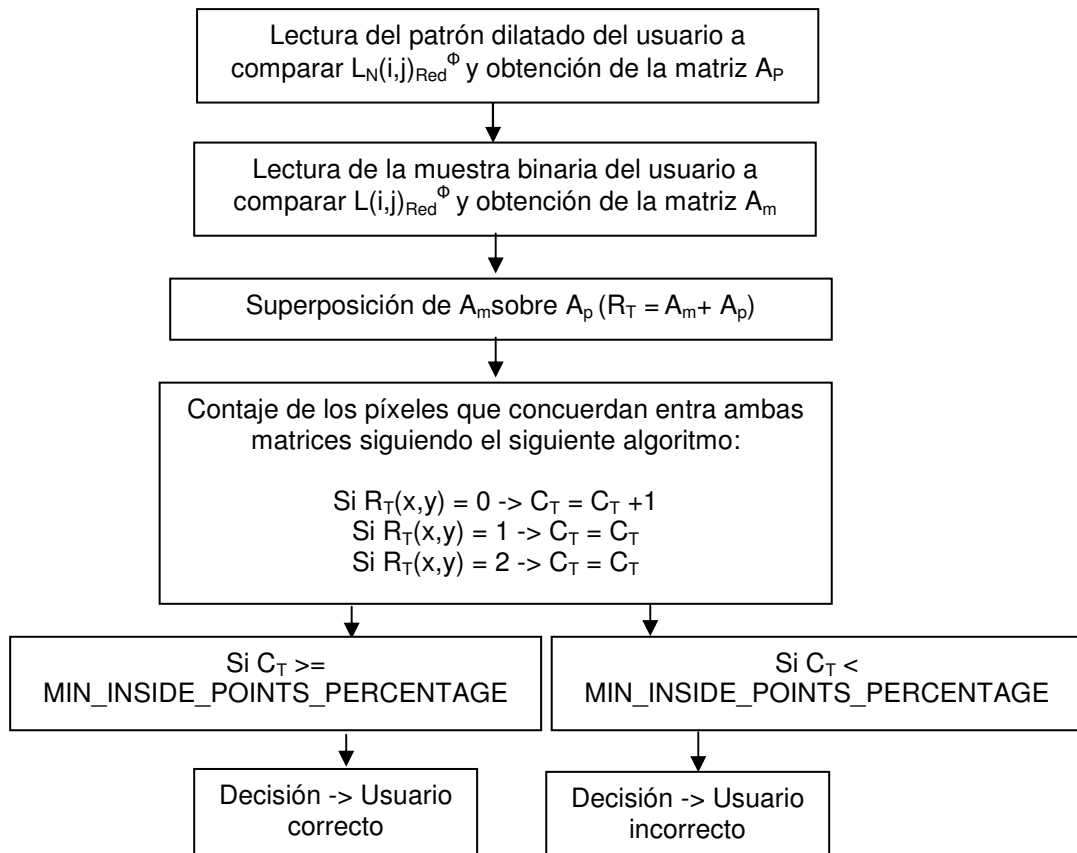


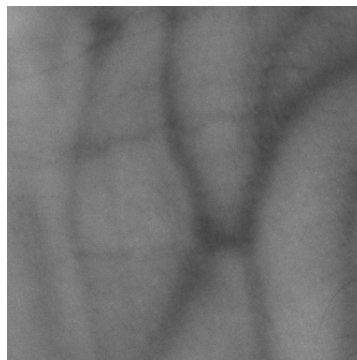
Figura 64: Principio de funcionamiento del método de comparación orientable completa de imágenes

El parámetro más importante a ajustar en este algoritmo es MIN_INSIDE_POINTS_PERCENTAGE, ya que su ajuste va a determinar claramente la calidad del sistema. Las pruebas mostradas en el capítulo 8, muestran que si se elige MIN_INSIDE_POINTS_PERCENTAGE = 85, las decisiones siempre serán las acertadas pudiendo conseguir valores de EER próximos a cero. También es conveniente comentar que es muy importante

también el ajuste de los N píxeles dilatados para cada patrón (parámetro RECRUIT_DIL del algoritmo), fundamental para el buen funcionamiento del sistema. Hay que dilatar el patrón para permitir pequeñas rotaciones y traslaciones en cada muestra tomada y que el sistema funcione correctamente, ya que a pesar del sistema final de fijación es imposible tomar 2 muestras exactamente iguales. Tal como se observa en el capítulo 8, si RECRUIT_DIL se elige demasiado pequeño, los patrones son muy “estrechos” y EER sube demasiado. Pero si es demasiado grande, EER llega a ser cero, pero hay muchas posibilidades de que las curvas de distribución de probabilidad intraclase e interclase se acerquen demasiado, haciendo al sistema demasiado inestable ante pequeñas posibles variaciones. Los mejores resultados se han comprobado que se obtienen ajustado $\text{RECRUIT_DIL} = 6$ (píxeles).

6.3.2 Resultados obtenidos

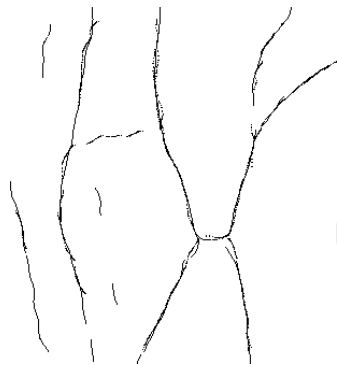
La figura 65 muestra el proceso completo de decisión de aceptación para una de las autenticaciones de prueba realizadas en el capítulo 8.



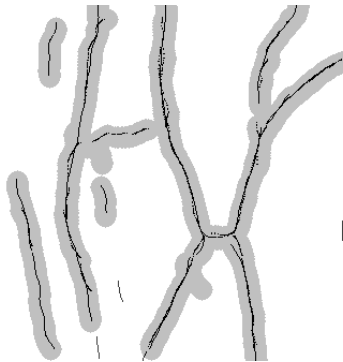
a) ROI del usuario



b) Patrón $L_N(i,j)_{\text{Red}}^\oplus$ guardado del usuario y obtención de la matriz A_p



c) Muestra $L(i,j)_{Red}^{\phi}$ del mismo usuario y obtención de la matriz A_m



d) Obtención de $R_T = A_m + A_p$

Píxeles de línea de la muestra del usuario: **2.131**
Píxeles de línea de la muestra del usuario que están dentro del patrón: **2.086**
Porcentaje de coincidencia: **98%**

Decisión: USUARIO CORRECTO

Figura 65: Decisión de aceptación para el método de análisis basado en la comparación orientable completa de imágenes

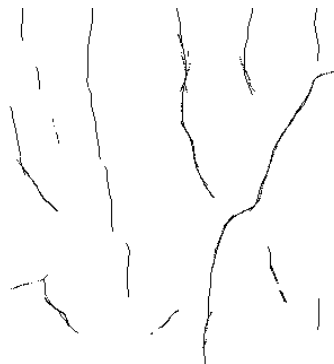
La figura 66 muestra el proceso completo de decisión de rechazo para una de las identificaciones de prueba realizadas para el capítulo 9.



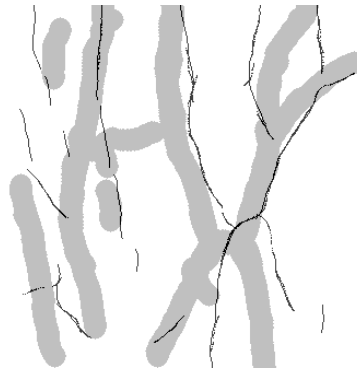
a) ROI del usuario 3



b) Patrón $L_N(i,j)_{Red}^\Phi$ guardado del usuario 5 y obtención de la matriz A_p



c) Muestra $L(i,j)_{Red}^\Phi$ del usuario 3 y obtención de la matriz A_m



e) Obtención de $R_T = A_m + A_p$

Píxeles de línea de la muestra del usuario 3: **1.512**
 Píxeles de línea de la muestra del usuario 3 que están dentro del patrón del usuario 5: **409**
 Porcentaje de coincidencia: **27%**

Decisión: **USUARIO ERRÓNEO**

Figura 66: Decisión de rechazo para el método de análisis basado en la comparación orientable completa de imágenes

La figura 67 muestra las curvas de distribución de probabilidad intraclase e interclase resultante de verificar la “muestra 1” del usuario 21 frente a su patrón y a todos los patrones guardados en el PC del resto de usuarios.

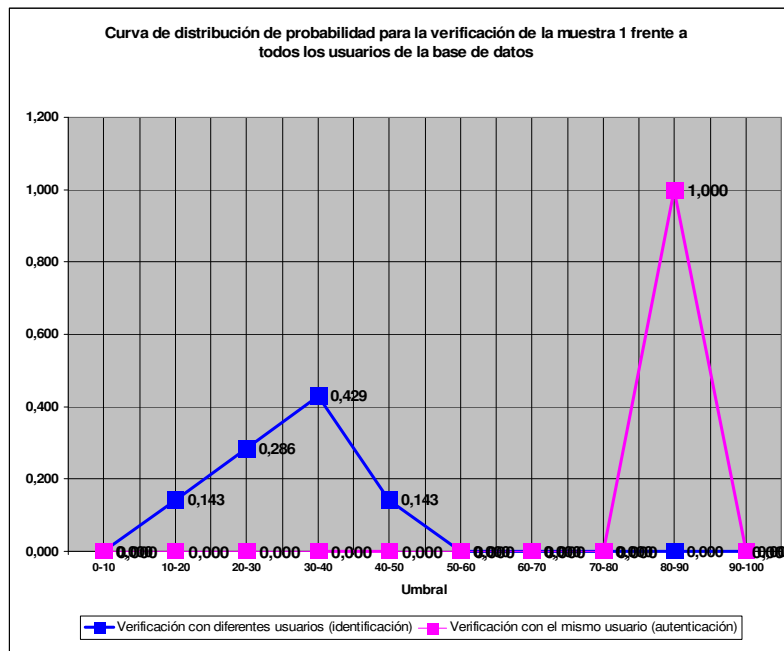


Figura 67: Curva de distribución de probabilidad de los resultados obtenidos con el método de comparación orientable completa al comparar un usuario con los 22 usuarios de la base de datos

Como se ha comentado en el punto 6.3.1, se ha comprobado que siempre que C_T es superior a 85%, la decisión (autenticación o identificación) debe ser positiva, porque en ningún proceso de autenticación se obtiene nunca un valor inferior (en la figura se constata este dato ya que la verificación del usuario 21 con el usuario 21, o sea su autenticación, da un resultado de 89% \rightarrow distribución de probabilidad = 1), mientras que en el resto de identificaciones los valores son siempre inferiores al umbral del 85% \rightarrow distribución de probabilidad máxima = 0,429).

6.3.3 Variante con traslaciones y rotaciones

Al realizar las pruebas descritas en el capítulo 8, se ve que aplicar este método directamente sin más hace que los resultados de EER se aproximen a cero, pero exige que las muestras sean muy parecidas. En el momento en que se desvíen lo suficiente, el resultado de coincidencia puede bajar drásticamente. La figura 68 muestra uno de estos casos posibles. En ella el resultado de coincidencia es del 19%, con lo que la decisión de autenticación sería de rechazo, a pesar de ser el mismo usuario. El problema está en la desviación existente entre el patrón y la muestra al captar sus imágenes.



Figura 68: Decisión de rechazo errónea por desviación en las imágenes de muestra y patrón

Para resolver este problema, se ha añadido un paso adicional al diagrama mostrado en la figura 64, consistente en un algoritmo de traslación y rotación que traslada y rota la imagen de la muestra las veces que se ajuste en unos nuevos parámetros del algoritmo de comparación, que se definen de la siguiente manera (entre paréntesis su representación numérica para la figura 69):

- RC -> Pasos de rotación en la dirección horaria (1)
- RAC -> Pasos de rotación en la dirección antihoraria (2)
- GR -> Grados rotados en cada rotación
- TL -> Número de desplazamientos de traslación a la izquierda (3)
- TR -> Número de desplazamientos de traslación a la derecha (4)
- TU -> Número de desplazamientos de traslación hacia arriba (5)
- TD -> Número de desplazamientos de traslación hacia abajo (6)
- PT -> Píxeles trasladados en cada traslación

La figura 69 muestra gráficamente el procedimiento seguido en este algoritmo de traslación y rotación.

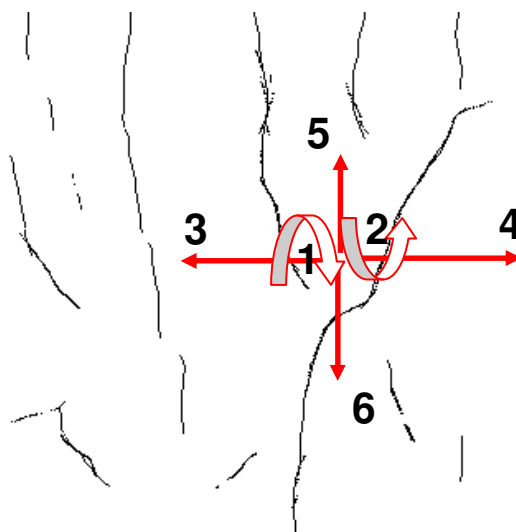


Figura 69: Principio de funcionamiento gráfico de las traslaciones y rotaciones realizadas por la variante del algoritmo

La secuencia que sigue el algoritmo es la siguiente:

1. Rotación GR grados a la izquierda (RC veces)
2. Rotación GR grados a la derecha (RAC veces), partiendo de la imagen original $L(i,j)_{Red}^{\Phi}$
3. Traslación PT píxeles la izquierda (TL veces), ejecutando 1 y 2 en cada traslación TL, partiendo de la imagen original $L(i,j)_{Red}^{\Phi}$
4. Traslación PT píxeles la derecha (TR veces), ejecutando 1 y 2 en cada traslación TL, partiendo de la imagen original $L(i,j)_{Red}^{\Phi}$
5. 1-4 se repite TU veces desplazando PT píxeles hacia arriba
6. 1-4 se repite TD veces desplazando PT píxeles hacia abajo.

El número total de modificaciones en la imagen de la muestra serán por tanto:

$$M_T = (RC+RAC)*TL*TR*TU*TD+1$$

Esta secuencia se puede modificar si se desea y así eliminar modificaciones innecesarias para reducir el tiempo de ejecución del reconocimiento. Por ejemplo, con el sistema de posicionamiento final indicado en el capítulo 4 se ha comprobado que no hace falta hacer rotaciones y los desplazamientos de traslación se pueden limitar a 3-4. En otros sistemas de posicionamiento estos parámetros habría que estudiarlos de manera heurística.

En cada uno de los pasos 1-6, es decir, con la imagen adecuadamente orientada, se produce el solapamiento de cada una de ellas con el patrón a comparar y el resultado se guarda en un vector de resultados. Cuando ya se hayan hecho todas las rotaciones y traslaciones ajustadas, se elige el mayor valor de este vector de resultados como resultado final para tomar la decisión, ya que ese valor se corresponderá con la mejor posición de la muestra respecto el patrón. La figura 70 muestra el principio de funcionamiento del método de comparación orientable completa de imágenes mostrado en la figura 64, pero completado en verde con esta variante con traslaciones y rotaciones.

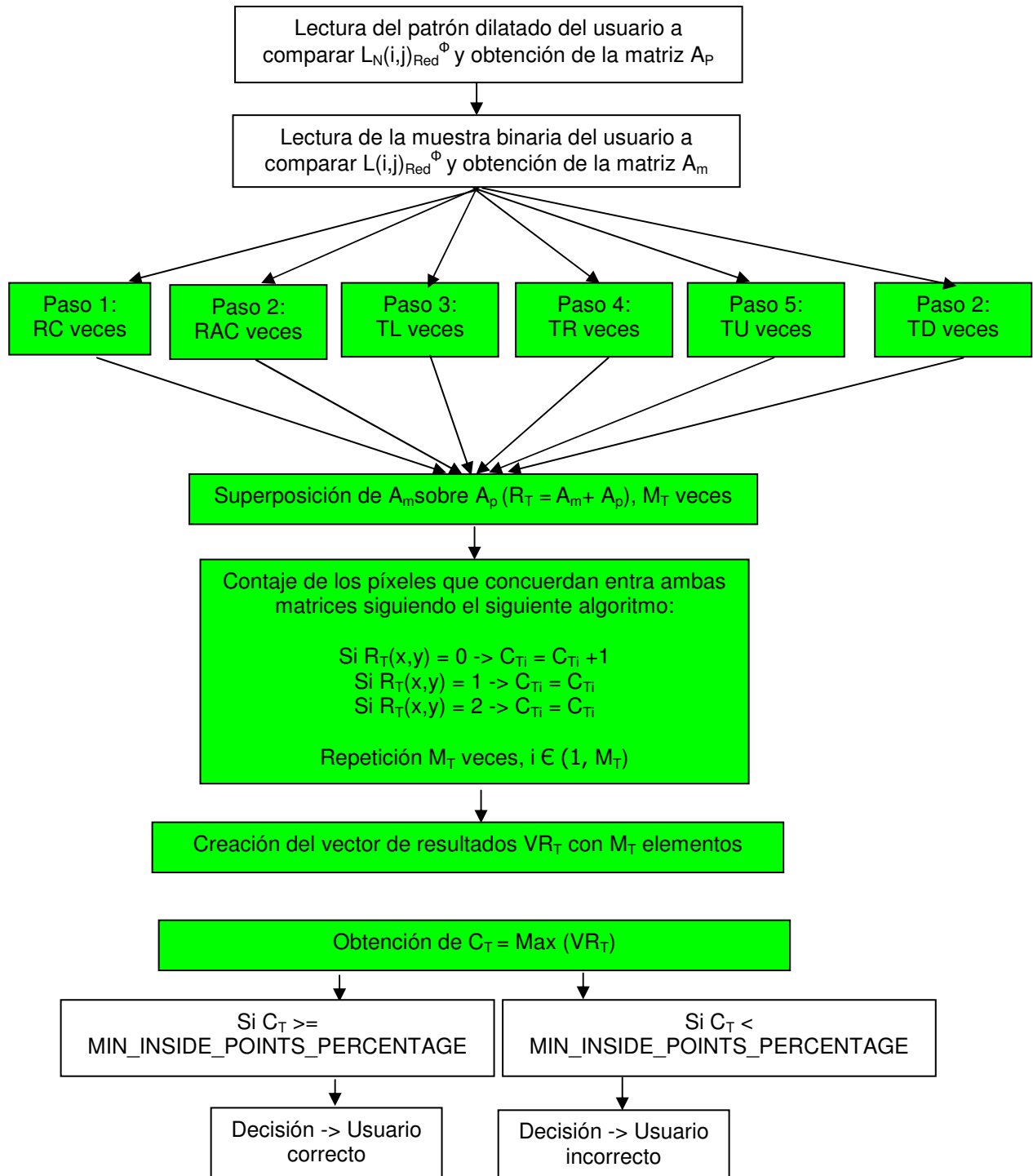


Figura 70: Principio de funcionamiento del método de comparación orientable completa de imágenes con la variante de traslaciones y rotaciones

Como ejemplo final, se muestra la figura 71 en la que se ve la curva de distribución de probabilidad de la autenticación realizada para la misma comparación mostrada en la figura 68 realizada por la plataforma de pruebas, pero ahora añadiendo la variante de traslaciones y rotaciones (49 traslaciones en total). Hay muchos resultados de comparación al realizar las 49 modificaciones de traslación (derecha, izquierda, arriba, abajo); entre 0 y 10% (0,224 de distribución de probabilidad – 11 valores) y así sucesivamente hasta llegar a entre 90 y 100% (0,061 de distribución de probabilidad – 3 valores) . El máximo valor de estas 49 modificaciones es el valor 96% (uno de los 3 valores entre 90 y 100%), que se toma como resultado C_T para ejecutar la decisión final y el usuario es aceptado. Es decir, la inclusión de esta variante hace que un usuario, que inicialmente se había reconocido como erróneo (el primer resultado de comparar la muestra sin modificaciones con el patrón era del 19%), sea finalmente reconocido como correcto. El inconveniente es que hay que hacer M_T comparaciones y por tanto se ralentiza el sistema completo.

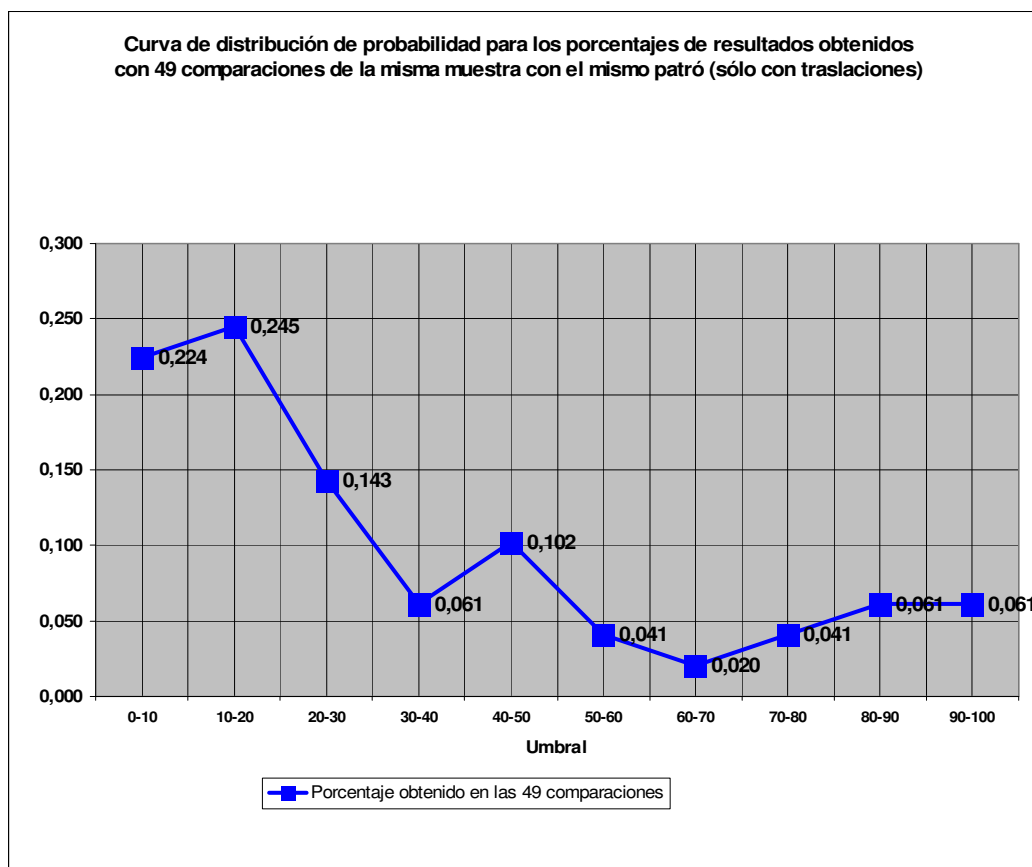


Figura 71: Curva de distribución de probabilidad de los resultados obtenidos al aplicar el algoritmo de traslaciones y rotaciones

6.4 Conclusiones

En este capítulo se ha explicado el proceso seguido para ejecutar dos algoritmos de comparación, el primero de ellos basado en el ancho de la muñeca y el segundo basado en la comparación orientable completa de imágenes de patrón y muestras. Tal como se ha indicado, el primero sólo serviría como primer método para descartar usuarios seguros que son erróneos, pero no puede aplicarse para aquellas decisiones en las que la distancia de la muñeca sea pequeña. Sin embargo, el segundo sí que se puede utilizar con todos los reconocimientos, planteándose como método a ejecutar cuando el primer método no pueda discernir la veracidad del usuario.

Sin embargo, los algoritmos utilizados en este capítulo tienen algunos puntos susceptibles de mejora en investigaciones futuras.

1. Si se desarrolla un sistema con más grados de libertad como se plantea en las líneas de investigación del capítulo 4, que no exija un posicionamiento tan estricto, las imágenes ya no van a ser tan similares y habría que adaptar el sistema de reconocimiento de comparación orientable completa.
2. Como la muestra ya no va a ser tan similar al patrón como en el sistema propuesto en esta Tesis Doctoral, ya no se van a poder comparar de manera completa como se describe en este capítulo, ni siquiera puede que sea posible realizando muchas traslaciones y rotaciones, porque además las muestras y patrones para realizar el método de comparación orientable no tienen por qué tener el mismo tamaño. Por ello, se propone hacer una comparación orientable parcial entre una zona más pequeña de las muestras a comparar con el patrón del reclutamiento. Para elegir la zona reducida de la muestra a comparar, se propone realizar un análisis previo de dicha muestra para extraer la zona con la máxima información vascular posible, por ejemplo, un análisis de minucias (puntos de intersección o puntos finales) de la imagen vascular binaria para elegir aquella zona con mayor cantidad de minucias y a partir de ella comparar de manera orientable con el patrón

del reclutamiento, utilizando el algoritmo de traslaciones y rotaciones propuesto en el punto 6.3.3.

Con este capítulo se termina la explicación de los algoritmos utilizados en esta Tesis Doctoral para desarrollar el sistema biométrico vascular completo, la parte HW y la parte SW. En los siguientes capítulos se explicarán los parámetros más óptimos para todos los sistemas HW y algoritmos explicados, así como todos los resultados que corroboran el buen funcionamiento del sistema.

Optimización de la solución propuesta

7.1 Introducción

En este capítulo se van a indicar los valores más óptimos para los diferentes parámetros de los sistemas HW y algoritmos explicados en los capítulos 4, 5 y 6. En primer lugar se van a analizar los parámetros del sistema de captura de imágenes, a continuación los parámetros necesarios para el preprocesamiento, en tercer lugar los parámetros necesarios para la extracción de características y se finalizará con los parámetros necesarios para los algoritmos de comparación.

7.2 Parámetros óptimos para el sistema de captura de imágenes

En el sistema de captura de imágenes, los parámetros a ajustar son escasos, ya que la cámara utilizada y su software asociado permiten la configuración de muy pocas opciones. Éstas son las siguientes:

- Alimentación del sistema de iluminación DOM: Se puede ajustar entre 0 y 24V DC.
- Parámetros del software de la cámara: Se pueden ajustar los parámetros GANANCIA, EXPOSICIÓN y GAMMA.

Para obtener las imágenes representadas en las figuras 48, 49 y 57, con las que los algoritmos software dan buenos resultados, se ha utilizado la siguiente configuración:

- **Apertura del objetivo de la cámara:** Mínimo
- **Alimentación del sistema de iluminación:** 11,5 V DC
- **GANANCIA:** 260 (mínima)
- **EXPOSICIÓN:** 1/30
- **GAMMA:** 50

Estos valores se han elegido de manera heurística tras realizar un estudio previo en el que se ajustó la apertura del objetivo de la cámara y la ganancia del software de la misma a sus valores mínimos, y luego se fueron ajustando en este orden los parámetros de la alimentación, exposición y gamma. Aunque la bondad de los valores seleccionados para los parámetros se observan a simple vista, se realizó un estudio matemático utilizando las medidas de calidad indicadas en el punto 4.7.1, para así decidir los mejores valores de estos parámetros.

Los resultados de este estudio se muestran en detalle en la tabla 3, en la que se analizaron y se eligieron los valores de los parámetros (resaltados en verde), buscando la mejor combinación con el máximo en la primera medida de calidad y los mínimos de las otras dos. Finalmente se realizaron pruebas heurísticas intermedias de preprocesado, extracción de características y comparación con los valores ajustados para constatar su validez.

Este primer ajuste es fundamental hacerlo lo mejor posible por lo indicado en el capítulo 4, ya que si las imágenes tienen buena calidad, los algoritmos software son luego más sencillos y ofrecen mejores resultados.

En la figura 72 se muestran diferentes imágenes del mismo usuario con diferentes valores del parámetro de la alimentación de la cámara, en la figura 73 se muestran diferentes imágenes del mismo usuario con diferentes valores del parámetro de la exposición del software de la cámara y en la figura 74 se muestran diferentes imágenes del mismo usuario con diferentes valores del parámetro gamma del software de la cámara.

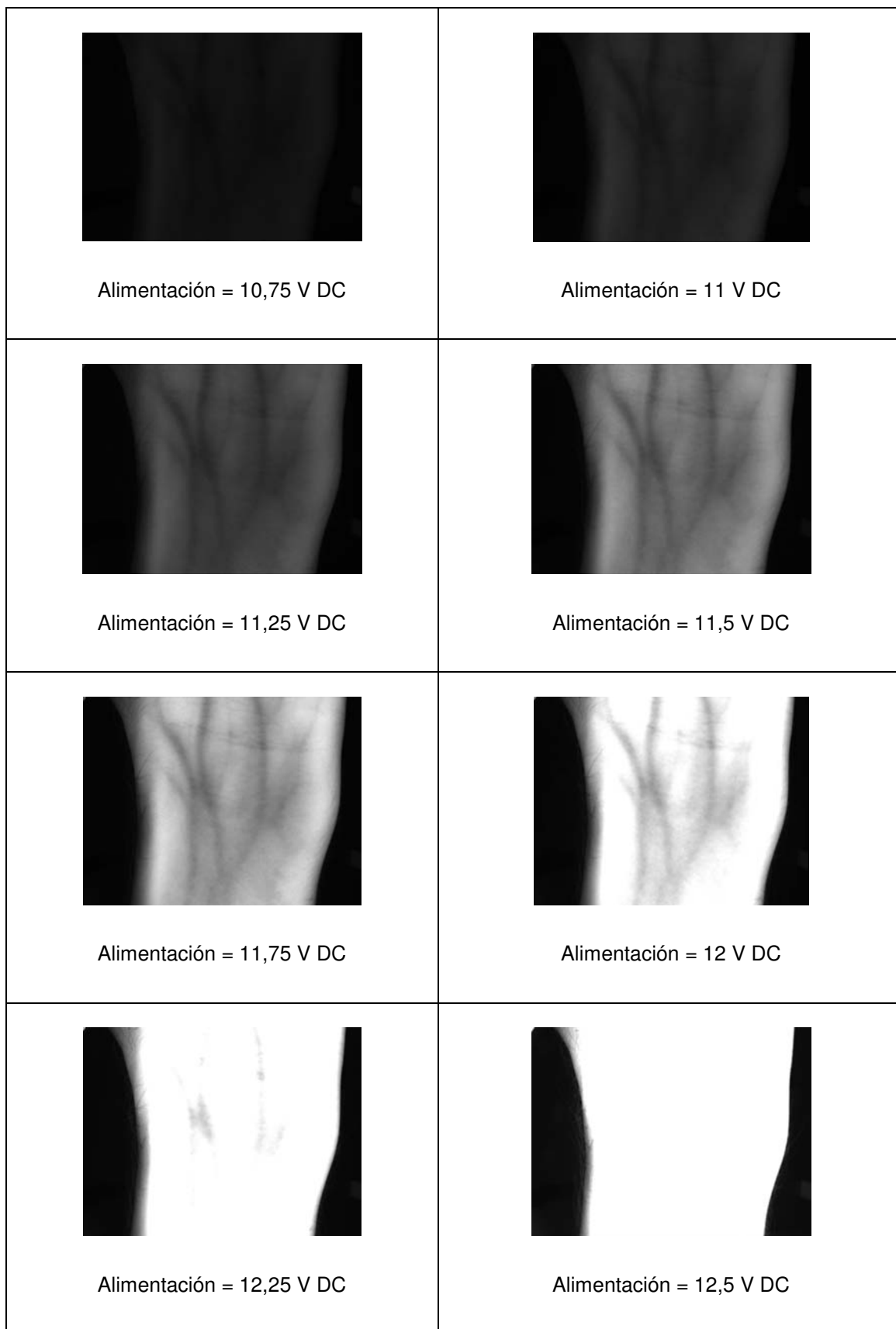


Figura 72: Imágenes obtenidas con diferentes valores para el parámetro de la alimentación de la cámara

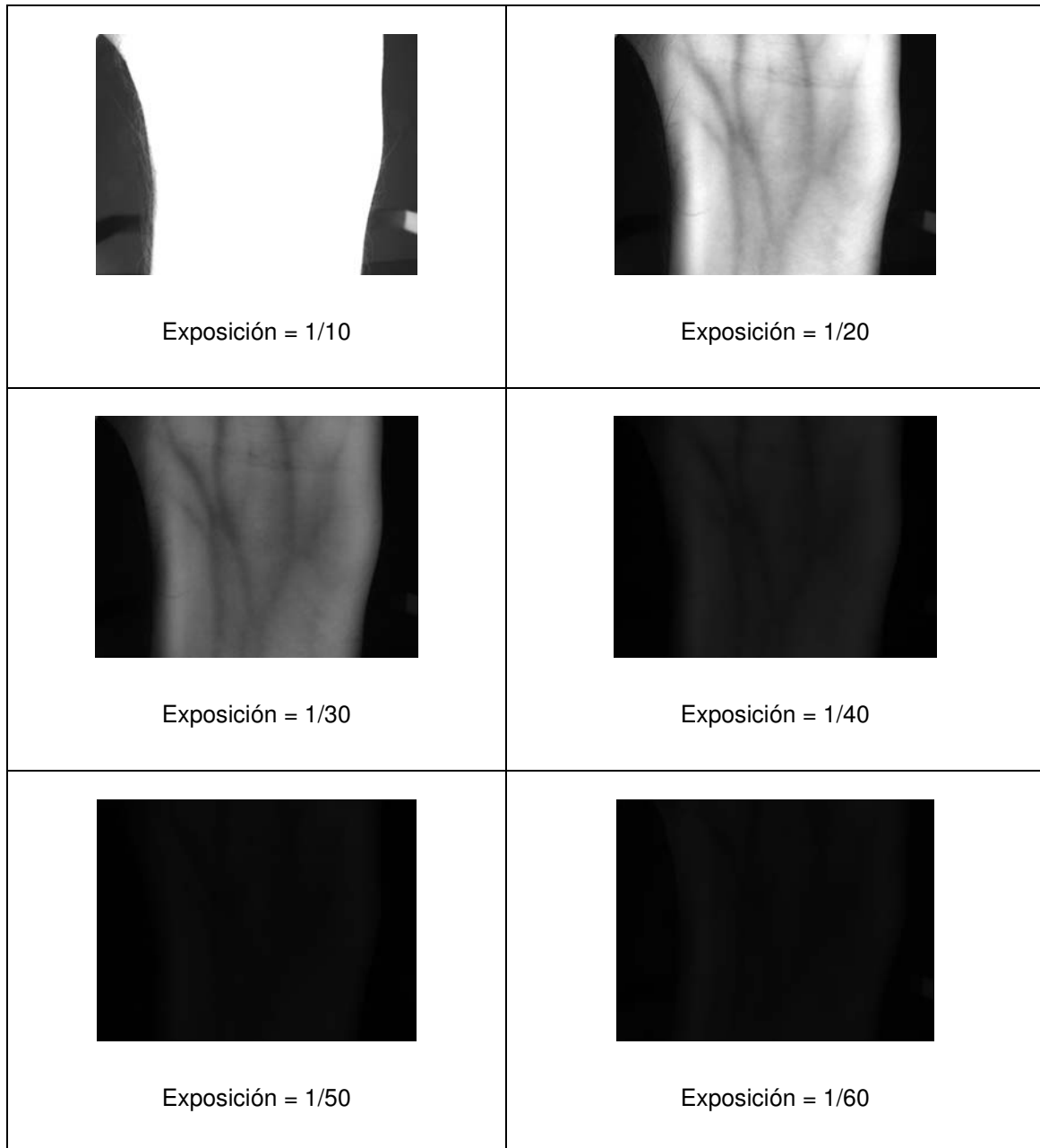


Figura 73: Imágenes obtenidas con diferentes valores para el parámetro de la exposición del software de la cámara

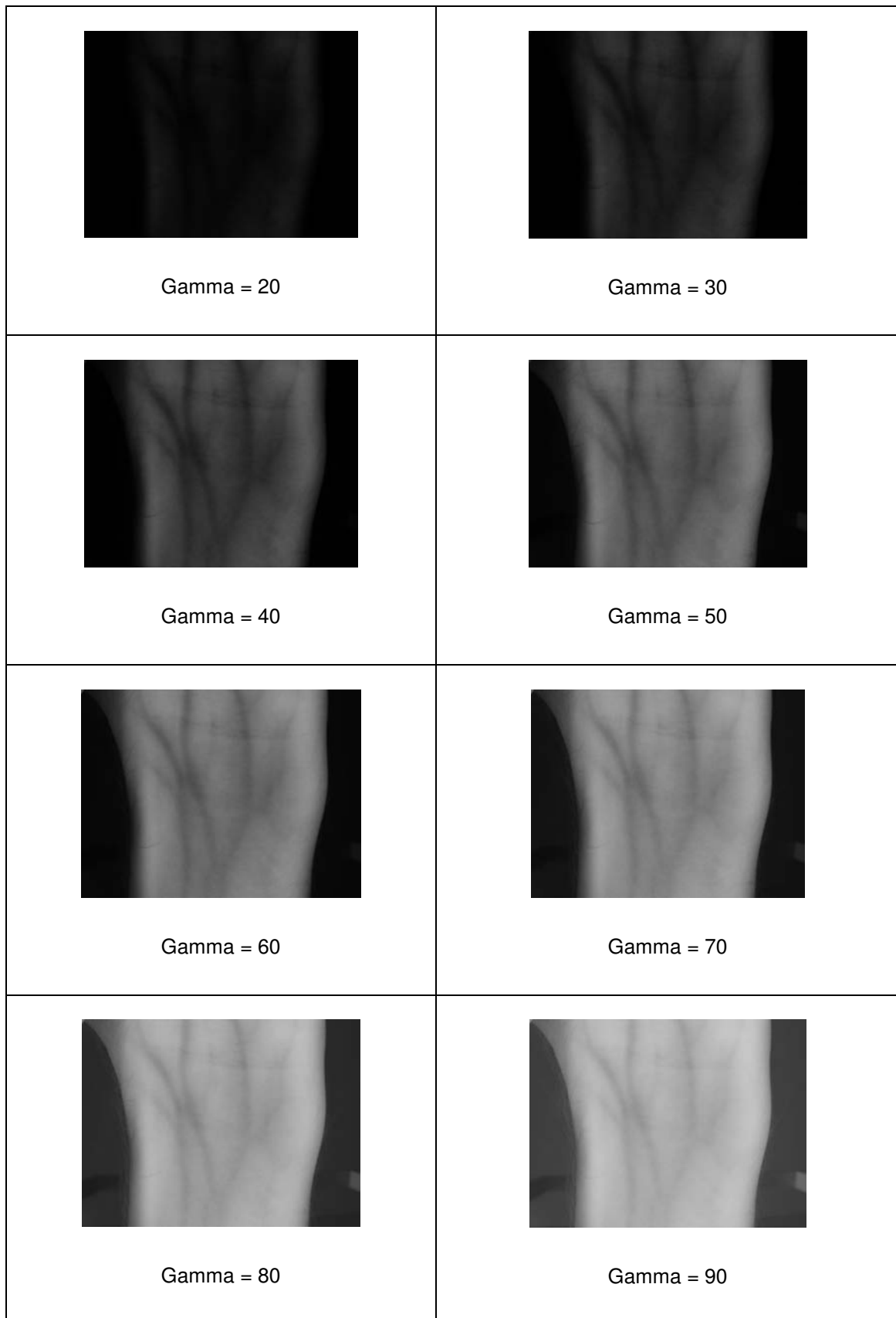


Figura 74: Imágenes obtenidas con diferentes valores para el parámetro Gamma del software de la cámara

Tabla 3: Resultados del estudio de calidad para los parámetros del sistema de iluminación

Medidas de calidad		Primera medida de calidad	Segunda medida de calidad	Tercera medida de calidad
Ajuste del parámetro de la alimentación	Alimentación: 10,75 V DC	0,56	34,76	5.672
	Alimentación: 11,00 V DC	3,67	56,32	5.892
	Alimentación: 11,25 V DC	8,23	89,45	6.356
	Alimentación: 11,50 V DC	12,38	108,23	7.236
	Alimentación: 11,75 V DC	13,67	134,51	23.890
	Alimentación: 12,00 V DC	34,78	187,23	43.581
	Alimentación: 12,25 V DC	156,89	234,13	6.783
	Alimentación: 12,75 V DC	234,67	253,89	2.568
Ajuste del parámetro de la exposición (con la alimentación ajustada a 11,5V)	Exposición: 1/10	0,12	0,34	3.460
	Exposición: 1/20	10,45	153,78	23.489
	Exposición: 1/30	11,78	111,49	7.567
	Exposición: 1/40	2,56	56,10	5.190
	Exposición: 1/50	1,78	3,67	2.081
	Exposición: 1/60	0,34	1,62	3.278
Ajuste del parámetro gamma (con la exposición ajustada a 1/30)	Gamma: 20	1,67	98,34	6.813
	Gamma: 30	4,60	103,67	7.820
	Gamma: 40	7,80	106,01	6.209
	Gamma: 50	12,91	109,23	7.105
	Gamma: 60	10,26	105,02	6.092
	Gamma: 70	4,78	106,09	7.307
	Gamma: 80	3,01	93,78	8.340
	Gamma: 90	2,93	97,65	7.802

7.3 Parámetros óptimos para el preprocesado de las imágenes

El algoritmo de preprocesado utiliza sólo 2 parámetros seleccionables (ROW_ROI y EDGE_ROI), tal como se ha explicado en el punto 5.2.1. Los ajustes óptimos son los siguientes:

- **EDGE ROI:** Ajusta el valor que necesita la función de máximos/mínimos para obtener el contorno exacto de la muñeca antes del cálculo de la ROI. El ajuste óptimo para el sistema de esta Tesis Doctoral se ha comprobado de manera heurística que es 220 y así obtener resultados como los mostrados en la figura 52 (con medidas de calidad similares a los mostrados en la tabla 3).
- **ROW ROI:** Ajusta la línea de corte con la muñeca en la extracción de la ROI. El ajuste óptimo para el sistema de esta Tesis Doctoral es de 430. Se podría elegir otro valor para subir o bajar dicha línea de corte, pero se ha comprobado de manera heurística que, al ser las imágenes originales de 680 X 480 píxeles y con el ajuste de zoom elegido para la cámara del sistema de captura, la selección de este valor hace que la

zona cuadrada de la ROI obtenida en la mayoría de los casos evite las zonas externas a la muñeca y se obtenga la máxima información posible. La representación gráfica de este ajuste se puede consultar en las figuras 55 y 56.

7.4 Parámetros óptimos para la extracción de características

El algoritmo de extracción de características utiliza los parámetros $N1_X$, $N2_X$, SS_X , SD_X , PL_X y $RECRUIT_DIL$ para la parametrización de su funcionamiento. Su significado y sus ajustes óptimos son los siguientes:

- **N1 X**: Ajusta los puntos que utiliza la función Gaussiana 1-D en la extracción de líneas, como se ha explicado en el punto 5.3.1. X indica la dirección en la que se utiliza la extracción: 45° , 90° ó 135° . El ajuste óptimo para el sistema de esta Tesis Doctoral es de 20 para todas las direcciones.
- **N2 X**: Ajusta los puntos que utiliza la primera y segunda derivada de la función Gaussiana 1-D en la extracción de líneas, como se ha explicado en el punto 5.3.1. X indica la dirección en la que se utiliza la extracción: 45° , 90° ó 135° . El ajuste óptimo para el sistema de esta Tesis Doctoral es de 30 para todas las direcciones.
- **SS X**: Ajusta la varianza que utiliza la función Gaussiana 1-D en la extracción de líneas, como se ha explicado en el punto 5.3.1. X indica la dirección en la que se utiliza la extracción: 45° , 90° ó 135° . El ajuste óptimo para el sistema de esta Tesis Doctoral es de 6,8 para todas las direcciones.
- **SD X**: Ajusta la varianza que utiliza la primera y segunda derivada de la función Gaussiana 1-D en la extracción de líneas, como se ha explicado en el punto 5.3.1. X indica la dirección en la que se utiliza la extracción: 45° , 90° ó 135° . El ajuste óptimo para el sistema de esta Tesis Doctoral es de 4,5 para todas las direcciones.

Todos estos valores se han elegido heurísticamente al procesar las primeras imágenes de la base de datos. Las siguientes figuras muestran algunas de las pruebas realizadas para optimizar estos parámetros. Inicialmente se intentaron aplicar los parámetros indicados en [LFE04] con unos resultados muy malos, tal como se muestra en la figura 75, para irlos ajustando poco a poco según el resto de parámetros del sistema y obtener resultados aceptables, tal como se observa en algunos ejemplos del procedimiento de ajuste mostrados en las figuras 76, 77 y 78.

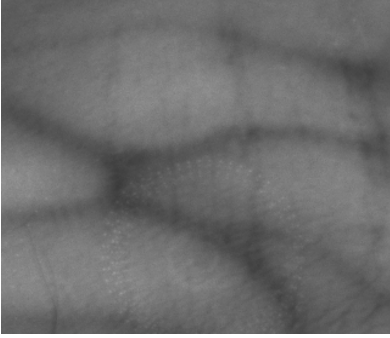

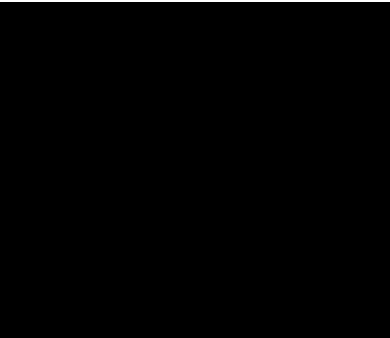
<p><u>Imagen ROI</u></p>	
<p><u>Imagen I'</u></p>	
<p><u>Resultado:</u></p>	

Figura 75: Ajustes para la extracción de características: $N1=9$; $N2=5$; $SS=1,8$; $SD=0,5$

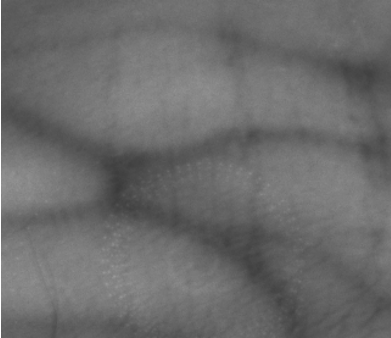

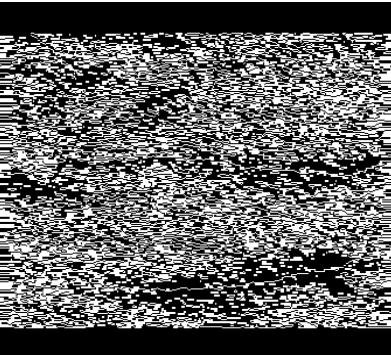
<p><u>Imagen ROI</u></p>	
<p><u>Imagen I'</u></p>	
<p><u>Resultado:</u></p>	

Figura 76: Ajustes para la extracción de características: $N1=20$; $N2=30$; $SS=1,8$; $SD=0,5$

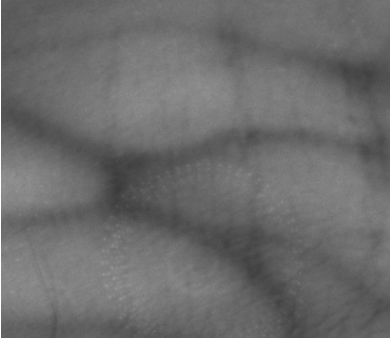
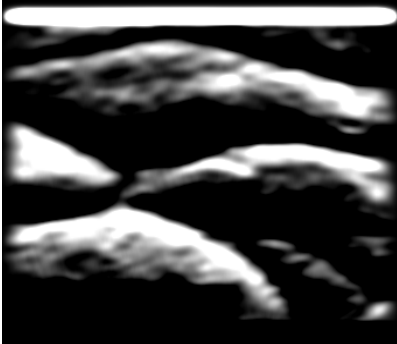

<p><u>Imagen ROI</u></p>	 A grayscale image showing a network of branching structures, likely a biological or material structure, with some noise and low contrast.
<p><u>Imagen I'</u></p>	 The same image as above, but with high contrast. The structures are now bright white against a black background, representing a binary thresholding operation.
<p><u>Resultado:</u></p>	 The image from the previous row, but with the structures reduced to their central lines (skeletons). This represents a thinning or skeletonization process.

Figura 77: Ajustes para la extracción de características: $N1=20$; $N2=30$; $SS=6,8$; $SD=3,5$

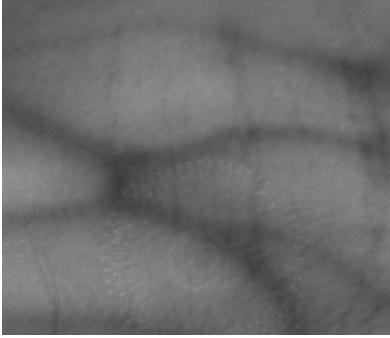
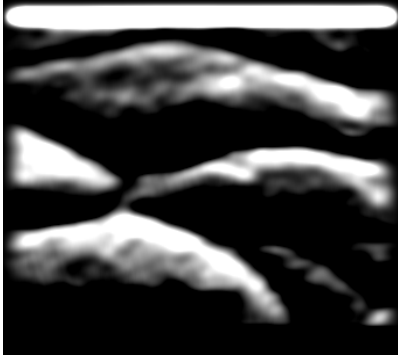
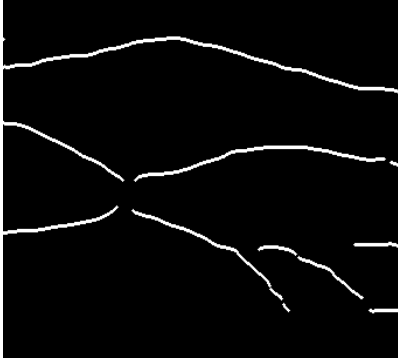
<p><u>Imagen ROI</u></p>	
<p><u>Imagen I'</u></p>	
<p><u>Resultado:</u></p>	

Figura 78: Ajustes para la extracción de características: $N1=20$; $N2=30$; $SS=6,8$; $SD=4,5$

- **PL X:** Ajusta el límite de píxeles para eliminar las líneas y puntos erróneos que procesa el algoritmo inicial de extracción de líneas. X indica la dirección en la que se utiliza la extracción: 45° , 90° ó 135° . En la figura 60 se muestra un ejemplo de la aplicación de esta función. Los valores óptimos para este parámetro se han obtenido de nuevo de manera heurística con las imágenes obtenidas. Los mejores resultados se obtienen con $PL_{45} = 300$, $PL_{90} = 200$ y $PL_{135} = 300$.

- **RECRUIT_DIL**: Ajusta el espesor, expresado en píxeles, con el que se amplía la imagen vascular extraída para los patrones en el proceso de reclutamiento. El ajuste óptimo para el sistema de esta Tesis Doctoral es de 6. En la figura 79 se muestran los resultados de reclutar el mismo patrón con diferentes valores del parámetro RECRUIT_DIL, los cuales se utilizan más tarde en el capítulo 8 para demostrar que el mejor ajuste es el indicado.

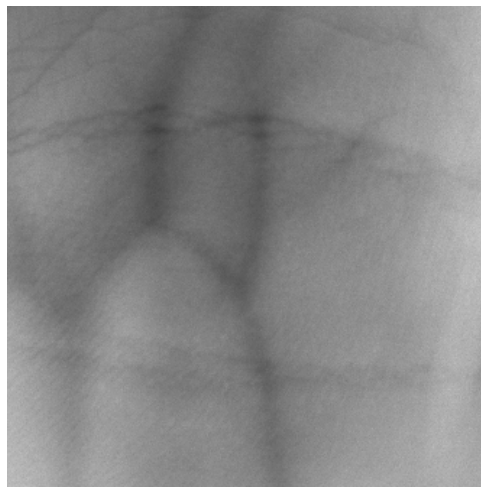


Imagen de la ROI



Patrón con RECRUIT_DIL = 3



Patrón con RECRUIT_DIL = 6



Patrón con RECRUIT_DIL = 9



Patrón con RECRUIT_DIL = 12



Patrón con RECRUIT_DIL = 15

Figura 79: Patrón con valores diferentes de RECRUIT_DIL

7.5 Parámetros óptimos para los métodos de comparación

En los métodos de comparación hay que ajustar 2 grupos de parámetros. Primero los parámetros para el método de análisis basado en la comparación orientable completa de imágenes, que ajustan el número de traslaciones y rotaciones que se deben realizar y que han sido explicados en el punto 6.3.3. Los valores óptimos comprobados para estos parámetros con el sistema final de fijación de la muñeca y la plataforma de pruebas (mostrados en el punto 8.3.3) son los siguientes, teniendo en cuenta que cuanto más bajos sean más rápido será el sistema completo:

- **TL**: Número máximo de traslaciones hacia la izquierda. El valor óptimo para el sistema de esta Tesis Doctoral es 4.
- **TR**: Número máximo de traslaciones hacia la derecha. El valor óptimo es 3.
- **TU**: Número máximo de traslaciones hacia arriba. El valor óptimo es 4.
- **TD**: Número máximo de traslaciones hacia abajo. El valor óptimo es 3.
- **RC**: Número máximo de rotaciones horarias. El valor óptimo es 0.
- **RAC**: Número máximo de rotaciones antihorarias. El valor óptimo es 0.

- **PT:** Número de píxeles utilizados en la translación. El valor óptimo es 10.
- **GR:** Número de grados utilizados en la rotación. El valor óptimo no existe ya que no hacen falta las rotaciones.

Utilizando otro sistema de posicionamiento de muñeca con más grados de libertad y que no fije tan exactamente la posición de la muñeca, habría que seleccionar unos valores mayores en los parámetros para conseguir que el sistema funcione correctamente, debido en este caso a la mayor diferencia de muestras y patrón. En el punto 8.4 se muestran, como ejemplo, las pruebas realizadas para el sistema primitivo de fijación y se observa que es necesario introducir rotaciones y más traslaciones para obtener resultados razonablemente buenos.

El segundo grupo de parámetros son es el que permite tomar la decisión de reconocimiento y proporcionar el resultado de validación o rechazo para el método de comparación orientable completa, tal como se muestra en los diagramas de bloques de las figuras 64 y 70, y para el método basado en el ancho de la muñeca, como se describe en el punto 6.2. Los valores indicados se han obtenido de manera heurística con todas las pruebas realizadas para el capítulo 8, donde se pueden corroborar.

- **MAX WIDTH DIFFERENCE:** Diferencia máxima admitida, expresada en píxeles, para así rechazar de manera segura a un usuario utilizando el método de reconocimiento basado en el ancho de la muñeca. El valor heurístico obtenido es de 12 píxeles más la tolerancia que se le quiera añadir (por ejemplo, un 70%), para dar un valor óptimo de 20..
- **MIN INSIDE POINTS PERCENTAGE:** Mínimo porcentaje de coincidencia admitido para validar a un usuario utilizando el método de reconocimiento basado en la comparación orientable completa de imágenes. El valor heurístico obtenido es de 85.

7.6 Conclusiones

En este capítulo se han explicado los procesos seguidos para optimizar los parámetros más importantes de los algoritmos de todo el sistema y se han indicado sus valores de manera fundamentada o heurística. Es obvio que estos parámetros se podrían optimizar todavía más y su rediseño sería imprescindible en los casos de modificación del sistema de captura, especialmente en lo relativo a los grados de libertad que se le deja al usuario. En el capítulo 9 se introducen algunas ideas sobre estas líneas futuras de investigación.

Resultados obtenidos

8.1 Introducción

Finalmente, en este capítulo se van a presentar los resultados de las pruebas realizadas para las diversas opciones ya explicadas. Se van a ir mostrando las pruebas que se realizaron cronológicamente para confirmar todas las conclusiones dadas en los capítulos 4, 5, 6 y 7 y el porqué de cada decisión tomada a la hora de ir modificando el sistema de captura de imágenes y los algoritmos software a la vista de los resultados obtenidos.

Indicar que todos los resultados que se van a exponer en este capítulo han sido obtenidos con el cuarto sistema de captura de imágenes, lo cual supone una base de datos completa de 131 usuarios con las siguientes características (tomada paulatinamente de enero de 2009 a marzo de 2011, según iban surgiendo las necesidades de prueba, en todas las estaciones del año y con condiciones cambiantes de luminosidad, temperatura y humedad del habitáculo de toma de muestras):

- Sexo: 72 hombres y 59 mujeres
- Edad: 26 usuarios de 13-14 años, 28 usuarios de 14-15 años, 31 usuarios de 15-16 años, 19 usuarios de 17-20 años, 8 usuarios de 20-30 años, 5 usuarios de 30-40 años, 6 usuarios de 40-50 años, 4 usuarios de 50-60 años y 4 usuarios de 60-75 años.
- Raza: 89 usuarios europeos de raza blanca, 24 usuarios sudamericanos de raza mulata, 8 usuarios norteafricanos de raza árabe, 4 usuarios asiáticos de raza amarilla y 6 usuarios africanos de raza negra.

Primero se muestran los resultados obtenidos para el sistema primitivo de fijación (sin fijación exacta de la muñeca), sin utilizar el algoritmo de rotaciones ni traslaciones y sólo probando el sistema de reconocimiento basado en la comparación orientable completa de imágenes, y luego se muestran las diferentes pruebas realizadas con el sistema final de fijación (con fijación exacta de la muñeca), sin y con el algoritmo de rotaciones y traslaciones y probando el sistema de reconocimiento basado en la comparación orientable completa de imágenes y el sistema basado en el diferente ancho de la muñeca.

A continuación se presentan las últimas pruebas realizadas con el sistema primitivo de fijación, pero ahora utilizando el algoritmo de rotaciones y traslaciones, y probando el sistema de reconocimiento basado en la comparación orientable completa de imágenes y el sistema basado en el diferente ancho de la muñeca.

Finalmente se indican los datos de tiempo de ejecución de cada prueba con la plataforma HW utilizada y una tabla comparativa de todos los resultados dados.

Los resultados se van a apoyar en algunas de las curvas biométricas explicadas en el capítulo 2. Como, en realidad, todas ellas ofrecen la misma información y para no mostrar cada prueba con las 4 curvas (EER, ROC, DET y distribución de probabilidad) y así cargar en exceso el capítulo con la misma información, cada prueba se va a justificar sólo con 2 de ellas.

Se ha elegido para ello la curva EER y así mostrar gráficamente el parámetro EER de cada prueba, así como la curva de distribución de probabilidad para ver la diferencia entre la distribución de probabilidad de las comparaciones intraclase e interclase y ver lo alejadas o cercanas que están y si presentan o no intersección.

Las pruebas serán tanto mejores cuanto más bajo sea el punto EER en las curvas EER, y más alejadas y menos intersección muestren las curvas de distribución de probabilidad de las comparaciones intraclase e interclase.

Todos los resultados se han obtenido utilizando la plataforma de pruebas explicada en el anexo.

8.2 Resultados con el sistema primitivo de fijación, sin traslaciones ni rotaciones

Al principio de esta Tesis Doctoral, sólo se probó el sistema de reconocimiento basado en la comparación orientable completa de imágenes y no el del ancho de la muñeca, dando como resultado la necesidad del sistema de posicionamiento final a pesar del inconveniente añadido de incomodidad que supone para el usuario. Las condiciones de las pruebas fueron las siguientes:

- **Sistema de fijación**: Primitivo
- **Nº de usuarios**: 22
- **Nº de manos**: 1 (derecha)
- **Nº de muestras/usuario**: 4 (1 como patrón, 3 como muestras)
- **Nº de comparaciones intraclase**: 66
- **Nº de comparaciones interclase**: 1.386

La figura 80 muestra la curva de distribución de probabilidad de las comparaciones intraclase e interclase con los resultados obtenidos para esta prueba mientras que la figura 81 muestra las curvas EER obtenidas a partir de los mismos.

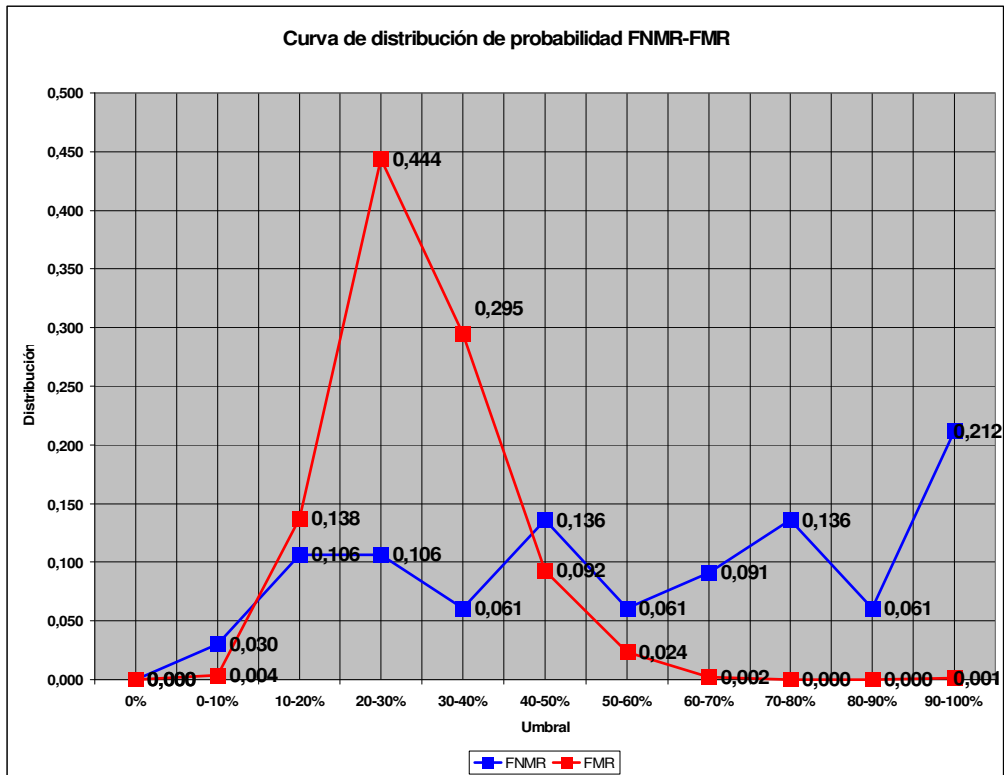


Figura 80: Curvas de distribución de probabilidad de las comparaciones intraclase e interclase con el sistema primitivo de fijación, sin utilizar ni traslaciones ni rotaciones

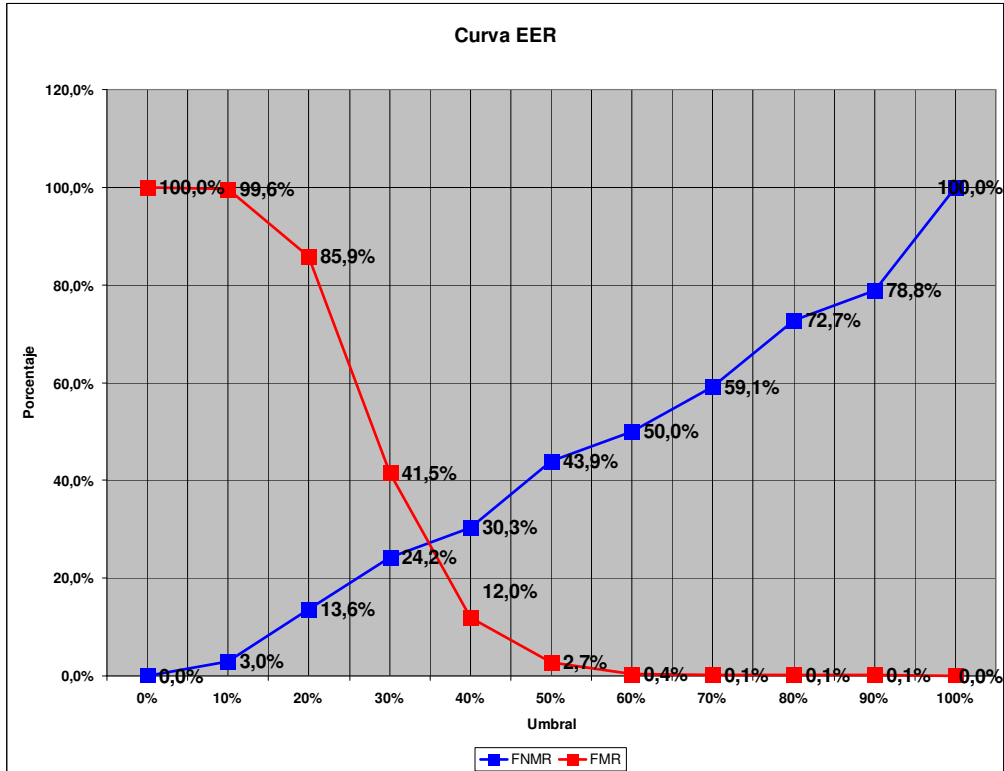


Figura 81: Curvas EER para los resultados con el sistema primitivo de fijación, sin utilizar ni traslaciones ni rotaciones

Tal como se observa en esta prueba, los resultados obtenidos son bastante malos (EER = 27,57 % con un umbral del 34,9%) y las curvas de distribución de probabilidad están juntas y muy superpuestas, debido a que el parámetro RECRUIT_DIL no es capaz de compensar las desviaciones entre las muestras y los patrones, y por tanto el método de comparación orientable completa falla en muchas ocasiones. La figura 82 muestra ejemplos de diferentes fallos para una muestra sobrepuesta sobre el patrón del mismo usuario.

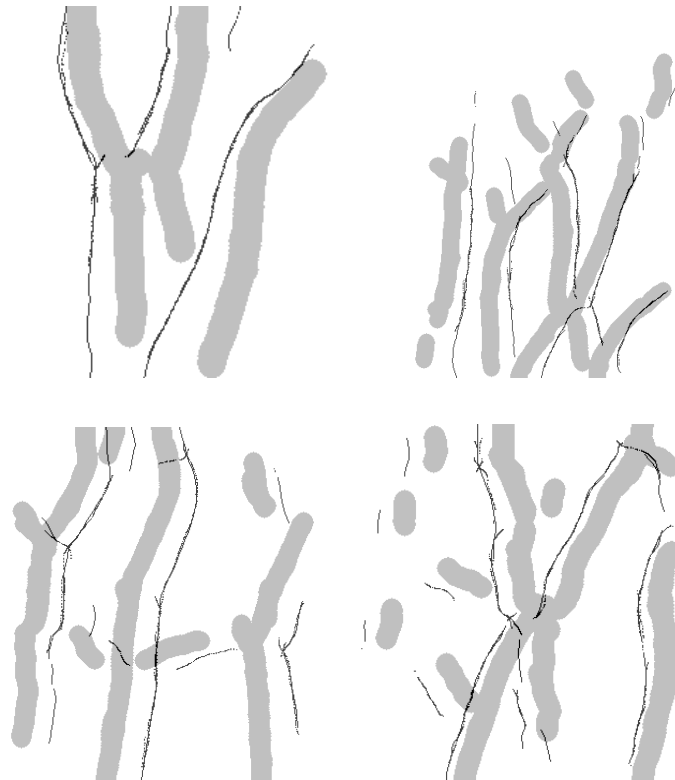


Figura 82: Fallos con el sistema primitivo de fijación, sin utilizar ni traslaciones ni rotaciones

Se observa que en casi todos los casos, los errores son debidos al desplazamiento de las muestras respecto a los patrones. Para resolver este problema se pensó en la idea del sistema final de fijación que limitaría los grados de libertad del usuario en las capturas y haría que las muestras de un mismo usuario fuesen muy parecidas, con lo que presumiblemente los resultados utilizando el algoritmo de reconocimiento con comparación orientable completa deberían ser mucho mejores. Todas las pruebas presentadas a partir de ahora en el punto 8.3 están hechas con el sistema final de fijación.

8.3 Resultados con el sistema final de fijación

Se presentan varias pruebas realizadas que corroboran las soluciones dadas a lo largo de los diferentes capítulos para resolver los problemas encontrados en los resultados del punto 8.2.

8.3.1 Sin traslaciones ni rotaciones, prueba para ajustar el parámetro RECRUIT_DIL

Las condiciones de las pruebas fueron las siguientes:

- **Sistema de fijación**: Final
- **Nº de usuarios**: 9
- **Nº de manos**: 2 (izquierda y derecha)
- **Nº de muestras/usuario**: 5 (1 como patrón, 4 como muestra)
- **Nº de comparaciones intraclase**: 72
- **Nº de comparaciones interclase**: 576

A) Con el parámetro RECRUIT_DIL = 3

La primera prueba se hizo para ver como funcionaba el sistema con el sistema final de fijación y ver si las similitudes de las muestras de cada usuario se podían compensar en principio con RECRUIT_DIL = 3, que se seleccionó de manera heurística tras unas primeras pruebas parciales iniciales. Al igual que en el punto 8.2, de momento sólo se prueba el sistema de reconocimiento basado en la comparación orientable completa de imágenes. La figura 83 muestra las curva de distribución de probabilidad de las comparaciones intraclase e interclase con los resultados obtenidos para esta prueba, mientras que la figura 84 muestra las curvas EER obtenidas a partir de los mismos.

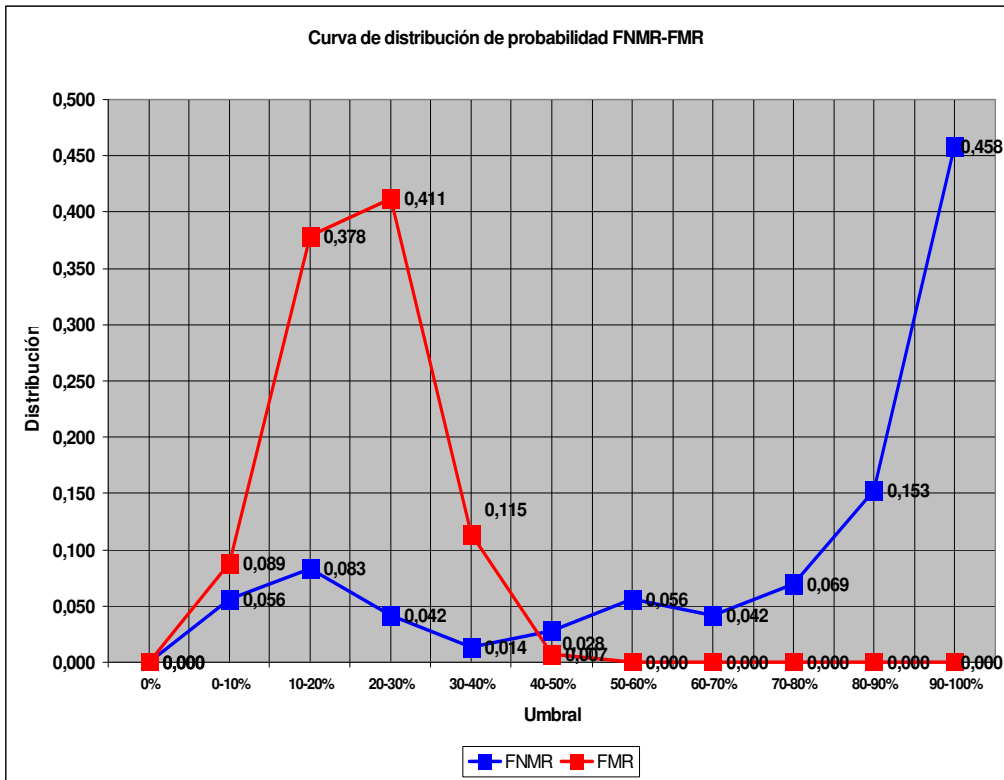


Figura 83: Curvas de distribución de probabilidad de las comparaciones intraclase e interclase con el sistema final de fijación, sin utilizar ni traslaciones ni rotaciones y RECRUIT_DIL = 3

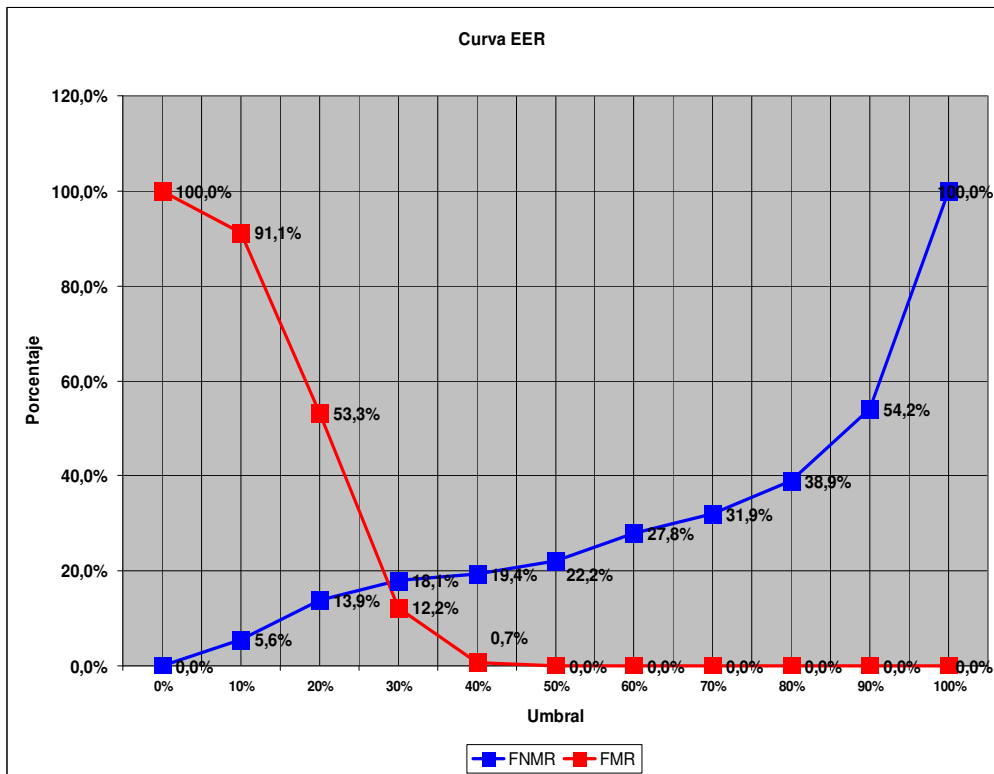


Figura 84: Curvas EER para los resultados con el sistema final de fijación, sin utilizar ni traslaciones ni rotaciones y RECRUIT_DIL = 3

Tal como se observa en esta prueba, los resultados obtenidos son más aceptables (EER = 18,4 % con un umbral del 28,7%), gracias al sistema final de fijación y a la similitud de las muestras, pero son claramente mejorables y lo primero que se intentó probar es modificar el parámetro RECRUIT_DIL y ver cómo repercutía en el parámetro EER y en la distribución de probabilidad de las comparaciones intraclase e interclase, para ver si se podía optimizar este parámetro mejor a las muestras obtenidas.

B) Con el parámetro RECRUIT_DIL = 6, 9, 12 y 15

Las condiciones de prueba son las mismas que las mostradas en el apartado A de este punto, pero modificando el parámetro RECRUIT_DIL en cada una de ellas. Las figuras 85, 86, 87 y 88 muestran las curvas de distribución de probabilidad de las comparaciones intraclase e interclase con los resultados obtenidos para esta prueba, mientras que las figuras 89, 90, 91 y 92 muestran las curvas EER obtenidas a partir de los mismos.

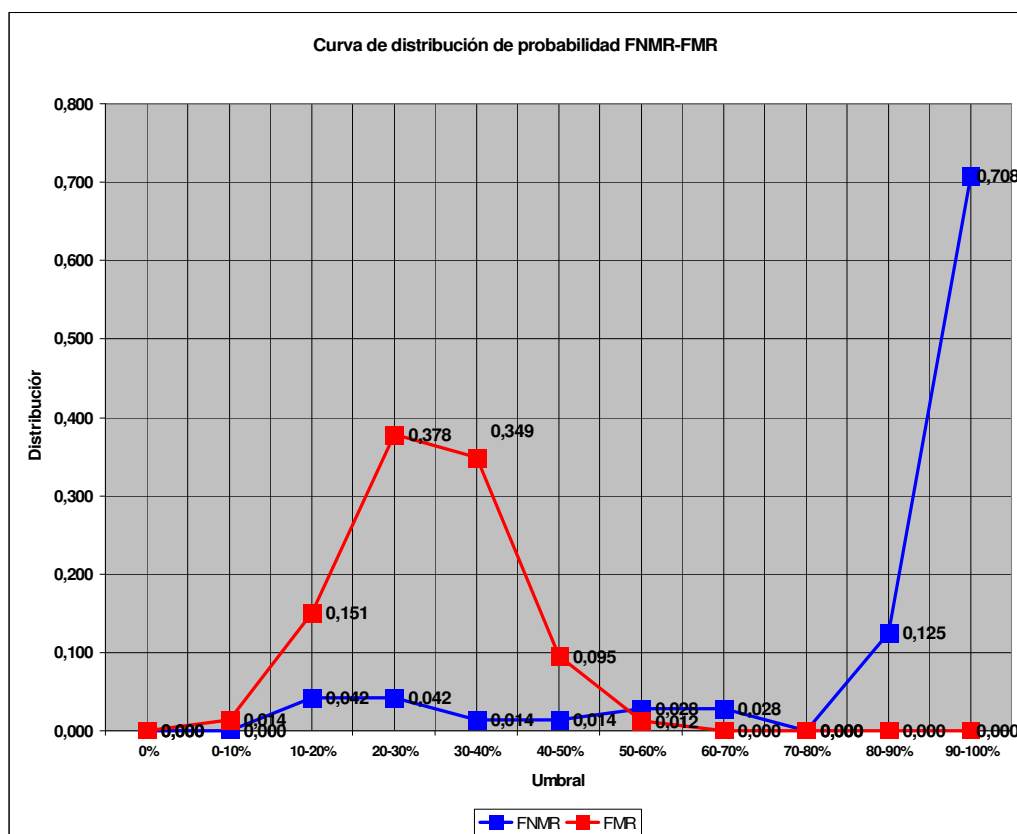


Figura 85: Curvas de distribución de probabilidad de las comparaciones intraclase e interclase con el sistema final de fijación, sin utilizar ni traslaciones ni rotaciones y RECRUIT_DIL = 6

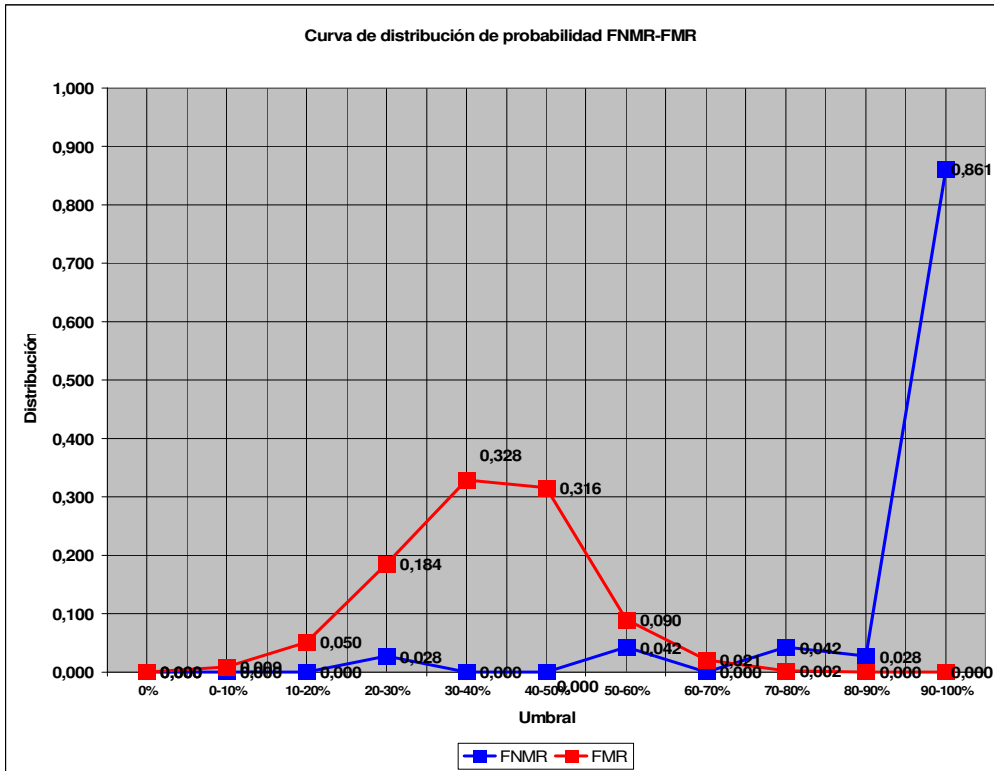


Figura 86: Curvas de distribución de probabilidad de las comparaciones intraclase e interclase con el sistema final de fijación, sin utilizar ni traslaciones ni rotaciones y RECRUIT_DIL = 9

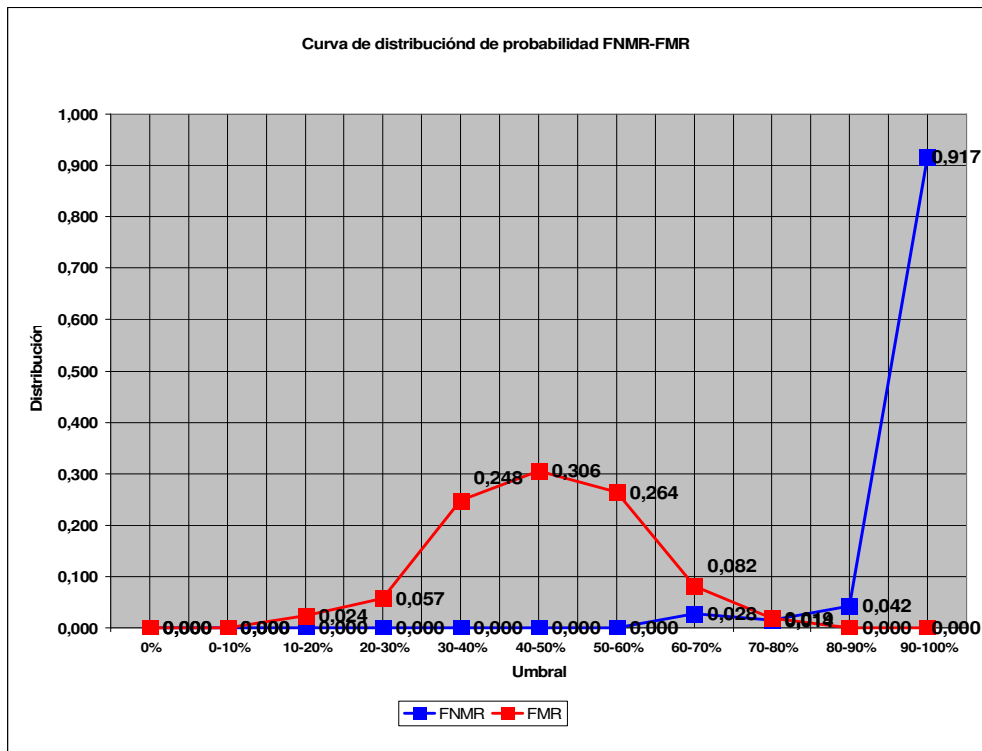


Figura 87: Curvas de distribución de probabilidad de las comparaciones intraclase e interclase con el sistema final de fijación, sin utilizar ni traslaciones ni rotaciones y RECRUIT_DIL = 12

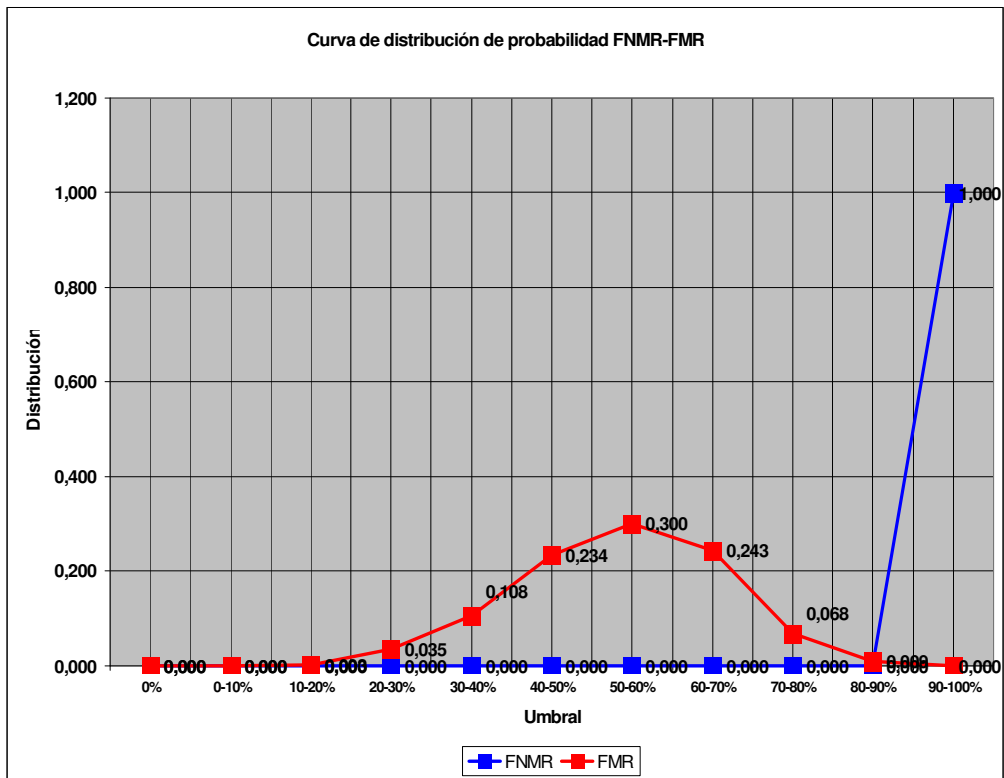


Figura 88: Curvas de distribución de probabilidad de las comparaciones intracase e intercase con el sistema final de fijación, sin utilizar ni traslaciones ni rotaciones y RECRUIT_DIL = 15

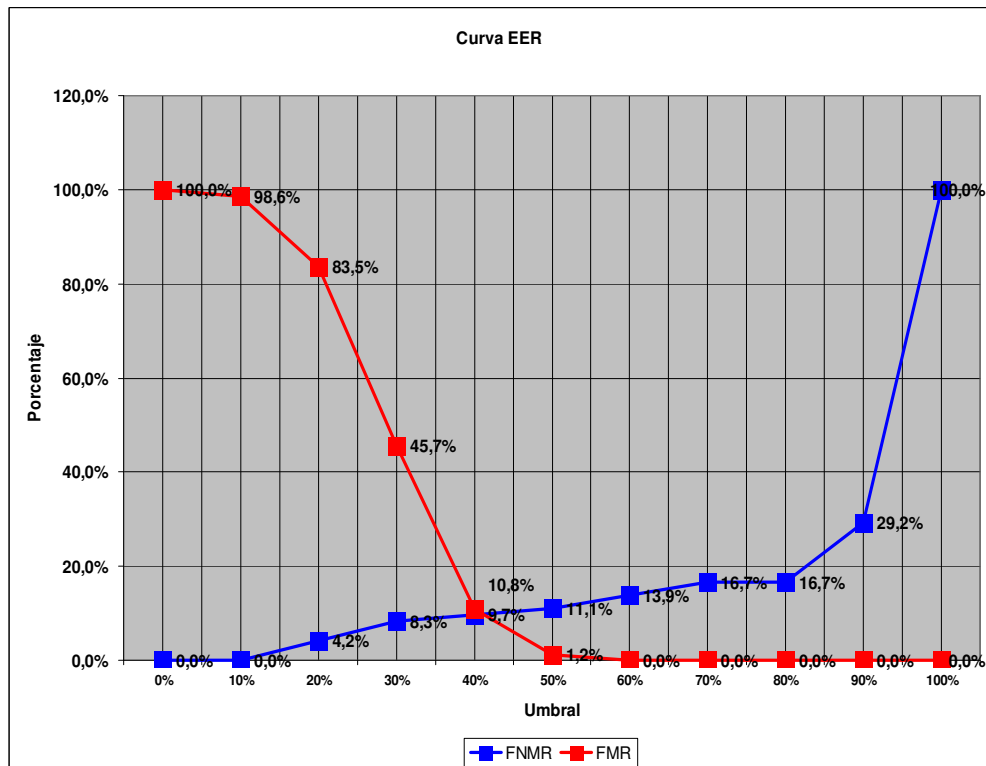


Figura 89: Curvas EER para los resultados con el sistema final de fijación, sin utilizar ni traslaciones ni rotaciones y RECRUIT_DIL = 6

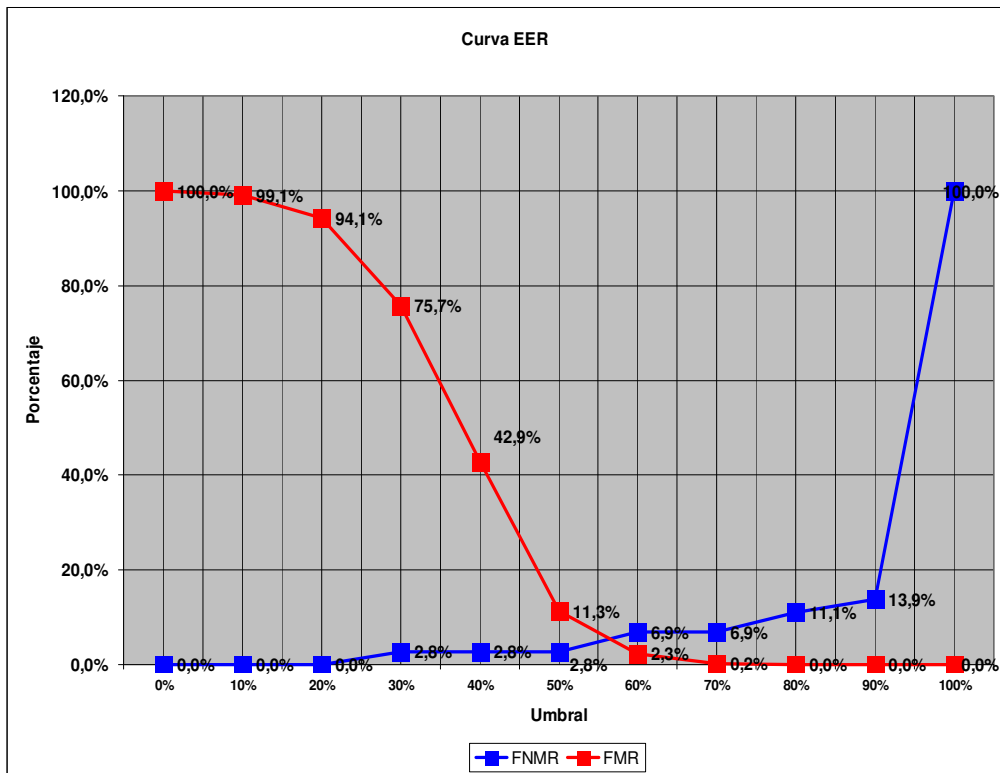


Figura 90: Curvas EER para los resultados con el sistema final de fijación, sin utilizar ni traslaciones ni rotaciones y RECRUIT_DIL = 9

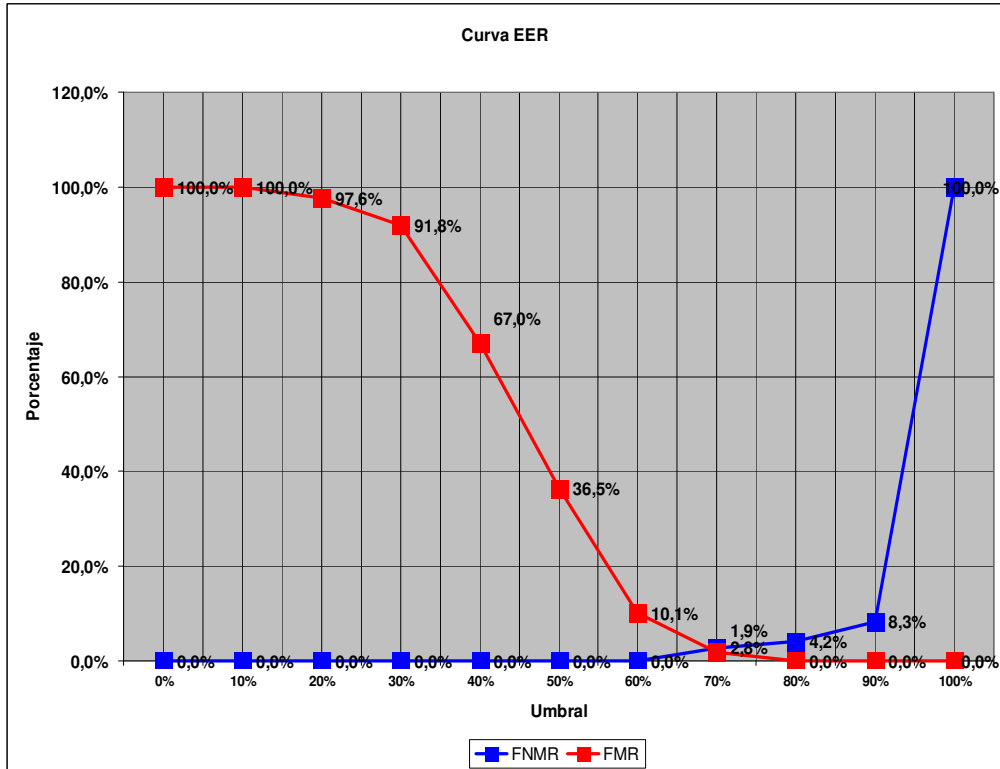


Figura 91: Curvas EER para los resultados con el sistema final de fijación, sin utilizar ni traslaciones ni rotaciones y RECRUIT_DIL = 12

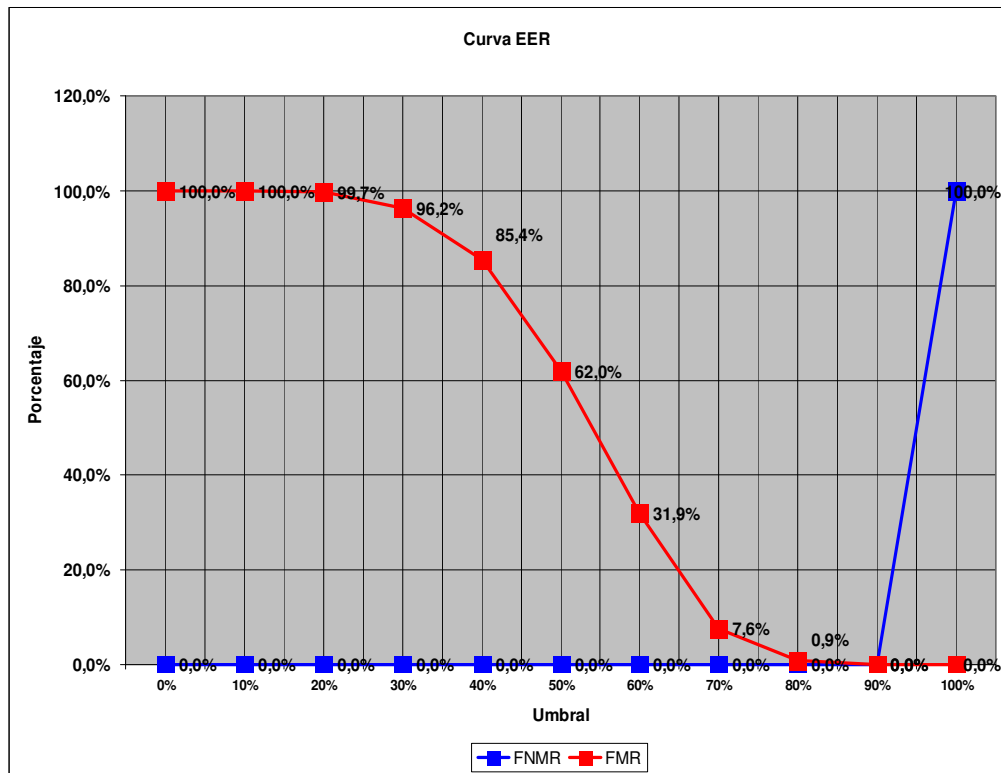


Figura 92: Curvas EER para los resultados con el sistema final de fijación, sin utilizar ni traslaciones ni rotaciones y RECRUIT_DIL = 15

Tal como se observa en esta prueba, los resultados obtenidos para el parámetro EER son cada vez mejores a medida que aumenta el valor del parámetro RECRUIT_DIL:

- EER = 10,2 % con un umbral del 41,2% para RECRUIT_DIL = 6
- EER = 5,1 % con un umbral del 57,3% para RECRUIT_DIL = 9
- EER = 2,2 % con un umbral del 68,4% para RECRUIT_DIL = 12
- EER = 0 % con un umbral del 88,7% para RECRUIT_DIL = 15

Se observa incluso que se puede llegar a obtener un ERR = 0 con RECRUIT_DIL = 15, pero tal como se explicó en el capítulo 2, el parámetro EER no es el único que se debe tener en cuenta a la hora de tomar decisiones sobre los sistemas biométricos. Dicho esto, también se observa que las curvas de distribución de probabilidad de las comparaciones intraclase e interclase se van aproximando cada vez más y lo deseable es tener EER bajos pero con

dichas curvas lo más separadas posible. Esto hace ponderar ambos aspectos y tomar la decisión de elegir el parámetro RECRUIT_DIL = 6 para las pruebas sucesivas. Con este valor ya se obtiene un EER relativamente bueno (10% aproximadamente) y las curvas están más separadas que con DIL = 9, 12 ó 15. Se descarta el valor DIL = 3 por tener un EER de un 20% aprox. y considerar que quizá es demasiado restrictivo y exigiría imágenes de muestras y patrones prácticamente idénticas para su buen funcionamiento.

8.3.2 Sin traslaciones ni rotaciones, pruebas adicionales

Para corroborar estos resultados y validarlos con más usuarios se hace paulatinamente una captura posterior de 100 muestras de la mano derecha con el sistema final de fijación y las mismas premisas que con las pruebas anteriores del punto 8.3.1 (5 muestras para cada usuario: 1 utilizada como patrón y 4 utilizadas como muestras). Además, en estas pruebas el sistema también añade por primera vez el reconocimiento basado en la diferencia del ancho de muñeca para ver su comportamiento. Las condiciones de prueba son las siguientes:

- **Sistema de fijación**: Final
- **Nº de usuarios**: 100
- **Nº de manos**: 1 (derecha)
- **Nº de muestras/usuario**: 5 (1 como patrón, 4 como muestra)
- **Nº de comparaciones intraclase**: 400
- **Nº de comparaciones interclase**: 39.600

El resultado final se muestra en las figuras 93 y 94. La figura 93 muestra la curva de distribución de probabilidad de las comparaciones intraclase e interclase, mientras que la figura 94 muestra las curvas EER obtenidas a partir de los mismos.

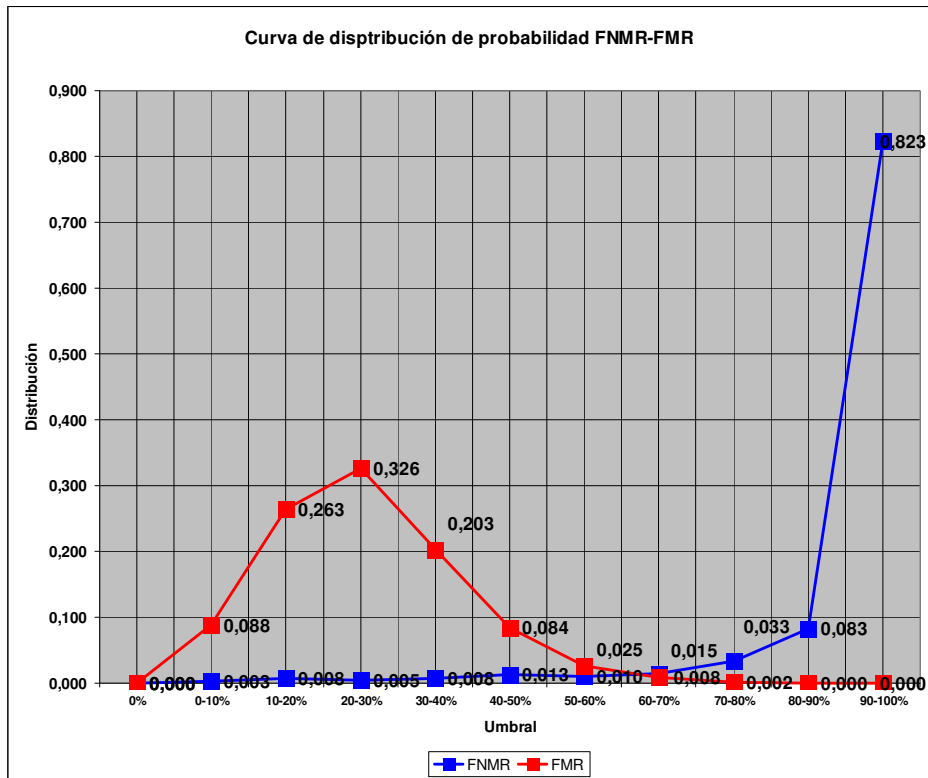


Figura 93: Curvas de distribución de probabilidad de las comparaciones intraclass e interclass con el sistema final de fijación, sin utilizar ni traslaciones ni rotaciones, DIL = 6 y 100 usuarios

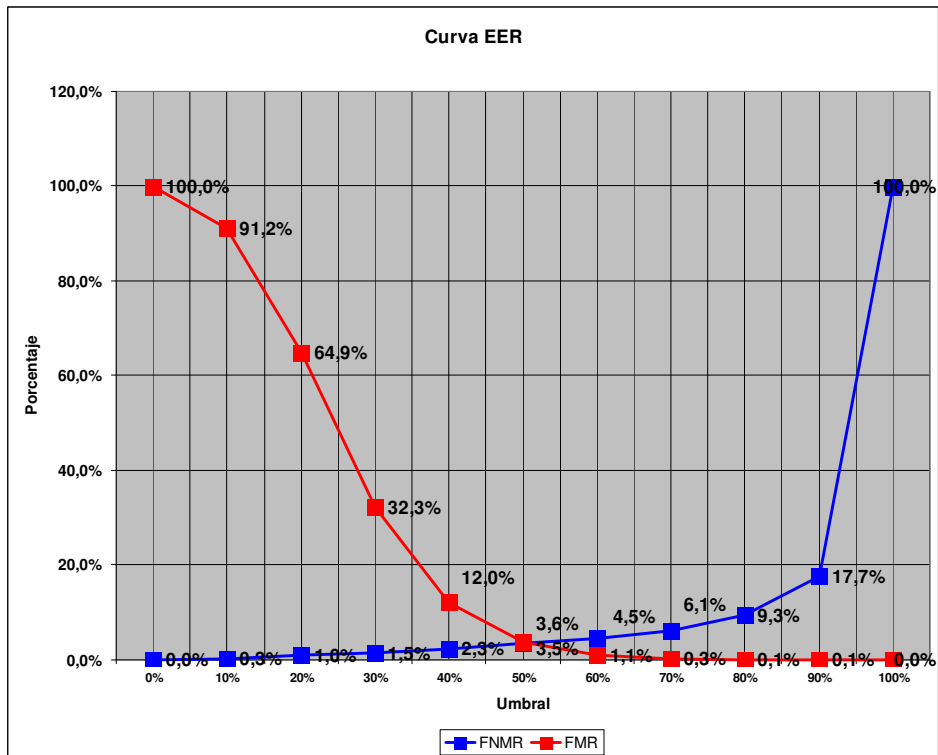


Figura 94: Curvas EER para los resultados con el sistema final de fijación, sin utilizar ni traslaciones ni rotaciones, DIL = 6 y 100 usuarios

Tal como se observa en esta prueba, los resultados obtenidos son similares o incluso mejores a los obtenidos en el punto anterior con RECRUIT_DIL = 6 (ERR = 3,55% al 51% de umbral frente al 10,2% del punto anterior).

En cualquier caso, se demuestra que a pesar de la eliminación de grados de libertad en el sistema de capturas y obtener imágenes de muestra muy similares, el sistema no es capaz de bajar apenas del 3-4% de error para el parámetro EER.

Por eso, en la siguiente prueba se añade el algoritmo de traslaciones y rotaciones, lo que presumiblemente tendría que hacer bajar el EER a un valor bastante inferior al indicado en este punto.

También se comprueba que el máximo valor de desviación de ancho de muñeca para autenticaciones validadas con el método de comparación orientable completa de imágenes es de 12 píxeles, al que se le puede sumar un 70% de tolerancia, dando un valor de 20 que se puede estimar como umbral heurístico de partida para eliminar aquellas identificaciones que den un valor superior al este método de reconocimiento, tal como ya se comentó en el capítulo 6.

Este valor se analiza y justifica con más detalle en las siguientes pruebas, añadiendo los resultados de esta prueba (realizada sólo con autenticaciones) a los resultados de las identificaciones.

8.3.3 Con traslaciones y rotaciones

En estas pruebas se utiliza el mismo grupo de pruebas que en el punto 8.3.2, pero ahora se añade el algoritmo de traslaciones y rotaciones a la plataforma de pruebas.

También se comprueban finalmente los valores de diferencia de ancho de muñeca tanto para autenticaciones como para identificaciones, para ver si se puede utilizar previamente como sistema de reconocimiento de descarte preliminar como se pretendía en principio.

El resultado final se muestra en las figuras 95, 96 y 97 (100 usuarios, 400 comparaciones de autenticación y 39.600 comparaciones de identificación (49 rotaciones + traslaciones: rotaciones = 0, traslaciones en horizontal = 7 (4 izquierda + 3 derecha), traslaciones en vertical = 7 (4 izquierda + 3 derecha))).

La figura 95 muestra las curva de distribución de probabilidad con el primer método de comparación (diferencia del ancho de la muñeca) sólo para las autenticaciones (intraclase), mientras que la figura 96 muestra las mismas curvas con el primer método de comparación, pero ahora para las identificaciones (interclase) y añadiendo la curva del porcentaje acumulado.

La figura 97 muestra las curvas EER obtenidas para esta prueba.

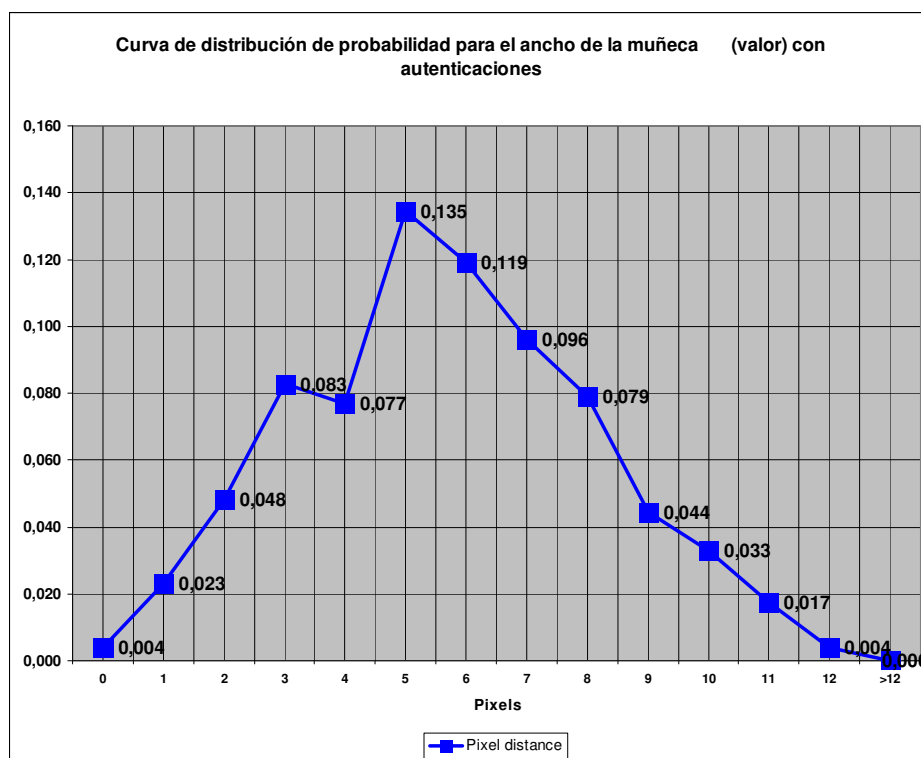


Figura 95: Curvas de distribución de probabilidad para los resultados con el sistema final de fijación, utilizando traslaciones y rotaciones, DIL = 6 y 100 usuarios, para el primer método de comparación y autenticaciones

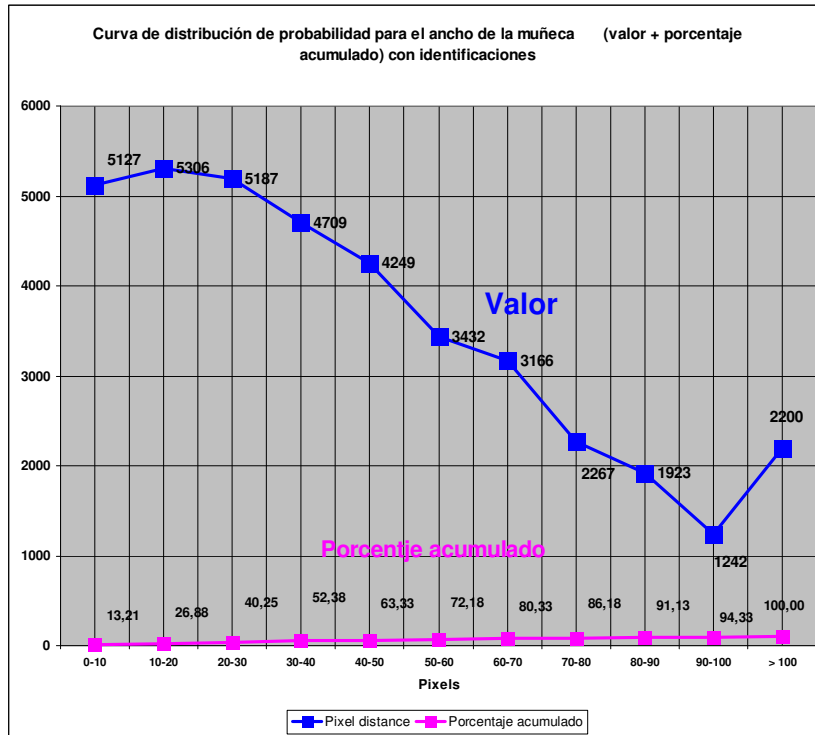


Figura 96: Curvas de distribución de probabilidad para los resultados con el sistema final de fijación, utilizando traslaciones y rotaciones, DIL = 6 y 100 usuarios, para el primer método de comparación, autenticaciones e identificaciones

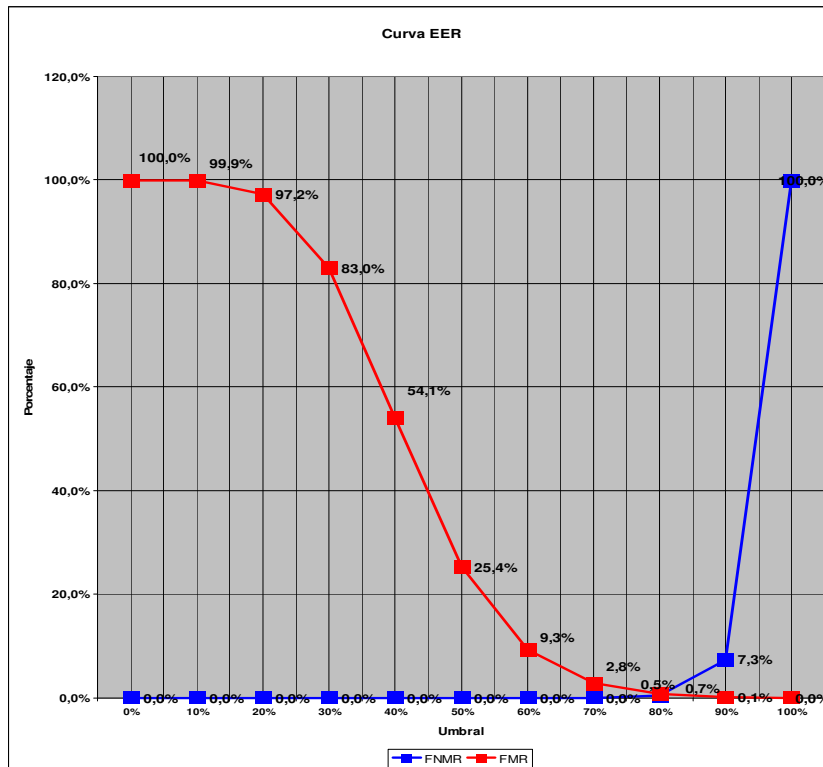


Figura 97: Curvas EER para los resultados con el sistema final de fijación, utilizando traslaciones ni rotaciones, DIL = 6 y 100 usuarios, para el segundo método de comparación

Tal como se observa en esta prueba, los resultados obtenidos son muy buenos con RECRUIT_DIL = 6, incluso sin necesidad de realizar rotaciones, gracias a que el parámetro RECRUIT_DIL es capaz de absorber las posibles desviaciones de rotación (ERR = 0,55% al 81,3% de umbral frente al 4-10% de los resultados obtenidos con el mismo sistema sin rotaciones ni traslaciones).

Se demuestra con un número elevado de usuarios la fiabilidad del sistema presentado en esta Tesis Doctoral. Además se observa que si se elige un umbral de 20 para el primer método con el ancho de la muñeca (12 + 8 píxeles (70% más de tolerancia)), sólo serían necesarias realizar 10.433 comparaciones (aproximadamente un 26% del total) con el método de la comparación orientable completa, el resto ya se podrían descartar y se ahorraría tiempo de ejecución en el sistema completo.

A pesar de estos resultados, que corroboran la fiabilidad del sistema total, se hizo una última prueba con el sistema primitivo de fijación aplicando el algoritmo de traslaciones y rotaciones para las muestras del grupo de usuarios utilizados en las pruebas del punto 8.2. Esta prueba habría que completarla con más usuarios para dar resultados más fiables, tal como se comenta en el punto de líneas de investigación futuras, pero serviría como primera evidencia sobre la viabilidad de la idea de esta Tesis Doctoral con sistemas que no fijen tan exactamente la posición de la muñeca. Las hipótesis de partida es que se necesitarán más comparaciones para el segundo sistema de comparación que las usadas en las pruebas realizadas en este punto para obtener resultados parecidos, al tener que realizar posiblemente más traslaciones y la necesidad de incluir rotaciones respecto a las pruebas de este punto.

8.4 Resultados con el sistema primitivo de fijación, con traslaciones y rotaciones

Se utilizan las mismas muestras del grupo presentado en el punto 8.2 que dieron un resultado EER = 27,57%. Las condiciones completas de esta prueba son las siguientes:

- **Sistema de fijación**: Primitivo
- **Nº de usuarios**: 22
- **Nº de manos**: 1 (derecha)
- **Nº de muestras/usuario**: 4 (1 como patrón, 3 como muestras)
- **Nº de comparaciones intraclase**: 66
- **Nº de comparaciones interclase**: 1.386
- **Rotaciones**: 2 (1 en el sentido horario + 1 en el sentido antihorario)
- **Traslaciones en horizontal**: 9 (5 izquierda + 4 derecha)
- **Traslaciones en vertical**: 9 (5 izquierda + 4 derecha)
- **Número de comparaciones totales para el segundo método de comparación**: 244

La figura 98 muestra las curvas de distribución de probabilidad con el primer método de comparación (diferencia del ancho de la muñeca) aplicada a las autenticaciones (intraclase), mientras que la figura 99 muestra las mismas curvas pero para las identificaciones (interclase) y mostrando el porcentaje acumulado. La figura 100 muestra las curvas de distribución de probabilidad de las comparaciones intraclase e interclase para el segundo método de comparación (comparación orientable completa), mientras que la figura 101 muestra las curvas EER obtenidas a partir de los mismos.

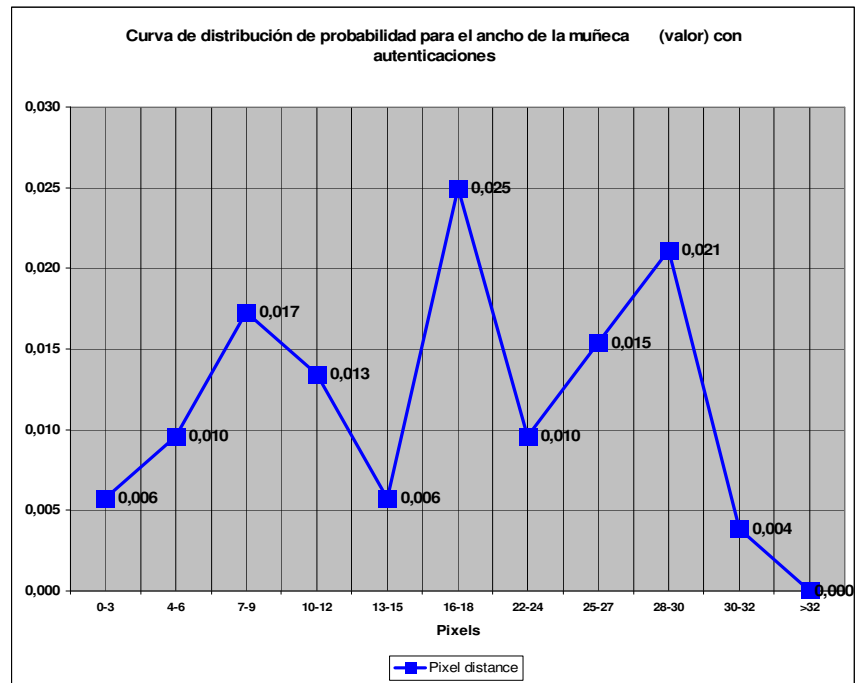


Figura 98: Curvas de distribución de probabilidad para los resultados con el sistema primitivo de fijación, utilizando traslaciones y rotaciones, para el primer método de comparación y autenticaciones

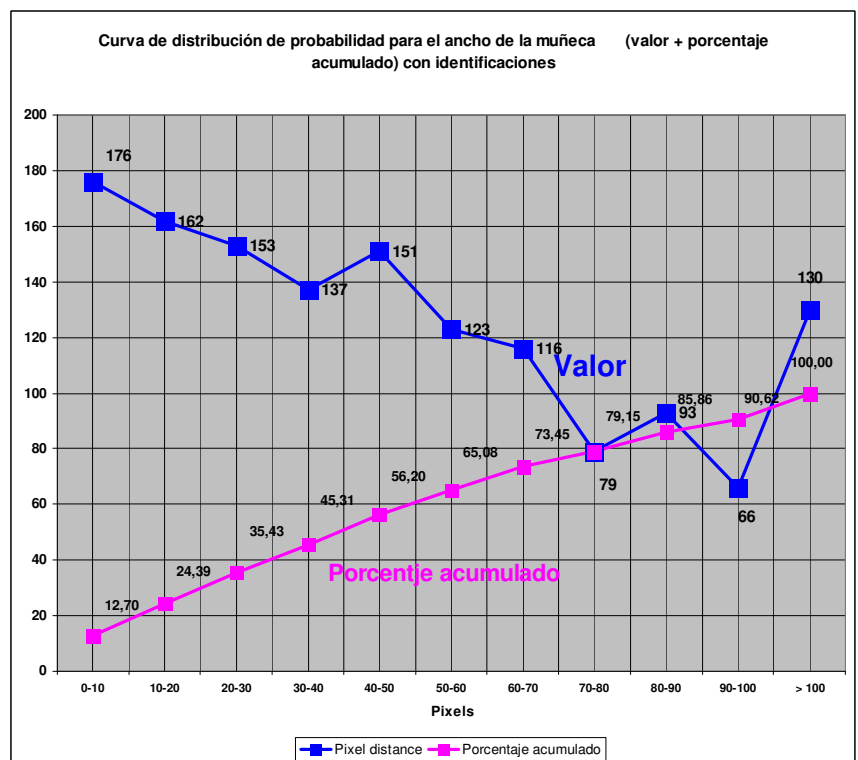


Figura 99: Curvas de distribución de probabilidad para los resultados con el sistema primitivo de fijación, utilizando traslaciones y rotaciones, para el primer método de comparación, autenticaciones e identificaciones

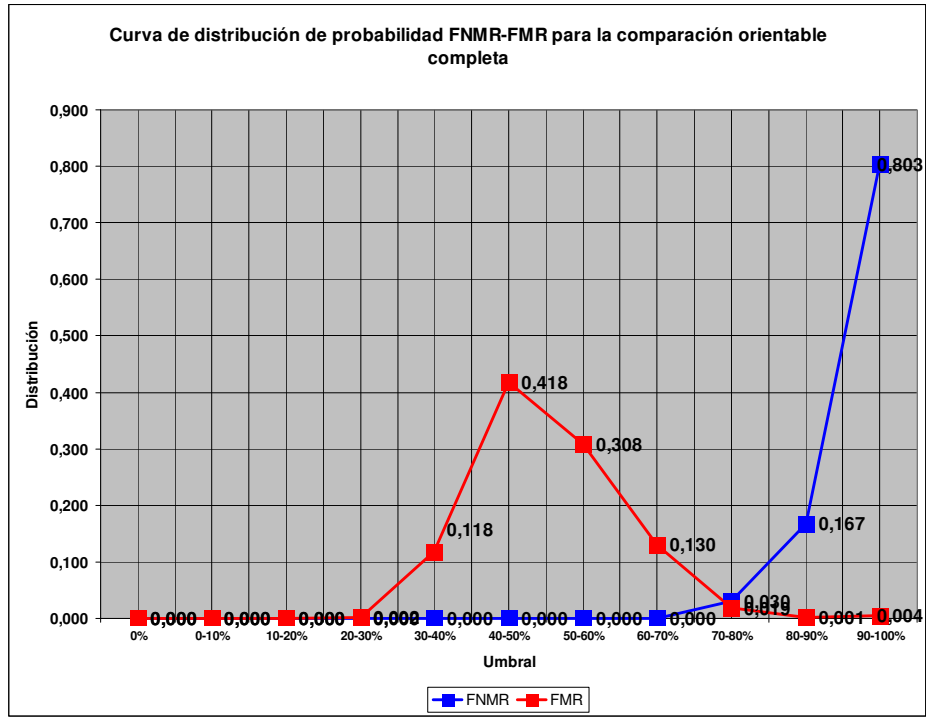


Figura 100: Curvas de distribución de probabilidad de las comparaciones intraclase e interclase con el sistema primitivo de fijación, utilizando traslaciones y rotaciones, para el segundo método de comparación

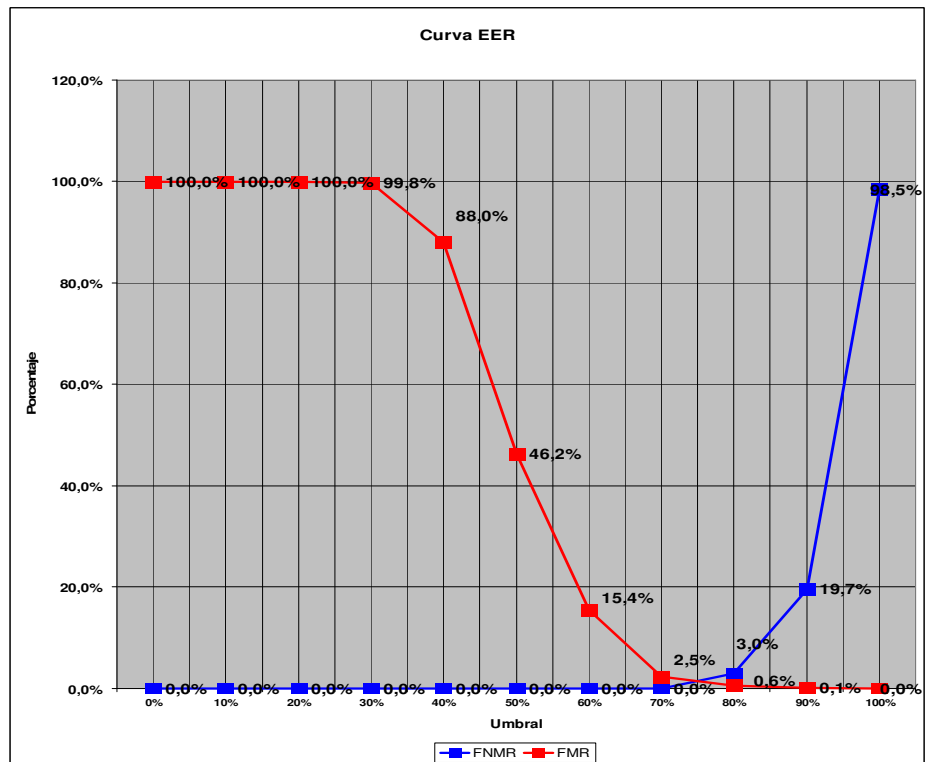


Figura 101: Curvas EER para los resultados con el sistema primitivo de fijación, utilizando traslaciones y rotaciones, para el segundo método de comparación

Tal como se observa en esta prueba, los resultados obtenidos son parecidos a los obtenidos en el punto 8.3.3 (EER = 1,53% con un umbral del 75,1% y un máximo de ancho de muñeca para descartes con el primer método de reconocimiento de 50 píxeles (32 (máximo en autenticaciones en este caso) + 18 (55% de tolerancia)), lo que significa que sólo sería necesario realizar el 56% de verificaciones aproximadamente con el método de comparación orientable completa (779 por debajo de 50 píxeles en el ancho de la muñeca), descartando la segunda comparación con todos aquellos valores que fuesen superiores.

La ventaja de este sistema con el sistema primitivo de fijación es que se mejora la comodidad del usuario a la hora de captar las imágenes, haciendo que las muestras del mismo usuario no sean tan semejantes.

Uno de los inconvenientes es que el umbral para el primer método de comparación (ancho de la muñeca) sube de 20 a 50 por el hecho de que ahora las imágenes no van a ser tan semejantes y eso hace que este primer método de comparación no sea tan restrictivo con lo que hay que hacer más comparaciones con el segundo método de comparación (comparación orientable completa).

Otro inconveniente es que el algoritmo de traslaciones y rotaciones es más intensivo en cálculo, al provocar que haya que hacer ahora 244 comparaciones totales frente a las 49 del punto 8.3.3, para obtener resultados parecidos, y por tanto aumente mucho el tiempo de ejecución del sistema.

Finalmente, otro problema es que las curvas EER y de distribución de probabilidad se acercan más que en el caso anterior, lo cual no es deseable.

8.5 Resultados temporales

Para terminar el capítulo de pruebas, se van a indicar los resultados de tiempo de ejecución de cada una de las pruebas, con las diferentes partes de cada algoritmo explicado, para tener una idea sobre la rapidez de la solución propuesta.

Lógicamente estos tiempos de ejecución dependen de la lógica de programación de la plataforma de pruebas (cuyo diagrama de bloques se muestra en la figura 102 del anexo) y de la plataforma HW y SW del PC utilizado. Ambos aspectos son susceptibles de cambio y mejora en investigaciones y estudios futuros.

Las características HW y SW del PC utilizado para ejecutar la plataforma de pruebas y obtener los resultados mostrados en este capítulo son las siguientes:

- Procesador Intel Pentium M 725 (1,6 GHz, 400 MHz FSB, 2 MB L2 Caché)
- Memoria RAM de 2 GB DDR2 (Support Dual-Channel)
- Disco Duro de 100 GB
- Sistema operativo Microsoft Windows Profesional 2002 + SP3
- MATLAB R2007b V7.5.0.342 como lenguaje de programación para el desarrollo de la plataforma de pruebas

Sobre los tiempos de ejecución obtenidos al ejecutar las acciones de la plataforma de pruebas indicadas en el punto A.3.3 del anexo, indicar que lo que se expone son los tiempos medios obtenidos tras aplicar la medida a varios usuarios aleatorios de la base de datos. También hay que mencionar que el tiempo de reclutamiento, de preprocesado, de extracción de características y del primer método de comparación van a ser de media los mismos en todas las pruebas, ya que estos procesos son independientes del sistema de fijación de la muñeca y del algoritmo de traslaciones y rotaciones. Además sólo se indica el tiempo de autenticación (una comparación de una muestra con su patrón), ya que el tiempo de las identificaciones sería el mismo pero multiplicado por el número de usuarios de la base de datos con los que se compara.

Los tiempos de ejecución obtenidos con la plataforma HW y SW utilizada se muestran en la tabla 4. Se han realizado 5 pruebas de cada tipo con usuarios elegidos aleatoriamente para finalmente obtener los valores medios. Los tiempos medios se ofrecen en segundos y entre paréntesis se muestran los valores máximo y mínimo.

Tabla 4: Tiempos de ejecución para los algoritmos con cada prueba

Propiedad de la prueba / Apartado de este capítulo		8.2	8.3.1	8.3.2	8.3.3	8.4
Sistema de fijación para la muñeca		Primitivo	Final	Final	Final	Primitivo
Utilización del 1º método de comparación		NO	NO	SI	SI	SI
Traslaciones para el 2º método de comparación		NO	NO	NO	7(4+3)	9(5+4)
Rotaciones para el 2º método de comparación		NO	NO	NO	0	2
Nº de comparaciones para el 2º método de comparación		1	1	1	49	244
RECLUTAMIENTO	PREPROCESADO: ROI Ampliación de histograma + Reconstrucción morfológica	0,3 (0,29 – 0,31)				
	Eliminación de puntos interiores + Recorte final de ROI	0,9 (0,77 – 1,24)				
	EXTRACCIÓN DE CARACTERÍSTICAS: Obtención de las líneas + Dilatación	1,6 (1,33 – 1,96)				
	Binarización + Eliminación de líneas erróneas + Dilatación final	0,2 (0,16 – 0,23)				
TIEMPO TOTAL DE RECLUTAMIENTO		3,0 (2,55 - 3,74)				
VERIFICACIÓN	PREPROCESADO: ROI Ampliación de histograma + Reconstrucción morfológica	0,3 (0,28 – 0,33)				
	Eliminación de puntos interiores + Recorte final de ROI	0,9 (0,75 – 1,27)				
	EXTRACCIÓN DE CARACTERÍSTICAS: Obtención de las líneas + Dilatación	1,6 (1,31 – 1,99)				
	Binarización + Eliminación de líneas erróneas	0,2 (0,15 – 0,25)				
	1º MÉTODO DE COMPARACION: ANCHO DE LA MUÑECA	0	0	0,005(0,0043-0,0056)		
2º MÉTODO DE COMPARACIÓN: COMPARACION ORIENTABLE	0,012 (0,009-0,015)			0,89 (0,75- 1,04)	4,46 (4,23- 4,84)	
TIEMPO TOTAL DE VERIFICACIÓN		3,01 (2,51 - 3,72)		3,02 (2,52 - 3,73)	3,90 (3,24 - 4,77)	7,46 (6,72 - 8,68)

8.6 Conclusiones

La tabla 5 muestra como conclusión un resumen comparativo de todos los resultados mostrados y comentados en este capítulo, considerando todas

las variantes utilizadas. Esta tabla va a servir más tarde como parte de las conclusiones generales y líneas de investigación futuras de esta Tesis Doctoral mostrados en el capítulo siguiente.

Tabla 5: Comparativa final de resultados para el sistema biométrico completo

Propiedad de la prueba / Apartado de este capítulo	8.2	8.3.1					8.3.2	8.3.3	8.4
Sistema de fijación de la muñeca	Primitivo	Final					Final	Final	Primitivo
Comodidad para el usuario	Alta	Baja					Baja	Baja	Alta
Nº de imágenes por usuario (patrón + muestras)	4(1+3)	5(1+4)					5(1+4)	5(1+4)	4(1+3)
Nº de usuarios utilizados	22	9					100	100	22
Nº de muñecas utilizadas	1	2					1	1	1
Comparaciones intraclase	66	72					400	400	66
Comparaciones interclase	1.386	576					39.600	39.600	1.386
Traslaciones para el 2º método de comparación	NO	NO					NO	7(4+3)	9(5+4)
Rotaciones para el 2º método de comparación	NO	NO					NO	0	2
Nº de comparaciones para el 2º método de comparación	1	1	1	1	1	1	1	49	244
Parámetro RECRUIT_DIL	6	3	6	9	12	15	6	6	6
Umbral en píxeles para el 1º método de comparación	NO	NO	NO	NO	NO	NO	20	20	50
EER	27,57	18,4	10,2	5,1	2,2	0	3,55	0,55	1,53
Tiempo de ejecución medio para autenticación (seg.)	3,01	3,01					3,02	3,90	7,46

Conclusiones y líneas de investigación futuras

9.1 Conclusiones generales

A la vista de los resultados obtenidos en el capítulo 4 sobre el sistema de captura de imágenes y en el capítulo 8 sobre el sistema biométrico completo, las principales conclusiones que se desprenden son las siguientes:

- 1 El sistema de captura de imágenes obtiene imágenes de las venas de la muñeca con muy buena calidad y suficiente diferencia entre vena y carne para que sus características puedan ser extraídas (esqueleto en forma de imagen binaria y dilatada) y se produzca su reconocimiento posterior con algoritmos software.
- 2 El algoritmo de extracción de características obtiene muy buenos resultados, independientemente de las características de usuario (edad, raza y sexo) y del entorno (humedad y temperatura).
- 3 Los algoritmos de reconocimiento, si bien son bastante sencillos, obtienen unos resultados excelentes en la plataforma de pruebas con las muestras, corroborando la buena calidad del sistema de imágenes y del algoritmo de extracción de características.
- 4 El sistema completo desarrollado cumple con los objetivos propuestos al principio de esta Tesis Doctoral (obtención de un primer sistema completo biométrico vascular con una plataforma de pruebas abierta para probar cualquier algoritmo de extracción de características y reconocimiento) con unos tiempos de ejecución bajos gracias a su sencillez.

9.2 Líneas de investigación futuras

Sin embargo, el sistema tiene algunos puntos susceptibles de mejora que deben ser tratados en investigaciones futuras (algunas de las cuales ya están siendo actualmente desarrolladas en el Grupo de Investigación GUTI) y que se comentan a continuación, agrupando las conclusiones parciales que se han indicado en cada capítulo del documento.

1. En el sistema completo implementado habría que desarrollar un método de posicionamiento de la muñeca más comercial y mas cómodo para el usuario, basándose en la idea indicada en el capítulo 4, ya que un punto fundamental del sistema actual es la necesidad de limitar lo más posible los grados de libertad del usuario, para así garantizar la similitud de las muestras con los patrones en el algoritmo de reconocimiento basado en la comparación orientable completa, lo que provoca una cierta incomodidad para el usuario a la hora de la adquisición. Como objetivo final se plantea que se pudiera obtener un sistema que capture imágenes con la mano en el aire y en movimiento (*“acquisition on the move”*).
2. Si se desarrolla un sistema con más grados de libertad y que no exija un posicionamiento tan estricto de la muñeca, que sería un punto a mejorar en el futuro, las imágenes ya no van a ser tan similares y habría que adaptar todos los algoritmos desarrollados y expuestos en los capítulos 5 y 6.
3. Habría que realizar más pruebas con nuevos usuarios para validar los resultados y ajustar, si es necesario, los parámetros de extracción de características mencionados en el capítulo 5, especialmente el parámetro $C_{N\ MAX}$ para establecer el límite de las líneas erróneas y las líneas correctas, que ha sido elegido completamente de manera heurística y podría ajustarse con más detalle en cada muestra, haciendo un análisis previo más exacto de la misma.
4. Para la adaptación de los distintos algoritmos a un sistema con más grados de libertad, se propone lo siguiente:

- Habría que cambiar el preprocesamiento para obtener una ROI de manera dinámica, es decir, no utilizar una línea horizontal fija (parámetro ROW_ROI del algoritmo de esta Tesis Doctoral) para extraer una ROI cuadrada ajustada siempre a 50 píxeles del borde inferior. Por ejemplo, se podría seleccionar una ROI que obtenga la máxima zona rectangular con información de la muñeca.
 - Como las imágenes de cada usuario ya no va a ser tan similares como en el sistema propuesto en esta Tesis Doctoral, no se van a poder comparar de manera completa con los patrones guardados, debido a que las muestras y patrones para realizar el método de comparación orientable completa no tendrán porqué tener el mismo tamaño. Por ello, se propone hacer una comparación orientable parcial entre una zona reducida de las muestras y el patrón completo del reclutamiento.
 - Para elegir esta zona reducida de la muestra a comparar con el patrón completo, se propone realizar un análisis previo de dicha muestra para extraer la zona con la máxima información vascular posible, por ejemplo, un análisis de minucias (puntos de intersección o puntos finales) de la imagen vascular binaria y así elegir aquella zona con mayor cantidad de minucias, para a partir de ella comparar de manera orientable con el patrón del reclutamiento mediante el algoritmo de traslaciones y rotaciones propuesto en el punto 6.3.3.
5. Otro punto importante sería el de corroborar todos estos resultados con más usuarios. Habría que seguir investigando y tomar más muestras y patrones a más usuarios, especialmente para confirmar los resultados mostrados en el punto 8.4, tal como se comentó. Aunque el sistema con el sistema de posicionamiento final se haya probado con 100 usuarios diferentes y en diferentes condiciones de edad, sexo y raza, habría que llegar a hacer pruebas con una cifra muy superior para validarlos completamente, utilizando para ello la plataforma de pruebas explicada en el anexo, con unas simples adaptaciones fáciles de implementar.

6. En concordancia con este último punto, la plataforma de pruebas se ha desarrollado con Matlab, pero el sistema completo se podría adaptar a plataformas software con lenguajes de programación más eficaces y rápidos, que puedan funcionar más a nivel de máquina y evitar las múltiples capas de abstracción de Matlab. Una solución en este sentido podría ser la exportación de los algoritmos al lenguaje C o C# si se quiere seguir manteniendo la idea de una solución software, o incluso a lenguaje VHDL para implementar el sistema a nivel hardware.

Finalmente, reseñar que las líneas de investigación futuras propuestas en los puntos 2 y 4 tendrían la desventaja de aumentar el tiempo de ejecución al complicar claramente los algoritmos a desarrollar, pero reduciría la complejidad del sistema de fijación exacto de la muñeca propuesto en esta Tesis y aumentaría la comodidad del usuario en la captura de imágenes. Habría que llegar a un compromiso entre velocidad de cálculo y comodidad para obtener un sistema comercial.

Referencias bibliográficas

- [AIS04] Negoita, Mircea; Howlett, Robert; Jain, Lakhmi; Shimooka, Toshiyuki; Shimizu, Koichi. "Artificial Immune System for Personal Identification with Finger Vein Pattern", Knowledge-Based Intelligent Information and Engineering Systems, Lecture Notes in Computer Science 2004, Springer Berlin / Heidelberg, pp. 511-518, vol. 3214. doi: 10.1007/978-3-540-30133-2_67
- [BAH04] Tanaka, T.; Kubo, N. "Biometric authentication by hand vein patterns," SICE 2004 Annual Conference on, vol. 1, pp.249-253 vol. 1, 4-6 Aug. 2004
- [BPI99] Jain, A.; Bolle, R.; Pankanti. *Biometrics: Personal Identification In Networked Society*, Kluwer Academic Publishers, 1999. 407p. ISBN 0-7923—8345-1
- [BPI02] Mansfield, A. J.; Wayman, J. L. *Best practices in testing and reporting performance of biometric devices*. Technical report, National Physical Laboratory Report, xxiii, pp. 16,18, 35
- [B+W08] Schneider Optics
Disponible en World Wide Web: "Schneider Optics",
<http://www.schneideroptics.com/ecommerce/catalogsubcategorydisplay.aspx?cid=57>
[Consulta: 13 de octubre de 2008]
- [BVU04] Chih-Lung Lin; Kuo-Chin Fan. "Biometric verification using thermal images of palm-dorsa vein patterns", Circuits and Systems for Video Technology, IEEE Transactions on, vol.14, no.2, pp. 199-213, Feb. 2004. doi: 10.1109/TCSVT.2003.821975
- [CHW10] Suarez Pascual, J.E.; Uriarte-Antonio, J.; Sanchez-Reillo, R.; Lorenz, M.G. "Capturing Hand or Wrist Vein Images for Biometric Authentication Using Low-Cost Devices", Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing (IIH-MSP), 2010 Sixth International Conference on, vol. 1, pp.318-322, 15-17 Oct. 2010. doi: 10.1109/IIHMSP.2010.85

- [CVB98] D. G. Joshi; Y. V. Rao; S. Kar; Valli Kumar; R. Kumar. "Computer-vision-based approach to personal identification using finger crease pattern", *Pattern Recognition*, vol. 31, issue 1, January 1998, pp. 15-22. doi: 10.1016/S0031-3203(97)00034-4
- [DCM08] DCM Sistemas.
Disponible en World Wide Web: "DCM Sistemas",
<http://www.dcmsistemas.com>
[Consulta: 13 de agosto de 2009]
- [DMS99] Jain, A.K.; Duta, N. "Deformable matching of hand shapes for user verification," *Image Processing, 1999. ICIP 99. Proceedings. 1999 International Conference on*, vol.2, pp.857-861, 24-28 Oct. 1999. doi: 10.1109/ICIP.1999.823019
- [EAS09] Cortés Martínez, Francisco. *Estado del arte de sistemas biométricos de reconocimiento mediante la identificación de patrones de las venas de la mano*. Informe técnico. Leganés, 5 de agosto 2008, 32 p. Informe técnico, Universidad Carlos III de Madrid
- [EHV08] Shi Zhao; Yiding Wang; Yunhong Wang. "Extracting Hand Vein Patterns from Low-Quality Images: A New Biometric Technique Using Low-Cost Devices," *Image and Graphics, 2007. ICIG 2007. Fourth International Conference on*, vol. 1, pp. 667-671, 22-24 Aug. 2007. doi: 10.1109/ICIG.2007.97
- [EYS08] EYSEO.
Disponible en World Wide Web: "Eyseo IP / Film & Live Pictures / Service & Downloads / International - ABUS Security-Center",
<http://www.abus-sc.co.uk/International/Service-Downloads/Film-Live-Pictures/Eyseo-IP>
[Consulta: 8 de octubre de 2008]
- [FEH06] Zhong Bo Zhang; Dan Yang Wu; Si Liang Ma; Jie Ma. "Feature Extraction of Hand-Vein Patterns Based on Ridgelet Transform and Local Interconnection Structure Neural Network", *Lecture Notes in Control and Information Sciences*, 2006. *International Conference on*, vol. 345, pp. 870-875, 13-15 Oct. doi: 10.1007/978-3-540-37258-5_106
- [FLF09] Jian-Gang Wang; Wei-Yun Yau; Suwandy, A. "Feature-level fusion of palmprint and palm vein for person identification based on a "Junction Point" representation," *Image Processing, 2008. ICIP 2008. 15th IEEE International Conference on*, vol. 1, pp. 253-256, 12-15 Oct. 2008. doi: 10.1109/ICIP.2008.4711739

- [FPP09] Jian-Gang Wang; Wei-Yun Yau; Suwandy, A.; Sung, E. "Fusion of Palmprint and Palm Vein Images for Person Recognition Based on "Laplacianpalm" Feature," Computer Vision and Pattern Recognition, 2007. CVPR '07. IEEE Conference on, vol. 1, pp. 1-8, 17-22 June 2007. doi: 10.1109/CVPR.2007.383386
- [FUJI06] Fujitsu Ltd.
 Disponible en World Wide Web: "Biometrics: PalmSecure : Fujitsu Europe, Middle East and Africa",
<http://www.fujitsu.com/emea/products/biometrics/>
 [Consulta: 20 de noviembre de 2008]
- [GSS06] Lingyu Wang; Leedham, G. "Gray-Scale Skeletonization of Thermal Vein Patterns Using the Watershed Algorithm in Vein Pattern Biometrics", Computational Intelligence and Security, 2006 International Conference on , vol.2, pp.1597-1602, 3-6 Nov. 2006. doi: 10.1109/ICCIAS.2006.295332
- [HITA06] Hitachi Ltd.
 Disponible en World Wide Web: "Biometrics Reader:Hitachi Information & Control Solutions, Ltd",
<http://www.hitachi-ics.co.jp/product/english/products/bio01.htm>
 [Consulta: 13 de septiembre de 2008]
- [HIU00] H. J. Lin, H. H. Guo, F.W. Yang, C. L. Chen. "Handprint identification using fuzzy inference", In Proc. 13th IPPR Conf. Computer Vision Graphics and Image Processing (CVGIP 2000), Taipei, Taiwan, vol. 2, pp. 164-168, 20- 22 August 2000
- [HOB02] Tuchin, Valery V. *Handbook of Optical Biomedical Diagnostics*. SPIE Press Monograph, vol. PM107, 1096 p., 2002
- [HPI02] Jane You; Wenxin Li; Zhang, David. "Hierarchical palmprint identification via multiple feature extraction," Pattern Recognition, vol. 35, pp. 847–859, 2002. doi: 10.1016/S0031-3203(01)00100-5
- [IBG10] International Biometric Group, "Comparative Biometric Testing. Round 6 Public Report", September 2006.
 Disponible en World Wide Web: "http://www.nws-sa.com/biometrics/CBT6_public_report.pdf",
http://www.nws-sa.com/biometrics/CBT6_public_report.pdf
- [IMS08] The Imaging Source GmbH.
 Disponible en World Wide Web: "The Imaging Source - Industrial Cameras, Frame Grabbers, Video Converters & Software",
<http://www.theimagingsource.com>
 [Consulta: 7 de noviembre de 2008]

- [IVP00] Sang-Kyun Im; Hyung-Man Park; Soo-Won Kim; Chang-Kyung Chung; Hwan-Soo Choi. "Improved vein pattern extracting algorithm and its implementation", Consumer Electronics, 2000. ICCE. 2000 Digest of Technical Papers. International Conference on, vol. 1, pp.2-3, 2000. doi: 10.1109/ICCE.2000.854470
- [IVT05] Toh, Kar-Ann; Eng, How-Lung; Choo, Yuen-Siong; Cha, Yoon-Leon; Yau, Wei-Yun; Low, Kay-Soon. "Identity verification through palm vein pattern and crease texture", Advances in Biometrics, chapter 73, pp. 546-553, vol. 3832, 2005. doi: 10.1007/11608288_73
- [LPR04] Jin Ok Kim; Woongjae Lee; Jun Hwang; Kyong Seok Baik; Chin Gint Gnter. "Lip print recognition for security systems by multi-resolution architecture", Journal Future Generation Computer Systems, vol. 20, issue 2, pp. 295-301, Feb. 2004. doi: 10.1016/S0167-739X(03)00145-6
- [LFE04] David D. Zhan. *Palmprint authentication*, International series on biometrycs, Kluwer, vol. 3, 2004, 252 p., chapter 8, pp.99-102. ISBN: 1-4020-8096-4, E-book: 1-4020-8097-2
- [MFE06a] Zhongbo Zhang; Siliang Ma; Xiao Han. "Multiscale Feature Extraction of Finger-Vein Patterns Based on Curvelets and Local Interconnection Structure Neural Network", Pattern Recognition, 2006. ICPR 2006. 18th International Conference on, vol. 4, pp.145-148, doi: 10.1109/ICPR.2006.848
- [MFE06b] Zhong Bo Zhang; Dan Yang Wu; Si Liang Ma; Jie Ma. "Multiscale Feature Extraction of Finger-Vein Patterns Based on Wavelet and Local Interconnection Structure Neural Network", Neural Networks and Brain, 2005. ICNN&B '05. International Conference on, vol. 2, pp.1081-1084, 13-15 Oct. 2005. doi: 10.1109/ICNNB.2005.1614805
- [NAB09] Chiang, J.Y. "A new approach for binary line image vectorization," Systems, Man and Cybernetics, 1995 Intelligent Systems for the 21st Century, IEEE International Conference on, vol. 2, pp.1489-1494 vol.2, 22-25 Oct. 1995. doi: 10.1109/ICSMC.1995.537983
- [NFI06] Lingyu Wang; Leedham, G. "Near- and Far- Infrared Imaging for Vein Pattern Biometrics", Video and Signal Based Surveillance, 2006. AVSS '06. IEEE International Conference on, vol. 1, pp.52, Nov. 2006. doi: 10.1109/AVSS.2006.80
- [NFV09] Xiang Yu; Wenming Yang; Qingmin Liao; Fei Zhou. "A Novel Finger Vein Pattern Extraction Approach for Near-Infrared Image," Image and Signal Processing, 2009. CISP '09. 2nd International Congress, vol. 1, pp. 1-5, 17-19 Oct. 2009. doi: 10.1109/CISP.2009.5304440

- [NMS06] Milner, David and Raz, Shmuel and Hel-Or, Hagit and Keren, Daniel and Nevo, Eviatar. "A new measure of symmetry and its application to classification of bifurcating structures", *Pattern Recognition*, vol. 40, issue 8, August 2007, issn 0031-3203, pp. 2237--2250. doi: 10.1016/j.patcog.2006.12.008
- [OSR08a] OSRAM Opto Semiconductors GmbH
 Disponible en World Wide Web: "OSRAM Opto Semiconductors|index",
<http://www.osram-os.com>
 [Consulta: 2 de septiembre de 2008]
- [OSR08b] Datasheet SFH 4450 IR LED
 Disponible en World Wide Web: "OSRAM OSRAM Opto Semiconductors - Product Catalog",
<http://catalog.osram-os.com/catalogue/catalogue.do?favOid=000000200000190001c0023&act=showBookmark>
 [Consulta: 5 de octubre de 2008]
- [PAU03] Chin-chuan Han; Hsu-liang Cheng; Chih-lung Lin. "Personal authentication using palmprint features", *Pattern Recognition*, vol. 36, no. 2, pp.371–381, 2003. doi: 10.1016/S0031-3203(02)00037-7
- [PAU09] Kumar, A.; Prathyusha, K.V.; "Personal Authentication Using Hand Vein Triangulation and Knuckle Shape," *Image Processing, IEEE Transactions on*, vol. 18, no. 9, pp. 2127-2136, Sept. 2009. doi: 10.1109/TIP.2009.2023153
- [PIU00] C. C. Han, P. C. Chang, C. C. Hsu. "Personal identification using hand geometry and palm-print", In *Proc. 4th Asian Conf. Computer Vision (ACCV 2000)*, Taipei, Taiwan, vol. 1, pp. 747–752, 2000
- [REI00] Sanchez-Reillo, R.; Sanchez-Avila, C.; Gonzalez-Marcos, A. "Biometric identification through hand geometry measurements," *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, vol. 22, no. 10, pp. 1168-1171, Oct 2000. doi: 10.1109/34.879796
- [REI06a] Sánchez-Reillo, Raúl. *Tema 5: Identificación Biométrica*. [Material gráfico proyectable]. Leganés 2006. 26 dispositivas. Master de Sistemas Electrónicos Avanzados, Universidad Carlos III de Madrid.
- [REI06b] Sánchez-Reillo, Raúl. *Tema 5c: Técnicas biométricas*. [Material gráfico proyectable]. Leganés 2006. 52 dispositivas. Master de Sistemas Electrónicos Avanzados, Universidad Carlos III de Madrid

- [SUS97] Smith, S.M.; Brady, J.M. "SUSAN - a new approach to low level image processing", International Journal of Computer Vision, vol. 23(1), pp.45--78, 1997
- [TEC07] TechSphere Co. Ltd.
Disponible en World Wide Web: "TechSphere Co. Ltd.",
http://tech-sphere.com/en/tech/?p_url=tech_c
[Consulta: 16 de mayo de 2008]
- [THV05] Lingyu Wang; Leedham, Graham. "A thermal hand vein pattern verification system ", ICAPR (2), Lecture Notes in Computer Science 2005, Springer Berlin / Heidelberg, pp. 58-65, vol. 3687. doi: 10.1007/11552499_7
- [TIS95] Cross, J.M.; Smith, C.L. "Thermographic imaging of the subcutaneous vascular network of the back of the hand for biometric identification", Security Technology, 1995. Proceedings. Institute of Electrical and Electronics Engineers 29th Annual 1995 International Carnahan Conference on, vol. 1, pp.20-35, 18-20 Oct 1995. doi: 10.1109/CCST.1995.524729
- [TNC99] Dapeng Zhang; Wei Shu. "Two novel characteristics in palmprint verification: Datum point invariance and line feature matching", Pattern Recognition, vol. 32, issue 4, April 1999, pp. 691-702. doi: 10.1016/S0031-3203(98)00117-4.
- [UTI04] Kuo-Chin Fan; Chih-Lung Lin. "The use of thermal images of palm-dorsa vein-patterns for biometric verification", Pattern Recognition, 2004. ICPR 2004. Proceedings of the 17th International Conference on, vol. 4, pp. 450- 453 Vol.4, 23-26 Aug. 2004. doi: 10.1109/ICPR.2004.1333799
- [VBS07] Sanchez-Reillo, R.; Fernandez-Saavedra, B.; Liu-Jimenez, J.; Sanchez-Avila, C. "Vascular Biometric Systems And Their Security Evaluation," Security Technology, 2007 41st Annual IEEE International Carnahan Conference on, vol. 1, pp. 44-51, 8-11 Oct. 2007. doi: 10.1109/CCST.2007.4373466
- [VSI94] Miller, B. "Vital sign of identify", IEEE Spectrum, vol 31, pp. 22–30, Feb 1994

Plataforma de pruebas

A.1 Introducción

Esta Tesis Doctoral tiene dos grandes bloques de investigación, el sistema de captura de imágenes y los algoritmos de preprocesado, extracción de características y comparación. Sin embargo, para poder validar dicha investigación ha sido necesario diseñar y desarrollar una plataforma de pruebas. Al no haber encontrado ninguna parecida en las referencias bibliográficas consultadas, la plataforma de pruebas se ha diseñado desde cero, por lo que se ofrece como otra novedad adicional de este trabajo para su utilización por otros investigadores.

Esta plataforma ha tenido muchas versiones en su desarrollo y se ha ido adaptando según iban surgiendo las necesidades de investigación. Inicialmente se diseñó para tener un interfaz de control gráfico, pero finalmente se descartó esta idea, porque no aportaba información adicional, y sí que proporcionaba posibles fuentes de error y retrasos en la ejecución.

Desde el principio se ha diseñado de forma parametrizable y reutilizable para otros investigadores, lo cual puede conseguirse con unas sencillas adaptaciones que se explicarán convenientemente en este capítulo. Se puede utilizar para probar cualquier sistema biométrico que tenga distintas partes del cuerpo para un mismo individuo, por ejemplo parte “izquierda” y “derecha” como ocurre con el iris, la biometría vascular o la geometría de la mano. Además proporciona todas las imágenes necesarias para la evaluación de resultados, mensajes de consola, así como archivos de texto y hojas de cálculo (en formato Excel) con los parámetros, resultados y curvas indicadas en el punto 2.4.

La plataforma de pruebas se ha desarrollado en Matlab R2007b, por su versatilidad y potencia matemática, ya que permite trabajar con fuentes abiertas.

Además los bloques de programación de la plataforma de pruebas disponen de ayuda sobre su código con comentarios en inglés, que posibilitan una comprensión clara de los mismos y su posterior adaptación a las futuras necesidades de cada investigador.

El sistema es totalmente portable a otros PCs de desarrollo gracias a sus parámetros de configuración. Este capítulo está destinado a describir esta plataforma en detalle.

A.2 Estructura y convenciones a adoptar

La estructura de la plataforma de pruebas es muy sencilla, creándose un sistema de carpetas para cada uno de los bloques indicados en la figura 1 y así poder archivar la documentación de resultados necesaria de manera ordenada, y una lógica de programación con bloques generales para cualquier algoritmo y bloques específicos de cada investigador.

A.2.1 Sistema de carpetas

Las carpetas que hay que mantener para cualquier sistema biométrico a desarrollar con la plataforma de pruebas son las siguientes:

- **work** -> Carpeta raíz donde se guardan el resto de carpetas del sistema y los bloques de programación desarrollados.
- **1_original_images** -> Carpeta donde hay que guardar las imágenes de las muestras y patrones obtenidos por la cámara (tanto las imágenes para el reclutamiento, como las imágenes para el reconocimiento). También se almacenará aquí la base de datos de usuarios necesaria, con todos ellos registrados (archivo llamado "Users_List.TXT").
- **2_step_roi_selection** -> Carpeta donde hay que guardar las imágenes obtenidas tras el preprocesado de las muestras del reclutamiento (ROI).

En la plataforma desarrollada también se guarda una copia de su muestra original para la comprobación del resultado, pero es ajustable.

- **3_step_recruitment** -> Carpeta donde hay que guardar las imágenes obtenidas tras la extracción de características de una imagen para reclutamiento, a partir de su ROI. En la plataforma desarrollada se guarda el patrón binario, el patrón dilatado, una copia de su ROI, la superposición del patrón binario y la ROI, y las imágenes parciales obtenidas en 45º, 90º y 135º para la comprobación de resultados, pero es ajustable.
- **4a_step_authentication** -> Carpeta donde hay que guardar las imágenes obtenidas tras la extracción de características de una imagen utilizada para el reconocimiento y el resultado de hacer una autenticación con ella. En la plataforma desarrollada también se guarda el patrón binario del usuario, el patrón dilatado, una copia de la imagen original de la muestra, una copia de su ROI, la superposición de la imagen binaria de la muestra y el patrón, así como las imágenes parciales obtenidas de la muestra en 45º, 90º y 135º para la comprobación de resultados, pero es ajustable.
- **4b_step_identification** -> Carpeta donde hay que guardar las imágenes superpuestas obtenidas tras la identificación de una imagen de la muestra con el resto de imágenes de los patrones de todos los usuarios registrados en la base de datos de usuarios. En la plataforma desarrollada también se guarda una copia de la imagen original de la muestra, pero es ajustable.
- **5_results_TXT_XLS** -> Carpeta donde hay que guardar todos los archivos TXT y XLS con los resultados de todos los pasos ejecutados (extracción de la ROI, autenticación e identificación).

Aparte de estas carpetas generales, el sistema de esta Tesis Doctoral tiene algunas carpetas específicas para realizar pruebas con los algoritmos desarrollados, que no serían necesarias para otros sistemas, todas ellas directamente guardadas en la carpeta "work". Se podrían añadir más carpetas.

A.2.2 Convenios generales a adoptar con la plataforma de pruebas

Hay una serie de convenios generales que debe cumplir cualquier investigador que quiera utilizar la plataforma de pruebas desarrollada.

Base de datos de usuarios:

Cada usuario debe estar registrado en la base de datos de usuarios (archivo "Users_Lists.txt" en la carpeta "1_original_images") manteniendo la convención siguiente:

User_N_W

N -> Número de usuario en 5 dígitos

W -> Muñeca: **L** (izquierda) o **R** (derecha)

Cada usuario debe estar registrado con ambas muñecas/manos (aunque sólo se hagan pruebas con una de ellas) y debe tener su nombre real o pseudónimo en la segunda línea con una flecha y un espacio en blanco delante. A continuación se muestra un ejemplo para un usuario:

User_00001_L

User_00001_R -> Jose Enrique Suarez Pascual

El número máximo de usuarios para el que está preparada la plataforma de pruebas es de 99.999.

Imágenes originales:

Cada usuario puede disponer de 1.000 imágenes originales en la carpeta "1_original_images", 1 imagen como patrón y 999 como muestras.

Nombres para los archivos:

Los nombres de los archivos de cada carpeta deben ser los siguientes para garantizar el funcionamiento de la plataforma y la salida de resultados en la carpeta "5_results_TXT_XLS":

■ **“1_original_images” -> User_N_W_ZZZ**

N -> Número de usuario: **00001 – 99999**

W -> Muñeca: **L / R**

ZZZ -> Tipo de imagen: **00M** -> para patrones (imagen para reclutamiento)
001-999 -> para muestras (imágenes para reconocimiento)

■ **“2_step_ROI_selection” -> User_N_W_ZZZ_ROI**

N -> Número de usuario: **00001 – 99999**

W -> Muñeca: **L / R**

ZZZ -> Patrón: **00M**

■ **“3_step_recruitment” -> User_N_W_ZZM_RECRUITMENT_(T)**

N -> Número de usuario: **00001 – 99999**

W -> Muñeca: **L / R**

ZZZ -> Patrón: **00M**

T -> Imagen adicional: **BIN_45º** -> para las imágenes binarias en 45º
BIN_90º -> para las imágenes binarias en 90º
BIN_135º -> para las imágenes binarias en 135º
BIN_TOTAL -> para la imagen binaria total
TOGETHER -> para las superposición de la imagen binaria total de un patrón y su ROI

■ **“4a_step_authentication” -> User_N_W_AUTHENTICATION_(T)**

N -> Número de usuario: **00001 – 99999**

W -> Muñeca: **L / R**

T -> Imagen adicional: **BIN_45º** -> para las imágenes binarias en 45º
BIN_90º -> para las imágenes binarias en 90º
BIN_135º -> para las imágenes binarias en 135º
BIN_TOTAL -> para la imagen binaria total
TOGETHER -> para las superposición de la imagen binaria total de la muestra y su ROI

■ **“4b_step_identification” -> User_N_W_ZZZ_IDENTIFICATION_**
AGAINST_USER_T

N -> Número de usuario: **00001 – 99999**

W -> Muñeca: **L / R**

ZZZ -> Número de muestra: **000-999**

T -> Número de usuario con el que se compara la muestra: **1 – 9.999**

Archivos de resultados en Excel:

Los archivos de resultados en Excel de la carpeta “5_results_TXT_XLS” se pueden adaptar internamente por el investigador, pero hay que mantener la convención de nombres para los archivos y las hojas utilizadas en la plataforma de pruebas de esta Tesis Doctoral:

■ **Results_ROI.xls** -> Archivo para guardar los resultados de la extracción de la ROI en cada fase

Hoja **ROI_Data_Recruitment** -> Para guardar los datos de la extracción de la ROI de los patrones para el reclutamiento

Hoja **ROI_Data_Authentication** -> Para guardar los datos de la extracción de la ROI de las muestras para la autenticación

Hoja **ROI_Data_Identification** -> Para guardar los datos de la extracción de la ROI de las muestras para la identificación

■ **Results_Authentication** -> Archivo para guardar los resultados del reconocimiento de autenticación

Hojas **User_X_Left** -> Para guardar los resultados de autenticación con cada una de las muestras del usuario X, muñeca izquierda

Hojas **User_X_Right** -> Para guardar los resultados de autenticación con cada una de las muestras del usuario X, muñeca derecha

■ **Results_Identification** -> Archivo para guardar los resultados del reconocimiento de identificación

Hoja **Results_Identification** -> Para guardar los resultados de identificación de cada una de las muestras de todos los usuarios con el resto de usuario en la base de datos de usuarios

Hoja **Results_Overview** -> Para guardar los parámetros biométricos calculados por la plataforma de pruebas y sus curvas

Interacción con el usuario:

La plataforma de pruebas presenta 3 bloques diferentes de interacción con el usuario, tal como se observa en la figura 102:

- La carpeta “1_original_images” donde el investigador debe guardar las imágenes originales (patrones y muestras) y registrar a los usuarios como se ha descrito en la base de datos de usuarios.
- La carpeta “work” con los bloques de Matlab desarrollados, con 2 partes diferenciadas: Los bloques generales reutilizables y los bloques

específicos de cada algoritmo a comprobar. El usuario tiene que realizar en dichos bloques las adaptaciones necesarias para sus algoritmos.

- La carpeta “5_results_TXT_XLS” donde el investigador debe adaptar los archivos de resultados en Excel a sus necesidades.

Modo de trabajo con la plataforma de pruebas:

- Lo primero es tomar las imágenes necesarias con el sistema de captura, con un máximo de 1000 (en las pruebas de esta Tesis Doctoral se han tomado 4 ó 5 imágenes para cada usuario, 1 patrón y 3 ó 4 muestras). Es importante resaltar que para que el sistema funcione correctamente, todos los usuarios deben tener el mismo número de imágenes en la carpeta “1_original_images”.
- A continuación se debe realizar el reclutamiento de dichas imágenes. Se puede realizar individualmente o en grupo, para finalmente crear las imágenes ROI en la carpeta “2_step_ROI_selection” y las imágenes del patrón dilatado en la carpeta “3_step_recruitment”.
- Ahora hay que ajustar los parámetros del archivo “configuration_variables.m” de la plataforma de pruebas, algunos de ellos indicados en el capítulo 7, para adaptarlos al sistema biométrico a comprobar (rutas de archivo, parámetros para los resultados, etc.).
- Finalmente, cuando se tengan las imágenes de los patrones y las imágenes de las muestras, se puede realizar el reconocimiento de las mismas. Hay 2 posibilidades: Realizar la autenticación de un usuario frente a su patrón (reconocimiento 1:1) o la realizar identificación de un usuario frente a todos los demás patrones de cada usuario (reconocimiento 1:N).

A.2.3 Diagrama de bloques

El diagrama de bloques completo de la plataforma de pruebas es el mostrado en la figura 102.

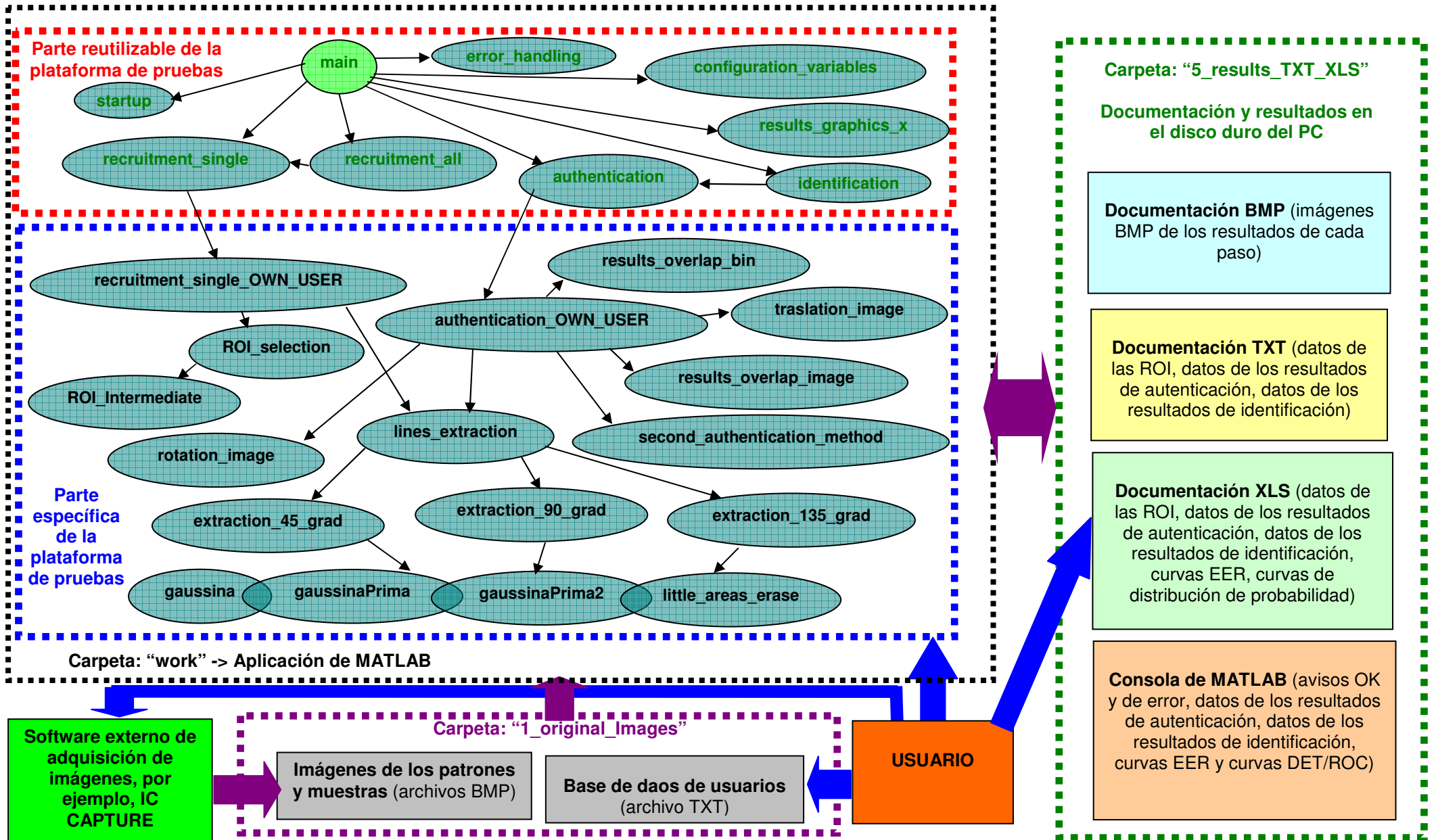


Figura 102: Diagrama de bloques de la plataforma de pruebas

A.3 Parte general reutilizable de la aplicación Matlab

Los bloques generales y reutilizables de la aplicación son los mostrados en el cuadro rojo de la figura 102. Todos ellos disponen de una descripción de ayuda que se puede activar mediante el comando “help” de Matlab (por ejemplo, help main).

A.3.1 Descripción de los bloques generales

- **“startup.m”** -> Archivo ejecutado por Matlab al arrancar la aplicación.
- **“main.m”** -> Archivo principal de la aplicación.
- **“configuration_variables.m”** -> Archivo donde se ajustan todas las variables de configuración válidas para el sistema.
- **“recruitment_single.m”** -> Archivo que realiza la parte general del reclutamiento de un patrón”.
- **“recruitment_all.m”** -> Archivo que realiza el reclutamiento de todos los patrones de todos los usuarios utilizando la función “recruitment single”.
- **“authentication.m”** -> Archivo que ejecuta la parte general de la autenticación de una muestra.
- **“identification.m”** -> Archivo que ejecuta la identificación de una muestra utilizando la función “authentication”.
- **“results_graphics_(all, left, right).m”** -> Archivos que realizan la evaluación de resultados generando los parámetros y curvas biométricas a evaluar para todas las muestras, sólo las muestras derechas o sólo las muestras izquierdas.
- **“error_handling.m”** -> Archivo que maneja los errores aparecidos en la aplicación para la consola de Matlab.

A.3.2 Ajustes a realizar en la parte general por el investigador

Hay que cumplir con la siguiente secuencia de ajustes para utilizar la plataforma de pruebas con los algoritmos de otros investigadores.

- Archivos “**main**”, “**recruitment_single.m**”, “**recruitment_all.m**”, “**authentication.m**”, “**identification.m**”, “**error_handling.m**” -> No hace falta modificar nada, pero se puede ampliar con más funcionalidades de las ya contenidas.
- Archivo “**configuration_variables.m**” -> El investigador debe adaptar las variables generales que utiliza la plataforma de pruebas, así como definir y asignar valores iniciales a las variables globales necesarias para sus algoritmos. Los ajustes óptimos para los parámetros generales utilizados en esta Tesis Doctoral están indicados en el capítulo 7.
- Archivo “**results_graphics.m**” -> El investigador debe eliminar las partes específicas de cálculo de los algoritmos de esta Tesis Doctoral y añadir los suyos propios.

A.3.3 Acciones a realizar en la parte general por el investigador

Para utilizar la plataforma de pruebas, simplemente hay que llamar al archivo “main.m” en la consola de Matlab con las opciones que se indican a continuación. Si se indica algún valor no permitido en sus parámetros de entrada, la plataforma de pruebas muestra el error en la consola de MATLAB e interrumpe la ejecución de la acción. La función **main** es la función raíz de todo el sistema y donde el usuario debe indicar la acción a realizar

* Llamada de la función: **main(ACTION, USER, WRIST, SAMPLE)**

* Valor de los parámetros de entrada: Todos los parámetros de entrada se deben indicar en forma de caracteres.

ACTION -> Acción deseada para realizar con la plataforma de pruebas

- 'recruitment single'** -> Para obtener los patrones de reclutamiento del usuario especificado
- 'recruitment all'** -> Para obtener los patrones de reclutamiento de todos los usuarios de la base de datos de usuarios
- 'authentication'** -> Para autenticar una muestra de un usuario con su patrón de reclutamiento guardado
- 'authentication user'**->Para autenticar todas las muestras de un usuario con su patrón de reclutamiento guardado (todas, derechas o izquierdas)
- 'authentication all'** -> Para autenticar todas muestras de todos los usuarios con sus patrones de reclutamiento respectivos guardados. No hace falta ningún parámetro de entrada adicional
- 'authentication all left'** -> Como “authentication all”, pero sólo para las muestras izquierdas
- 'authentication all right'** -> Como “authentication all”, pero sólo para las muestras derechas
- 'identification'** -> Para identificar una muestra de un usuario con los patrones de reclutamiento guardados de todos los usuarios
- 'identification all'** -> Para identificar todas las muestras de todos los usuarios con los patrones de reclutamiento guardados de todos los usuarios y generar los resultados completos en el archivo de Excel “Results_Identification”. No hace falta ningún parámetro de entrada adicional

'identification all left' -> Como "identification all", pero sólo para las muestras izquierdas

'identification all right' -> Como "identification all", pero sólo para las muestras derechas

USER -> -> Número de usuario a analizar

'A' -> Sólo con "recruitment all", para obtener las imágenes de reclutamiento de todos los patrones, derechos e izquierdos

'L' -> Sólo con "recruitment all", para obtener las imágenes de reclutamiento de todos los patrones izquierdos

'R' -> Sólo con "recruitment all", para obtener las imágenes de reclutamiento de todos los patrones derechos

'00001-99999'-> Con "recruitment single", "authentication", "authentication user" e "identification", para indicar el usuario a analizar

WRIST -> -> Tipo de muñeca a analizar

'A' -> Sólo con "recruitment all", para obtener las imágenes de reclutamiento de todos los patrones, derechos e izquierdos

'L' -> Con "recruitment single", "recruitment all", "authentication", "authentication user" e "identification" para seleccionar sólo la muñeca izquierda

'R' -> Con "recruitment single", "recruitment all", "authentication", "authentication user" e "identification" para seleccionar sólo la muñeca derecha

SAMPLE -> -> Número de muestra a analizar

'M' -> Con "recruitment single" y "recruitment all", para obtener los patrones de reclutamiento de las imágenes seleccionadas

'1-999'-> Con "authentication" e "identification", para indicar la muestra a analizar

* Ejemplos de acciones típicas con la plataforma de pruebas: Todos los parámetros de entrada se deben indicar en forma de caracteres.

- Reclutamiento del patrón derecho para el usuario 3:

main('recruitment single', '00003', 'R', 'M')

- Reclutamiento de todos los patrones de todos los usuarios:

main('recruitment all', 'A', 'A', 'M')

- Reclutamiento de todos los patrones izquierdos de todos los usuarios:

main('recruitment all', 'A', 'L', 'M')

- Autenticación de la muestra 2 izquierda del usuario 3:

main('authentication', '00003', 'L', '2')

- Autenticación de todas las muestras izquierdas del usuario 3:

main('authentication user', '00003', 'L')

- Autenticación de todas las muestras de todos los usuarios:

main('authentication all ')

- Autenticación de todas las muestras derechas de todos los usuarios:

main('authentication all right')

- Identificación de la muestra 3 derecha del usuario 4:

main('identification', '00004', 'R', '3')

- Identificación de todas las muestras de todos los usuarios:

main('identification all ')

- Autenticación de todas las muestras izquierdas de todos los usuarios:

main('identification all right')

A.4 Parte específica de cada investigador de la aplicación Matlab

Los bloques específicos de la aplicación de esta Tesis Doctoral son los mostrados en el cuadro azul de la figura 102. Todos ellos disponen de una descripción de ayuda que se puede activar mediante el comando help de Matlab (por ejemplo, help rotation_image). Sin embargo, los bloques específicos deben ser desarrollados por cada investigador, teniendo en cuenta los parámetros de entrada de la función MAIN. Se comentan brevemente los utilizados para los algoritmos de esta Tesis Doctoral.

- **“recruitment_single_OWN_USER.m”** -> Archivo que realiza el reclutamiento específico de un patrón con los algoritmos de esta Tesis”.
- **“ROI_selection.m”** -> Archivo que obtiene la ROI de cada imagen
- **“ROI_intermediate.m”** -> Archivo que realiza la eliminación de los puntos interiores al borde de la muñeca necesaria para la selección de las ROI de cada imagen.
- **“authentication_OWN_USER.m”** -> Archivo que realiza la autenticación específica de una muestra con los algoritmos de esta Tesis.
- **“lines_extraction.m”** -> Archivo que realiza la extracción de líneas de una muestra o un patrón.
- **“extraction_45_grad.m”** -> Archivo que realiza la extracción parcial de líneas de una muestra o un patrón en la dirección de 45°.
- **“extraction_90_grad.m”** -> Archivo que realiza la extracción parcial de líneas de una muestra o un patrón en la dirección de 90°.
- **“extraction_135_grad.m”** -> Archivo que realiza la extracción parcial de líneas de una muestra o un patrón en la dirección de 135°.
- **“gaussiana.m”** -> Archivo que implementa la función Gaussiana 1-D.
- **“gaussianaPrima.m”** -> Archivo que implementa la primera derivada de función gaussiana 1-D.

- **“gaussianaPrima2.m”** -> Archivo que implementa la segunda derivada de función gaussiana 1-D.
- **“little_areas_erase.m”** -> Archivo que realiza la eliminación de líneas o puntos considerados erróneas.
- **“second_authentication_method.m”** -> Archivo que implementa el método de reconocimiento basado en la comparación orientable completa de imágenes.
- **“rotation_image.m”** -> Archivo que implementa la rotación de las imágenes.
- **“traslation_image.m”** -> Archivo que implementa la traslación de las imágenes.
- **“results_overlap_image.m”** -> Archivo que realiza la superposición de un patrón con las líneas extraídas de una muestra para comprobar la autenticación o identificación.
- **“results_overlap_bin.m”** -> Archivo que realiza la superposición de una ROI con las líneas extraídas de una muestra o un patrón para comprobar la autenticación o el reclutamiento.

Estos archivos se pueden aprovechar en su totalidad por otros investigadores o seleccionar algunas de sus funciones en el código, por ejemplo:

- Lectura y escritura de archivos BMP
- Lectura y escritura de archivos TXT
- Lectura y escritura de archivos XLS
- Solapamiento de imágenes de muestra
- Cálculo de valores FNMR y FMR
- Creación de gráfica EER y DET en Matlab

A.5 Bloque de resultados generados por la plataforma de pruebas

Los resultados generados por la plataforma de pruebas son los mostrados en el cuadro verde de la figura 102. Cada investigador debe decidir qué documentación genera y adaptar en consecuencia los parámetros previstos para la documentación en Excel en el archivo “configuration_variables.m”, los archivos Excel de resultados y el archivo “results_graphics.m”

A.5.1 Documentación generada por la plataforma de pruebas

A modo de ejemplo se indica a continuación la documentación completa generada para cada una de las acciones del sistema de pruebas indicadas en el punto A.3.3, pero se puede añadir o eliminar información.

Para el reclutamiento:

- **1 archivo de imagen BMP de la ROI** del patrón, guardado en la carpeta “2_step_roi_selection”.
- **1 archivo de texto TXT** con los datos principales de la ROI del patrón, guardado en la carpeta “5_results_TXT_XLS”.
- Inclusión de los mismos datos que en el archivo TXT en la **hoja “ROI_Data_Recruitment”** del **archivo de Excel “Results_ROI.xls”**, guardado en la carpeta “5_results_TXT_XLS”.
- **4 archivos de imagen BMP con las imágenes dilatadas** del patrón (total, 45º, 90º y 135º), guardados en la carpeta “3_step_recruitment”.
- **1 archivo de imagen BMP del solapamiento** de la ROI del patrón con la imagen binaria obtenida de la misma, guardado en la carpeta “3_step_recruitment”.
- **Señalización en la consola de MATLAB** del desarrollo del proceso completo.

Para la autenticación:

- **1 archivo de imagen BMP de la ROI** de la muestra, guardada en la carpeta “4a_step_authentication”.
- Inclusión de los datos principales de la ROI de la muestra en la **hoja “ROI_Data_Authentication”** del **archivo de Excel “Results_ROI.xls”**, guardado en la carpeta “5_results_TXT_XLS”.
- **1 archivo de texto TXT** con los datos obtenidos en la autenticación, guardado en la carpeta “5_results_TXT_XLS”.
- Inclusión de los mismos datos que en el archivo TXT en la **hoja “User_X_Left”** o **“User_X_Left”** del **archivo de Excel “Results_Authentication.xls”**, guardado en la carpeta “5_results_TXT_XLS”.
- **4 archivos de imagen BMP con las imágenes dilatadas** de la muestra (total, 45°, 90° y 135°), guardados en la carpeta “4a_step_authentication”.
- **1 archivo de imagen BMP del solapamiento** de la ROI de la muestra con la imagen binaria obtenida de la misma, guardado en la carpeta “4a_step_authentication”.
- **1 archivo de imagen BMP del solapamiento** de la ROI del patrón con la imagen binaria obtenida de la muestra, guardado en la carpeta “4a_step_authentication”.
- **Señalización en la consola de MATLAB** del desarrollo del proceso completo.

Para la identificación:

- Inclusión de los datos principales de la ROI de la muestra en la **hoja “ROI_Data_Identification”** del **archivo de Excel “Results_ROI.xls”**, guardado en la carpeta “5_results_TXT_XLS”.
- **N archivos de texto TXT** con los datos obtenidos en la identificación con los N usuarios, guardados en la carpeta “5_results_TXT_XLS”.
- Inclusión de los datos de resultados del método de reconocimiento basado en el ancho de la muñeca y del método de reconocimiento basado en la comparación orientable completa de muestras en la **hoja “Results_Identification del archivo de Excel “Results_Identificationn.xls”**, guardado en la carpeta “5_results_TXT_XLS”.
- **N archivos de imagen BMP del solapamiento** de la ROI del patrón con la imagen binaria obtenida de la muestra, guardados en la carpeta “4b_step_identification”.
- **Señalización en la consola de MATLAB** del desarrollo del proceso completo.

Toda esta documentación se puede mostrar u ocultar en función de unos parámetros ajustables en el archivo de configuración “configuration_variables.m”. Se puede evitar parte de la documentación ajustando el valor 0 en alguno de estos parámetros.

A.5.2 Ejemplos de la documentación generada por la plataforma de pruebas

Por último, se muestran diferentes ejemplos de los resultados indicados en el punto A.5.1.

1. Documentación BMP

-> Carpeta “2 step ROI selection”:

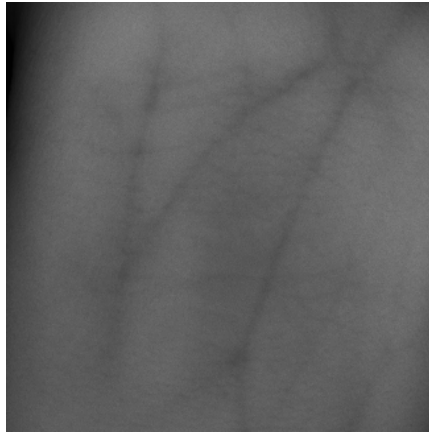


Figura 103: Ejemplo de documentación BMP - Archivo
"User_00013_R_00M_ROI.bmp"

-> Carpeta "3 step recruitment":



Figura 104: Ejemplo de documentación BMP - Archivo
"User_00013_R_00M_RECRUITMENT.bmp"



Figura 105: Ejemplo de documentación BMP - Archivo
"User_00013_R_00M_RECRUITMENT_BIN_45.bmp"

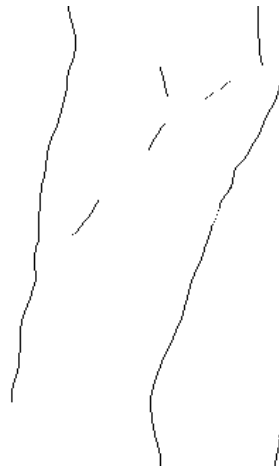


Figura 106: Ejemplo de documentación BMP - Archivo
"User_00013_R_00M_RECRUITMENT_BIN_90.bmp"



Figura 107: Ejemplo de documentación BMP - Archivo
"User_00013_R_00M_RECRUITMENT_BIN_135.bmp"



Figura 108: Ejemplo de documentación BMP - Archivo
"User_00013_R_00M_RECRUITMENT_BIN_TOTAL.bmp"



Figura 109: Ejemplo de documentación BMP - Archivo
"User_00013_R_00M_RECRUITMENT_TOGETHER.bmp"

-> Carpeta "4a step authentication":

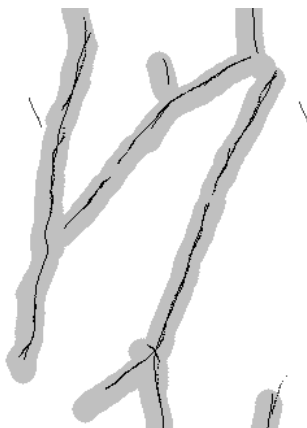


Figura 110: Ejemplo de documentación BMP - Archivo
"User_00013_R_004_AUTHENTICATION.bmp"



Figura 111: Ejemplo de documentación BMP - Archivo
"User_00013_R_004_AUTHENTICATION_BIN_45.bmp"



Figura 112: Ejemplo de documentación BMP - Archivo
"User_00013_R_004_AUTHENTICATION_BIN_90.bmp"



Figura 113: Ejemplo de documentación BMP - Archivo
"User_00013_R_004_AUTHENTICATION_BIN_135.bmp"



Figura 114: Ejemplo de documentación BMP - Archivo
"User_00013_R_004_AUTHENTICATION_TOTAL.bmp"

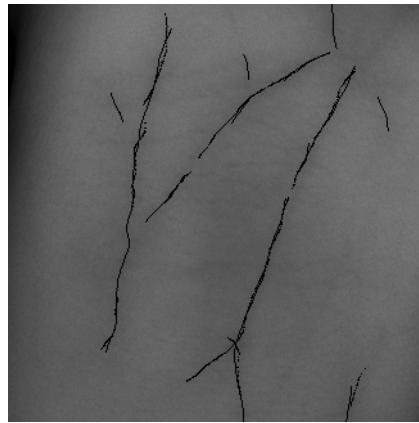


Figura 115: Ejemplo de documentación BMP - Archivo
"User_00013_R_004_AUTHENTICATION_TOGETHER.bmp"

-> Carpeta "4b step identification":

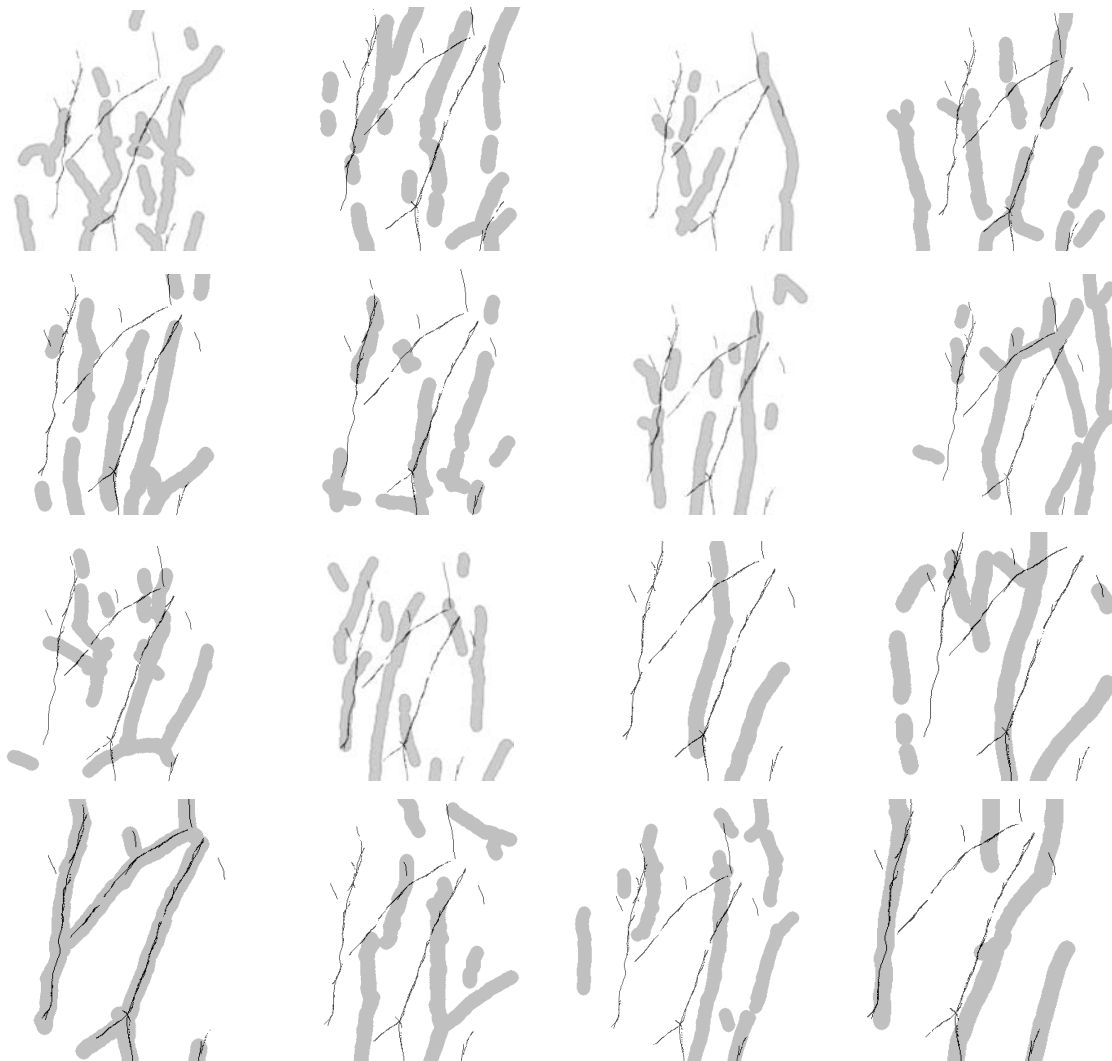


Figura 116: Ejemplo de documentación BMP - Archivos
"User_00013_R_004_IDENTIFICATION_AGAINST_USER_X.bmp"

2. Documentación TXT

-> Carpeta "5 results TXTstep authentication":

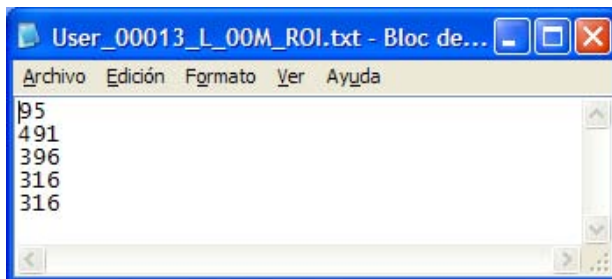


Figura 117: Ejemplo de documentación TXT - Archivo "User_00013_L_00M_ROI.txt"

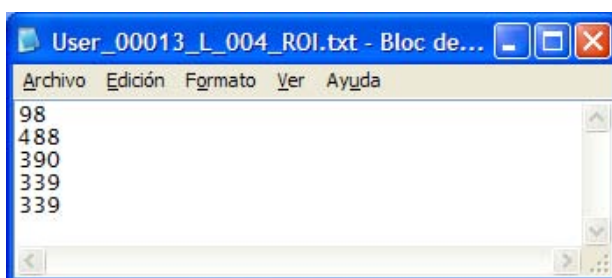


Figura 118: Ejemplo de documentación TXT - Archivo "User_00013_L_004_ROI.txt"

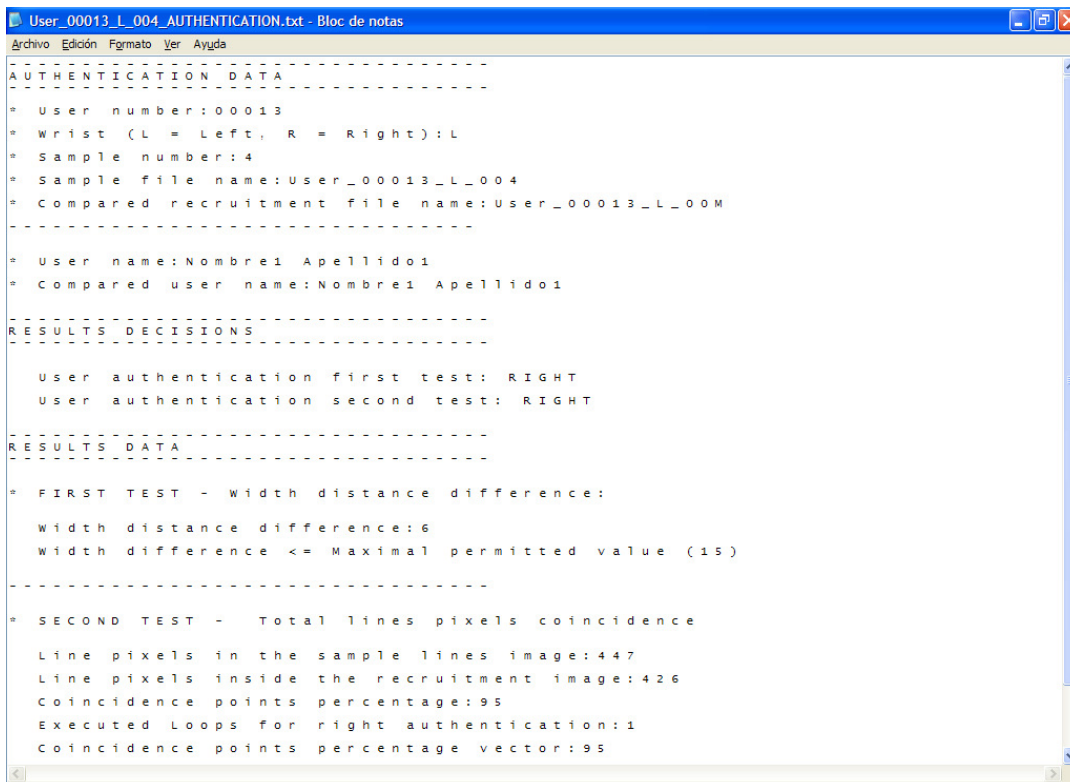


Figura 119: Ejemplo de documentación TXT - Archivo
"User_00013_L_004_AUTHENTICATION.txt"

```

User_00013_L_004_IDENTIFICATION_AGAINST_USER_00010.txt - Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
-----
IDENTIFICATION DATA
-----
* User number:00013
* Wrist (L = Left, R = Right):L
* Sample number:4
* Sample file name:User_00013_L_004
* Compared recruitment file name:User_00010_L_00M
-----
* User name:Nombre1 Apellido1
* Compared user name:Nombre3 Apellido3
-----
RESULTS DECISIONS
-----
User authentication first test: WRONG
User authentication second test: WRONG
-----
RESULTS DATA
-----
* FIRST TEST - Width distance difference:
Width distance difference:29
Width distance difference > Maximal permitted value (15)
-----
* SECOND TEST - Total lines pixels coincidence
Line pixels in the sample lines image:466
Line pixels inside the recruitment image:33
Coincidence points percentage:7
Executed Loops for right authentication:1
Coincidence points percentage vector:0
    
```

Figura 120: Ejemplo de documentación TXT - Archivo "User_00013_L_004_IDENTIFICATION_AGAINST_USER_00010.txt"

3. Documentación XLS

User	Right	First pixel	Last pixel	Pixel distance	ROI width	ROI height	Date and time
User 1	Right	134	535	401	321	321	10-Apr-2011 20:56:23
User 2	Right	128	526	397	317	317	14-Apr-2011 19:04:14
User 3	Right	38	522	484	404	404	10-Apr-2011 20:56:39
User 4	Right	53	514	461	375	375	14-Apr-2011 16:45:42
User 5	Right	77	476	399	313	313	10-Apr-2011 20:56:53
User 6	Right	32	523	491	351	351	10-Apr-2011 20:57:32
User 7	Right	52	552	500	388	388	

Figura 121: Ejemplo de documentación XLS - Archivo "Results_ROI.xls" -> Hoja "ROI_Data_Recruitment"

Row	Sample	User	First pixel	Last pixel	Pixel distance	ROI width	ROI height	Date and time
1	1	User 1	133	535	402	321	321	13-Apr-2011 21:21:58
2	2	User 1	133	536	403	321	321	13-Apr-2011 21:22:07
3	3	User 1	133	536	403	321	321	13-Apr-2011 21:22:07
4	4	User 1	133	536	403	321	321	13-Apr-2011 21:22:07
5	5	User 2	123	523	400	317	317	14-Apr-2011 18:06:40
6	6	User 2	123	523	400	317	317	14-Apr-2011 18:06:40
7	7	User 2	123	523	400	317	317	14-Apr-2011 18:06:40
8	8	User 2	123	523	400	317	317	14-Apr-2011 18:06:40
9	9	User 3	40	525	484	404	404	13-Apr-2011 21:24:04
10	10	User 3	40	526	485	404	404	13-Apr-2011 21:24:10
11	11	User 3	40	526	485	404	404	13-Apr-2011 21:24:10
12	12	User 3	40	526	485	404	404	13-Apr-2011 21:24:10
13	13	User 4	81	534	453	375	375	14-Apr-2011 16:53:58
14	14	User 4	81	534	453	375	375	14-Apr-2011 16:53:58
15	15	User 4	81	534	453	375	375	14-Apr-2011 16:53:58
16	16	User 4	81	534	453	375	375	14-Apr-2011 16:53:58
17	17	User 5	160	547	386	396	396	13-Apr-2011 21:26:19
18	18	User 5	160	547	386	396	396	13-Apr-2011 21:26:19
19	19	User 5	160	547	386	396	396	13-Apr-2011 21:26:19
20	20	User 5	160	547	386	396	396	13-Apr-2011 21:26:19
21	21	User 6	75	470	395	313	313	13-Apr-2011 21:27:09
22	22	User 6	75	470	395	313	313	13-Apr-2011 21:27:09
23	23	User 6	75	470	395	313	313	13-Apr-2011 21:27:09
24	24	User 6	75	470	395	313	313	13-Apr-2011 21:27:09
25	25	User 7	90	579	488	389	389	13-Apr-2011 21:27:59
26	26	User 7	90	579	488	389	389	13-Apr-2011 21:27:59
27	27	User 7	90	579	488	389	389	13-Apr-2011 21:27:59
28	28	User 7	90	579	488	389	389	13-Apr-2011 21:27:59
29	29	User 8	101	529	428	398	398	13-Apr-2011 21:28:10
30	30	User 8	101	529	428	398	398	13-Apr-2011 21:28:10
31	31	User 8	101	529	428	398	398	13-Apr-2011 21:28:10
32	32	User 8	101	529	428	398	398	13-Apr-2011 21:28:10

Figura 122: Ejemplo de documentación XLS - Archivo "Results_ROI.xls" -> Hoja "ROI_Data_Authentication"

Row	Sample	User	First pixel	Last pixel	Pixel distance	ROI width	ROI height	Date and time
1	1	User 1	121	535	414	340	340	13-Apr-2011 10:45:55
2	2	User 1	121	536	415	340	340	10-Apr-2011 22:44:00
3	3	User 1	121	536	415	340	340	10-Apr-2011 22:44:00
4	4	User 1	121	536	415	340	340	10-Apr-2011 22:44:00
5	5	User 2	123	523	400	340	340	10-Apr-2011 23:07:16
6	6	User 2	123	523	400	340	340	10-Apr-2011 23:14:59
7	7	User 2	123	523	400	340	340	10-Apr-2011 23:14:59
8	8	User 2	123	523	400	340	340	10-Apr-2011 23:14:59
9	9	User 3	40	525	484	340	340	10-Apr-2011 23:38:35
10	10	User 3	40	526	485	340	340	10-Apr-2011 23:46:29
11	11	User 3	40	526	485	340	340	10-Apr-2011 23:46:29
12	12	User 3	40	526	485	340	340	10-Apr-2011 23:46:29
13	13	User 4	81	534	453	340	340	11-Apr-2011 00:10:34
14	14	User 4	81	534	453	340	340	11-Apr-2011 00:10:59
15	15	User 4	81	534	453	340	340	11-Apr-2011 00:10:59
16	16	User 4	81	534	453	340	340	11-Apr-2011 00:10:59
17	17	User 5	160	547	386	340	340	11-Apr-2011 00:42:05
18	18	User 5	160	547	386	340	340	11-Apr-2011 00:49:28
19	19	User 5	160	547	386	340	340	11-Apr-2011 00:49:28
20	20	User 5	160	547	386	340	340	11-Apr-2011 00:49:28
21	21	User 6	75	470	395	340	340	11-Apr-2011 01:11:55
22	22	User 6	75	470	395	340	340	11-Apr-2011 01:19:08
23	23	User 6	75	470	395	340	340	11-Apr-2011 01:19:08
24	24	User 6	75	470	395	340	340	11-Apr-2011 01:19:08
25	25	User 7	90	579	488	340	340	11-Apr-2011 01:41:46
26	26	User 7	90	579	488	340	340	11-Apr-2011 01:49:17
27	27	User 7	90	579	488	340	340	11-Apr-2011 01:49:17
28	28	User 7	90	579	488	340	340	11-Apr-2011 01:49:17
29	29	User 8	101	529	428	398	398	11-Apr-2011 01:49:17
30	30	User 8	101	529	428	398	398	11-Apr-2011 01:49:17
31	31	User 8	101	529	428	398	398	11-Apr-2011 01:49:17
32	32	User 8	101	529	428	398	398	11-Apr-2011 01:49:17

Figura 123: Ejemplo de documentación XLS - Archivo "Results_ROI.xls" -> Hoja "ROI_Data_Identification"

Figura 124: Ejemplo de documentación XLS - Archivo “Results_Authentication” -> Hoja “User_13_Right”

Figura 125: Ejemplo de documentación XLS - Archivo “Results_Identification” -> Hoja “Results_Identification”

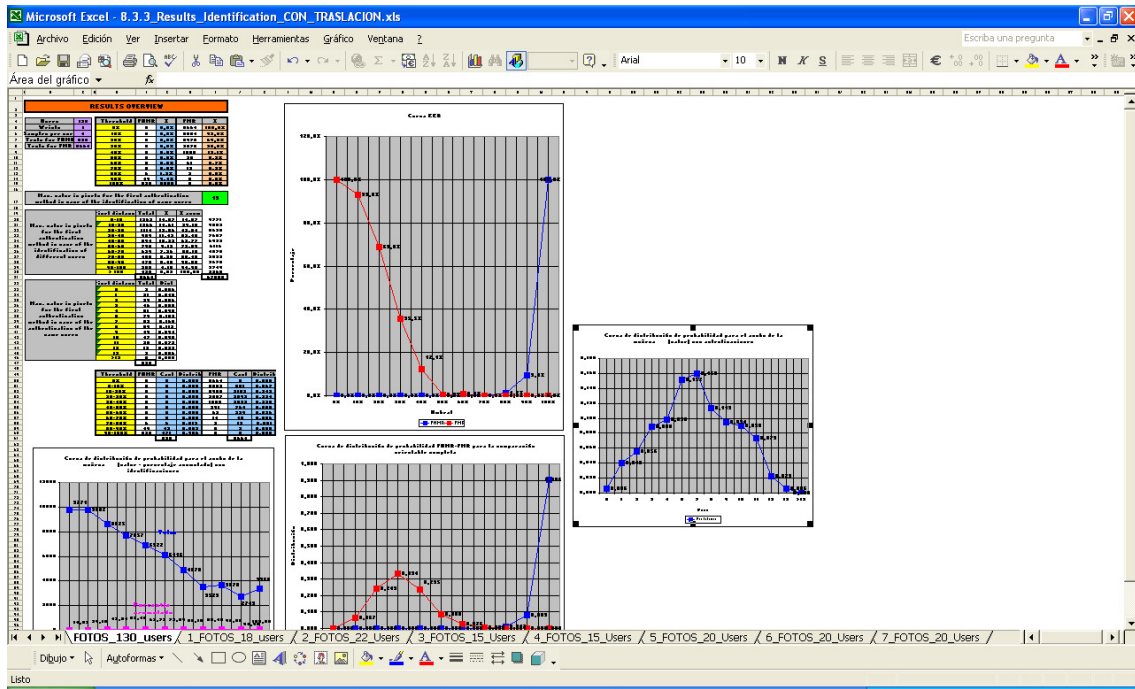


Figura 126: Ejemplo de documentación XLS - Archivo “Results_Identification” -> Hoja “Results_Overview”

4. Documentación en la consola de Matlab

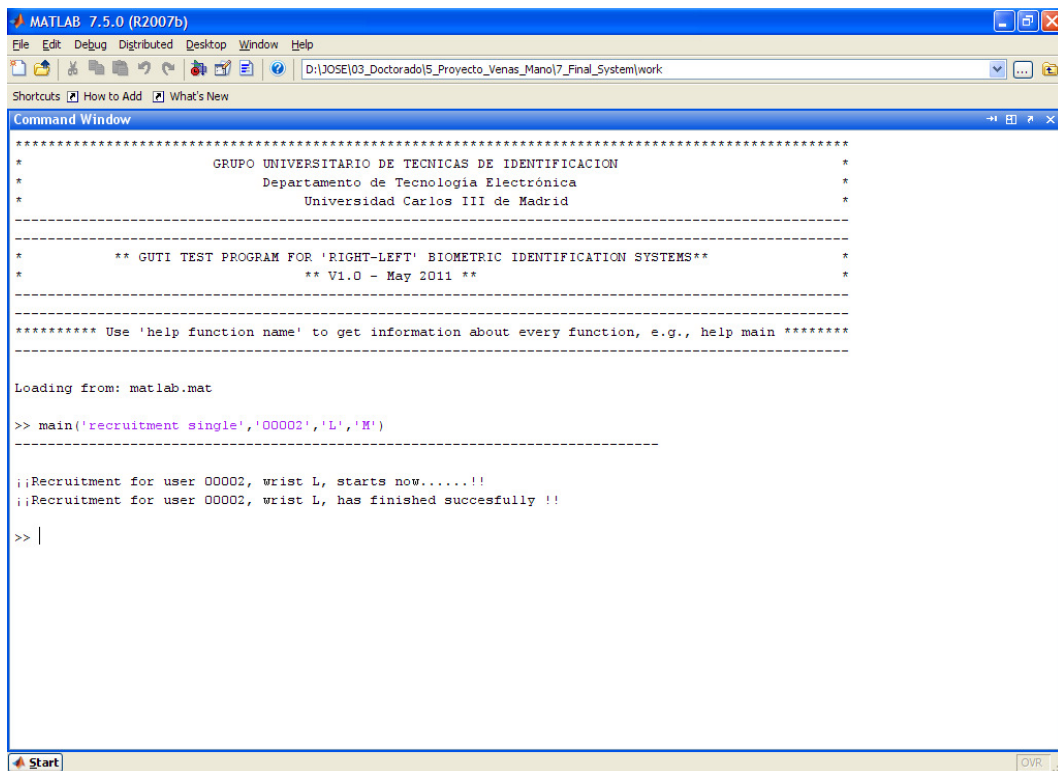
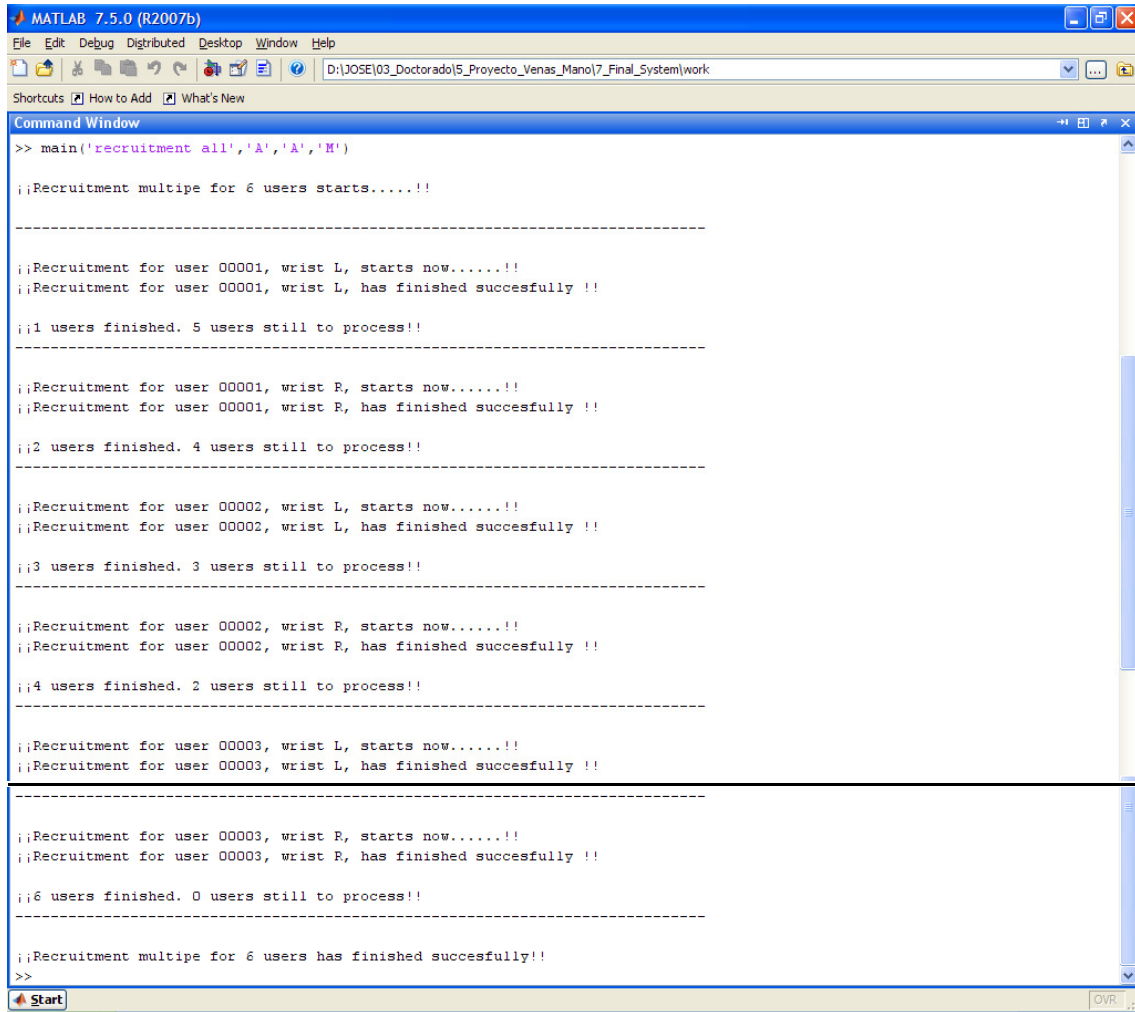


Figura 127: Ejemplo de documentación en consola de MATLAB - Con el reclutamiento individual, por ejemplo, de la muestra derecha del usuario 00001



```
MATLAB 7.5.0 (R2007b)
Efile Edit Debug Distributed Desktop Window Help
D:\JOSE\03_Doctorado\5_Proyecto_Venas_Mano\7_Final_System\work
Shortcuts How to Add What's New
Command Window
>> main('recruitment all','A','A','M')

;;Recruitment multiple for 6 users starts.....!!

-----

;;Recruitment for user 00001, wrist L, starts now.....!!
;;Recruitment for user 00001, wrist L, has finished succesfully !!

;;1 users finished. 5 users still to process!!

-----

;;Recruitment for user 00001, wrist R, starts now.....!!
;;Recruitment for user 00001, wrist R, has finished succesfully !!

;;2 users finished. 4 users still to process!!

-----

;;Recruitment for user 00002, wrist L, starts now.....!!
;;Recruitment for user 00002, wrist L, has finished succesfully !!

;;3 users finished. 3 users still to process!!

-----

;;Recruitment for user 00002, wrist R, starts now.....!!
;;Recruitment for user 00002, wrist R, has finished succesfully !!

;;4 users finished. 2 users still to process!!

-----

;;Recruitment for user 00003, wrist L, starts now.....!!
;;Recruitment for user 00003, wrist L, has finished succesfully !!

-----

;;Recruitment for user 00003, wrist R, starts now.....!!
;;Recruitment for user 00003, wrist R, has finished succesfully !!

;;6 users finished. 0 users still to process!!

-----

;;Recruitment multiple for 6 users has finished succesfully!!
>>
```

Figura 128: Ejemplo de documentación en consola de MATLAB - Con el reclutamiento múltiple, por ejemplo, de los 3 usuarios de la base de datos de usuarios

```

MATLAB 7.5.0 (R2007b)
File Edit Debug Distributed Desktop Window Help
D:\JOSE\03_Doctorado\5_Proyecto_Venas_Mano\7_Final_System\work
Shortcuts How to Add What's New
Command Window
>> main('authentication','00003','L','4')

-----
;;Authentication for user 00003, wrist L, sample 4, starts now.....!!
;;Authentication for user 00003, wrist L, sample 4, has finished successfully !!
;;Authentication images and results in TXT files saved in directory D:\Jose\03_Doctorado\5_Proyecto_Venas_Mano\7_Final_System
;;Authentication results in XLS files saved in directory D:\Jose\03_Doctorado\5_Proyecto_Venas_Mano\7_Final_System\work\5_res

-----
AUTHENTICATION DATA
-----
* User number: 00003

* Wrist (L = Left, R = Right): L

* Sample number: 4

* Sample file name: User_00003_L_004

* Compared recruitment file name: User_00003_L_00M

-----

* User name:{1} =
Nombre3 Apellido3

* Compared user name:{1} =
Nombre3 Apellido3

-----
RESULTS DECISIONS
-----

User authentication first test: RIGHT
User authentication second test: RIGHT

-----
RESULTS DATA
-----

* FIRST TEST - Width distance difference:

Width distance difference:2
Width difference <= Maximal permitted value (15)

-----

* SECOND TEST - Total lines pixels coincidence

Line pixels in the sample lines image:728
Line pixels inside the recruitment image:647
Coincidence points percentage:89
Executed Loops for right authentication:99
Coincidence points percentage vector:35 35 31 80 35 68 36 10 29 0 29 7 20 15 17 26 33 86 36 84 38
Coincidence points percentage >= Minimal permitted value (85)

```

Figura 129: Ejemplo de documentación en consola de MATLAB - Con la autenticación individual, por ejemplo, de la muestra 4 izquierda del usuario 00003

```
MATLAB 7.5.0 (R2007b)
File Edit Debug Distributed Desktop Window Help
D:\J090103_Doctorado\5_Proyecto_Venas_Mano\7_Final_System\work
Command Window
>> main('authentication user','00001','L')

!!AUTHENTICATION USER 00001: 4 tests for USER 00001, WRIST L starts now.....!!

-----

!!Authentication for user 00001, wrist L, sample 1, starts now.....!!
!!Authentication for user 00001, wrist L, sample 1, has finished successfully !!
!!Authentication images and results in TXT files saved in directory D:\Jose\03_Doctorado\5_Proyecto_Venas_Mano\7_Final_System\work\
!!Authentication results in XLS files saved in directory D:\Jose\03_Doctorado\5_Proyecto_Venas_Mano\7_Final_System\work\5_res

AUTHENTICATION DATA
-----

* User number: 00001

* Wrist (L = Left, R = Right): L

* Sample number: 1

* Sample file name: User_00001_L_001

* Compared recruitment file name: User_00001_L_00X

-----

* User name:[1] =

*****

-----

* SECOND TEST - Total lines pixels coincidence

Line pixels in the sample lines image:411
Line pixels inside the recruitment image:364
Coincidence points percentage:89
Executed Loops for right authentication:1
Coincidence points percentage vector:89
Coincidence points percentage >= Minimal permitted value (85)

-----

!!Authentication for user 00001, wrist L, sample 3, starts now.....!!
!!Authentication for user 00001, wrist L, sample 3, has finished successfully !!
!!Authentication images and results in TXT files saved in directory D:\Jose\03_Doctorado\5_Proyecto_Venas_Mano\7_Final_System\work\
!!Authentication results in XLS files saved in directory D:\Jose\03_Doctorado\5_Proyecto_Venas_Mano\7_Final_System\work\5_res

AUTHENTICATION DATA
-----

* User number: 00001

* Wrist (L = Left, R = Right): L

* Sample number: 3

*****

-----

RESULTS DECISIONS
-----

User authentication first test: RIGHT
User authentication second test: RIGHT

RESULTS DATA
-----

* FIRST TEST - Width distance difference:

Width distance difference:6
Width difference <= Maximal permitted value (15)

-----

* SECOND TEST - Total lines pixels coincidence

Line pixels in the sample lines image:447
Line pixels inside the recruitment image:426
Coincidence points percentage:95
Executed Loops for right authentication:1
Coincidence points percentage vector:95
Coincidence points percentage >= Minimal permitted value (85)

-----

!!AUTHENTICATION USER 00001: Process has already finished!!

>>
<
Start
```

Figura 130: Ejemplo de documentación en consola de MATLAB - Con la autenticación múltiple, por ejemplo, de las 4 muestras izquierdas del usuario 00001


```

MATLAB 7.5.0 (R2007b)
File Edit Debug Diagnostics Desktop Window Help
D:\XOE01_Doctorado\E_Proyecto_Vinas_Mano\7_Final_System\work
Startups How to Add What's New
Command Window
>> main('identification','00002','L','4')
;;identification for 3 users starts.....!!

;;Authentication for user 00002, wrist L, sample 4 against USER 1, starts now.....!!
;;Authentication for user 00002, wrist L, sample 4, has finished successfully !!
-----
AUTHENTICATION DATA
-----
* User number: 00002
* Wrist (L = Left, R = Right): L
* Sample number: 4
* Sample file name: User_00002_L_004
* Compared recruitment file name: User_00001_L_00X
-----

* User name:(1) =
Nombre1 Apellido2

* Compared user name:(1) =
-----
*****

* SECOND TEST - Total lines pixels coincidence
Line pixels in the sample lines image:420
Line pixels inside the recruitment image:243
Coincidence points percentage:58
Executed Loops for right authentication:99
Coincidence points percentage vector:14 14 8 19 6 11 15 2 11 16 16 22 41 24 43 16 6 20 7 12 17 5
Coincidence points percentage < Minimal permitted value (85)
-----
;;1 users finished. 2 users still to process!!

;;Authentication for user 00002, wrist L, sample 4 against USER 2, starts now.....!!
;;Authentication for user 00002, wrist L, sample 4, has finished successfully !!
-----
AUTHENTICATION DATA
-----
* User number: 00002
* Wrist (L = Left, R = Right): L
* Sample number: 4
* Sample file name: User_00002_L_004
* Compared recruitment file name: User_00002_L_00X
-----
*****

RESULTS DECISIONS
-----
User authentication first test: RIGHT
User authentication second test: WRONG
-----
RESULTS DATA
-----
* FIRST TEST - Width distance difference:
Width distance difference:1
Width difference <= Maximal permitted value (15)
-----
* SECOND TEST - Total lines pixels coincidence
Line pixels in the sample lines image:604
Line pixels inside the recruitment image:286
Coincidence points percentage:47
Executed loops for right authentication:99
Coincidence points percentage vector:6 12 7 16 22 12 45 12 8 7 15 10 26 35 6 9 4 13 19 12 47
Coincidence points percentage < Minimal permitted value (85)
-----
;;3 users finished. 0 users still to process''

;;identification for 3 users has finished successfully!!
>>
<
Start

```

Figura 131: Ejemplo de documentación en consola de MATLAB - Con la identificación individual o múltiple, por ejemplo, de las 4 muestras izquierdas del usuario 00002 frente a los 3 usuarios de la base de datos de usuarios

