

**DESARROLLO DE UN PROTOTIPO OPTOELECTRÓNICO PARA
EVALUACIÓN EN LA VERIFICACIÓN DE HUELLAS DACTILARES**

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de
magíster en ingeniería

Por:
OMAR JAVIER TÍJARO ROJAS

Director
Dr. Yezid Torres Moreno

Codirector
MPE. Henry Arguello Fuentes

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
MAESTRÍA EN INGENIERÍA - ÁREA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

Agosto 2008

**DESARROLLO DE UN PROTOTIPO OPTOELECTRÓNICO PARA
EVALUACIÓN EN LA VERIFICACIÓN DE HUELLAS DACTILARES**

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de
magíster en ingeniería

Por:
OMAR JAVIER TÍJARO ROJAS

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICO-MECÁNICAS
MAESTRÍA EN INGENIERÍA - ÁREA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
Agosto 2008

*A mis padres, mis hermanos,
a Leidy y sobretodo a Dios*

AGRADECIMIENTOS

A mi director Dr. Yezid Torres Moreno, codirector MPE. Henry Arguello Fuentes, por la dedicación y las enseñanzas brindadas durante el desarrollo del proyecto.

Al Dr. Arturo Plata, al Dr. Jáder Guerrero, a la Dra. María del Carmen Lasprilla, al Dr. Jaime Meneses, al Físico Luis Gabriel Valdivieso y a todos los integrantes del Grupo de Óptica y Tratamiento de Señales por la colaboración académica y el apoyo incondicional.

A mi familia por el respaldo, paciencia, confianza y los valores que me enseñaron, los cuales son reflejados en cada uno de los logros alcanzados en esta investigación. Ustedes han sido un motivo de inspiración y vigor en los momentos difíciles.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	1
1. MARCO TEÓRICO Y GENERALIDADES.....	3
1.1 CORRELADOR DE TRANSFORMADA CONJUNTA.....	3
1.2 PROCESADORES DIGITALES DE SEÑALES (DSP).....	6
1.2.1 Sistema de desarrollo para imágenes (DSP TMS320C6000).....	7
1.3 MEDIDAS DE DESEMPEÑO.....	10
1.4 MEDIDAS DE VERIFICACIÓN.....	11
2. CARACTERIZACIÓN DE LOS DISPOSITIVOS Y DISEÑO.....	14
2.1 PANTALLA DE CRISTAL LÍQUIDO.....	14
2.1.1 Adquisición de imágenes de microscopía del dispositivo de muestreo.....	15
2.1.2 Caracterización y reconstrucción del dispositivo de muestreo.....	17
2.2 DISEÑO GENERAL DEL PROTOTIPO.....	21
3. SIMULACIONES DEL PROTOTIPO.....	27
3.1 DESCRIPCIÓN DE LOS ELEMENTOS Y LAS PRUEBAS.....	27
3.2 RESULTADOS INICIALES.....	29
3.3 ANÁLISIS DE DATOS.....	36
3.4 RESULTADOS FINALES DE SIMULACIÓN.....	44
Artículo I.....	45
4. CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS AL PROTOTIPO.....	46
4.1 ETAPA DE PROCESAMIENTO ÓPTICO.....	46
4.1.1 Filtro Espacial.....	46
4.1.2 Colimación.....	46
4.1.3 Plano de entrada.....	47
4.1.4 Transformación de Fourier.....	47
4.2 ETAPA DE PROCESAMIENTO DIGITAL.....	48
4.2.1 Procesado en DSP.....	49
4.2.2 Imágenes del plano de entrada.....	49
4.2.3 Imágenes en el sensor cuadrático CCD.....	52
4.3 RESULTADOS FINALES.....	54
4.3.1 Dimensiones finales.....	54
4.3.2 Datos adquiridos.....	55
4.3.3 Análisis de Datos.....	56
4.4 OPERACIÓN DEL PROTOTIPO.....	61
5. CONCLUSIONES.....	64
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	66

ANEXO A. RESULTADOS PARA UMBRALIZACIÓN.....	68
ANEXO B. RESPUESTA DE PANTALLA LCD.....	72
ANEXO C. TABLAS DE PRUEBAS FINALES POR USUARIO.....	82

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
FIGURA 1. CORRELADOR DE TRANSFORMADA CONJUNTA [5]	4
FIGURA 2. GRÁFICA DE FMR Y FMNR PARA UN UMBRAL DADO U.....	13
FIGURA 3. DIMENSIONES DE LA LCD (EN MM) [21]	15
FIGURA 4. IMAGEN DE LA LCD ADQUIRIDA DESDE EL MICROSCOPIO	15
FIGURA 5. IMAGEN DE ALTO CONTRASTE A PARTIR DE LA FIGURA 4.	16
FIGURA 6. INTERPOLACIÓN A 3D DE LA FIGURA 5 CON SUS RESPECTIVAS MEDIDAS.....	16
FIGURA 7. IMAGEN DE LA LCD A 100X CON SUS RESPECTIVOS CENTROIDES	17
FIGURA 8. PÍXEL EFECTIVO DE LA LCD BINARIZADO	18
FIGURA 9. EXTRAPOLACIÓN DE LA FIGURA 8.	18
FIGURA 10. CENTROIDES DE LA FIGURA 9 Y COMPARACIÓN CON LOS DE LA FIGURA 7.	19
FIGURA 11. MAGNITUD SIMULADA DEL ESPECTRO DE LA REGIÓN CENTRAL DE LA LCD	19
FIGURA 12. MAGNITUD SIMULADA DEL ESPECTRO DE UNA REGIÓN EXTREMO.....	20
FIGURA 13. DISEÑO GENERAL DEL PROTOTIPO.	21
FIGURA 14. TAMAÑO DE LA LCD EN MM Y PÍXELES.	22
FIGURA 15. TAMAÑO DEL SENSOR EN MM Y PÍXELES.	22
FIGURA 16. CÁMARA CCD CG55H CON LENTE. REFERENCIA: WWW.SHOPEIO.COM.....	23
FIGURA 17. SISTEMA DE FILTRADO ESPACIAL.	23
FIGURA 18. SENSOR CÁMARA CCD	24
FIGURA 19. IMAGEN DE CORRELACIÓN, PROBABLE: A) FALSA ACEPTACIÓN B) FALSO RECHAZO..	30
FIGURA 20. A) Y C) DENSIDAD ESPECTRAL DE ENERGÍA DE B) Y D). B) Y D) IMÁGENES TOMADAS DE LA BASE DE DATOS	31
FIGURA 21. PSR A DIFERENTES ÁNGULOS DE ROTACIÓN.....	33
FIGURA 22. IMAGEN CIRCULAR CENTRADA EN LA IMAGEN.	33
FIGURA 23. PSR DE LA FIGURA 22 A DIFERENTES ÁNGULOS DE ROTACIÓN.....	34
FIGURA 24. A) BASE DEL PSR B) PSR DE LA FIGURA 22 A DIFERENTES ÁNGULOS	34
FIGURA 25. PSR A DIFERENTES ÁNGULOS DE ROTACIÓN TOMADO CON BASE CIRCULAR.....	35
FIGURA 26. A) IMAGEN ESPECTRAL PROMEDIO. B) IMAGEN ESPECTRAL PROMEDIO FILTRADA. ...	36
FIGURA 27. PSR DE LAS CORRELACIONES PARA BÚSQUEDA DE UMBRAL DE VERIFICACIÓN.	37
FIGURA 28. PCE DE LAS CORRELACIONES PARA BÚSQUEDA DE UMBRAL DE VERIFICACIÓN.	38
FIGURA 29. 1/SNR DE LAS CORRELACIONES PARA BÚSQUEDA DE UMBRAL DE VERIFICACIÓN.....	39
FIGURA 30. PCE DE LAS CORRELACIONES PARA BÚSQUEDA DE UMBRAL DE VERIFICACIÓN PARA EL SENSOR CARACTERIZADO Y CORRELACIONES NORMALIZADAS.....	40
FIGURA 31. PSR DE LAS CORRELACIONES PARA BÚSQUEDA DE UMBRAL DE VERIFICACIÓN PARA EL SENSOR CARACTERIZADO Y CORRELACIONES NORMALIZADAS.....	40
FIGURA 32. 1/SNR DE LAS CORRELACIONES PARA BÚSQUEDA DE UMBRAL DE VERIFICACIÓN PARA EL SENSOR CARACTERIZADO Y CORRELACIONES NORMALIZADAS.....	41

FIGURA 33. PCE DE LAS CORRELACIONES PARA BÚSQUEDA DE UMBRAL DE VERIFICACIÓN, HUELLAS FILTRADAS Y CORRELACIÓN NORMALIZADA.....	41
FIGURA 34. PSR DE LAS CORRELACIONES PARA BÚSQUEDA DE UMBRAL DE VERIFICACIÓN, HUELLAS FILTRADAS Y CORRELACIÓN NORMALIZADA.....	42
FIGURA 35. 1/SNR DE LAS CORRELACIONES PARA BÚSQUEDA DE UMBRAL DE VERIFICACIÓN, HUELLAS FILTRADAS Y CORRELACIÓN NORMALIZADA.....	42
FIGURA 36. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PROCESO DE VERIFICACIÓN UTILIZANDO SIMULACIÓN DIGITAL.	45
FIGURA 37. COLIMACIÓN DE LA ONDA GENERADA POR UN RAYO LÁSER PREVIAMENTE FILTRADA ESPACIALMENTE [13].....	47
FIGURA 38. IMAGEN DE PRUEBA EN EL PLANO DE ENTRADA.....	48
FIGURA 39. TRANSFORMADA DE FOURIER ÓPTICA DE LA FIGURA 38.	48
FIGURA 40. PROCESO DE FORMACIÓN DE IMÁGENES EN UNA PANTALLA LCD. (REFERENCIA: HTTP://WWW.MTAS.ES/INSHT/NTP/NTP_678.HTM)	50
FIGURA 41. GRÁFICO DE NIVELES DE GRIS EN CCD VS. NIVELES DE GRIS EN LCD (16,5° POLARIZADOR 0°)	51
FIGURA 42. RESULTADO FINAL DE MEDICIÓN CON VALORES MÍNIMOS DE INTENSIDAD.....	52
FIGURA 43. RESULTADO FINAL DE MEDICIÓN CON VALORES MEDIOS DE INTENSIDAD.	52
FIGURA 44. COMPARACIÓN DE LA RELACIÓN SEÑAL A RUIDO EN LA CCD POR PÍXEL.	53
FIGURA 45. MEDIDAS ESPACIALES FINALES DEL PROTOTIPO.....	54
FIGURA 46. TIPOS DE HUELLAS MÁS COMUNES [4].....	55
FIGURA 47. IMÁGENES PROCESADAS EN EL PROTOTIPO HÍBRIDO. A) AUTOCORRELACIÓN, B) CORRELACIÓN CON EL MISMO USUARIO, C) CORRELACIÓN ENTRE USUARIOS DISTINTOS.	56
FIGURA 48. A) PSR Y B) PCE DE LA CORRELACIÓN DE LAS IMÁGENES ENFRENTADAS.....	57
FIGURA 49. A) SNR Y B) VALOR MÁXIMO DE LA CORRELACIÓN DE LAS IMÁGENES ENFRENTADAS.	57
FIGURA 50. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PROCESADO EN EL PROTOTIPO.....	58
FIGURA 51. BARRIDO PARA UMBRALES DE FMR (ROJO) Y FMNR (AZUL)	60
FIGURA 52. DESCRIPCIÓN DETALLADA DEL PROTOTIPO ÓPTICO.....	62
FIGURA 53. IMÁGENES DESPLEGADAS EN LA LCD PARA PROCESAMIENTO.	62
Figura B1. Gráfico de Niveles de Gris en CCD vs. Niveles de Gris en LCD. a) 0° y b) 5°	76
Figura B2. Gráfico de Niveles de Gris en CCD vs. Niveles de Gris en LCD. a) 10° y b) 15°	76
Figura B3. Gráfico de Niveles de Gris en CCD vs. Niveles de Gris en LCD. a) 20° y b) 25°	77
Figura B4. Gráfico de Niveles de Gris en CCD vs. Niveles de Gris en LCD. a) 16° y b) 17°	77
Figura B5. Gráfico de Niveles de Gris en CCD vs. Niveles de Gris en LCD. a) 18° y b) 19°	78

LISTA DE TABLAS

	Pág.
TABLA 1. CARACTERÍSTICAS DEL MÓDULO DE DESARROLLO.	8
TABLA 2. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL PANEL LCD [21]	14
TABLA 3. VALORES ENCONTRADOS DE LOS CENTROIDES	17
TABLA 4. PROMEDIOS DE LOS CENTROIDES DE LA IMAGEN.	18
TABLA 5. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LOS DISPOSITIVOS	26
TABLA 6. RESULTADOS DE MÁXIMOS DE CORRELACIÓN (NORMALIZADOS A LA AUTOCORRELACIÓN)	29
TABLA 7. RESULTADOS DE FALSA ACEPTACIÓN Y FALSO RECHAZO.	58
TABLA 8. RESULTADOS DE FALSA ACEPTACIÓN Y FALSO RECHAZO CON UMBRALES ÓPTIMOS.	59
TABLA 9. RESULTADOS DE APLICAR LA ECUACIÓN 19 A LOS PARÁMETROS DE DESEMPEÑO.	59
TABLA 10. RESULTADOS DE FALSA ACEPTACIÓN Y FALSO RECHAZO CON UMBRALES ÓPTIMOS. ..	60
Tabla A1. Estudio para encontrar umbral de aceptación	68
Tabla A2. Estudio para encontrar umbral de rechazo	70
Tabla B1. Pruebas iniciales NG (Nivel de Gris), Analiz. #º: Analizador a #º	72
Tabla B2. Pruebas con menor delta en los grados	73
Tabla B3. Pruebas finales NG (Nivel de Gris), Analiz. #º: Analizador a #º.	79
Tabla C1. USUARIO 1 CONTRA OTROS USUARIOS. PSR	82
Tabla C2. USUARIO 1 CONTRA OTROS USUARIOS. PCE	83
Tabla C3. USUARIO 1 CONTRA OTROS USUARIOS. SNR.....	85
Tabla C4. USUARIO 1 CONTRA OTROS USUARIOS. MÁXIMO	86

RESUMEN

TÍTULO: DESARROLLO DE UN PROTOTIPO OPTOELECTRÓNICO PARA EVALUACIÓN EN LA VERIFICACIÓN DE HUELLAS DACTILARES

AUTOR: OMAR JAVIER TÍJARO ROJAS**

PALABRAS CLAVE: JTC, JPS, DSP, CCD, LCD, huellas dactilares, SNR, PCE, PSR.

CONTENIDO: Actualmente, las herramientas que utiliza el hombre para desarrollar sus actividades son más dependientes de la tecnología que en épocas anteriores. A su vez, las innovaciones tecnológicas requieren cada vez, más velocidad de procesamiento y tasas de error reducidas.

Con el fin de contribuir con estos requerimientos, en este trabajo se diseñó y construyó un prototipo optoelectrónico basado en la correlación, para evaluar el desempeño en verificación de huellas dactilares. El procesamiento híbrido se ejecuta en la primera etapa a partir de una arquitectura óptica conocida como correlador de transformada conjunta (JTC), en la cual la imagen de entrada (escena compuesta por la huella dactilar de ingreso y la huella a comparar en base de datos) es desplegada en una pantalla de cristal líquido (LCD) traslúcida, se filtra a través de una lente de Fourier hacia una cámara CCD, donde se captura el espectro de energía conjunto (JPS). En la segunda etapa, se lleva la imagen capturada en la CCD a un procesador digital de señales (DSP) el cual realiza una transformada de Fourier inversa para obtener la imagen de correlación espacial de donde se extraen los parámetros relación señal a ruido (SNR), la relación altura de pico-lóbulo lateral (PSR), la relación energía-valor pico de correlación (PCE) y la altura de pico, que finalmente son estudiados para admitir o no a un usuario enfrentado al prototipo.

Como conclusión, a partir de un correlador de transformada conjunta híbrido es posible obtener tasas de falsa aceptación (FMR) de 0.8611% tasas de falso rechazo (FNMR) de 14% en un tiempo de 28 milisegundos.

* Trabajo de investigación.

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Maestría en Ingeniería, área Electrónica. Director, Dr. Yezid Torres Moreno. Codirector, MPE. Henry Arguello Fuentes

ABSTRACT

TITLE: DEVELOPMENT OF A OPTOELECTRONICS PROTOTYPE FOR EVALUATION IN THE MATCH OF FINGERPRINTS

AUTHOR: OMAR JAVIER TÍJARO ROJAS**

KEYWORDS: JTC, JPS, DSP, CCD, LCD, Fingerprint, SNR, PCE, PSR.

CONTENT: In this moment, the tools that the man uses to develop his activities are more dependent on the technology that in previous time. In turn, the technological innovations need every time, more speed of processing and limited rates of mistake.

In order to contribute with these requirements, in this work a optoelectronics prototype was designed and constructed based on the correlation, to evaluate the performance in match of fingerprints. The hybrid processing executes in the first stage from an optical architecture known like joint transform correlator (JTC), where the image of entry (scene composed by the fingerprint of revenue and the fingerprint to match in database) is showed on a liquid crystal display translucent (LCD), filters across Fourier's lens to a camera CCD, where there is captured the joint power spectrum (JPS). In the second stage, the image is captured in the CCD to a digital signal processor (DSP) which realizes one inverse transform Fourier to obtain the image of spatial correlation wherefrom the parameters extract relation to themselves signal to noise (SNR), the Peak to side-lobe relation (PSR), the peak correlation energy (PCE) and the height of peak, that finally are studied to admit or not to a user faced the prototype.

As conclusion, from a joint transform correlator hybrid is possible to obtain rates of false acceptance (FMR) of 0.8611 % rates of false rejection (FNMR) of 14 % in a fragment of 28 milliseconds.

* Work of researching.

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Maestría en Ingeniería, área Electrónica. Director, Dr. Yezid Torres Moreno. Codirector, MPE. Henry Arguello Fuentes

INTRODUCCIÓN

Los últimos avances de la ciencia han estado influenciados de gran manera por las investigaciones realizadas en el área de la óptica y la evolución de la electrónica. Ejemplos de estos adelantos son los dispositivos de almacenamiento masivo de información digital como los discos compactos, los cuales tienen un costo comercial considerablemente bajo en comparación con los dispositivos electrónicos que tienen funciones similares. Este tipo de prototipos, que necesitan en su tratamiento implementación óptica para acceder a datos digitales, son un ejemplo de que el tratamiento híbrido es una buena opción para realizar procesamiento de señales, que en el caso del trabajo aquí presentado son imágenes de huellas dactilares.

En esta investigación se presenta el estudio de una arquitectura híbrida compuesta por un correlador de transformada conjunta óptico y un procesador digital de señales donde se lleva a cabo la comparación de dos huellas dactilares.

En el capítulo 1 de este trabajo se describen los lineamientos teóricos que soportan cada una de las experiencias que se implementaron, las características generales de algunas de las implementaciones, y las medidas de desempeño y verificación que fueron utilizadas en la toma de decisiones al final del documento.

En el capítulo 2 se muestra la caracterización de los dispositivos de muestreo (pantalla de cristal líquido) y el diseño general del prototipo en el que se calcula la distancia focal de la lente a la cámara donde se adquiere la densidad espectral de

energía de la imagen de entrada. En este se hace un análisis del sistema de muestro de entrada a partir de imágenes obtenidas al microscopio.

En el capítulo 3 se muestra la ejecución de las simulaciones de los algoritmos y el análisis de los resultados de las mismas, se diseñó un sistema para que los errores de verificación fuesen pequeños, y en el capítulo final comparar éstos con los obtenidos en el prototipo híbrido.

En el capítulo 4 se describe cada etapa del prototipo para el entendimiento de su funcionamiento. De manera semejante, se hacen las pruebas indispensables a los elementos para que el funcionamiento de las etapas opere en su región óptima. Allí se muestra la descripción final del prototipo con sus diferentes medidas espaciales y temporales.

1. MARCO TEÓRICO Y GENERALIDADES

En este capítulo se presenta una recopilación de las principales investigaciones y bases teóricas tomadas en cuenta para el diseño del correlador híbrido, partiendo de las características de implementación de un correlador de transformada conjunta, estudiando su formulación matemática, las restricciones que tiene el mismo y las generalidades de los dispositivos ópticos y electrónicos a utilizar.

1.1 CORRELADOR DE TRANSFORMADA CONJUNTA

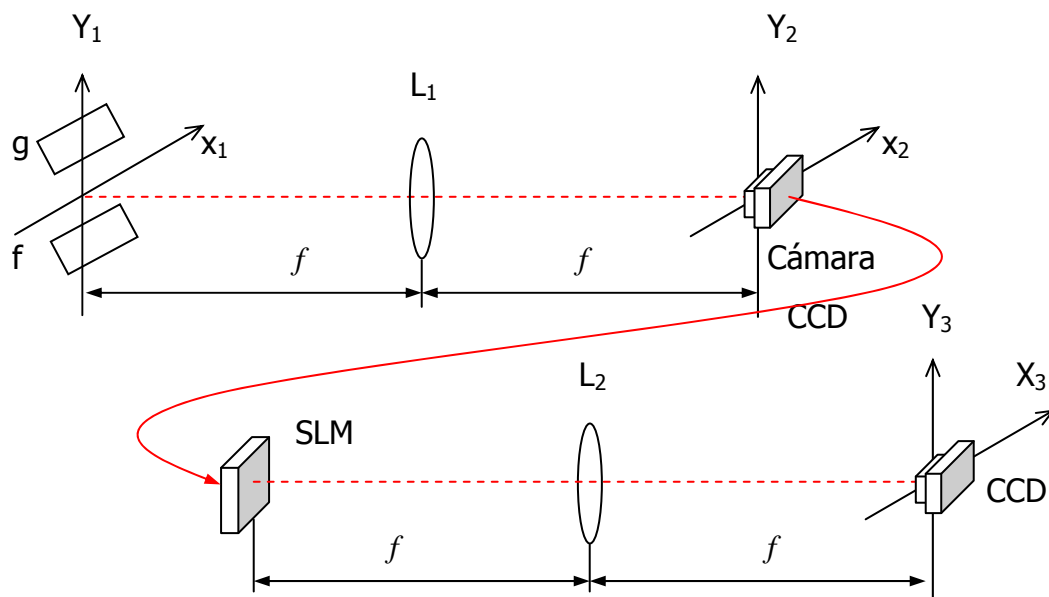
Una arquitectura óptica para procesamiento de imágenes es la presentada en 1966 por Weaver y Goodman [19], la cual permite realizar ópticamente una correlación entre dos funciones (imágenes). Esta técnica es llamada correlador de transformada conjunta (más conocido por su sigla en inglés *Joint Transform Correlator JTC*). Las aplicaciones que se han desarrollado con este sistema se utilizan en la localización de trayectorias, sistemas dirigidos autónomamente, protección de cambios, sistemas de rastreo, reconocimiento de formas en tiempo real, entre otras.

Las ventajas que proporciona este tipo de correlador es que comparadas con una arquitectura VanderLugt [18] no es necesario un filtro complejo para modular la amplitud y la fase de la transformada de Fourier de la escena, lo cual lo hace menos sensible a las vibraciones y al desalineamiento de los elementos ópticos.

Por otro lado, en este correlador la transformación de la densidad espectral conjunta de energía no es un proceso lineal [6], lo que permite exhibir picos más agudos en el plano de salida.

En la implementación del correlador, se tiene en el plano de entrada la función de referencia $f(x_1, y_1 - Y/2)$ y la función escena $g(x_1, y_1 + Y/2)$, es decir, desplazadas cada una de ellas una distancia $Y/2$ del origen del sistema de coordenadas, entonces la función de entrada es:

$$u_1(x_1, y_1) = f(x_1, y_1 - Y/2) + g(x_1, y_1 + Y/2) \quad (1)$$



SLM: Modulador espacial de luz

Figura 1. Correlador de transformada conjunta [5]

La densidad espectral conjunta de energía (JPS – del inglés *Joint Power Spectrum*), la cual corresponde al módulo al cuadrado de la transformada de Fourier de la función de entrada $u_1(x_1, y_1)$, puede obtenerse experimentalmente empleando un sensor cuadrático, por ejemplo una cámara CCD (del inglés *charge-coupled device*) en la figura 1, la cual se encuentra ubicada en el plano focal posterior de la lente

L₁. En el plano del sensor, la amplitud compleja del campo electromagnético es proporcional a [5]:

$$u_2(x_2, y_2) = \frac{1}{\lambda f} F\left(\frac{x_2}{\lambda f}, \frac{y_2}{\lambda f}\right) \ell\left(-j2\pi y_2 \frac{Y}{\lambda f}\right) + \frac{1}{\lambda f} G\left(\frac{x_2}{\lambda f}, \frac{y_2}{\lambda f}\right) \ell\left(j2\pi y_2 \frac{Y}{\lambda f}\right) \quad (2)$$

Siendo λ la longitud de onda de la onda plana monocromáticamente coherente que ilumina el sistema óptico y f la longitud focal de la lente L₁. F y G representan la transformada de Fourier estándar escalada de las funciones f y g respectivamente, por lo tanto la densidad espectral conjunta de energía obtenida es:

$$I(x_2, y_2) = |u_2(x_2, y_2)|^2 = \frac{1}{(\lambda f)^2} \left[\begin{aligned} & \left| F\left(\frac{x_2}{\lambda f}, \frac{y_2}{\lambda f}\right) + G\left(\frac{x_2}{\lambda f}, \frac{y_2}{\lambda f}\right) \right|^2 \\ & + F\left(\frac{x_2}{\lambda f}, \frac{y_2}{\lambda f}\right) G^*\left(\frac{x_2}{\lambda f}, \frac{y_2}{\lambda f}\right) \ell\left(-j2\pi y_2 \frac{Y}{\lambda f}\right) \\ & + F^*\left(\frac{x_2}{\lambda f}, \frac{y_2}{\lambda f}\right) G\left(\frac{x_2}{\lambda f}, \frac{y_2}{\lambda f}\right) \ell\left(j2\pi y_2 \frac{Y}{\lambda f}\right) \end{aligned} \right] \quad (3)$$

Para hallar la correlación entre las funciones f y g se debe efectuar una transformada de Fourier a la densidad espectral conjunta de energía, en el caso de la figura 1 también se realiza ópticamente. En el plano de salida del correlador $u_3(x_3, y_3)$ se obtiene la distribución de amplitud:

$$u_3(x_3, y_3) = \frac{1}{\lambda f} \left[\begin{aligned} & f(x_3, y_3) * f^*(-x_3, -y_3) + g(x_3, y_3) * g^*(-x_3, -y_3) \\ & + f(x_3, y_3) * g^*(-x_3, -y_3) * \delta(x_3, y_3 - Y) \\ & + f^*(-x_3, -y_3) * g(x_3, y_3) * \delta(x_3, y_3 + Y) \end{aligned} \right] \quad (4)$$

En la ecuación anterior se pueden observar fácilmente los términos de autocorrelación (dos primeros términos) y correlación cruzada que están centrados

en $(0,-Y)$ y $(0,Y)$ en el plano de salida del correlador, lo que representa la posibilidad de solapamiento en los picos de correlación (observados en la ecuación 4), por lo tanto, las imágenes referencia y escena se deben separar con la siguiente restricción:

$$Y > \max\{Ry_1, Ey_1\} + \frac{Ry_1 + Ey_1}{2} \quad (5)$$

Donde Ry_1 y Ey_1 es el ancho del soporte de la referencia y de la escena a lo largo del eje y_1 (plano de entrada en la figura 1).

1.2 PROCESADORES DIGITALES DE SEÑALES (DSP)

Los procesadores digitales de señales son circuitos integrados programables que están diseñados especialmente para que puedan llevar a cabo funciones de procesamiento digital, mediante una cooperación entre desarrollo de hardware específico y algoritmos que por lo general están basados en lenguaje C y ensamblador.

Gracias al desarrollo de la teoría de procesamiento digital de señales, estos dispositivos han sido el centro de muchos procesos en el área de la ingeniería, como las comunicaciones, imágenes médicas, radar, automatización industrial, sonido, entre otras. Lo cual ha permitido igualmente, que los equipos de diseñadores de estos circuitos integrados desarrollen diferentes utilidades en software y hardware para que el usuario final utilice estas herramientas sin necesidad de invertir tiempo innecesario en algoritmos y hardware complejos [5].

La principal diferencia de los DSP con los microcontroladores radica principalmente en que estos últimos no tienen desarrollada una aritmética para realizar cálculos numéricos cuando se necesitan teóricamente, y es probable hoy en día encontrar

DSP's que pueden realizar millones de operaciones por segundo en arquitecturas numéricas de punto fijo y flotante, y tarjetas electrónicas diseñadas especialmente para investigación y desarrollo, las cuales son mejoradas con dispositivos como arreglo de compuertas lógicas programables FPGA (del inglés *Field Programmable Gate Array*) para administración de memoria y así, el procesador opere lo más eficientemente posible [2].

Los principales fabricantes de estos dispositivos son *Texas Instruments*, *Freescale* (antiguo *Motorola semiconductor*) y *Analog Devices*, los cuales desarrollan sistemas de evaluación enfocados a aplicaciones cada vez más generales, como las tarjetas de desarrollo presentadas por Texas Instruments para aplicaciones de tratamiento de señales tan específicas como se desee (imágenes, *ethernet*, audio, entre otras), a través de un procesador digital de señales [15].

Los dispositivos actuales más comerciales que operan con buen rendimiento para desarrollo de aplicaciones, son los que proporciona la empresa *Texas Instruments* con DSP's como el TMS320DM642 [16] el cual puede procesar hasta 5600 MIPS (millones de instrucciones por segundo) con representación numérica de punto fijo, y el TMS320C6727B [17] que procesa a 2800 MIPS pero además puede procesar hasta 2100 MFLOPS (Millones de instrucciones en punto flotante por segundo), este último construido para procesamiento en punto flotante y es el procesador más reciente (2006) diseñado por *Texas Instruments* para la familia C6000 de punto flotante. El DSP escogido (TMS320C6711) para desarrollar la aplicación procesa a 1000 MFLOPS y también pertenece a esta familia de procesadores.

1.2.1 Sistema de desarrollo para imágenes (DSP TMS320C6000). El sistema de desarrollo utilizado para realizar las pruebas de la investigación fue el TMS320C6000 [14], el cual consta de herramientas hardware y software eficientes para el tratamiento digital de imágenes en tiempo real. En términos generales el

hardware está compuesto por: una tarjeta de evaluación con una entrada y salida de audio, una entrada para video (con su respectiva cámara), una salida de video a pantallas convencionales de computadores personales. El software tiene herramientas como el *Code Composer Studio*, el cual sirve como interfaz de compilación y envío de algoritmos programados al procesador, y está equipado con funciones, librerías y miniaplicaciones (como el DSPBIOS) para manejar datos que facilitan la programación de aplicaciones.

1.2.1.1 Descripción del hardware. El hardware consta de un procesador digital de señales, una tarjeta de video de propósito específico, una cámara de propósito general tipo NTSC y un sistema de desarrollo para el DSP TMS320C6711 de la empresa Texas Instruments [2]. Además, este sistema cuenta con una interfaz para comunicación por el puerto paralelo, codecs para entrada y salida de señales analógicas y una tarjeta esclava para video. Las características más importantes del hardware general se describen en la tabla 1.

Tabla 1. Características del Módulo de desarrollo.

ITEM	CARACTERÍSTICA
DSP TMS320C6711	
Frecuencia de Operación	150 MHz
Tensión de polarización (Entrada/Salida)	3.3 V
Tensión del core	1.8 V
Tiempo de ejecución de 1 instrucción	6.7 ns
Arquitectura de representación numérica	Punto flotante
Temporizadores	2 (32 bits)
Unidades independientes de cálculo	4 sumadores punto fijo y flotante 2 sumadores para punto fijo 2 multiplicadores para punto fijo y punto flotante
Acceso directo a memoria (DMA)	16 canales independientes
MFLOPS	1000
Cámara de vídeo Telecámara NK9127C (CCD)	
Sistema de exploración	NTSC o PAL
Tamaño de la imagen en píxeles ²	768(H) x 494 (V)
Tensión de alimentación	12 VDC, 185 mA
Tarjeta de Vídeo	
Entrada de vídeo	NTSC o PAL
Salida RGB para pantalla	565 VGA o SVGA
Entrada de cámara compatible	NTSC/PAL

Además de las características citadas en la tabla 1, es importante resaltar de éste módulo la arquitectura de la CPU. Ésta posee 8 unidades de procesamiento en paralelo, lo que le permite a este procesador operar con gran eficiencia. La CPU tiene de la misma forma conexión directa con la memoria caché, tanto de datos como de programa, que permite el acceso inmediato a los datos o a las instrucciones aumentando de la misma forma la eficiencia [2].

1.2.1.2 Descripción del software. El software para manejo de este sistema de desarrollo es el *Code Composer Studio*. Este tiene como objetivo brindar al programador un ambiente amigable para crear y editar los algoritmos en lenguaje C, ensamblador y enlaces entre estos, luego compilarlos y enviarlos por el puerto paralelo del computador al procesador. También permite visualización y análisis de datos en tiempo real, así como configuración de periféricos y el hardware en general.

Además de los beneficios descritos anteriormente, el *Code Composer Studio* tiene una herramienta gráfica para la configuración del hardware del sistema DSP, dentro de los cuales se destacan la configuración de memoria caché, memoria interna y externa, interrupciones, codecs, temporizadores, canales de acceso directo a memoria, entre otros.

Una aplicación adicional que proporciona el fabricante es la herramienta de imágenes IDK (del inglés *Imaging Developer's Kit*). Esta tiene diferentes niveles jerárquicos o capas que son distribuidas según el tipo de usuario del sistema. De esa forma está el *ExpressDSP* con aplicaciones completas generales compiladas con características estándar; los algoritmos desarrollados por cada programador, que involucra el llamado a funciones especializadas y utiliza librerías del IDK; funciones para procesamiento de imágenes que se pueden invocar unas a otras; rutinas de propósito general y específicos altamente optimizadas; el manejador de datos para imágenes (IDM), el cual se encarga de transferencia de datos de

manera óptima; y por último las librerías de soporte del chip (CSL), que permiten al programador manejar e interactuar con el "Hardware" del sistema DSP [2].

1.3 MEDIDAS DE DESEMPEÑO

Para validar las respuestas de sensibilidad de la correlación en dos dimensiones del prototipo, es necesario encontrar algunos patrones de medida que sirven para comparar los objetos en la escena. Debido a esto, se utilizan por lo general medidas de desempeño como: la relación señal a ruido (SNR – del inglés *signal to noise ratio*), la relación altura de pico-lóbulo lateral (PSR – del inglés *peak-to-sidelobe ratio*), la relación energía-valor pico de correlación (PCE – del inglés *peak to correlation energy*) y la altura de pico.

La relación señal a ruido es definida como la relación entre la intensidad del pico de correlación y la desviación estándar del ruido, considerando ruido a los valores de intensidad inferiores al 50% de la altura del pico [5]. En la siguiente expresión se puede observar su descripción matemática.

$$SNR = \frac{I_p}{\sqrt{\frac{\sum_i^{N_1} \sum_j^{N_2} |n(x_i, y_i) - \overline{n(x_i, y_i)}|^2}{N_1' N_2'}}} \quad (6)$$

I_p es la intensidad de pico de correlación del blanco deseado, N_1 y N_2 son el número total de píxeles del área donde el pico de correlación es medido, N_1' y N_2' son el número de píxeles donde hay ruido, x_i y y_i son las coordenadas de cada píxel y $\overline{n(x_i, y_i)}$ es la medida de la esperanza matemática de la imagen [5]. Un valor alto de este parámetro indica una alta tolerancia a la presencia de ruido dentro de la escena.

La relación altura de pico lóbulo lateral se usa para cuantificar la agudeza del pico de correlación, la cual es un indicador de la incertidumbre en la localización en el plano de salida del objeto a ser reconocido [5]. Matemáticamente se define en la siguiente ecuación.

$$PSR = \frac{I_p - \mu}{\sigma} \quad (7)$$

Donde μ representa el valor medio y σ la desviación estándar de una región circular de 30 píxeles de radio alrededor del pico de correlación (excluyendo una región de 10 píxeles de radio que contiene el pico de correlación) [5].

La relación energía-valor pico de correlación determina la relación de la intensidad del pico de correlación respecto a la energía del plano de correlación, como lo muestra la ecuación [5]:

$$PCE = \frac{I_p}{\sqrt{\sum_i^{N_1} \sum_j^{N_2} |c(x_i, y_i)|^2}} \quad (8)$$

Donde $c(x,y)$ es el resultado sobre el plano de correlación.

1.4 MEDIDAS DE VERIFICACIÓN

Para el diseño de un sistema de verificación biométrico el problema puede ser formulado así: dada una base de datos con imágenes plantilla T y una entrada de datos con imágenes I , entonces, las hipótesis son [7]:

$H_0: I \neq T$ La entrada no pertenece a la misma persona de la base de datos.

$H_1: I = T$ La entrada pertenece a la misma persona de la base de datos.

Las decisiones son las siguientes:

D_0 : La persona no es quien dice ser.

D_1 : La persona es quien dice ser.

La verificación enfrenta las imágenes T e I usando una medida de similitud $s(T,I)$. Si el margen de enfrentamiento es menor que el umbral del sistema U, entonces se decide D_0 , si no, se decide D_1 [7].

Para fines de comunicación, H_0 es la hipótesis que la señal recibida es más ruido que mensaje y H_1 es la hipótesis donde la señal recibida es más mensaje que ruido. Por lo tanto se proyecta la formulación inherente de dos tipos de error [7]:

Tipo I: Falsa Aceptación (D_1 es decidido cuando H_0 es verdadero).

Tipo II. Falso Rechazo (D_0 es decidido cuando H_1 es verdadero).

La rata de falsa aceptación (FMR – *del inglés False Match Rate*) es la probabilidad de encontrar error tipo I y la rata de falso rechazo (FNMR – *del inglés False Non-Match Rate*) es la probabilidad de encontrar error tipo II [7].

$$\text{FMR} = \text{Prob}(D_1 | H_0 = \text{Verdadero})$$

$$\text{FNMR} = \text{Prob}(D_0 | H_1 = \text{Verdadero})$$

Para evaluar la exactitud de un sistema biométrico se deben coleccionar valores generados desde un número de imágenes de huellas dactilares del mismo dedo (la distribución $p(s|H_1=\text{verdadero})$ de los valores es llamada distribución genuina), y los valores generados desde un número de imágenes de huellas dactilares de dedos de diferentes usuarios (la distribución $p(s|H_0=\text{verdadero})$ de los valores es llamada distribución impostora) [7]. Los valores generados en este caso fueron las medidas de desempeño descritas en la sección 1.3. La figura 2 muestra una explicación de la medida de error a utilizar.

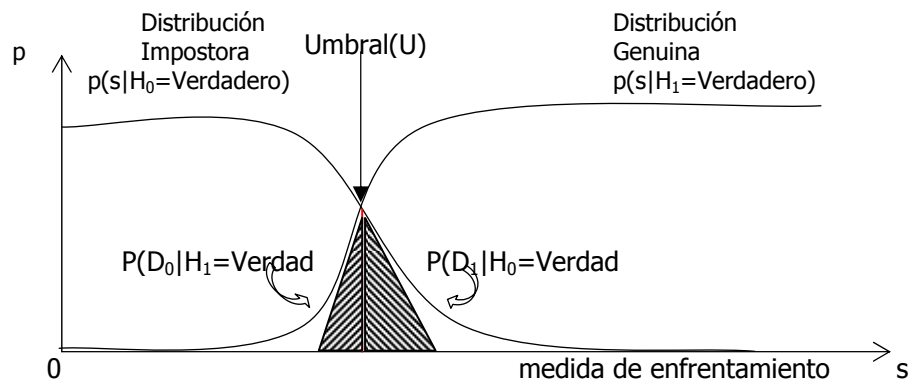


Figura 2. Gráfica de FMR y FMNR para un umbral dado U .

2. CARACTERIZACIÓN DE LOS DISPOSITIVOS Y DISEÑO

Para la caracterización de los dispositivos fue necesario utilizar una arquitectura óptica de correlación (sección 1.1) y, observar las posibilidades de diseño de los sistemas híbridos. El compromiso presentado por la óptica es el de proporcionar velocidad de procesamiento al sistema, ya que los sistemas electrónicos utilizan gran parte de su tiempo en la administración de la memoria.

Gracias a la adquisición previa de algunos elementos, se realizaron mediciones en éstos para llevar a cabo el diseño del prototipo teniendo en cuenta sus características. Inicialmente se describirá la pantalla de cristal líquido, ya que el DSP fue descrito en la sección 1.2, luego se observará el análisis realizado para el diseño.

2.1 PANTALLA DE CRISTAL LÍQUIDO

Dentro del equipo adquirido se encuentra una pantalla de cristal líquido (LCD - del inglés *Liquid Crystal Display*) traslúcida, por lo cual fue necesario comprobar algunos de los parámetros dados por el fabricante (Tabla 2).

Tabla 2. Especificaciones técnicas del panel LCD [21]

Tipo	Matriz activa TFT panel de modo de transmisión usando material de cristal líquido "twisted nematic".
Resolución espacial	1024 (Horizontal) x768 (Vertical) píxeles ² monocromáticos.
Tamaño del píxel	14 μm (H) x 14 μm (V)
Dimensión del píxel	11 μm (H) x 8.5 μm (V)
Dimensiones del panel	Área activa 14.33 mm (H) x 10.75 mm (V)
Transmisión	14% típicamente a 600nm
Factor de relleno	40% con máscara de metal opacante entre píxeles
Radio de contraste	>100:1 en ejes

Observados estos parámetros se aprovechó el uso del laboratorio de óptica para llevar a cabo una observación real de los parámetros dados por el fabricante y una posterior medición gracias a los equipos de microscopía de alta resolución que se poseen. Esto se comparó con las imágenes que mostraban en sus catálogos los fabricantes de la imagen de los píxeles (Figura 3) [21].

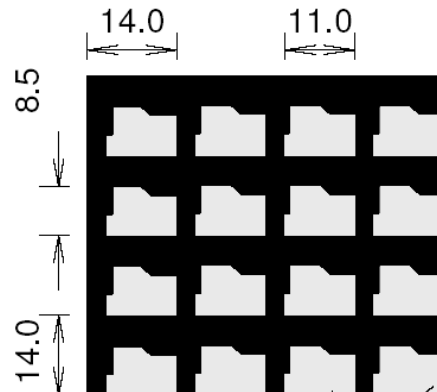


Figura 3. Dimensiones de la LCD (en μm) [21]

2.1.1 Adquisición de imágenes por microscopía del dispositivo de muestreo.

Para poder realizar los diferentes cálculos del error arrojado por el dispositivo de muestreo, fue necesario tomar imágenes de la pantalla de cristal líquido en un microscopio óptico de alta resolución a 100x (figura 4) y con ésta, hacer las diferentes pruebas y mediciones respectivas para tener en cuenta en el momento del diseño.

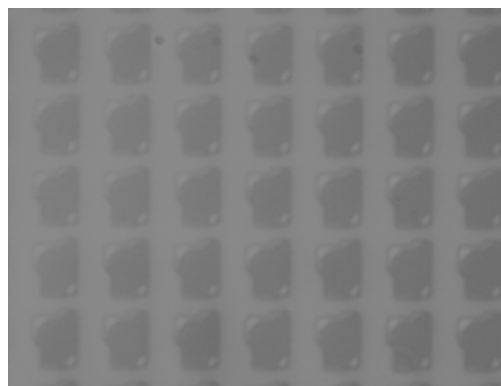


Figura 4. Imagen de la LCD adquirida desde el microscopio

Inicialmente se puede observar que en la figura 5 se presentan errores que fueron complejos de corregir, pero de igual forma las pruebas se hicieron con el fin de encontrar la forma real del píxel. El primer intento de segmentación a su vez fue el observado en la figura 5, el cual permitió que la imagen tuviese un contraste más alto; sin embargo seguían apareciendo errores que poco a poco se fueron eliminando.

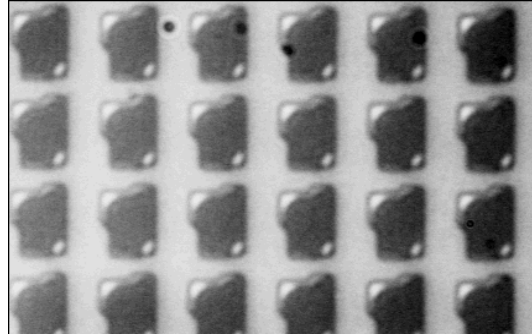


Figura 5. Imagen de alto contraste a partir de la figura 4.

Obtenida la figura 5 fue importante conocer cuales eran sus medidas reales, esto se hace gracias a herramientas de software con las que son calibradas los microscopios ópticos de alta resolución y a su vez ofrecen las distancias reales que se observan en las imágenes (figura 6).

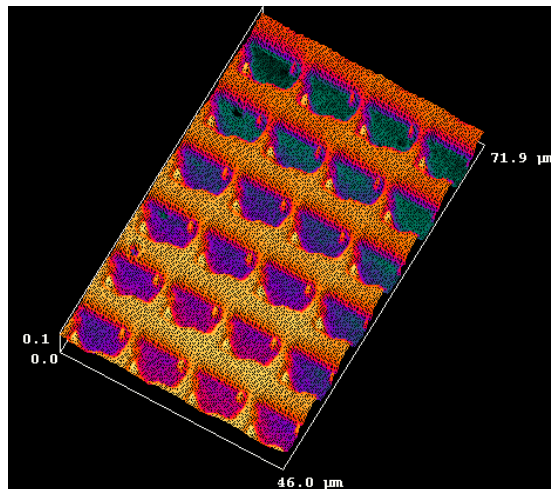


Figura 6. Interpolación a 3D de la figura 5 con sus respectivas medidas.

Estas medidas identifican el tamaño de cada píxel que se calcula con la relación de su tamaño en píxeles sobre la medida real en μm , por lo tanto cada píxel de la imagen digital tiene un tamaño de $0.16 \mu\text{m}$.

A continuación se binarizó la imagen, aclarando que la referencia de la imagen está en la parte superior izquierda y las distancias positivas se miden de izquierda a derecha y de arriba abajo (figura 7). Seguidamente se encuentran los respectivos centroides en la tabla 3, solo se tomaron los que aparecen en la figura 7, porque en la toma de la imagen se presentó una inclinación micrométrica de la muestra, la que no permitió una iluminación uniforme y por lo tanto, al realizar la binarización sus centroides no se hallaron con exactitud. En la sección 2.1.2 se aclara la importancia de estos centroides respecto a la situación espacial de los mismos y su respectiva representación en el espacio recíproco.

Tabla 3. Valores encontrados de los centroides

X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
29.2450	35.1641	102.0564	36.7444	174.3399	37.3226	246.5080	37.3233
28.9190	108.1647	101.7171	109.2713	173.9663	110.3888	246.0117	110.2721
28.7828	180.7006	101.3189	182.0074	173.7580	182.3103	245.5898	182.7
29.3296	252.5868	100.7762	252.0919	173.0929	252.0985	245.3935	251.3739

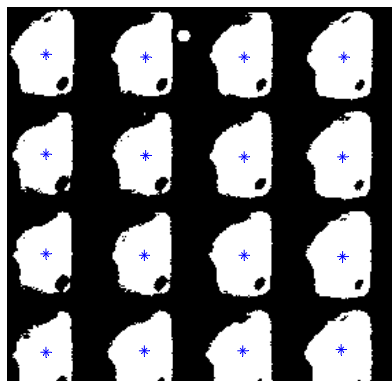


Figura 7. Imagen de la LCD a 100x con sus respectivos centroides

2.1.2 Caracterización y reconstrucción del dispositivo de muestreo.

La imagen adquirida tiene 275 píxeles de alto y 434 píxeles de ancho, sin embargo la importancia de este análisis fue encontrar según el tratamiento de la imagen qué tanto están separados los píxeles efectivos de la LCD con respecto a la imagen

digitalizada al microscopio y así poder interpolar con una imagen sintética una simulación de los fenómenos que se presentan durante el transcurso de la investigación. Se clasificó entonces el píxel más representativo de donde se tomó la imagen binarizada de un píxel de la LCD reconstruida (figura 8) mejorando a su vez el umbral y rellenando los espacios donde se presentaban por las aberraciones en la lente o simplemente ruido difícil de suprimir en la misma.



Figura 8. Píxel efectivo de la LCD binarizado

Los promedios de los centroides de la imagen estudiada en la figura 7 se observan en la tabla 4, y a partir de estos se tiene el objetivo de reconstruir una imagen binaria con muestras repetidas de la figura 8 para estudiar su espectro.

Tabla 4. Promedios de los centroides de la imagen.

X	Y	X	Y
29.0691	36.6386	173.7893	181.9296
101.4672	109.5242	245.8758	252.0378

Finalmente se obtiene que la separación promedio entre cada píxel efectivo de la imagen corresponde a 72 píxeles en x y 72 píxeles en y , con lo que se logra una extrapolación como la que se muestra en la figura 9.

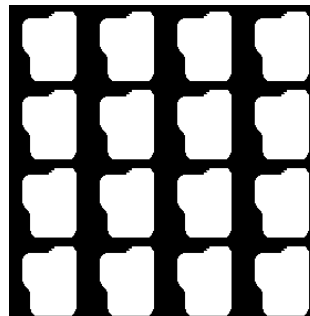


Figura 9. Extrapolación de la figura 8.

La figura 10 representa con asteriscos los centroides finales de la imagen, a su vez con símbolos "+" los calculados en la figura 7, el hecho que los píxeles de los

centroides no hayan quedado igualmente espaciados se debe principalmente a que la imagen de la figura 8 es la correspondiente a un píxel correctamente binarizado y tratado, por lo tanto su extrapolación no presenta el ruido inicial debido a la iluminación y a la detección.

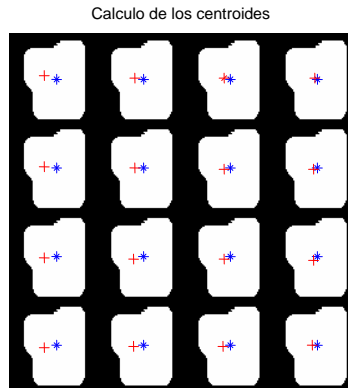


Figura 10. Centroides de la figura 9 y comparación con los de la figura 7.

Gracias a la reconstrucción de la figura 10 se observó su espectro y obtenido éste teóricamente, el posible error que arrojaría a la frecuencia esperada (difracción que se genera). En la figura 11 se puede observar la región de interés primordial de la magnitud de la transformada de Fourier de la LCD simulada con una matriz de 12×12 píxeles² reales (simulación 864×864 píxeles²).

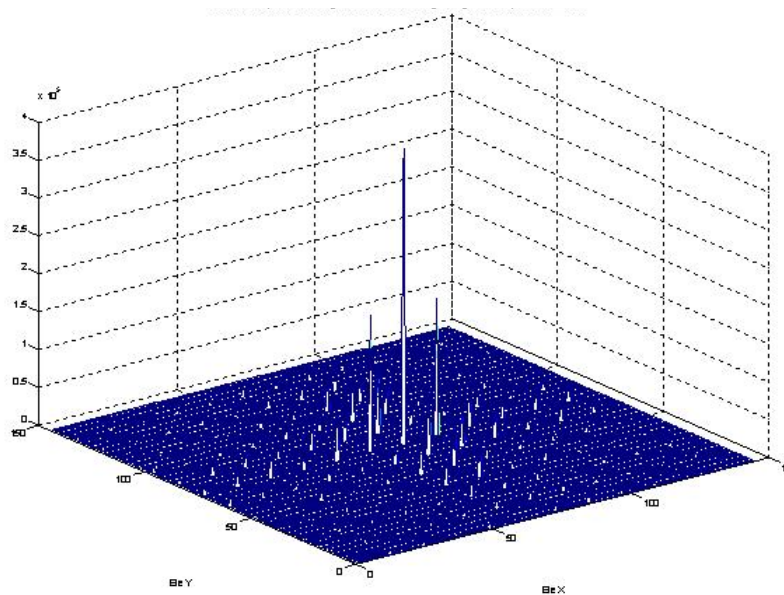


Figura 11. Magnitud simulada del espectro de la región central de la LCD

Se escogió esta área ya que los diferentes cálculos realizados, para encontrar la densidad espectral de energía, son los necesarios y estos mismos se repetirán con menor intensidad en las distintas regiones de la imagen debido a la repetición del patrón y su posición con respecto al origen. Una prueba sencilla de escritorio se hizo comparando los máximos de todas las regiones con el de la región central, y finalmente se encontró, que en estos se obtiene el máximo de la imagen en la región central como se había analizado, teniendo un máximo 350 veces más grande en la imagen simulada, esto último como consecuencia del tamaño y forma del píxel.

En la figura 12 se observa la imagen simulada de una región en los extremos de la misma donde se deduce fácilmente que su magnitud es mucho menor que la obtenida en la figura 11.

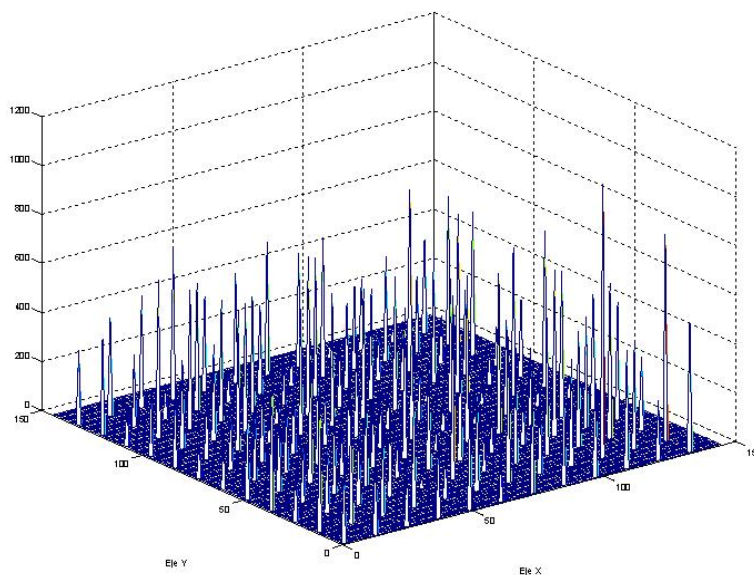


Figura 12. Magnitud simulada del espectro de una región extremo

Con estas simulaciones se observó finalmente que la densidad espectral de energía de la imagen tendrá repeticiones atenuadas de los parámetros por la periodicidad de la imagen, además la transformada de Fourier permite observar que por la forma rectangular del patrón repetitivo el espectro tendrá una envolvente tipo $\text{sinc}(x)/x$.

Haciendo los cálculos pertinentes, el espectro de la imagen se observará en 0,088 mm en sentido vertical y horizontal (ecuación 9).

$$\frac{N}{\lambda d} - \frac{2 * \pi * T}{\lambda d} = 0 \Rightarrow N = 2 * \pi * T = 2 * \pi * 14(10^{-6}) = 0,088\text{mm} \quad (9)$$

Donde N es el tamaño de cada píxel en el espacio recíproco, λ es la longitud de onda, d es la distancia focal y, T es el periodo en el espacio directo (en x y y). Por lo tanto toda la densidad espectral está en un área de 0,9x0,6 mm.

2.2 DISEÑO GENERAL DEL PROTOTIPO

Para el diseño del prototipo mostrado en la figura 13, se tienen en cuenta las características observadas por la pantalla de cristal líquido y el DSP para poder adecuar los demás elementos.

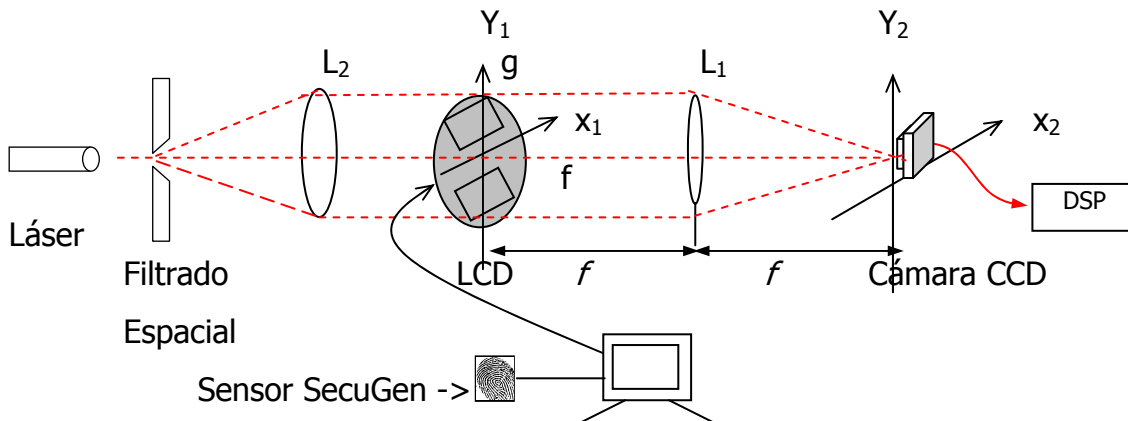


Figura 13. Diseño general del prototipo.

Como la matriz LCD caracterizada tiene 1024(H) x 768(V) píxeles con un área activa de 14,33mm (H) x 10,75 mm(V)[21] se decidió adquirir un sensor en el que se pudiera mostrar punto a punto, la huella digital sensada además de una que estuviese almacenada en una base de datos. Por lo tanto en la LCD el sistema se presentará de la forma mostrada en la figura 14.

En este caso las huellas deben acoplarse a nivel horizontal en la LCD cumpliendo con las restricciones que se dieron en la ecuación 5 y el tamaño en píxeles de la LCD, por lo tanto las imágenes de las huellas dactilares deben tener un tamaño menor a por lo menos la tercera parte de su distancia horizontal lo que equivale a 341,3 píxeles, así se escoge que los píxeles que debe contener la imagen de la huella dactilar en su anchura son 256, para que la misma no quede en los extremos de la zona activa. Por otro lado, la altura debe ser menor que la mitad del tamaño vertical de la LCD el cual corresponde a 384 píxeles.



Figura 14. Tamaño de la LCD en mm y píxeles.

De acuerdo a los anteriores resultados y después de realizar una búsqueda de equipos comerciales se ha encontrado que el sensor SecuGen se ajusta a las medidas proporcionadas por la LCD, las cuales son de 260x300 píxeles², y este sensor es de 1,28 x 1,5 cm, que es un tamaño adecuado para el prototipo compacto (Figura 15), teniendo en cuenta que cumple con el estándar del FBI de una resolución de 500dpi. Así se restringe el prototipo a que las características de la imagen de las huellas dactilares sean del tipo indicado aquí.

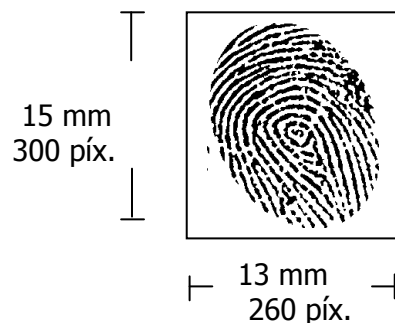


Figura 15. Tamaño del sensor en mm y píxeles.

Caracterizado el sistema de adquisición de huellas en la matriz de puntos, se procedió con la caracterización del sistema de adquisición de la imagen al DSP. Se escogió la cámara CCD CG55H de la empresa shopeio pues tiene una buena resolución sin hacerse necesario el uso de los colores (de la misma forma que la LCD), y de igual forma de un tamaño total de $37,5 \times 40 \times 27,5 \text{mm}^3$. El sensor de ésta es de $1/3''$ (figura 16), lo cual es una medida óptima y se refleja con más precisión en los cálculos realizados más adelante en este capítulo (ecuaciones 11 a 15).



Figura 16. Cámara CCD CG55H con lente. Referencia: www.shopeio.com

La fuente de luz utilizada para alimentar el sistema óptico debe ser una onda plana, por lo tanto se utiliza un sistema de diodo láser, un filtro espacial y finalmente una lente colimadora. Debido a estas características, se escogió un diodo láser verde (532nm), y un sistema de filtrado como se muestra en la figura 17.

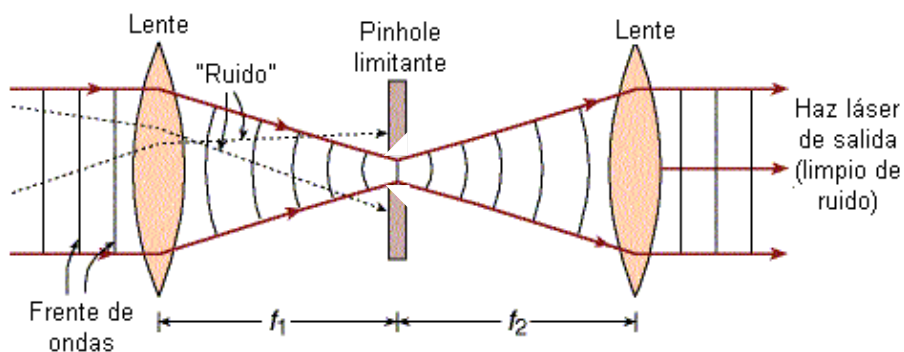


Figura 17. Sistema de filtrado espacial.
Referencia: <http://www.um.es/LEQ/laser/Ch-8/C8s1t2p11.htm>

Como último detalle se caracteriza la lente de Fourier; para la cual se debe saber su distancia focal y de otra parte, el diámetro debe ser mayor que la longitud

diagonal del área efectiva de la pantalla de cristal líquido. Además se debe tener en cuenta que en la cámara CCD se va a observar el espectro conjunto de las huellas dactilares, y por esta razón se tomará un modelo que relacione la frecuencia espacial perteneciente a las líneas y las discontinuidades propias de las huellas para poder realizar la caracterización de las mismas.

Debido a que las huellas dactilares deben expresarse en un modelo frecuencial, se hizo el ejercicio de visualizar las mismas, y se realizó un corte vertical u ortogonal al periodo espacial predominante en el espacio directo, para poder encontrar de allí, la región donde el número de líneas es mayor y la máxima frecuencia espacial se pueda modelar con una función senoidal en una dimensión (Ecuación 10).

$$\int \cos\left(\frac{x}{b}\right) \ell^{\frac{-i2\pi x x'}{\lambda f}} dx = \frac{1}{2} \int \left(\ell^{\frac{ix}{b}} + \ell^{\frac{-ix}{b}} \right) \ell^{\frac{-i2\pi x x'}{\lambda f}} dx$$

$$= \frac{1}{2} \int \ell^{\frac{-i2\pi x}{\lambda f} \left(x' - \frac{\lambda f}{2\pi b} \right)} dx + \frac{1}{2} \int \ell^{\frac{-i2\pi x}{\lambda f} \left(x' + \frac{\lambda f}{2\pi b} \right)} dx = \frac{1}{2} \left[\delta \left(x' - \frac{\lambda f}{2\pi b} \right) + \delta \left(x' + \frac{\lambda f}{2\pi b} \right) \right] \quad (10)$$

En esta ecuación, b es el periodo espacial y por lo tanto se va a reflejar en el espectro de la imagen adquirida por la CCD. De la misma forma, λ es la longitud de onda de la fuente de luz (532nm), x la variable espacial, x' la variable recíproca o frecuencial de la x espacial, y f corresponde a la distancia focal donde se debe colocar la lente de Fourier calculada. Como la máxima frecuencia espacial no puede estar por fuera de los márgenes que se calcularon en la expresión anterior, se utiliza el sensor de la cámara para realizar los cálculos finales y elegir una distancia focal adecuada, esto se observa mejor en la figura 18.

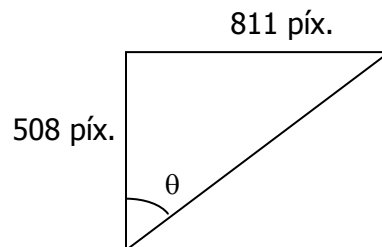


Figura 18. Sensor cámara CCD

Como se mencionó el sensor de la cámara es de 1/3", por tanto se tiene que:

$$\tan(\theta) = \frac{811}{508} \Rightarrow \theta = 57,9375^\circ \quad (11)$$

Además, las medidas reales de los extremos son:

$$\frac{2,54}{3} * \cos(57,9375^\circ) = 4,494mm \quad (12)$$

$$\frac{2,54}{3} * \text{sen}(57,9375^\circ) = 7,175mm \quad (13)$$

Teniendo en cuenta que estos son los valores límite de la cámara, se utiliza el de menor longitud y se hacen los cálculos con este mismo para que el sensor tome la mayor cantidad de energía. Como además se obtendrá la densidad espectral de energía conjunta se puede aprovechar la simetría que tiene esta con respecto al eje 0 y se tendrá que:

$$x'_{\text{máx}} \geq \frac{\lambda f}{\pi b} \Rightarrow f \leq \frac{\pi \cdot b \cdot x'_{\text{máx}}}{\lambda} = \frac{\pi \cdot 14(10^{-6}) \cdot 4,494(10^{-3})}{532(10^{-9})} = 0,3715 \text{ m} \quad (14)$$

En esta última ecuación se puede observar que la distancia focal debe ser menor que 37 cm para garantizar que el espectro quede dentro del sensor CCD y no mucho menor que este valor ya que su tamaño sería muy reducido perdiendo resolución espacial.

Una descripción de los elementos tenidos en cuenta para el diseño son los presentados en la tabla 5.

Tabla 5. Especificaciones técnicas de los dispositivos

Sensor de Huellas		Cámara miniatura	
Referencia	Secugen	Referencia	CG55H
Resolución	500dpi	Tipo de sensor	SONY 1/3 EX-VIEW
Tamaño de imagen	260x300 píxeles ²	Píxeles ² efectivos	795x596
Tamaño	1,5 cm x 1,5 cm	Lente	C / CS Mount
Tiempo de adquisición	1,3 s	Tamaño	37,5x40x27,5 mm ³
Diodo Láser [10]		Otros	
Referencia	BWT50E	Objetivo microscópico	40X Jena
Longitud de onda	532+/-1 nm	Pinhole	10µm newport
Paquete	35(H)x50(W)x100(L) mm ³	Base filtrado espacial	Edmund-Optics
Lente de Fourier			
Referencia	SORL		
Distancia focal	36 mm		
Diámetro de la lente	76 mm		

Con este diseño, se continúa con las simulaciones del prototipo, que se pueden consultar en el capítulo siguiente.

3. SIMULACIONES DEL PROTOTIPO

En el desarrollo del capítulo, se muestran los resultados encontrados a partir de los diferentes algoritmos diseñados. En la primera parte se hace una descripción de los elementos para realizar la simulación del proceso a llevar a cabo en el prototipo, seguidamente los resultados, y al final un análisis de los datos. Todo esto con el fin de que en la construcción del prototipo se tuviese la menor cantidad de errores posible.

3.1 DESCRIPCIÓN DE LOS ELEMENTOS Y LAS PRUEBAS

Inicialmente se seleccionó una base de datos cuyas imágenes fuesen tomadas con un sensor similar al caracterizado. Se escogió una base de datos de la empresa Verifinger SDK con características similares a las estipuladas en el diseño [20].

La base de datos se compone entonces de 408 imágenes compuestas de la siguiente forma: 9 usuarios, 6 dedos por usuario, 8 muestras por dedo, con excepción de un usuario que registraba solo 3 dedos con el mismo número de muestras por dedo. La resolución de estas imágenes es de 480x504 píxeles² de 8 bits.

Las imágenes de esta base de datos fueron tratadas para poder obtener en lo posible la imagen efectiva de la huella dactilar, luego se normalizaron con respecto a su tamaño y finalmente respecto a la huella de mayor energía encontrada en la base de datos.

Para ejecutar la verificación se lleva a cabo una operación de correlación de la imagen de entrada con una imagen de huella dactilar diferente. Esta operación está descrita por la siguiente ecuación:

$$f \otimes g = f * g^* = F^{-1} \{ F \cdot G^* \} \quad (15)$$

La ecuación anterior describe una forma de encontrar la operación correlación utilizando las propiedades de la transformada de Fourier [9], esto debido a la similitud a la experiencia realizada ópticamente y en donde se aprovecha el espacio de cálculos en memoria computacional.

Como se describió en la sección 1.3, si hay agudeza en el pico de correlación, se tiene una buena medida de desempeño y, por lo tanto se presenta entonces una aceptación, mientras si el pico no es agudo se presenta un rechazo, por esta razón la correlación fue la operación escogida para verificación de huellas dactilares y mediante la cual se realizó la primera simulación.

Por otro lado, como es conocido en [3] la correlación tiene problemas cuando las imágenes están rotadas una respecto a la otra a más de 5° pero no cuando están trasladadas, por lo tanto, como al hacer un registro de una huella dactilar los equipos tienen errores y los usuarios también, es muy probable que la imagen no sea registrada de la misma forma como se encuentra en la base de datos. Por esta razón, en una segunda simulación se usaron varias versiones rotadas de las imágenes originales.

Finalmente, se utilizaron algoritmos basados en la transformada de Fourier para encontrar las métricas de desempeño y evaluar la confiabilidad del correlador. Sin embargo, algunas de las definiciones fueron probadas para observar su comportamiento digital ante diferentes parámetros, lo cual se puede observar al finalizar la sección 3.2.

3.2 RESULTADOS INICIALES

Al observar los resultados de la simulación, algunos parámetros que normalmente se visualizan en la correlación cruzada de otro tipo de imágenes fueron muy distintos en las huellas dactilares, un ejemplo evidente fue el máximo valor numérico de la imagen de correlación. En la tabla 6 se pueden observar algunos resultados de los máximos de autocorrelación, donde las columnas de UsuarioAA corresponden a la correlación de las imágenes registradas por el mismo usuario y su mismo dedo pero diferente toma, mientras las columnas de UsuarioAB son de usuarios distintos al que se registra. El valor uno (1) dentro de la tabla indica la autocorrelación de la imagen.

Tabla 6. Resultados de máximos de correlación (normalizados a la autocorrelación)

Usuario 1		Usuario 2		Usuario 3	
UsuarioAA	UsuarioAB	UsuarioAA	UsuarioAB	UsuarioAA	UsuarioAB
Máximos	Máximos	Máximos	Máximos	Máximos	Máximos
0,40817474	0,51678145	0,53754195	0,54745202	0,88526023	0,27380801
0,55719405	0,25978188	0,4883526	0,81448359	0,50839423	0,49089788
1	0,55750419	0,66524162	0,71929321	0,55393985	0,32352688
0,48747724	0,32687443	1	0,8141651	0,51313491	0,442066
0,58899423	0,61666226	0,72117408	0,80899185	0,57609179	0,38545611
0,7813213	0,50762824	0,66758532	0,69866442	0,62237568	0,44964918
0,54880887	0,25715598	0,48875875	0,88766122	1	1,11297661
0,58136613	0,25399803	0,53887292	0,79432626	0,48797022	0,40959735

Es posible resaltar que los resultados sombreados son desfavorables si se tomase un umbral de 0.5, ya que en casos de falso rechazo, los valores deberían ser próximos a uno y en caso de falsa aceptación, cercanos a cero, aclarando de igual forma que la normalización de los resultados con respecto a la autocorrelación se hizo con el fin de observar el comportamiento de la relación entre diferentes usuarios; sin embargo, los valores máximos (números 1 en la tabla) de estas imágenes son muy distantes entre sí, y se pueden enumerar de izquierda a derecha máximos de 712'561.267, 639'105.798 y 365'137.062.

Esta primera prueba, se hizo con el fin de corroborar que las huellas dactilares tienen particularidades que hacen difícil su procesamiento lineal, y se observa claramente cuando los máximos de la correlación cruzada con usuarios distintos, son mayores al de la correlación cruzada con registros distintos del mismo usuario (tabla 6). Esto se debe a que las franjas características de la imagen pueden coincidir en muchos puntos con otras imágenes, lo cual hace que los máximos sean altos, pero no produzcan picos de correlación. Los resultados en estos casos son los observados en la figura 19a y 19b.

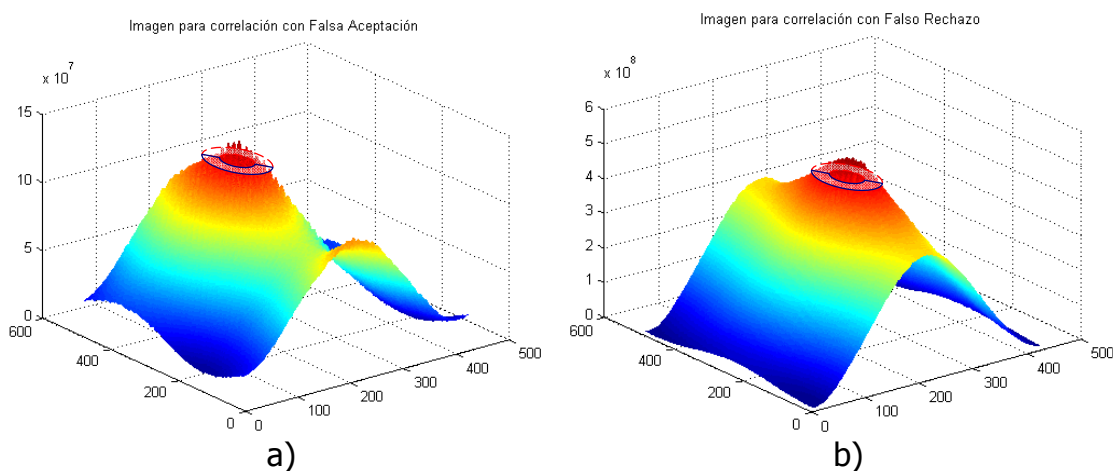


Figura 19. Imagen de correlación, probable: a) Falsa aceptación b) Falso rechazo

En la figura 19a, se presenta la imagen de correlación de dos huellas dactilares de diferente usuario, en esta se pueden observar discontinuidades que tienden a sobresalir de la superficie superior en general, además si se puede recortar, sin incluir los picos, un contorno circular próximo a ellos (alrededor de la cresta de la correlación), se puede observar que la variación (estadística - varianza) de este último no es alta.

Por otro lado, en la figura 19b se presenta la imagen de correlación de dos huellas dactilares del mismo usuario y de su mismo dedo, pero con diferente toma. Allí, no se observan protuberancias destacables y por el contrario, no existe una superficie que sea aproximadamente plana, alrededor de ella.

Gracias a este análisis fue posible entender que un pico visible (agudo) debe ser buscado minuciosamente y, en general en estas imágenes se observan máximos, pero los picos no son tan agudos, y entonces, los valores máximos no son discriminantes en la simulación.

A partir de estas pruebas, se produjo la siguiente hipótesis: "las huellas se encontraban de alguna forma rotadas y trasladadas con respecto a la posición de la mayoría de las huellas", por lo tanto se realizaron operaciones para obtener la transformada de Fourier y, con su magnitud, un posible ángulo de rotación de la huella dactilar efectiva con respecto al contorno rectangular de la imagen [8]. Esto se hizo con el objetivo de encontrar un ángulo de referencia para que la imagen de entrada y la comparada no tuviesen los problemas de rotación citados en la sección 3.1. Sin embargo, la orientación irregular de algunas huellas dactilares no permitía que en el espectro se reflejaran ángulos notables (figura 20).

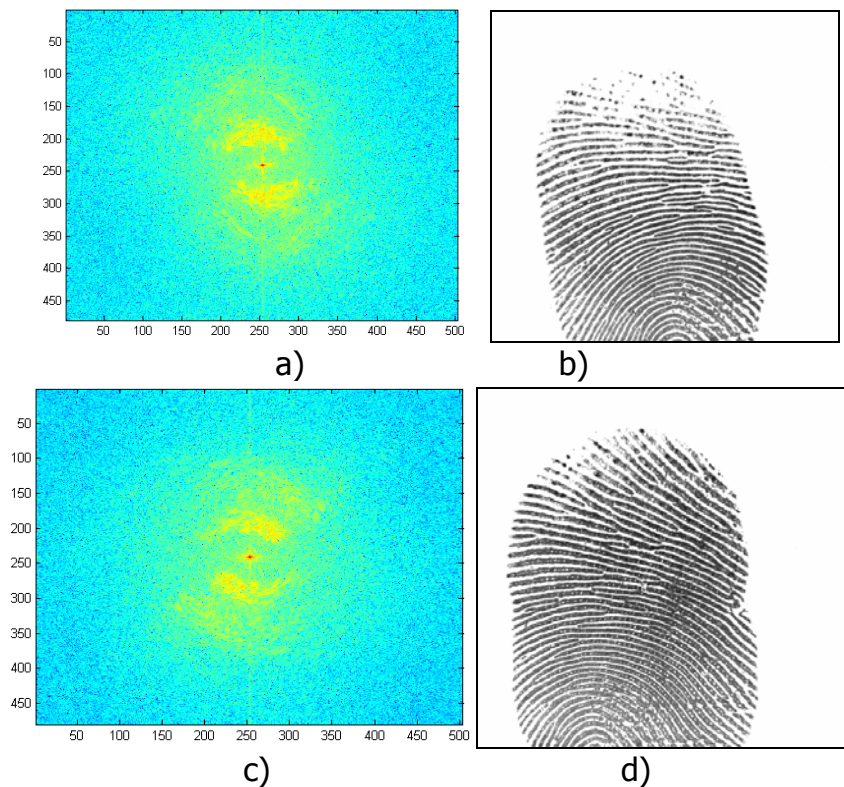


Figura 20. a) y c) Densidad Espectral de Energía de b) y d). b) y d) Imágenes tomadas de la base de datos

En la figura 20b es notable una rotación de la imagen con respecto al contorno, sin embargo en el espectro no es muy fácil notarlo, y por el contrario, en la figura 20d no existe rotación de la imagen y en el espectro se observa una orientación de aproximadamente 10° en el sentido de las manecillas del reloj con respecto a la línea vertical que corta el punto central. Con estos resultados, fue difícil validar la hipótesis de encontrar un posible ángulo de rotación de la huella, ya que los campos de orientación de la misma incidían en el ángulo de la densidad espectral encontrada y el algoritmo se podría equivocar con facilidad.

Después de observar estos problemas, se realizó la búsqueda de algún otro patrón que fuese un poco más selectivo, de donde se escogió el PSR, para saber en donde se registra un pico de correlación y por lo tanto tomar esta medida como un umbral de comparación en la verificación. Los resultados arrojados por este criterio de calidad fueron mejores; observándose valores más altos del parámetro PSR para correcta verificación (1-FNMR) y más bajos para falsa aceptación (FMR), sin embargo, se podían observar resultados que podían indicar un falso rechazo más fácilmente que un porcentaje de falsa aceptación.

Después, se diseñaron pruebas a partir de algoritmos de rotación con el fin de encontrar un ángulo en el que el PSR de la imagen de correlación tuviese un valor más alto. En esta prueba se mejoraron un poco los resultados, pero en algunos casos se observaban errores dados por los algoritmos existentes de rotación.

En la figura 21, se muestra como cambia el parámetro PSR en la autocorrelación de dos imágenes de huellas dactilares a diferentes ángulos de rotación, teniendo en cuenta que la imagen efectiva tenía un contorno rectangular amplio en el que no se perdiera información al realizar cada una de las rotaciones.

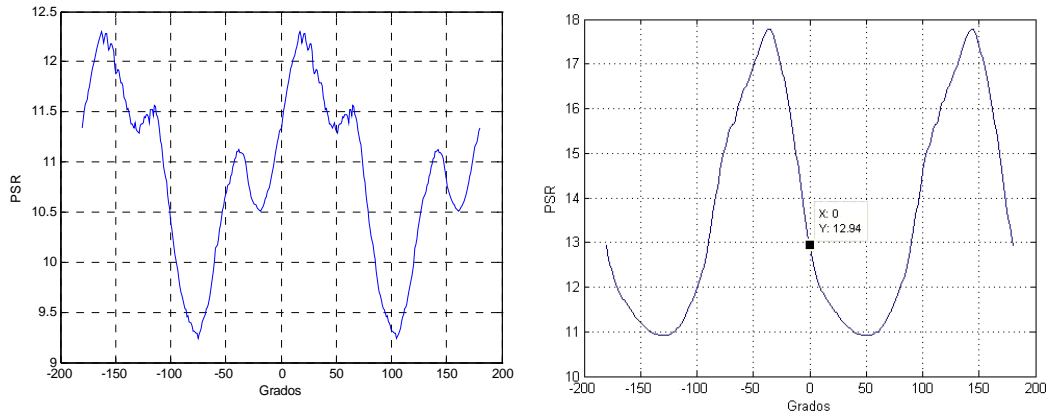


Figura 21. PSR a diferentes ángulos de rotación

Debido a los cambios tan notables en el parámetro PSR en cada uno de los ángulos, se decidió observar más a fondo el algoritmo de rotación y hacer algunas pruebas adicionales.

Inicialmente se diseñó una imagen con simetría circular que estuviese formada de anillos concéntricos (Figura 22) donde su origen estuviese situado en el centro geométrico de la imagen, esto, para observar que tan grande era el cambio de la misma con respecto a su parámetro PSR.

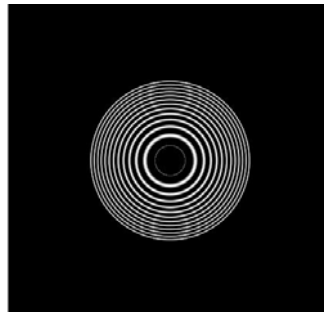


Figura 22. Imagen circular centrada en la imagen.

Los resultados encontrados a partir de esta imagen y usar una base cuadrada como máscara para la búsqueda del PSR fueron los observados en la figura 23.

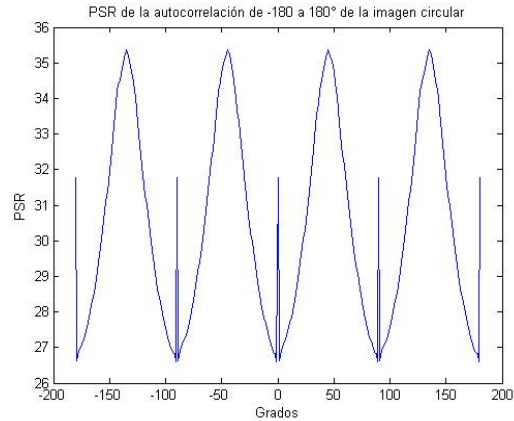


Figura 23. PSR de la figura 22 a diferentes ángulos de rotación

De estos resultados se concluyó que el área de la máscara del PSR no debería ser un cuadrado hueco sino un círculo hueco que de alguna forma encontrase poca variación en este parámetro con respecto a la rotación, de allí se obtuvieron los resultados mostrados en la figura 24.

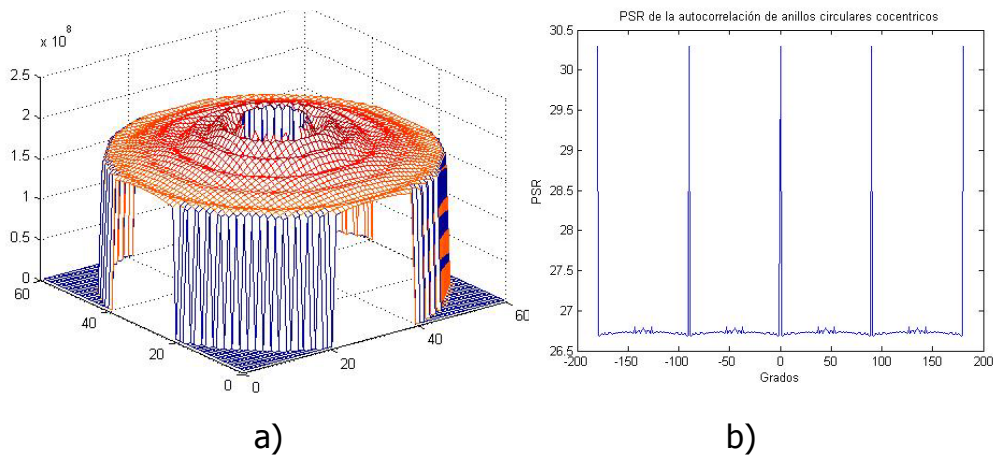


Figura 24. a) Base del PSR b) PSR de la figura 22 a diferentes ángulos

En la figura 24 se siguieron observando algunos errores (margen de valores con respecto al máximo en la figura 24 b) cercanos al 10% que se deben al algoritmo mismo, sin embargo se realizó una prueba adicional de donde se obtuvo lo mostrado en la figura 25.

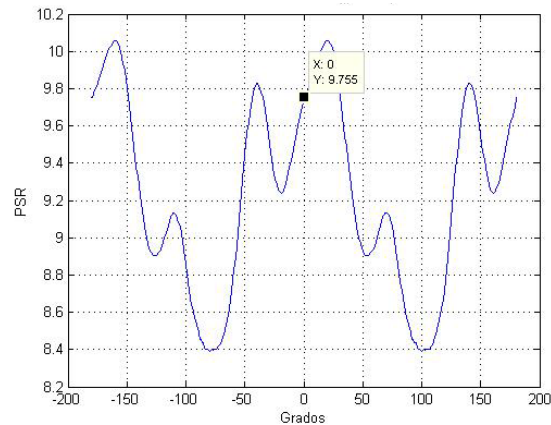


Figura 25. PSR a diferentes ángulos de rotación tomado con base circular

Aunque el cambio observado por el contorno circular no es el más significativo, se alcanza a reducir el error en aproximadamente un 5% con respecto al contorno rectangular. Así, se concluyó de estas pruebas, que el PSR cambia mucho debido a la rotación no lineal que hacen los algoritmos en cada píxel de la imagen con respecto al centro de la imagen, incluso utilizando las técnicas propuestas por los mismos para que se tengan las mejores aproximaciones con técnicas de interpolación.

Estudiado lo anterior, se realizó una búsqueda adicional de la región de acción espectral de las huellas dactilares, con el fin de mejorar la calidad de las imágenes originales y el patrón del PSR tuviese una mejor respuesta. De esta manera, se sumaron cada una de las magnitudes de las imágenes en el espacio de Fourier y se diseñó un filtro a partir de ésta con las características promedio. Esta implementación se observa con más detalle en la figura 26.

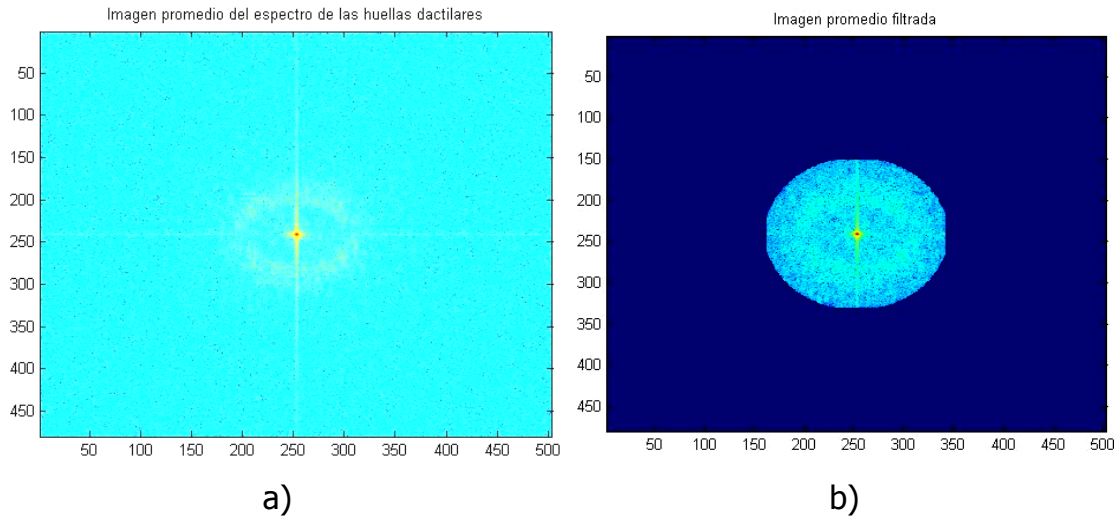


Figura 26. a) Imagen espectral promedio. b) Imagen espectral promedio filtrada.

La figura 26a muestra el logaritmo de la sumatoria de la densidad espectral de energía de las imágenes, mientras la figura 26b el filtro diseñado a partir de ésta. En general, la información bloqueada pertenece a las altas frecuencias producidas por los poros que se tienen en la piel y al ruido adicional de la adquisición de la imagen.

3.3 ANÁLISIS DE DATOS

En esta sección se muestran los resultados que se obtuvieron en simulación y con ellos los umbrales para discriminar la falsa aceptación y el falso rechazo.

El estudio de los umbrales se hace a partir de los parámetros PSR, PCE y SNR, que generalmente se usan como métrica para evaluar un correlador. Inicialmente, en la Tabla A1. **Estudio para encontrar umbral de aceptación.** del anexo A se muestran los porcentajes de la población comparada con representaciones de la distribución genuina, en busca de los umbrales de falso rechazo y, en la Tabla A2. **Estudio para encontrar umbral de rechazo.** un recorrido por la distribución impostora, buscando la falsa aceptación. En las tablas del anexo A se listan los

resultados de comparación a partir del parámetro PSR los cuales son mostrados en el título del eje horizontal y de donde se buscan los posibles umbrales.

Estos resultados se representan gráficamente en la figura 27, contrastando los errores tipo I y II que se enunciaron en el capítulo 1 en la sección 1.4. Allí, se indica claramente con líneas punteadas los datos correspondientes a la distribución genuina y con una línea continua los de la distribución impostora. De la figura 27 se puede notar claramente que la distribución impostora está bien definida pues los datos están concentrados en puntos determinados, siendo incluso en varios puntos valores cercanos al 9% y la mayoría de usuarios por encima del umbral 5 valores cercanos o iguales al 0%, mientras la distribución genuina no tiene el mismo comportamiento ya que incluso en umbrales cercanos al 9% de la distribución impostora se tienen valores cercanos al 4% de la población genuina y por esta razón el encontrar errores tipo I y II con el PSR como un parámetro decisorio final no es congruente.

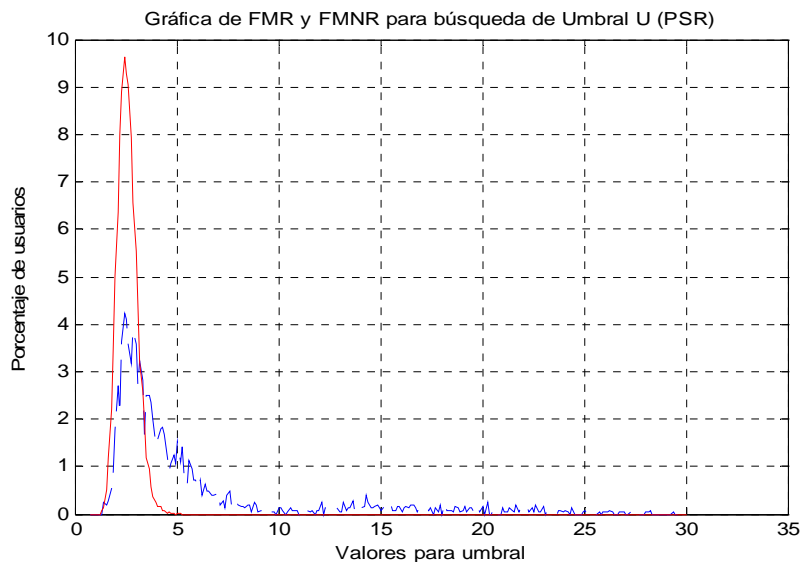


Figura 27. PSR de las correlaciones para búsqueda de umbral de verificación.

De manera similar y debido al comportamiento del PSR, se tomaron los datos de las correlaciones de las huellas dactilares normalizadas respecto a su tamaño y la

mayor energía de las mismas, pero en este caso con respecto al parámetro PCE. El resumen de los resultados es presentado en la figura 28.

Allí, es fácil observar que nuevamente hay una distribución impostora bien definida (línea continua roja) con porcentajes de usuarios aproximadamente del 12% que permiten visualizar la gráfica más concentrada en estos puntos, mientras que la distribución genuina (línea punteada azul) está un poco más dispersa en el margen de valores dados, sin embargo en comparación con los datos observados en la figura 27, hay un porcentaje de población menor (cercano al 3%) en la región donde la distribución impostora tiene el 12%, pero de la misma forma se encuentra un índice de población cercano al 2% distribuidos en diferentes lugares de la gráfica donde la distribución impostora es 0%. En cualquiera de los casos, puede ser posible que el error tipo I (falsa aceptación) sea mínimo, pero el error tipo II (falso rechazo) podría ser alto. Estos argumentos sirvieron para hacer una prueba más, con otro parámetro de la correlación.

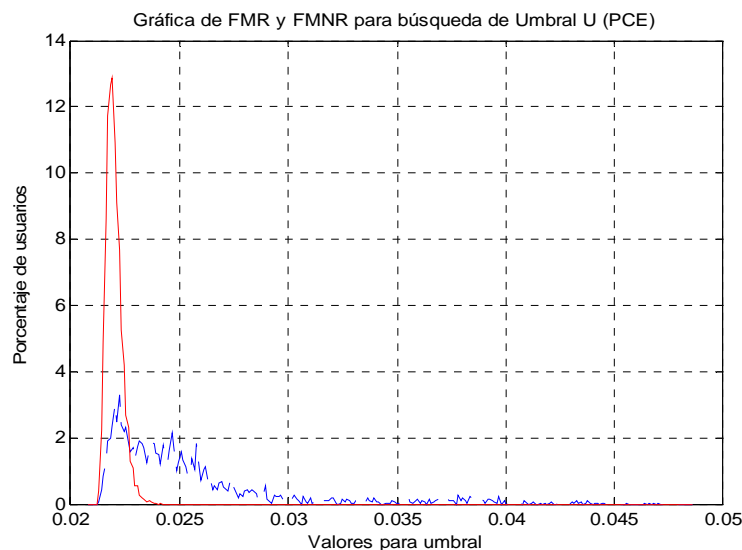


Figura 28. PCE de las correlaciones para búsqueda de umbral de verificación.

El parámetro escogido ha sido el SNR, pero en la experiencia, se debió utilizar su inverso multiplicativo pues por lo general la imagen de la huella dactilar al hacer

correlación genera muchos picos que se toman como ruidosos por las altas frecuencias que se presentan al incluir las minucias.

Los resultados igualmente fueron representados en la figura 29, la cual muestra dos distribuciones un poco más cercanas a las características buscadas inicialmente (sección 1.4). Los porcentajes de población encontrados aquí no son tan altos como los observados en las anteriores figuras, no obstante los valores máximos de ambas distribuciones no están contenidos el uno en el otro, lo cual es una aproximación más cercana a un umbral de verificación.

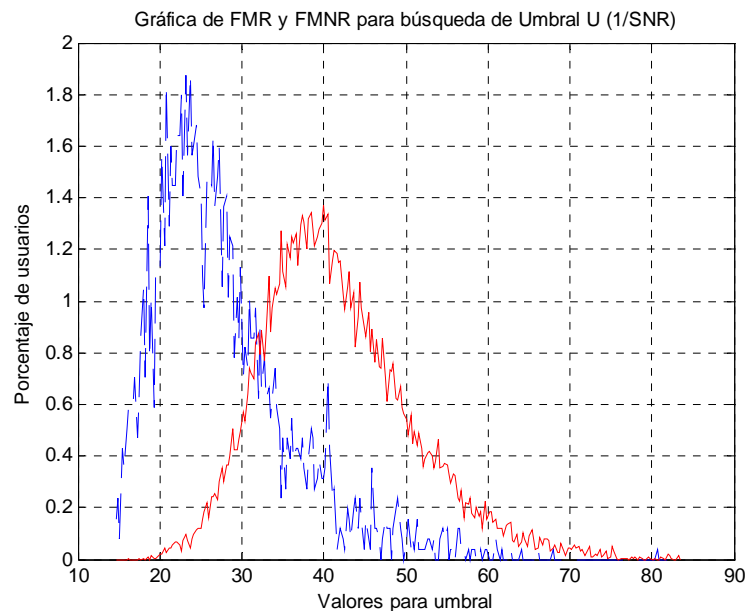


Figura 29. 1/SNR de las correlaciones para búsqueda de umbral de verificación.

Los resultados observados inicialmente para las huellas dactilares adquiridas por el sensor caracterizado (sólo normalizadas) y tomando los mismos parámetros, se muestran en las figuras 30 a 32.

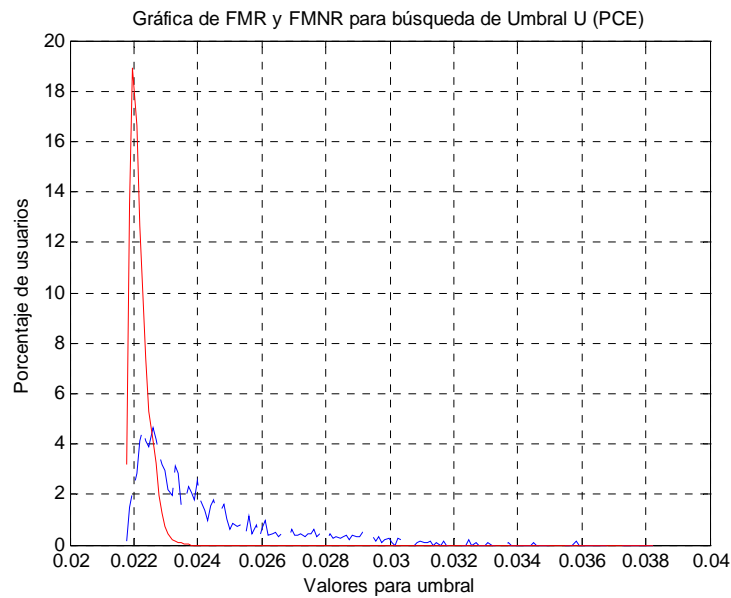


Figura 30. PCE de las correlaciones para búsqueda de umbral de verificación para el sensor caracterizado y correlaciones normalizadas.

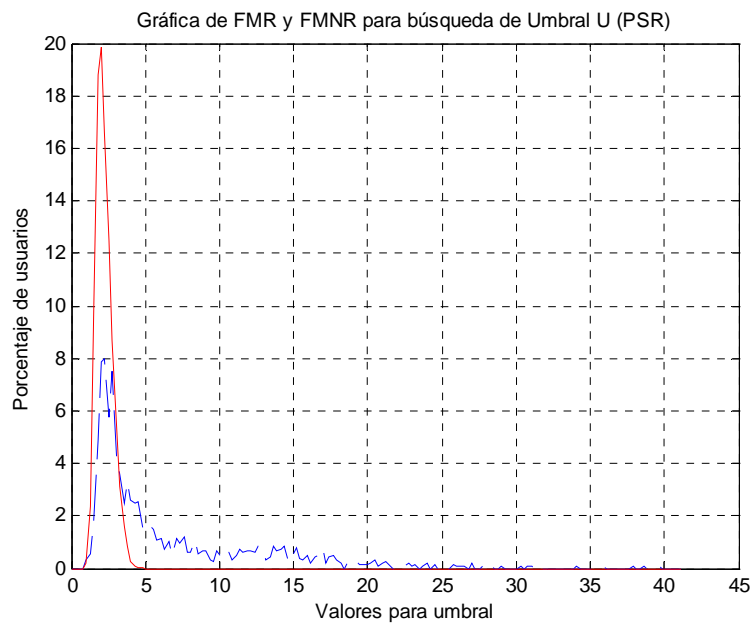


Figura 31. PSR de las correlaciones para búsqueda de umbral de verificación para el sensor caracterizado y correlaciones normalizadas.

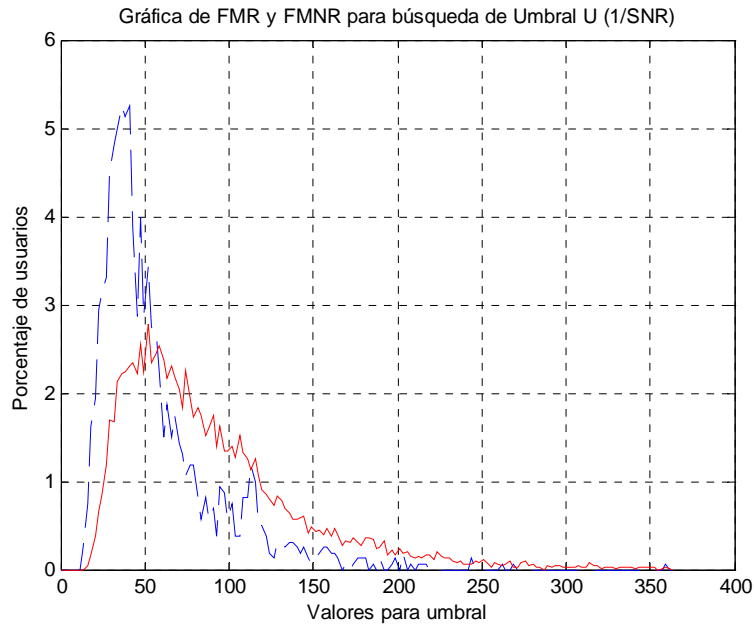


Figura 32. 1/SNR de las correlaciones para búsqueda de umbral de verificación para el sensor caracterizado y correlaciones normalizadas.

Los resultados para las huellas filtradas se pueden observar las figuras 33 a 35.

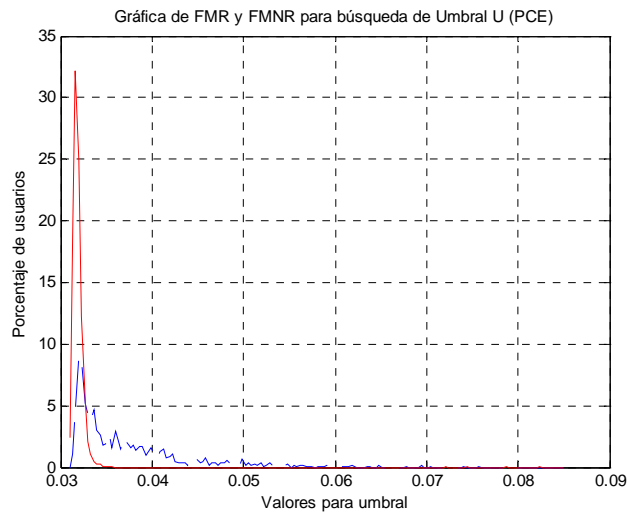


Figura 33. PCE de las correlaciones para búsqueda de umbral de verificación, huellas filtradas y correlación normalizada.

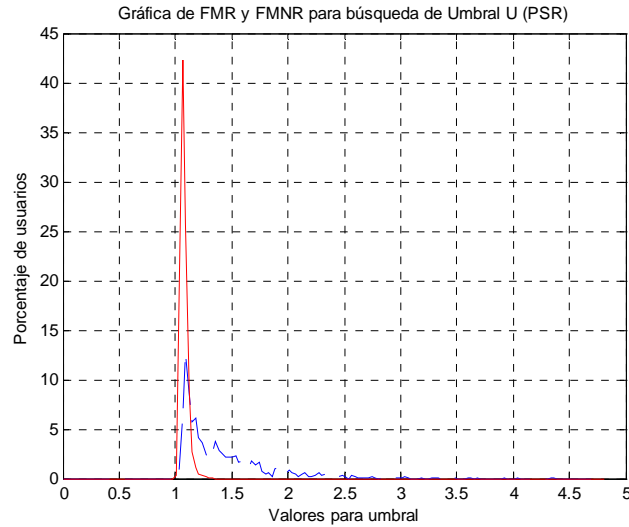


Figura 34. PSR de las correlaciones para búsqueda de umbral de verificación, huellas filtradas y correlación normalizada.

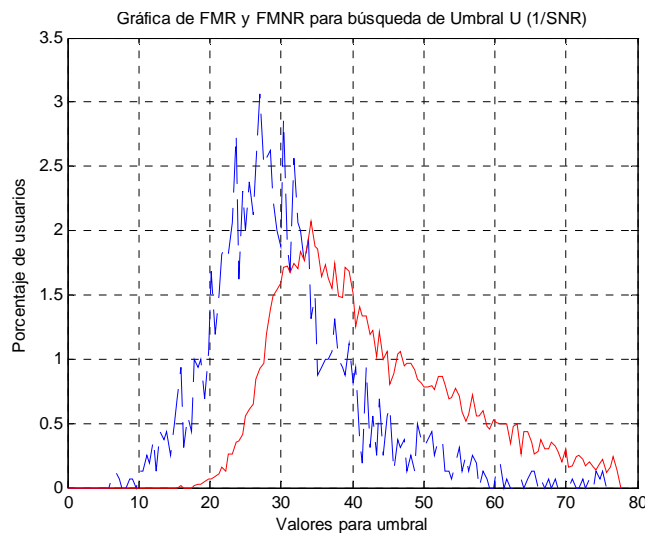


Figura 35. 1/SNR de las correlaciones para búsqueda de umbral de verificación, huellas filtradas y correlación normalizada.

Con los datos obtenidos, se observó que cuando se debía producir una correcta aceptación los resultados tenían, en algunos casos valores más altos en su PSR, PCE y 1/SNR, y cuando se debía rechazar a algún usuario sucedía lo contrario. No obstante, se encontraban casos en los cuales la base de datos no encontraba correspondencia uno a uno con el usuario a identificarse, y los resultados no eran

favorables, incluso se producían más altos los porcentajes de falsa aceptación y falso rechazo. Los resultados en correspondencia uno a uno, a partir de estos parámetros (PSR, PCE y 1/SNR), en la falsa aceptación fueron FMR=1.3895% y falso rechazo de FMNR=35.3571%.

Por este motivo, se notó nuevamente que por lo menos una de las tomas del usuario de la base de datos tenía un buen registro del PSR, PCE y 1/SNR en el caso de correcta verificación (1-FMNR), lo cual motivó a una simulación final que aprovechó estos datos para el diseño de un umbral regido por las ecuaciones 16, 17 y 18. Esta prueba se realizó para encontrar resultados iniciales y compararlos con los arrojados en el prototipo.

$$u_1 = \sqrt{\left(\sum_{k=1}^8 PSR^2(k) \right) - PSR^2(rand(1:8))} \quad (16)$$

$$u_2 = \sum_{k=1}^8 PCE(k) - PCE(rand(1:8)) \quad (17)$$

$$u_3 = \sqrt{\left(\sum_{k=1}^8 \frac{1}{SNR(k)} \right)} \quad (18)$$

Donde PSR(k) son los datos de PSR para las k=1,...,8 muestras, igualmente PCE(k) los datos del parámetro PCE y 1/SNR(k) los datos del 1/SNR, tomados todos de las correlaciones entre huellas. La función rand(1:8) es la generación de un valor aleatorio entre los enteros 1 y 8, es decir una muestra extraída al azar.

En el caso de las ecuaciones 16 y 17, se buscó normalizar los valores encontrados puesto que una posible autocorrelación de las imágenes (en este caso el número aleatorio se conocía y por lo tanto se excluía), ya que el número de la comparación de imágenes entre usuarios diferentes era mayor en una unidad al de comparación con el mismo usuario, de esta manera se hace más selectiva la búsqueda de un usuario y se disminuyen los posibles errores en la adquisición de una huella mal tomada del conjunto a comparar. En la ecuación 18 los valores de 1/SNR en la

autocorrelación eran muy similares, y en algunos casos menores, a los observados con otras representaciones del mismo usuario y su mismo dedo.

3.4 RESULTADOS FINALES DE SIMULACIÓN

Inicialmente se hicieron los respectivos cálculos con las huellas dactilares tratadas, pero sin hacer ninguna modificación a la huella original efectiva, únicamente se hizo una inversión del contraste utilizando el histograma para tener la huella sobre un fondo nulo. El resultado de la falsa aceptación fue $FMR=1,6071\%$ en el peor de los casos y el $FMNR=16,0714\%$, utilizando la ecuación 16; $FMR=1,0714\%$ y $FMNR=26,4286\%$, usando la ecuación 17; y un $FMR=0\%$ y un $FMNR=0\%$ en la ecuación 18, los resultados presentados son en el peor de los casos del valor aleatorio escogido en las ecuaciones 16 y 17, los umbrales seleccionados para estas son 9 y 0,163, y en la ecuación 18 el umbral elegido es 300. Sin embargo, la relación señal a ruido no se tomó como umbral único debido a la gran importancia de los parámetros antes mencionados.

A pesar de que los resultados proporcionados fueron aceptables de acuerdo a la literatura, se usaron las imágenes obtenidas a partir del filtro pasabajas en frecuencia observado en la figura 26. Para este último proceso se utilizaron nuevamente las ecuaciones 16, 17 y 18 con un umbral de 9, 0,163 y 300 respectivamente, y se observó una falsa aceptación de $FMR=0,8036\%$ y un falso rechazo de $FMNR=20\%$ para la ecuación 16; $FMR=0,1786\%$ y $FMNR=32,85\%$ para la ecuación 17; y con el parámetro SNR se observó un $FMR=0\%$ y un $FMNR=0\%$.

Después de la observación de estos resultados se efectuaron operaciones lógicas AND en las pruebas con los parámetros más importantes como lo son el PSR y el PCE los cuales arrojaron resultados más satisfactorios en la falsa aceptación. En las huellas sin realizar filtrado se encontró un $FMR=0,1786\%$, pero en el falso rechazo

empeoraron un poco con un FMNR=29,0625% y, en las filtradas un FMR=0%, pero en el falso rechazo un FMNR=35,625%.

Finalmente, al observar los buenos resultados arrojados por el parámetro inverso de la relación señal a ruido, se dedujo entonces que estos podrían ayudar como último caso para mejorar los resultados del falso rechazo y no incidir en el caso de una falsa aceptación. Por esta razón, se propuso una operación lógica OR al final del bloque lógico AND entre PSR y PCE. El diagrama de bloques final de la simulación se consigna en la figura 36.

Lo que se logró de esta última experiencia fue que el falso rechazo con las imágenes filtradas y las no filtradas fuese de un FMNR= 0%, mientras que la falsa aceptación en el caso de las imágenes sin filtrar fue de FMR=0,1786%, y en las filtradas fue de FMR=0%.

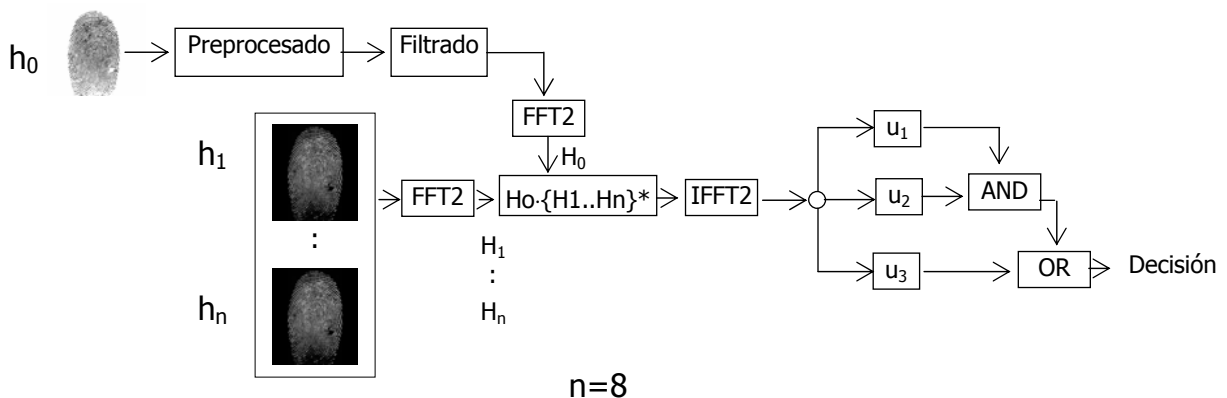


Figura 36. Diagrama de bloques del proceso de verificación utilizando simulación digital.

En las simulaciones, se pudo observar que al hacer las pruebas con las muestras disponibles de la base de datos, se necesitó del conjunto de registros por dedo de los usuarios y de una combinación de compuertas lógicas (parte final de la figura 36) para que los resultados fuesen favorables, lo cual no siempre lo es en un prototipo de verificación.

4. CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS AL PROTOTIPO

En este capítulo se listan cada uno de los pasos que se siguieron para la construcción del prototipo desde la implementación del mismo hasta los resultados obtenidos con respecto a la verificación de huellas dactilares. La guía es la figura 13, la cual describirá los procesos de izquierda a derecha y de arriba abajo.

4.1 ETAPA DE PROCESAMIENTO ÓPTICO

Para la construcción del prototipo óptico se tuvieron en cuenta los diseños y la caracterización de los dispositivos presentados en el capítulo 2, además de algunos diseños predeterminados por los fabricantes de los instrumentos utilizados.

4.1.1 Filtro Espacial. Es uno de los componentes más importantes del prototipo ya que es la región donde se filtran componentes espaciales de alta frecuencia del haz de luz que incide en el procesador, y está compuesto por un objetivo de microscopio de 40X y un *pinhole* de $10\mu\text{m}$; apto para un láser con una longitud de onda de 532nm. En esta etapa se siguieron las instrucciones del fabricante como lo muestra [12] y la Figura 17. **Sistema de filtrado espacial.**

4.1.2 Colimación. Es la etapa del procesado en la que se obtiene un haz de luz plano y es necesaria para que el tamaño de las imágenes proyectadas no sufran, en lo posible, escalamiento en su procesado e iluminen una lente que compense la curvatura debida a la difracción. Este se forma con una lente que por lo general es diseñada para tal caso. En la figura 37 se muestra el ejemplo de una onda colimada donde la distancia focal f en el caso del prototipo es de 38 cm. y el diámetro D de la lente es de 8 cm.

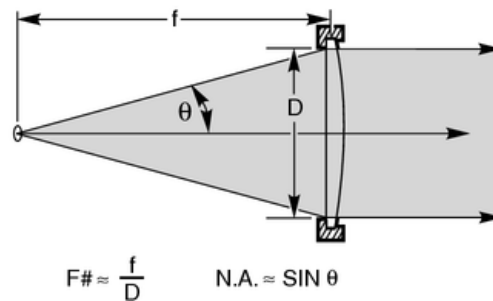


Figura 37. Colimación de la onda generada por un rayo láser previamente filtrada espacialmente [13].

4.1.3 Plano de entrada. Es el lugar en el que se despliegan las imágenes a procesar y está formado por la pantalla de cristal líquido y dos polarizadores que permiten el funcionamiento de la misma en modo de amplitud. En esta etapa se hicieron pruebas, que se describen detalladamente en las tablas del anexo B, para trabajar en la región óptima lineal que, finalmente fue de 0° para el polarizador y 36° para el analizador. Se denomina polarizador al dispositivo polarizador colocado antes de la LCD (izquierda a derecha) y analizador al dispositivo polarizador gemelo ubicado después.

4.1.4 Transformación de Fourier. En esta etapa se utiliza una lente de Fourier a una distancia de 37,15 cms. según los cálculos realizados en el capítulo 2.2, y se efectúa la debida transformación la cual se sensó en una cámara CCD. Aquí finaliza el procesamiento óptico pues la imagen es capturada y procesada digitalmente por un DSP embebido en una tarjeta de desarrollo para tratamiento de imágenes.

Se hicieron pruebas para corroborar la operación del procesado óptico a partir de la figura 38, la cual se desplegó en la LCD transportándose hacia la CCD a través del sistema óptico.

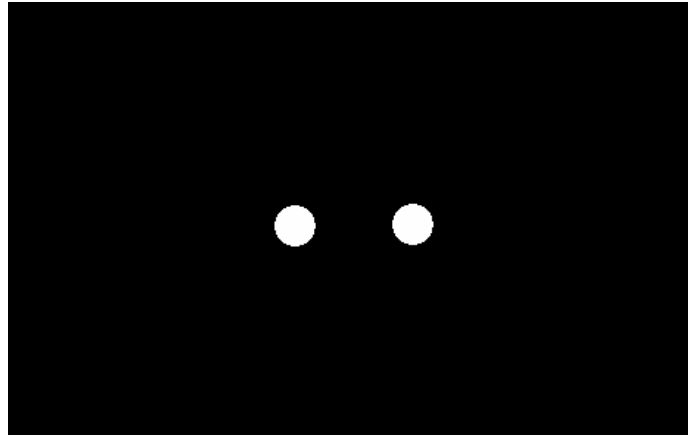


Figura 38. Imagen de prueba en el plano de entrada.

Los círculos representados en la figura anterior en este tipo de pruebas se acercan o alejan, con el fin de encontrar que en el espacio recíproco o frecuencial el periodo de las franjas generadas sea mayor o menor respectivamente, como lo muestra la figura 39.

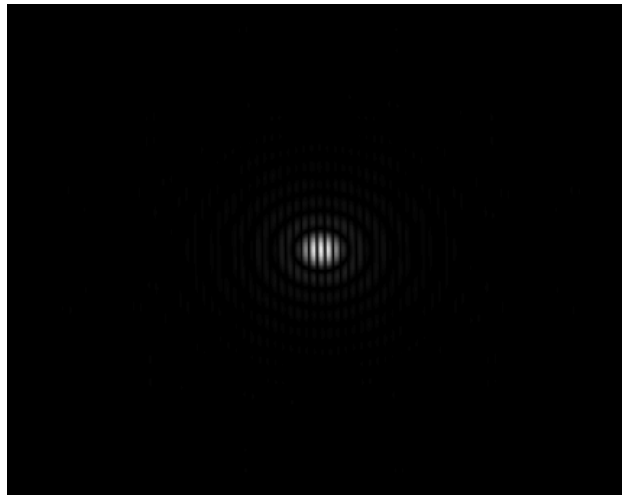


Figura 39. Transformada de Fourier óptica de la figura 38.

4.2 ETAPA DE PROCESAMIENTO DIGITAL

Para el procesamiento de las imágenes adquiridas en la cámara CCD se utilizó un DSP y, para generar las imágenes del plano de entrada se simuló un servidor que registraba al usuario de ingreso y formulaba una nueva imagen con un conjunto de

posibles coincidencias (los registros almacenados en la base de datos del usuario registrado).

4.2.1 Procesado en el DSP. Para el desarrollo de los algoritmos de decisión, se utilizó, en la captura de las imágenes procesadas ópticamente, un DSP que tuvo la función de tomar la densidad espectral conjunta de energía y realizar una transformada de Fourier, la cual arrojó en los casos de la distribución genuina picos de correlación altos y en la distribución impostora, picos poco notables. Esto se realizó todo en un tiempo de 28 milisegundos aproximadamente, incluyendo la estadística de la imagen procesada la cual tardó 2 ms en calcularse. En general el tiempo de proceso es de 35,7 cuadros por segundo.

4.2.2 Imágenes del plano de entrada. Para el diseño de la simulación de un servicio que colocase imágenes de entrada se utilizó una versión de prueba de Adobe Flash [1]. Para escoger la ubicación espacial se tuvieron en cuenta los conceptos de traslape que se encuentran dados en [5]. Allí se utilizó un espacio dedicado para la búsqueda en la base de datos (superior derecho) y otro espacio para la imagen adquirida del sensor de huellas dactilares (inferior izquierdo), el cual podría ser habilitado dentro del mismo software para la adquisición de nuevas imágenes para el procesado (como en un prototipo automático), no para almacenar en base de datos.

Dado que el plano de entrada está conformado en el procesado óptico por la pantalla LCD, se presentan los resultados de las pruebas realizadas a ésta para que trabaje en la región óptima con respecto a la recepción del haz de luz y su debido proceso para obtener la imagen de salida utilizando dos polarizadores que se asumen cruzados según las instrucciones del fabricante. La figura 40 muestra como se realiza este proceso.

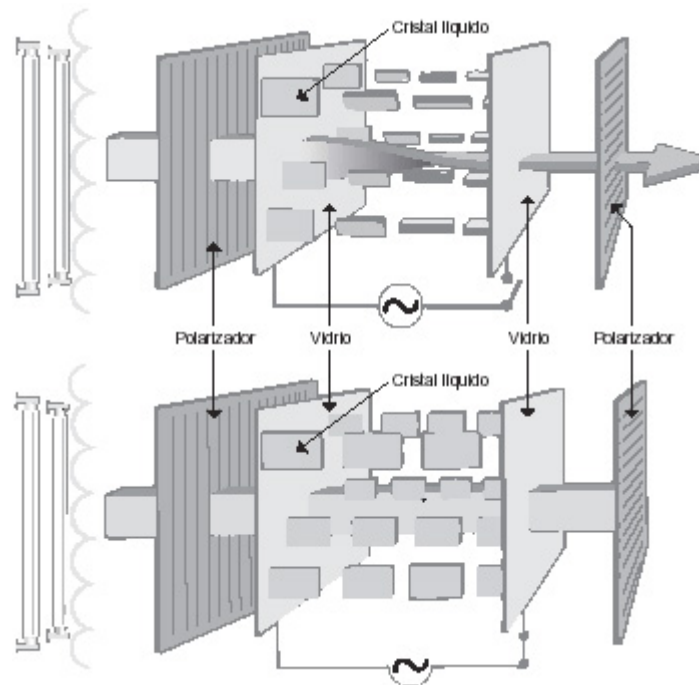


Figura 40. Proceso de formación de imágenes en una pantalla LCD.
(Referencia:http://www.mtas.es/insht/ntp/ntp_678.htm)

Las pruebas que se le hicieron a la pantalla fueron necesarias debido a que la respuesta que se obtuvo a exactamente 90° como se muestra en la figura 40 no tuvieron los resultados que se buscaban. El polarizador situado en la parte lateral derecha de la figura se le denomina analizador.

En el anexo B se muestran varias tablas de pruebas que se realizaron a partir de la cámara CCD, el IDK-DSP (Herramienta hardware para procesamiento de imágenes *Imaging Development Kit*) y la proyección de una imagen de grises editada en un PC externo, la pantalla LCD se dejó estática al igual que el polarizador, solo en este caso se movió el analizador para saber a cuántos grados debería estar con respecto al polarizador y de allí encontrar una recta que representase en lo posible a la imagen de entrada.

La muestra más representativa se puede observar en la figura 41 que fue donde se observó un mejor ángulo entre los dos polarizadores ópticos, en el anexo B se

encuentran las figuras B2-B6 donde se puede observar con más detalle cada una de las pruebas en donde las líneas rectas corresponden a una interpolación lineal de los datos arrojados. Allí se concluyó que la saturación de la cámara CCD no permitió utilizar este equipo para la caracterización de la LCD porque en este caso no se sabría a ciencia cierta si los datos tomados serían reales o si hubiese un problema dónde estaría el error.

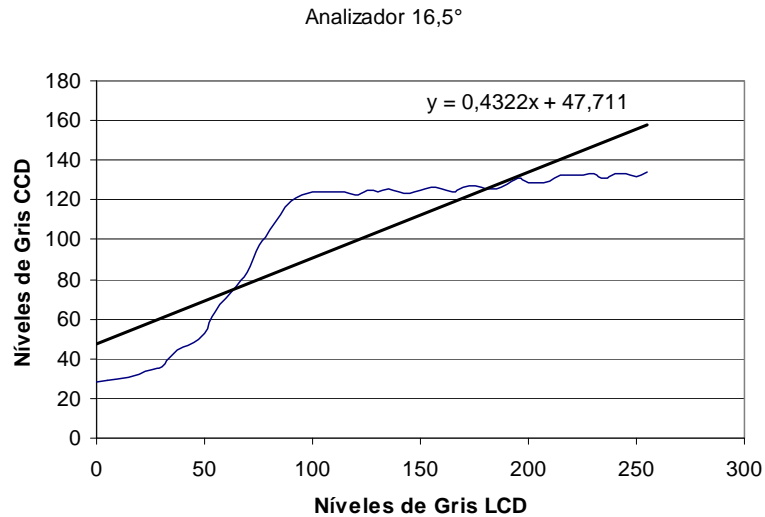


Figura 41. Gráfico de Niveles de Gris en CCD vs. Niveles de Gris en LCD (16,5° polarizador 0°)

Al observar la curva de saturación característica de la CCD, se hizo la experiencia con otro tipo de sensor que no se satura de la misma forma y al haber adquirido cierta experiencia en las pruebas anteriores, se dio un giro en la pantalla LCD y se proyectaron de la misma manera niveles de intensidad altos y bajos que se adquirieron en otro equipo de laboratorio para mediciones de energía (*Newport Power Meter - Model 1815-C*), y sólo se muestran los datos al ángulo óptimo. Los cuales son registrados en la tabla B3. La razón de mostrar en la tabla dos resultados es debido a que con el nuevo sensor se tenían escalas muy pequeñas de donde se empezó la medida y podría esto incidir en el error de la experiencia (para la posible corrección se le subió un poco más de intensidad para modelar un *Offset* en el medidor). Las figuras 42 y 43 describen la medición con más certeza.

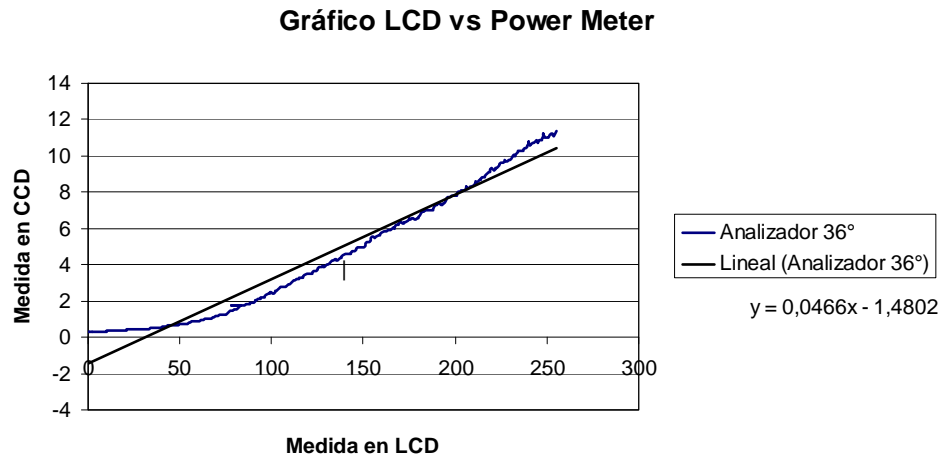


Figura 42. Resultado final de medición con valores mínimos de intensidad.

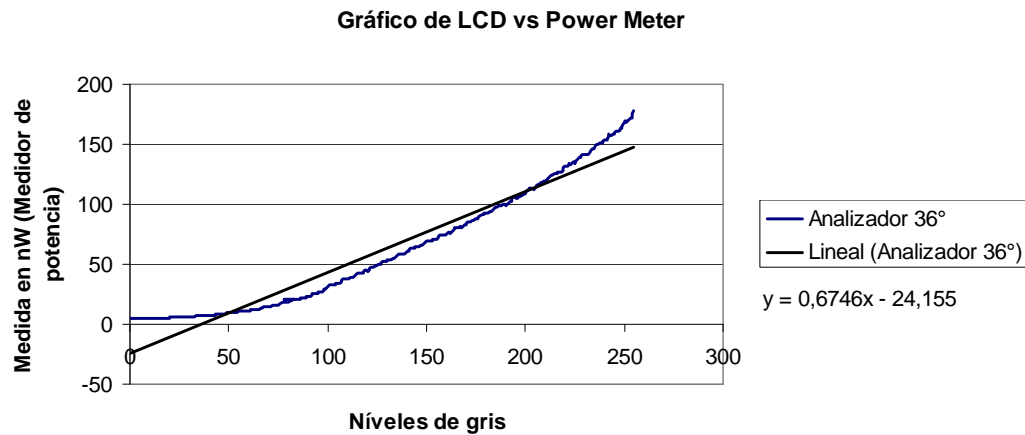


Figura 43. Resultado final de medición con valores medios de intensidad.

4.2.3 Imágenes en el sensor cuadrático CCD. Para comprobar que el sensor funcionase bien se hicieron pruebas a partir de 50 imágenes que se adquirieron para cada prueba. Las medidas utilizadas fueron la energía de la imagen, los valores de los píxeles (la imagen como un todo) y luego por la toma de píxeles aleatorios (ambas en el transcurso del tiempo); sin embargo como el sensor es a color y su formato es NTSC, la imagen se forma en 3 planos. Los cálculos fueron hechos a partir de la razón entre la media y la varianza de las imágenes o de los píxeles. A esta razón se le ha llamado SNR en [11] y es derivado del parámetro de la correlación con el que se ha experimentado.

Las pruebas se realizaron primero sin ninguna iluminación y luego con iluminación uniforme. Se tomaron 12 píxeles aleatorios y el cambio de su SNR. En la figura 44 se muestra una gráfica comparativa de los promedios en los 3 planos (RGB) de la energía en los píxeles (mostrados en dB) de las 50 imágenes, y a continuación se muestran los promedios de las imágenes totales.

Sin iluminación:

Energía Imagen -> SNR:	73.7430	73.0011	73.2853
Valor Imagen -> SNR:	73.5729	74.5453	68.2199

Iluminación uniforme (no saturación):

Energía Imagen -> SNR:	97.7332	84.3744	83.1822
Valor Imagen -> SNR:	103.4223	94.7736	91.7900

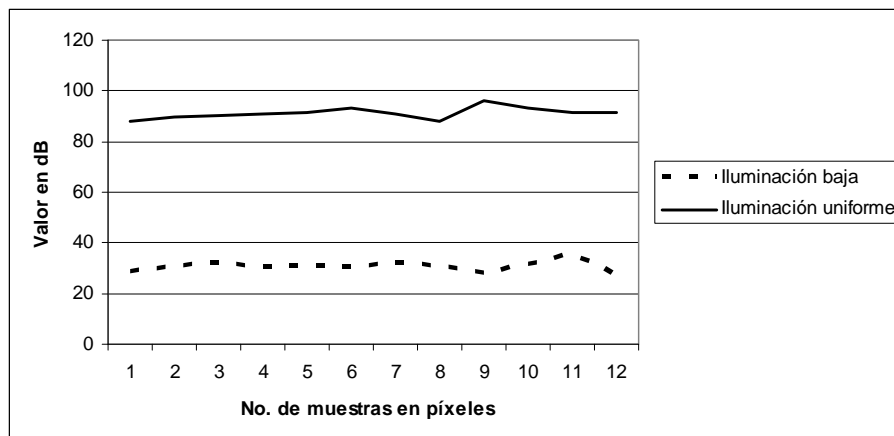


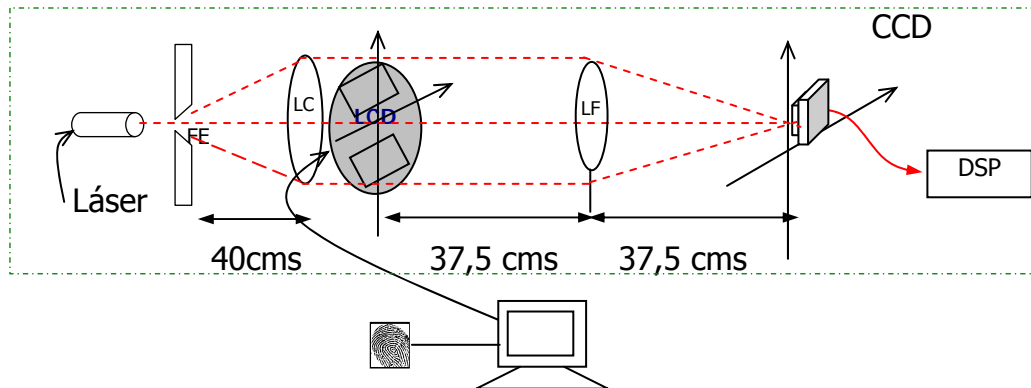
Figura 44. Comparación de la relación señal a ruido en la CCD por píxel.

Obtenidos los resultados, se pudo inferir que la cámara responde muy bien en la zona de iluminación cuasi uniforme, mientras que con poca luz la respuesta no es la más deseada.

4.3 RESULTADOS FINALES

En las pruebas realizadas al prototipo se realizó el mismo procedimiento que en la simulación, pues se calcularon los diferentes parámetros, a una base de datos construida con el sensor caracterizado, lo que se puede observar a fondo en la sección 4.3.3. Con estos resultados se visualizan en la figuras 48 y 49 la diferencia entre los umbrales obtenidos en simulación y los obtenidos en la ejecución del algoritmo en el prototipo.

4.3.1 Dimensiones finales. El tamaño final del prototipo híbrido se describe en la figura 45 con los respectivos tamaños.



FE: Filtrado Espacial; LC: Lente colimadora; LF: Lente de Fourier;

Figura 45. Medidas espaciales finales del prototipo.

Finalmente la etapa de procesamiento del prototipo (líneas punteadas externas de la figura 45) tiene una medida de 1,15m de largo, 132 mm de ancho y 76 mm de alto. La distancia entre el extremo izquierdo del láser y el filtrado espacial en el prototipo de prueba es de 26 cm (incluyendo atenuador), sin embargo en el prototipo la única distancia fija es la referente a los 37,5 cms de la focal de Fourier calculada en la sección 2,2, la distancia referente entre el filtrado y la lente colimadora puede reducirse dependiendo de la focal de la lente, de manera similar con la distancia entre el láser y el sistema de filtrado, así mismo si se utiliza la óptica metaxial.

4.3.2 Datos adquiridos. Para la prueba final fue necesaria la construcción de una pequeña base de datos de 10 usuarios en la que cada uno registró todos los dedos de sus dos manos en 4 ocasiones, y en la que se encuentran los seis tipos de huellas más comunes (*Arch*, *Tented Arch*, *Right Loop*, *Left Loop*, *Whorl* y *Twin Loop*) y la combinación de estas últimas de acuerdo como se ha estipulado en el NITS [4] y tal como se ve en la figura 46. Estas muestras fueron adquiridas y tratadas desde Visual C++ como primera instancia y luego almacenadas para generar con ellas las pruebas al prototipo. En este punto fueron llevadas al servicio diseñado en Adobe Flash y finalmente con los algoritmos diseñados en el DSP se calcularon cada uno de los parámetros simulados y analizados en el capítulo anterior lo cual se refleja en la sección 4.3.3.

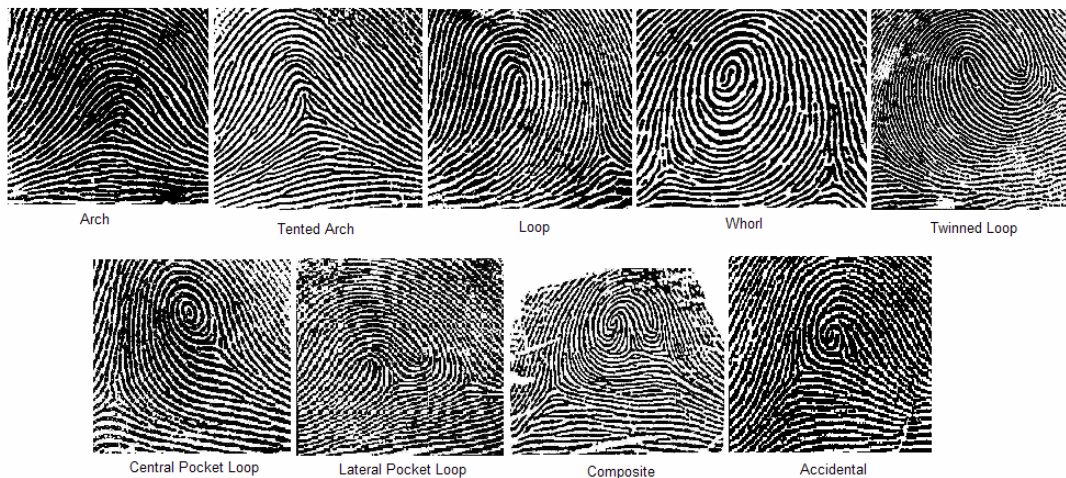


Figura 46. Tipos de huellas más comunes [4].

En el prototipo híbrido entonces se llevó a cabo el procesamiento de las imágenes adquiridas y tratadas para poder componer la imagen en la arquitectura de transformada conjunta, lo cual es visualizado en las figura 47. En ésta, se puede observar, en la parte a, los picos de correlación prolongados correspondientes a la autocorrelación de la imagen, los picos de la correlación cruzada con una muestra diferente dentro de la distribución genuina (parte b) y picos muy atenuados en la correlación cruzada con usuarios que no correspondían a la distribución genuina.

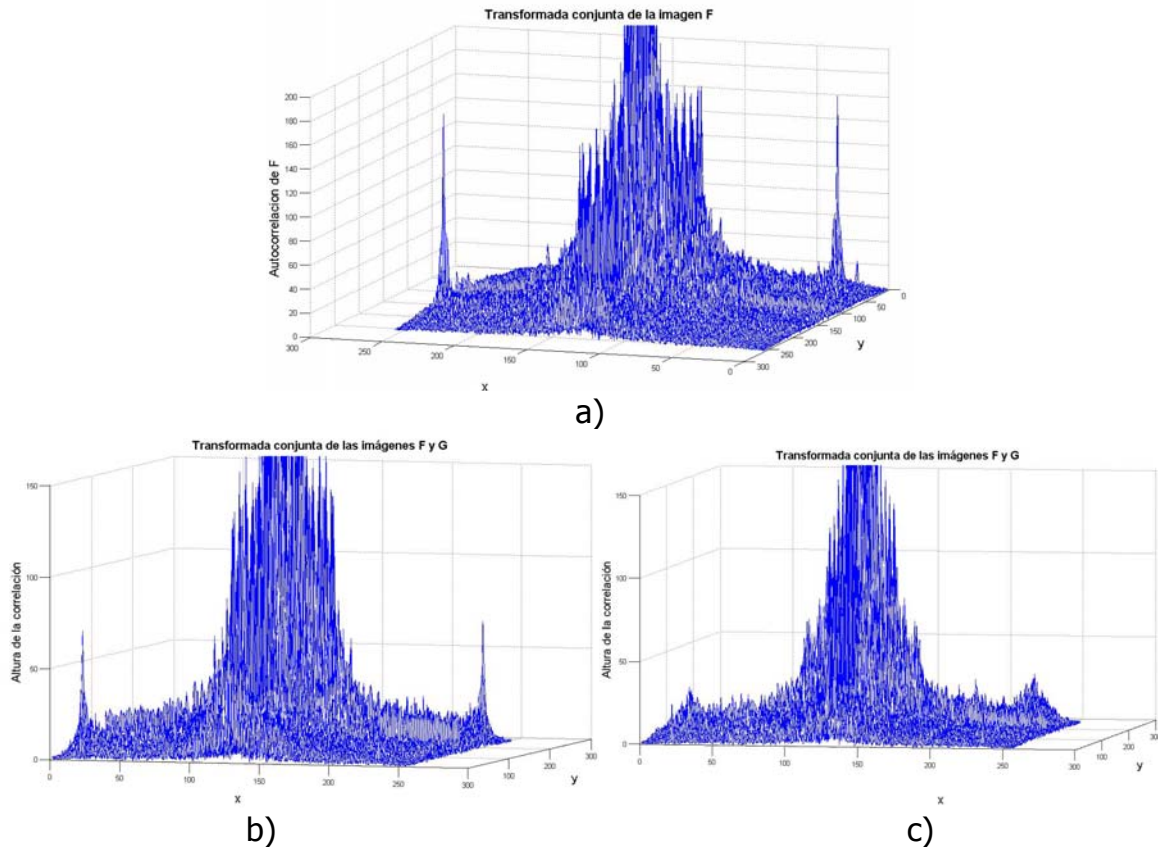


Figura 47. Imágenes procesadas en el prototipo híbrido. a) Autocorrelación, b) Correlación con el mismo usuario, c) Correlación entre usuarios distintos.

4.3.3 Análisis de Datos. Los datos obtenidos son representados en las figuras 48 y 49 (y puede ser observado en el anexo C uno de los conjuntos de las tablas que se obtuvieron), los cuales presentan líneas continuas (roja) para la distribución impostora y líneas discontinuas (azul) para la distribución genuina, cada uno de ellos normalizados para poder encontrar en lo posible un umbral en la medida de enfrentamiento (eje x). En el análisis de las figuras 48 y 49 se puede observar que los parámetros más discriminantes son el PSR y el SNR, los cuales muestran más claramente que se podrían establecer umbrales que permitieran diferenciar si existe falso rechazo o falta aceptación. Esto gracias a que la distribución genuina y la impostoras se aprecian más separadas que en el caso de la altura, la cual podría ser un indicador que fuese definitivo en caso de que los otros fallasen, mientras el

PCE no denota que sea una buena medida, pues los datos se encuentran concentrados en puntos muy cercanos al origen y es muy difícil diferenciarlos.

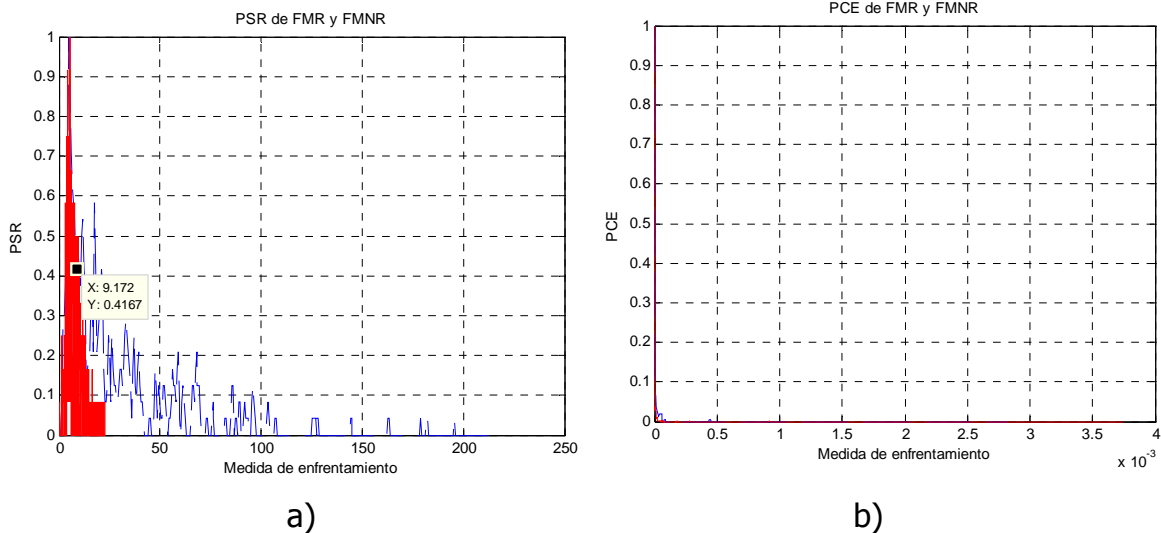


Figura 48. a) PSR y b) PCE de la correlación de las imágenes enfrentadas.

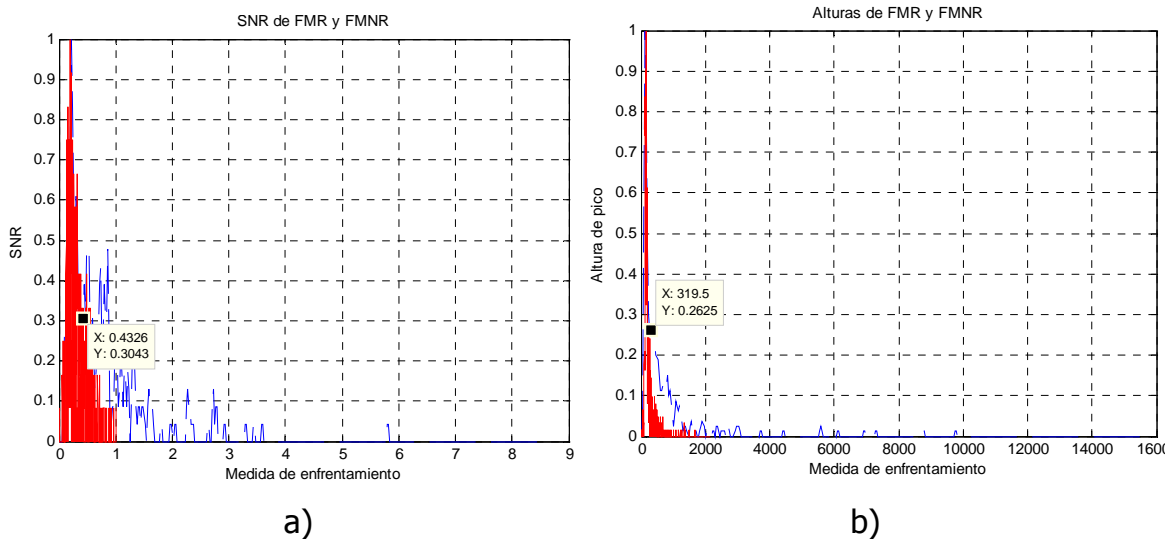


Figura 49. a) SNR y b) Valor máximo de la correlación de las imágenes enfrentadas.

Los umbrales ($u(x)$ léase umbral de x) escogidos según las figuras para el estudio de la verificación fueron: $u(\text{PSR})= 9,15$, $u(\text{SNR})=0,432$ y $u(\text{Altura})=320$, sin embargo el PCE no se tuvo en cuenta dados los resultados. Con estas cifras se reportaron en la tabla 7, los resultados de verificación uno a uno. Es importante

resaltar que en esta tabla sólo se hace búsqueda de todos los posibles elementos de verificación de la base de datos en la última fila, en la cual se busca si hay una huella de las cuatro opcionadas en la que los resultados estén por encima de uno de los umbrales, los demás datos listados en la tabla 7 se enfrentan uno a uno. Las características anteriormente descritas son usadas también en la tabla 8.

Tabla 7. Resultados de Falsa Aceptación y Falso rechazo.

Parámetro	%FMNR	% FMR
PSR	34	11.4167
SNR	36.3333	11.3889
ALTURA	31.6667	11.0556
Operación AND al PSR, SNR y ALTURA	41	6.3611
AND en las 4 posibles huellas	25.33	24.6944

En la tabla 7 se reportan dos operaciones adicionales que fueron la combinación de estos parámetros, inicialmente se buscó una operación lógica excluyente como la AND que relacionase estos parámetros, el resultado en ese entonces fue tolerable para la falsa aceptación pero no para el falso rechazo, luego se intentó mejorar con otra prueba haciendo una búsqueda en los grupos de 4 posibles huellas dactilares con la misma operación de AND y el resultado fue invertido (aunque mejoró el falso rechazo) debido a que se buscó que no hubiese ninguna de ellas debajo de los umbrales. El diagrama de bloques de las operaciones se describe en la figura 50.

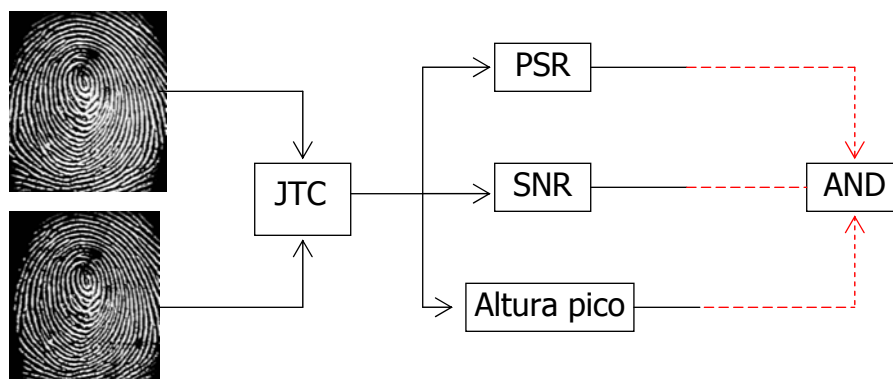


Figura 50. Diagrama de bloques del procesamiento en el prototipo.

En la figura 50 las líneas punteadas indican que la operación AND puede realizarse uno a uno o en dado caso puede realizarse al conjunto de las 4 huellas dactilares esperando que en la mayoría de los casos se pueda superar el umbral en el caso de falsa aceptación y lo contrario en el caso de falso rechazo.

Al observar estos resultados se decidió cambiar los umbrales para tener un poco más de ingreso en los usuarios de la distribución genuina sin afectar de forma significativa a la distribución impostora. Se hicieron varias pruebas para que de una manera sencilla se pudiese tener más certeza de que un usuario podría identificarse uno a uno con pocas probabilidades de que el sistema errara. Los valores de umbral caracterizados para llegar a un punto de equilibrio óptimo inicial son: $u(\text{PSR})=15$, $u(\text{SNR})=0,132$, y $u(\text{Altura})=290$.

Tabla 8. Resultados de Falsa Aceptación y Falso rechazo con umbrales óptimos.

Parámetro	%FMNR	% FMR
PSR	48.3333	0.9722
SNR	14.6667	57.5278
ALTURA	30	13.4444
Operación AND al PSR, SNR y ALTURA	14	0.8611
AND en las 4 posibles huellas	31.6667	25

Con estos resultados hay una probabilidad de que un usuario genuino tenga certeza de que en un 86% de las veces que ingrese al sistema sea verificado con éxito, mientras que un impostor va tener certeza que en un 99.1389% de las veces que ingrese al sistema sea rechazado. Finalmente, se hizo un barrido de cada uno de los parámetros para observar cual era el que más variaba y afectaba al sistema. La operación efectuada fue la siguiente:

$$y[k] = x[k] - x[k - 1] \quad (19)$$

Tabla 9. Resultados de aplicar la ecuación 19 a los parámetros de desempeño.

Parámetro	FMNR (Media)	FMR (Media)
PSR	1.3434	0.6212
SNR	0.138	2.8 e-4
ALTURA	1.3434	1.0098

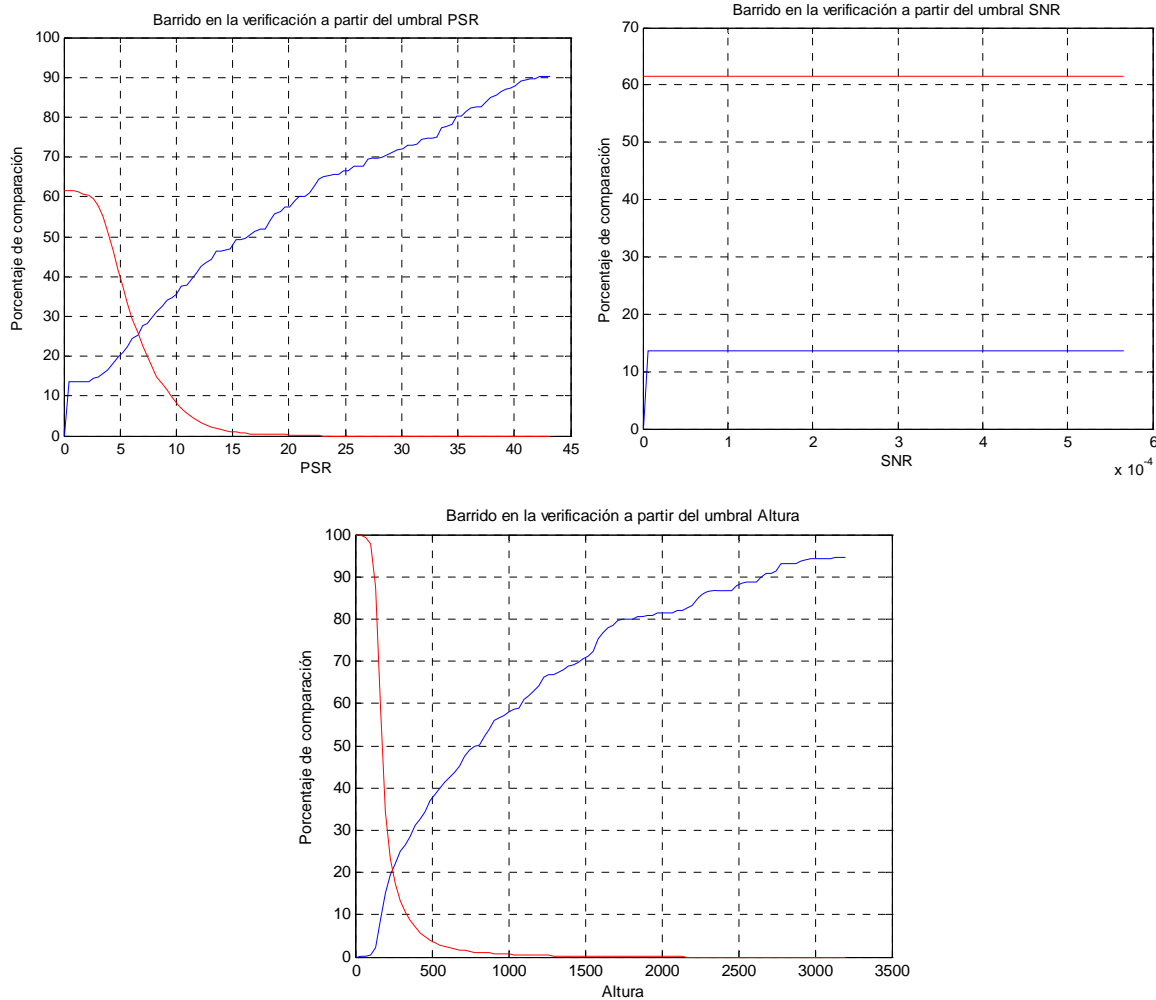


Figura 51. Barrido para umbrales de FMR (rojo) y FMNR (azul)

Gracias al estudio de variabilidad, se mejoraron los resultados de verificación dando la posibilidad a un cliente que pueda cambiar los umbrales de forma tal que puedan entrar más de una distribución u otra. Sin embargo, con una buena localización de los mismos se tiene que $u(\text{PSR})=24$, $u(\text{SNR})=0.1$, $u(\text{Altura})=120$ arrojan excelentes resultados mostrados en la tabla 10.

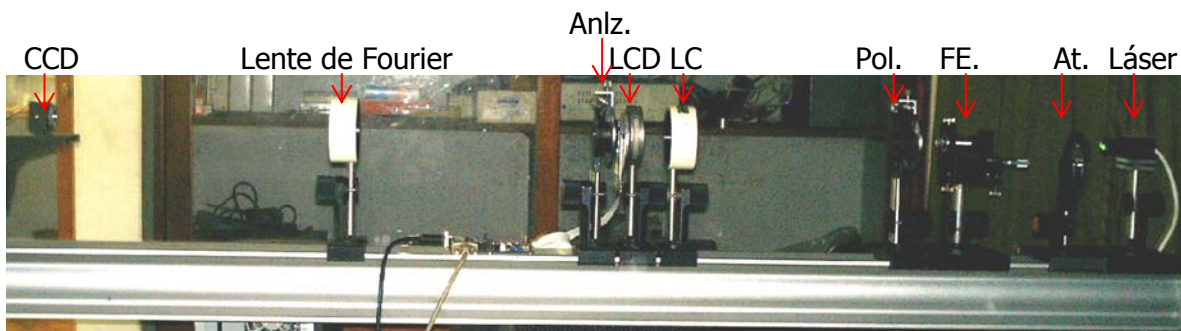
Tabla 10. Resultados de Falsa Aceptación y Falso rechazo con umbrales óptimos.

Parámetro	%FMNR	% FMR
PSR	65.66667	0
SNR	13.6667	60.0556
ALTURA	1.66667	13.4444
Operación AND al PSR, SNR y ALTURA	0	0
AND en las 4 posibles huellas	33.3333	25

En este estudio se observa que los parámetros que presentaron más variabilidad para el proceso fueron el PSR y la altura del pico, los cuales al realizar el análisis fueron los que se aproximaron más a los resultados arrojados por un sistema de análisis únicamente digital. Además, en las simulaciones realizadas en el capítulo anterior, se obtuvieron resultados en los que se debía hacer una normalización de los datos y en ésta, era necesario utilizar todos los registros de las huellas dactilares por dedo. Los resultados erróneos, encontrados en las pruebas hechas al prototipo final, principalmente se deben a rotaciones en los dedos de los usuarios, respecto a la mayoría de sus muestras, registradas al ingresar sus huellas dactilares en el dispositivo de adquisición.

4.4 OPERACIÓN DEL PROTOTIPO

Finalmente es necesario centrarse en la figura 45 y 51 para comprender el funcionamiento del prototipo. En éste, el procesamiento óptico se supone todo el tiempo operando y mecánicamente estático (sus componentes no se trasladan), lo único que varía en este montaje son las imágenes de entrada a la LCD que son generadas a través de un computador personal y es el que se utiliza como simulador de un servidor de base de datos y adquisición de huellas dactilares. La figura 52 muestra el plano de entrada de las imágenes, donde la imagen superior derecha es la función de referencia y la inferior izquierda la función escena (imagen adquirida desde el sensor de huellas dactilares en operación).



Anlz.:Analizador. Pol: Polarizador. LC: Lente Colimadora. FE: Filtrado Espacial. At.: Atenuador

Figura 52. Descripción detallada del prototipo óptico.

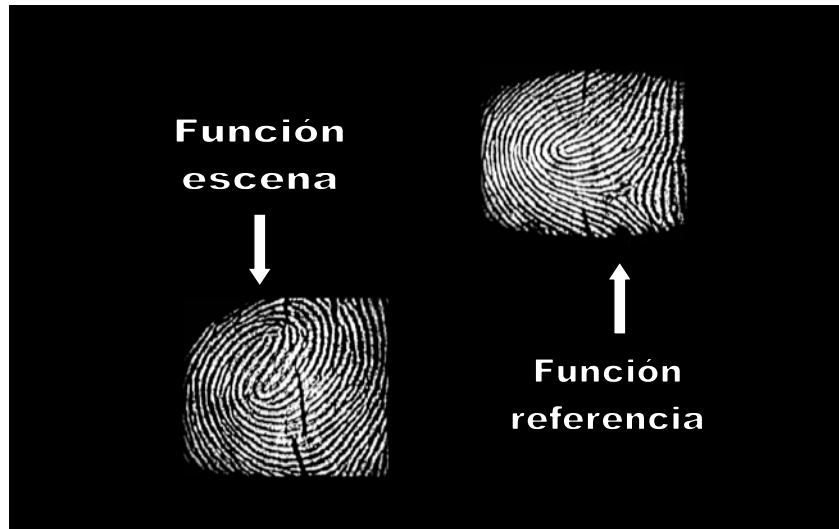


Figura 53. Imágenes desplegadas en la LCD para procesamiento.

Las huellas dactilares de ingreso son adquiridas desde el sensor gracias a una interfaz sencilla a nivel de usuario la cual utiliza los controladores del sensor de huellas para adquirir la nueva imagen y en donde el usuario espera un tiempo no mayor a 2 segundos para que realice la debida adquisición. En esta primera etapa digital se preprocesa la imagen para que tenga un fondo continuo negro, se hace una inversión.

La imagen así generada se escribe sobre la LCD es polarizada eléctricamente dado el principio básico de funcionamiento de estas pantallas, el haz colimado transporta la información hasta la cámara CCD ubicada a la distancia focal imagen de la lente LF, donde la magnitud al cuadrado de la transformada de Fourier es sensada acorde a la salida de la figura 52. En este momento, la cámara adquiere la imagen, ésta es almacenada en la memoria externa del DSP quien transforma nuevamente la imagen adquirida para convertirla en una de las imágenes presentadas en la figura 47, allí se miden los parámetros descritos en la sección 1.3 y según el análisis de la sección 4.3.3 se toman las decisiones pertinentes.

De esta manera se ha diseñado y construido un prototipo que evaluado en verificación de huellas dactilares arrojó un error tipo I de 0,8611% y un error tipo II de 14% verificando una a una cada huella dactilar, en un tiempo total de 1,4 segundos incluyendo el tiempo de la adquisición de la imagen de la huella dactilar.

5. CONCLUSIONES

Se determinaron las características para implementar un correlador híbrido teniendo cuenta cada una de las etapas y dispositivos presentes tanto para el muestreo de las señales bidimensionales como para la captura óptica de las mismas.

Se realizó el diseño según el hardware caracterizado para la implementación del correlador híbrido a partir de la arquitectura de correlación de transformada conjunta.

Se simularon los algoritmos en un software de altas prestaciones para procesamiento de imágenes, para que la implementación en el DSP fuese más rápida y objetiva.

Se reiteraron los problemas de la correlación con respecto a la rotación, y por lo tanto se utilizaron las mismas métricas de correlación tales como el PSR, PCE y SNR de una máscara circular y no cuadrada como se hacía anteriormente, lo cual arrojó mejoría de los resultados en un 10%.

Se encontraron algunas deficiencias (ruido de fondo importante) en la respuesta de la cámara al fondo continuo sin iluminación, lo cual no produjo alteraciones significativas en el procesado del prototipo.

Las pruebas de cada uno de los elementos sirvieron para observar que la imagen de correlación se presenta con más detalle y ayudaron a encontrar de manera similar las curvas de caracterización de elementos como la LCD y la CCD.

Se construyó un sistema híbrido en el cual se tomó una combinación lógica de los parámetros del PSR, SNR y la altura como descriptores principales para la toma de decisiones en la verificación de huellas dactilares con un porcentaje en el falso rechazo del 14% y de falsa aceptación del 0,8611%.

En el prototipo final, los tiempos de procesamiento fueron de 36 cuadros por segundo, observándose igualmente que el procesado en un prototipo híbrido es mucho más rápido que si fuese sólo digital y con la ventaja de la toma de decisiones que en un prototipo óptico se remite a la presencia de un experto en el área.

Gracias a los resultados obtenidos es posible proponer otros prototipos de verificación biométrica e iniciar una posible identificación con esta arquitectura híbrida y sensores debidamente caracterizados. De manera similar se abre la posibilidad de incursionar en otro tipo de verificación de patrones para aplicaciones industriales.

La utilización de un DSP de última generación podría acelerar los procesos y no se utilizaría un servidor adicional (PC) para almacenamiento y enfrentamiento de imágenes en pantalla. Estos dispositivos están equipados con varios puertos USB (adquisición de datos), y disco duro embebido, con las mismas características para desarrollo de aplicaciones de procesamiento de imágenes. Esto quiere decir que pueden adquirir video y audio, y mostrar en pantalla, no siempre necesario, con la adición de herramientas para procesar video.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Adobe Systems Incorporated. Adobe Flash CS3 Profesional. Demo trial 30 days.
<http://store1.adobe.com/cfusion/store/html/index.cfm?event=displayStoreSelector&keyword=flash> Consulta en <http://www.adobe.com>
- [2] Argüello H. "Correlación en tiempo real implementación mediante DSP", Tesis de maestría, Universidad Industrial de Santander, (2003).
- [3] A. BAZEN and G.T.B VERWAAIJE, et Al., A Correlation-Based Fingerprint Verification System, ProRISC 2000 Workshop on circuits, System and Signal Processing, Veldhoven, The Netherlands, November, 2000. p.1-8.
- [4] C. I. Watson and C. L. Wilson, "NIST Special Database 9, Fingerprint Database," National Institute of Standards and Technology, March 1992.
- [5] Cornejo J. "Correlador híbrido de transformada conjunta empleando un DSP", tesis de maestría, Universidad Industrial de Santander, (2005)
- [6] Javidi B., Horner J., "Nonlinear joint transform correlators", in Real-Time Optical Information Processing, chapter 4, pp. 115-183, Academic Press, (1994).
- [7] Maltoni D., Maio D., Otros, Handbook of Fingerprint Reconigtion. Springer Verlag, Chapter 1,4, pp. 13-14,137-141. New York, (2003).
- [8] Molina M. "Verificador de la autenticidad de las firmas escritas a mano", tesis de maestría, pp. 37-42. Universidad Industrial de Santander, (2003)
- [9] Oppenheim A. "Señales y sistemas". Prentice Hall Hispanoamérica. 1997. Capítulo 4, pp. 328. Naucalpan de Juárez. México.
- [10] Datasheet Laser Module. B&W TEK INC.
http://www.bwtek.com/products/laser_systems/instrumentation/dpss/BWN/BWN.pdf

- [11] Goswami, Robi. SNR Calculation and Image Improvement in Magnetic Resonance Imaging, EE362. March. 2002.
<http://scien.stanford.edu/class/psych221/projects/02/insomnia/intro.htm>
- [12] Newport catalogue. Spatial Filters. Technical-Reference-and-Fundamental-Applications. <http://www.newport.com/Spatial-Filters/144910/1033/catalog.aspx#>
- [13] Newport catalogue. Light Collection and Systems Throughput. Technical-Information. <http://www.newport.com/Light-Collection-and-Systems-Throughput/381845/1033/catalog.aspx>
- [14] TEXAS INSTRUMENTS. TMS320C6000 Imaging Developer's Kit (IDK) User's Guide. September. 2001 <http://focus.ti.com/lit/ug/spru494a/spru494a.pdf>
- [15] TEXAS INSTRUMENTS. DVEVM Started Guide. (2006)
- [16] TEXAS INSTRUMENTS. TMS320DM642 Video/Imaging Fixed-Point Digital Signal Processor. (2006) <http://www.ti.com/corp/docs/dsp/dmdkit.htm>.
- [17] TEXAS INSTRUMENTS. TMS320C6727B Floating-Point Digital Signal Processor. (2006) <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/tms320c6727b.pdf>
- [18] VanderLugt A. "Signal detection by complex filtering". IEEE trans.Info.Theory, pp. 139-145. (1964).
- [19] Weaver C. And Goodman J. "Technique for optically convolving two functions", Appl. Opt., pp.1248-1249, (1966).
- [20] Base de datos de Muestra del Software Verifinger SDK para huellas dactilares. <http://www.gvirtz.com/111/?C=M;O=A>
- [21] XGA4 Miniature LCD User Guide Document # TCF/00032. Document no.: 409/0353/01A dated 24/09/2004. Document release # CRO 06/04. Copyright CRLO Displays Limited. Registered in England: 5220480. 2004.

ANEXO A. RESULTADOS PARA UMBRALIZACIÓN

Tabla A1. Estudio para encontrar umbral de aceptación.

ESTUDIO DE PORCENTAJE TOTAL DE VERIFICACIÓN MISMO USUARIO									
Usuario/Umbral	>9	>8,5	>8	>7,5	>7	>6,5	>6	>5,5	>5
Usuario1 M1	60	62,8571	74,2857	85,7142	88,5714	94,2857	97,1428	100	100
Usuario1 M2	45,7142	48,5714	54,2857	62,8571	68,5714	68,5714	74,2857	77,1428	85,7142
Usuario1 M3	37,1428	48,5714	54,2857	68,5714	74,2857	74,2857	85,7142	91,4285	97,1428
Usuario1 M4	34,2857	40	45,7142	54,2857	71,4285	80	85,7142	85,7142	91,4285
Usuario1 M5	48,5714	48,5714	57,1428	74,2857	85,7142	88,5714	88,5714	91,4285	100
Usuario1 M6	80	85,7142	88,5714	91,4285	91,4285	97,1428	97,1428	100	100
Usuario1 M7	51,4285	57,1428	57,1428	68,5714	74,2857	82,8571	85,7142	94,2857	97,1428
Usuario1 M8	40	57,1428	62,8571	71,4285	74,2857	77,1428	82,8571	91,4285	97,1428
Usuario2 M1	8,57142	17,1428	28,5714	28,5714	40	45,7142	57,1428	71,4285	91,4285
Usuario2 M2	25,7142	31,4285	37,1428	45,7142	65,7142	77,1428	82,8571	85,7142	94,2857
Usuario2 M3	37,1428	45,7142	51,4285	68,5714	77,1428	82,8571	85,7142	97,1428	100
Usuario2 M4	25,7142	40	51,4285	57,1428	71,4285	85,7142	88,5714	88,5714	97,1428
Usuario2 M5	14,2857	20	25,7142	34,2857	37,1428	48,5714	57,1428	80	85,71428
Usuario2 M6	20	31,4285	31,4285	34,2857	51,4285	62,8571	65,7142	71,4285	74,2857
Usuario2 M7	20	22,8571	31,4285	40	54,2857	62,8571	74,2857	82,8571	88,5714
Usuario2 M8	20	25,7142	25,7142	31,4285	40	45,7142	65,7142	71,4285	80
Usuario3 M1	17,1428	22,8571	22,8571	25,7142	37,1428	42,8571	45,7142	54,2857	57,1428
Usuario3 M2	14,2857	20	22,8571	34,2857	34,2857	42,8571	51,4285	68,5714	80
Usuario3 M3	11,4285	17,1428	20	28,5714	34,2857	45,7142	57,1428	62,8571	65,7142
Usuario3 M4	20	20	20	25,7142	25,7142	40	51,4285	57,1428	65,7142
Usuario3 M5	11,4285	14,2857	20	22,8571	40	42,8571	51,4285	62,8571	74,2857
Usuario3 M6	8,5714	11,4285	20	25,7142	40	42,8571	57,1428	62,8571	68,5714
Usuario3 M7	8,57142	11,4285	25,7142	25,7142	28,5714	37,1428	45,7142	51,4285	65,7142
Usuario3 M8	17,1428	20	22,8571	25,7142	28,5714	56,6666	63,3333	83,3333	86,6666

Tabla A1. Estudio para encontrar umbral de aceptación.

ESTUDIO DE PORCENTAJE TOTAL DE VERIFICACIÓN MISMO USUARIO									
Usuario/Umbral	>9	>8,5	>8	>7,5	>7	>6,5	>6	>5,5	>5
Usuario4 M1	11,4285	11,4285	11,4285	17,1428	17,1428	20	22,8571	28,5714	34,2857
Usuario4 M2	17,1428	25,7142	28,5714	31,4285	31,4285	45,7142	48,5714	57,1428	62,8571
Usuario4 M3	5,7142	5,7142	8,5714	14,2857	17,1428	20	20	34,2857	34,2857
Usuario4 M4	20	22,8571	25,7142	28,5714	28,5714	31,4285	42,8571	45,7142	51,4285
Usuario4 M5	0	0	0	0	0	0	0	0	5,71428571
Usuario4 M6	11,4285	17,1428	17,1428	17,1428	22,8571	25,7142	28,5714	40	45,7142
Usuario4 M7	8,5714	8,5714	8,5714	17,1428	17,1428	22,8571	28,5714	40	48,5714
Usuario4 M8	20	25,7142	25,7142	31,4285	37,1428	42,8571	45,7142	45,7142	51,4285
Usuario5 M1	17,1428	17,1428	17,1428	25,7142	40	45,7142	51,4285	62,8571	82,8571
Usuario5 M2	40	48,5714	54,2857	54,2857	74,2857	80	91,4285	94,2857	100
Usuario5 M3	25,7142	25,7142	37,1428	48,5714	54,2857	60	65,7142	71,4285	88,5714
Usuario5 M4	31,4285	42,8571	48,5714	62,8571	71,4285	74,2857	85,7142	91,4285	100
Usuario5 M5	28,5714	34,2857	40	48,5714	57,1428	71,4285	85,7142	91,4285	91,4285
Usuario5 M6	14,2857	25,7142	34,2857	51,4285	65,7142	68,5714	71,4285	85,7142	88,57142
Usuario5 M7	14,2857	22,8571	37,1428	48,5714	54,2857	65,7142	71,4285	88,5714	97,1428
Usuario5 M8	25,7142	31,4285	37,1428	48,5714	57,1428	60	80	82,8571	91,4285
Usuario6 M1	31,4285	40	42,8571	45,7142	51,4285	65,7142	68,5714	68,5714	80
Usuario6 M2	57,1428	62,8571	71,4285	80	80	85,7142	94,2857	94,2857	97,1428
Usuario6 M3	42,8571	57,1428	65,7142	71,4285	77,1428	94,2857	97,1428	100	100
Usuario6 M4	28,5714	31,4285	40	45,7142	57,1428	62,8571	74,2857	82,8571	85,7142
Usuario6 M5	34,2857	37,1428	54,2857	60	62,8571	71,4285	77,1428	85,7142	97,1428
Usuario6 M6	42,8571	57,1428	62,8571	65,7142	74,2857	82,8571	94,2857	97,1428	100
Usuario6 M7	60	68,5714	68,5714	74,2857	80	85,7142	94,2857	100	100
Usuario6 M8	51,4285	60	62,8571	74,2857	80	88,5714	94,2857	97,1428	100
Usuario7 M1	20	22,8571	28,5714	28,5714	34,2857	40	40	54,2857	74,2857
Usuario7 M2	20	22,8571	22,8571	28,5714	31,4285	34,2857	37,1428	51,4285	65,7142
Usuario7 M3	11,4285	14,2857	20	22,8571	31,4285	45,7142	54,2857	62,8571	80
Usuario7 M4	11,4285	14,2857	14,2857	22,8571	34,2857	37,1428	42,8571	62,8571	80
Usuario7 M5	5,71428	5,71428	5,71428	17,1428	28,5714	31,4285	37,1428	51,4285	74,2857
Usuario7 M6	28,5714	31,4285	31,4285	34,2857	45,7142	57,1428	68,5714	74,2857	85,7142
Usuario7 M7	5,71428	8,57142	11,4285	11,4285	17,1428	22,8571	22,8571	31,4285	40
Usuario7 M8	17,1428	22,8571	25,7142	37,1428	37,1428	40	60	74,2857	80
Usuario8 M1	8,57142	8,57142	14,2857	25,7142	28,5714	28,5714	31,4285	40	45,7142
Usuario8 M2	17,1428	17,1428	22,8571	22,8571	22,8571	31,4285	37,14285	51,4285	65,7142
Usuario8 M3	8,57142	17,1428	25,7142	25,7142	34,2857	37,1428	42,8571	45,7142	54,2857
Usuario8 M4	22,8571	28,5714	28,5714	34,2857	37,1428	42,8571	48,5714	57,1428	62,8571
Usuario8 M5	20	25,7142	31,4285	37,1428	42,8571	45,7142	57,1428	62,8571	62,8571
Usuario8 M6	17,1428	25,7142	37,1428	40	45,7142	54,2857	60	65,7142	71,4285
Usuario8 M7	11,4285	14,2857	20	22,8571	25,7142	37,1428	42,8571	54,2857	62,8571
Usuario8 M8	5,71428	11,4285	22,8571	31,4285	40	45,7142	54,2857	60	65,7142

Tabla A2. Estudio para encontrar umbral de rechazo.

ESTUDIO DE PORCENTAJE TOTAL DE VERIFICACIÓN DE USUARIOS DISTINTOS											
Usuario/Umbral	>8,5	>8	>7,5	>7	>6,5	>6	>5,5	>5	>4,5	>4	>3,5
Usuario1 M1	0	0	0	0	0	37,5	62,5	62,5	87,5	100	100
Usuario1 M2	0	0	0	12,5	25	25	62,5	87,5	100	100	100
Usuario1 M3	0	0	0	12,5	12,5	37,5	62,5	75	100	100	100
Usuario1 M4	0	0	0	0	12,5	25	62,5	87,5	100	100	100
Usuario1 M5	0	0	0	12,5	12,5	25	37,5	75	100	100	100
Usuario1 M6	0	0	12,5	12,5	25	25	37,5	75	100	100	100
Usuario1 M7	0	0	0	12,5	25	50	50	75	100	100	100
Usuario1 M8	0	0	0	0	12,5	12,5	75	75	87,5	100	100
Usuario2 M1	12,5	12,5	12,5	12,5	25	50	75	87,5	100	100	100
Usuario2 M2	0	12,5	12,5	37,5	50	62,5	87,5	87,5	100	100	100
Usuario2 M3	0	0	12,5	25	37,5	62,5	75	87,5	100	100	100
Usuario2 M4	0	0	12,5	12,5	37,5	62,5	87,5	87,5	100	100	100
Usuario2 M5	0	0	0	12,5	12,5	37,5	37,5	75	100	100	100
Usuario2 M6	0	0	0	12,5	25	37,5	62,5	87,5	100	100	100
Usuario2 M7	0	0	25	37,5	50	62,5	62,5	75	100	100	100
Usuario2 M8	0	0	0	12,5	12,5	37,5	62,5	100	100	100	100
Usuario3 M1	0	0	0	0	12,5	37,5	37,5	62,5	87,5	100	100
Usuario3 M2	0	0	0	12,5	12,5	12,5	25	50	87,5	100	100
Usuario3 M3	0	0	0	0	12,5	12,5	50	75	100	100	100
Usuario3 M4	0	0	0	12,5	25	37,5	62,5	75	100	100	100
Usuario3 M5	0	0	0	12,5	12,5	25	50	75	100	100	100
Usuario3 M6	0	0	0	0	12,5	12,5	37,5	62,5	75	100	100
Usuario3 M7	0	0	0	12,5	12,5	25	50	50	87,5	100	100
Usuario3 M8	0	0	0	0	12,5	25	37,5	62,5	87,5	100	100
Usuario4 M1	0	0	0	0	12,5	12,5	25	37,5	87,5	100	100
Usuario4 M2	0	0	0	0	12,5	12,5	37,5	50	87,5	100	100
Usuario4 M3	0	0	0	12,5	12,5	25	37,5	62,5	87,5	100	100
Usuario4 M4	0	0	0	0	12,5	37,5	50	62,5	100	100	100
Usuario4 M5	0	0	0	0	0	0	12,5	12,5	62,5	87,5	100
Usuario4 M6	0	0	0	0	12,5	25	25	62,5	75	100	100
Usuario4 M7	0	0	0	12,5	25	25	37,5	62,5	87,5	100	100
Usuario4 M8	0	0	0	12,5	25	25	50	75	100	100	100
Usuario5 M1	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	25	62,5	75	100	100	100
Usuario5 M2	0	0	0	12,5	12,5	37,5	62,5	87,5	100	100	100
Usuario5 M3	0	0	0	12,5	12,5	25	75	100	100	100	100
Usuario5 M4	0	0	12,5	12,5	25	62,5	75	87,5	100	100	100
Usuario5 M5	0	0	0	0	12,5	25	50	62,5	87,5	100	100
Usuario5 M6	0	0	12,5	12,5	25	37,5	50	87,5	100	100	100
Usuario5 M7	0	12,5	25	25	37,5	50	62,5	100	100	100	100
Usuario5 M8	0	0	0	12,5	25	37,5	62,5	87,5	87,5	100	100

Tabla A2. Estudio para encontrar umbral de rechazo.

ESTUDIO DE PORCENTAJE TOTAL DE VERIFICACIÓN DE USUARIOS DISTINTOS											
Usuario/Umbral	>8,5	>8	>7,5	>7	>6,5	>6	>5,5	>5	>4,5	>4	>3,5
Usuario6 M1	0	0	12,5	12,5	25	50	62,5	75	100	100	100
Usuario6 M2	0	0	12,5	25	25	37,5	62,5	87,5	100	100	100
Usuario6 M3	0	0	0	25	37,5	37,5	62,5	87,5	100	100	100
Usuario6 M4	0	0	12,5	12,5	12,5	37,5	62,5	75	100	100	100
Usuario6 M5	0	0	0	0	12,5	12,5	37,5	87,5	100	100	100
Usuario6 M6	0	0	0	25	25	37,5	50	75	100	100	100
Usuario6 M7	0	0	12,5	12,5	25	37,5	75	87,5	100	100	100
Usuario6 M8	0	0	0	0	12,5	37,5	50	75	100	100	100
Usuario7 M1	0	0	12,5	12,5	25	25	62,5	75	100	100	100
Usuario7 M2	0	12,5	12,5	12,5	37,5	50	62,5	87,5	100	100	100
Usuario7 M3	0	0	0	12,5	12,5	25	50	87,5	100	100	100
Usuario7 M4	0	0	0	12,5	25	50	75	87,5	100	100	100
Usuario7 M5	0	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	25	62,5	100	100	100
Usuario7 M6	0	0	0	12,5	12,5	25	62,5	87,5	100	100	100
Usuario7 M7	0	0	0	12,5	12,5	12,5	37,5	87,5	87,5	100	100
Usuario7 M8	0	0	0	0	12,5	25	25	75	100	100	100
Usuario8 M1	0	0	0	12,5	12,5	25	50	75	87,5	100	100
Usuario8 M2	0	0	0	12,5	12,5	37,5	62,5	87,5	100	100	100
Usuario8 M3	0	0	0	0	12,5	12,5	37,5	75	100	100	100
Usuario8 M4	0	0	0	0	12,5	12,5	37,5	62,5	100	100	100
Usuario8 M5	0	0	0	0	0	12,5	37,5	50	75	100	100
Usuario8 M6	0	0	0	0	0	12,5	62,5	87,5	87,5	100	100
Usuario8 M7	0	0	0	12,5	12,5	12,5	12,5	75	87,5	100	100
Usuario8 M8	0	0	0	0	0	12,5	37,5	75	100	100	100

ANEXO B. RESPUESTA DE PANTALLA LCD

En este anexo se listan las pruebas realizadas con el polarizador fijo a 0° y las diferentes rotaciones del analizador.

PANTALLA LCD VS CCD

Tabla B1. Pruebas iniciales NG (Nivel de Gris), Analiz. #°: Analizador a #°.

NG	Analiz. 0°	NG	Analiz. 5°	NG	Analiz. 10°	NG	Analiz. 15°	NG	Analiz. 20°	NG	Analiz. 25°
0	128,703	0	123,928	0	109,341	0	46,997	0	46,1889	0	123,4541
5	130,668	5	127,67	5	108,891	5	46,531	5	46,4078	5	123,6739
10	130,223	10	126,848	10	108,366	10	47,1507	10	45,7142	10	124,283
15	128,327	15	126,731	15	107,647	15	47,0805	15	47,0402	15	124,7436
20	131,592	20	127,488	20	106,182	20	48,4286	20	48,7362	20	123,4868
25	130,294	25	126,532	25	105,346	25	48,165	25	49,9254	25	123,8288
30	131,236	30	127,739	30	104,581	30	47,9575	30	51,0958	30	123,6668
35	129,629	35	125,437	35	103,209	35	49,4142	35	56,6937	35	123,295
40	129,243	40	125,23	40	122,979	40	50,7691	40	60,5044	40	122,8965
45	130,509	45	124,03	45	123,544	45	51,2438	45	65,5611	45	123,1859
50	131,82	50	123,97	50	123,747	50	51,7802	50	68,5294	50	123,8269
55	130,595	55	123,057	55	122,405	55	53,9295	55	72,0522	55	123,5066
60	131,936	60	123,164	60	124,245	60	59,2117	60	79,7041	60	123,9589
65	130,136	65	123,7672	65	122,786	65	62,9046	65	83,5181	65	122,4052
70	130,967	70	124,116	70	123,396	70	67,5521	70	87,4782	70	123,2401
75	129,649	75	123,252	75	123,0277	75	71,4633	75	92,5731	75	124,5639
80	131,344	80	123,6533	80	122,792	80	81,4268	80	102,2421	80	123,8675
85	132,247	85	124,495	85	123,449	85	86,4009	85	107,4885	85	123,0728
90	131,023	90	123,592	90	123,192	90	91,1522	90	113,1523	90	122,9031
95	131,765	95	124,221	95	124,512	95	96,6003	95	118,3751	95	123,4914
100	130,515	100	123,268	100	123,678	100	109,4781	100	124,2232	100	123,0575
105	129,095	105	124,33	105	123,962	105	115,7751	105	124,1115	105	124,1114
110	130,856	110	123,721	110	123,777	110	121,8018	110	124,0929	110	122,6665
115	129,427	115	123,001	115	122,814	115	123,3525	115	124,0696	115	124,0756
120	126,814	120	124,396	120	124,095	120	123,0943	120	123,2042	120	124,5384
125	127,698	125	124,286	125	124,485	125	123,3303	125	126,1123	125	123,9205
130	124,364	130	124,368	130	124,38	130	122,5926	130	127,9313	130	125,5502
135	125,276	135	123,715	135	125,301	135	123,8614	135	123,9287	135	123,0473
140	121,504	140	124,27	140	124,574	140	124,5737	140	122,5432	140	123,502
145	122,438	145	124,588	145	123,661	145	123,9536	145	122,7421	145	123,2965
150	126,58	150	124,022	150	124,312	150	123,4427	150	123,9889	150	122,9328
155	125,953	155	123,057	155	123,465	155	124,501	155	124,8845	155	123,0882
160	122,069	160	124,379	160	123,233	160	125,7209	160	124,5738	160	125,8849

Tabla B1. Pruebas iniciales NG (Nivel de Gris), Analiz. #°: Analizador a #°.

NG	Analiz. 0°	NG	Analiz. 5°	NG	Analiz. 10°	NG	Analiz. 15°	NG	Analiz. 20°	NG	Analiz. 25°
165	122,826	165	123,352	165	124,727	165	123,2848	165	123,0207	165	125,6941
170	123,779	170	123,349	170	125,394	170	124,1935	170	127,1817	170	123,5481
175	122,86	175	124,701	175	123,606	175	125,4627	175	125,6996	175	127,6784
180	121,647	180	124,039	180	125,141	180	126,5525	180	128,6016	180	129,1464
185	122,637	185	123,418	185	124,511	185	125,2777	185	128,3906	185	127,2499
190	122,134	190	124,048	190	123,793	190	127,9862	190	128,5509	190	125,6674
195	123,97	195	123,293	195	127,041	195	125,6988	195	130,9268	195	131,9021
200	122,851	200	122,756	200	128,556	200	128,614	200	130,7099	200	131,5845
205	122,392	205	124,844	205	127,786	205	130,273	205	131,0587	205	128,798
210	121,922	210	124,307	210	131,201	210	130,2247	210	131,3457	210	130,3418
215	123,547	215	125,823	215	130,377	215	130,8072	215	131,5291	215	132,275
220	123,197	220	125,56	220	132,895	220	129,2307	220	133,4178	220	133,3061
225	123,442	225	127,557	225	131,854	225	130,748	225	131,2127	225	132,5089
230	123,648	230	131,737	230	130,448	230	131,5437	230	131,5701	230	132,3783
235	123,691	235	131,481	235	132,283	235	129,3317	235	133,4563	235	131,7151
240	122,794	240	131,303	240	132,018	240	132,098	240	132,9293	240	132,8037
245	123,271	245	131,441	245	132,287	245	133,0725	245	132,0998	245	132,7405
250	124,478	250	132,022	250	131,403	250	132,8225	250	132,3712	250	131,9357
255	129,881	255	133,141	255	133,258	255	131,9307	255	133,8887	255	134,1313

La tabla B2 es una continuación de la tabla B1, pero allí se afinó un poco más la búsqueda del ángulo óptimo en el que deben operar el conjunto polarizador-analizador, según los resultados encontrados en la tabla B1.

Tabla B2. Pruebas con mayor resolución en grados hexagecimales para el analizador.

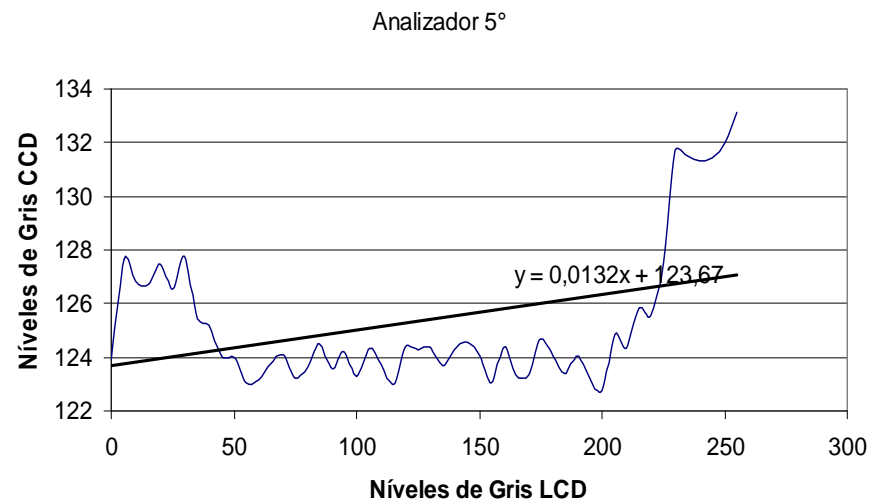
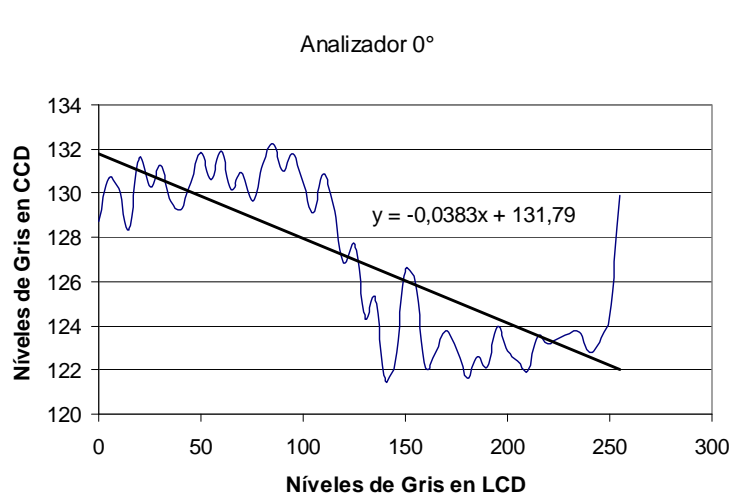
NG	Analiz.16°	NG	Analiz.17°	NG	Analiz.18°	NG	Analiz.19°	NG	Analiz.16,5°
0	40,4229	0	35,6381	0	39,7771	0	52,5945	0	28,1384
5	41,0343	5	35,8306	5	41,7088	5	53,2753	5	29,3346
10	41,759	10	36,1072	10	42,2681	10	54,821	10	29,745
15	42,5962	15	37,476	15	45,6525	15	59,2532	15	30,3295
20	44,7537	20	38,7935	20	48,469	20	61,2101	20	31,9557
25	45,3144	25	40,0843	25	53,8998	25	64,2651	25	34,3509
30	47,3271	30	41,2398	30	61,3565	30	66,5027	30	36,0311
35	50,6612	35	45,5106	35	66,3799	35	73,9872	35	42,0913
40	54,2958	40	48,8123	40	71,0053	40	79,2168	40	45,5767
45	58,1712	45	52,5939	45	76,3676	45	84,181	45	48,4405
50	61,0034	50	55,8394	50	87,7071	50	86,3457	50	52,8022
55	70,4135	55	65,2492	55	93,7081	55	91,1672	55	63,2099
60	75,7968	60	69,542	60	100,5583	60	101,8676	60	70,557
65	82,2061	65	74,9881	65	107,91	65	108,342	65	76,5141
70	87,7812	70	80,9133	70	122,7448	70	114,5981	70	83,3906

NG	Analiz.16°	NG	Analiz.17°	NG	Analiz.18°	NG	Analiz.19°	NG	Analiz.16,5°
75	100,9476	75	93,1839	75	122,7408	75	120,9143	75	97,3161
80	92,7529	80	99,1508	80	124,4839	80	123,5751	80	104,8336
85	105,8473	85	105,7587	85	123,1509	85	123,984	85	112,2506
90	113,1349	90	112,54	90	124,1201	90	124,1546	90	119,8688
95	125,7448	95	124,4955	95	124,3405	95	124,2651	95	122,8764
100	123,7231	100	123,4021	100	123,7375	100	123,2331	100	123,7501
105	124,2995	105	125,8751	105	122,8819	105	124,1162	105	123,8372

Tabla B2. Pruebas con mayor resolución en grados hexagecimales para el analizador

NG	Analiz.16°	NG	Analiz.17°	NG	Analiz.18°	NG	Analiz.19°	NG	Analiz.16,5°
110	124,0831	110	123,3657	110	124,8774	110	122,6882	110	123,7693
115	123,0611	115	124,3363	115	122,773	115	123,014	115	124,2677
120	124,3078	120	125,4018	120	124,0333	120	123,1434	120	122,8065
125	124,794	125	123,4212	125	123,4223	125	123,0958	125	124,5506
130	123,0706	130	123,6119	130	122,9901	130	123,6959	130	124,0751
135	124,4878	135	125,6341	135	123,3636	135	122,5353	135	125,5644
140	124,1072	140	124,4175	140	123,0637	140	123,2466	140	124,2101
145	123,0054	145	123,4024	145	124,1276	145	123,2182	145	123,6648
150	124,3282	150	123,89	150	125,995	150	124,538	150	124,6428
155	125,0608	155	125,3066	155	126,4786	155	124,2061	155	126,3609
160	123,441	160	124,6215	160	125,0828	160	123,864	160	125,3194
165	124,4212	165	123,4279	165	127,4463	165	123,2365	165	123,9977
170	125,264	170	124,3722	170	128,7254	170	127,1684	170	126,6766
175	128,7966	175	129,4377	175	124,4738	175	125,0044	175	127,4539
180	126,724	180	125,4101	180	128,8822	180	128,5995	180	125,5891
185	127,3089	185	126,767	185	127,531	185	128,3994	185	125,8111
190	127,7067	190	129,5322	190	132,2734	190	129,7778	190	128,0587
195	133,109	195	133,4542	195	130,0999	195	129,608	195	130,9735
200	131,4627	200	131,4032	200	132,5849	200	130,9126	200	128,7159
205	131,1606	205	130,2641	205	133,475	205	127,6891	205	128,98
210	132,2927	210	133,5112	210	132,2746	210	129,2776	210	129,822
215	131,226	215	130,7073	215	132,8358	215	131,8975	215	132,4894
220	129,5148	220	133,455	220	132,7455	220	131,7159	220	132,207
225	132,7567	225	133,7498	225	133,2236	225	131,2316	225	132,4524
230	131,8231	230	135,3565	230	133,8219	230	132,9581	230	133,0969
235	132,9433	235	136,0453	235	134,0854	235	132,5815	235	131,2147
240	133,1516	240	133,2772	240	133,826	240	130,3831	240	133,3065
245	133,4206	245	132,5784	245	134,061	245	132,5734	245	133,4566
250	131,8216	250	133,2919	250	133,86	250	132,0279	250	131,7502
255	133,9339	255	133,9306	255	133,7331	255	133,1539	255	133,9312

Finalmente, se muestran en las figuras B1 a B5 las gráficas que representan cada una de las pruebas donde las líneas con color azul denotan los resultados y la recta negra es la ecuación lineal interpolada utilizando métodos convencionales. El polarizador como se aclaró anteriormente está fijo a 0°.

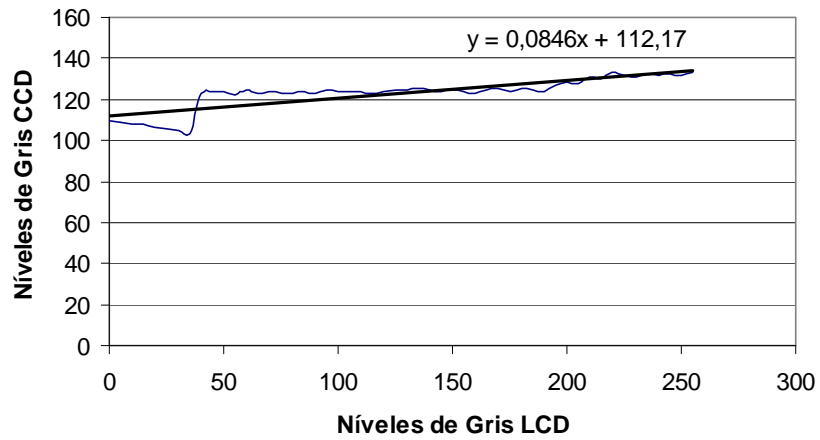


a)

b)

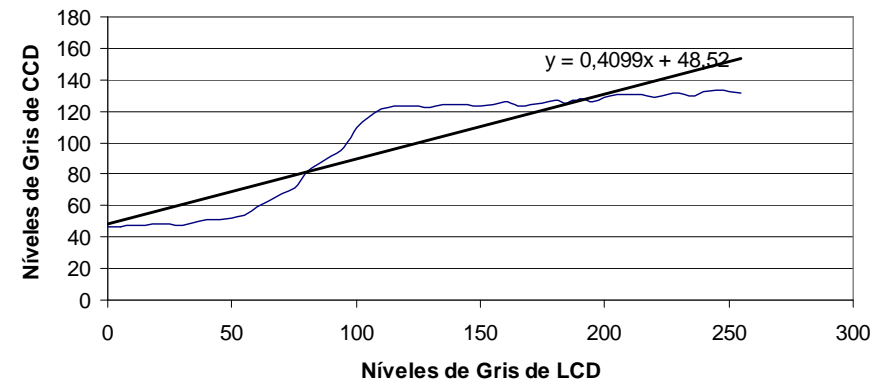
Figura B1. Gráfico de Niveles de Gris en CCD vs. Niveles de Gris en LCD. a) 0° y b) 5°

Analizador 10°



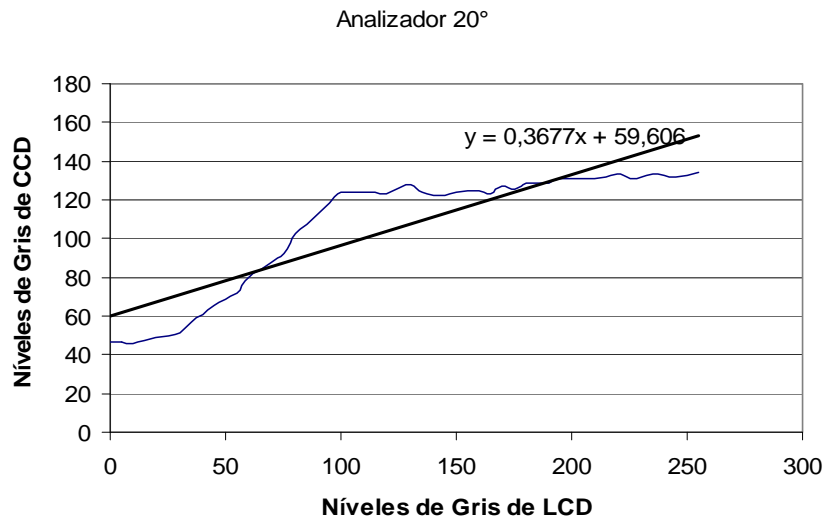
a)

Analizador 15°

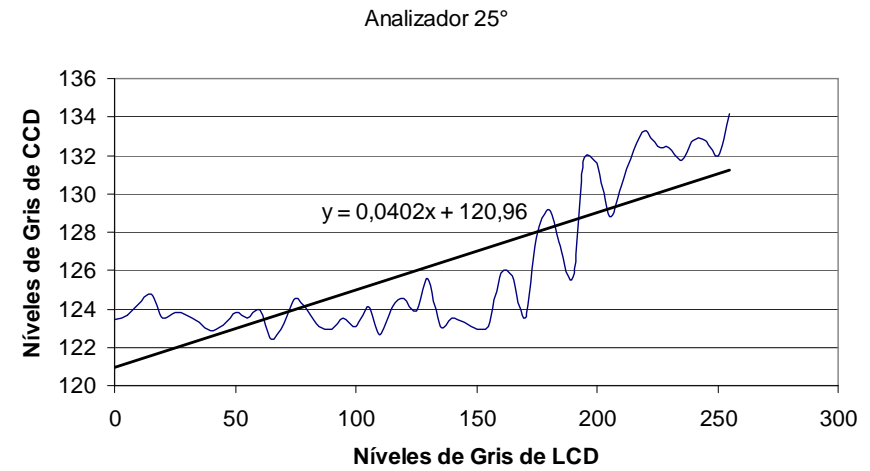


b)

Figura B2. Gráfico de Niveles de Gris en CCD vs. Niveles de Gris en LCD. a) 10° y b) 15°

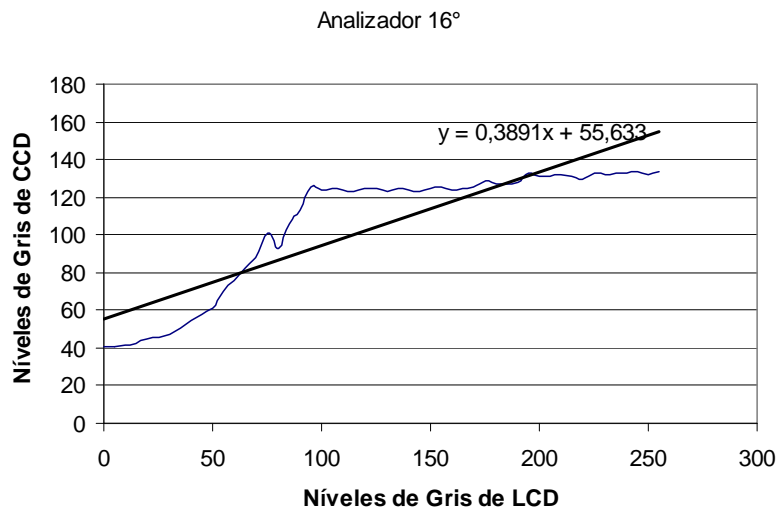


a)

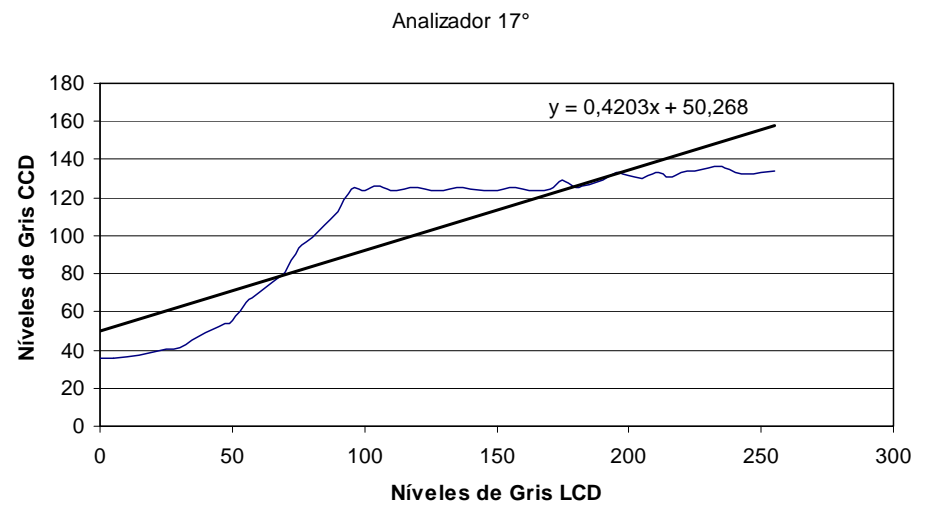


b)

Figura B3. Gráfico de Niveles de Gris en CCD vs. Niveles de Gris en LCD. a) 20° y b) 25°

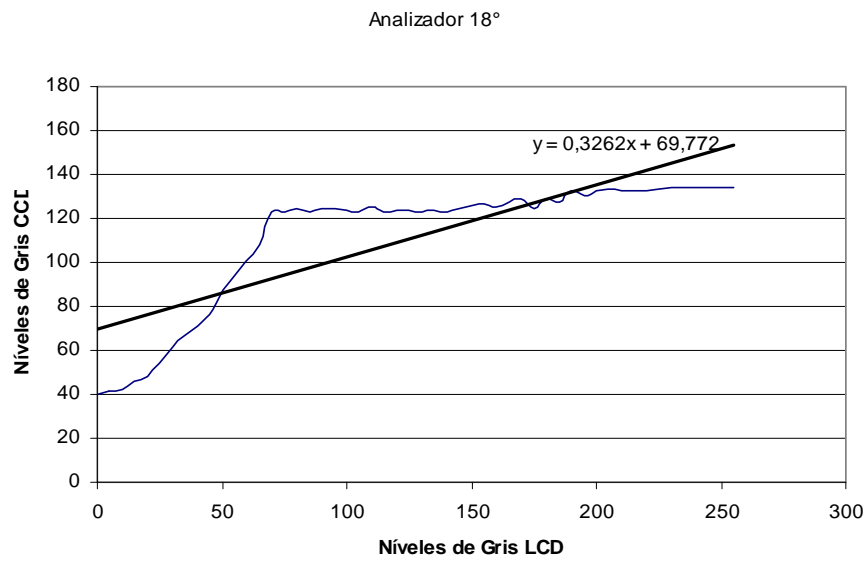


a)

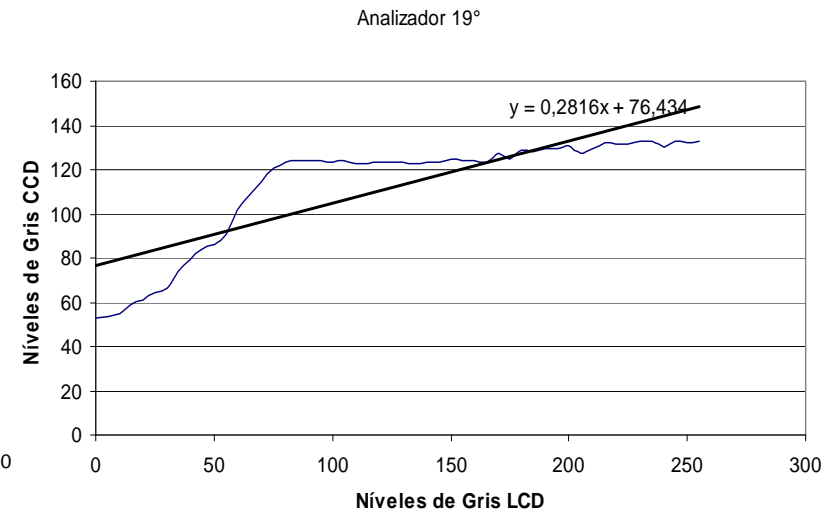


b)

Figura B4. Gráfico de Niveles de Gris en CCD vs. Niveles de Gris en LCD. a) 16° y b) 17°



a)



b)

Figura B5. Gráfico de Niveles de Gris en CCD vs. Niveles de Gris en LCD. a) 18° y b) 19°

PANTALLA LCD vs. MEDIDOR DE ENERGIA

Tabla B3. Pruebas finales NG (Nivel de Gris), Analiz. #°: Analizador a #°.

PRUEBA 1						PRUEBA 2					
NG	Analiz.36°	NG	Analiz.36°	NG	Analiz.36°	NG	Analiz.36°	NG	Analiz.36°	NG	Analiz.36°
0	0,3	31	0,48	62	0,94	0	4,34	31	6,28	62	12,3
1	0,31	32	0,48	63	0,94	1	4,33	32	6,48	63	12,4
2	0,31	33	0,48	64	1,02	2	4,35	33	6,49	64	12,6
3	0,31	34	0,5	65	1,01	3	4,35	34	6,83	65	12,6
4	0,31	35	0,5	66	1,04	4	4,41	35	6,9	66	13,3
5	0,32	36	0,53	67	1,04	5	4,42	36	7	67	13,3
6	0,32	37	0,54	68	1,1	6	4,53	37	7,1	68	14,4
7	0,32	38	0,54	69	1,09	7	4,57	38	7,1	69	14,5
8	0,33	39	0,55	70	1,19	8	4,59	39	7,4	70	15,2
9	0,33	40	0,55	71	1,18	9	4,64	40	7,4	71	15,2
10	0,33	41	0,57	72	1,25	10	4,64	41	7,8	72	15,6
11	0,34	42	0,58	73	1,25	11	4,74	42	7,9	73	15,6
12	0,34	43	0,62	74	1,28	12	4,76	43	7,9	74	16,4
13	0,35	44	0,63	75	1,28	13	4,75	44	8,1	75	16,4
14	0,34	45	0,63	76	1,35	14	4,99	45	8,1	76	17,6
15	0,37	46	0,65	77	1,47	15	5	46	8,1	77	18,1
16	0,37	47	0,65	78	1,5	16	5,07	47	8,4	78	18
17	0,37	48	0,68	79	1,5	17	5,07	48	9	79	18,4
18	0,37	49	0,67	80	1,54	18	5,2	49	9,2	80	18,4
19	0,39	50	0,73	81	1,52	19	5,21	50	9,2	81	19,4
20	0,39	51	0,74	82	1,6	20	5,43	51	9,4	82	19,4
21	0,4	52	0,74	83	1,73	21	5,5	52	9,4	83	20,8
22	0,41	53	0,76	78	1,77	22	5,52	53	9,8	77,9	21,3
23	0,41	54	0,76	85	1,77	23	5,6	54	9,8	85	21,3
24	0,42	55	0,8	86	1,82	24	5,61	55	10,5	86	21,3
25	0,42	56	0,8	87	1,81	25	5,79	56	10,7	87	21,8
26	0,43	57	0,86	88	1,8	26	5,79	57	10,7	88	21,8
27	0,44	58	0,87	89	1,92	27	6,06	58	11	89	21,8
28	0,46	59	0,88	90	1,93	28	6,16	59	11	90	23,4
29	0,47	60	0,9	91	2,08	29	6,15	60	11,5	91	23,4
30	0,47	61	0,9	92	2,07	30	6,26	61	11,5	92	25,1

Tabla B3. Pruebas finales NG (Nivel de Gris), Analiz. #°: Analizador a #° (Continúa).

PRUEBA 1						PRUEBA 2					
NG	Analiz.36°	NG	Analiz.36°	NG	Analiz.36°	NG	Analiz.36°	NG	Analiz.36°	NG	Analiz.36°
93	2,12	138	4,37	183	6,9	93	25,1	138	59,1	183	94
94	2,11	139	4,56	184	7	94	25,7	139	59	184	96
95	2,22	140	4,6	185	7	95	25,7	140	60,7	185	98
96	2,2	141	4,61	186	7	96	26,9	141	60,6	186	97
97	2,37	142	4,61	187	7	97	26,8	142	63,2	187	99
98	2,4	143	4,62	188	7	98	28,7	143	64	188	99
99	2,4	144	4,74	189	7,2	99	29,3	144	63,9	189	100
100	2,45	145	4,71	190	7,3	100	32,1	145	64,6	190	99
101	2,44	146	4,91	191	7,4	101	32,7	146	64,6	191	100
102	2,56	147	4,96	192	7,3	102	32,7	147	66	192	103
103	2,54	148	4,96	193	7,4	103	33,4	148	66	193	103
104	2,72	149	4,99	194	7,4	104	33,3	149	68,5	194	106
105	2,75	150	4,98	195	7,6	105	34,7	150	69	195	105
106	2,75	151	5,11	196	7,7	106	34,7	151	69	196	106
107	2,81	152	5,27	197	7,7	107	36,7	152	70	197	106
108	2,79	153	5,27	198	7,8	108	37,3	153	69	198	107
109	2,93	154	5,41	199	7,8	109	37,3	154	71	199	109
110	2,91	155	5,52	200	7,8	110	38	155	71	200	109
111	3,1	156	5,51	201	7,8	111	37,9	156	72	201	112
112	3,15	157	5,54	202	8	112	39,5	157	74	202	112
113	3,14	158	5,64	203	8	113	39,5	158	74	203	113
114	3,18	159	5,63	204	8,1	114	41,7	159	75	204	112
115	3,18	160	5,75	205	8,1	115	42,5	160	75	205	114
116	3,28	161	5,85	206	8,3	116	42,5	161	77	206	116
117	3,26	162	5,85	207	8,2	117	43,1	162	76	207	117
118	3,44	163	5,84	208	8,3	118	43,2	163	78	208	118
119	3,49	164	5,91	209	8,3	119	44,7	164	80	209	118
120	3,48	165	5,93	210	8,4	120	44,5	165	80	210	120
121	3,53	166	6,07	211	8,6	121	46,8	166	80	211	120
122	3,52	167	6,01	212	8,5	122	47,6	167	82	212	122
123	3,65	168	6,21	213	8,7	123	47,4	168	81	213	124
124	3,63	169	6,18	214	8,7	124	48,2	169	83	214	124
125	3,83	170	6,32	215	8,8	125	48,2	170	83	215	126
126	3,86	171	6,3	216	8,8	126	49,8	171	85	216	126
127	3,86	172	6,37	217	9	127	49,7	172	85	217	127
128	3,92	173	6,32	218	9,1	128	52,1	173	87	218	127
129	3,9	174	6,41	219	9,1	129	52,9	174	87	219	129
130	4,02	175	6,54	220	9,3	130	52,9	175	88	220	132
131	4,02	176	6,5	221	9,2	131	53,7	176	88	221	132
132	4,18	177	6,6	222	9,3	132	53,6	177	90	222	134
133	4,22	178	6,5	223	9,3	133	55,3	178	92	223	133
134	4,22	179	6,6	224	9,5	134	55,3	179	91	224	135
135	4,28	180	6,6	225	9,6	135	57,6	180	93	225	134
136	4,27	181	6,7	226	9,6	136	58,4	181	93	226	136
137	4,39	182	6,9	227	9,8	137	58,5	182	94	227	139

Tabla B3. Pruebas finales NG (Nivel de Gris), Analiz. #°: Analizador a #°

PRUEBA 1						PRUEBA 2					
NG	Analiz.36°	NG	Analiz.36°	NG	Analiz.36°	NG	Analiz.36°	NG	Analiz.36°	NG	Analiz.36°
228	9,7	238	10,4	248	11,2	228	139	238	151	248	164
229	9,8	239	10,5	249	11	229	141	239	151	249	164
230	9,8	240	10,8	250	11	230	141	240	154	250	169
231	10	241	10,6	251	11	231	142	241	154	251	168
232	10,1	242	10,7	252	11,2	232	142	242	159	252	169
233	10	243	10,7	253	11,2	233	145	243	157	253	172
234	10,3	244	10,9	254	11,1	234	146	244	159	254	173
235	10,3	245	10,7	255	11,4	235	146	245	159	255	178
236	10,3	246	10,9			236	150	246	161		
237	10,3	247	10,9			237	150	247	161		

ANEXO C. TABLAS DE PRUEBAS FINALES POR USUARIO

Tabla C1. USUARIO 1 CONTRA OTROS USUARIOS. PSR

USUARIOS COMPARADOS PSR	USUARIO1									
	MANO DERECHA					MANO IZQUIERDA				
	PULGAR	INDICE	CORAZON	ANULAR	MEÑIQUE	PULGAR	INDICE	CORAZON	ANULAR	MEÑIQUE
Usuario1 T1	179,4499	85,3582	69,6260	60,3113	62,0143	59,5618	35,3639	19,2183	13,1855	9,0565
Usuario1 T2	67,7866	57,8560	32,8408	7,2867	10,0474	21,5458	18,4815	52,2652	26,8239	52,7295
Usuario1 T3	69,4841	32,0479	19,2361	6,6902	14,8431	20,0685	21,9015	7,9497	5,2399	7,9814
Usuario1 T4	26,1025	82,6272	27,6004	20,6405	27,2440	9,5485	24,8606	6,3036	5,4752	7,3872
Usuario2 T1	6,9206	3,7983	0,0000	2,7030	0,0000	4,4530	6,1374	6,2229	5,6564	5,2231
Usuario2 T2	6,3137	5,5130	5,8532	4,5584	0,0000	7,3369	9,5826	6,0390	6,0911	3,6807
Usuario2 T3	6,7969	4,9471	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	8,8150	5,6564	5,3080	0,0000
Usuario2 T4	7,3992	5,2787	4,3868	0,0000	0,0000	0,0000	7,6701	5,3748	0,0000	0,0000
Usuario3 T1	10,3386	9,4258	4,6260	0,0000	0,0000	6,3085	0,0000	9,9516	0,0000	3,7683
Usuario3 T2	6,7956	14,5504	7,3227	3,6659	7,2340	8,2093	8,4002	0,0000	8,9911	4,4043
Usuario3 T3	11,1200	7,8953	3,9163	4,6612	6,0225	6,0202	11,9651	4,3448	6,1335	5,0019
Usuario3 T4	0,0000	7,5334	0,0000	4,1312	5,7466	6,7923	13,1129	6,5141	4,8485	8,6590
Usuario4 T1	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	6,0659	6,7156	0,0000	5,4644	5,3520	10,9005
Usuario4 T2	9,8596	4,2623	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	10,5288	5,1452	5,9816	0,0000
Usuario4 T3	0,0000	4,0297	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	6,7013	4,5527	6,8665
Usuario4 T4	6,6209	4,3691	0,0000	0,0000	0,0000	4,5649	3,8080	4,4227	5,6240	5,1753
Usuario5 T1	8,1472	17,3326	5,4835	0,0000	4,6939	5,0047	7,4186	5,5663	5,4356	5,7660
Usuario5 T2	6,7953	0,0000	11,0699	0,0000	0,0000	3,3726	6,5291	5,6468	8,3742	4,3650
Usuario5 T3	0,0000	0,0000	11,3464	0,0000	0,0000	4,3158	6,0466	0,0000	0,0000	3,9013
Usuario5 T4	0,0000	9,0691	0,0000	4,6432	0,0000	3,9434	7,1488	4,0204	0,0000	6,6857
Usuario6 T1	7,0434	5,3110	10,8490	3,4915	0,0000	4,1595	8,5634	6,3239	3,9453	0,0000
Usuario6 T2	6,8049	20,3276	12,9021	3,3644	0,0000	5,9332	7,9266	6,3595	4,9095	4,6852
Usuario6 T3	7,8896	16,0513	9,7246	4,8125	0,0000	6,3064	11,8321	7,9229	0,0000	4,6308
Usuario6 T4	5,5189	13,0001	6,0748	3,7065	3,1774	6,1358	9,3619	3,9853	5,3021	3,8035
Usuario7 T1	10,4094	7,8521	6,9831	4,7006	4,3027	6,7332	4,3677	3,8342	4,0639	5,7372
Usuario7 T2	0,0000	6,4162	7,1189	0,0000	3,3671	9,0713	5,2417	0,0000	3,8966	3,4680
Usuario7 T3	0,0000	11,8232	0,0000	4,0115	3,1287	10,0180	4,8764	3,8649	0,0000	4,5945

USUARIOS COMPARADOS PSR	USUARIO1									
	MANO DERECHA					MANO IZQUIERDA				
	PULGAR	INDICE	CORAZON	ANULAR	MEÑIQUE	PULGAR	INDICE	CORAZON	ANULAR	MEÑIQUE
Usuario7 T4	0,0000	7,4216	0,0000	0,0000	0,0000	9,9207	0,0000	2,8849	0,0000	4,7204
Usuario8 T1	4,0766	0,0000	8,7345	4,5141	0,0000	10,8856	9,4754	3,8753	3,6081	0,0000
Usuario8 T2	0,0000	4,2883	5,2911	0,0000	0,0000	6,8999	9,3934	3,2676	5,0171	6,7576
Usuario8 T3	0,0000	0,0000	6,8322	0,0000	4,8895	6,5319	10,8421	3,0523	3,7922	5,3166
Usuario8 T4	0,0000	5,3521	5,7167	0,0000	0,0000	8,4583	16,4724	2,5820	0,0000	0,0000
Usuario9 T1	6,3758	11,3710	0,0000	0,0000	0,0000	12,8463	13,1152	0,0000	4,7236	8,2673
Usuario9 T2	3,7966	6,1989	0,0000	0,0000	4,5459	10,0406	0,0000	0,0000	6,7704	5,1844
Usuario9 T3	5,8907	7,8489	11,4707	5,1867	6,4070	11,0239	0,0000	4,8171	0,0000	7,8768
Usuario9 T4	0,0000	10,0319	13,0737	0,0000	0,0000	7,0846	14,5425	8,0612	5,6678	4,9574
Usuario10 T1	7,0026	5,2961	4,9149	0,0000	0,0000	9,8035	12,5542	2,9859	0,0000	3,6851
Usuario10 T2	5,3453	5,8198	5,7469	0,0000	0,0000	0,0000	14,6997	5,1429	6,5866	0,0000
Usuario10 T3	6,1619	5,2963	3,3207	0,0000	0,0000	10,3471	17,1029	0,0000	6,0062	6,7413
Usuario10 T4	0,0000	3,2967	5,9641	0,0000	0,0000	8,0832	10,9222	5,7371	3,6525	4,6880

Tabla C2. USUARIO 1 CONTRA OTROS USUARIOS. PCE

USUARIOS COMPARADOS PCE	USUARIO1									
	MANO DERECHA					MANO IZQUIERDA				
	PULGAR	INDICE	CORAZON	ANULAR	MEÑIQUE	PULGAR	INDICE	CORAZON	ANULAR	MEÑIQUE
Usuario1 T1	1,81E-07	1,20E-07	9,60E-07	2,58E-07	1,56E-05	5,40E-07	1,64E-07	3,43E-07	1,14E-07	2,13E-07
Usuario1 T2	8,58E-08	3,64E-08	1,58E-07	8,49E-07	8,54E-08	2,91E-05	4,73E-07	1,59E-04	2,01E-05	2,34E-05
Usuario1 T3	3,25E-08	3,73E-08	3,78E-06	2,19E-07	5,59E-07	4,09E-07	3,97E-05	1,07E-03	1,37E-05	2,97E-07
Usuario1 T4	1,65E-07	1,74E-06	6,14E-07	3,75E-08	2,01E-06	2,17E-07	1,75E-05	8,69E-05	2,58E-05	1,44E-07
Usuario2 T1	4,83E-06	7,74E-07	0	2,20E-07	0	1,06E-06	1,12E-06	9,96E-07	4,08E-07	1,563E-06
Usuario2 T2	3,74E-06	1,94E-06	3,49E-07	1,51E-07	0	2,19E-07	6,69E-07	2,67E-05	1,66E-06	3,45E-06
Usuario2 T3	3,15E-06	3,36E-07	0	0	0	0	1,13E-07	3,17E-07	7,24E-06	0,00E+00
Usuario2 T4	7,62E-07	1,86E-06	2,67E-06	0	0	0	8,84E-07	2,39E-05	0	0,00E+00
Usuario3 T1	8,29E-08	1,53E-06	5,35E-06	0	0	8,56E-07	0,00E+00	4,33E-06	0,00E+00	1,05E-05
Usuario3 T2	1,32E-07	9,00E-08	2,93E-07	5,28E-06	3,56E-07	7,34E-08	8,39E-07	0,00E+00	9,84E-07	1,486E-07
Usuario3 T3	5,01E-06	1,40E-06	2,58E-06	2,90E-07	7,74E-07	1,33E-07	9,70E-08	1,80E-06	1,13E-06	2,62E-06

USUARIOS COMPARADOS	USUARIO1									
	MANO DERECHA					MANO IZQUIERDA				
	PCE	PULGAR	INDICE	CORAZON	ANULAR	MEÑIQUE	PULGAR	INDICE	CORAZON	ANULAR
Usuario3 T4	0	1,62E-06	0	7,11E-07	6,42E-07	7,91E-07	9,72E-07	1,77E-06	3,28E-07	2,27E-07
Usuario4 T1	0	0	0	0	4,36E-07	3,88E-06	0	7,7167E-07	5,75E-07	2,79E-06
Usuario4 T2	8,62E-07	2,17E-06	0	0	0	0	2,63E-06	2,80E-07	1,63E-07	0,00E+00
Usuario4 T3	0,00E+00	5,50E-07	0	0	0	0	0	2,32E-07	4,67E-06	4,61E-06
Usuario4 T4	3,68E-07	4,98E-06	0	0	0	2,79E-07	2,75E-06	5,65E-06	2,55E-07	2,50E-06
Usuario5 T1	5,14E-07	3,66E-07	3,15E-07	0	4,95E-07	1,61E-07	9,28E-07	1,43E-05	8,73E-07	5,49E-06
Usuario5 T2	6,18E-07	0	5,10E-07	0	0	1,88E-06	8,96E-06	4,68E-07	6,85E-07	4,47E-07
Usuario5 T3	0,00E+00	0	8,86E-07	0	0	1,24E-06	1,91E-06	0,00E+00	0,00E+00	3,55E-07
Usuario5 T4	0	9,54E-08	0	6,35E-07	0	4,33E-07	8,61E-07	3,54E-05	0,00E+00	1,93E-07
Usuario6 T1	1,03E-07	3,82E-05	7,04E-07	3,85E-07	0	1,60E-07	1,35E-05	1,97E-06	1,70E-07	0,00E+00
Usuario6 T2	9,24E-07	3,08E-06	1,32E-07	3,91E-07	0	1,90E-07	7,00E-07	1,87E-06	2,92E-06	1,56E-06
Usuario6 T3	4,92E-07	2,24E-07	2,16E-07	4,37E-06	0	5,69E-07	2,20E-07	5,54E-07	0,00E+00	5,44E-07
Usuario6 T4	1,42E-06	1,30E-07	4,57E-07	1,32E-06	3,74E-06	5,86E-07	8,46E-07	4,54E-06	4,98E-06	8,51E-07
Usuario7 T1	5,15E-06	2,40E-07	6,60E-06	1,01E-06	5,96E-06	8,83E-07	7,44E-07	2,0245E-06	3,12E-06	1,11E-06
Usuario7 T2	0	1,18E-06	1,35E-07	0	1,03E-06	1,67E-06	6,43E-07	0,00E+00	1,16E-06	1,23E-06
Usuario7 T3	0,00E+00	1,84E-07	0	1,44E-06	4,83E-07	1,07E-06	1,43E-06	1,3795E-06	0,00E+00	1,96E-06
Usuario7 T4	0	1,99E-06	0	0	0	1,27E-06	0	4,5609E-06	0	6,43E-06
Usuario8 T1	1,89E-07	0	5,61E-07	2,64E-06	0	8,30E-07	2,13E-06	1,4301E-06	1,34E-06	0,00E+00
Usuario8 T2	0,00E+00	1,64E-06	2,51E-07	0	0	1,22E-06	3,08E-07	1,63E-06	3,03E-07	3,08E-06
Usuario8 T3	0,00E+00	0	3,05E-06	0	1,45E-06	4,10E-07	7,18E-07	1,35E-06	1,22E-05	1,46E-06
Usuario8 T4	0,00E+00	1,29E-06	3,13E-06	0	0	5,24E-07	4,32E-07	3,8383E-07	0,00E+00	0,00E+00
Usuario9 T1	2,11E-06	1,86E-07	0	0	0	9,56E-07	4,67E-07	0	3,2E-07	2,04E-06
Usuario9 T2	4,78E-06	1,37E-07	0	0	1,45E-06	7,39E-08	0	0	1,29E-06	6,11E-07
Usuario9 T3	2,17E-06	1,66E-07	3,03E-07	5,64E-07	4,84E-06	9,25E-08	0	2,30E-06	0,00E+00	5,14E-06
Usuario9 T4	0,00E+00	3,84E-07	1,54E-07	0	0	4,60E-07	1,47E-07	2,28E-06	1,13E-06	1,37E-05
Usuario10 T1	1,77E-06	9,01E-07	2,71E-07	0	0	6,72E-07	6,94E-07	1,08E-06	0,00E+00	1,17E-06
Usuario10 T2	2,45E-06	3,06E-06	2,42E-06	0	0	0	1,13E-07	7,16E-07	6,55E-07	0,00E+00
Usuario10 T3	4,04E-07	2,78E-06	1,18E-05	0	0	9,99E-08	6,58E-07	0,00E+00	2,92E-07	1,04E-06
Usuario10 T4	0,00E+00	6,07E-06	1,46E-05	0	0	1,95E-07	7,40E-08	3,18E-06	8,49E-07	7,36E-07

Tabla C3. USUARIO 1 CONTRA OTROS USUARIOS. SNR

USUARIOS COMPARADOS SNR	USUARIO1									
	MANO DERECHA					MANO IZQUIERDA				
	PULGAR	INDICE	CORAZON	ANULAR	MEÑIQUE	PULGAR	INDICE	CORAZON	ANULAR	MEÑIQUE
Usuario1 T1	7,1949	3,4297	2,7996	2,4225	2,4901	2,3962	1,4338	0,7882	0,6678	0,3790
Usuario1 T2	2,7318	2,3321	1,3294	0,3086	0,4309	0,8688	0,8686	2,1029	1,0861	2,1189
Usuario1 T3	2,7973	1,2990	0,8417	0,2839	0,6026	0,9934	0,8936	0,3309	0,2194	0,3373
Usuario1 T4	1,2997	3,3207	1,1158	0,8383	1,1049	0,4596	1,1778	0,2637	0,2297	0,3165
Usuario2 T1	0,3055	0,1619	0,0000	0,1135	0,0000	0,1910	0,2779	0,2790	0,2398	0,2185
Usuario2 T2	0,2690	0,2384	0,2482	0,1916	0,0000	0,3050	0,4636	0,2637	0,2566	0,1538
Usuario2 T3	0,2872	0,2156	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,4520	0,2531	0,2219	0,0000
Usuario2 T4	0,3149	0,2200	0,1827	0,0000	0,0000	0,0000	0,3605	0,2259	0,0000	0,0000
Usuario3 T1	0,4785	0,5067	0,1926	0,0000	0,0000	0,2613	0,0000	0,4173	0,0000	0,1591
Usuario3 T2	0,2975	0,6372	0,3096	0,1574	0,3242	0,3448	0,4141	0,0000	0,3762	0,1843
Usuario3 T3	0,4602	0,3524	0,1699	0,2049	0,2562	0,2518	0,5868	0,1823	0,2612	0,2230
Usuario3 T4	0,0000	0,3442	0,0000	0,1746	0,2403	0,2986	0,5580	0,2794	0,2106	0,4108
Usuario4 T1	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,2552	0,2888	0,0000	0,2316	0,2277	0,4859
Usuario4 T2	0,4175	0,1829	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,4399	0,2173	0,2505	0,0000
Usuario4 T3	0,0000	0,1711	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,2781	0,1890	0,2864
Usuario4 T4	0,2822	0,1880	0,0000	0,0000	0,0000	0,1926	0,1610	0,1880	0,2473	0,2161
Usuario5 T1	0,3447	0,7535	0,2355	0,0000	0,2041	0,2209	0,3251	0,2319	0,2396	0,2439
Usuario5 T2	0,2962	0,0000	0,4950	0,0000	0,0000	0,1444	0,2756	0,2417	0,3814	0,1883
Usuario5 T3	0,0000	0,0000	0,4700	0,0000	0,0000	0,1841	0,2572	0,0000	0,0000	0,1683
Usuario5 T4	0,0000	0,3954	0,0000	0,1934	0,0000	0,1775	0,3320	0,1692	0,0000	0,2880
Usuario6 T1	0,3200	0,2325	0,5129	0,1467	0,0000	0,1783	0,3643	0,2699	0,1668	0,0000
Usuario6 T2	0,3083	0,8327	0,5591	0,1445	0,0000	0,2475	0,4030	0,2715	0,2062	0,1970
Usuario6 T3	0,3626	0,8878	0,5225	0,2015	0,0000	0,2647	0,5228	0,3375	0,0000	0,1943
Usuario6 T4	0,2364	0,6760	0,2944	0,1580	0,1351	0,2631	0,4346	0,1671	0,2203	0,1631
Usuario7 T1	0,4321	0,3659	0,2948	0,1973	0,1781	0,2984	0,1860	0,1634	0,1706	0,2442
Usuario7 T2	0,0000	0,2722	0,3025	0,0000	0,1415	0,4207	0,2235	0,0000	0,1658	0,1464
Usuario7 T3	0,0000	0,5017	0,0000	0,1682	0,1324	0,4317	0,2069	0,1647	0,0000	0,1938
Usuario7 T4	0,0000	0,3859	0,0000	0,0000	0,0000	0,5116	0,0000	0,1198	0,0000	0,1994
Usuario8 T1	0,1757	0,0000	0,3849	0,1886	0,0000	0,5244	0,4117	0,1653	0,1526	0,0000
Usuario8 T2	0,0000	0,1835	0,2249	0,0000	0,0000	0,2926	0,4224	0,1363	0,2101	0,2819

USUARIOS COMPARADOS	USUARIO1									
	MANO DERECHA					MANO IZQUIERDA				
	SNR	PULGAR	INDICE	CORAZON	ANULAR	MEÑIQUE	PULGAR	INDICE	CORAZON	ANULAR
Usuario8 T3	0,0000	0,0000	0,2951	0,0000	0,2027	0,2902	0,5063	0,1280	0,1609	0,2235
Usuario8 T4	0,0000	0,2257	0,2423	0,0000	0,0000	0,4194	0,7154	0,1101	0,0000	0,0000
Usuario9 T1	0,2663	0,6145	0,0000	0,0000	0,0000	0,6157	0,5868	0,0000	0,2022	0,3567
Usuario9 T2	0,1672	0,2811	0,0000	0,0000	0,1893	0,4462	0,0000	0,0000	0,2830	0,2229
Usuario9 T3	0,2475	0,3999	0,4906	0,2202	0,2628	0,5105	0,0000	0,2060	0,0000	0,3349
Usuario9 T4	0,0000	0,4927	0,5743	0,0000	0,0000	0,3125	0,7178	0,3340	0,2400	0,2074
Usuario10 T1	0,2934	0,2283	0,2093	0,0000	0,0000	0,4716	0,5942	0,1262	0,0000	0,1566
Usuario10 T2	0,2297	0,2470	0,2415	0,0000	0,0000	0,0000	0,6159	0,2241	0,2810	0,0000
Usuario10 T3	0,2592	0,2268	0,1381	0,0000	0,0000	0,4926	0,7101	0,0000	0,2570	0,2805
Usuario10 T4	0,0000	0,1374	0,2528	0,0000	0,0000	0,3718	0,5427	0,2376	0,1557	0,1959

Tabla C4. USUARIO 1 CONTRA OTROS USUARIOS. MÁXIMO

USUARIOS COMPARADOS	USUARIO1									
	MANO DERECHA					MANO IZQUIERDA				
	Máximo	PULGAR	INDICE	CORAZON	ANULAR	MEÑIQUE	PULGAR	INDICE	CORAZON	ANULAR
Usuario1 T1	15974,020	9802,39	3444,79	2752,26	2198,94	5354,15	2460,11	589,59	444,06	202,98
Usuario1 T2	7336,53	3107,63	1568,80	261,34	362,28	732,34	840,49	1698,23	882,20	1574,21
Usuario1 T3	6978,16	1959,94	865,84	244,85	427,99	1130,99	576,07	242,08	171,46	153,86
Usuario1 T4	2418,40	2774,27	857,65	726,19	990,40	328,00	840,27	194,45	178,89	179,52
Usuario2 T1	220,19	143,93	173,57	117,81	122,44	142,89	193,92	228,57	153,10	144,52
Usuario2 T2	213,06	202,46	133,14	193,20	158,63	238,93	237,99	188,24	161,60	136,36
Usuario2 T3	220,09	171,06	208,94	128,72	184,05	166,33	251,74	195,35	150,07	108,36
Usuario2 T4	188,74	210,96	149,92	96,56	166,80	226,33	198,95	183,64	168,62	169,35
Usuario3 T1	308,69	431,53	164,03	174,73	272,19	309,39	261,16	258,11	237,43	169,79
Usuario3 T2	234,27	525,71	277,88	158,94	221,71	344,88	229,78	249,42	270,36	122,64
Usuario3 T3	357,30	255,19	153,11	174,29	174,83	259,72	349,09	213,19	163,84	161,97
Usuario3 T4	263,82	205,98	124,69	147,99	185,43	264,90	339,86	210,09	172,26	223,32
Usuario4 T1	248,86	245,67	197,46	134,17	181,48	192,62	156,77	160,29	169,66	90,81
Usuario4 T2	185,08	165,70	194,53	164,68	148,05	194,62	204,16	176,88	190,85	226,91

USUARIOS COMPARADOS	USUARIO1									
	MANO DERECHA					MANO IZQUIERDA				
	Máximo	PULGAR	INDICE	CORAZON	ANULAR	MEÑIQUE	PULGAR	INDICE	CORAZON	ANULAR
Usuario4 T3	469,47	169,42	207,40	195,81	171,44	215,95	166,40	226,50	139,55	134,52
Usuario4 T4	176,36	146,68	199,31	150,41	140,46	166,63	130,13	154,89	168,27	146,25
Usuario5 T1	259,34	534,61	182,73	190,72	162,07	183,15	147,74	190,09	187,86	162,71
Usuario5 T2	229,04	294,31	370,45	212,53	161,40	136,32	157,15	177,44	261,36	150,56
Usuario5 T3	248,26	381,24	326,72	168,99	144,09	197,35	169,38	167,61	362,87	144,38
Usuario5 T4	258,72	247,42	491,82	166,61	193,15	144,94	169,47	161,22	291,32	145,52
Usuario6 T1	250,5	132,04	359,08	145,19	149,89	157,55	205,89	194,76	138,52	159,28
Usuario6 T2	238,52	560,22	325,56	118,63	123,85	266,86	186,49	197,46	129,51	156,94
Usuario6 T3	305,65	615,63	352,15	160,22	171,63	246,83	295,89	233,54	209,81	150,42
Usuario6 T4	185,68	512,16	214,15	123,05	120,99	202,81	234,76	124,03	142,29	115,01
Usuario7 T1	159,87	236,60	206,45	178,50	148,12	212,59	153,42	139,29	119,64	127,06
Usuario7 T2	191,47	202,16	185,17	127,78	118,08	200,78	178,98	145,18	148,44	123,18
Usuario7 T3	131,67	388,25	336,88	138,65	117,41	218,85	161,10	140,54	262,98	137,83
Usuario7 T4	198,37	245,69	339,45	145,31	163,98	270,51	192,77	159,30	165,47	124,15
Usuario8 T1	118,79	171,95	277,82	176,16	201,58	279,22	197,82	164,83	135,82	163,04
Usuario8 T2	127,88	138,16	181,42	235,68	139,00	253,05	259,86	158,32	189,07	185,09
Usuario8 T3	184,61	157,50	172,09	177,55	153,15	241,54	230,01	105,46	129,57	136,32
Usuario8 T4	154,38	147,68	185,72	148,30	138,20	282,00	510,60	110,45	181,80	127,14
Usuario9 T1	227,15	529,24	409,97	227,50	142,96	437,10	656,93	368,34	133,29	173,06
Usuario9 T2	129,61	221,14	373,27	424,47	199,67	321,22	681,13	245,89	174,17	184,13
Usuario9 T3	180,96	320,83	439,07	176,59	175,19	326,25	289,21	189,05	293,27	175,12
Usuario9 T4	207,01	303,21	500,85	213,71	144,22	238,51	714,34	211,29	146,70	151,71
Usuario10 T1	286,77	183,99	198,17	188,25	164,06	291,53	487,50	118,69	136,21	117,89
Usuario10 T2	226,56	169,50	232,09	182,08	150,10	305,17	472,29	150,79	158,67	128,00
Usuario10 T3	229,82	176,46	166,68	155,52	199,61	349,87	668,70	195,33	158,02	164,47
Usuario10 T4	411,35	166,37	188,50	170,14	189,09	291,00	352,36	171,70	120,09	160,89