

**ALGORITMO DE MEJORAMIENTO DE IMÁGENES DE HUELLAS DACTILARES  
PARA SU POSTERIOR USO EN VERIFICACIÓN BIOMÉTRICA.**

**NICOLAS REY VILLAMIZAR**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO – MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA  
ENERO  
2008**

NICOLAS REY VILLAMIZAR

---

**ALGORITMO DE MEJORAMIENTO DE IMÁGENES DE HUELLAS DACTILARES  
PARA SU POSTERIOR USO EN VERIFICACIÓN BIOMÉTRICA.**

**NICOLAS REY VILLAMIZAR**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de  
Ingeniero Electrónico**

**Director  
Dr. YEZID TORRES MORENO**

**Codirector  
MI(c). Ing. OMAR JAVIER TÍJARO ROJAS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO – MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA  
ENERO  
2008**

## **AGRADECIMIENTOS**

A todas las personas que de una u otra forma colaboraron en la realización de este proyecto de grado, muy especialmente a mi director por su constante aporte, tanto en aspectos académicos como personales y sobre todo por ser un modelo a seguir en su entrega a la investigación. Agradezco también a mi codirector, por su compromiso para con el desarrollo del proyecto. A los miembros del Grupo de Óptica y Tratamiento de señales (GOTS), por su constante aporte durante los seminarios de grupo en el desarrollo del proyecto. Y a todos mis familiares y amigos, quienes de una u otra forma brindaron el respaldo necesario para perseverar en la culminación de este proyecto.

NICOLAS REY VILLAMIZAR

---

*A mi familia.*

*Nicolas Rey Villamizar*

## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	12
1. ESPECIFICACIONES DEL PROYECTO .....	3
1.1. OBJETIVO GENERAL .....	3
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	3
2. RECONOCIMIENTO USANDO BIOMETRÍA .....	4
2.1. MÉTODOS BIOMÉTRICOS MAS UTILIZADOS .....	4
2.2. HISTORIA DEL USO DE LAS HUELLAS DACTILARES .....	6
2.3. ESTÁNDARES PARA EL USO DE LAS HUELLAS DACTILARES COMO MÉTODO BIOMÉTRICO .....	9
3. DIFERENTES MÉTODOS UTILIZADOS PARA ADQUISICIÓN DE IMÁGENES DE HUELLAS DACTILARES.....	11
3.1. MÉTODO TRADICIONAL.....	11
3.2. MÉTODOS DE DIGITALIZACIÓN DIRECTA.....	12
3.2.1. SENSORES CAPACITIVOS.....	13
3.2.2. SENSORES DE RADIO FRECUENCIA (RF) .....	17
3.2.3. SENSORES ÓPTICOS.....	18
3.2.4. OTROS TIPOS DE SENSORES .....	21
4. SISTEMA DE ADQUISICIÓN ESCOGIDO.....	23
4.1. CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA.....	23
4.2. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO.....	24
4.3. PRUEBAS REALIZADAS AL SISTEMA .....	27
5. BASE DE DATOS .....	31
5.1. CARACTERÍSTICAS DE LAS BASES DE DATOS.....	31
5.2. BASE DE DATOS CONSTRUIDA .....	32
6. DESARROLLO DE ALGORITMOS DE MEJORAMIENTO DE IMÁGENES DE HUELLAS DACTILARES.....	36
6.1. MEJORAMIENTO DE IMÁGENES “ON-LINE” VS “OFF-LINE” .....	36
6.2. ALGORITMOS DE MEJORAMIENTO DE IMÁGENES .....	36
6.2.1. ALGORITMO BASADO EN FILTROS DE GABOR .....	37
7. DESARROLLO DE ALGORITMO DE MEJORAMIENTO IMPLEMENTADO .....	39
7.1. DESCRIPCIÓN .....	39
7.1.1. NORMALIZACIÓN DE PRESIÓN.....	39
7.1.2. SEGMENTACIÓN DE LA IMAGEN .....	43
7.1.3. NORMALIZACIÓN.....	43

7.1.4.	ESTIMACIÓN DE LA ORIENTACIÓN LOCAL .....	44
7.1.5.	ESTIMACIÓN DE LA FRECUENCIA LOCAL.....	46
7.1.6.	FILTRADO DE GABOR .....	47
7.2.	RESULTADOS .....	54
8.	ALGORITMO DE ROTACIÓN DESARROLLADO.....	58
8.1.	DESCRIPCIÓN DEL ALGORITMO.....	61
8.2.	INTERSECCIONES DE LAS IMÁGENES .....	62
8.3.	CALCULO DE ÁREAS .....	64
8.4.	SUBDIVISIÓN DE CASOS .....	65
8.4.1.	PRIMER CASO .....	67
8.4.2.	SEGUNDO CASO.....	68
8.4.3.	TERCER CASO.....	69
8.5.	RESULTADOS .....	69
9.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	72
9.1.	RECOMENDACIONES Y TRABAJO A FUTURO .....	72
9.2.	CONCLUSIONES .....	73
10.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	75

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: PORCENTAJES DE USO DE LAS DISTINTAS TECNOLOGÍAS DE IDENTIFICACIÓN BIOMÉTRICA.	6
FIGURA 2: REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL FUNCIONAMIENTO DE UN SENSOR CAPACITIVO.	15
FIGURA 3: SENSOR CAPACITIVO DE LA COMPAÑÍA INFINEON, REFERENCIA FINGERTIP.	15
FIGURA 4: SENSOR CAPACITIVOS CONFORMADOS POR UNA FILA DE SENSORES, ESTE TIPO DE SENSORES SON LOS QUE SE UTILIZAN EN SU MAYORÍA EN LOS COMPUTADORES PORTÁTILES.	15
FIGURA 5: REPRESENTACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE UN SENSOR TIPO CAPACITIVO CON MEJORAS SIGNIFICATIVAS EN SU DESEMPEÑO, PATENTE # 6512381 DE ESTADOS UNIDOS.	16
FIGURA 6: FUNCIONAMIENTO DE LOS SENSORES DE RADIO FRECUENCIA (RF).	18
FIGURA 7: PRINCIPIO BÁSICO DE FUNCIONAMIENTO DE LOS SENSORES DE BASE ÓPTICA.	19
FIGURA 8: SENSOR ÓPTICO QUE NO REQUIERE DEL USO DE UN PRISMA COMO SUPERFICIE DE CONTACTO PARA EL DEDO.	20
FIGURA 9: PRINCIPIO BÁSICO DE FUNCIONAMIENTO DE LA MAYORÍA DE SISTEMAS ÓPTICOS.	25
FIGURA 10: PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE SENSADO ESCOGIDO.	27
FIGURA 11: VARIACIÓN DEL BRILLO Y DEL CONTRASTE PARA UNA MISMA HUELLA PARTICULAR.	28
FIGURA 12: DIFERENTES CLASES DE HUELLAS DACTILARES [11] Y [12].	32
FIGURA 13: EJEMPLO DE LA TOMA DE UNA HUELLA DACTILAR CENTRADA.	34
FIGURA 14: EJEMPLO DE LA TOMA DE UNA HUELLA DACTILAR DESPLAZADA HACIA EL PRIMER CUADRANTE.	35
FIGURA 15: IMAGEN MUESTRA TOMADA CON EL SENSOR SELECCIONADO.	40
FIGURA 16: CORTE AXIAL DE UNA HUELLA DACTILAR.	41
FIGURA 17: IMAGEN ORIGINAL Y SU MÁSCARA DE PRESIÓN RESULTANTE.	41
FIGURA 18: MAPA DE DESVIACIONES.	42
FIGURA 19: PROYECCIÓN DE UNA REGIÓN LOCAL SOBRE UNA LÍNEA (1D).	47
FIGURA 20: CASOS DE VARIACIÓN SIGNIFICATIVA DE FRECUENCIA.	50
FIGURA 21: IMAGEN DE UNA HUELLA DACTILAR, JUNTO CON SU TRANSFORMADA DE FOURIER Y SU DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA PARTICULAR.	52
FIGURA 22: IMAGEN MUESTRA 1 ANTES Y DESPUÉS DEL MEJORAMIENTO.	54
FIGURA 23: IMAGEN MUESTRA 2 ANTES Y DESPUÉS DEL MEJORAMIENTO.	55
FIGURA 24: IMAGEN DE HUELLA DACTILAR ANTES (SUPERIOR) Y DESPUÉS (INFERIOR) DEL MEJORAMIENTO. ANTES DEL MEJORAMIENTO FC = 63%, DESPUÉS DEL MEJORAMIENTO FC = 75%.	56
FIGURA 25: IMAGEN DE HUELLA DACTILAR ANTES (SUPERIOR) Y DESPUÉS (INFERIOR) DEL MEJORAMIENTO. ANTES DEL MEJORAMIENTO FC = 47%, DESPUÉS DEL MEJORAMIENTO FC = 59%.	57
FIGURA 26: SENSADO DE LA LETRA A POR MEDIO DE UNA MATRIZ DE SENSORES.	58
FIGURA 27: FORMA IDEAL EN LA QUE SE DEBERÍA TOMAR UN REGISTRO DE LA ROTACIÓN DE UNA IMAGEN.	59
FIGURA 28: CONVENCION UTILIZADA PARA REPRESENTAR CADA UNA DE LAS IMÁGENES.	60
FIGURA 29: ROTACIÓN PARA LA CUAL EL TAMAÑO DE SALIDA DE LA IMAGEN ROTADA ES EL MÁXIMO.	61
FIGURA 30: EJEMPLO DE LOS TRIÁNGULOS DE COLOR AZUL, LOS CUALES REPRESENTAN LAS INTERSECCIONES DE LOS LADOS DE LAS DOS MATRICES.	63
FIGURA 31: PRIMERO DE LOS CASOS PARA EL CÁLCULO DE LAS ÁREAS.	65
FIGURA 32: SEGUNDO DE LOS CASOS PARA EL CÁLCULO DE LAS ÁREAS.	66
FIGURA 33: TERCERO DE LOS CASOS PARA EL CÁLCULO DE LAS ÁREAS.	66
FIGURA 34: SUBCASO 1.	67
FIGURA 35: SEGUNDO CASO.	68
FIGURA 36: RESULTADOS DE LA ROTACIÓN DE 50.70° DE UNA ONDA SINODAL PROYECTADA EN 2D.	70
FIGURA 37: RESULTADOS AL REALIZAR CORTES TANTO DE LA IMAGEN ORIGINAL COMO DE LA IMAGEN DESPUÉS DE LA ROTACIÓN.	70

## LISTA DE TABLAS

TABLA 1: ALGUNAS DE LAS TÉCNICAS BIOMÉTRICAS MÁS COMÚNMENTE UTILIZADAS Y LA COMPARACIÓN ENTRE ELLAS.....	5
TABLA 2: PRINCIPALES REFERENCIAS DE SENSORES DISPONIBLES EN EL MERCADO.....	13
TABLA 3: RESUMEN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS. ....	30

**TITULO: ALGORITMO DE MEJORAMIENTO DE IMÁGENES DE HUELLAS DACTILARES PARA SU POSTERIOR USO EN VERIFICACIÓN BIOMÉTRICA\***

**AUTOR: REY VILLAMIZAR, Nicolas<sup>†</sup>**

**PALABRAS CLAVES: Huellas Dactilares, Mejoramiento de Imágenes, Filtro de Gabor, Rotación de imágenes**

**DESCRIPCIÓN**

En la actualidad el uso de métodos de autenticación de personas que tengan una robustez superior a los métodos tradicionales, los cuales son basados en técnicas como: memorización de claves, uso de elementos únicos (llaves), etc. ha incentivado la investigación en sistemas de verificación basados en patrones biológicos de los individuos. Estos métodos utilizan la premisa básica de que estos patrones son diferentes en cada una de las personas. En particular las huellas dactilares han sido utilizadas como una característica única de las personas durante más de veinte siglos, desde que fueron introducidas por primera vez por los antiguos chinos. Esta es la única característica biométrica que ha sido ampliamente aceptada en la mayoría de países para ser usada en las cortes como un criterio válido para culpar a un acusado.

En este trabajo de grado se desarrolla la implementación de un algoritmo que permite el mejoramiento de las imágenes de huellas dactilares que han sido digitalizadas por medio de un sistema de sensado óptico. Este algoritmo reconstruye zonas de la imagen que no fueron correctamente adquiridas por el sistema de sensado. Estas imágenes pueden ser usadas en un sistema posterior de verificación, el cual mejorará considerablemente su desempeño ya que en general estos sistemas son bastante dependientes de la calidad de las imágenes introducidas.

---

\* Trabajo de grado para optar al Título de Ingeniero en Electrónica.

† Universidad Industrial de Santander (UIS); Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones (E3T); Programa de Ingeniería Electrónica; Dr. Yezid Torres Moreno, Director de Proyecto; MI(c). Ing. Omar Javier Tijero Rojas, Codirector de Proyecto.

**TITLE: ALGORITHM FOR IMAGING ENHANCEMENT OF FINGERPRINTS USED IN BIOMETRIC PATTERN VERIFICATION<sup>‡</sup>**

**AUTHOR: REY VILLAMIZAR, Nicolas<sup>§</sup>**

**KEY WORDS: Fingerprints, Image Enhancement, Gabor Filter, Image Rotation.**

**DESCRIPTION**

Nowadays the use of identification methods of people that have a superior performance than the traditional methods, which are based on techniques like: password memorization, use of unique elements (keys), etc. have gave an incentive to the research on verification systems based on biological patterns of the individuals. This methods use the basic idea that this biological patterns are different from each person. In particular fingerprints have been used as a unique characteristic of the people during more than twenty centuries, since they were introduced for the first time by the old Chinese. This is the only biometric characteristic that has been largely accepted in most of the countries for his use on courts like a valid criterion to accuse a defendant.

The implementation of an algorithm that allows the enhancement of the fingerprint images that have been digitalized using an optical system is been develops in this Undergraduate thesis. This algorithm reconstructs regions of the image that were not correctly acquired by the sensor system. These images can be use in a subsequent verification system, which will improve considerably his performance since in general these systems are really dependant of the quality of the images that are introduced.

---

<sup>‡</sup> Undergraduate thesis as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Electronic Engineering

<sup>§</sup> Universidad Industrial de Santander (UIS); Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones (E3T); Electronics Engineering program; Dr. Yezid Torres Moreno, Director de Proyecto; MI(c). Ing. Omar Javier Tijero Rojas, Codirector de Proyecto.

## INTRODUCCIÓN

Los sistemas clásicos de identificación de personas como son, los basados en carnets, o en el conocimiento de una clave, se han tornado medios obsoletos para la identificación y verificación de personas en aplicaciones civiles como son las transacciones bancarias electrónicas, encriptamiento de datos, uso de tarjetas de crédito o de computadores portátiles entre otras. Debido principalmente a la relativa facilidad con que un impostor sea aceptado por el sistema como el verdadero usuario.

La necesidad de crear sistemas robustos que permitan la identificación de personas motivó la investigación en el campo de la biometría, ya que es una tecnología que utiliza una característica única e intransferible de la persona, lo que hace que ésta sea una técnica de identificación con bajas probabilidades de falsificación.

La biometría ha sido una técnica utilizada desde hace más de seiscientos años para la identificación de personas. Uno de los antecedentes más antiguos del que se tenga noticia del uso de esta técnica con la finalidad de la identificación de personas fue reportada por João de Barros en el siglo XIV en China [16].

En el caso de las huellas dactilares, su unicidad se ha establecido por estudios empíricos y hasta 1993 esto era del todo aceptado; sin embargo en el caso de *Daubert v. Merrell Dow Pharmaceuticals* [17], este concepto se puso en duda y desde entonces existen numerosos estudios basados principalmente en la cantidad de información presente en las huellas dactilares y otros parámetros, que intentan determinar que tan probable es encontrar dos huellas dactilares idénticas [2], [3] y [7].

Para llevar a cabo la verificación basada en huellas dactilares, el algoritmo más comúnmente utilizado consiste en la localización de minucias por ser esta la forma más similar, a la usada por los expertos forenses tradicionalmente para el análisis de huellas dactilares. A pesar de existir más de 100 clases distintas de minucias

(islas, huecos, puentes, etc.) en las huellas dactilares, las cuales son características que al ser correlacionadas con respecto a un determinado punto de la huella dactilar (como puede ser su centro), crean el patrón que caracteriza a dicha huella, en las técnicas de verificación automática actualmente implementadas, la investigación se ha centrado básicamente en caracterizar dos tipos de minucias. Este hecho es debido principalmente a la complejidad de los algoritmos que permitan extraer todas las diferentes clases de minucias posibles presentes en las huellas y por ende su alto costo computacional.

Por lo tanto, el enfoque de las investigaciones actuales ha sido el de buscar algoritmos que permitan encontrar características de las huellas que estén presentes siempre, como por ejemplo los poros de la piel. Sin embargo estos métodos no son de mucho interés por parte de algunos de los sectores que utilizan las huellas dactilares como método de identificación de personas, como la aplicación en criminalística donde por lo general las huellas dactilares encontradas son de una calidad relativamente baja, lo cual hace imposible caracterizar el patrón de poros de la piel en la huella.

De esta manera, se han explorado otros métodos para caracterizar huellas dactilares como el basado en correlación, el cual se basa en el análisis de la información global y no en la particular como lo hace el método basado en minucias; adicionalmente, no introduce errores en la imagen muestra, ya que todo algoritmo de localización de minucias tiene un grado de error considerable, y al no utilizar la imagen original como patrón de medida, sino las minucias extraídas, este error queda almacenado en las minucias características de las huellas. Aun así, este método presenta también fuertes inconvenientes como lo son su alto costo computacional y su alta sensibilidad a la distorsión no lineal introducida por la plasticidad de la piel en la toma de datos.

Independientemente del método planteado que se utilice para realizar un proceso de verificación de huellas, los resultados obtenidos dependen apreciablemente de la calidad de la imagen muestra que se tenga.

## 1. ESPECIFICACIONES DEL PROYECTO

### 1.1. OBJETIVO GENERAL

- Implementar un algoritmo de mejoramiento de imágenes digitales de huellas dactilares adquiridas por medio de un sensor, para su posterior uso en un sistema híbrido (óptico-digital) de verificación por correlación de Transformada de Fourier Conjunta.

### 1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Seleccionar el sensor de adquisición de imágenes de huellas dactilares acorde a las necesidades del proyecto.
- Construir una base de datos de imágenes digitales de huellas dactilares con criterios claramente establecidos y obtenidas por medio del sistema de adquisición escogido.
- Escoger un algoritmo de mejoramiento de imágenes de huellas dactilares que sea el que mejor se ajuste a las condiciones particulares de adquisición de la base de datos.
- Implementar el algoritmo de mejoramiento de imágenes de huellas dactilares escogido.
- Proponer y describir las características de un algoritmo que altere en la menor proporción la forma y la energía de las imágenes cuando esta es rotada.

## **2. RECONOCIMIENTO USANDO BIOMETRÍA**

En general toda medida biométrica puede ser utilizada, siempre que cumpla con cuatro requisitos fundamentales: universalidad, unicidad, permanencia con el paso del tiempo y recolectabilidad. De todas las medidas biométricas estudiadas hasta la actualidad (huellas dactilares, rostro, iris, geometría de la mano, firma, termograma facial, voz, etc.) la técnica de reconocimiento de huellas dactilares es la técnica que ha alcanzado el grado más alto de madurez y además, es la única que ha sido adoptada en la mayoría de los países para su uso en las cortes.

### **2.1. MÉTODOS BIOMÉTRICOS MAS UTILIZADOS**

En general toda característica fisiológica o de comportamiento de las personas puede servir como un método de identificación biométrica, siempre que cumpla con los requisitos antes mencionados. Adicional a esta práctica, existen en la biometria otras dos características muy importantes y deseables, las cuales tienen la aceptabilidad por parte de la comunidad en general (un ejemplo es el uso del ADN como método de identificación biométrica el cual es un método que hasta ahora comienza a ser aceptado), y la robustez global de sistema, esta última característica incluye que tan fácilmente un impostor puede ser aceptado como el verdadero usuario y en general todas aquellas medidas que definen la confiabilidad del método.

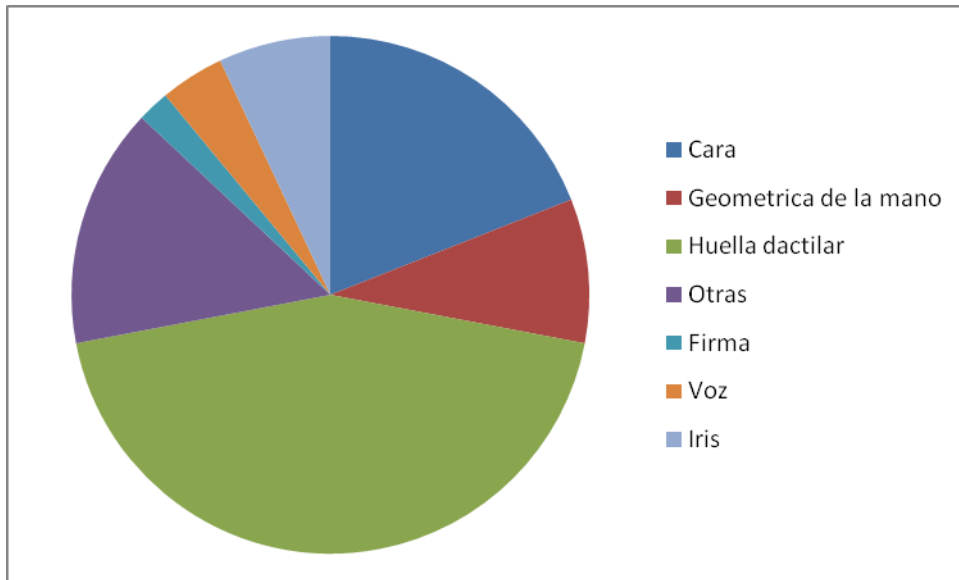
En la Tabla 1 se pueden ver algunas de las características biométricas más comúnmente utilizadas y una comparación relativa entre estas, donde el nivel se indica por un número; número 1 indica alto, el número 2 indica medio y el número 3 indica bajo.

<b>Método</b>	<b>Diferenciabilidad</b>	<b>Robustez</b>	<b>Aceptabilidad</b>	<b>Permanencia</b>
<b><i>Firma</i></b>	3	3	1	3
<b><i>ADN</i></b>	1	1	3	1
<b><i>Huellas Dactilares</i></b>	1	2	1	1
<b><i>Oído</i></b>	2	2	1	1
<b><i>Cara</i></b>	3	3	1	1
<b><i>Iris</i></b>	1	1	3	1

**Tabla 1:** Algunas de las técnicas biométricas más comúnmente utilizadas y la comparación entre ellas [4].

Como podemos ver el uso de huellas dactilares es un método biométrico de identificación que en general cumple satisfactoriamente con todos los requisitos anteriormente descritos. Lamentablemente la robustez del método no es la mejor debido a impostores que usan métodos para reproducir las huellas dactilares y engañar a los sistemas de sensado, sin embargo un sistema clásico de escaneo de imágenes de huellas dactilares no supervisado, se puede complementar con una supervisión parcial o bien usar una complementación entre diferentes medidas biométricas, y de esta manera, mejorar la robustez global del sistema, evitando todo tipo de huellas dactilares falsas.

En la figura 1 se puede ver un gráfico en el cual se aprecia los porcentajes de uso de las diferentes tecnologías biométricas en el mercado. Como puede verse claramente la identificación usando huellas dactilares ocupa aproximadamente el 50% del mercado mundial de identificación biométrica.



**Figura 1:** Porcentajes de uso de las distintas tecnologías de identificación biométrica.<sup>5</sup>

## 2.2. HISTORIA DEL USO DE LAS HUELLAS DACTILARES

La primera alusión clara al uso de la biometría como sistema de identificación proviene del siglo XIV cuando los chinos estampaban las huellas de las manos y de los pies de los niños para poderlos identificar unos de otros. Pero fue sólo hasta 1686 que el Italiano Marcello Malpighi profesor de anatomía de la Universidad de Bologna identificó algunos de los patrones en las huellas dactilares (ahora llamados minucias), aun así este no hizo ninguna alusión a la idea de utilizar estas medidas biométricas como una forma de identificación.

Solo hasta 1823 un médico checo llamado Jhon Evangelista Purkine hizo el primer estudio sobre la unicidad de las huellas en los humanos, llegando a la conclusión de que efectivamente estas eran una característica única en cada persona. Este médico checo escribió lo siguiente en su tesis, publicada en Diciembre 22 de 1823:

---

<sup>5</sup> Tomado de <http://www.imrapt.com.au/>

*“In the hands of the monkeys, as well as in their prehensile tails, similar lines occur, the distinction of which adds to the knowledge of the characteristics of all species. Zoologists, unless they consider them unimportant, will add further details” [6].*

Posteriormente en 1856 el inglés Sir William Hershel comenzó a utilizar las huellas dactilares como una forma de remplazar la firma, llegando independientemente a la conclusión de que las huellas dactilares eran únicas, del médico checo Purkine, pero aun así no hizo un estudio detallado del tema.

El 28 de octubre de 1880 el escocés Henry Faulds publicó el primer artículo científico en la revista Nature sobre cómo se podría utilizar las huellas dactilares para identificar criminales [20].

Posteriormente Sir Francis Galton en 1888, es la primera persona en comprobar con estudios empíricos que las huellas dactilares no cambian con el paso del tiempo como se había sospechado anteriormente, además es él, la primera persona en plantear un modelo matemático para determinar la probabilidad de que en una población dada existan dos huellas dactilares iguales, su modelo finalmente arrojó la probabilidad de 1 en 64 mil millones, pero este modelo fue descartado posteriormente por no considerar todos los tipos de minucias posibles existentes en una huella dactilar y además porque el método en si se basaba en el hecho de que si se conocían las vecindades de una parte de la huella (está dividida en 64 partes), la probabilidad de reconstrucción de esta parte faltante es de  $\frac{1}{2}$ , lo cual demostró fácilmente más adelante, que la probabilidad de este evento es mucho menor a  $\frac{1}{2}$ .

En 1891 Juan Vucetich funcionario de la policía Argentina comenzó el primer archivo de huellas dactilares basado en los estudios de Galton y en el método de antropología descriptiva desarrollado por el francés Alphonse Bertillon en 1870.

En 1892 el trabajo de Galton concluye con la publicación del libro “Fingerprints”, en el cual detalla un novedoso sistema de clasificación de huellas dactilares, siendo este de gran acogida en su momento ya que la inexistencia de recursos electrónicos

para la época comenzaba a hacer inmanejables las bases de datos de huellas dactilares.

Después de que estos estudios teóricos no alcanzaron resultados prácticos, el primer caso de la utilización de las huellas dactilares para la condena de un delincuente se dió. Ocurrió en Argentina gracias a la rápida acogida de técnicas biométricas adoptadas por Vucetich. Esto sucede el 29 de Junio de 1892 cuando Francisco Rojas es condenado por asesinato con la prueba irrefutable de dejar una huella dactilar suya en la escena del crimen.

Paralelo al desarrollo científico, el escritor Mark Twain publica dos libros que hablan de la utilización de huellas dactilares por la policía forense para la identificación de criminales, estos libros se titularon "Life on the Mississippi" y "The Tragedy of Pudd'nhead Wilson". Es esta idea, y la implementación de recolección de huellas dactilares en las penitenciarías, las que posteriormente crearon un prejuicio colectivo respecto a la utilización de las huellas dactilares como medio de identificación, ya que se asocia ésta con criminales.

En 1896 Sir Eduard Henry siendo inspector general de la policía de Gales, quien con ayuda de uno de sus trabajadores, Azizul Haque, modificó el método de clasificación propuesto por Galton, método al que posteriormente se le llamó "método Henry" y fue el que la mayor parte de las policías forenses utilizaron a nivel mundial por muchos años. Desde 1903 a 1908 se implementa el uso de la huella dactilar en la Fuerza Aérea, la Armada y el Ejército de los Estados Unidos. De allí en adelante, este método de identificación comienza a expandirse por el mundo rápidamente, el creerse comprobado en su totalidad, tesis que 90 años más adelante se rebatió en el primer juicio de la historia que cuestionó el uso de las huellas dactilares como prueba contundente.

En 1918 se establece una medida del grado de similitud que deben tener dos imágenes de una huella dactilar para concluir que estas corresponden a la misma huella. Edmond Locard llega a la conclusión de que con sólo 12 minucias iguales, se

puede inferir que las huellas pertenecen al mismo individuo. Eso se tomó como base para la legislación Estadounidense, aun así cada país tomó diferentes criterios, en algunos casos más estrictos y en otros menos estrictos que los adoptados por Estados Unidos.

La primera patente que se registra concerniente al uso de huellas digitales es la No.2530758 del 21 de Noviembre de 1950 en Estados Unidos, la cual consistía en una cámara de identificación de huellas digitales, desarrollada por William T. Cirone. El 30 de Mayo de 2002 se da concesión a una patente en Colombia a Jean François Mainguet cuyo solicitante es Thomson CSF, la patente se titula “Sistema de lectura de huellas dactilares” [5].

Luego, Colombia Trek 2000 International Ltd. solicita la patente para un “dispositivo portátil que tiene capacidades de autenticación basadas en biometría”, inventado por Poo Teng Pin y Lim Lay Chuan y publicada el 30 de Enero de 2004 con número de expediente 255831 [5].

Actualmente existen diversos dispositivos que utilizan la lectura de huellas dactilares como medio de identificación, aun así, ninguno de ellos es completamente fiable, pero han sido de una gran acogida en el público. Este crecimiento en la confiabilidad de los sistemas de reconocimiento de huellas dactilares se ha visto gravemente afectado cuando se descubren nuevas formas de vulnerar su seguridad, por ejemplo está el caso de un hacker que logró vulnerar la seguridad ofrecida por Microsoft con su dispositivo de lectura de huellas dactilares para reemplazar todas las claves usadas en un computador por la huella dactilar del usuario [10].

### **2.3. ESTÁNDARES PARA EL USO DE LAS HUELLAS DACTILARES COMO MÉTODO BIOMÉTRICO**

Desde la aparición de sistemas que permitían digitalizar las imágenes de huellas dactilares, el FBI dispuso de un estándar de 500 dpi como la mínima resolución para la adquisición de estas imágenes, se llegó a esta conclusión basados en un estudio

en el cual se compararon la calidad de las imágenes tomadas por el tradicional método de la tinta y el papel con el método digital, con la ayuda de expertos en el tema.

Actualmente la norma más comúnmente aceptada para la estandarización de las imágenes de huellas dactilares es la ANSI/NIST-ITL 1-2000 y CJIS-RS-0010 (v7), en éstas se encuentra establecida la mínima resolución de los sistemas de digitalización de imágenes de huellas dactilares, la cual dice debe ser de 500 dpi, adicional a esto el sistema estandarizado para el registro es de tipo óptico.

### **3. DIFERENTES MÉTODOS UTILIZADOS PARA ADQUISICIÓN DE IMÁGENES DE HUELLAS DACTILARES**

La forma como se adquieren las imágenes de las huellas dactilares se pueden dividir básicamente en dos: El tradicional método de tinta y papel, y los métodos que permiten la digitalización directa de la imagen.

#### **3.1. MÉTODO TRADICIONAL**

Esta forma se ha usado desde principios del siglo XX para almacenar un registro de las imágenes de las huellas dactilares, cuando el uso de estas como un método de identificación biométrica comenzó a ser estudiado. Este método de registro consiste básicamente en deslizar la zona que se desea registrar sobre una zona que está impregnada de una tinta especial, y posteriormente deslizar el dedo sobre un papel que guardara de esta forma la impresión de las características de crestas y valles de la huella.

El estudio de las características especiales de la combinación del tipo de tinta y el tipo de papel correctas, determinan la calidad de la impresión que se tendrá de la imagen de la huella dactilar. El uso de un determinado tipo de tinta, o de un determinado tipo de papel, fijan las características globales que tendrá la imagen registrada. Existen extensos estudios sobre todos los tipos de tintas y tipos de papeles utilizados para registrar las huellas, y como estos afectan la calidad de las imágenes [19] y [21].

En la actualidad, existe una migración rápida hacia el uso de sensores digitales y las correspondientes investigaciones en este campo. Sin embargo, debido a que la mayor parte de las bases de datos corresponden a imágenes de huellas dactilares tomadas usando el método tradicional, existe una gran cantidad de casos de estudio que no han sido resueltos y requieren investigaciones sobre las imágenes de

huellas tomadas con base en el método tradicional. Además de esto las imágenes encontradas en la escena de un crimen, en su mayoría de características en resolución y calidad de imagen, se pueden asemejar a imágenes que han sido tomadas usando el método tradicional y no tanto a las adquiridas por un método digital de sensado.

El método tradicional para registrar las imágenes de huellas dactilares ya no es el método ideal para hacer el registro, debido a que ahora es necesario que toda la información sea digitalizada. Es así que la digitalización directa reduce en un paso el proceso, con lo cual se mejora apreciablemente la eficiencia en general.

### **3.2. MÉTODOS DE DIGITALIZACIÓN DIRECTA**

Es así que se ha encontrado que a pesar de la flexibilidad existente en el método tradicional de registro, se permite utilizar distintos tipos de tinta o papel para resaltar o no ciertas características de la huella, se ha optado por utilizar dispositivos de registro que permiten crear una representación digital directa, a partir de la muestra de una huella dactilar.

Actualmente existen en el mercado una gran variedad de compañías que ofrecen distintos tipos de sensores, en la Tabla 2 se puede ver un resumen de los principales sensores disponibles en la actualidad, sus principales características técnicas así como también su fabricante.

	Technology	Company	Model	Dpi	Area(hxw)	Pixels
Ópticas	FTIR	Biometrika <a href="http://www.biometrika.it/eng/">www.biometrika.it/eng/</a>	FX2000	569	0.98"x0.52"	560x296 (165,760)
	FTIR	Digital Persona <a href="http://www.digitalpersona.com">www.digitalpersona.com</a>	UareU2000	440	0.67"x0.47"	316x228 (72,048)
	FTIR (sweep)	Kinetic Science <a href="http://www.kinetic.bc.ca">www.kinetic.bc.ca</a>	K-1000	Up to 1000	0.002"x0.6"	2x900 (Hx900)
	FTIR	Secugen <a href="http://www.secugen.com">www.secugen.com</a>	Hamster	500	0.64"x0.54"	320x268 (85,760)
	Sheet prism	Identix <a href="http://www.identix.com">www.identix.com</a>	DFR 200	380	0.67"x0.67"	256x256 (65,535)
	Fiber Optic	Delsy <a href="http://www.delsy.com">www.delsy.com</a>	CMOS module	508	0.71"x0.47"	360x240 (86,400)
	Electro-optical	Ethentica <a href="http://www.ethentica.com">www.ethentica.com</a>	TactilSense T-FPM	403	0.76"x0.56"	306x226 (69,156)
	Sensores de Estado Sólido	Capacitive (sweep)	Fujitsu <a href="http://www.fmw.fujitsu.com">www.fmw.fujitsu.com</a>	MBF300	500	0.06"x0.51"
Capacitive		Infineon <a href="http://www.infineon.com">www.infineon.com</a>	FingerTip	513	0.56"x0.44"	288x224 (64,512)
Capacitive		ST-Microelectronics Us.st.com	TouchChip TCS1AD	508	0.71"x0.50"	360x256 (92,160)
Capacitive		Veridicom <a href="http://www.veridicom.com">www.veridicom.com</a>	FPS110	500	0.60"x0.60"	300x300 (90,000)
Thermal (sweep)		Atmel <a href="http://www.atmel.com">www.atmel.com</a>	FingerChip AT77C101B	500	0.02"x0.55"	8x280 (H,280)
Electric Field		Authentec <a href="http://www.authentec.com">www.authentec.com</a>	AES4000	250	0.38"x0.38"	96x96 (9,216)
Piezoelectric		BMF <a href="http://www.bm-f.com">www.bm-f.com</a>	BLP-100	406	0.92"x0.63"	384x256 (98,304)

**Tabla 2:** Principales referencias de sensores disponibles en el mercado<sup>6</sup>.

### 3.2.1. SENSORES CAPACITIVOS

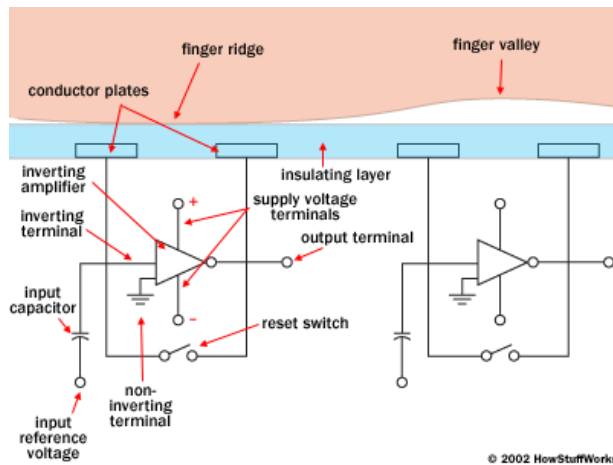
Este tipo de sensores funcionan basados en las características del valor de la capacitancia, en el caso de placas planas paralelas, la variación en la distancia de separación y el tipo de dieléctrico que este en medio de estas, son los que

<sup>6</sup> D. Maltoni, D. Maio, A.K. Jain, S. Prabhakar Handbook of Fingerprint Recognition Springer, New York, 2003

determinan el valor de la capacitancia. En este caso cada pixel de la imagen, es una capacitancia que se forma entre la superficie semiconductor (matriz de sensores) y el dedo que contiene la huella dactilar. Esta capacitancia varía según el tipo de material existente entre las dos placas, el cual en este caso puede ser la piel (en el caso de que sea una cresta la que esté presionando determinado pixel) o aire, en el caso de que sea un valle el que está presionando la superficie semiconductor. Un problema en el desempeño de estos sensores, ocurre con la acumulación de diferentes tipos de dieléctricos (sudor, células muertas, etc) en los valles lo cual altera la medida de la capacitancia en estas regiones.

Una ventaja significativa de estos sensores, por la cual son los más utilizados en los computadores portátiles, es que al usar un chip semiconductor y no una unidad CCD, este tipo de sensores tienden a ser más compactos que los sensores ópticos, los cuales para tener un buen desempeño, requieren de una superficie de sensado 2D.

En la figura 2, se puede ver una representación gráfica del funcionamiento de los sensores capacitivos. En la figura 3 y 4, se pueden ver dos tipos de presentaciones en las cuales se fabrican los sensores capacitivos, en la primera de ellas para realizar el sensado simplemente se debe presionar el dedo sobre la superficie semiconductor para tener la lectura de la huella dactilar, en el segundo caso un empaquetamiento menos voluminoso (este es el que en su mayoría se utiliza en los computadores portátiles) existe una línea de sensores sobre la que se debe deslizar el dedo para de esta manera realizar la lectura de la huella dactilar.



**Figura 2:** Representación gráfica del funcionamiento de un sensor capacitivo<sup>7</sup>.



**Figura 3:** Sensor capacitivo de la compañía Infineon, referencia FingerTIP<sup>8</sup>.



**Figura 4:** Sensor capacitivos conformados por una fila de sensores, este tipo de sensores son los que se utilizan en su mayoría en los computadores portátiles<sup>9</sup>.

En el caso de los sensores en los que hay que deslizar el dedo para registrar la imagen completa de la huella dactilar, el software de desempeño del sistema es

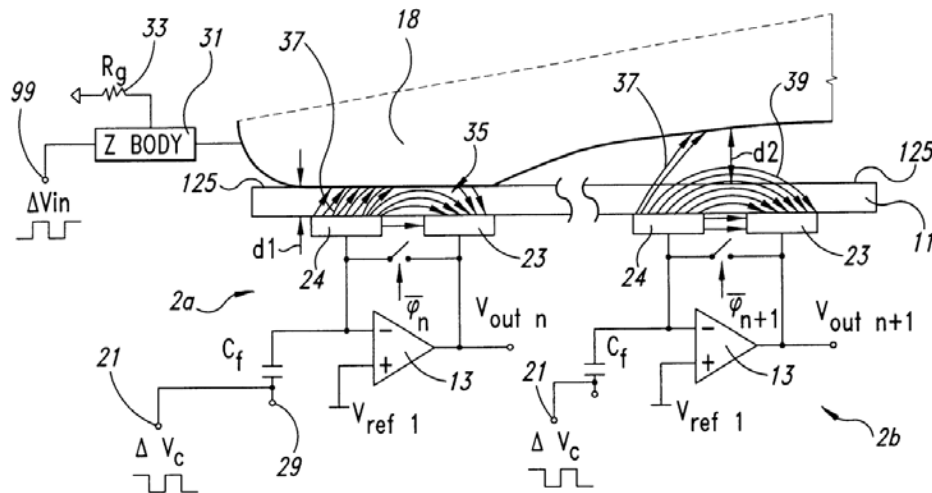
<sup>7</sup> Tomado de <http://computer.howstuffworks.com/>

<sup>8</sup> Tomado de <http://www.bergdata.com/fr/>

<sup>9</sup> Tomado de <http://www.3g.co.uk/>

mucho más exigente ya que debe reconstruir la imagen de la huella a partir de lecturas parciales periódicas de la misma. En general, la resolución de la imagen resultante obtenida en estos casos no cumple con los estándares mínimos de calidad de huellas dactilares para ser usada por instancias judiciales. Particularmente este tipo de sensores son poco útiles cuando la persona a la que se le toma el registro dactilar no presta la cooperación adecuada.

En la figura 5 podemos ver la configuración correspondiente a la patente # 6512381 de Estados Unidos, en este caso básicamente lo que se hace para mejorar el desempeño del sistema de sensado capacitivo, es aplicar una fuente de señal conocida (99) al dedo de la persona a la cual se le desea registrar su huella dactilar. Esta patente es particularmente importante ya que la mejora en el desempeño lograda con este sistema es significativa respecto al pobre desempeño en general de los sistemas capacitivos de sensado para huellas dactilares. Especialmente por el hecho de poder reducir representativamente los errores de sensado producidos por acumulación de sustancias en los valles de las huellas y por daños superficiales en la piel de la huella.



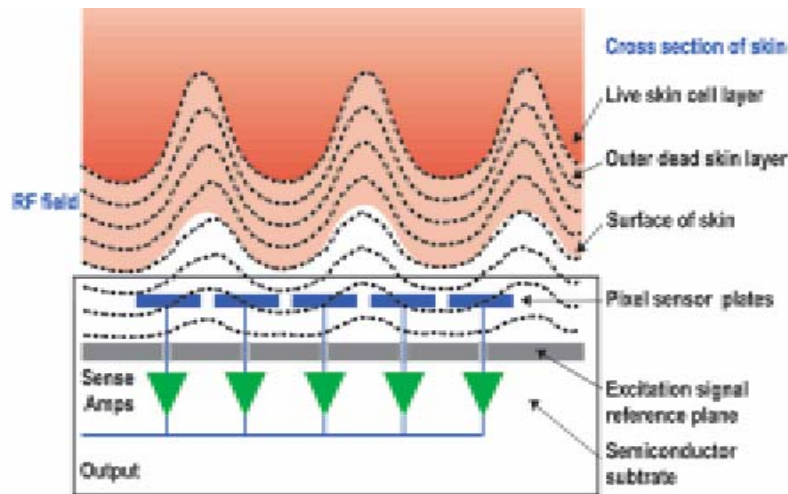
**Figura 5:** Representación del funcionamiento de un sensor tipo capacitivo con mejoras significativas en su desempeño, patente # 6512381 de Estados Unidos<sup>10</sup>.

<sup>10</sup> Tomado de <http://www.freepatentsonline.com/>

### **3.2.2.      SENSORES DE RADIO FRECUENCIA (RF)**

Estos son los únicos sensores disponibles comercialmente que son capaces de hacer el registro de la huella dactilar de la dermis, la cual es la capa de piel que está detrás de la capa superficial de piel y es llamada epidermis. La dermis al igual que la epidermis posee la misma huella dactilar, y es por esto que el resultado de hacer un registro de la dermis o la epidermis tiene los mismos resultados. Gracias a esta capacidad de hacer un registro de la dermis, se elimina substancialmente la necesidad de tener una piel limpia para realizar un correcto registro de la huella dactilar, al igual que se eliminan los problemas relacionados con el deterioro de la epidermis con las actividades realizadas diariamente y más importante aún, es que se eliminan problemas con cicatrices que se registren en la capa más superficial de la piel en la huella dactilar como consecuencia de heridas causadas con el paso del tiempo.

En la figura 6, se puede ver como funciona un sensor basado en RF, en este caso los sensores que se ubican cerca de las crestas miden señales de mayor intensidad, debido a que las ondas viajan menos distancia antes de hacer contacto con la piel, en el caso contrario, cuando cerca de un sensor se ubica un valle las ondas viajan una mayor distancia en el aire antes de hacer contacto con la piel. Con base en esta diferencia en cada uno de los casos (valles y crestas) se puede crear así una imagen de la huella dactilar.



**Figura 6:** Funcionamiento de los sensores de Radio Frecuencia (RF)<sup>11</sup>.

Estos sensores son de muy buen desempeño, pero poseen el inconveniente de que poseen grandes problemas de interferencia electromagnética, además son más voluminosos en general que los sensores de huellas dactilares basados en otro tipo de tecnologías. Anteriormente, el costo era una limitante bastante fuerte en este tipo de tecnología sin embargo se ha visto disminuido gracias a la producción en masa.

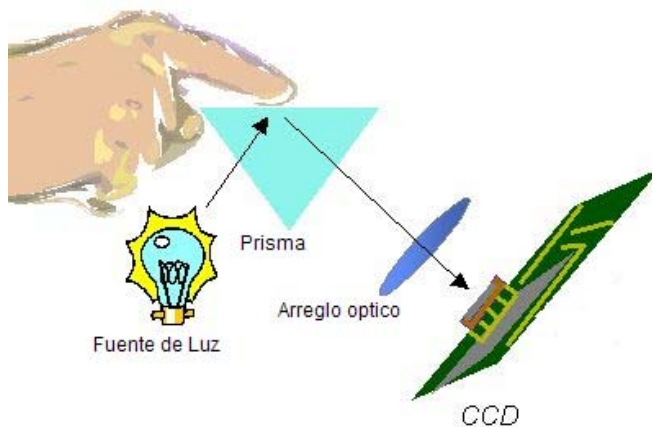
### 3.2.3. SENSORES ÓPTICOS

Estos son el tipo de sensores que más se utilizan en la actualidad. Esta es una de las tecnologías más antiguas que existen para la creación de imágenes digitales de las huellas dactilares. A pesar de ser un concepto antiguo, los avances relativamente actuales han hecho que esta tecnología se mantenga vigente y con un desempeño competitivo respecto de las demás. Particularmente este tipo de tecnología es la que se ha estandarizado en los estudios desarrollados por el FBI y, es por esto que la mayoría de las entidades tanto privadas como gubernamentales, que han sido pioneras en el uso de tecnologías biométricas para la identificación de personas, han optado por el uso de sensores basados en tecnología óptica.

<sup>11</sup> Tomado de <http://www.itl.nist.gov/>

En la actualidad son ininidad las empresas dedicadas a la fabricación de sensores de tipo óptico, sin embargo existen algunas de ellas que son líderes en el mercado, por brindar una solución biométrica completa y además porque poseen patentes sobre la tecnología particular que utilizan. Particularmente, la empresa SecuGen es líder en el campo de los sensores ópticos en los Estados Unidos, gracias a que ella es dueña de patentes sobre las tecnologías específicas.

El principio esencial de funcionamiento de los sensores ópticos es como se puede ver en la figura 7. Básicamente una luz visible es reflejada en la superficie del dedo a través de un prisma, después de lo cual la luz que es reflejada, es dirigida por medio del prisma hacia una matriz de sensores, ya sea de tipo CCD y es allí donde se captura la imagen y se corrigen algunos problemas de distorsión.

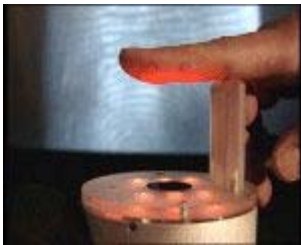


**Figura 7:** Principio básico de funcionamiento de los sensores de base óptica.

Esta es la idea más antigua que existe para el funcionamiento de sensores de tipo óptico, sin embargo el desarrollo de mejoras constantes para reducir los problemas de ruido ha mantenido esta idea vigente en el estado del arte de la adquisición de imágenes de huellas dactilares.

Existen nuevas ideas referentes al desarrollo de sensores ópticos que tratan de eliminar la necesidad de usar prismas, y por el contrario hacer sensores que no requieran contacto directo del dedo con una superficie, para de esta forma tomar

una mayor área de registro de la huella dactilar, como puede apreciarse en la figura 8. Sin embargo, la resolución obtenida usando este tipo de sensores aun no ha sido comparable con la que se puede lograr con los sensores que funcionan con el principio clásico.



**Figura 8:** Sensor óptico que no requiere del uso de un prisma como superficie de contacto para el dedo<sup>12</sup>.

La tecnología óptica tiene algunas ventajas significativas sobre las otras, lo cual la ha hecho particularmente atractiva para su implementación en aplicaciones masivas. La primera de ellas es que las tecnologías basadas en chips de silicio (como lo son la tecnologías capacitivas) tienden a tener un área de sensado muy pequeña, ya que la manufactura de grandes áreas de silicio suele ser bastante costosa, esto hace que no se pueda tomar la totalidad del registro de la huella dactilar, especialmente en el dedo más grande (Pulgar). La segunda es que los sensores basados en tecnologías de contacto directo con el silicio (como es el caso de los sensores capacitivos) están expuestas a daños producto de descargas electromagnéticas y además de esto requieren mantenimiento constante para limpiar la superficie de contacto para no introducir ruido en la lectura de la huella dactilar. Finalmente, a pesar de que algunas de las superficies de silicio están protegidas por pequeñas capas de materiales resistentes, su costo en caso de daño es muy superior al costo de reemplazar un prisma en el caso de la superficie de contacto de un sensor óptico.

---

<sup>12</sup> Tomado de <http://pagesperso-orange.fr/>

Existen numerosos informes que ratifican el mejor desempeño de los algoritmos de verificación de huellas dactilares cuando el sistema de adquisición utilizado es de tipo óptico. La Universidad Estatal de Michigan ha publicado algunas informes como: “Fingerprint Matching: Data Acquisition and Performance Evaluation, MSU Technical Report TR99-14” en el cual se pone de manifiesto las ventajas del uso de sensores de tipo ópticos sobre los sensores de tipo capacitivo. Adicional a esto el concurso de verificación de huellas dactilares en sus versiones FVC2002, FVC2004 y FVC2006 (el cual es una fuerte referencia en el estado del arte de los sistemas de verificación de huellas dactilares) se puede ver claramente en sus informes finales sobre el desempeño de los algoritmos, que los algoritmos tuvieron un mejor desempeño sobre las bases de datos obtenidas por medio de sensores ópticos. Y finalmente un artículo [18] que muestra como usando un sensor óptico y uno capacitivo de las mismas características se obtiene un TER (*Total Error Rate*) de 3.2% en el caso de uso de un sensor óptico y de 18.5% en el caso del uso de un sensor capacitivo.

Particularmente, en el caso de la sociedad colombiana algunos de los bancos, como Bancafé y Banco de Bogotá, que han optado por el uso de tecnologías biométricas para dar mayor seguridad a sus transacciones, están utilizando sensores basados en tecnologías ópticas. Adicional a esto la Registraduría Nacional del Estado Civil en nuestro país, ha implementado un sistema de registro de huellas dactilares basado en sensores ópticos para la generación de las nuevas cédulas de ciudadanía que remplazarán las antiguas cédulas.

### **3.2.4. OTROS TIPOS DE SENSORES**

Existe una gran variedad de tecnologías que se han propuesto para realizar la labor de sensado de imágenes de huellas dactilares, sin embargo ninguna de estas tecnologías se ve como la clara substituta de la tecnología actualmente líder en este mercado, la cual es la tecnología basada en óptica.

Algunas de estas tecnologías son:

- *Sensores térmicos*: estos a pesar de pensarse como una alternativa viable desde el punto de vista de la dificultad para ser engañados, posee la desventaja de que la diferencia de temperatura de la piel de los valles a la de las crestas es casi imperceptible para sensores de temperatura comerciales de bajo costo. Además de este inconveniente tiene la desventaja de que el tiempo de adquisición debe ser muy rápido de lo contrario se llega a un equilibrio térmico entre la superficie de sensado y el dedo, lo que hace imposible un registro claro de la imagen de la huella dactilar.
- *Sensores de Presión*: Esta fue la primera idea que surgió para la adquisición digital de imágenes de huellas dactilares, sin embargo fue rápidamente descartada debido a la falta de la adecuada tecnología que permita crear micro sensores que se activen con la presión ejercida por el dedo y que sea viable para usos comerciales especialmente debido a su alto costo, su poca durabilidad y su necesidad de mantenimiento. También surge el problema de que la imagen adquirida es una imagen de poca información ya que es una imagen de tipo binaria (ON - OFF).

#### 4. SISTEMA DE ADQUISICIÓN ESCOGIDO

El sistema de adquisición que finalmente se escogió fue el “SecuGen Hamster III”, de la compañía SecuGen, la cual tiene la patente tecnológica para la fabricación de este sistema de adquisición con principio de funcionamiento óptico indicado más adelante.

##### 4.1. CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA

Este es un sistema que basa su funcionamiento en un principio óptico, donde las características más relevantes de este sistema, concernientes al desarrollo de este proyecto son las mostradas en la Tabla siguiente.

<b>Ópticas</b>	
Sensor	FDU02R
Resolución de la imagen	500 DPI $\pm$ 0.2%
Tamaño de la imagen obtenida	260 x 300 pixels
Tamaño del área de sensado	16.1 mm x 18.2 mm
Tamaño efectivo del área de sensado	12.7 mm x 14.9 mm
Escala de grises de la imagen	256 niveles
Distorsión (no lineal)	< 0.1%
Fuente de luz	Tipo LED
<b>Eléctricas</b>	
Fuente de alimentación	USB
Voltaje de operación	5 V $\pm$ 5%
<b>Comunicación</b>	
Interface	USB 1.1 y USB 2.0
Velocidad de captura de imagen	1.3 segundos
Otras	
Sistemas operativos soportados	Windows Vista, Xp, 2000, 98, Server, Linux
Sistemas de desarrollo uso académico	si

**Tabla 2:** Tabla de especificaciones del sistema de sensado escogido.

Este sistema cumple con los requisitos de resolución establecidos por el FBI para las imágenes de huellas dactilares. También, posee la característica de ser un sistema de fácil transporte gracias a su reducido tamaño y a que posee la ventaja de disponer de conexión USB. Adicional a esto tiene la característica de poseer un mínimo requerimiento de mantenimiento de sus partes.

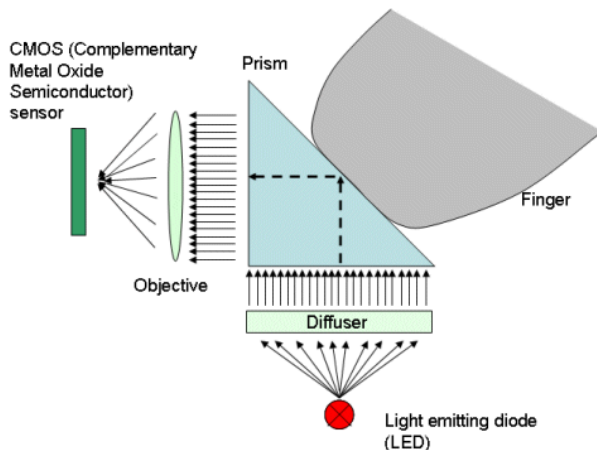
#### **4.2. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO**

Tradicionalmente los sistemas de adquisición de imágenes de huellas dactilares basados en sensores ópticos, utilizan el método de FTIR (*Frustrated Total Internal Reflection*). Este método basa sus principios en un fenómeno óptico llamado "Reflexión Interna Total", el cual ocurre cuando un rayo de luz alcanza el borde del medio en el que viaja (medio 1), con un ángulo mayor al ángulo crítico con respecto a la normal. Si el índice de refracción es mucho menor al otro lado del borde (medio 2), el rayo no puede pasar y por ende toda la luz del rayo es reflejada. El ángulo crítico es el ángulo mínimo (con respecto a la normal) donde se presenta el fenómeno de Reflexión Interna Total. Este principio es utilizado en multitud de dispositivos ópticos, pero especialmente en la fibra óptica, donde es de esperarse que la Reflexión Interna Total se de, para que de esta manera el rayo que se transmite se atenue la menor cantidad posible cada vez que este incida en el borde de la fibra transportadora.

Cuando se presenta la Reflexión Interna Total a pesar de que toda la energía es reflejada, una onda evanescente, la cual decae exponencialmente con la distancia, atraviesa el medio. A pesar de que toda la energía es reflejada, esta onda no transmite energía a menos que encuentre un material con un índice de refracción diferente al del medio en el que viaja (medio 2) a una corta distancia antes de desaparecer. Si esto sucede, esta onda transmite energía al nuevo medio (medio 3), causando así que la Reflexión Interna Total se vea "frustrada" en una proporción que depende de las características del medio 2 con respecto al medio 3, y principalmente de la distancia de separación entre el medio 2 y el medio 3,

presentándose así el fenómeno de FTIR. Este fenómeno es utilizado en los “divisores de onda” los cuales son dispositivos ampliamente utilizados en óptica experimental.

Para el caso particular de la toma de imágenes de huellas dactilares, el medio 3 es la piel del dedo de la persona que hace contacto con el prisma (crestas de la huella dactilar). Como se muestra en la figura 9, en el momento en el que el dedo hace contacto con el prisma las zonas protuberantes de la huella dactilar (es decir las crestas) son las que producen el fenómeno de FTIR, no siendo así con los valles, en los cuales existe un espacio de aire entre el prisma y la piel como consecuencia de esto la onda evanescente proveniente del LED se atenúa en esta distancia, y por esto en estas zonas la Reflexión Interna Total de la onda del LED no es “frustrada”. Es así como la onda envolvente que se refracta en el prisma e incide en las crestas es absorbida por la piel, sucediendo lo contrario con las ondas que inciden en los valles, y son estas diferencias en la refracción lo que luego se utiliza en un arreglo de sensores para así crear la imagen de la huella dactilar.



**Figura 9:** Principio básico de funcionamiento de la mayoría de sistemas ópticos<sup>13</sup>.

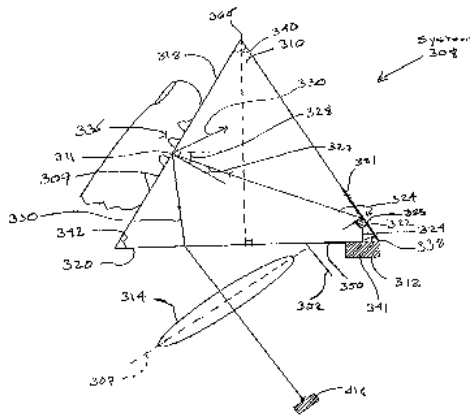
El sistema de adquisición de imágenes de huellas dactilares escogido, llamado “SecuGen Hamster III”, funciona básicamente usando el mismo principio de FTIR, pero con algunas variaciones que permiten un mejor desempeño, respecto al

<sup>13</sup> Tomado de <http://www.invenia.es/>

contraste de las imágenes adquiridas. El principio de funcionamiento de este sistema tiene la patente numero 6917695 de Estados Unidos.

La figura 10 (tomada de la patente) representa el diagrama de funcionamiento de este sistema de adquisición de imágenes, la diferencia principal respecto al método basado en FTIR, es que en este caso las crestas de la huella dactilar son las que permiten que el rayo de luz proveniente del LED sea reflejado de vuelta en el prisma, y los valles por el contrario producen el efecto de que la luz del LED sea refractada cambiando de medio y de esta forma no llegue al arreglo de sensores que leen la imagen.

En este método de adquisición de imagen de la huella dactilar el rayo proveniente 334 de la fuente 312 (LED) incide sobre la superficie 322 la cual es difusiva, y permite que el rayo de luz sea “difundido” dentro del prisma 310. Este rayo de luz difuso incide sobre la cara 318 (cara del prisma donde se posiciona el dedo) con un ángulo que es menor que el ángulo crítico de esta superficie, por lo cual en el caso de que este rayo de luz incida sobre un valle de la huella dactilar 309, la mayor parte del rayo de luz incidente será refractada y se saldrá del prisma, y así no podrá incidir sobre el arreglo CCD que genera la imagen. Contrario al proceso descrito anteriormente, está el caso en que el rayo de luz incidente 324 sobre la superficie 318, incida en una cresta 311 de la huella dactilar, como consecuencia una parte del rayo de luz 324 se refleja para posteriormente incidir sobre la cara 320 del prisma y consecuentemente sobre el arreglo CCD para formar la imagen. Este contraste entre valles y crestas es el que se aprovecha en el arreglo de sensores CCD y posteriormente en la etapa de procesamiento para formar la imagen. Allí se puede ver que los rayos que finalmente alcanzan el arreglo de sensores, son el negativo de los rayos que inciden en el arreglo de sensores en el caso del método basado en FTIR.



**Figura 10:** Principio de funcionamiento del sistema de sensado escogido<sup>14</sup>.

### 4.3. PRUEBAS REALIZADAS AL SISTEMA

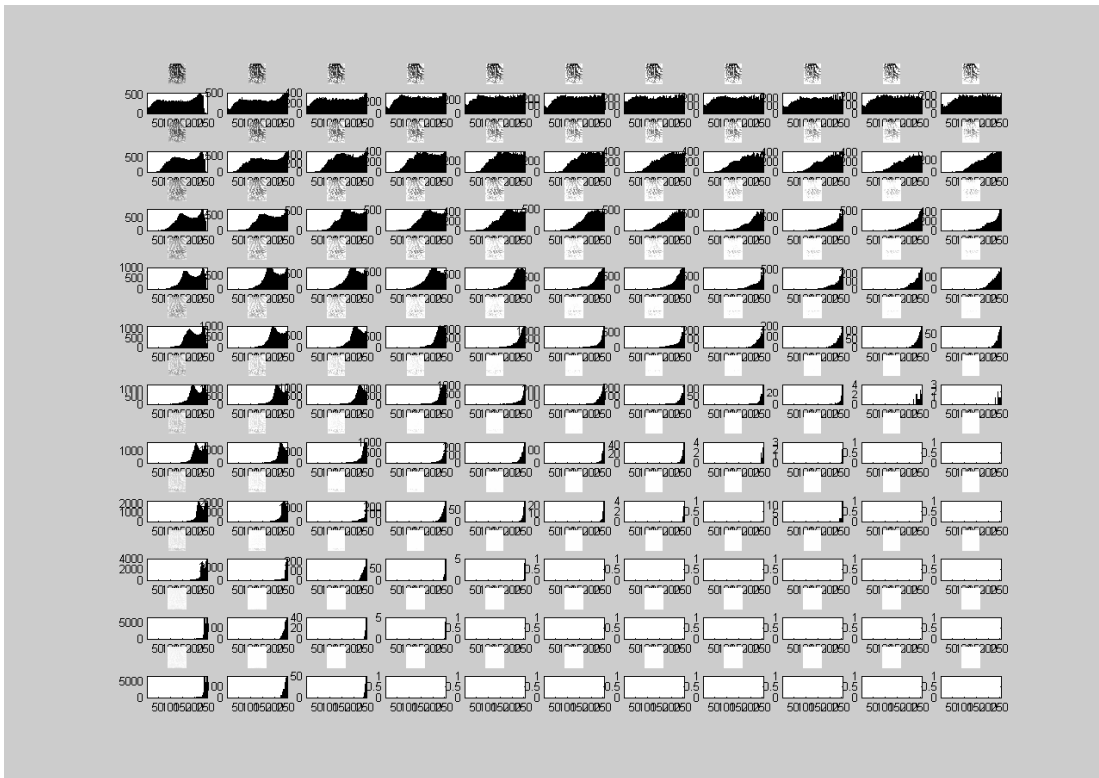
Para poder realizar todas las pruebas al sistema, se solicitó al fabricante el sistema de desarrollo (SDK), el cual fue cedido para uso estricto en aplicaciones académicas. En éste, se puede tener acceso a la modificación de ciertos parámetros que de otra manera no sería posible controlar.

La primera prueba que se realizó al sistema fue el manejo de los parámetros de brillo y contraste. Esto con el fin de lograr que en la adquisición de las imágenes se tuviera una imagen con el mejor contraste posible, es decir utilizando toda la escala de niveles de gris posibles. Existió un problema bastante crítico en este punto y fue la imposibilidad de mantener un modelo (dedo) fijo en el sistema mientras se hace la variación de los parámetros, para su posterior comparación. Es por esto que se tuvo que recurrir a la realización de un molde en distintos materiales como son: Silicona, Colbon, plastilina, etc. En el momento de utilizar el molde, se tuvo en cuenta obstruir por completo toda la parte de sensado del sistema para que los valores que se obtuvieran de niveles de gris en las áreas circundantes no variarían el histograma, el cual es uno de los parámetros de comparación del comportamiento del sistema.

---

<sup>14</sup> Tomado de la patente numero 6917695 de Estados Unidos.

En la figura 11 se puede apreciar un compendio de gráficas donde se encuentran graficadas una imagen de una huella dactilar y su respectivo histograma a medida que se varían dos de sus parámetros brillo y contraste. En el eje x (horizontalmente) está la variación del contraste y en el eje y (verticalmente) está la variación del brillo. Donde el contraste disminuye en sentido de izquierda a derecha, y el brillo disminuye en sentido de arriba abajo.



**Figura 11:** Variación del brillo y del contraste para una misma huella particular.

Teniendo en cuenta los análisis realizados sobre la variación de dichos parámetros, se implementó un algoritmo que logra realizar una toma con el mejor contraste posible en la imagen. Es decir, se trató de lograr que se utilicen todos los niveles posibles de la escala de gris. Sin embargo, el sistema adquirido (en general todos los sistemas de adquisición de precios razonables) tiene un tiempo de adquisición de las imágenes de más o menos un segundo, lo cual hace que sea imposible implementar un algoritmo de adquisición “óptimo” en el contraste ya que los movimientos del dedo de la persona sobre el área de sensado hacen que la

convergencia del algoritmo se vea afectada considerablemente. Al realizar la comparación con las muestras anteriores, la muestra no es fija, lo que hace que la comparación no arroje resultados estables y en muchos casos no se llegue a encontrar el punto en el cual el contraste es óptimo.

Así, para lograr imágenes de un contraste (definido para este trabajo como el mejor aprovechamiento del rango dinámico del sensor) considerablemente bueno, se recurrió a hacer pruebas de laboratorio con un número considerable de muestras usando 6 voluntarios, los cuales colocaron el dedo en el sensor con ciertos parámetros de ubicación establecidos (los cuales se explican en el capítulo referente a bases de datos) pero con parámetros de presión variables, ya que ésta es la principal variable a tener en cuenta para los análisis del contraste en la imagen. Esto se debe a que existe la posibilidad de perder información referente a la definición de las crestas y valles de la huella cuando existe una exagerada presión sobre el sensor, puesto que si la piel es presionada lo suficiente hará que las crestas de la huella se aplasten y por lo tanto sean imposibles de detectar por el sensor. Sin embargo, sin llegar a casos extremos de presión, es posible hacer un mejoramiento en la característica de crestas y valles, haciendo variaciones adecuadas en el brillo y el contraste.

Los voluntarios que se utilizaron para esta prueba fueron de un rango de edad variado, esto debido a que en general las personas adultas tienden a ejercer diferentes tipos de presión en comparación de las personas jóvenes y estos a su vez que los niños. En la Tabla 3 se puede apreciar un compendio de los voluntarios que se utilizaron para hacer las pruebas respectivas y su edad. Además de esto allí se pueden observar los valores de brillo y contraste con los que finalmente se obtuvo el contraste óptimo, después de la realización de numerosas pruebas.

	Edad	Brillo	Contraste
Voluntario # 1	13%	28%	80%
Voluntario # 2	15%	23%	85%
Voluntario # 3	21%	32%	85%
Voluntario # 4	22%	35%	86%
Voluntario # 5	52%	28%	91%
Voluntario # 6	58%	26%	92%

**Tabla 3:** Resumen de los resultados obtenidos, para brillo y contraste óptimos en función de la persona.

Para la realización de esta prueba se hicieron 10 tomas del dedo índice en dos sesiones distintas, y los resultados mostrados son el promedio de los valores óptimos que se encontraron analizando el histograma de las imágenes para el mejor caso de adquisición. Es así como analizando estos datos se llegaron a unos valores que dan un punto de partida para hacer la toma de los datos.

Un punto bastante crítico respecto a las características del sensor, dado que este va a ser utilizado en un sistema basado en correlación, es que este debe corregir las aberraciones propias del sistema óptico. Es decir el comportamiento no lineal que introduce la configuración del LED y el cristal, para que de esta forma no se vean afectados la imagen en sus bordes. Esto se consultó antes de la compra con el fabricante, y este expresó que efectivamente las no linealidades del sistema en los bordes estaban corregidas, sin embargo siempre existió esta inquietud por parte de los integrantes del GOTS, así que se diseñó una prueba para investigar esto.

Para esta prueba se planteó utilizar un molde al cual se le realizó un rayado homogéneo de una cuadrícula de aproximadamente un milímetro cuadrado de área, en sus cuadrados posteriormente esta fue puesta en el sensor para realizar la adquisición de la imagen. Después, se analizaron las distancias que tenía dicha cuadrícula en contraste con las distancias adquiridas por el sensor medidas en pixeles, y se llegó a la conclusión de que el sistema es completamente lineal y por ende es viable su utilización en un sistema que basara su funcionamiento en medidas de correlación.

## 5. BASE DE DATOS

El sensor óptico adquirido se utilizó para la creación de una base de datos, esto con el fin de poder manipular las diferentes variables que influyen en la toma de imágenes de las huellas dactilares, sin tener que recurrir a bases de datos preestablecidas en las cuales, no se tiene la plena certeza de la forma como se manejaron los diferentes parámetros cuando fueron construidas.

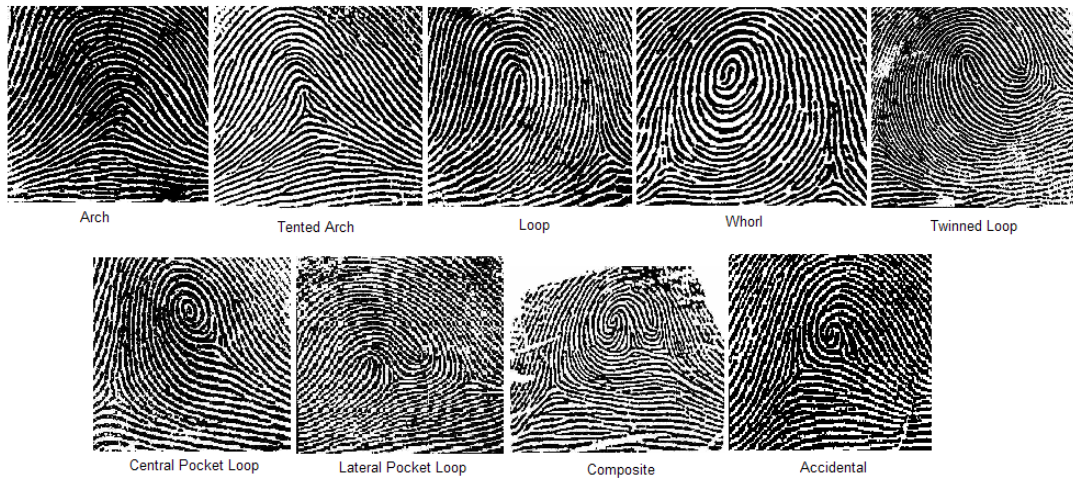
### 5.1. CARACTERÍSTICAS DE LAS BASES DE DATOS

Las bases de datos utilizadas ampliamente para la comparación y caracterización de los diferentes algoritmos que tratan las imágenes de huellas dactilares son principalmente dos: las bases de datos que provee el concurso bianual de huellas dactilares FVC (*Fingerprint Verification Competition*) y las que provee el NIST (*National Institute of Standards and Technology*). En general dichas bases de datos tienen características similares y se clasifican según los mismos parámetros.

La clasificación de las bases de datos es según características técnicas globales durante la adquisición. Un ejemplo claro son las bases de datos utilizadas para las diferentes versiones de los concursos FVC. En dichos concursos se han utilizado bases de datos adquiridas con distintos tipos de sensores, cada uno funcionando con una tecnología base diferente (óptica, capacitiva, térmica, etc.). Es decir, esta información junto con las clases de huellas que tiene la base de datos, son en general los detalles que diferencian una base de datos de otra.

Por ejemplo, algunas bases de datos NIST tienen igual cantidad de cada una de las clases de huellas dactilares existentes. En la figura 12 puede verse un ejemplo de cada una de los tipos de huellas dactilares según la clasificación Henry (en general la clasificación que se utiliza en la práctica es sólo de seis tipos: *Arch*, *Tented Arch*, *Right Loop*, *Left Loop*, *Whorl* y *Twin Loop*). En caso de hacerse la base de datos aleatoriamente con un grupo de voluntarios sin tener en cuenta el tipo de huellas, algunas de las clases de huellas serían más abundantes que las otras, ya que como

está demostrado existen diferentes probabilidades de hallar uno u otro tipo de huella en una población determinada.



**Figura 12:** Diferentes clases de huellas dactilares [11] y [12].

También existen bases de datos basados en otro tipo de características globales de las huellas o de la técnica que fue utilizada para realizar la adquisición de las imágenes.

## 5.2. BASE DE DATOS CONSTRUIDA

Debido a que esta base será utilizada para la verificación de la concordancia de las huellas dactilares por medio de correlación, se plantea la creación de una base de datos que tenga como característica principal que tan centrada esta la huella en el sistema de sensado. Es decir, se plantea hacer una clasificación de todas las huellas dactilares según qué tan distante esta del centro del área de sensado, el centro de la huella. Esto es debido a que la correlación es una medida global de similitud, y por lo tanto se ve bastante afectada si la intersección en la toma de un área con respecto a otra toma tiene muy poca área en común.

En la base de datos a construir sólo se utilizó un sistema de adquisición y en algunas de las huellas la calidad en la toma fue controlada, esto con el fin de que sirva a las personas que utilizan esta base de datos para realizar la puesta a punto de sus algoritmos.

Teniendo en cuenta todo lo anteriormente descrito, se desarrolló la base de datos que se describirá a continuación. Se utilizaron 50 voluntarios a cada uno de los cuales les tomó aproximadamente 10 minutos cada una de las sesiones en que se hizo la toma de las muestras. La toma se realizó en dos sesiones cada una de las cuales implicaba la misma serie de pasos para hacer tomas de características similares. El protocolo utilizado para hacer la toma de huellas fue el siguiente:

1. Primera toma aleatoria.
2. Segunda toma aleatoria.
3. Toma de huella centrada.
4. Toma de huella desplazada hacia el primer cuadrante.
5. Toma de huella desplazada hacia el segundo cuadrante.
6. Tercera toma aleatoria.
7. Toma de huella desplazada hacia el tercer cuadrante.
8. Toma de huella desplazada hacia el cuarto cuadrante.
9. Cuarta toma aleatoria.
10. Toma de huella centrada.

Las tomas aleatorias implican que la persona coloca el dedo sobre el sensor sin ninguna indicación por parte de la persona que está supervisando la toma de las imágenes de huellas dactilares. El protocolo de toma de huellas combina en diferente orden tomas aleatorias de las huellas y tomas supervisadas por la persona encargada. En estas tomas supervisadas se analizan como están las posiciones del centro de la huellas con respecto al centro de las imágenes. En la toma supervisada además se controló que la presión sobre el sensor sea moderada sobre un rango de trabajo y de esta forma la calidad de la imagen resultante sea considerablemente buena.

En total se hicieron dos sesiones con 50 personas cada una, de a 10 tomas en dos de sus dedos (índice y pulgar derechos) en cada una de las sesiones. Es así como se obtuvieron un total de 400 imágenes de huellas dactilares, lo cual es una

cantidad comparable a la que ofrecen algunas de las bases de datos comerciales existentes en el mercado para la puesta a punto de los algoritmos.

En las figuras 13 y 14 se pueden ver algunos ejemplos de las imágenes presentes en la base de datos.



**Figura 13:** Ejemplo de la toma de una huella dactilar centrada.



**Figura 14:** Ejemplo de la toma de una huella dactilar desplazada hacia el primer cuadrante.

## **6. DESARROLLO DE ALGORITMOS DE MEJORAMIENTO DE IMÁGENES DE HUELLAS DACTILARES**

Como ya se ha discutido esta es una etapa fundamental para el buen desempeño de los sistemas que trabajan en el reconocimiento y verificación de huellas dactilares, ya que tener imágenes de buena calidad facilita todo proceso posterior.

### **6.1. MEJORAMIENTO DE IMÁGENES “ON-LINE” vs “OFF-LINE”**

Existen aplicaciones que requieren de un mejoramiento “rápido” de las imágenes de huellas dactilares, ya que se necesita realizar una verificación inmediata. El algoritmo de mejoramiento se plantea como una solución para hacer el mejoramiento de las imágenes que están almacenadas en la base de datos, y entonces el tiempo que tome el proceso, a pesar de ser considerablemente reducido, se puede aumentar con el fin de lograr que las imágenes patrón que sean almacenadas en la base de datos sean de la mejor calidad posible.

### **6.2. ALGORITMOS DE MEJORAMIENTO DE IMÁGENES**

Básicamente existen tres grandes clases entre los que se pueden clasificar los distintos tipos de mejoramiento de imágenes de huellas dactilares en la actualidad. Éstos son los basados en: Transformada de Fourier 2D, Filtros de Gabor y descomposición Wavelet [22].

El primero de estos algoritmos a pesar de ser una de las ideas más antiguas respecto a la forma como se podría lograr mejoramiento de imágenes de huellas dactilares, no ha mostrado aun resultados de desempeño que sean lo suficientemente buenos para ser de consideración apreciable. El tercero de estos métodos es un concepto bastante nuevo que al igual que el primero de los algoritmos no ha mostrado un desempeño satisfactorio, sin embargo los resultados obtenidos hasta el momento indican que este método de mejoramiento es una muy buena opción.

Es así como el algoritmo basado en filtros de Gabor fue escogido como el algoritmo base para realizar el mejoramiento de imágenes para el caso particular de desarrollo de este proyecto. Cabe anotar que este algoritmo es el líder indiscutible entre todos los nuevos algoritmos nacientes ya que se ve como el algoritmo referencia a perfeccionar por las nuevas ideas propuestas. Cabe anotar que al ser este un trabajo de grado no se pretendió lograr una idea innovadora totalmente en su concepto, sino por el contrario partir de la base de un algoritmo global existente para de esta forma mejorar lo máximo posible este lo mayor posible para adaptarlo a las condiciones particulares de investigación de este trabajo.

Antes de tomar en consideración el algoritmo basado en Filtros de Gabor se realizaron pruebas preliminares sobre algoritmos novedosos en el estado del arte pero sin embargo nunca se llegó a tener un resultado satisfactorio en comparación al algoritmo basado en Filtros de Gabor [23].

### **6.2.1. ALGORITMO BASADO EN FILTROS DE GABOR**

Este algoritmo de mejoramiento de imágenes de huellas dactilares, basa su funcionamiento en la utilización de filtros de Gabor con parámetros variables según regiones locales de las imágenes. Es decir, son filtros que se modifican según cada una de las regiones particulares en las cuales se desee aplicar, basados en las características de frecuencia y orientación de las crestas en dicha región. Este algoritmo fue el que se decidió utilizar como base para el desarrollo del mejoramiento de las imágenes de huellas dactilares gracias a que ha sido el que a demostrado un mejor desempeño y adaptabilidad hasta el momento.

En general existen etapas principales en la implementación del algoritmo la primera de ellas es el cálculo de la orientación del patrón de crestas y valles, la segunda es el cálculo de la frecuencia de este patrón, y la tercera es la aplicación del filtrado de Gabor. A continuación se explicará en general como se desarrolla cada una de estas etapas.

El cálculo de la orientación del patrón de crestas y valles en cada una de las regiones se calculó usando un método basado en la Transformada de Fourier, el cual al implementarse sobre una región de la imagen, da como resultado la orientación más sobresaliente hacia donde se inclina dicho patrón. El cálculo de la frecuencia se realizó por un método que implica la proyección de la sección local sobre una línea base (plano 1D) usando el algoritmo de rotación desarrollado descrito en el capítulo 9. Finalmente, la implementación del filtrado de Gabor se realizó utilizando como parámetros la frecuencia y orientación anteriormente calculadas.

## **7. DESARROLLO DE ALGORITMO DE MEJORAMIENTO IMPLEMENTADO**

El algoritmo implementado se basa en el propuesto por Hong [24] el cual se puede subdividir en los siguientes pasos: normalización, estimación de orientaciones locales, estimación de frecuencias locales, y filtrado. Se introducen algunas variaciones que se han tomado en consideración según nuevos artículos publicados basados en dicho algoritmo así como también teniendo en cuenta la aplicación particular en la cual se desea implementar este algoritmo de mejoramiento y la experiencia adquirida durante el desarrollo de este proyecto.

### **7.1. DESCRIPCIÓN**

A continuación se describiré cada una de los pasos que comprenden la etapa de mejoramiento de imágenes de huellas dactilares basados en el algoritmo propuesto por Hong.

#### **7.1.1. NORMALIZACIÓN DE PRESIÓN**

Como sabemos la superficie de la huella dactilar es curva, es decir que la representación exacta debería ser en 3D, para que de esta forma se tuviese en cuenta la curvatura de la superficie. Así es que esta característica causa grandes problemas de no linealidad cuando se desea hacer una representación de la huella en 2D.

Teniendo esto en cuenta podríamos afirmar que en general todas las imágenes de huellas dactilares que son tomadas por sensores planos que no requieren de un deslizamiento de la huella o que no hacen un sensado en 3D de la huella, tienen una considerable diferencia en la presión que se ejerce en el centro de la huella comparada con la que se ejerce en la partes exteriores de la misma. En las huellas dactilares el centro de esta, definido en la ciencia forense como el punto donde convergen las curvaturas del patrón de crestas y valles, se encuentra ubicado por lo general cerca del pico de la superficie de la huella dactilar, es así que se puede ver

en las imágenes de huellas que se aprecia un mayor grosor de las crestas en las cercanías del centro como consecuencia de una presión superior a la que se ejerce en la superficie exterior de esta.

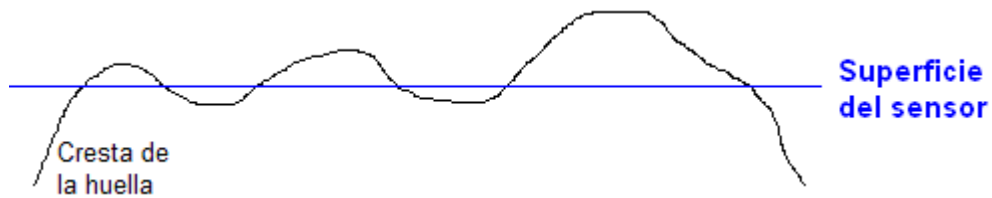
Para el caso particular del sensor escogido, esta característica de las imágenes adquiridas descritas anteriormente se cumple. Como puede apreciarse en la figura 15 las crestas cercanas a el centro de la huella están bien definidas y son continuas (caso 1), en cambio las crestas que se encuentran alejadas del centro de la huellas son de una calidad inferior y por lo general poseen una característica de discontinuidad (caso 2). En la figura 16 se puede ver una representación de lo que sucede en la superficie de la cresta en la huella dactilar cuando esta es censada por una superficie (2D).



**Figura 15:** Imagen muestra tomada con el sensor seleccionado.

Estas características de discontinuidad podrían ser bastante valiosas para un método basado en correlación, ya que en cierta forma estas son una representación de la superficie en las crestas de las huellas, algo similar a cortes axiales sobre la superficie. Sin embargo dado el sistema de adquisición del que se dispone, que tan profundo es el corte axial en una cresta particular depende de la presión que se

ejerce sobre la superficie del sensor, esto hace que la característica adquirida no sea repetible y por ende no sea menos viable para su uso como patrón de verificación.



**Figura 16:** Corte axial de una huella dactilar.

En este punto se propone un algoritmo que basado en la varianza de la imagen así como también en la densidad de crestas (negro) determine una “máscara de presión”, la cual indica en qué lugar de la imagen se ejerció mayor presión y en cuales fue menor la presión, para de esta forma lograr aumentar la presión artificialmente en estas zonas.



**Figura 17:** Imagen original y su máscara de presión resultante.

Básicamente lo que se hizo fue analizar la varianza y la media globales, y compararla con la media y varianza locales de la imagen, la cual esta subdividida en cuadros de área de ancho  $w$  y largo  $w$ , donde  $w$  esta medido en pixeles, no trasladables. El tamaño de los cuadros se tomó de tal forma que en promedio los cuadrados de subdivisión pudiesen abarcar dos crestas y dos valles, para que de esta forma contuviesen información del patrón de crestas y valles, y no fuese tan pequeña que no se alcanzara a detallar dicho patrón no tan grande que produjera resultados muy generales.



**Figura 18:** Mapa de desviaciones.

Adicional a la máscara anteriormente descrita se creó una máscara basándose en la desviación estándar. Como se puede suponer esta es mayor en las zonas de alta frecuencia, es decir en los bordes de las crestas. Para ejercer una presión artificialmente similar a como se ejerce la presión sobre las crestas cuando estas son presionadas contra el área de sensado, lo que se propone es hacer una operación de transformación en los niveles de gris de la imagen de tal forma que la curva de representación de dicha transformación sea tal que para los niveles de gris más cercanos al negro (representación de crestas) se transformen a negro,

logrando así un efecto de engrosamiento en las crestas representadas en la imagen. Es así como teniendo en cuenta la máscara descrita inicialmente, se realiza el proceso de incrementar la presión artificialmente descrito anteriormente, en las zonas de la imagen donde existe una menor presión relativa (zonas exteriores de la imagen).

### **7.1.2. SEGMENTACIÓN DE LA IMAGEN**

Basados en los cálculos de media y desviación estándar realizados anteriormente, se implementa un criterio de decisión sobre los segmentos locales, cuadros de ancho  $w$  y largo  $w$ , donde  $w$  está medido en píxeles, de la imagen que hacen parte de la información del patrón de huella dactilar y sobre los que hacen parte del fondo de la imagen. Este criterio de decisión consiste en establecer un nivel crítico para realizar la decisión y de esta forma segmentar la imagen, este nivel de decisión se estableció empíricamente después de realizar análisis de un gran número de imágenes de huellas dactilares.

Esta etapa del algoritmo se plantea después de la etapa anterior ya que sí se implementa primero la etapa de segmentación que la de normalización de la presión, gran parte de la información de los bordes de la huella es desechada por el método de decisión como si esta hiciera parte del fondo de la imagen.

### **7.1.3. NORMALIZACIÓN**

Ya que el sistema de adquisición utilizado tiene un rango fijo de niveles de gris (8 bits), esta etapa no es del todo necesaria. A pesar de que la media y desviación estándar no son conocidas de antemano en todas las imágenes estas no son parámetros completamente aleatorios. Esto se debe a que el software de sensado tiene implementado un algoritmo con ciertos requerimiento mínimos sobre la imagen a sensar para considerarla como una huella dactilar válida, entre estos requerimientos está un valor mínimo de media y varianza, lo cual junto al rango de

operación en niveles de gris dan un rango mínimo y máximo para los valores de media y varianza en las imágenes.

#### **7.1.4. ESTIMACIÓN DE LA ORIENTACIÓN LOCAL**

Como describió en el primer paso del proceso la imagen fue subdividida en cuadros de ancho  $w$  y largo  $w$ , donde  $w$  esta medido en pixeles, el algoritmo original utiliza subdivisiones pares, sin embargo se decidió utilizar tamaños pares para que de esta forma no exista ambigüedad en el cálculo del centro de las imágenes locales, el cual es un parámetro necesario en los cálculos realizados.

Esta etapa y las consecutivas son aplicadas independientemente a cada subdivisión de la imagen en el algoritmo original, sin embargo esto causa que existan grandes problemas de discontinuidad en la imagen resultante, es por esto que se propone un método que utiliza cuadrados de ancho  $w$  y largo  $w$ , donde  $w$  esta medido en pixeles, trasladables, para que de esta forma no se presente problema de discontinuidad en la imagen resultante.

La implementación de este sistema de áreas que se traslapan tiene un incremento significativo en el desempeño del algoritmo, a pesar de incrementar el costo computacional, este se logra reducir considerablemente haciendo uso de los cálculos comunes a una región con respecto a la anterior. Sin embargo el costo en la lógica utilizada en la implementación aumenta considerablemente.

El método propuesto para el cálculo de las orientaciones locales se basa en el método del gradiente, donde se utiliza el hecho de que el vector de orientación es ortogonal al gradiente. Se calcula primero que todo el gradiente en cada pixel de la imagen, después de esto se realiza una operación de promediado con el gradiente de cada pixel en el área local para así obtener el gradiente representativo de dicha área local. Los gradientes  $(\Delta x(i,j))$  y  $(\Delta y(i,j))$  se calculan utilizando un filtrado Sobel.

(matrices sobel) [25]

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{pmatrix}$$

La orientación local en cada región local puede ser estimada utilizando las ecuaciones (1), (2) y (3), donde  $\theta(i, j)$  es el mínimo error cuadrático medio de cada una de las regiones locales

$$V_x(i, j) = \sum_{u=i-\frac{w}{2}}^{i+\frac{w}{2}} \sum_{v=j-\frac{w}{2}}^{j+\frac{w}{2}} 2\partial_x(u, v)\partial_y(u, v) \quad (1)$$

$$V_y(i, j) = \sum_{u=i-\frac{w}{2}}^{i+\frac{w}{2}} \sum_{v=j-\frac{w}{2}}^{j+\frac{w}{2}} \partial_x^2(u, v)\partial_y^2(u, v) \quad (2)$$

$$\theta(i, j) = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{V_y(i, j)}{V_x(i, j)} \quad (3)$$

Después de esto se realiza un filtrado tipo Gauss sobre los campos de orientación en las vecindades, con el fin de lograr que en los puntos donde hay minucias y los campos de orientación no sean correctamente calculados se corrijan estos errores; esto se hace basados en el hecho de que el cambio en la orientación del patrón de crestas y valles no varía abruptamente en las pequeñas vecindades.

Debido a que se utilizó una subdivisión de la imagen en regiones con intersección no nula, la utilización de este filtrado pasa bajos sobre los campos de orientación no es necesaria debido a que con esta clase de subdivisión de la imagen las orientaciones locales se toman teniendo en cuenta las vecindades del área, cuando la imagen de salida es calculada, ya que existe una contribución de las regiones aledañas con su orientación particular referida a dicha región.

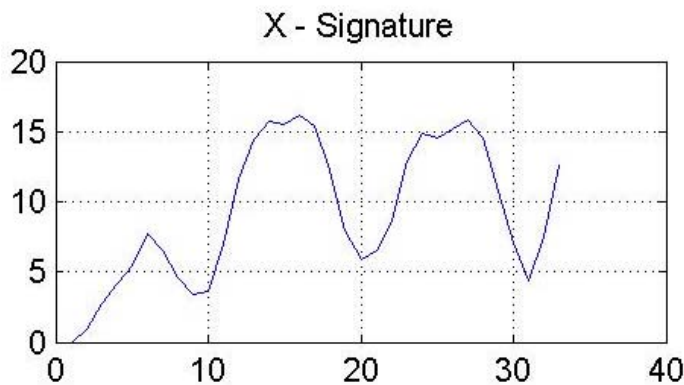
### 7.1.5. ESTIMACIÓN DE LA FRECUENCIA LOCAL

La segunda etapa de cálculo local para el diseño de los filtros de Gabor implica el cálculo de la frecuencia local, esto se hace con base en el patrón de crestas y valles de la huella. Para esto se proyecta cada uno de los cuadrados en los que se ha subdividido la imagen, sobre una dirección ortogonal a la orientación local calculada para dicha área. Esta parte del algoritmo fue la motivación para crear el algoritmo descrito en el capítulo 9 sobre rotación, ya que al tener que realizar la rotación de áreas tan pequeñas (15x15) el método para lograr este fin, debe ser tal que se introduzca la mínima cantidad de ruido. En general los métodos propuestos para realizar la rotación de imágenes introducen un ruido considerable en las imágenes, producto de las aproximaciones realizadas al tener que utilizar cálculos de senos y cosenos de ángulos. El método propuesto para la rotación, reduce el ruido de forma óptima con un considerable aumento en el costo computacional, sin embargo dada la aplicación esta consideración es válida.

Después de esto se realiza una proyección de esta imagen 2D sobre una línea (1D) para de esta forma obtener una característica patrón que en general posee la forma de una senoidal. Esta senoidal posee la información de la frecuencia de aparición de las crestas y valles. Al analizar esta característica en diferentes regiones de las imágenes, se llega rápidamente a la conclusión de que el cálculo de la frecuencia es bastante sensible al ruido introducido por el algoritmo de rotación empleado, ya que el espaciamiento entre cada una de las crestas es bastante reducido.

En la figura 19 podemos ver la forma como se ve la proyección de una región particular de una huella, sobre una línea (1D). Para el cálculo de la frecuencia de dicha senoidal se utilizó el algoritmo de FFT, con lo cual se obtuvieron resultados bastante satisfactorios en comparación con el método propuesto originalmente en el algoritmo, el cual calcula la frecuencia basada en mediciones espaciales de esta senoidal. Pero dadas las características de alto ruido presentes en las huellas dactilares, junto con los malos resultados obtenidos en el cálculo de primera y

segunda derivadas, los cálculos de mínimos y máximos en la función son bastante complejos y poco estables.



**Figura 19:** Proyección de una región local sobre una línea (1D).

#### 7.1.6. FILTRADO DE GABOR

Una vez se tienen calculados la orientación y frecuencia de una región se hace el diseño del filtro de Gabor a aplicar. Un filtro de Gabor en dos dimensiones consiste en una onda senoidal de una orientación y frecuencia definidas, modulada por una envolvente tipo Gauss. Estos filtros de Gabor son utilizados porque ellos tienen la propiedad de selectividad en frecuencia y orientación. Esta característica los hace ideales para su uso en esta aplicación, donde estos parámetros son fundamentales. Así es que se utiliza un filtrado de Gabor para mejorar efectivamente el patrón de crestas y valles, reduciendo considerablemente el ruido.

El filtro de Gabor consiste en la parte real de la función de Gabor, la cual está dada por una señal cosenoidal modulada por una Gaussiana. En las ecuaciones (4), (5) y (6) se puede ver como se define un filtro de Gabor en el dominio espacial.

$$G(x, y; \theta, f) = \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{x_{\theta}^2}{\sigma_x^2} + \frac{y_{\theta}^2}{\sigma_y^2}\right]\right\} \cos(2\pi f x_{\theta}) \quad (4)$$

$$x_{\theta} = x \cos(\theta) + y \sin(\theta) \quad (5)$$

$$y_{\theta} = -x \sin \theta + y \cos(\theta) \quad (6)$$

En las ecuaciones anteriormente descritas  $\theta$  y  $f$  son la orientación y frecuencia, calculadas previamente para cada una de las regiones de subdivisión,  $\sigma_x$  y  $\sigma_y$  son las desviaciones estándar de la envolvente Gaussiana en cada uno de los ejes correspondientes. Este filtro de Gabor es aplicado a la imagen convolucionando espacialmente la imagen con el filtro diseñado para cada caso particular. Así para determinar la imagen de salida en cada uno de los pixeles se debe utilizar la ecuación (7), la cual calcula la convolucion del filtro con la imagen, donde  $I$  es la imagen que se obtiene después de realizar los primeros dos pasos y  $w_x$  y  $w_y$  son los tamaños del filtro en la dirección x y y respectivamente.

$$E(i, j) = \sum_{u=-\frac{w_x}{2}}^{\frac{w_x}{2}} \sum_{v=-\frac{w_y}{2}}^{\frac{w_y}{2}} G(u, v; \theta, f) I(i-u, j-v) \quad (7)$$

El ancho de banda del filtro, es determinado por los parámetros de desviación estándar. En el algoritmo original estos parámetros fueron escogidos empíricamente a un cierto valor. Esto hace que el ancho de banda sea constante lo cual no tiene en cuenta las diferentes variaciones de frecuencia en la imagen, contradiciendo el

principio inicial por el que se creó el algoritmo que era suponer que la frecuencia de las crestas no era un parámetro constante en toda la imagen.

Se hicieron pruebas utilizando círculos concéntricos con frecuencias variables y se pudo ver que usando esta técnica (desviación estándar fija) la reconstrucción de la imagen falla considerablemente cuando existen variaciones de frecuencia considerables en el patrón de crestas. Es por esto que se propone hacer que las desviaciones estándar sean proporcionales (constante a calcular) al parámetro de frecuencia en cada área de subdivisión. Se encontró empíricamente después de realizar numerosas pruebas, un valor de 5 para dicha constante.

En el algoritmo original se plantea un tamaño para la máscara de filtrado de 11x11, este valor fue ajustado empíricamente, sin embargo en casos en los que la variación de la frecuencia es significativa (como el experimento explicado anteriormente) se puede ver que este tamaño no es el adecuado. Es por eso que se propone hacer una máscara de filtrado de tamaño tal que sea adaptable según la frecuencia del patrón de crestas y valles, siguiendo la misma idea utilizada para el cálculo de la desviación estándar.

Es así como se toma esta constante con un valor de 4, con esto, 2 desviaciones estándar son incluidas en la información de la huella. En general las variaciones en la frecuencias de los patrones de crestas y valles no es significativa, sin embargo en los puntos de minucias existen variaciones significativas, y es en estos puntos en donde este algoritmo adaptable tiene mayor importancia. Ejemplo de esto es la figura 20, donde se puede ver el área local (verde) de una huella dactilar y sus vecindades (rojo), allí es apreciable que al analizar las áreas locales (verdes) parecería que la frecuencia es casi el doble de la frecuencia global, esto como consecuencia de la subdivisión repentina de una cresta en dos crestas como en el primero de los casos, o cuando existe una subdivisión gradual, como es el segundo de los casos.



**Figura 20:** Casos de variación significativa de frecuencia.

## 7.2 MÉTRICA DE DESEMPEÑO DEL ALGORITMO

Se utilizara el algoritmo propuesto por Chen [], para el análisis de la calidad de imágenes de las huellas dactilares. Con este algoritmo se pretende dar un valor numérico comparativo a la calidad de las imágenes de huellas dactilares. Esto con el fin de mostrar que tan eficiente es el algoritmo propuesto, en cuanto al mejoramiento de la calidad en dichas imágenes.

El método que se propone consiste básicamente en obtener una medida global de la distribución de la energía en la imagen de la huella dactilar con respecto a la frecuencia, y según esto, usar un criterio de entropía para dar un factor de calidad comparativo de cada una de las imágenes.

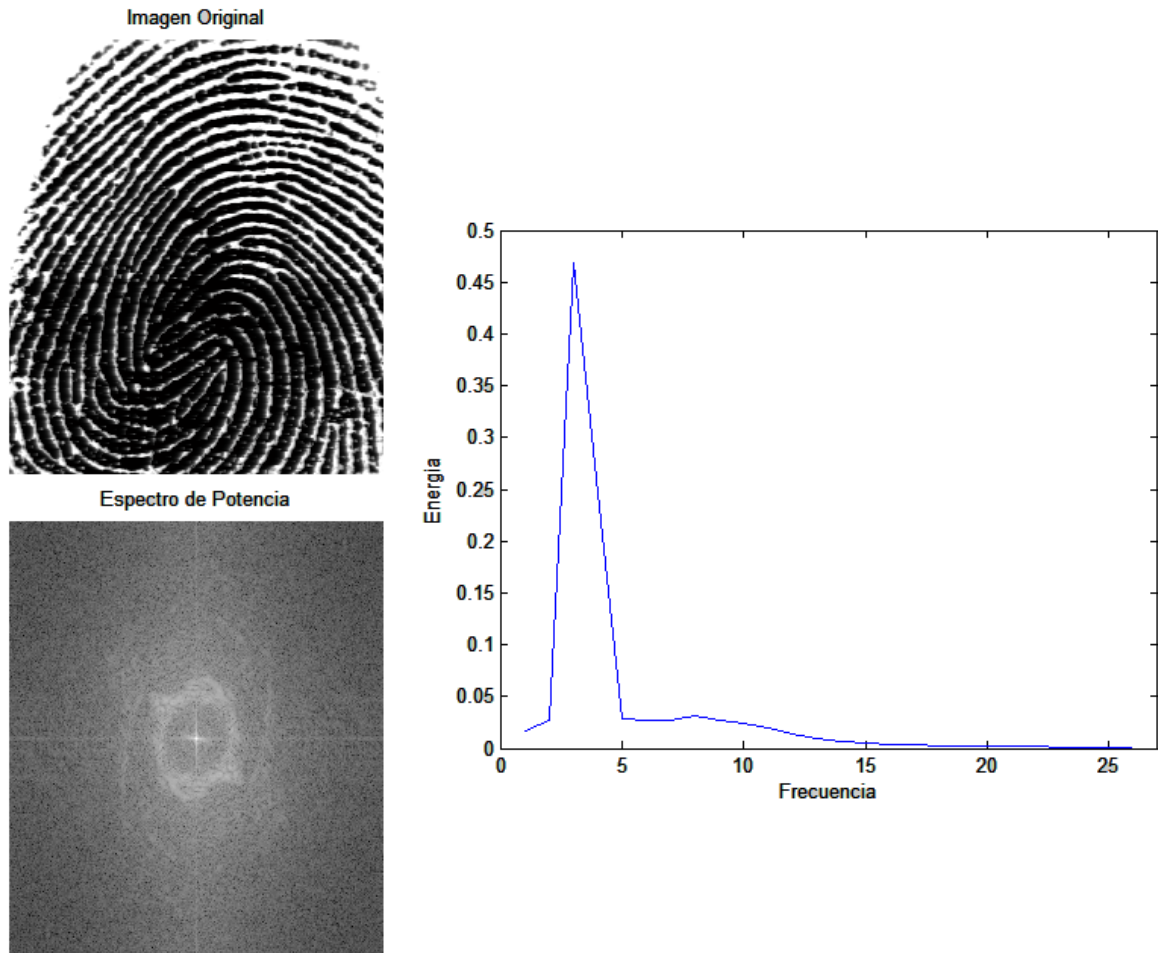
Partiendo de una imagen dada, se calcula su espectro de energía, el cual es una medida que contiene la mayor parte del contenido de información de la imagen. Dicho espectro se puede calcular fácilmente como el valor absoluto, elevado al cuadrado de la transformada de Fourier 2D de la imagen, como se puede ver en la ecuación 4.

$$P(n,m) = |F(n,m)|^2 \quad (4)$$

Donde F es la transformada de Fourier de la imagen y P es el espectro de energía. Al hacer un análisis sobre las frecuencias espaciales típicas de las imágenes de huellas dactilares se ha encontrado un rango de valores dentro de los cuales se encuentra la información más relevante.

Al analizar el espectro de energía de las imágenes de huellas dactilares se puede ver que cuando el patrón de crestas y valles está bien definido existen un rango pequeño de frecuencias dominantes, como es de esperarse, dado que el espaciamiento de las crestas y los valles es constante. Caso contrario se presenta cuando la imagen de la huella dactilar es de mala calidad y no existe un patrón claro de crestas y valles, en dicho caso no existe un pequeño rango de frecuencias dominantes en la imagen, sino que la energía se dispersa en un rango amplio de frecuencias.

Con esta idea, se puede definir un método para medir la calidad de las imágenes de huellas dactilares basados en la concentración de energía en ciertas bandas de frecuencia. Para esto se plantea hacer filtrados pasa banda butterworth en la imagen, sobre el rango posible de frecuencias espectrales de imágenes de huellas dactilares, posterior a esto se analiza el contenido de energía de cada una de estas bandas de frecuencia establecidas, para de esta manera lograr identificar como es la distribución de energía en la imagen con respecto de la frecuencia. Como se puede ver en la figura 21, donde se aprecia una imagen de una huella dactilar junto con su espectro de potencia y la distribución de energía con respecto a la frecuencia.



**Figura 21:** Imagen de una huella dactilar, junto con su transformada de Fourier y su distribución de energía particular.

Como se había mencionado antes, una imagen de huella dactilar con una buena resolución, es aquella que tiene una concentración apreciable de su energía en un rango de frecuencias dado, es por esto que se plantea medir la agudeza del pico de la distribución de energía con respecto a la frecuencia, como una forma de determinar la calidad de la imagen. Como parámetro para medir la agudeza de dicho pico se utiliza la ecuación 5, la cual da una medida numérica de que tan concentrada esta la información en la grafica de distribución de la energía respecto de la frecuencia.

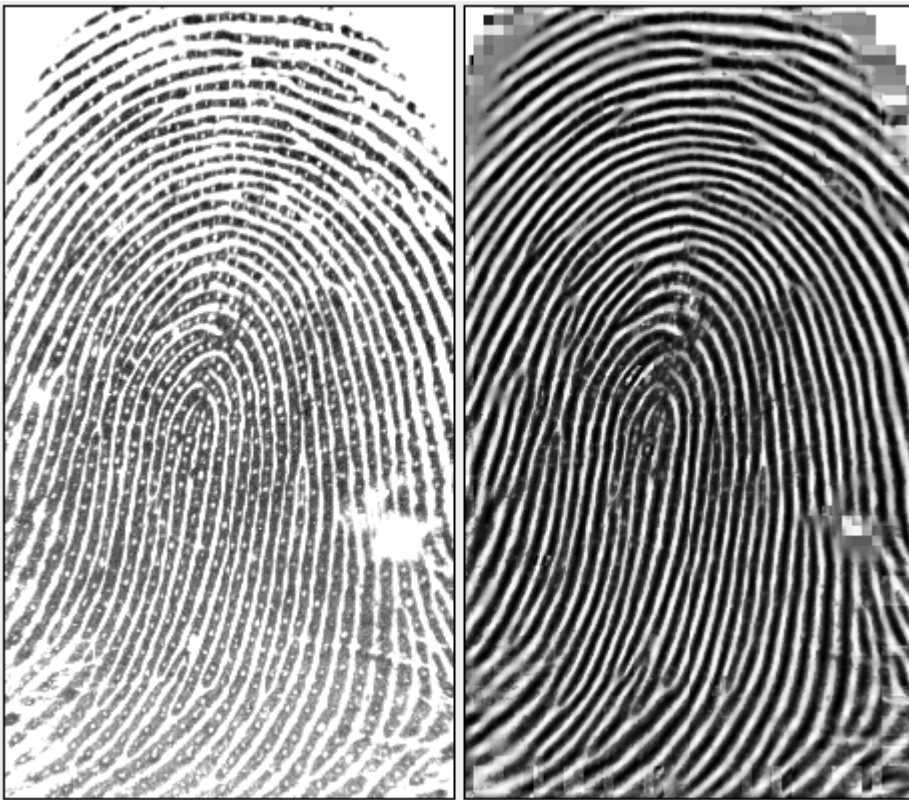
$$FC = \log(E_1^{E_1} * E_2^{E_2} * \dots * E_n^{E_n}) \quad (5)$$

Donde  $E_1, E_2, \dots, E_n$ , corresponde la energía (normalizada) que se encuentra presente en cada una de las bandas de subdivisión creadas a partir del filtro pasa banda Butterworth descrito anteriormente. Como puede verse en caso de una concentración máxima, es decir cuando una banda contenga toda la energía ( $E = 1$ ) y las otras bandas por consiguiente no contengan energía ( $E = 0$ ), el FC (factor de calidad) es máximo.

Este procedimiento fue aplicado a todas las imágenes de la base de datos antes y después del mejoramiento, para de esta forma tener una medida numérica comparativa respecto al porcentaje de mejoramiento que se logró con la técnica planteada. En la sección de resultados se puede ver lo obtenido.

## 7.2. RESULTADOS

A continuación se pueden ver algunas de las imágenes a las que se les aplicó el algoritmo de mejoramiento descrito, y los resultados obtenidos.

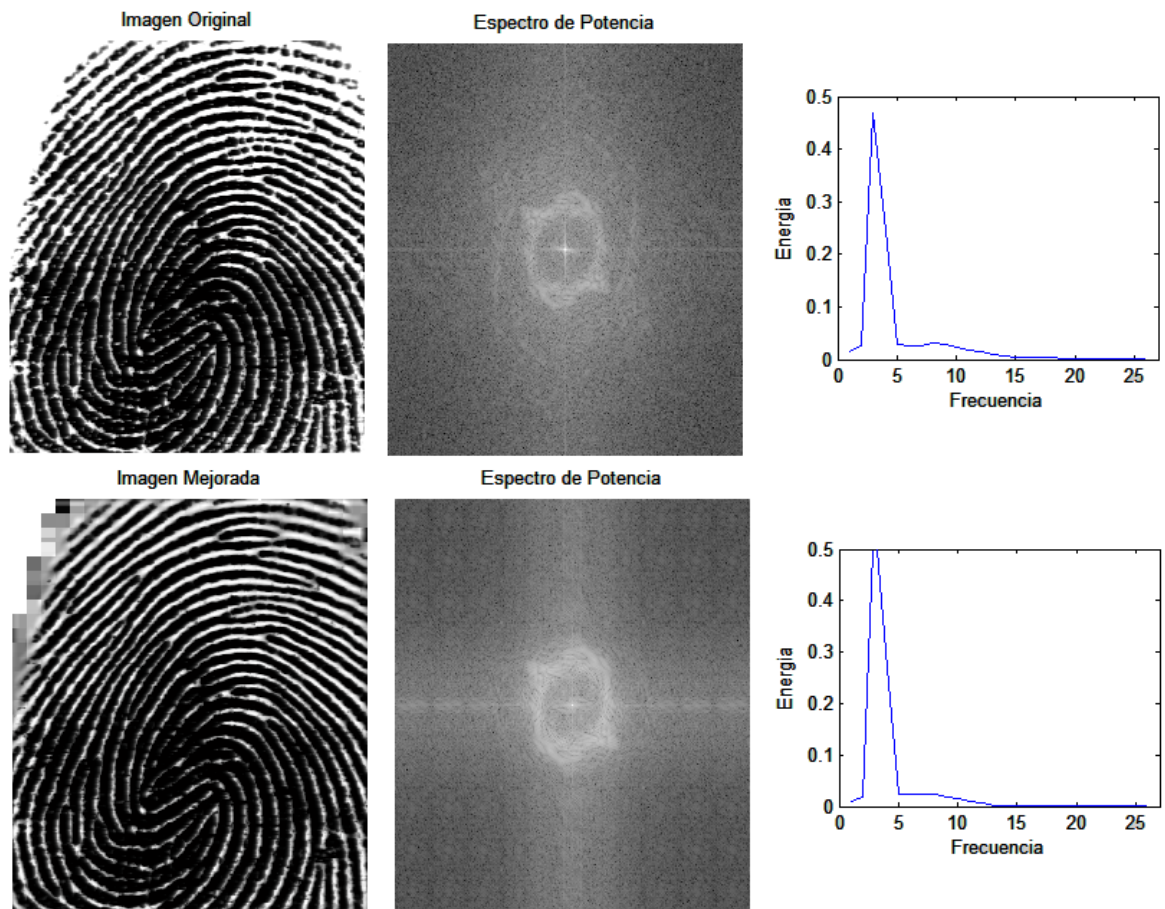


**Figura 22:** Imagen muestra 1 antes y después del mejoramiento.

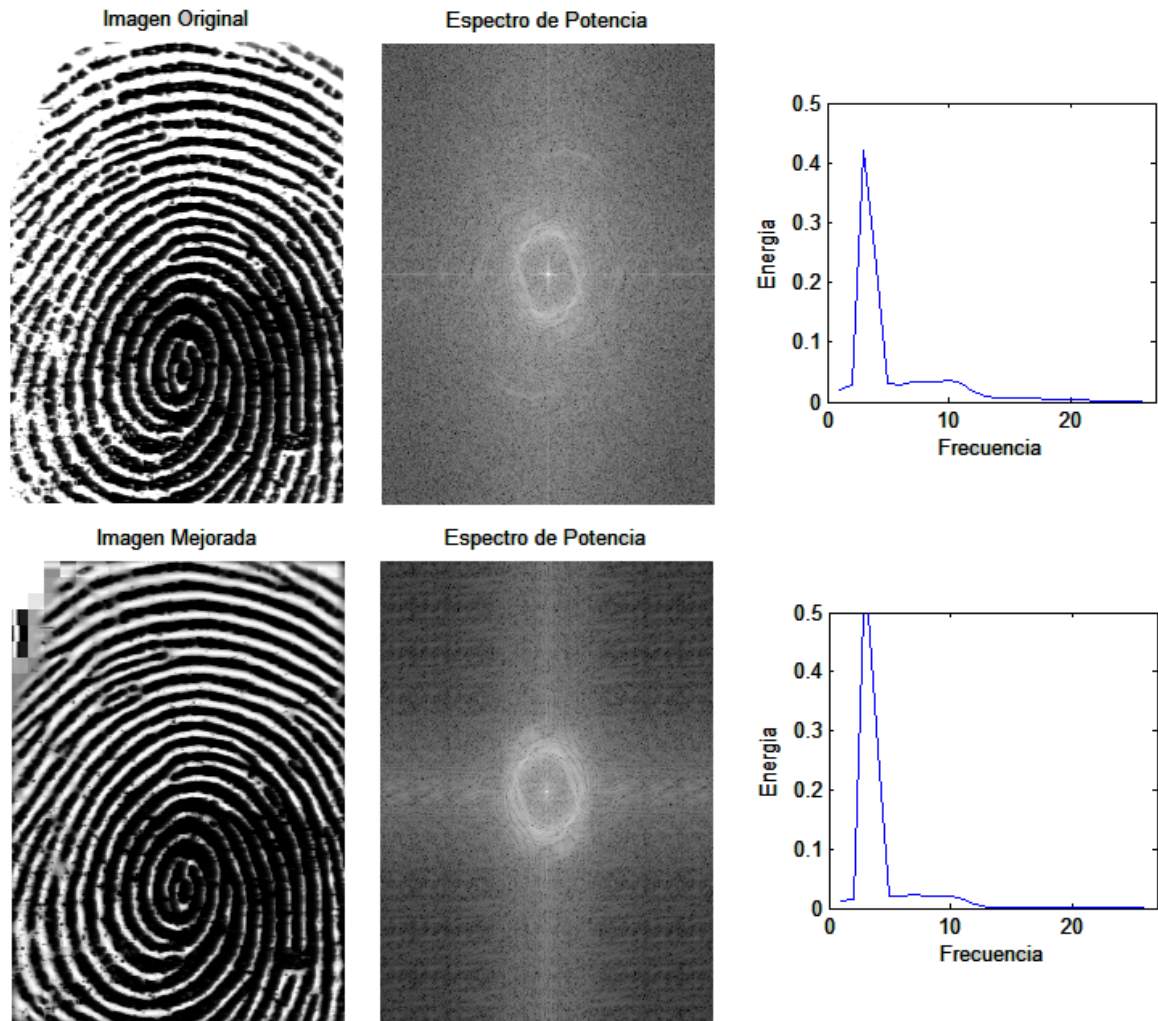


**Figura 23:** Imagen muestra 2 antes y después del mejoramiento.

El procedimiento descrito en el capítulo 7.2, fue aplicado a toda la base de datos antes y después del mejoramiento de imágenes implementado, para de esta forma tener una medida numérica comparativa del desempeño del algoritmo propuesto. A continuación en las figuras 23 y 24, se pueden ver las imágenes originales junto con las imágenes mejoradas y el factor de calidad medido en cada uno de los casos.



**Figura 24:** Imagen de huella dactilar antes (superior) y después (inferior) del mejoramiento. Antes del mejoramiento FC = 63%, después del mejoramiento FC = 75%

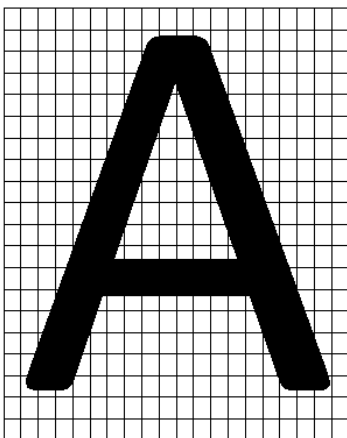


**Figura 25:** Imagen de huella dactilar antes (superior) y después (inferior) del mejoramiento. Antes del mejoramiento FC = 47%, después del mejoramiento FC = 59%

## 8. ALGORITMO DE ROTACIÓN DESARROLLADO

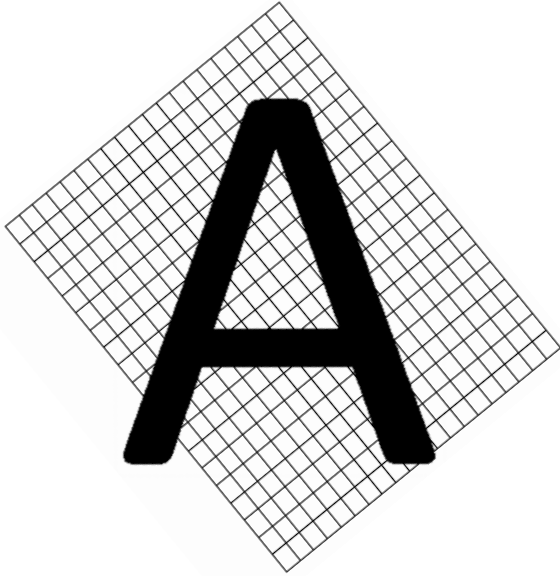
Este algoritmo de rotación está orientado a lograr obtener la menor alteración en la distribución de los niveles de intensidad en la imagen. Básicamente se plantea un método en el cual no se utilicen aproximaciones en el cálculo de los valores de cada uno de los píxeles de la imagen rotada, sacrificando el costo computacional. Para este fin se implementó un algoritmo que analiza la correspondencia de la matriz de píxeles de la imagen nueva con la matriz de píxeles de la imagen original, basándose en un muestreo digital.

La suposición básica para el desarrollo de este algoritmo es que la imagen original fue obtenida por medio de un arreglo de pel cuadrado, en el cual la distancia de separación que existe entre cada uno de los sensores es despreciable y podemos suponer que una imagen digital es un arreglo de cuadrados continuos (sin espacio de separación entre ellos), donde cada uno de estos cuadrados representa el valor de intensidad (pixel) promedio del área de sensado. Como puede verse en la figura 26, al censar una imagen, como consecuencia de que el arreglo de sensores a utilizar es de una limitada cantidad, la representación de la imagen pierde parte de su definición original. Esta pérdida de información será apreciable dependiendo de la densidad de sensores con la que cuente la matriz de sensado.



**Figura 26:** Sensado de la letra A por medio de una matriz de sensores.

Cabe anotar que el valor de intensidad de cada uno de los sensores esta dado como el valor de intensidad luminosa que este recibe durante un determinado periodo de tiempo. Ahora bien, si lo que se desea es realizar una rotación de la imagen, lo ideal sería lograr disponer del modelo original de la imagen y colocar un arreglo de sensores en la inclinación que deseemos de rotación. Como puede verse en la figura 27.



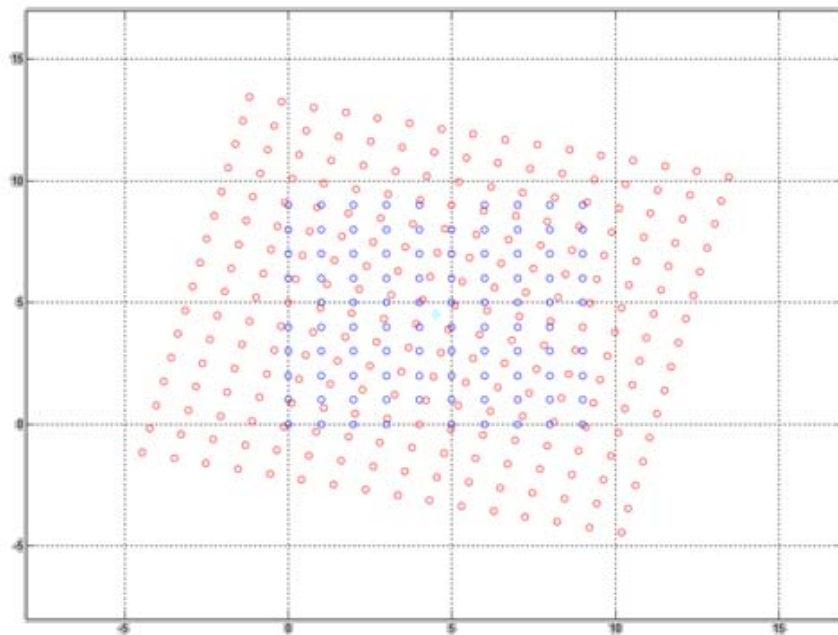
**Figura 27:** Forma ideal en la que se debería tomar un registro de la rotación de una imagen.

Como se puede ver claramente en esta imagen, uno de los principales problemas asociados a la rotación, aun sensando el modelo original, es la diferencia en el tamaño de la imagen rotada con respecto a la imagen no rotada. Es decir que para el caso de querer aplicar algún procedimiento para comparar una imagen con su imagen rotada, se debe tener muy en cuenta esta diferencia en los tamaños de las imágenes.

Intuitivamente vemos que si deseamos realizar una rotación lo más cercana a la rotación 'ideal' descrita anteriormente, pero sin contar con el modelo original, debemos realizar un procedimiento similar, con la diferencia que en este caso debemos tener en cuenta nuestra limitación de solo disponer de una representación

digital del modelo original (matriz de sensado original). Este procedimiento similar consiste en simular el sensado de la imagen original, por medio del sensado de la imagen digital en el ángulo deseado de rotación, como si esta fuese el modelo original, o al menos es la mejor aproximación al modelo original de que disponemos.

Este procedimiento de sensado requiere hacer el cálculo para el valor de intensidad de la nueva matriz rotada, en donde debido a la rotación los pixeles del nuevo arreglo no corresponderán exactamente con los pixeles del arreglo de la imagen original, así que para obtener sus valores de intensidad se propone modelar su valor como una proporción de los valores de intensidad de los pixeles de la matriz original con los cuales exista intersección. Esto es, dentro de los pixeles de la nueva matriz (imagen rotada) se analizan las áreas de intersección con cada uno de los pixeles de la matriz original (imagen original), y en proporción con el valor de cada una de estas áreas se tomó su valor de intensidad, para así posteriormente calcular cada uno de los nuevos valores de intensidad para la nueva matriz.

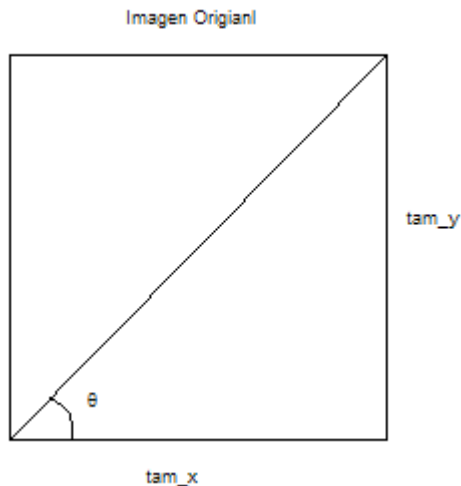


**Figura 28:** Convención utilizada para representar cada una de las imágenes.

Como puede verse en la figura 28, La convención utilizada para representar las matrices es: límites de la imagen original (puntos azules) y límites de la imagen rotada (puntos rojos).

### 8.1. DESCRIPCIÓN DEL ALGORITMO

Primero que todo es necesario definir el tamaño máximo de la imagen de salida, para esto suponemos el peor de los casos, el cual es, cuando exista un ángulo de rotación tal que la diagonal de la matriz original quede orientada en su totalidad ya sea en sentido horizontal o en sentido vertical. Este ángulo crítico para el cual la imagen de salida tiene que ser de un tamaño máximo se puede ver ilustrado en la figura 29.



**Figura 29:** Rotación para la cual el tamaño de salida de la imagen rotada es el máximo.

Es así como la imagen resultante de rotación que censará la matriz original, deberá ser de este tamaño máximo, para que sin importar el ángulo de rotación la imagen original siempre quede dentro de los límites de la imagen rotada.

Como primer paso en el desarrollo de este algoritmo se propone encontrar las intersecciones entre la matriz de la imagen original y la matriz de la imagen rotada, esto con el fin de definir los límites que tienen cada una de las áreas de

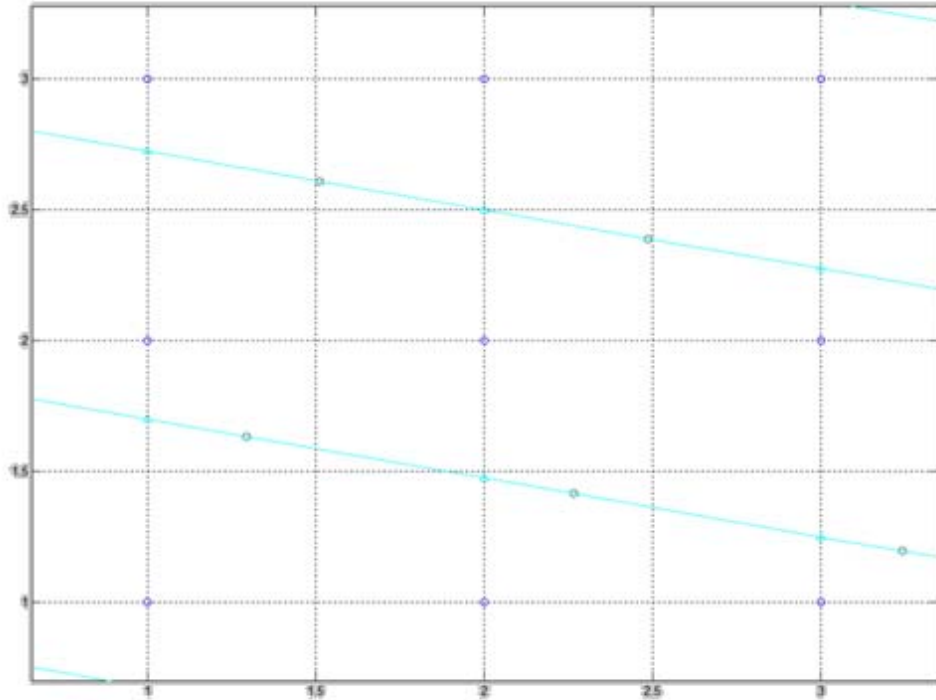
intersección. Para lograrlo, se recorre cada uno de los lados que definen los píxeles en las dos matrices y analizar cuando estos lados se intersectan con los lados de la otra matriz.

Los puntos de delimitación de un píxel, es decir cada uno de los cuatro puntos que lo demarcan, son al mismo tiempo puntos de delimitación de áreas, ya que estos definen el cambio de un píxel a otro, es así como estos puntos no serán analizados sino que por el contrario de ante mano se incluirán en el vector que contiene las intersecciones. Debido a que más adelante será prioritario tener las intersecciones en cada uno de los lados en orden creciente, el vector que contendrá las intersecciones además de contener la información de las coordenadas en las que ocurre la intersección, deberá contener la información de la distancia que posee cada una de las intersecciones con respecto al punto inicial del recorrido del lado en su dominio.

En el caso de la matriz original las distancias con respecto al punto inicial de cada lado es una información trivial, ya que las coordenadas  $x$  y  $y$  de cada una de las intersecciones definen la distancia que existe con el punto inicial, cuando se recorre la imagen horizontalmente la coordenada  $x$  determina la distancia con respecto al punto inicial, y cuando el recorrido se haga en la dirección vertical, esta distancia está definida por la componente  $y$ . En el caso de la matriz de la imagen rotada, ya que los puntos iniciales de cada una de los lados tienen coordenadas que dependen tanto del tamaño de la imagen de salida como del ángulo de rotación, el cálculo de las distancias con respecto a los puntos iniciales de cada lado implican el cálculo de una hipotenusa utilizando las coordenadas de la intersección así como también las coordenadas del punto inicial del lado respectivo. Así por ejemplo, si se recorre el quinto lado horizontal de la imagen rotada, todas las distancias deben estar medidas con respecto al primer punto de la quinta horizontal, el cual coincide con el punto superior izquierdo que delimita el primer píxel de la cuarta fila.

## **8.2. INTERSECCIONES DE LAS IMÁGENES**

La variable  $H_{1\_xy}$  representa las intersecciones de la matriz original con la matriz rotada, cuando los lados analizados son los horizontales de la imagen rotada.



**Figura 30:** Ejemplo de los triángulos de color azul, los cuales representan las intersecciones de los lados de las dos matrices.

Como puede verse en la figura 30, los triángulos de color azul claro representan las intersecciones de los lados de las dos gráficas. Un procedimiento análogo se realiza para los lados verticales.

Después de tener todas las intersecciones entre las dos matrices, se ordenan todos estos valores según la distancia que tengan respecto de cada uno de sus lados, teniendo en cuenta de incluir los límites de los píxeles en este vector. La necesidad de incluir los límites de los píxeles en el vector de intersecciones se verá más clara cuando se explique la forma como se calculan cada una de las áreas.

### **8.3. CALCULO DE ÁREAS**

Esta parte del algoritmo es la más compleja, ya que en esta se plantea la necesidad de buscar generalizar todos los casos de intersecciones que se puedan presentar en los pixeles de la imagen original y los pixeles de la imagen rotada. Es así como se clasifican de alguna manera todos los casos según alguna característica que los identifique a todos sin exclusión.

La mejor forma que se encontró para una clasificación de todas estas posibilidades es en base a la cantidad de puntos de delimitación de pixeles de la imagen original que se encuentren dentro del área que limita cada uno de los pixeles de la imagen rotada. Esta clasificación se pensó, teniendo en cuenta que más adelante se necesitó calcular cada una de las áreas de intersección, para lo cual esta clasificación es bastante útil como se explicará más adelante.

Antes de explicar la clasificación utilizada para los casos presentados en el cálculo de las áreas, vale la pena aclarar que el algoritmo diseñado se encarga de realizar el cálculo del nuevo valor de intensidad para cada uno de los pixeles de la imagen rotada, en base a las áreas de intersección presentes con respecto a la imagen original ponderadas con su intensidad, y posteriormente avanza a calcular el valor de intensidad de un nuevo pixel.

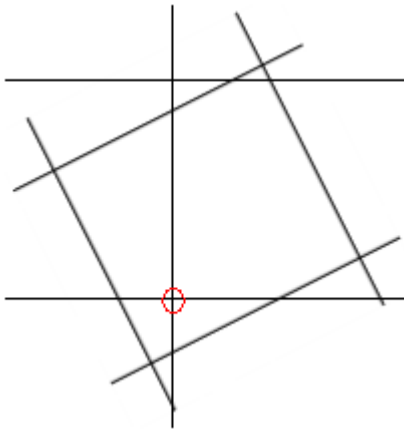
Para analizar si un punto de delimitación de pixel de la imagen original se encuentra contenido dentro de un pixel de la imagen rotada, se realizaron los siguientes pasos:

1. Calcular cuales de los lados de la imagen original se intersecan con los lados de cada uno de los pixeles de la imagen rotada.
2. Posteriormente se guardan los puntos de intersección mutuos de estos lados, los cuales son los posibles puntos de delimitación de pixel de la imagen original que pueden encontrarse contenidos dentro de un pixel de la imagen rotada.

3. Se utilizó el producto punto de los cuatro vectores para así calcular el área de cada uno de los polígonos que se forman.

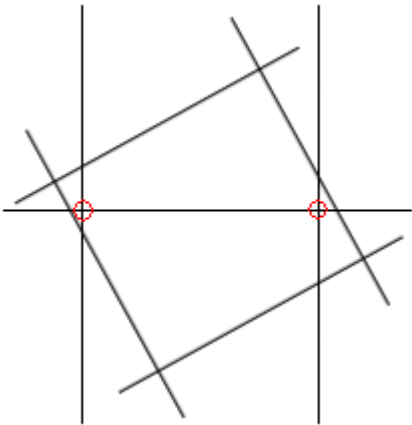
#### 8.4. SUBDIVISIÓN DE CASOS

Cuando se analiza la cantidad de cruces de los lados horizontales y verticales de la imagen original sobre los lados de la imagen secundaria y su cantidad, el cálculo de las áreas de intersección, se puede dividir en tres casos principalmente. El primero de ellos consiste en el caso cuando dentro del área del píxel de la imagen rotada existe un punto de delimitación de píxel de la imagen original como puede verse en la figura 31.



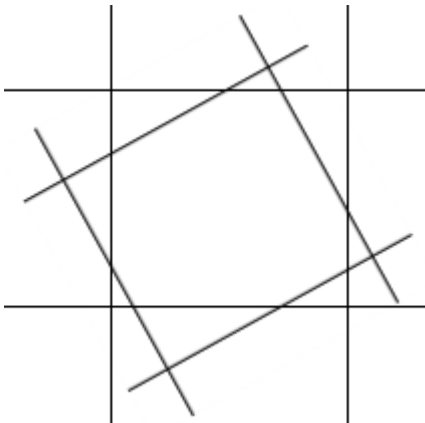
**Figura 31:** Primero de los casos para el cálculo de las áreas.

El segundo caso consiste en el caso cuando dentro del área del píxel de la imagen secundaria existen dos puntos de delimitación de píxel de la imagen original como puede verse en la figura 32.



**Figura 32:** Segundo de los casos para el cálculo de las áreas.

El tercer caso consiste en el caso cuando dentro del área del píxel de la imagen secundaria no existen puntos de delimitación de píxel de la imagen original, como puede verse en la figura 33.



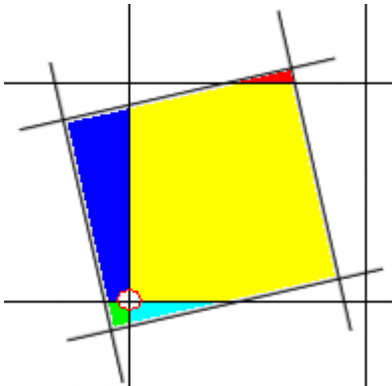
**Figura 33:** Tercero de los casos para el cálculo de las áreas.

Ahora se explica cada uno de los casos por separado y como se logra calcular cada uno de las áreas de intersección de los píxeles. El algoritmo de cálculo de áreas implementado calcula las áreas con base a los puntos que delimitan el polígono. Se debe tener muy en cuenta que para que este algoritmo funcione correctamente sin la necesidad de implementar un algoritmo adicional que ordene los puntos de delimitación de los polígonos en un orden definido, incurriendo en un aumento significativo en el costo computacional, estos puntos que delimitan los polígonos deben estar ordenados en un sentido definido, es decir, estar ordenados estrictamente en sentido horario o en sentido anti horario.

### 8.4.1. PRIMER CASO

Tomando como el punto central el punto de delimitación de pixel de la imagen original, haciendo la similitud con un sistema de coordenadas cartesianas, podemos definir cuatro cuadrantes que tomen este punto como el origen (0,0). Según este planteamiento este caso se podría dividir adicionalmente en cuatro casos distintos según la ubicación del punto origen (0,0). Dado esto, las esquinas del pixel de la imagen original es la que se encuentra dentro del área del pixel de la imagen secundaria que se está analizando. Se explica detalladamente que algoritmo se implementó para el subcaso 1, esta explicación podrá ser interpretada para entender el algoritmo implementado en los subcasos 2, 3 y 4, utilizando las analogías correspondientes en cada uno de ellos.

Subcaso 1:



**Figura 34:** Subcaso 1.

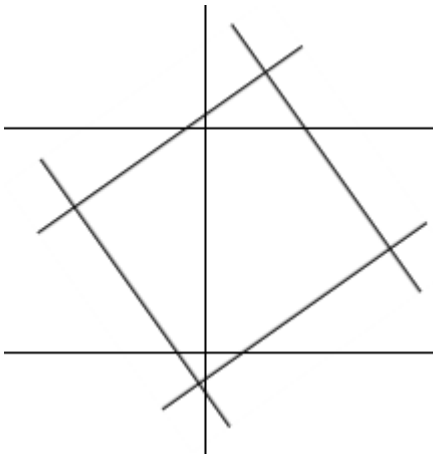
Como se puede observar en la figura 34 las áreas que colindan con el punto de referencia son fácilmente calculables ya que se posee toda la información de las intersecciones de los lados de los pixeles. Sin embargo el área que está en color rojo no colinda con el punto de referencia así que no tenemos un punto de partida para así poder calcular los puntos que delimitan su área.

Para generalizar la forma de encontrar estas áreas “rojas” debemos analizar la cantidad de lados del pixel analizado de la imagen rotada que no son intersecados

por los lados de los píxeles de la imagen original, y así de esta forma encontrar los puntos que delimitan cada una de estas áreas, que pueden ser una o dos áreas adicionales a las cuatro principales, también existe el caso de que no exista área “roja”.

Una explicación análoga se da para los subcasos 2, 3 y 4 en los cuales las áreas rojas se pueden encontrar usando un procedimiento análogo, con la diferencia de que en cada uno de estos casos la posibilidad de existencia de cada una de estas áreas que colindan con esquinas distintas de los píxeles de la imagen rotada.

#### 8.4.2. SEGUNDO CASO



**Figura 35:** Segundo caso.

Como podemos ver en la figura 35 el segundo caso en el que se subdividen los casos de cálculo de áreas, se presenta cuando dos de las esquinas que definen un píxel de la imagen original están incluidos dentro del área del píxel de la imagen secundaria que se está analizando. Ocurre un caso análogo cuando la intersección se da sobre las líneas de división horizontales de los píxeles.

Igual que en el caso anterior, el punto de referencia es una de las esquinas de delimitación del píxel de la imagen original que está dentro del área del píxel de la imagen secundaria. Así que se calculan las áreas que colindan con este punto de referencia, quedando por calcular dos áreas más que colindan con el punto

secundario de referencia el cual es la otra esquina de delimitación de la imagen original que se encuentra dentro del área del pixel analizado.

Un procedimiento análogo se puede hacer para el caso en que la intersección se da sobre las líneas de división horizontales de los pixeles.

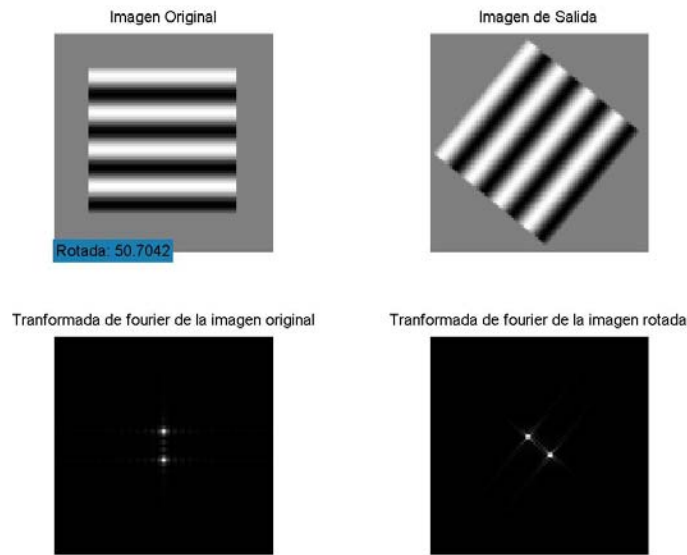
#### **8.4.3. TERCER CASO**

Este se da cuando ninguna de las esquinas de delimitación de un pixel de la imagen original está dentro del área del pixel de la imagen rotada que se está analizando. En este caso existen cinco distintas posibilidades de configuración para el cálculo de las áreas, según sea la inclusión o no de las esquinas de delimitación de los pixeles de la imagen secundaria dentro del área de un pixel de la imagen original, con lo cual se reduce la subdivisión de áreas en cada pixel a sólo cinco.

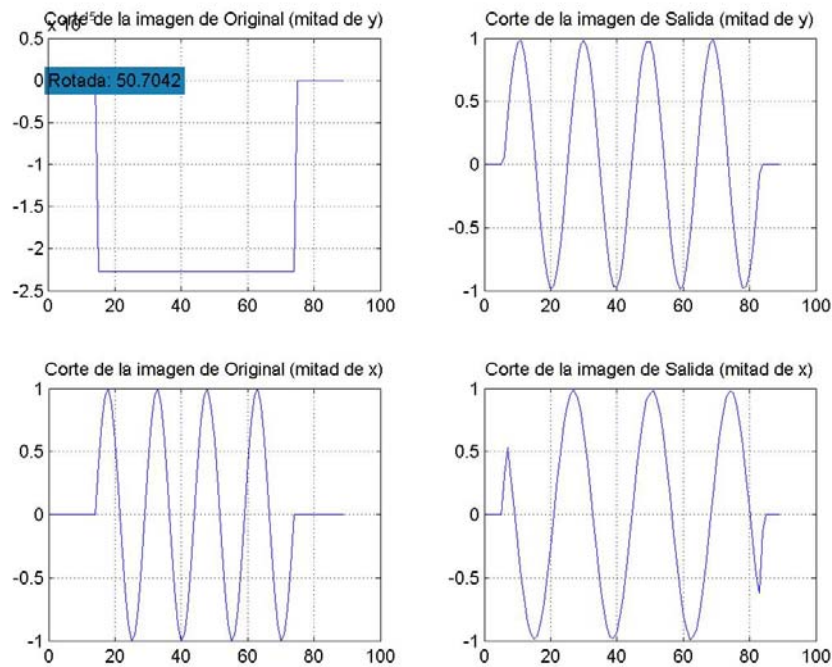
Cabe anotar, que en este caso la subdivisión del pixel a analizar puede ser en 4 o 5 áreas diferentes y nunca en un número diferente a estos. Ya que esto implicaría que el caso que se está analizando no es éste.

### **8.5. RESULTADOS**

El algoritmo funciona correctamente para el cálculo de rotación de imágenes hasta con una precisión de cinco cifras decimales para el cálculo de cada una de las áreas, según el tamaño de las imágenes de huellas dactilares obtenidas con el sistema de sensado escogido.



**Figura 36:** Resultados de la rotación de  $50.70^\circ$  de una onda sinodal proyectada en 2D.



**Figura 37:** Resultados al realizar cortes tanto de la imagen original como de la imagen después de la rotación.

En las figuras 36 y 37 se puede ver claramente que al realizar un corte transversal de la imagen de salida, ésta no presenta alteración en la forma sinodal y además el ruido que se introduce en la rotación es mínimo, ya que la rotación planteada es la mejor posible.

## 9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 9.1. RECOMENDACIONES Y TRABAJO A FUTURO

- Es de vital importancia para el uso masivo de los sistemas de verificación de huellas dactilares, basados en tecnologías de sensado que requieren contacto, investigar las probabilidades de posicionar el dedo correctamente y además que tan variable es la posición del dedo en la superficie de sensado, cuando las personas han recibido instrucción y cuando no la han recibido.
- Realizar una base de datos con personas dependiendo de su actividad profesional, para de esta forma analizar algoritmos particulares que tengan en cuenta el entorno en el cual serán utilizados. Cabe anotar que se encontró particularmente que las personas dedicadas a actividades relacionadas con la salud, las cuales utilizan guantes durante una gran parte del día, reflejan una muy baja resolución en la toma de las imágenes de huellas dactilares usando sensores de tipo óptico, de peor calidad aún, que las personas que se dedican a trabajos manuales.
- Utilizando un sistema óptico que funcione a diferentes longitudes de onda, permitiría diferentes rangos de penetración en imágenes cromáticas de la piel, con lo cual se podría crear un escaneo de la característica en las crestas de la huellas dactilares, es así que se propone investigar si es o no una característica discriminativa de las huellas el patrón sobre la superficie de las crestas, o si este es solo debido a células residuales muertas.
- Crear un algoritmo de engrosamiento en el sentido de los campos de orientación, para de esta forma lograr que se mejore esta etapa del proceso al tenerse en cuenta un mayor engrosamiento en el sentido de las crestas con lo cual se hace un engrosamiento que espera que ayude a disminuir discontinuidades, sin las desventaja de crear posibles traslapes entre crestas, esto se podría implementar por ejemplo con técnicas morfológicas.

## 9.2. CONCLUSIONES

- La utilización de algoritmos que sean particulares al sistema de adquisición utilizado, tienen la ventaja de mejorar su desempeño aprovechando las características de cada caso particular, como por ejemplo aprovechando la deformación general introducida en la huella dactilar en el momento de la toma, como sucede en el caso particular de este proyecto.
- La subdivisión de la imagen en regiones traslapables, hace que la imagen resultante tenga una característica más “suave”, lo cual la hace más idónea para la aplicación posterior de un algoritmo de detección de patrones, a diferencia del caso, cuando la subdivisión de regiones es no traslapable existe una característica de discontinuidad en los límites de los cortes de la imagen, lo cual daña por completo el patrón global de la imagen.
- La utilización de poros en las huellas dactilares como una característica de identificación no es viable con un sistema de sensado que requiere contacto, ya que en general esta característica es altamente sensible a la presión ejercida sobre la superficie de sensado del dispositivo, por lo cual se convierte en una característica no repetible en las tomas de muestras. Además se requiere una gran resolución en las imágenes, tema de desarrollo actual en este campo de investigación.
- La utilización de un algoritmo preciso para el cálculo de la reflexión de la imagen en el sentido del campo de orientación, es bastante importante debido a que de esta reflexión depende el cálculo de la frecuencia de la imagen, que es uno de los parámetros principales con los que se realiza el diseño del filtrado de Gabor.
- El uso de una ancho del la campana de Gabor variable tiene una ventaja significativa, ya que existen casos de huellas dactilares que tienen una variación significativa en la frecuencia espacial de las crestas en

comparación con otras, con lo cual se crea un algoritmo adaptable que ajusta el ancho de banda del filtro dependiendo de la frecuencia.

- La utilización de poros como una característica de las huellas dactilares, no es válida cuando se utilizan sistemas de adquisición de baja resolución, como el utilizado en el presente proyecto, ya que el patrón de poros a pesar de brindar una información muy valiosa sobre las huellas dactilares, no es una característica lo suficientemente repetible en estos sistemas como para ser considerada para su uso en verificación biométrica.
- Debido a que la representación de las imágenes en las computadoras es por pixeles, la rotación de estas implica pérdida de información excepto en casos de ángulos de rotación múltiplos de  $90^\circ$ . Se pudo lograr un algoritmo que realiza la rotación óptima, con errores muy inferiores a los registrados por un algoritmo de subdivisión, el cual es un método de fácil implementación pero que aumenta substancialmente el costo computacional.
- En todo sistema tanto de verificación como de identificación de huellas dactilares, un algoritmo que realice un mejoramiento sobre la imagen, es fundamental ya que como se puede ver en las imágenes adquiridas en la base de datos, las condiciones de adquisición de cada una de las imágenes de huellas afecta significativamente la imagen resultante que se registra.

## 10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Daubert v. Merrell Dow Pharmaceuticals (92-102), 509 U.S. 579 (1993).  
<http://supct.law.cornell.edu/supct/html/92-102.ZS.html>
- [2] F. Galton, Finger Prints, London: McMillan, 1892.
- [3] D. A. Stoney and J. I. Thornton, "A Critical Analysis of Quantitative Fingerprint Individuality Models", Journal of Forensic Sciences, Vol. 31, No. 4, Oct 1986, pp. 1187-1216.
- [4] D. Maltoni, D. Maio, A.K. Jain and S. Prabhakar, Handbook of Fingerprint Recognition, Springer (New York), 2003.
- [5] Superintendencia de Industria y Comercio. Consulta de patentes publicadas en Colombia <http://www.sic.gov.co/>
- [6] Advances in Fingerprint Technology, Edited by Henry C. Lee and R. E. Gaensslen, Second Edition, CRC Press LCC, Florida, 2001.
- [7] E. P. Richards, "Phenotype vs. Genotype: Why Identical Twins Have Different Fingerprints?", [http://www.forensic-evidence.com/site/ID Twins.html](http://www.forensic-evidence.com/site/ID%20Twins.html).
- [8] Lin Hong; Yifei Wan; Jain, A.; "Fingerprint image enhancement: algorithm and performance evaluation" Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on Volume 20, Issue 8, Aug. 1998 Page(s):777 – 789
- [9] Biometrix Int. <http://www.biometrix.at/page15.html>
- [10] Researcher Hacks Microsoft Fingerprint Reader, Robert McMillan, IDG News Service, Monday, March 06, 2006.

- [11] C. I. Watson and C. L. Wilson, "NIST Special Database 4, Fingerprint Database," National Institute of Standards and Technology, March 1992.
- [12] C. I. Watson and C. L. Wilson, "NIST Special Database 9, Fingerprint Database," National Institute of Standards and Technology, March 1992.
- [13] FVC 2006 Fingerprint Verification Competition  
<http://bias.csr.unibo.it/fvc2006/>
- [14] D. Sherlock, D.M. Monro, and K. Millard, "Fingerprint Enhancement by Directional Fourier Filtering," IEE Proc. Visual Image Signal Processing, vol. 141, no. 2, pp. 87–94, 1994.
- [15] Hecht, Eugene, Optics, 4th ed. Addison Wesley: New York, 2002, p 125.
- [16] Alyson G. Wilson, Gregory D. Wilson and David H. Olwell, Statistical Methods in Counterterrorism, Springer New York, 2006.
- [17] Daubert v. Merrell Dow Pharmaceuticals, 509 U.S. 579 (1993).
- [18] G. L. Marcials and F. Roli, "Fingerprint verification by decision-level fusion of optical and capacitive sensors," Pattern Recognition Letters, vol. 25, no. 11, pp. 1315–1322, 2004.
- [19] Christophe Champod , Chris J. Lennard , Pierre Margot , "Milutin Stoilovic Fingerprints and Other Ridge Skin Impressions", CRC, Primera Edicion, 2004
- [20] W.J. Herschel, "Skin Furrows of the Hand", Nature, 1885
- [21] Henry C. Lee, R. E. Gaensslen, Advances in Fingerprint Technology, CRC, Segunda Edicion, 2001

- [22] Anto Melvin Paul, R. Mary Lourde, "A Study on Image Enhancement Techniques for Fingerprint Identification", Proceedings of the IEEE International Conference on Video and Signal Based Surveillance, AVSS 2006
  
- [23] R. C. González and R. E. Woods, Tratamiento Digital de imágenes. Wilmington, Delaware: Addison-Wesley / Diaz de Santo, 1996.
  
- [24] L. Hong, Y. Wan, and A. Jain, "Fingerprint Image Enhancement: Algorithm and Performance Evaluation," IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 20, no.8, pp.777-789, 1998
  
- [25] R. C. González and R. E. Woods, Tratamiento Digital de imágenes. Wilmington, Delaware: Addison-Wesley / Diaz de Santo, 1996.