

**IMPLEMENTACIÓN DE UN ALGORITMO BIOMÉTRICO COMPUTACIONAL
MULTIETAPA PARA LA VERIFICACIÓN DE HUELLAS DACTILARES
APLICANDO LAS PROPIEDADES DE OPTIMIZACIÓN DE LOS SISTEMAS
INMUNES ARTIFICIALES**

**MANUEL IGNACIO CUADRADO MORAD
WILFREDO ARIEL GÓMEZ BUENO**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE SISTEMAS E INFORMÁTICA
BUCARAMANGA
2009**

**IMPLEMENTACIÓN DE UN ALGORITMO BIOMÉTRICO COMPUTACIONAL
MULTIETAPA PARA LA VERIFICACIÓN DE HUELLAS DACTILARES
APLICANDO LAS PROPIEDADES DE OPTIMIZACIÓN DE LOS SISTEMAS
INMUNES ARTIFICIALES**

**MANUEL IGNACIO CUADRADO MORAD
WILFREDO ARIEL GÓMEZ BUENO**

**Trabajo de grado presentado para optar al título de
Ingeniero de Sistemas**

**Director
MPE. Henry Arguello Fuentes
Profesor
Escuela de Ingeniería de Sistemas e Informática**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE SISTEMAS E INFORMÁTICA
BUCARAMANGA
2009**

A Dios Todopoderoso

A mis padres Sol y Nacho

A mi hermana Gaby

A mis abuelos, tíos y primos

A todos aquellos que han estado a mi lado en la realización de mis sueños

Manuel Ignacio Cuadrado Morad

A Dios

A mis padres José Vicente y Marina

A mis hermanos Claudia y José Mauricio

A mi sobrinita Carol

A mi novia Dana

A mis tíos y primos

A mis amigos y compañeros

A todos los que hicieron posible el cumplimiento de este sueño

Wilfredo Ariel Gómez Bueno

AGRADECIMIENTOS

Los autores del proyecto desean expresar sus más sinceros agradecimientos:

A Dios por hacer todo esto posible.

A Nuestras familias por todo el amor y apoyo incondicional.

Al profesor Henry Arguello Fuentes, director de este proyecto, quien buscando siempre la excelencia de sus estudiantes; se arriesgo por esta propuesta y puso su confianza en nuestras capacidades, brindándonos sus conocimientos y orientación a lo largo de la realización del presente trabajo.

Al Grupo de Investigación en Ingeniería Biomédica (GIIB), y sus integrantes, tanto profesores como estudiantes, que siempre nos acompañaron y otorgaron toda la colaboración para la realización de este proyecto, al igual que su amistad y camaradería.

A todos los amigos y compañeros que nos acompañaron y soportaron a lo largo de la vida universitaria, por brindarnos su confianza, apoyo y honestidad en todo momento y por todas los buenos momentos que quedaran en la memoria.

Finalmente agradecer a la Universidad Industrial de Santander, Nuestra Alma Máter y a la escuela de Ingeniería de Sistemas. Por acogernos y dotarnos de conocimiento y sabiduría formándonos como seres humanos íntegros.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	3
1.1. OBJETIVOS	5
1.1.1. Objetivo General	5
1.1.2. Objetivos Específicos	5
1.2. JUSTIFICACIÓN	6
2. MARCO TEÓRICO	8
2.1 HUELLAS DACTILARES	8
2.1.1 Características de las Huellas Dactilares	10
2.1.1.1. Características Globales	10
2.1.1.2. Características Locales (Minucias)	11
2.2. EL SISTEMA INMUNOLÓGICO	13
2.2.1 El sistema inmunológico natural	13
2.2.2. Modelos Teóricos del Sistema Inmunológico	15
2.2.2.1. Selección Negativa	15
2.2.2.2. Selección Clonal	16
2.2.2.3. Redes Inmunes	18
2.2.3. Sistemas Inmunes Artificiales	20
2.2.4. Redes Inmunes Artificiales	21
2.2.4.1. Red Inmune Artificial aiNet (L.N. de Castro)	23
2.2.4.2. Opt-aiNet	24
3. DESARROLLO	26
3.1. ANÁLISIS DE LA IMPRESIÓN DACTILAR	26
3.1.1. Adquisición	26
3.1.2. Representación	26
3.1.3. Normalización	27
3.1.4. Campo de Orientación	28
3.1.5. Filtrado	28
3.1.6. Segmentación	29
3.1.7. Binarización	29
3.1.8. Esqueletización	30
3.1.9. Extracción de Características	31
3.1.10. Codificación	34
3.2. VALIDACION DE LA ETAPA DE ANALISIS DE LA HUELLA DACTILAR	34
3.2.1. Ubicación de las Minucias Extraídas vs Ubicación Real	35
3.2.2. Densidad de Minucias	39
3.2.3. Distancias Entre Minucias	40

3.3.	RECONOCIMIENTO DE PATRONES DACTILARES	45
3.3.1.	Técnica de Comparación de Huellas basada en Minucias	47
3.3.2.	Registro de Imágenes	48
3.3.3.	La Distancia de Hausdorff	50
3.4.	ALINEACIÓN DE PATRONES DE MINUCIAS USANDO UNA RED INMUNE ARTIFICIAL ORIENTADA A LA OPTIMIZACIÓN DE FUNCIONES	52
3.4.1.	Características de la Red Inmune	53
3.5.	CORRESPONDENCIA DE PATRONES ALINEADOS	56
3.6.	PRUEBAS DE ALINEACIÓN Y CORRESPONDENCIA	59
3.6.1.	Pruebas de Alineación con Patrones Generados Artificialmente	59
3.6.2.	Pruebas de Verificación Con Impresiones Dactilares	65
3.6.2.1.	Imágenes de demostración	69
	CONCLUSIONES	73
	RECOMENDACIONES	76
	BIBLIOGRAFÍA	78
	ANEXOS	83

LISTA DE FIGURAS

		Pág.
Figura No 1	Diversos Tipos de Impresiones Dactilares	9
Figura No 2	Crestas Y valles en una huella Dactilar	9
Figura No 3	Patrones geométricos de crestas	11
Figura No 4	Minucias en una huella dactilar	13
Figura No 5	Atributos de las Minucias	13
Figura No 6	Selección Clonal	17
Figura No 7	Modelo de red inmune de Jerne.	19
Figura No 8	Árbol genealógico de los modelos de redes inmunes artificiales	23
Figura No 9	Algoritmo de la red Inmune aiNet	24
Figura No 10	Impresión Dactilar Original	27
Figura No 11	Impresión dactilar Normalizada	27
Figura No 12	Campo de Orientación de Una Huella Dactilar	28
Figura No 13	Imagen segmentada	29
Figura No 14	Imagen luego de ser filtrada y binarizada	30
Figura No 15	Impresión dactilar luego de aplicar el proceso de esqueletización	31
Figura No 16	Reglas para la extracción de minucias	32
Figura No 17	Extracción de las minucias en la imagen procesada	32
Figura No 18	Tipos más comunes de falsas minucias	33

Figura No 19	Verificación de las minucias extraídas	34
Figura No 20	Interfaz desarrollada para extracción manual de minucias	36
Figura No 21	Porcentaje de correspondencia entre minucias extraídas manualmente y minucias extraídas automáticamente	37
Figura No 22	Número de Minucias Extraídas Manuales Vs Número de Minucias Correspondientes	37
Figura No 23	Número de Minucias Extraídas Automáticamente Vs Número de Minucias Correspondientes	38
Figura No 24	Distancias entre minucias extracción manual y automática	39
Figura No 25	Triangulación de Delaunay de un conjunto de minucias.	42
Figura No 26	Histograma de las distancias entre minucias cercanas usando todas las minucias.	43
Figura No 27	Histograma de las distancias entre minucias cercanas usando las minucias tipo terminación.	44
Figura No 28	Histograma de las distancias entre minucias cercanas usando las minucias tipo bifurcación	45
Figura No 29	Impresiones dactilares de una misma huella.	50
Figura No 30	Algoritmo de Red Inmune Artificial implementado en el presente trabajo	53
Figura No 31	Emparejamiento de Minucias según su posición	57
Figura No 32	Emparejamiento de Minucias según su orientación	58
Figura No 33	Interfaz de Pruebas con patrones generados	60
Figura No 34	Alineación de Patrones Generados Artificialmente	62
Figura No 35	Convergencia de la red inmune en los cinco escenarios de patrones aleatorios.	64

Figura No 36	Distribución del error en la estimación de la transformación aplicada a los patrones de puntos aleatorios	64
Figura No 37	Falso rechazo	65
Figura No 38	Falsa Aceptación	66
Figura No 39	Grafico FA/FR	66
Figura No 40	Distribución de la distancia parcial de Hausdorff post alineación	67
Figura No 41	Comparación entre la exactitud de la Red Inmune Artificial y Un Algoritmo Genético en el proceso de verificación de huellas	69
Figura No 42	Impresiones de prueba 1: Dos Imágenes de buena Calidad.	69
Figura No 43	Impresiones de prueba No 1 luego de ser alineadas con la red inmune artificial	70
Figura No 44	Impresiones de prueba 2: Una muestra de mala calidad y otra de buena calidad	70
Figura No 45	Impresiones de prueba No 2 luego de ser alineadas con la red inmune artificial	71
Figura No 46	Impresiones de Muestra 3: Dos muestras de mala calidad	72
Figura No 47	Impresiones de prueba No 3 luego de ser alineadas con la red inmune artificial	72

LISTA DE TABLAS

		Pág.
Tabla No 1	Resultados histograma de distancias entre minucias	39
Tabla No 2	Resultados densidad de minucias	40
Tabla No 3	Resultados distancia medias entre minucias	43
Tabla No 4	Parámetros de la red Inmune Artificial	53
Tabla No 5	Resultados obtenidos de las pruebas de alineación de patrones de puntos generados aleatoriamente	63
Tabla No 6	Comparación entre la exactitud de la Red Inmune Artificial y Un Algoritmo Genético	68

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A: GLOSARIO DE TÉRMINOS	83
ANEXO B: DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE VERIFICACIÓN	88
ANEXO C: CAPTURAS DEL SISTEMA DE VERIFICACIÓN	91
ANEXO D: ARTÍCULOS	100

RESUMEN

TÍTULO: IMPLEMENTACIÓN DE UN ALGORITMO BIOMÉTRICO COMPUTACIONAL MULTITAPPA PARA LA VERIFICACIÓN DE HUELLAS DACTILARES APLICANDO LAS PROPIEDADES DE OPTIMIZACIÓN DE LOS SISTEMAS INMUNES ARTIFICIALES*

AUTORES: CUADRADO MORAD, Manuel Ignacio
GÓMEZ BUENO, Wilfredo Ariel**

PALABRAS CLAVES: Sistemas Inmunes Artificiales, Verificación de Huellas dactilares, Transformación Geométrica Afín, Distancia Parcial Modificada de Hausdorff, Optimización, Alineación, Minucias.

DESCRIPCIÓN:

La huella dactilar es uno de los identificadores biométricos más confiables y de uso más extendido; esto ha despertado gran interés en la investigación y desarrollo de sistemas automáticos de reconocimiento basados en esta característica.

El presente trabajo propone un algoritmo biométrico, para la verificación de huellas, basado en modelos inspirados en los procesos y funciones del sistema inmunológico denominados sistemas inmunes artificiales.

El algoritmo implementado explora el uso de una red inmune artificial para optimizar la alineación de dos impresiones dactilares, buscando la transformación geométrica óptima que relaciona conjuntos de patrones de puntos singulares extraídos de las imágenes de las huellas, a la vez que minimiza una medida de similitud conocida como distancia parcial modificada de Hausdorff.

En este trabajo de grado también se contempla el desarrollo de procedimientos para procesamiento y mejora de las imágenes digitales de las impresiones así como la extracción de singularidades o minucias que posteriormente son usados en el proceso de comparación de patrones dactilares.

La red inmune artificial fue evaluada tanto en patrones de puntos generados artificialmente, simulando la distribución de minucias, como en impresiones pertenecientes a una base de datos conocida internacionalmente.

El procedimiento implementado se comparó con otros desarrollos en el área de comparación de huellas dactilares basado en minucias.

* Trabajo de Investigación

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería de Sistemas e Informática.

Director: Henry Arguello Fuentes.

ABSTRACT

TITLE: IMPLEMENTATION OF A MULTISTAGE ALGORITHM FOR COMPUTATIONAL BIOMETRIC FINGERPRINT VERIFICATION APPLYING THE OPTIMIZATION PROPERTIES OF ARTIFICIAL IMMUNE SYSTEMS*

AUTHORS: CUADRADO MORAD, Manuel Ignacio
GÓMEZ BUENO, Wilfredo Ariel**

PALABRAS CLAVES: Artificial Immune Systems, Fingerprint Verification, Affine Geometric Transformation, Modified Partial Hausdorff Distance, Optimization, Alignment, Minutiae.

DESCRIPTION:

Fingerprints are considered one of the most reliable and most widely used biometric identifiers; this has raised interest in the research and development of automatic recognition systems based on this characteristic.

This work proposes a biometric algorithm for fingerprint verification, based on models inspired by the processes and functions of the immune system, known as artificial immune systems.

The implemented algorithm explores the use of an artificial immune network for optimizing the alignment of two fingerprints, searching for the optimal geometric transformation that relates singular point sets patterns extracted from the fingerprint images, while minimizing a similarity measure known as modified partial Hausdorff distance.

This work also involves the development of procedures for processing and enhancement of fingerprint images, and also the extraction of singularities or minutiae that are used in the process of matching fingerprint patterns.

The artificial immune network was evaluated with artificially generated point patterns, simulating the minutiae distribution, and with fingerprint impressions belonging to an internationally known database.

The implemented procedure was compared with other developments in the area of minutiae-based fingerprint matching.

* Investigation Project

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering. Systems Engineering and Informatics School

Advisor: Henry Arguello Fuentes.

INTRODUCCIÓN

Frente a la evolución constante de las tecnologías. Muchas labores antes realizadas por humanos, son ahora realizadas por sistemas computacionales. Una de las tareas que ha llegado a automatizarse es la habilidad de establecer o comprobar la identidad de los individuos. Y es así como el área conocida la biometría se considera de creciente interés en cuanto a la investigación y desarrollo de componentes tecnológicos.

La biometría consiste en la verificación automática de la identidad de una persona mediante características biológicas, psicológicas y conductuales del individuo.

Los principales estudios y desarrollos en el campo de la biometría se basan en mediciones de características como las huellas dactilares, la voz, la caligrafía, el iris, la forma del rostro, la geometría de las manos, las orejas, los patrones de las venas en ciertas partes del cuerpo, entre otros.

Aunque no es un mecanismo de identificación tan fiable como otros basados en patrones oculares, la huella dactilar sigue siendo uno de los métodos de identificación más difundidos, y en el cual se han llevado a cabo numerosas investigaciones, conllevando en la actualidad a tener sistemas de identificación muy confiables alimentados por completas bases de datos que sirven en muchos casos en la rama judicial o en sistemas de seguridad en los cuales se busca controlar el acceso a algún recurso.

Muchos de los sistemas biométricos se apoyan en algoritmos de inteligencia artificial como las redes neuronales artificiales, o los algoritmos genéticos [29],

[30] para realizar las tareas de verificación de patrones extraídos de las diversas características.

El presente trabajo propone un algoritmo de verificación de patrones dactilares apoyado en un novedoso tipo de algoritmos inspirados en la inmunología teórica conocidos como sistemas inmunes artificiales, los cuales han despertado gran interés en el campo de la informática.

1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

En la actualidad se han alcanzado desarrollos excepcionales en tecnologías asociadas en el manejo de la información, tanto así, que ésta se ha convertido en el activo más importante para las organizaciones, los contenidos ahora se encuentran inmersos en el mundo digital, por esto es necesario garantizar que el manejo de éste bien tanpreciado, se realice de manera adecuada y con estrictas medidas de seguridad. Se ha llegado a asegurar, que lograr manejar y proteger de la mejor manera la mayor cantidad de información, será el horizonte de la nueva sociedad de la información.

Uno de los procesos involucrados en la seguridad es la identificación de individuos, para esto se han llevado a cabo numerosos trabajos en el campo de la biometría, buscando comparar características únicas de la fisionomía o comportamiento de las personas. La característica más difundida en la identificación de biometrica, sin que esto signifique que es la mejor en niveles de confiabilidad, es la huella dactilar; esto debido a su facilidad de obtención y sus características de universalidad, unicidad, permanencia a lo largo de la vida de los seres humanos.

Las implementaciones computacionales de esos sistemas biométricos, generalmente recurren a modelos ampliamente conocidos como las redes neuronales o modelos de la computación evolutiva, para realizar las tareas de correlación de las características.

Sin embargo, muchos de los métodos de verificación conllevan un alto nivel de procesamiento computacional, y en otros casos los procedimientos no son

prácticos porque las tareas de reconocimiento no se realizan con la suficiente rapidez, para las necesidades de quien las pretende usar.

Todo sistema biométrico para su completa aprobación debe estar continuamente en revisión para medir qué tan fiables son los resultados que genera, y aunque ninguna implementación logrará obtener una fiabilidad absoluta, sí se pueden alcanzar niveles aceptables.

La principal problemática en el campo de la biometría es lograr desarrollar métodos de comparación de características individuales, que presenten un equilibrio en cuanto al rendimiento de la tarea elaborada y a la vez mantener altos niveles de confiabilidad.

En los últimos años se han desarrollado modelos computacionales inspirados en el funcionamiento del sistema inmunológico de los invertebrados, y han sido utilizados para resolver problemas con un alto nivel de complejidad. Se ha demostrado que generan resultados comparables a otros algoritmos de más amplia difusión; y en muchos casos con menor consumo de recursos.

En este proyecto de investigación, se aborda la necesidad que se genera al buscar nuevas metodologías para afrontar la problemática presente en el área de la identificación biométrica de individuos, que cada vez exige procedimientos más exactos y eficientes.

Con el desarrollo de este proyecto, se busca obtener un método robusto, basado en algoritmos inmunológicos, que haga uso de principios existentes en técnicas ya consolidadas.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo General

Aplicar los mecanismos de procesamiento de los sistemas inmunes artificiales, para la implementación de un algoritmo capaz de llevar a cabo tareas de reconocimiento biométrico de huellas dactilares.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Implementar algoritmos de procesamiento digital a las imágenes de huellas dactilares, para la extracción de singularidades de las muestras.
- Aplicar la abstracción de procesos fisiológicos del sistema inmunológico, para llevar a cabo el proceso de alineación de huellas dactilares.
- Desarrollar una herramienta software, que permita realizar tareas de verificación de individuos a través de huellas dactilares.
- Contrastar el funcionamiento de la herramienta implementada frente a otros métodos tradicionales de verificación, basados en la comparación de huellas dactilares; haciendo uso de muestras pertenecientes a bases de datos internacionales.

1.2. JUSTIFICACIÓN

Existe la concepción errónea que todo el trabajo concerniente a la identificación de personas, en especial aquellas que se hacen uso huellas dactilares, ya han alcanzado un nivel de desarrollo insuperable; esto debido a que a es una de las aplicaciones de reconocimiento que más ha sido investigada a lo largo de los años.

Las diferentes metodologías computacionales que están relacionadas en la tarea de identificar personas, siguen siendo en la actualidad un desafiante e importante campo de investigación para construir nuevas propuestas alrededor del reconocimiento de patrones.

El desarrollo de este proyecto, pretende sumarse a los numerosos desarrollos en el campo de la biometría, especialmente en el área de reconocimiento automático de individuos basados en el procesamiento de huellas dactilares, buscando examinar la aplicabilidad a la temática de la identificación biométrica, de los modelos computacionales pertenecientes al campo de la inteligencia artificial, generados a partir de abstracciones de los principios y funcionamiento del sistema inmunológico de los seres vivos.

Los principales motivos que impulsan la realización de esta tesis son:

- i. Fomentar la línea de investigación referente a los sistemas inmunes artificiales, no solo aplicados en el contexto de los sistemas biométricos, sino en otras problemáticas presentes en diversas áreas de la ingeniería.
- ii. Aportar nuevos métodos capaces de llevar a cabo tareas de identificación de individuos, principalmente en la actualidad, que existe una creciente necesidad de hacer uso de estos sistemas, generalmente en aplicaciones

relacionadas con la seguridad, y precisamente cuando cada vez más organizaciones tienen acceso a este tipo de desarrollos.

- iii. Conocer las diferentes técnicas usadas en el procesamiento de imágenes de huellas dactilares incorporadas en sistemas biométricos y encontrar si los sistemas inmunes artificiales pueden mejorar de alguna manera los métodos previamente desarrollados.
- iv. Implementar un algoritmo biométrico, basado en la comparación de puntos característicos de las huellas dactilares, aplicando conceptos que no se tienen como primera opción, para este tipo de procesos computacionales.
- v. Mostrar que el área de los sistemas inmunes artificiales se constituye en una alternativa de modelos bioinspirados, para resolver problemas en los cuales se usan generalmente métodos como redes neuronales, algoritmos genéticos, entre otros.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. HUELLAS DACTILARES

La huella dactilar es considerada como la característica biométrica de uso más antiguo y extendido. El estudio científico de esta característica data de finales del siglo XVI³.

Son una característica exclusiva de los primates. En los seres humanos se forman en la sexta semana de gestación y en situaciones de vida normal sus características son invariantes con el tiempo y únicas para cada individuo, aún cuando se trate de gemelos.

Las huellas dactilares son patrones constituidos por las crestas papilares de los dedos de las manos, se localizan en la dermis y se reproducen en la epidermis, generando configuraciones diversas.

Las impresiones dactilares son las reproducciones resultantes de las huellas sobre una superficie plana, quedando almacenada en formato analógico (papel) o digital (archivo), estas están constituidas por una serie de líneas oscuras que representan las crestas y una serie de espacios blancos que representan los valles.

³ *Handbook of Fingerprint Recognition - Maltoni, Maio, Jain -2003*



Figura No 1. Diversos Tipos de Impresiones Dactilares.
Fuente: Bases de Datos FVC2004

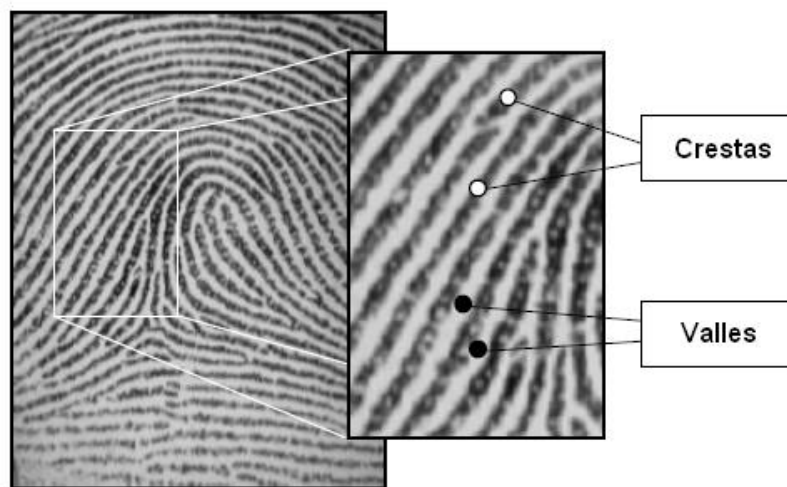


Figura No 2. Crestas Y valles en una huella Dactilar.
Fuente: *Handbook of Fingerprint Recognition*

2.1.1. Características de las Huellas Dactilares

2.1.1.1. Características Globales⁴

Son los tipos de patrones geométricos de las crestas que son reconocibles a simple vista, basados en estos patrones las huellas dactilares se dividen en tres grupos principales: lazo (*Loop*), Arco (*Arch*), Arco Tendido (*Tented Arch*) y Torbellino (*Whorl*).



(a)



(b)



(c)



(d)

⁴ The Galton-Henry system of fingerprint classification - 1900



(e)

Figura No 3: Patrones geométricos de crestas - (a) Lazo izquierdo. (b) Lazo derecho. (c) Torbellino (*Whorl*). (d) Arco (*Arch*). (e) Arco Tendido (*Tented Arch*)
Fuente: *Handbook of Fingerprint Recognition*

2.1.1.2. Características Locales (Minucias)

Las crestas en una huella dactilar no son continuas ni rectas, sino más bien cambian de dirección, cortándose y bifurcándose. Los puntos en donde los cambios ocurren son denominados minucias. En una imagen de alta calidad es común encontrar entre setenta y cien minucias, las cuales proveen la suficiente información para determinar la individualidad de una huella dactilar. Los tipos de minucias son:

- **Laguna** (*Enclosure*): Es una cresta que se divide en dos ramas y se unifica otra vez luego de recorrer una distancia corta creando un área cerrada.
- **Isla** (*Dot*). Es una cresta muy pequeña, a tal grado que es semejante a un punto.
- **Cresta Independiente** (*Short ridge*): Es una cresta muy corta pero lo suficientemente grande para no ser una isla.
- **Aguijón** (*Spur*): Es una cresta que se divide en dos ramas y una de éstas recorre una distancia muy corta finalizando.

- **Finalización** (*Ending*): Es el punto en donde una cresta termina abruptamente.
- **Bifurcación** (*Bifurcation*): Es el punto en donde una cresta se divide en dos ramas.
- **Trifurcación** (*Crossover*): Es producida por la unión de dos minucias de bifurcación.

Las minucias son clasificadas en dos categorías: tipos básicos y compuestos. Los tipos compuestos están constituidos a partir de los tipos básicos. Las minucias de finalización y bifurcación son consideradas como los tipos básicos y el resto de las minucias son consideradas como los tipos compuestos. Por ejemplo, una laguna es la unión de dos bifurcaciones de direcciones opuestas; una cresta corta es la unión de dos minucias de finalización con una separación muy pequeña. Los principales atributos de una minucia son:

- **Orientación**: Cada minucia posee una orientación particular, siendo ésta concordante con la dirección de la cresta a la que pertenece.
- **Posición**: Es la ubicación geométrica de la minucia con respecto al eje de referencia de la imagen o con respecto a algún punto de referencia.

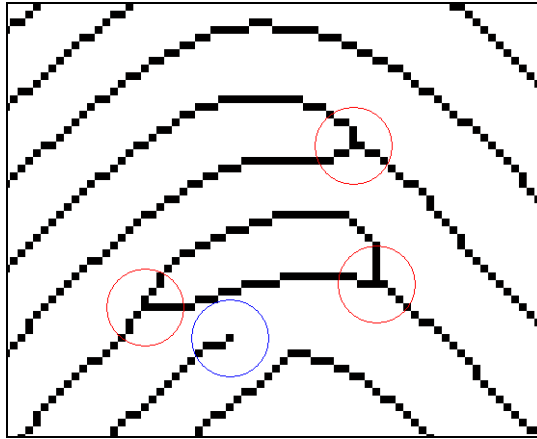


Figura No 4: Minucias en una huella dactilar
 Fuente: Minucias extraídas con el modulo de procesamiento desarrollado en el presente trabajo

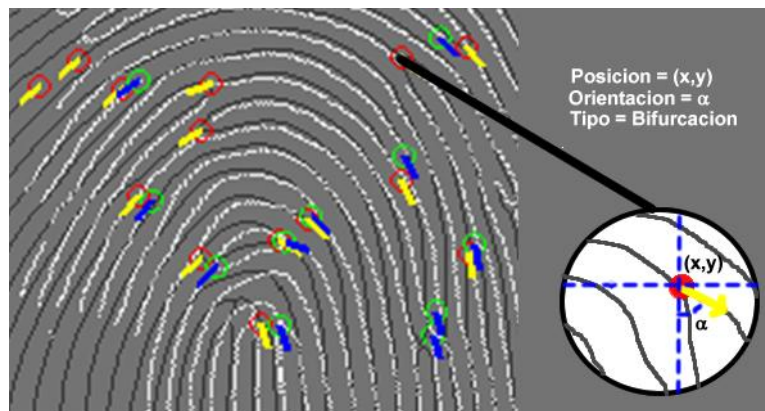


Figura No 5: Atributos de las Minucias
 Fuente: Modulo de Alineación de Huellas desarrollado en el presente trabajo

2.2. EL SISTEMA INMUNOLÓGICO

2.2.1. El Sistema Inmunológico Natural

El sistema inmunológico natural es el conjunto de mecanismos que protegen a un organismo de infecciones por medio de la identificación y eliminación de agentes patógenos.

Al sistema inmune lo componen un complejo número de células, estructuras moleculares y órganos, que constituyen un mecanismo de defensa capaz de detectar, atacar y eliminar estructuras y microorganismos infecciosos externos conocidos como antígenos.

Los vertebrados han desarrollados órganos específicos como la médula ósea y el timo que se encargan de la generación y posterior maduración de las células inmunológicas.

Las células representativas de la respuesta del sistema inmune, llamadas linfocitos, se encuentran en un constante monitoreo del estado del organismo, permitiendo detectar cuándo un agente perjudicial se encuentra presente. La habilidad de reconocimiento del sistema inmune, se puede considerar ilimitado para un extremadamente amplio repertorio de agentes infecciosos, que son detectados como estructuras *no propias* del organismo y distinguiéndolas de aquellas otras estructuras no infecciosas que hacen parte del conjunto de moléculas *propias* o nativas del cuerpo.

Existen dos tipos de inmunidad, la inmunidad innata y la inmunidad adaptativa.

- El sistema inmune “innato”: se denomina así debido a que todo individuo nace con la habilidad de reconocer una gran cantidad de agentes patógenos y destruirlos inmediatamente después que ingresan al organismo. La información y funcionamiento de éste tipo de inmunidad viene codificada genéticamente para cada especie.
- El sistema inmune “adaptativo”: es un mecanismo de defensa que se va desarrollando a lo largo de la vida del individuo; es aquel capaz de generar, a partir de procesos fisicoquímicos aleatorios, células específicas capaces de neutralizar la presencia de antígenos particulares. Gracias a este tipo de inmunidad se explica que un organismo durante el padecimiento de una

enfermedad ocasionada por algún tipo de agente infeccioso, desarrolla defensas especializadas para combatir a los agentes patógenos, generando una especie de memoria inmunológica que perdura muchos después de haberse curado y que lo protege generando una respuesta mucho más efectiva en caso de enfrentarse nuevamente a el mismo tipo de antígeno o alguno que posea similar estructura.

2.2.2. Modelos Teóricos del Sistema Inmunológico

2.2.2.1. Selección Negativa

Para que el sistema inmunológico funcione de manera apropiada, es necesario que éste posea la capacidad de diferenciar entre las moléculas que comúnmente se encuentran normalmente en el organismo (*self*), y las moléculas pertenecientes a antígenos externos (*non self*), que en últimas son las que constituyen una verdadera amenaza para el organismo.

Para que lo anterior se lleve a cabo de manera perfecta, existe un proceso importante al cual son sometidos los linfocitos T, en su etapa de maduración dentro del Timo. Antes de ser liberados para que realicen su trabajo, los linfocitos son expuestos a manera de prueba a un repertorio de antígenos que el organismo tiene almacenados; a partir de las interacciones que se generan en esta prueba, se busca controlar la generación de células que se activen ante antígenos propios del individuo y que no representan peligro. Si dichos linfocitos son liberados, podrían generar una respuesta de autoinmunidad ocasionando que estructuras del cuerpo sean reconocidas como agentes perjudiciales.

Se puede resumir todo lo expresado anteriormente como:

*La **selección negativa**, se entiende como el proceso mediante el cual el sistema inmune garantiza el no reconocimiento de células propias por parte de las células*

T; el fruto de este proceso es la generación de un conjunto de células inmunes capaces de detectar moléculas extrañas presentes en el organismo, y la muerte de las células que reconocieron moléculas propias⁵.

2.2.2.2. Selección Clonal

El principio de selección clonal es el proceso mediante el cual se describe las características básicas de una respuesta inmunológica ante un estímulo antigénico. Establece la premisa de que solo aquellas células capaces de reconocer la estructura molecular del antígeno, serán seleccionadas por encima de aquellas que no reaccionen ante la presencia del agente externo.

El proceso de selección clonal, se aplica sobre los dos distintos tipos de linfocitos, conocidos como células T y células B.

Cuando un organismo es expuesto a un antígeno extraño, la población de linfocitos responde produciendo anticuerpos para defender al individuo. Cada linfocito secreta un y solo un tipo de anticuerpos, haciendo que cada célula sea específica para contrarrestar a un tipo determinado de antígeno.

Aquellas células cuyos anticuerpos reconozcan y limiten la acción del antígeno, son estimuladas para su reproducción (clonación) y posterior evolución (diferenciación) a células mas especializadas, como las células plasma encargadas de secretar anticuerpos en altas concentraciones, o las células de memoria cuya función es resguardar la información de la estructura molecular del anticuerpo desarrollado, en caso que se presente una nueva amenaza del mismo antígeno.

Cuando el organismo es expuesto ante un antígeno cuya estructura es igual o muy similar a otro previamente neutralizado, el sistema inmune recurre nuevamente a

⁵ Laboratorio Virtual de Sistemas Inmunológicos Artificiales - UNAL

la selección clonal para desarrollar anticuerpos específicos para la nueva amenaza.

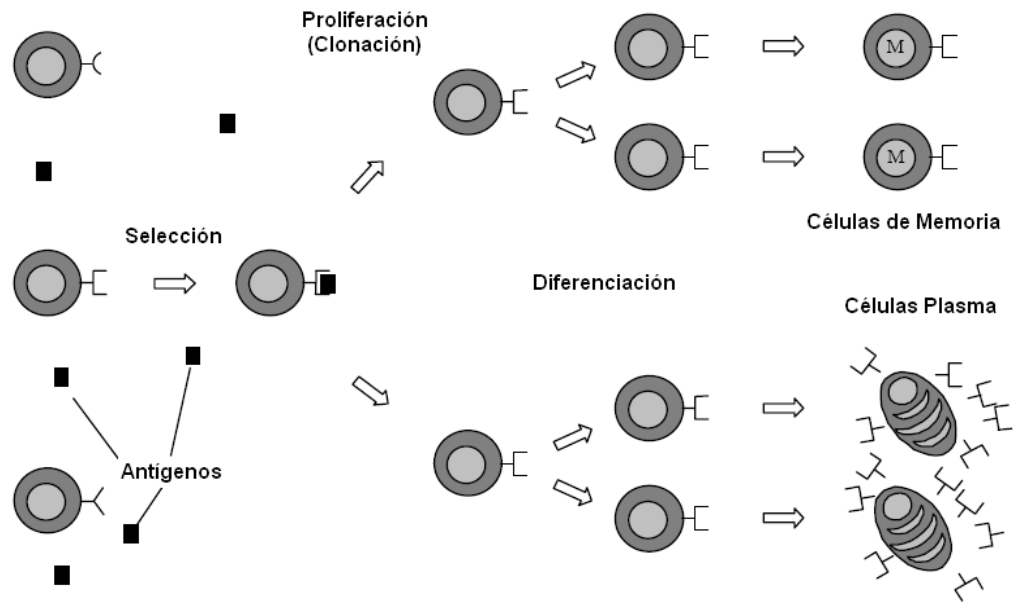


Figura No 6: Selección Clonal
 Fuente: Artificial Immune Systems Part I – Basic Theory and Applications – Nunes de Castro; Von Zuben

Debido a que existe un “registro” de la estructura de un antígeno similar, almacenado en un ataque previo, se espera que aun haya anticuerpos que tengan afinidad con el antígeno, pero no en el grado que se necesita para eliminarlo. Las células que produzcan este tipo de anticuerpos que reaccionen en cierto grado con el antígeno, son sometidas a mecanismos de hipermutación.

La mutación, es inversamente proporcional al grado de afinidad de los anticuerpos, siempre buscando que la población de células sea capaz de eliminar al antígeno; aquellas células que presenten mayor afinidad presentarán una reorganización mínima en su estructura, hasta que sus anticuerpos reconozcan de manera óptima el antígeno, y ante éste se activen e inicien la respuesta inmunológica.

Paralelo al proceso de selección clonal, el sistema inmune realiza constantemente procesos de selección negativa previniendo que durante la ejecución de la mutación de las células, accidentalmente se generen linfocitos que produzcan anticuerpos “prohibidos” o autoinmunes.

Los procesos fisiológicos del sistema inmune pueden ser comparados con aquellos presentes en fenómenos como la evolución, en los cuales los organismos con mejores características para adaptarse al ambiente, son los que se mantienen y evolucionan para alcanzar el mejoramiento de las especies.

2.2.2.3. Redes Inmunes

Una de las características del sistema inmunológico que ha despertado gran interés es la capacidad de reaccionar de manera más rápida y con mayor efectividad en contra de antígenos con los cuales ya se ha enfrentado antes. Eso ha conllevado a definir el concepto de memoria inmunológica, y muchas teorías se han planteado en torno a este concepto.

Algunas teorías proponen que las células que neutralizan a un antígeno en un primer ataque sobreviven el suficiente tiempo como para atacar al antígeno en posteriores infecciones evitando así que el sistema inmune deba generar nuevamente antígenos específicos.

Dichas teorías han sido descartadas experimentalmente, debido a que se ha demostrado que las células del sistema inmune mueren en periodo de meses si no son estimuladas.

Una de las teorías más conocidas es la llamada Red inmune Idiopática desarrolladas por Jerne [4] y Perelson [5]. Sus trabajos explican la memoria y la dinámica del sistema inmune a través de un mecanismo de realimentación, proponen que el sistema inmunológico no solo es estimulado por antígenos externos, sino también por elementos propios del sistema inmunológico. Las

células no solo se estimulan entre ellas sino que también desencadenan procesos de supresión; manteniendo así un control sobre la estimulación de las células para conservar una memoria estable.

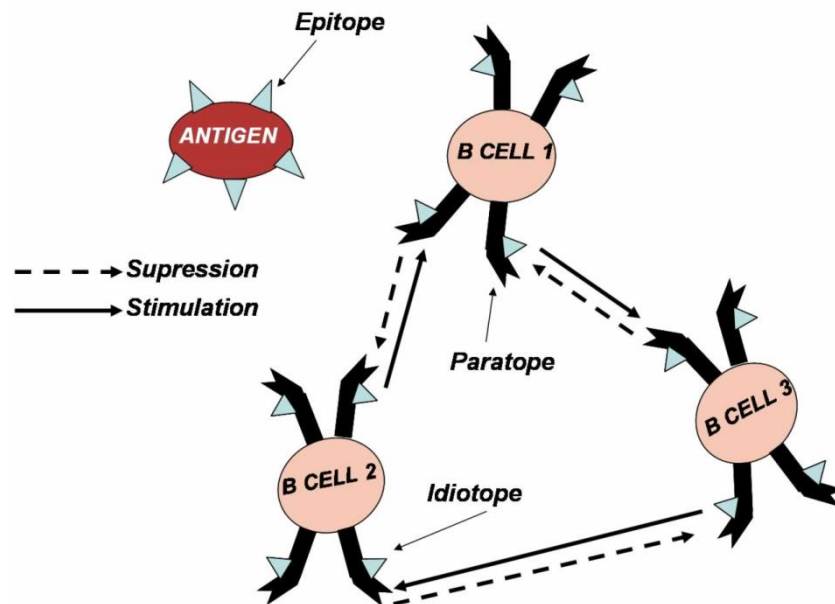


Figura No 7: Modelo de red inmune de Jerne.

Fuente: "Artificial immune systems: a novel data analysis technique inspired by the immune network theory"

En el modelo de Jerne se encuentran los siguientes elementos:

Células B: Estas realizan el papel de nodos de la red, interactuando entre sí y con los antígenos; el grado de estimulación de las células depende de dos factores clave: de una estimulación, que puede ser interna o externa, y de una supresión:

- La estimulación interna es producida por los mismos elementos de la red, esto se define como el proceso en el cual una célula B puede detectar a otra.
- La estimulación externa en una célula B es generada cuando ésta detecta un antígeno.

- La supresión en una célula B es producida cuando ésta es detectada por otra célula B.

Paratopos: son parte de las células B, y se encargan de la detección de los elementos alcanzables por la célula. Es el único medio que tiene la célula para incrementar su estimulación.

Idiotopos: estos son los elementos de la célula que son detectados por los paratopos de otras células. Cuando uno de ellos es detectado por alguna célula B, se produce una disminución de la estimulación en la célula a la cual pertenece. Esta disminución de la estimulación es también llamada supresión.

Epitopos: son elementos que están presentes en los antígenos. Cuando se dice que una célula B detecta un antígeno, realmente sucede que un paratopo de la célula detecta un epitopo del antígeno.

2.2.3. Sistemas Inmunes Artificiales

Diversos autores han planteado definiciones de lo que se entiende por un sistema inmune artificial. Algunas de ellas se presentan a continuación⁶:

“Los sistemas inmunes artificiales son metodologías para la manipulación de datos, clasificación, representación y razonamiento, los cuales siguen el paradigma biológico del sistema inmune humano”

“El sistema inmune artificial es un sistema computacional basado en los principios del sistema inmune natural”

“Los sistemas inmunes artificiales son metodologías inteligentes inspiradas en el sistema inmune, enfocadas a resolver problemas del mundo real”

⁶ Un Sistema Inmune Artificial para resolver el problema del Job Shop Scheduling- Daniel Cortez Rivera

“Los sistemas inmunes artificiales son sistemas adaptativos, inspirados en la teoría, modelos y principios inmunológicos y las funciones inmunes observadas, que se aplican a la solución de problemas”

Entre los sistemas inspirados en el sistema inmunológico se destacan los algoritmos basados en la selección negativa, selección clonal y las redes inmunes artificiales. Este último tipo de algoritmo será detallado a continuación.

2.2.4. Redes Inmunes Artificiales⁷

Las redes inmunes artificiales son modelos computacionales inspirados por la teoría de red inmunológica propuesta por Jerne. Estos modelos han sido implementadas para llevar a cabo tareas diversas como análisis de datos, clasificación, reconocimiento de patrones y optimización.

El primer trabajo en el área de las redes inmunes artificiales fue realizado por Farmer [6], este modelo utilizaba una representación binaria y era capaz de preservar una memoria de los datos (antígenos) que fueron presentados a la red.

Luego, Dos familias de redes inmunes fueron desarrolladas: aiNet, y AINE

aiNet, fue desarrollada por de Castro y Von Zuben [11],[12], este algoritmo modelaba anticuerpos individuales, y tiene en consideración interacciones supresoras, para evitar redundancia de datos. Este modelo originalmente fue presentado para resolver problemas de agrupación (*clustering*) de datos y se presentaron diversas variaciones que orientaron el algoritmo para resolver problemas de optimización de funciones [9] [13]; en ambos casos con excelentes resultados. Este modelo se detallará mas adelante.

⁷ A New Artificial Immune Network Model based on Repertoire Completeness Assumption – Alonso, Niño

AINE [15], fue desarrollada por Timmis, y hace uso de lo que en el modelo se conoce como ARB (*Artificial Recognition Ball*) o esferas artificiales de reconocimiento, que son representaciones de un conjunto de anticuerpos similares. Este modelo solo considera señales de estimulación a partir de antígenos y otros anticuerpos. Las ARB compiten por la representación de células B, entre más estimuladas se encuentran, mayor número de células representan.

Aine fue modificada más adelante; en este se limitaban los recursos del sistema el número de ARBs dentro de la red. Este modelo se conoció como RLAIS (*Resource limited AIS*) Sistema inmune Artificial de recursos Limitados, y finalmente se renombró como RAIN (*Resource-limited Artificial Immune Network*)

Existen numerosas modificaciones a los modelos de redes presentados, en los cuales principalmente se modifican las medidas de afinidad entre células o la representación computacional de las mismas.

Los Modelos de redes inmunes artificiales han sido usados de manera exitosa en la solución de problemas relacionados con la agrupación de datos, clasificación, reconocimiento de patrones, optimización y robótica.

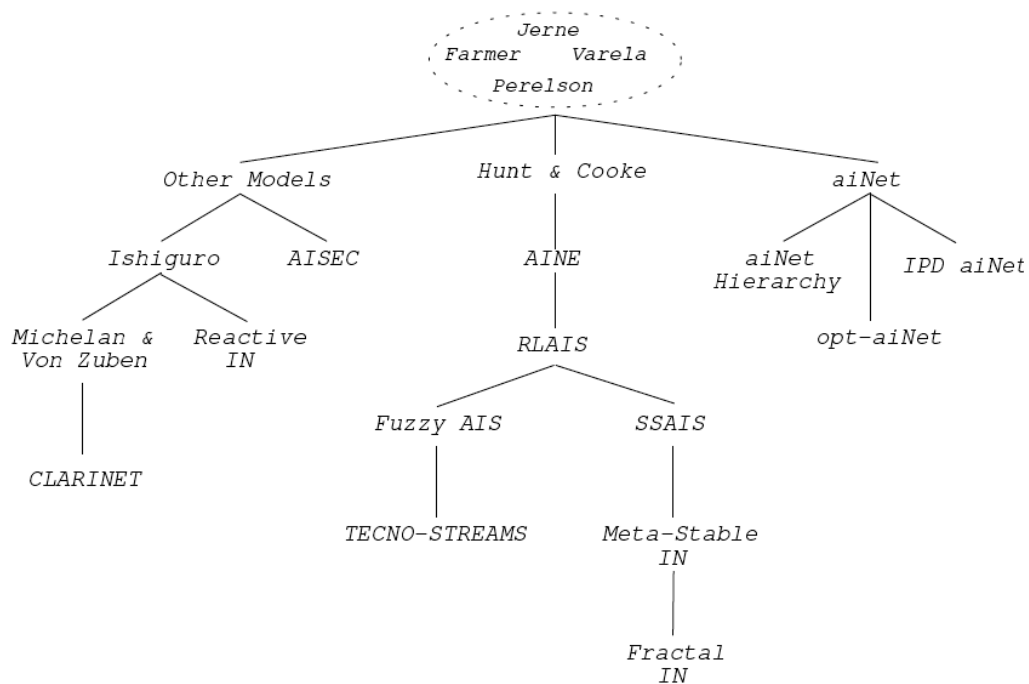


Figura No 8: Árbol genealógico de los modelos de redes inmunes artificiales
Fuente: *A Comparative Analysis of Artificial Immune Network Models*

2.2.4.1. Red Inmune Artificial aiNet (L.N. de Castro)

Este modelo originalmente fue propuesto como un algoritmo para el análisis de datos, y posteriores versiones la orientaron a resolver problemas de optimización de funciones. La versión de aiNet para optimización se conoce como opt-aiNet.

En este modelo de red inmune artificial los anticuerpos constituyen los nodos de la red. Los anticuerpos compiten por el reconocimiento de antígenos, Aquellos que sean estimulados por el antígeno se proliferarán y se suprimirán aquellos que sean menos competentes en la tarea de reconocimiento.

En el modelo original, tanto como los anticuerpos son representados por vectores de datos n-dimensionales.

Las interacciones antígeno-anticuerpo y anticuerpo-anticuerpo están cuantificadas por medidas de proximidad. Se utiliza cierta métrica de distancia para evaluar la similitud entre anticuerpos y antígenos. Es así como la afinidad entre un anticuerpo y un antígeno será inversamente proporcional a su distancia, entre más grande sea la distancia, menor será la afinidad y viceversa.

1. **Inicialización:** se genera una población inicial de anticuerpos de forma aleatoria.
2. **Presentación de antígenos:** Para cada antígeno, haga lo siguiente:
 - a. **Selección clonal y expansión:** para cada elemento de la red, determine su afinidad con el antígeno presentado. Seleccione un número de elementos con mayor afinidad y reproduzcalos proporcionalmente a su afinidad.
 - b. **Maduración de la afinidad:** Mute cada clon de forma inversamente proporcional a su afinidad. Seleccione el número de clones con mayor afinidad e introdúzcalos en un conjunto de memoria clonal.
 - c. **Metadinámica:** Elimine todos los clones de memoria cuya afinidad con los antígenos sea menor que un umbral preestablecido.
 - d. **Interacciones entre clones:** Determine las interacciones entre los anticuerpos.
 - e. **Supresión clonal:** Elimine los anticuerpos cuya afinidad con los otros anticuerpos sea menor que un Umbral preestablecido.
 - f. **Construcción de la red:** Incorpore los clones que quedan en la memoria clonal con todos los anticuerpos de la red.
3. **Interacciones de red:** Determine la similitud entre cada par de anticuerpos de la red.
4. **Supresión en la red:** Elimine todos los anticuerpos cuya afinidad es menor que un umbral preestablecido.
5. **Ciclos:** Repita los pasos del 2 al 4 hasta que un número preestablecido de iteraciones es alcanzado.

Figura No 9: Algoritmo de la red Inmune aiNet

Fuente: Laboratorio Virtual de Sistemas Inmunológicos Artificiales – Universidad Nacional de Colombia

2.2.4.2. Opt-aiNet⁸

El algoritmo de una red inmune artificial orientada a la optimización de funciones se puede definir como un procedimiento evolutivo basado en la mutación de una

⁸ *An Artificial Immune Network for Multimodal Function Optimization* - de Castro, L. N. & Timmis, J. I

población de tamaño dinámico cuyos elementos representan células del sistema inmunológico.

En esencia el algoritmo de la red tipo opt-aiNet comienza inicializando una población aleatoria de individuos; cada individuo de la población representa a una célula del sistema inmune; las células son codificadas como vectores n-dimensionales de elementos reales, según las características del problema o la función que se busque optimizar. Cada elemento de la población es evaluado frente a una función objetivo que mide la aptitud de la célula; dicha función es una analogía a un antígeno externo que ha ingresado al sistema y que debe ser neutralizado. El objetivo principal de la red inmune es desarrollar al menos una célula (valores) que posea la suficiente aptitud para eliminar a dicho anticuerpo (que maximicen la función objetivo). Luego de ser evaluadas, cada célula genera un número de clones o copias exactas de si misma, los cuales posteriormente son sometidos a un proceso de hipermutación inversamente proporcional a la aptitud de la célula madre, esto con el objetivo de mejorar la población, explorando el espacio de soluciones. Paralelo a esta dinámica se ejecutan procesos de nacimiento de nuevas células que se incorporan al repertorio y de igual forma muerte de células que no hayan sido lo suficientemente estimuladas (baja aptitud); de igual se modelan las interacciones entre células midiendo la afinidad entre estas, con el fin de evitar redundancia dentro de la población.

En el presente trabajo se implementó una red inmune artificial basada en la familia de redes inmunes conocida como aiNet, más específicamente en su versión orientada a la optimización de funciones.

3. DESARROLLO

3.1. ANÁLISIS DE LA IMPRESIÓN DACTILAR

3.1.1. Adquisición

En este proyecto no se hizo ningún trabajo referente a la captura de muestras de las huellas; esto debido a que a lo largo del desarrollo del proyecto se usó una base de datos internacional proveniente de la competencia de verificación de huellas versión 2004⁹ (FVC 2004); se trabajará con el conjunto DB1 capturadas con el sensor óptico "V300" de la empresa CrossMatch, el repertorio de este conjunto nos entregó imágenes con gran diversidad y de diferentes características en lo que a calidad de la muestra se refiere.

3.1.2. Representación

A lo largo de este trabajo una imagen digital será representada matemáticamente por una función bidimensional discreta o matriz de puntos I de tamaño N Filas x N columnas, cuyo valor en el punto (u,v) denominado píxel representa la intensidad de luz.

⁹ FVC2004: the Third International Fingerprint Verification Competition - <http://bias.csr.unibo.it/fvc2004/>



Figura No 10: Impresión Dactilar Original
Fuente: Base de datos DB1 FVC 2004

3.1.3. Normalización

Se inicia con este proceso de ecualización del histograma para tener una cierta independencia de las propiedades de la imagen, como lo son el brillo y el contraste, de esta manera facilitar la visibilidad de zonas que presenten un mayor contraste es decir de aquellos sectores que presentan alta densidad de píxeles. Para el proceso de normalización además de necesitarse el conjunto de píxeles que conforman la imagen de la huella, se requiere también los valores extremos del histograma de grises que se desea ecualizar.



Figura No 11: Impresión dactilar Normalizada

Fuente: Imagen obtenida utilizando el módulo de procesamiento desarrollado

3.1.4. Campo de orientación

Corresponde al conjunto de ángulos entre las crestas y el eje horizontal de la imagen. Las orientaciones locales son en principio perpendiculares a los vectores gradiente, por lo que se generan a partir de los mismos.

La información detallada por este campo de orientación se agrupa en una matriz donde cada punto representa la orientación promedio de cada punto de las crestas de la imagen original, esta información se usara posteriormente en otros procesos del desarrollo.



Figura No 12: Campo de orientación de Una Huella Dactilar
Fuente: Imagen obtenida utilizando el módulo de procesamiento desarrollado

3.1.5. Filtrado

Para filtrar la imagen se utilizan filtros orientados en la misma dirección del campo de orientación. La imagen es filtrada por cloques y antes de ser aplicado se orienta en la misma dirección predominante en dicho bloque.

3.1.6. Segmentación

El proceso de segmentación consiste en la aplicación de un umbral sobre la imagen pre procesada, para poder identificar que se encuentra en primer plano es decir lo que verdaderamente nos interesa y que se encuentra en segundo plano que correspondería al fondo que no es de utilidad.

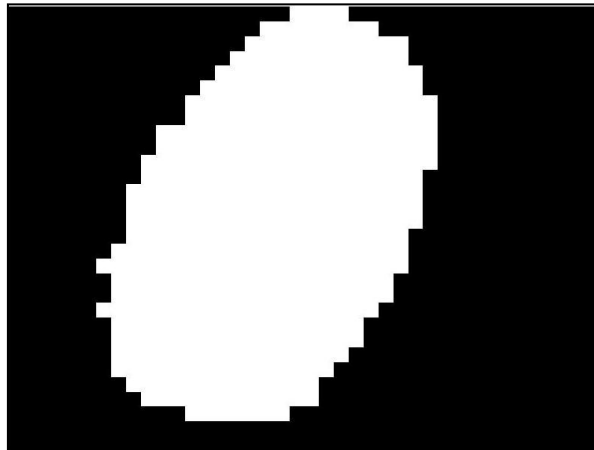


Figura No 13: Imagen segmentada
Fuente: Imagen obtenida utilizando el módulo de procesamiento desarrollado

3.1.7. Binarización

La técnica estándar de binarización realiza la comparación numérica de los píxeles con un valor umbral. Si el píxel de interés tiene un valor menor al umbral, entonces el píxel correspondiente en la imagen binaria toma el valor cero, en caso contrario toma el valor uno.



Figura No 14: Imagen luego de ser filtrada y binarizada
Fuente: Imagen obtenida utilizando el módulo de procesamiento desarrollado

3.1.8. Esqueletización

La esqueletización busca representar una región u objeto por su grafo o esqueleto. El esqueleto de una región es un conjunto de puntos conectados, ubicados a la mitad de los bordes, teniendo éstos las siguientes propiedades: (a) presentan la misma conectividad que la región original; (b) el ancho del esqueleto es un píxel; (c) preserva los puntos aislados y de finalización de la región original.

Consiste en adelgazar las crestas al grosor de un pixel para ser más cómodo el proceso de ubicación de las singularidades. La esqueletización es el producto de aplicar diversas operaciones morfológicas como dilatación, erosión, limpieza, rellenado y adelgazamiento sobre la imagen binarizada.



Figura No 15: Impresión Dactilar luego de aplicar el proceso de esqueletización
Fuente: Imagen obtenida utilizando el módulo de procesamiento desarrollado

3.1.9. Extracción de características

Después de culminados los pasos anteriores, es posible extraer los puntos característicos (minucias) de la huella, este procedimiento se realiza aprovechando el adelgazamiento de las crestas y se basa en analizar la vecindad de cada punto que conforman las crestas encontrando que si existe un determinado número de pixeles vecinos, ese punto corresponderá a alguna de las dos posibles singularidades con las que se trabajo en este desarrollo sea el caso de una terminación o de una bifurcación.

A grandes rasgos lo que se realizó fue recorrer las crestas punto por punto y aplicar una máscara de 3x3 dependiendo el caso con la cual se establecía la vecindad de dicho punto. Si la cantidad de puntos vecinos era igual a uno se concluía que dicho punto correspondía a una posible minucia de terminación; si la vecindad resultante era igual a 3 ese punto clasificaba como una minucia de bifurcación.

En ciertos casos algunos puntos que presentaban 4 píxeles de vecindad eran tomados en cuenta como posibles minucias de bifurcación pues pasaban por una máscara de un mayor tamaño que permitía verificar de mejor manera que pertenecían a dicho grupo.

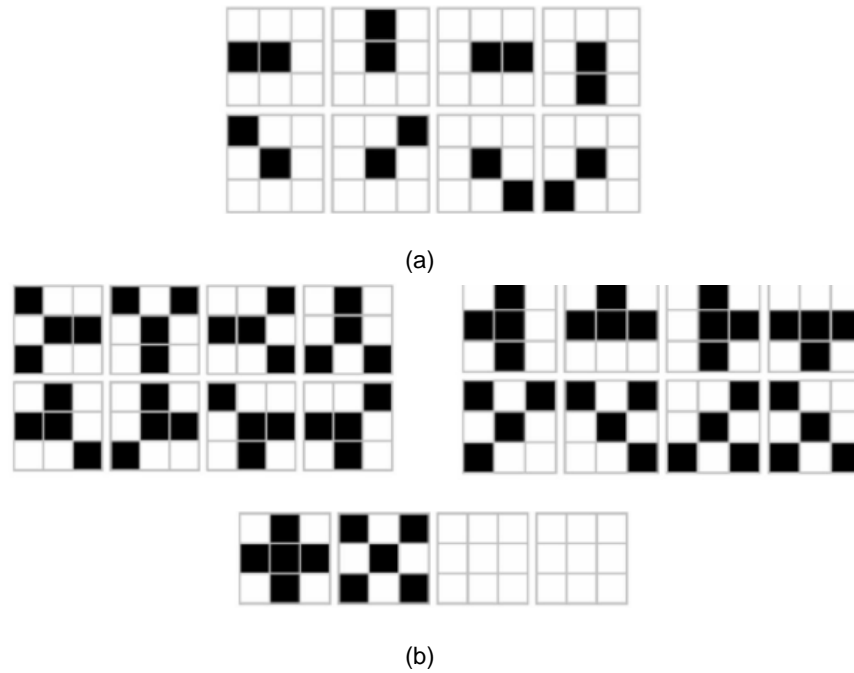


Figura No 16: Reglas para la extracción de minucias (a) Terminación (b) bifurcación

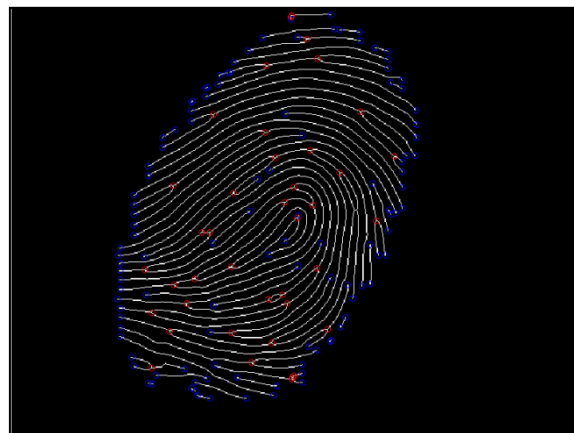


Figura No 17: Extracción de las minucias en la imagen procesada
Fuente: Imagen obtenida utilizando el módulo de procesamiento desarrollado

Después de este procedimiento es posible que existan características falsas que no correspondan a minucias reales, es por eso que se aplican 4 reglas de eliminación para dichas espurias que básicamente consisten en eliminación de singularidades muy cercanas que muy posiblemente representan cortes en las crestas o creación de falsas estructuras que aparecieron debido al tratamiento de dicha imagen.

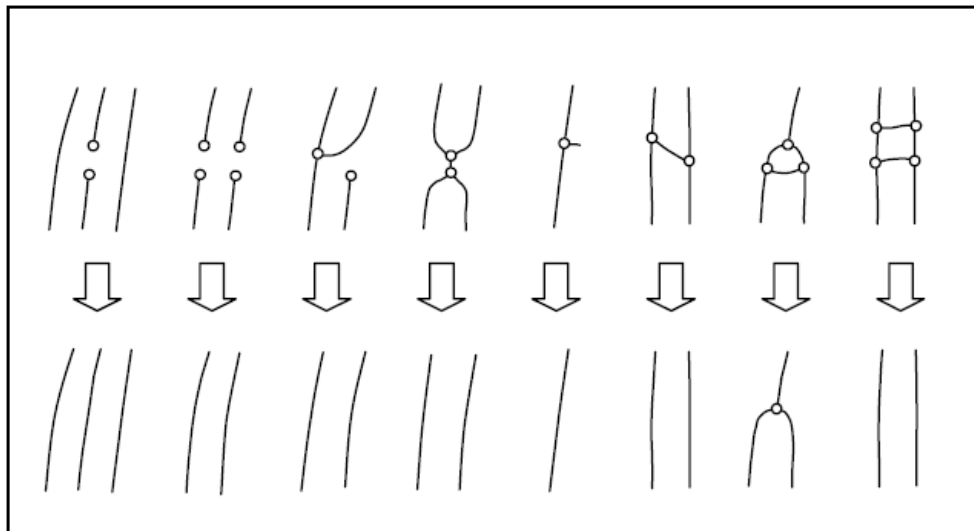


Figura No 18: Tipos más comunes de falsas minucias
Fuente: Handbook of Fingerprint recognition



Figura No 19: Verificación de las minucias extraídas.
Fuente: Imagen obtenida utilizando el módulo de procesamiento desarrollado

Al terminar se obtiene un conjunto depurado con las posiciones de todas las minucias tanto de bifurcación como de terminación correspondiente a cada una de las imágenes huellas dactilares.

3.1.10. Codificación

En esta etapa se recopila toda la información característica de cada huella que corresponde a una serie de datos que van a servir para la posterior etapa de verificación, estos datos (ubicación y orientación de cada minucia) se organizan por el tipo de minucia y se guardan en archivos para su posterior manipulación.

Esta información es lo que comúnmente se conoce como plantilla y es la base para la diferenciación de las muestras en la etapa de verificación.

3.2. VALIDACIÓN DE LA ETAPA DE ANALISIS DE LA HUELLA DACTILAR

Se llevaron a cabo para verificar la calidad y el funcionamiento de la etapa de procesamiento y extracción de características de la huella dactilar, comparando

este desarrollo con trabajos anteriores que tienen cierta consolidación y validez científica.

3.2.1. Ubicación de las Minucias Extraídas vs Ubicación Real

Estas pruebas se realizaron con el objetivo de verificar la calidad del procedimiento de extracción de minucias basado en un algoritmo incluido en este desarrollo, para así corroborar la confiabilidad de la información arrojada por el mismo que corresponde a la ubicación de las minucias en la imagen de la huella.

Es necesario tener certeza que la información que se extrae automáticamente en este proceso tenga el menor número de errores e incongruencias posibles porque dicha información fundamental pues su uso y procesamiento son la base del proceso de verificación de huellas.

Para este caso fue necesario se escogieron un grupo de 21 muestras aleatorias pertenecientes a la base de datos internacional con la que se trabajó en este desarrollo para de esta forma realizar una extracción manual de las minucias y su tipo de cada muestra seleccionada para esta prueba, este procedimiento se hizo con un programa que registraba las posiciones de los puntos seleccionados sobre la imagen.



Figura No 20: Interfaz desarrollada para extracción manual de minucias

Después de obtener un compilado de las ubicaciones de las minucias utilizando este procedimiento manual se contrastaron con los datos extraídos al final de la etapa de análisis de las muestras; con el fin de observar que variaciones existen entre ambos procedimientos y tener certeza que la información adquirida corresponde a la realidad.

En este procedimiento era necesario usar un método de correspondencia entre minucias cercanas, y recolectar información referente a qué tan distantes se encuentran entre ellas.

- ***Medición de Correspondencia***

Se realizaron dos medidas para observar que tan similares fueron los dos conjuntos, primero la medida original de correspondencia y segundo una medida para observar en qué proporción se encontraba el número de minucias que se

detectaban como correspondientes. Los resultados obtenidos se encuentran ilustrados en la siguiente figura:

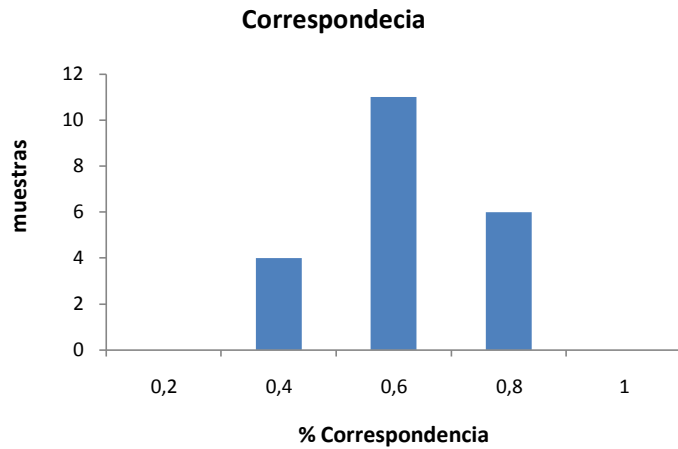


Figura No 21: Porcentaje de correspondencia entre minucias extraídas manualmente y minucias extraídas automáticamente
Fuente: Grafica obtenida a partir de los resultados de correspondencia

Se observó que la gran mayoría de las muestras presentaron una correspondencia mayor a 40% y según la prueba la media de las correspondencias se encuentra en 51 %.

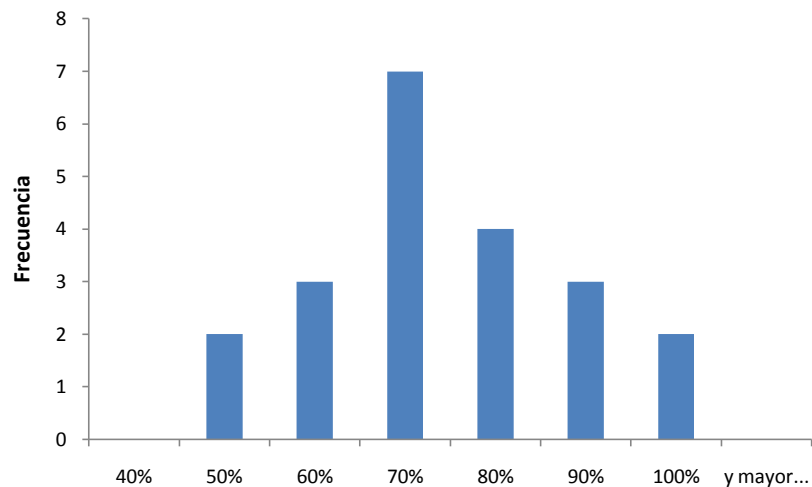


Figura No 22: Número de Minucias Extraídas Manuales Vs Número de Minucias Correspondientes

Fuente: Grafica obtenida a partir de los resultados de correspondencia

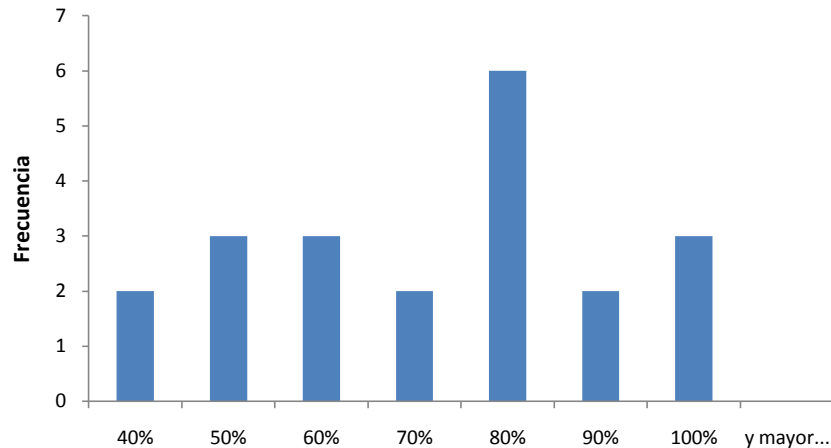


Figura No 23: Número de Minucias Extraídas Automáticamente Vs Número de Minucias Correspondientes

Fuente: Grafica obtenida a partir de los resultados de correspondencia

Para el segundo ítem de medida se observó que el porcentaje de proporción entre la cantidad de minucias correspondientes y las cantidades totales de minucias extraídas manualmente y las de extracción automática fue bastante alto y que más de la mitad de las muestras presentan porcentajes iguales o mayores al 70% las medias de estas muestras se encontraron en el 67 y 70% respectivamente.

- **Medición de distancias**

Es necesario verificar que tan distantes se encuentran las ubicaciones de las minucias de extracción manual respecto al otro conjunto de extracción automática para poder determinar de cierta forma la precisión del algoritmo. Esto se hace buscando que minucias corresponden entre si y midiendo la distancia euclidiana que las separa, a partir de esto se realizaron las siguientes mediciones.

Histograma de distancias entre minucias

<i>Pixeles</i>	<i># Minucias</i>	<i>%</i>	<i>% acumulado</i>
5	247	52.55%	52.55%
10	108	22.98%	75.53%
15	21	4.47%	80.00%
20	21	4.47%	84.47%
25	23	4.89%	89.36%
30	50	10.64%	100.00%
	470	100.00%	

Tabla No 1: Resultados Histograma de distancias entre minucias

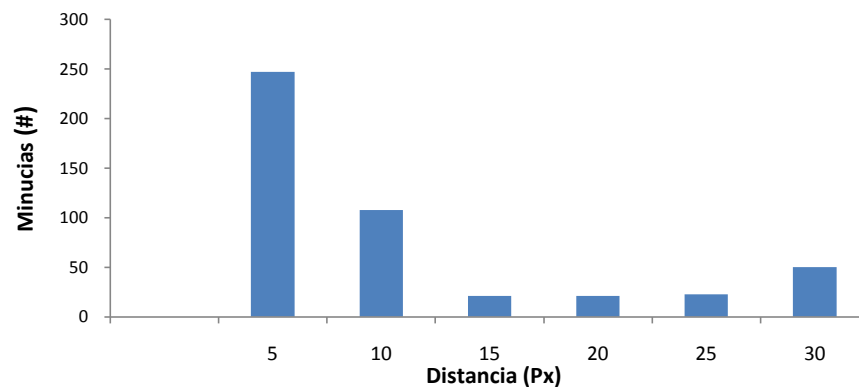


Figura No 24: Distancias entre minucias extracción manual y automática
Fuente: grafica obtenida de los resultados de comparación de distancias

Se observó que la precisión es bastante alta pues más de la mitad de las minucias presentan una distancia no mayor de 5 píxeles de separación y por lo menos el 80% de las minucias de la prueba tiene una distancia no mayor a 15 píxeles, la media de esta prueba se encuentra en tan solo 7.54 píxeles.

3.2.2. Densidad de Minucias

En esta prueba se calcula la densidad de minucias dentro del área segmentada de la huella. Se observa que los valores de densidad en 0.1953 Minucias por mm^2 con un tamaño de 30 muestras y desviación estándar en 0.0478 tiene gran proximidad a los registros de trabajos anteriores y aplicaciones ya desarrolladas. Las mediciones fueron realizadas en muestras procesadas tanto con el algoritmo desarrollado, como con el kit de desarrollo de la empresa Neurotechnology conocido como Verifinger¹⁰.

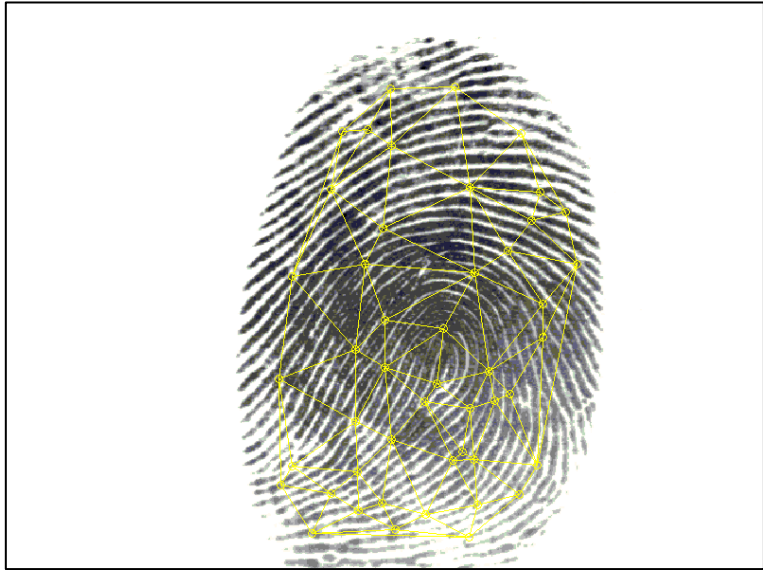
Prueba	Fuente	Tamaño de la Muestra	Densidad Media de Minucias (por mm^2)	Desviación Estándar
1	Dankmeijer et al.	1000	0.1900	0.0069
2	Stoney et al.	412	0.2230	0.0045
3	Kingston	100	0.2460	0.0084
4	Thai	30	0.2040	0.0285
5	Estudio Actual (MATLAB)	30	0.1953	0.0478
6	Estudio Actual (SDK Verifinger)	30	0.2398	0.0662

Tabla No 2: Resultados densidad de minucias
Fuente: *Fingerprint Image Enhancement and Minutiae Extraction* – Raymond Thai

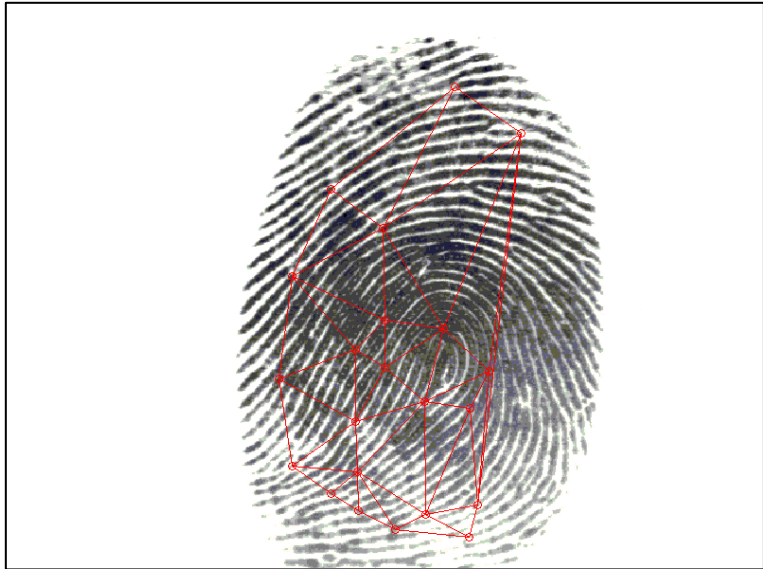
3.2.3. Distancias Entre Minucias

En esta prueba se verificaron las distancias medias entre minucias. Se utilizó la triangulación de Delaunay para generar una grilla triangular entre las minucias y así recolectar la información referente a las distancias entre minucias vecinas. La prueba se realizó triangulando todas las minucias y clasificándolas por tipo.

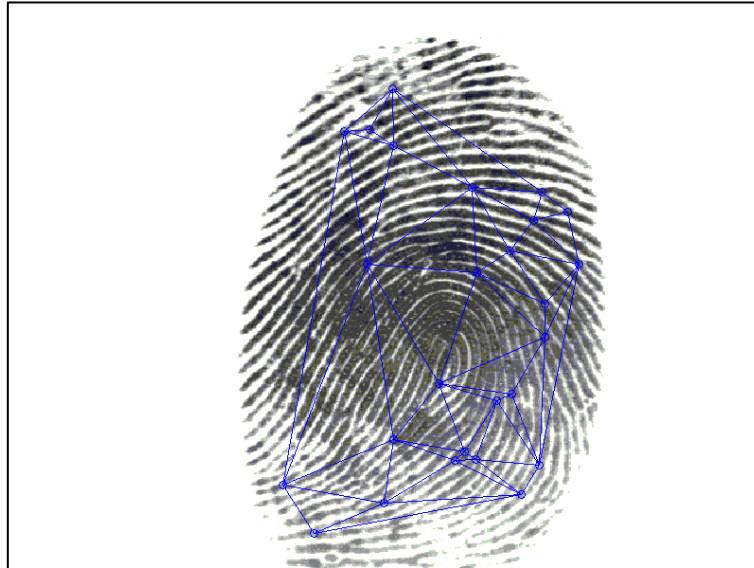
¹⁰ <http://www.neurotechnology.com/verifinger.html>



(a)



(b)



(c)

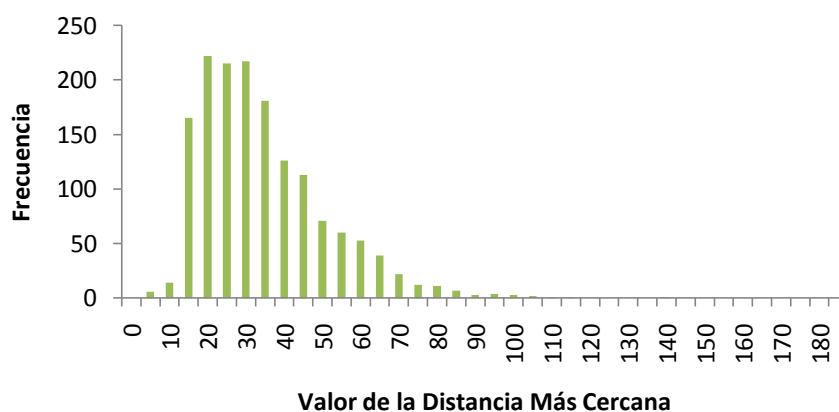
Figura No 25: triangulación de Delaunay de un conjunto de minucias.
 (a) Usando todas las minucias. (b) Usando minucias de tipo terminación
 (c) Usando minucias tipo bifurcación.

Estudio Anterior (Raymond Thai)			
Tipo de Minucias	Tamaño de la Muestra	Distancia Media (pixeles)	Desviación Estándar
Todas	1894	24.9594	12.8920
Terminaciones	879	34.0183	21.0203
Bifurcaciones	1015	32.6584	17.4864

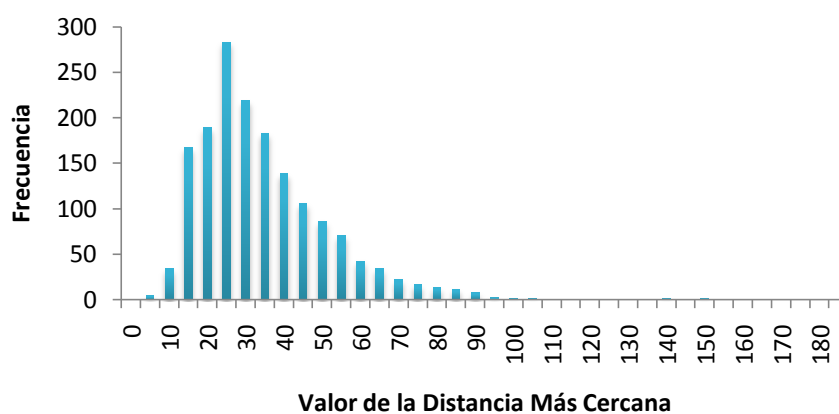
Estudio Actual (MATLAB)			
Tipo de Minucias	Tamaño de la Muestra	Distancia Media (pixeles)	Desviación Estándar
Todas	4647	32.4338	16.7859
Terminaciones	2103	40.7275	22.7933
Bifurcaciones	1905	37.7260	20.9670

Estudio Actual (SDK Verifinger)			
Tipo de Minucias	Tamaño de la Muestra	Distancia Media (pixeles)	Desviación Estándar
Todas	4890	32.2687	16.6559
Terminaciones	1809	43.9934	24.2568
Bifurcaciones	2484	38.8370	20.5511

Tabla No 3: Resultados distancia medias entre minucias
Fuente: *Fingerprint Image Enhancement and Minutiae Extraction* – Raymond Thai

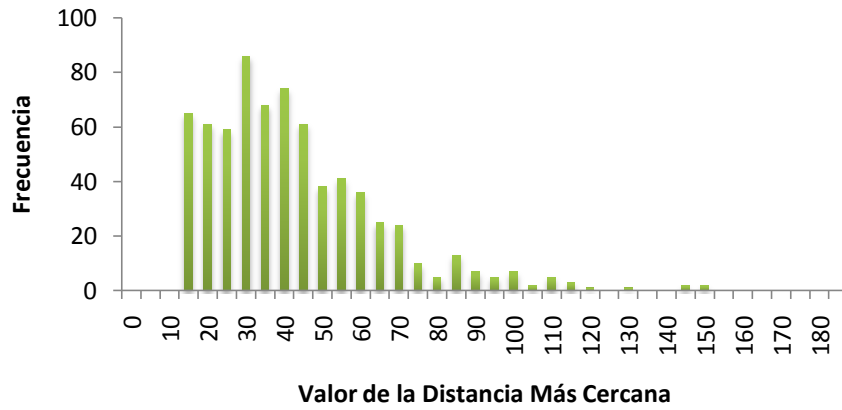


(a)

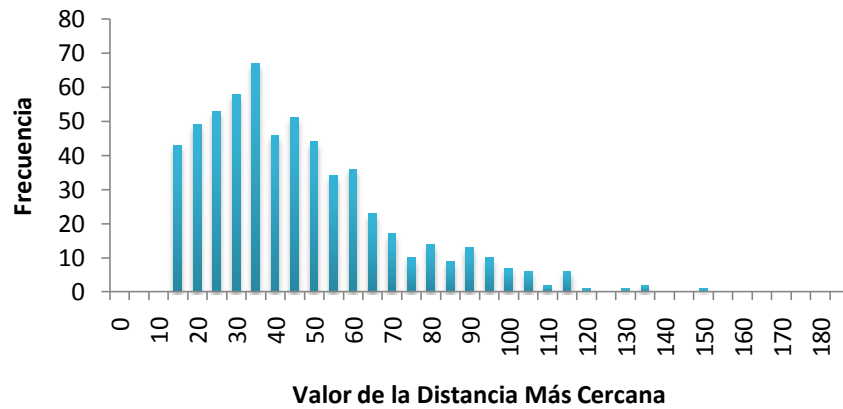


(b)

Figura No 26: Histograma de las distancias entre minucias cercanas usando todas las minucias. (a) Muestras procesadas el algoritmo desarrollado en Matlab. (b) Muestras procesadas con el kit de desarrollo Verifinger.

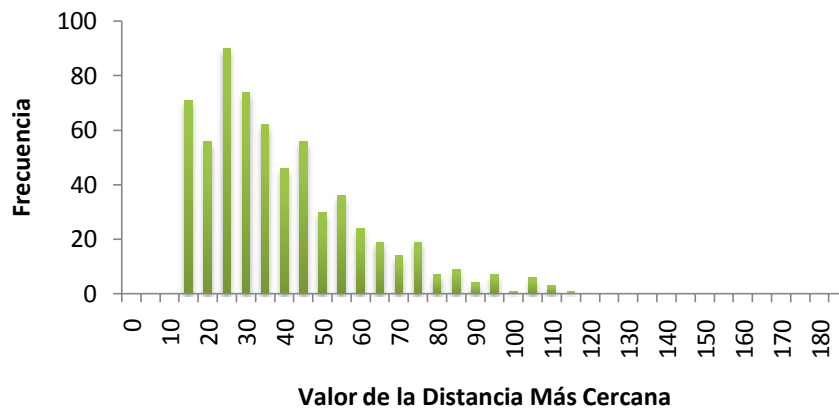


(a)

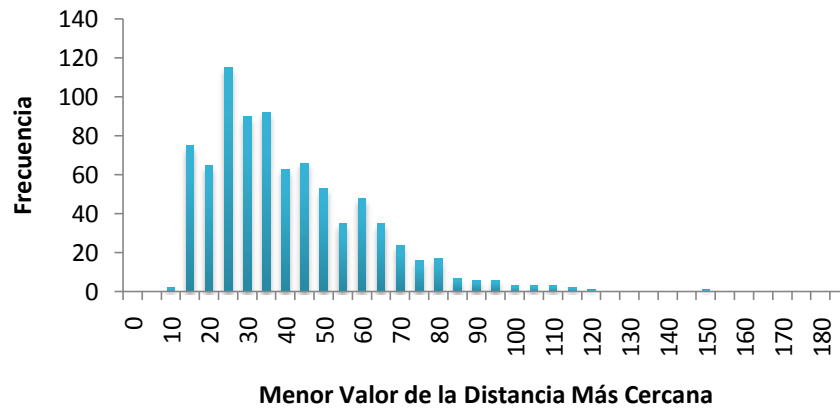


(b)

Figura No 27: Histograma de las distancias entre minucias cercanas usando las minucias tipo terminación. (a) Muestras procesadas el algoritmo desarrollado en Matlab. (b) Muestras procesadas con el kit de desarrollo Verifinger.



(a)



(b)

Figura No 28: Histograma de las distancias entre minucias cercanas usando las minucias tipo bifurcación. (a) Muestras procesadas el algoritmo desarrollado en Matlab. (b) Muestras procesadas con el kit de desarrollo Verifinger.

3.3. RECONOCIMIENTO DE PATRONES DACTILARES

El reconocimiento de patrones dactilares es un proceso complejo, se comparan las características extraídas de dos huellas dactilares y se calcula un valor que representa el grado de similitud entre ambos patrones; en otros casos la salida de el proceso de reconocimiento de patrones es una respuesta binaria tipo (coincide/no coincide).

La dificultad del proceso de comparación de huellas radica principalmente en dos motivos:

- La correspondencia entre los patrones de dos huellas dactilares nunca es conocida, aun si ambos patrones corresponden a la misma huella.
- Las condiciones en las que se obtienen las huellas dactilares son en extremo variables.

Debido a que existen diversos tipos de sensores de captura y diversas situaciones bajo las cuales se obtienen las muestras, todo algoritmo de comparación de huellas que se considere fiable, debe estar diseñado para manejar diversos inconvenientes procedentes del proceso de captura o procesamiento de la huella. Las impresiones dactilares son ligeramente diferentes cada vez que son capturadas, las principales variaciones presentes entre una muestra y otra se pueden enunciar de la siguiente forma:

- Desplazamiento: La posición del dedo al momento de la captura es variable, lo cual genera una traslación en la impresión dactilar resultante, y en manejo de imágenes digitales de huellas dactilares los desplazamientos del orden de milímetros, representan traslaciones del orden de decenas de pixeles en la imagen digital.
- Rotación: Al colocar el dedo para la captura de la muestra es altamente probable que involuntariamente se rote el dedo con respecto a la superficie de captura, obteniendo impresiones que presentan diversas rotaciones con respecto a la orientación vertical.
- Escalado: La presión del dedo contra la superficie de captura es variable, lo que traduce en un escalado espacial del patrón de la huella.

- Distorsiones no lineales: Este tipo de inconvenientes se genera debido a que al adquirir una impresión dactilar se está transformando una superficie tridimensional como la del dedo, en una imagen bidimensional, esta adquisición produce distorsión no lineal, debido a que la piel posee cierto grado de plasticidad.
- Ruido: este tipo de distorsiones son introducidas, por las condiciones del sistema de captura; por ejemplo residuos o suciedad ya sea en el dedo o en la superficie de captura.
- Aparición o pérdida de patrones o puntos característicos: Un sistema debe estar en capacidad de tolerar la aparición de puntos de referencia falsos o pérdida de patrones en la huella; esto se maneja principalmente en la etapa de procesamiento de imágenes y existen técnicas ya propuestas en la literatura que pueden hacer frente a este tipo de inconveniente.

Los algoritmos de reconocimiento de patrones dactilares pueden tener en cuenta todas o algunas de las circunstancias mencionadas anteriormente; por lo general los estos tienen en consideración transformaciones de traslación, rotación y escalado; así como tolerancia a ruido y a la aparición o pérdida de patrones o puntos característicos

3.3.1. Técnica de Comparación de Huellas Basada en Minucias

La comparación de Huellas basado en patrones de minucias es una de las técnicas más comunes en los sistemas biométricos; esto debido a que es análogo al trabajo que realizan los expertos al comparar manualmente dos impresiones dactilares. Esta técnica esencialmente consiste en la determinación del alineamiento entre el conjunto de minucias de la impresión primaria y la impresión secundaria, del cual resulta el número máximo de minucias coincidentes.

En el campo de procesamiento y análisis de imágenes este tipo de problemas se conoce como Registro de imágenes.

3.3.2. Registro de Imágenes (*Image Registration*)

El problema de registro en imágenes consiste en encontrar la transformación geométrica que ponga dos imágenes dadas en la mejor correspondencia posible. Para esto se utilizan puntos descriptores de la imagen como contornos, superficies, entre otros.

En el proceso de registro de imágenes se busca alinear dos imágenes que pudieron ser tomadas inclusive en distintas condiciones por medio de la superposición de las mismas. Existen diferentes algoritmos de registro de imagen, para el caso de este desarrollo se pueden clasificar de acuerdo con la transformación que utilizan para relacionar la imagen objetivo y la imagen de referencia con el espacio en el que se encuentran, que básicamente corresponde al sistema de referencia de coordenadas. La primera categoría de modelos de transformación incluye transformaciones lineales, que incluyen la traslación, rotación y escalado. Estas transformaciones lineales son de carácter global, por lo tanto, el modelo geométrico no difiere entre las imágenes. La segunda categoría de transformaciones permiten transformaciones elásticas que tiene la capacidad de tolerar deformaciones a nivel local. El fin es alinear la imagen objetivo con la imagen de referencia admitiendo una pequeña deformación a nivel local. Existen modelos más complejos que admiten deformaciones a gran escala pero para la aplicabilidad de esta problemática no presentan utilidad.

Desde la perspectiva de la comparación de huellas usando como puntos descriptores las minucias extraídas; el proceso de registro de imagen tiene una serie de componentes:

Conjunto de datos: Corresponden a la información de cada imagen contenida en los archivos de minucias donde se encuentran las coordenadas de las mismas junto con su ángulo de orientación

Modelo de transformación: Supóngase que se tienen dos muestras de la misma huella y de igual forma se tienen dos conjuntos de minucias pertenecientes al mismo dedo:

$$X = \{m_1^x, m_2^x, m_3^x, \dots, m_n^x\} \quad (3.1)$$

$$Y = \{m_1^y, m_2^y, m_3^y, \dots, m_m^y\} \quad (3.2)$$

Cada elemento representa una minucia en la huella; como se enunció previamente cada minucia está descrita por su posición y su orientación relativa dentro de la imagen:

$$m_i = \{x_i, y_i, \theta_i\} \quad (3.3)$$

Debido a distorsiones es muy probable que ambos conjuntos no coincidan, y es necesario encontrar una función que transforme o mapee los elementos de un conjunto para que sean equivalentes a los elementos del otro conjunto.

$$F(m_i^x) = m_j^y \quad (3.4)$$

Planteándolo de otra forma:

$$F(m_i^x = \{x'_i, y'_i, \theta'_i\}) = m_j^y = \{x''_i, y''_i, \theta''_i\} \quad (3.5)$$

Cada minucia se somete a transformaciones geométricas, para encontrar la correspondencia de las coordenadas entre una y otra huella. La función de transformación debe contener factores o coeficientes de rotación y traslación

$$m_j^y = s * R * m_i^x + T \quad (3.6)$$

En donde s representa el factor de escalamiento; R , es un factor que determina el ángulo de rotación entre ambas huellas; y T representa la traslación relativa en dirección vertical y horizontal de una huella con respecto a la otra.

Expresando la función en de las coordenadas de las minucias, las transformaciones lineales quedan expresadas de la forma:

$$\begin{bmatrix} x_i'' \\ y_i'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos(\theta) & \text{sen}(\theta) \\ \text{sen}(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i' \\ y_i' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

El problema se enfoca en estimar los parámetros s , θ , T_x , y T_y que alineen de mejor manera ambos patrones y maximicen la correspondencia entre los elementos.

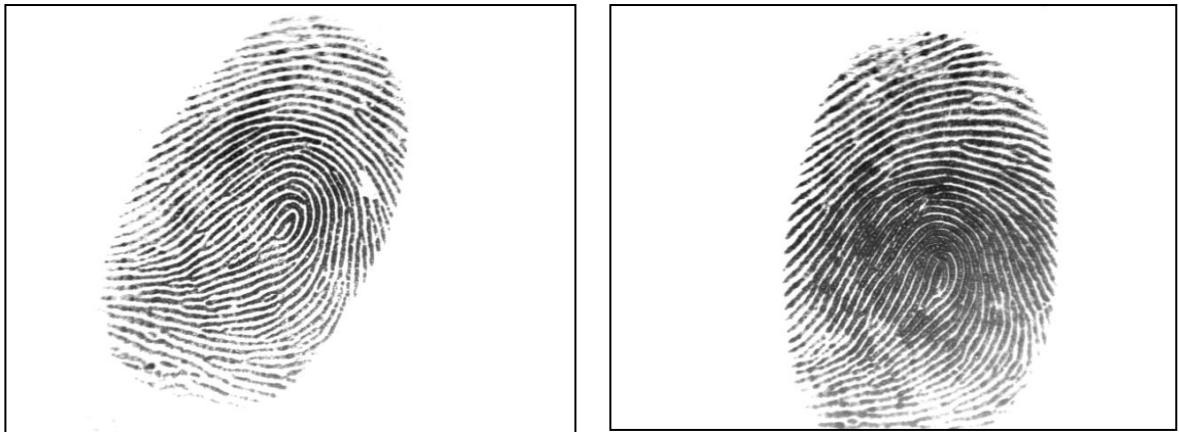


Figura No 29: Impresiones dactilares de una misma huella. Nótese las distorsiones de posición en ambas muestras
Fuente: Base de datos DB1 FVC 2004

3.3.3. La distancia de Hausdorff

Dados dos conjuntos de puntos A y B , la distancia de Hausdorff se define como:

$$H(A, B) = \max(h(A, B), h(B, A)) \quad (3.8)$$

Donde

$$h(A, B) = \max \min \|a - b\|; a \in A \text{ y } b \in B \quad (3.9)$$

$\|*\|$ representa la distancia entre a y b . La función $h(A, B)$ es conocida como la distancia directa de Hausdorff entre A y B , e identifica el punto $a_i \in A$ que está más lejos de cualquier punto de B . Es así como la distancia de Hausdorff es una medida de disimilitud entre dos conjuntos de puntos calculando la distancia del punto en A que se encuentra más lejos del conjunto B y viceversa.

La distancia de Hausdorff es muy sensible a ruido y puntos espurios, dado que la distancia tomará valores muy grandes ante la presencia de puntos externos aunque los conjuntos coincidan; es por eso que para contrarrestar el efecto de este tipo de inconvenientes, se define la distancia parcial de Hausdorff, que en vez de tomar la máxima de las mínimas distancias, estas son primero organizadas en orden ascendente y se usa un percentil para tomar el valor que ocupe la k -ésima posición:

$$h_k(A, B) = k_{ésima} \min \|a - b\|; a \in A \text{ y } b \in B \quad (3.10)$$

La distancia de Hausdorff se ha utilizado en numerosos trabajos referentes a registro de imágenes y patrones; y se han evaluado modificaciones a la fórmula general, buscando siempre una medida de mayor rendimiento que sea tolerante a los ruidos y más. En el presente trabajo se utilizó como medida de aptitud una versión modificada de la distancia parcial de Hausdorff que utiliza dos percentiles para dar mayor robustez a la medición. La distancia parcial modificada de Hausdorff (MPHD) se define como:

$$h_{kl}(A, B) = \frac{1}{N_{kl}} \sum_{m=k}^l \min \|a - b\|; a \in A \text{ y } b \in B \quad (3.11)$$

$$H(A, B) = \max(h_{kl}(A, B), h_{kl}(B, A)) \quad (3.12)$$

Donde N_{kl} es el número de puntos entre las posiciones k y l , y $h_{kl}(A, B)$ se obtiene calculando el promedio de distancias que se encuentran entre la posición k y la posición l .

3.4. ALINEACIÓN DE PATRONES DE MINUCIAS USANDO UNA RED INMUNE ARTIFICIAL ORIENTADA A LA OPTIMIZACIÓN DE FUNCIONES

En el caso de este desarrollo se implementa una red inmune artificial de la familia aiNet para aplicarla en el registro de imágenes dactilares, alineando los patrones de minucias extraídos de las mismas.

```

Función C=OptaiNet(Nc, iniCell, div,  $\sigma$ , maxgen, maxcell, maxedad)
C=generar_Cell(iniCell)
Mientras (no se alcance una condicion de parada) Haga
    Para cada celula c del repertorio C
        c.apt=evaluar_cell(c)
        C'=clonar(c, Nc, apt*)
        C'=mutar(C', apt*)
        c*=seleccionar mejor clon(C*)
        Si c* es mejor que c
            c=c*
            c.edad=0
        Sino
            c.edad=c.edad+1
        Fin
        Si la edad de la célula es mayor a maxedad
            Muerte_por_apoptosis(c)
        Fin
    Fin

Si el error promedio de todo el repertorio no se ha estancado
    Retorne al inicio del ciclo
Sino
    Supresión_celular(C,  $\sigma$ )
    C=[C;generar_Cell(iniCell*div)

```

```

Fin
Si el tamaño del repertorio es mayor a max_cell
    Suprimir_celulas_no_estimuladas(C)
Fin
Fin

```

Figura No 30: Algoritmo de Red Inmune Artificial implementado en el presente trabajo

PARAMETROS DE LA RED INMUNE ARTIFICIAL	
Parámetro	Descripción
<i>ini_Cell</i>	Número inicial de células
<i>Nc</i>	Número de clones generados por cada célula
<i>div</i>	Porcentaje de nuevas células que ingresan al repertorio
<i>max_gen</i>	Número máximo de generaciones o ciclos
<i>max_cell</i>	Número máximo de células
<i>max_edad</i>	Limite de vida de una célula antes de ser suprimida por apoptosis (muerte celular)

Tabla No 4: Parámetros de la red Inmune Artificial

3.4.1. Características de la Red Inmune

Inicialización y representación

Los parámetros que se necesitan estimar son s , θ , t_x y t_y , cada parámetro se define dentro de un intervalo; es así como para el caso de dos dimensiones cada célula está representada por un vector real de cuatro componentes. Cada componente de dicho vector es inicializada de manera aleatoria dentro de los límites en los que está definido esa componente.

Evaluación

Como se enunció anteriormente cada posible solución representa una transformación geométrica; para evaluar la aptitud de la misma, primero es aplicada al patrón de huellas y luego se calcula la distancia parcial modificada de Hausdorff para validar qué tan cercanos están los patrones de minucias.

Clonación

Esta etapa del algoritmo es básicamente para realizar copias exactas de las células madres y de esta forma operar a los clones sin afectar la población original.

Después de que se les aplique los procesos de mutación estos clones serán evaluados nuevamente respecto a la población original y aquellos que presenten una buena aptitud harán parte de la población original.

Este proceso se repetirá en iteraciones conocidas como ciclos clonales

Mutación

Esta es de las etapas más importantes de todo el algoritmo, pues después de generar los clones de la población inicial hay que modificar estos para lograr una variación en las aptitudes de dichas células padre que permitan converger a una solución más rápidamente.

La mutación en este tipo de algoritmos ha sido depurada con el fin de corregir algunos errores que presentan los algoritmos antecesores como lo son los algoritmos genéticos y para el caso específico de este desarrollo se crearon tres operadores diferentes de mutación.

La mutación se va controlando con un valor extremo tanto superior como inferior que impiden la producción de modificaciones que no sean factibles. Después de

realizada la modificación los clones pasan de nuevo por un proceso de evaluación de aptitud.

- **Hipermutación:** En esta mutación se crea una nueva variable para controlar cuántos elementos de la estructura que representa una solución serán modificados por medio de una mutación de tipo gaussiana.

Los operadores de mutación en las redes inmunes siguen la premisa que la las alteraciones de los individuos es inversamente proporcional a su aptitud para explorar en detalle el espacio de soluciones que abarca el problema.

Selección:

Los algoritmos evolutivos son de carácter competitivo donde solo prosperan los mejores de ahí que se requiera un proceso de selección que determine por aptitud quienes van a pasar a la siguiente generación.

Computacionalmente este procedimiento es algo sencillo e inicia con un ordenamiento de los elementos se habían clonado y mutado para determinar cuál es el mejor de todos. En este momento pasamos a revisar si la aptitud de este clon es superior a la de su célula madre, si es superior el clon mutado tomara el reemplazará a su progenitor en el repertorio de células.

Supresión

Este operador es una de las grandes fortalezas de este tipo de algoritmos pues mediante este procedimiento el algoritmo elimina células redundantes que presentan características demasiado similares a otras células de la población. Esto es importante pues evita en cierto modo la convergencia a mínimos locales o a soluciones no factibles y redundantes.

Se establece que la célula candidata para ser eliminada va ser aquella que presente la menor aptitud entre aquellas dos de afinidad similar.

3.5. CORRESPONDENCIA DE PATRONES ALINEADOS

Este proceso se realiza con el objetivo de darle una magnitud a la similitud entre la información característica de dos huellas que pueden ser o no del mismo individuo intentando con esto inferir dicho juicio a través de un porcentaje de aceptación conocido como porcentaje de correspondencia.

El porcentaje de correspondencia se calcula de la siguiente manera

$$\text{Correspondencia} = \text{Correspa} / (\text{Ttotalminuciain}) \quad (3.13)$$

- *Correspondencia* = Porcentaje de Correspondencia
- *Correspa* = Número de minucias aceptadas como correspondientes
- *Ttotalminuciain* = Número de minucias de imagen de entrada

Para llegar a estos valores se debe pasar por un proceso de selección de minucias correspondientes que consta de tres etapas:

i. Cálculo de distancias Euclidianas y selección de conjunto base de minucias correspondientes

Consiste en generar una matriz de distancias donde cada elemento corresponde a la distancia de la minucia i-ésima del primer conjunto o set de minucias y la minucia j-ésima del segundo conjunto o set de minucias. Con esto se determinan todas las distancias entre las minucias de un conjunto y las del segundo conjunto para poder encontrar cuales son las mínimas.

Si se determina cual es la mínima distancia de la minucia i-ésima respecto a todas las del segundo conjunto esto quiere decir que se encontró cual es la minucia que se encuentra más cerca del otro conjunto, pero si dicha minucia ya había correspondido con anterioridad a otra del primer conjunto esta no será tomada en cuenta y se procederá a buscar la siguiente más pequeña.

De esta manera se crea el conjunto base en el cual cada minucia del primer conjunto corresponde a solo una minucia del segundo conjunto.

ii. Selección por Aproximación

El conjunto base debe pasar por un filtro de selección por aproximación que evalúa si la distancia encontrada entre estas dos minucias es lo suficientemente pequeña como para poder aseverar que podría corresponde a la misma.

Es así como se filtran todas las distancias y solo son tenidas en cuenta aquellas que se encuentran por debajo de un umbral de 30 pixeles de distancia, lo que genera un conjunto más depurado.

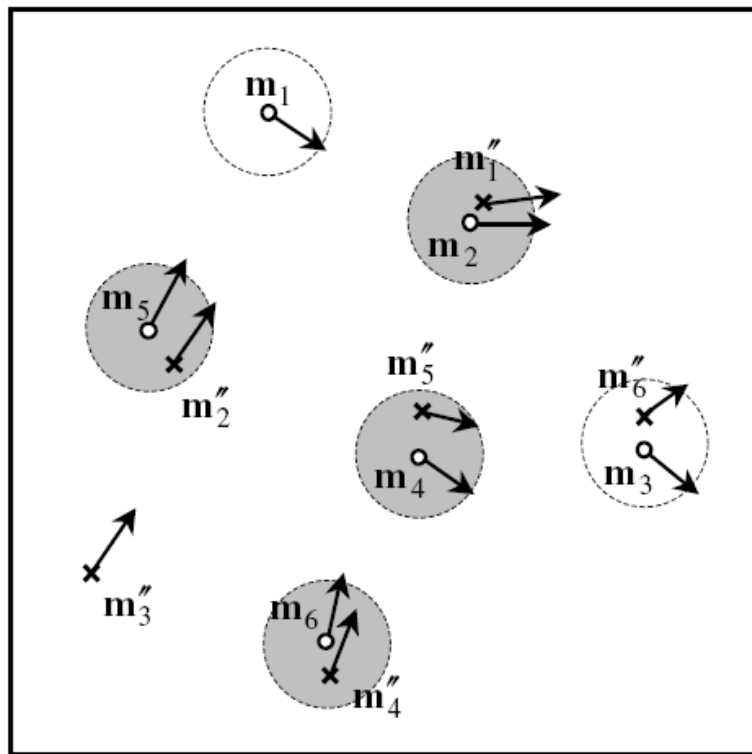


Figura No 31 :Emparejamiento de Minucias según su posición
Fuente: *Handbook of Fingerprint Recognition*

iii. Selección por ángulo de Orientación

El nuevo conjunto debe pasar por un nuevo filtro de selección que consiste en la verificación del ángulo de orientación de cada minucia.

Este filtro solo lo sobrepasan aquellas minucias que estén a una distancia menor de 20 pixeles y que sus ángulos no difieran en más de 30 grados.

Debido a que la rotación varia respecto al punto de referencia que se tome dentro del marco de referencia de la imagen digital, y que para este caso ese punto corresponde al centroide del conjunto de minucias, los ángulos no se podrían comparar directamente, es por eso que las orientaciones actualizarse usando un procedimiento de transformación para encontrar el nuevo ángulo relativo al eje horizontal luego de aplicado la transformación geométrica óptima. Esto se realiza generando puntos de referencia adyacentes a las minucias, cuya posición es invariante a la ubicación del centroide y a la rotación que se aplica a la impresión dactilar.

A partir de estos procedimientos se obtiene la base de minucias que emparejadas y con ese valor se procede a calcular el porcentaje de correspondencia.

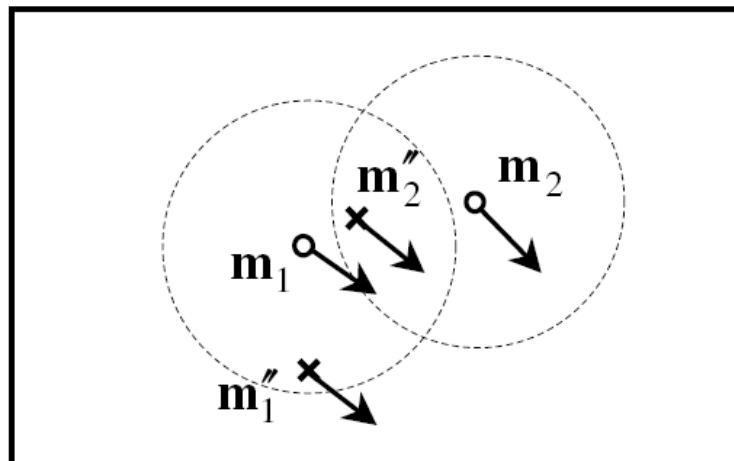


Figura No 32 :Emparejamiento de Minucias según su orientación
Fuente: *Handbook of Fingerprint Recognition*

3.6. PRUEBAS DE ALINEACIÓN Y CORRESPONDENCIA

Con estas pruebas se verificó algunos aspectos relacionados con el funcionamiento y el rendimiento del algoritmo de alineación como el de correspondencia, sumado a eso se verifica la calidad de los resultados arrojados por los mismos.

3.6.1. Pruebas de Alineación con Patrones Generados Artificialmente

Se implementó una aplicación independiente para este tipo de pruebas, que genera conjuntos aleatorios de patrones que simulan los patrones de minucias en el proceso de verificación. A uno de los conjuntos se le aplica una transformación determinada y se le adicionan los tipos más comunes de variaciones o distorsiones presentes en el emparejamiento de patrones de puntos, como los son ruido en la posición de los puntos, cambio en el tipo de punto (en el contexto de biometría dactilar cambio en el tipo de minucia), oclusiones o puntos faltantes, y puntos adicionales o espurios. Con esto se busca simular de manera aislada y controlada el proceso de alineación realizado por el algoritmo inmune artificial.

Las pruebas buscan medir en la estimación de la transformación aplicada a los patrones de puntos; determinando así la efectividad en la búsqueda de dicha transformación. La apariencia física de la aplicación es la siguiente:

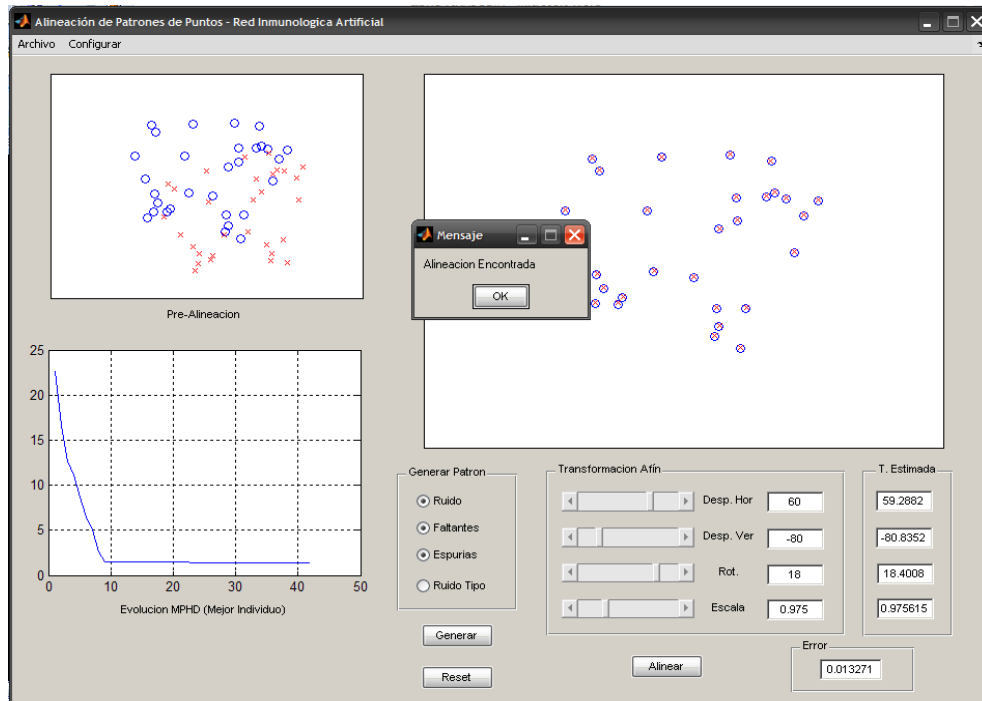


Figura No 33: Interfaz de Pruebas con patrones generados
 Fuente: Programa de alineación de patrones generados desarrollado para este trabajo

El algoritmo fue aplicado a patrones de puntos generados dentro de 5 escenarios diferentes en los cuales se contemplan ruido, puntos faltantes y puntos espurios.

A manera de prueba se generaron patrones de 30, 50, y 100 elementos; a los cuales se les aplicó una transformación geometría predefinida. Los parámetros de la transformación (t_x, t_y, θ, s) que fue aplicada a los patrones fueron establecidos en

$$[-90 \quad 50 \quad 30 \quad 1.1]$$

Los porcentajes de puntos espurios y faltantes fueron establecidos en 25%

Los escenarios en los cuales se generaron los patrones consistieron en:

- **Escenario 1: Patrón 2 = $T(\text{Patrón 1})$**

En este caso el patrón dos se obtiene aplicando una transformación geométrica al patrón 1.

- **Escenario 2: Patrón 2 = T(Patrón 1) + puntos espurios**

En este caso el patrón dos se obtiene aplicando una transformación geométrica al patrón 1, y adicional a esto se adicionan puntos que no pertenecen al patrón original.

- **Escenario 3: Patrón 2 = T(Patrón 1) - puntos faltantes**

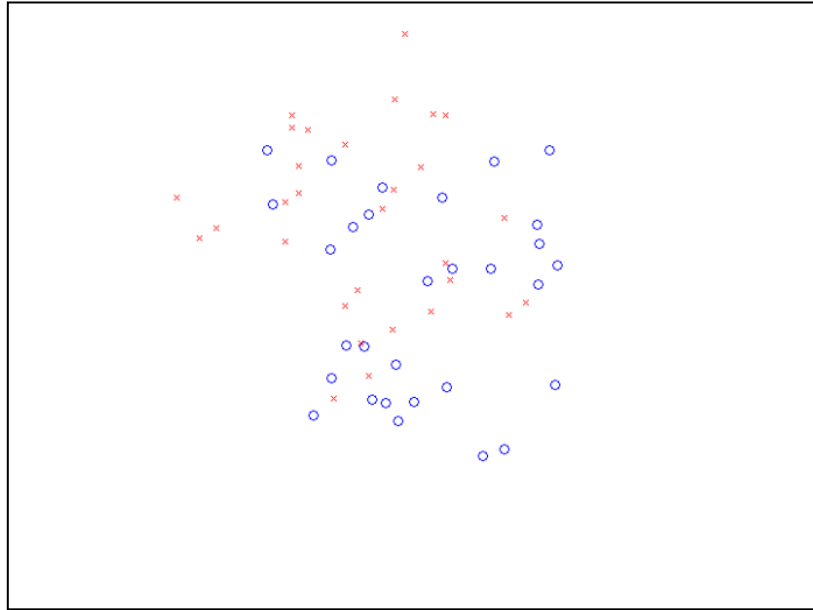
En este caso el patrón dos se obtiene aplicando una transformación geométrica al patrón 1, y adicional a esto se sustraen elementos del patrón original.

- **Escenario 4: Patrón 2=T(Patrón 1) + ruido**

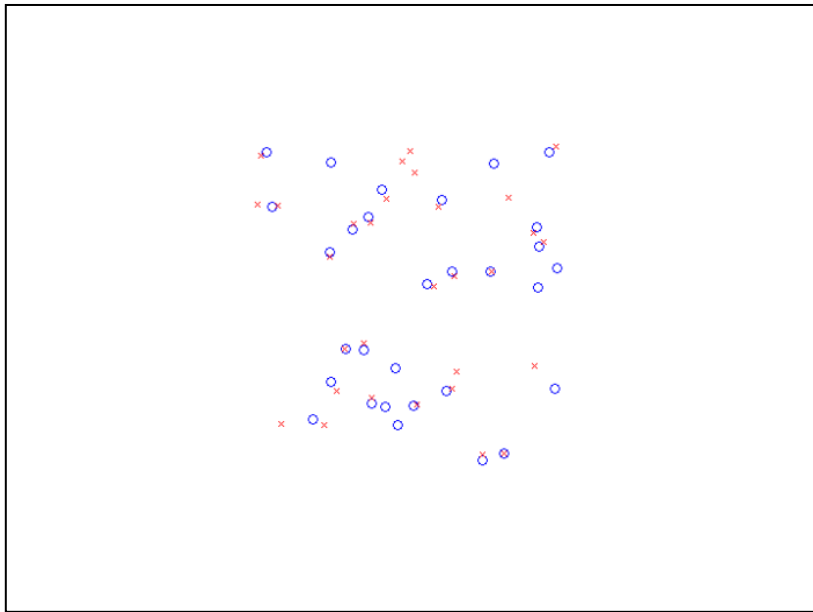
En este caso el patrón dos se obtiene aplicando una transformación geométrica al patrón 1, y adicional a esto se presentan distorsiones en las coordenadas de los puntos que conforman los patrones.

- **Escenario 5: Patrón 2=T(Patrón 1) + ruido + puntos espurios - puntos faltantes**

Este caso es una combinación de todos escenarios anteriores, incorporando distorsiones y elementos faltantes y espurios



(a)



(b)

Figura. No 34: Alineación de Patrones Generados Artificialmente (a) Patrones de puntos antes de la alineación; (b) Alineación de los patrones luego de usar la red inmune artificial.

Fuente: Programa de alineación de patrones generados desarrollado para este trabajo

Los resultados obtenidos al aplicar la red inmune artificial para alinear los patrones de puntos generados aleatoriamente se ilustran en la siguiente tabla:

# de Puntos	Escenario	Promedio		
		MPHD	Error	Tiempo (Seg.)
30	1	3,54	0,023	16,28
	2	4,21	0,023	20,53
	3	3,78	0,021	13,63
	4	11,77	0,050	16,89
	5	14,15	0,041	15,98
50	1	3,86	0,024	38,13
	2	4,48	0,025	50,35
	3	4,28	0,021	32,53
	4	11,88	0,049	36,97
	5	14,23	0,046	40,87
100	1	3,64	0,023	153,69
	2	4,04	0,021	176,72
	3	6,26	0,065	111,70
	4	11,15	0,043	138,08
	5	12,63	0,063	131,49

Tabla No 5: Resultados obtenidos de las pruebas de alineación de patrones de puntos generados aleatoriamente

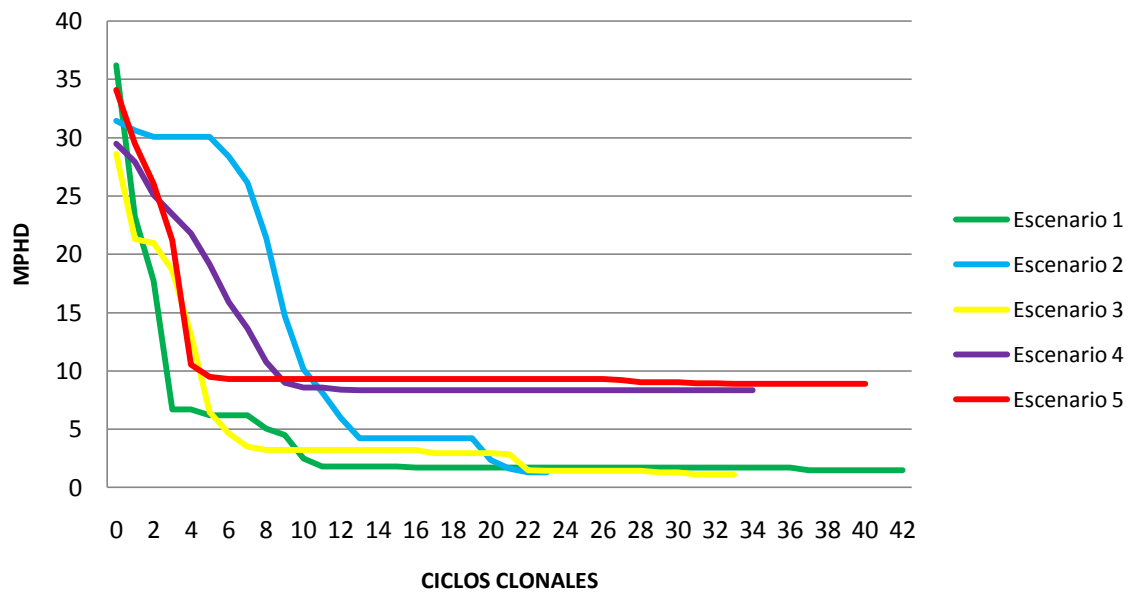


Figura No 35: Convergencia de la red inmune en los cinco escenarios de patrones aleatorios. Evolución del valor de la distancia parcial modificada de Hausdorff a lo largo de las generaciones

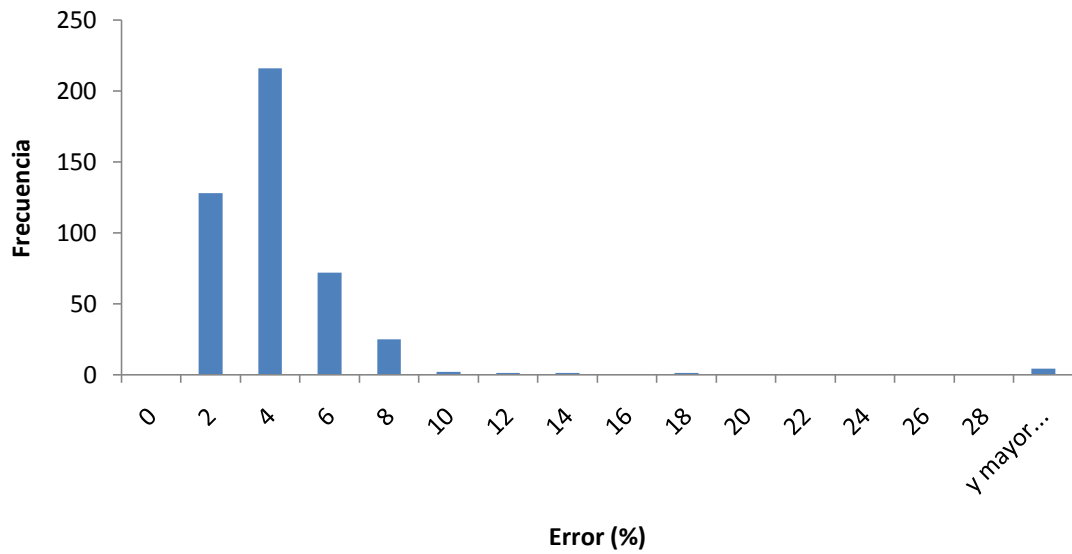


Figura No 36: Distribución del error en la estimación de la transformación aplicada a los patrones de puntos aleatorios

3.6.2. Pruebas de Verificación con Impresiones Dactilares

Estas pruebas tienen como objetivo comprobar que el funcionamiento y rendimiento de la red inmune artificial sean adecuados para un sistema de verificación biométrica. Para estas evaluaciones se hizo usaron diversas muestras de la base de datos de impresiones dactilares. Esta muestra está compuesta por un total de 80 muestras comprendidas por 8 impresiones de 10 individuos.

Las mediciones de falsa aceptación y falso rechazo se ilustran en las siguientes figuras:

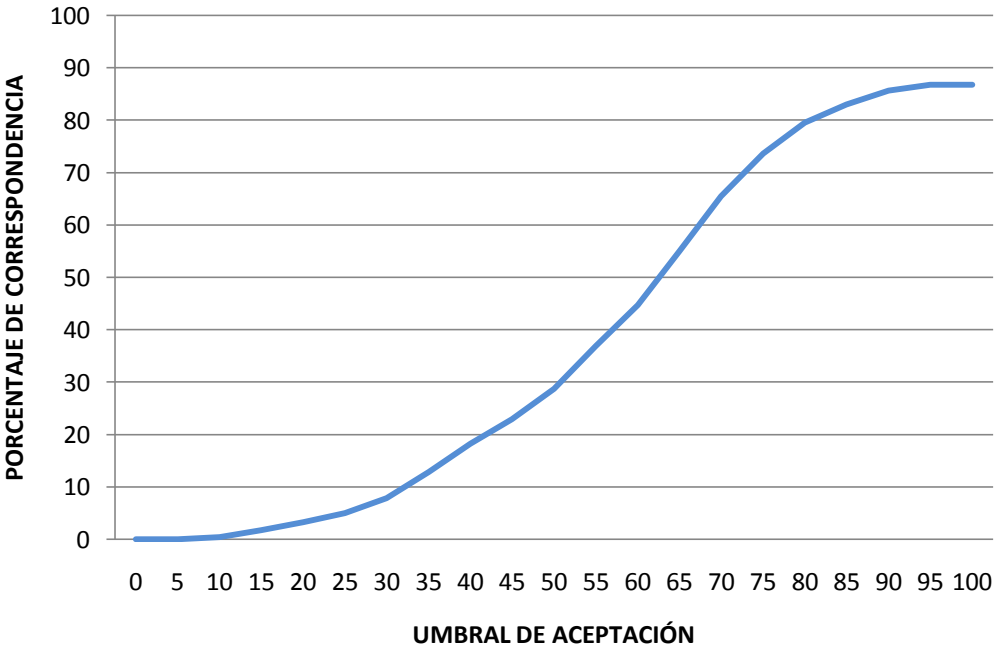


Figura No 37: Falso rechazo

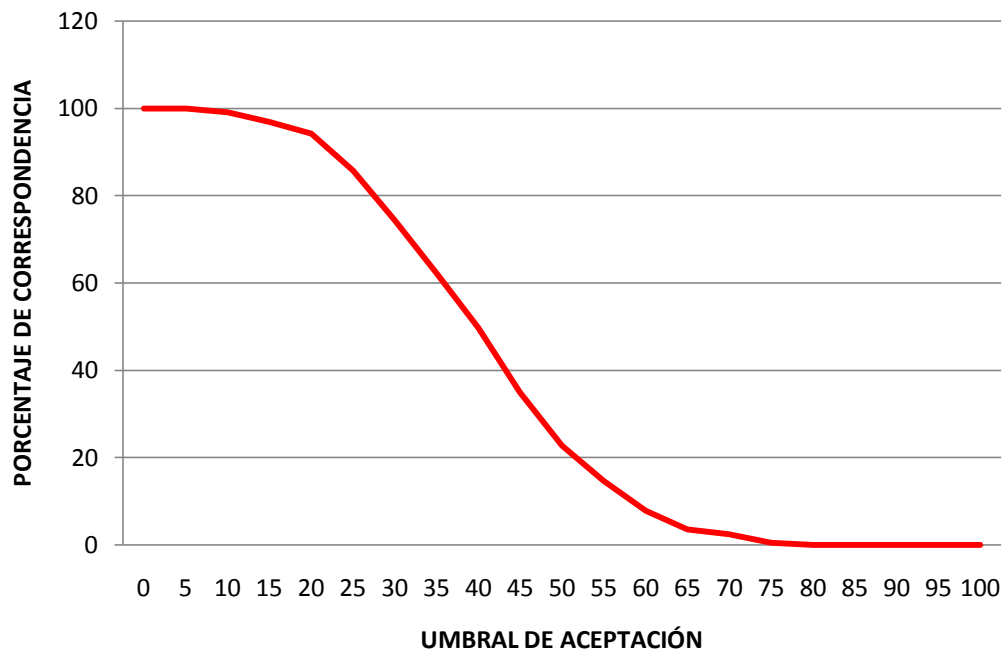


Figura No 38: Falsa Aceptación

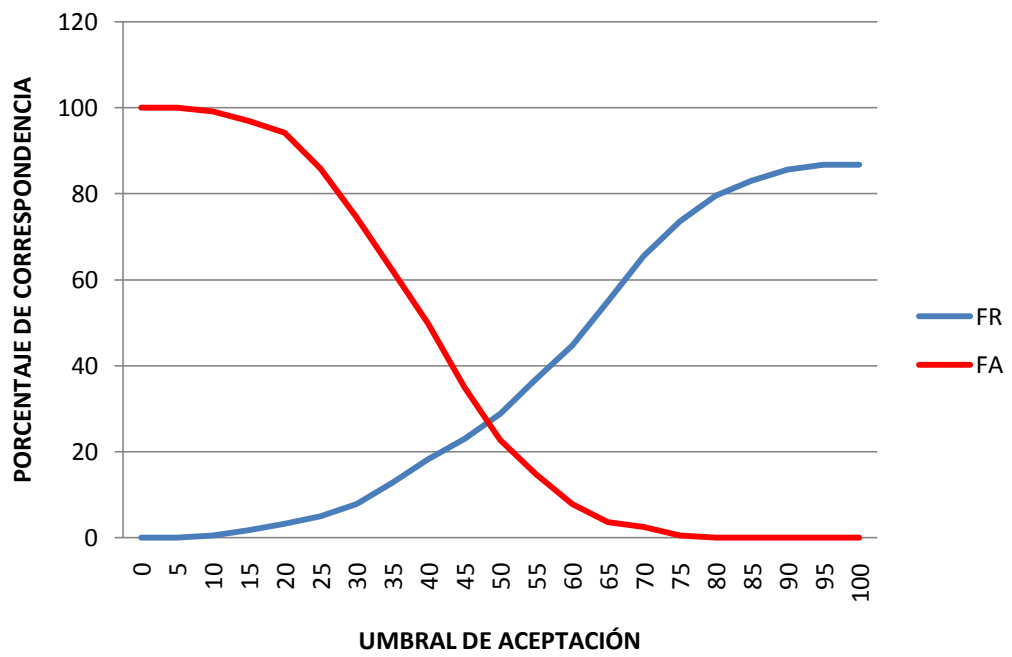
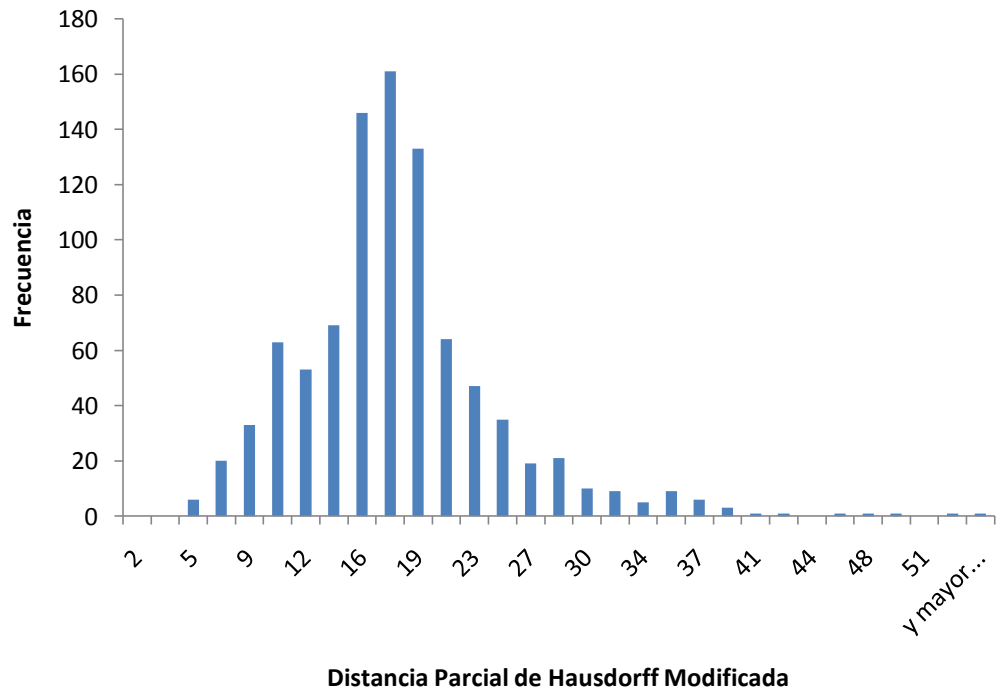


Figura No 39: Grafico FA/FR

De igual forma se registraron las distancias de Hausdorff obtenías luego de la alineación



Umbral (%)	Exactitud	
	RIA	AG
10	100	100
20	97	74
30	92	64
40	82	54
50	71	46
60	55	39
70	35	33
80	20	28
90	14	24
100	13	21

Tabla No 6: Comparación entre la exactitud de la Red Inmune Artificial y Un Algoritmo Genético

El algoritmo basado en una red inmune artificial presenta mejores resultados que el algoritmo genético hasta un umbral de aceptación superior a 70%, el cual es un umbral aceptable para el proceso de verificación biométrica dactilar.

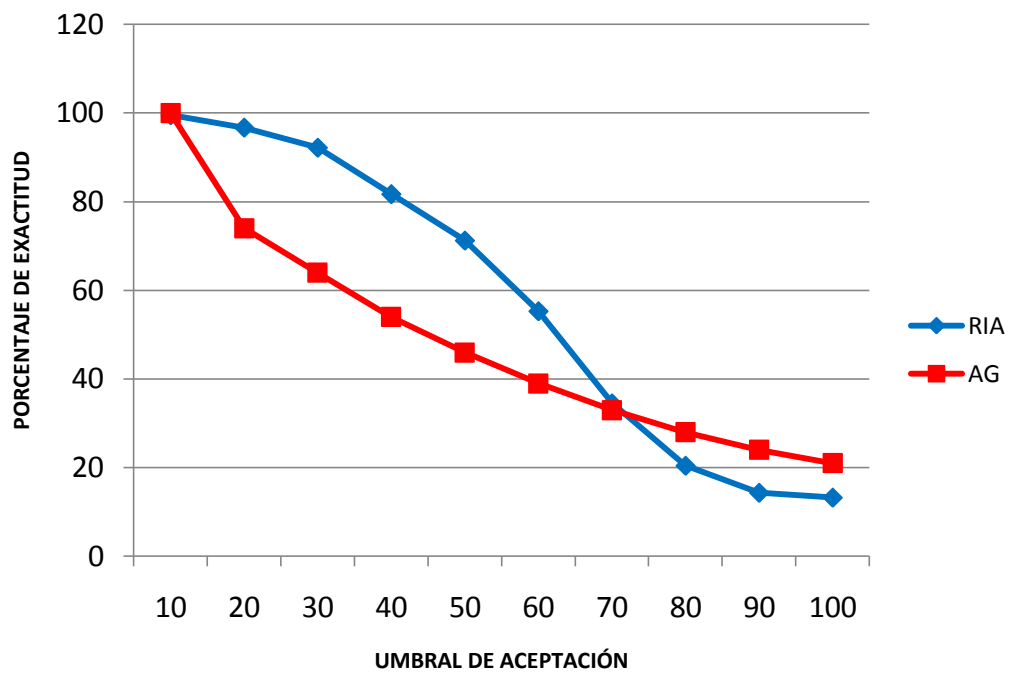


Figura No 41: Comparación entre la exactitud de la Red Inmune Artificial y Un Algoritmo Genético en el proceso de verificación de huellas

3.6.2.1. Imágenes de demostración



Figura No 42: Impresiones de prueba 1: Dos Imágenes de buena calidad

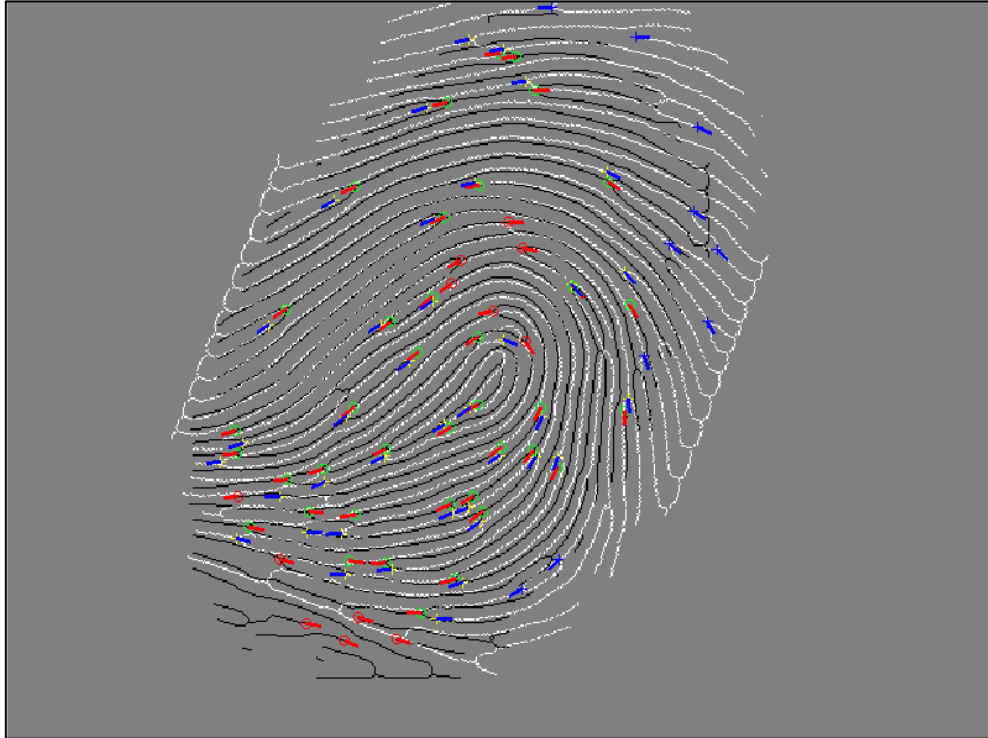


Figura No 43: Impresiones de prueba No 1 luego de ser alineadas con la red inmune artificial

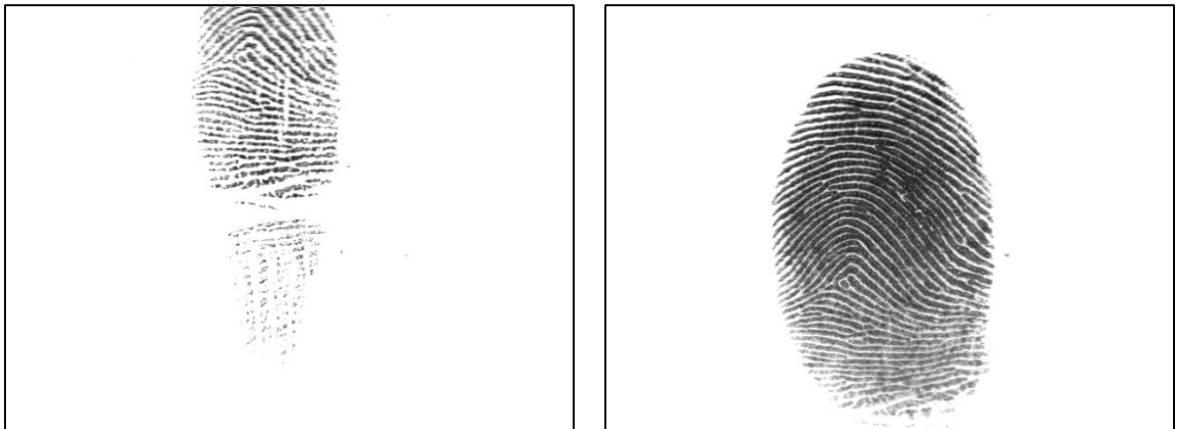
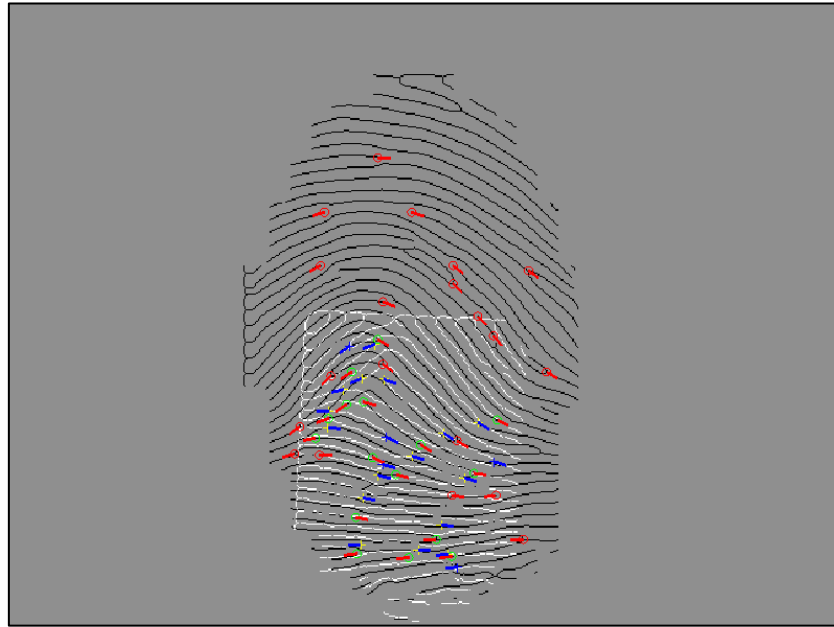
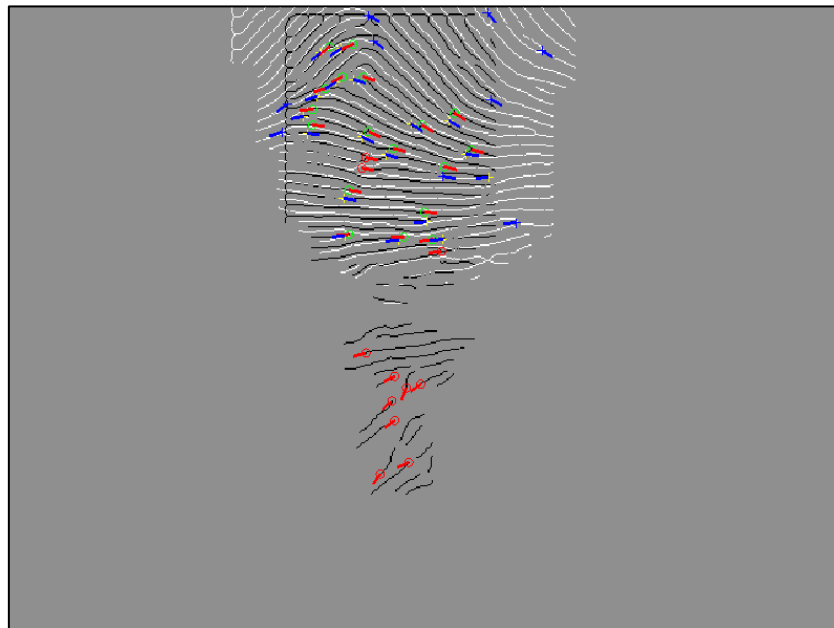


Figura No 44: Impresiones de prueba 2: Una muestra de mala calidad y otra de buena calidad



(a)



(b)

Figura No 45: Impresiones de prueba No 2 luego de ser alineadas con la red inmune artificial. (a) Alineación de la primera muestra con la segunda. (b) Alineación de la segunda muestra con respecto a la primera



Figura No 46: Impresiones de Muestra 3: Dos muestras de mala calidad

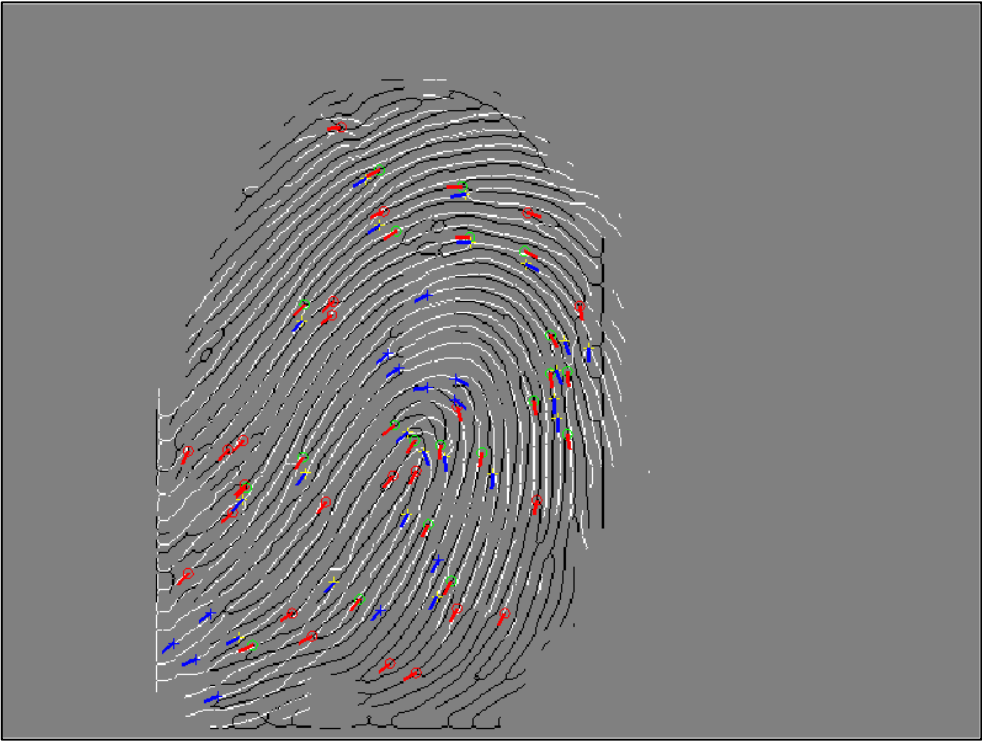


Figura No 47: Impresiones de prueba No 3 luego de ser alineadas con la red inmune artificial

CONCLUSIONES

- Se alcanzaron los objetivos trazados en primera instancia, implementándose un algoritmo multietapa funcional y con un rendimiento adecuado para la verificación de huellas dactilares basado en correlación por minucias.
- Se logró implementar un algoritmo basado en una abstracción del sistema inmunológico que inicialmente fue concebido para la optimización de funciones multiobjetivo; y en este trabajo se realizó una adaptación del modelo que lograra dar una solución satisfactoria a la problemática de alineación de patrones, el cual representa etapa fundamental en el proceso de verificación de huellas dactilares.
- Este desarrollo sigue la línea de otros trabajos en los cuales se busca verificar la versatilidad de nuevos algoritmos como es el caso de los sistemas inmunes artificiales y su aplicabilidad en diversas áreas. Para problemas relacionados con la biometría, a pesar de no encontrarse desarrollos previos, se puede destacar que en términos generales en este las pruebas realizadas en este proyecto arrojaron resultados de gran similitud a los obtenidos en otros estudios similares.
- Se corroboró que la distancia de Hausdorff es funcional como métrica de aproximación entre dos conjuntos de patrones. Para este trabajo se optó por utilizar una modificación de dicha distancia; y las pruebas realizadas indicaron que la variación a la fórmula general presentaba el mejor

rendimiento y la mejor adaptación para el problema de alineación de impresiones dactilares.

- Se alcanzó un buen rendimiento en la etapa de preprocesamiento de las imágenes de impresiones dactilares verificado en alto porcentaje por las pruebas realizadas y por la calidad de la información arrojada en dicha etapa, adicionalmente cada uno de los procesos fue depurado teniendo en cuenta referencias bibliográficas y desarrollos realizados en trabajos similares.
- El algoritmo inmune presenta un alto grado de eficacia en el proceso de búsqueda de la transformación geométrica óptima entre dos conjuntos de minucias pertenecientes a impresiones prestas a alinearse, el error arrojado es de un orden muy pequeño y altamente aceptable. En la revisión de las imágenes alineadas es muy notoria la calidad del trabajo realizado por el algoritmo.
- Se analizó de manera detallada el proceso de correspondencia de minucias. Con las pruebas realizadas se logró obtener el modelo más adecuado para estimar el porcentaje de correlación entre dos impresiones dactilares, y así determinar el grado de similitud entre las mismas indicando para inferir si pertenecen o no al mismo individuo.
- Se observó que en Colombia los trabajos que se han realizado referentes a la temática de los sistemas inspirados en el sistema inmunológico, aun son muy escasos con respecto al panorama mundial, lo que hace difícil encontrar referencias en nuestro entorno cercano. De igual forma esta situación motiva aun más a iniciar la labor investigativa, tomar la iniciativa y

generar el impulso para el estudio de esta temática que ciertamente ha generado gran interés en el campo de inteligencia artificial y su aplicabilidad en diversas áreas del conocimiento ha sido creciente a lo largo de los años recientes.

- Se generaron dos publicaciones de carácter científico como producto de este desarrollo con el objetivo de difundir lo realizado y establecer una guía para futuros desarrollos ya sea en biometría o en el área de sistemas inmunes artificiales

RECOMENDACIONES

- Es importante continuar con desarrollos similares que permitan entender de manera más amplia la complejidad y funcionalidad de los sistemas inmunes artificiales como una herramienta robusta en el mejoramiento de procesos en los cuales normalmente se hace uso de otros modelos relacionados con la inteligencia artificial. A partir de esto se recomienda desarrollar estrategias para incentivar el estudio y desarrollo de nuevos proyectos investigativos en el área de computación bio-inspirada.
- El algoritmo inmune implementado en el presente trabajo tuvo una depuración y evolución ininterrumpida a lo largo de todo el desarrollo, la continuación de estos procesos es fundamental para concebir posteriormente una herramienta aun más competitiva y de una posible aplicación comercial.
- Uno de los objetivos para próximos desarrollos será disminuir aun más los porcentajes de falsa aceptación y falso rechazo del sistema para que el proceso de verificación llegue a estándares de confiabilidad óptimos.
- Se recomienda para futuros desarrollos en esta área se tenga la posibilidad de estudiar las diferentes formas de implementación en paralelo de algoritmos con características como las de los sistemas inmunes artificiales en cada una de sus abstracciones; esto para aumentar su eficiencia en la solución de problemas de mucha más complejidad y que demanden un alto grado de consumo de recursos.

- Es necesario iniciar un estudio que permita contrastar las diversas metodologías en el área de computación evolutiva que mayor uso y difusión tienen en este momento, con el fin de medir su eficiencia efectividad y aplicabilidad en las diversas problemáticas; para adquirir criterios de evaluación sobre cuál de ellas es la más adecuada en determinados casos de aplicación.

BIBLIOGRAFÍA

1. De Castro y Von Zuben. “*Artificial immune systems: Part I – Basic theory and applications*”, Technical Report – RT DCA 01/1999, p. 95.
2. De Castro y Von Zuben., Technical Report – RT DCA 02/2000, p. 65.
3. Leandro N. de Castro and Jon Timmis. (2002), *Artificial Immune Systems: A new computational intelligence approach*, Springer-Verlag, London, September, 357 p.
4. *Towards a Network Theory of the Immune System*, by N. K. Jerne, 1974; Ann. Immunol. (Inst. Pasteur), 125C, 373-389.
5. Forrest, Perelson, Allen y Cherukuri. “*Self-nonsel self discrimination in a computer*”.
6. J.D. Farmer, N. Packard and A. Perelson, (1986) "The immune system, adaptation and machine learning", Physica D, vol. 2, pp. 187--204
7. Laboratorio Virtual de Sistemas Inmunológicos Artificiales. <http://dis.unal.edu.co/grupos/lisi/labvirtual/virtualworkspace.htm> - Consultado en marzo de 2008.
8. L. N. de Castro and J. Timmis. *Artificial Immune Systems: A Novel Paradigm to Pattern Recognition*, In *Artificial Neural Networks in Pattern Recognition* , J. M. Corchado, L. Alonso, and C. Fyfe (eds.), SOCO-2002, University of Paisley, UK, pp. 67-84.

9. de Castro, L. N. & Timmis, J. I. "*An Artificial Immune Network for Multimodal Function Optimization*", In Proceedings of IEEE CEC'02, **1**, pp. 699-674.
10. Jon Timmis and Camilla Edmonds. *A Comment on opt-AiNET: An Immune Network Algorithm for Optimization*, Proceedings of the 2005 conference on Genetic and evolutionary computation, PP 289–296.
11. De Castro, L. N., & Von Zuben, F. J. "*aiNet: An Artificial Immune Network For Data Analysis*", Book Chapter in *Data Mining: A Heuristic Approach*, H. A. Abbass, R. A. Sarker, and C. S. Newton (eds.), Idea Group Publishing, USA, Chapter XII, pp. 231-259.
12. Leandro Nunes de Castro, Fernando J. Von Zuben. "*An Evolutionary Immune Network for Data Clustering*", In Proceedings of the IEEE SBRN'00 (Brazilian Symposium on Artificial Neural Networks), pp. 84-89.
13. França, F. O.; Von Zuben, F. J.; De Castro, L. N. *Artificial Immune Network for Multimodal Function Optimization on Dynamic Environments*. In: Genetic and Evolutionary Computation Conference, GECCO-2005, 2005, Washington. Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference, GECCO-2005. New York: ACM Press, 2005.
14. Leandro Nunes de Castro, Fernando J. Von Zuben, Getúlio A. de Deus Jr. (2003) *The Construction of a Boolean Competitive Neural Network Using Ideas from Immunology*, Neurocomputing, 50C, pp. 51-85.
15. Timmis. "A resource limited artificial immune system for data analysis". 2000.
16. Zhou Ji, Dipankar Dasgupta, Zhiling Yang and Hongmei Teng. *Analysis of Dental Images using Artificial Immune Systems*. Congress on Evolutionary Computation (CEC at WCCI). Vancouver, Canada: July, 2006.

17. Thomas Stibor, Philipp Mohr, Jonathan Timmis. *Is Negative Selection Appropriate for Anomaly Detection?*, Proceedings of the 2005 conference on Genetic and evolutionary computation, pp. 321-328.
18. Hong Zheng and Li Li. *An Artificial Immune Approach for Vehicle Detection from High Resolution Space Imagery*, IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security, VOL.7 No.2, February 2007.
19. McCoy, D.F.; Devarajan, V. *Artificial immune systems and aerial image segmentation*, Systems, Man, and Cybernetics, 1997. 'Computational Cybernetics and Simulation'. 1997 IEEE International Conference on, pp. 867-872 vol.1.
20. Julien Franzolini, Damien Olivier. *Self-Organization In An Artificial Immune System*, In Eurosis, editor, European Simulation and Modelling Conference, 9pp (2006).
21. Davide Maltoni, Dario Maio, Anil Jain, and Salil Prabhakar. *Handbook of Fingerprint Recognition*, Springer, New York, 2003.
22. García Ortega Victor Hugo. *Sistema De Reconocimiento De Huellas Dactilares Para el Control De Acceso A Recintos*, XXIII Congreso Internacional de Ingeniería Electrónica, ELECTRO 2001.
23. Adriana Milena Castaño Padilla (2003), Silvia Patricia Morales Chamorro. *Sistema De Control De Acceso A Recintos Utilizando El reconocimiento Neuronal De Huellas Dactilares*, Monografía Minor Automatización Industrial – Universidad Tecnológica de Bolívar.
24. F.A. Afsar, M. Arif and M. Hussain. *Fingerprint Identification and Verification System using Minutiae Matching*, National Conference on Emerging Technologies 2004.

25. Xudong Jiang; Wei-Yun Yau. *Fingerprint minutiae matching based on the local and global structures*, Pattern Recognition, 2000. Proceedings. 15th International Conference on, pp. 1038-1041 vol.2.
26. Honglei Wei; Mingen Guo; Zongying Ou. *Fingerprint Verification Based on Multistage Minutiae Matching*, Pattern Recognition, 2006. ICPR 2006. 18th International Conference on, pp. 1058 – 1061.
27. Jae-Won Jeong, Tae-Hoon Kim, Kwee-Bo Sim and Dong-Wook Lee. *Fingerprints Recognition Algorithm Based On The Self-Recognition Model Of The Artificial Immune System*, International Symposium on Advanced Intelligent Systems (ISIS 2004).
28. Toshiyuki Shimooka, Koichi Shimizu. *Artificial Immune System for Personal Identification with Finger Vein Pattern*, Springer Berlin / Heidelberg. Knowledge-Based Intelligent Information and Engineering Systems, pp. 511-518, 2004.
29. Ammar, H.H.; Tao, Y. *Fingerprint registration using genetic algorithms* Proceedings. 3rd IEEE Symposium on Volume, Issue , 2000 Page(s):148 – 154.
30. Xuejun Tan, Bir Bhanu, "Fingerprint Verification Using Genetic Algorithms," *wacv*, p. 79, Sixth IEEE Workshop on Applications of Computer Vision (WACV'02), 2002
31. Zsolt Miklos Kovacs-Vajna. *A fingerprint verification system based on triangular matching and dynamic time warping* *IEEE Transactions on* Volume 22, Issue 11, Nov 2000 Page(s): 1266 – 1276.
32. Jorge Leonid Aching Samatelo, David Augusto Rojas Vigo, "*Reconocimiento Biométrico de Huellas Dactilares y su Implementación en DSP*" 2005, Lima-

Peru, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Electrónica pp 15-234.

33. Arguello Fuentes Henry, "*Evaluación de la distancia Hausdorff en un sistema automático de reconocimiento de huellas dactilares*", 2006, Colombia, Revista Colombiana de Computación, Pag 20
34. Li TIAN, Sei-ichiro KAMATA, Yoshifumi UESHIGE, Yoshimitsu KUROKI, "*An Automatic Image-Map Registration Algorithm Using Modified Partial Hausdorff Distance*" 2005 IEEE pp 4 .
35. Jian-Wei Zhang, Guo-Qiang Han, Yan Wo. *Image registration based on generalized and mean Hausdorff distances. Machine Learning and Cybernetics*, 2005. Proceedings of 2005 International Conference on. 18/09/2005; 8:5117- 5121 Vol. 8.
36. 32. M. Dubuisson and A.K. Jain, "*A Modified Hausdorff Distance for Object Matching*," Proc. Int'l Conf. Pattern Recognition, pp. 566–568, 1994
37. PIRES, M. G. ; DUARTE, F. V. ; GONZAGA, A. . Genetic Optimization for Fingerprint Verification. In: XIX Brazilian Symposium on Computer Graphics and Image Processing - SIBGRAPI 2006, 2006, Manaus. Proceedings of XIX Brazilian Symposium on Computer Graphics and Image Processing - SIBGRAPI 2006

ANEXOS

ANEXO A

GLOSARIO DE TÉRMINOS

- **ANTICUERPO:** Moléculas segregadas durante la respuesta inmune aprendida, encargadas de neutralizar y eliminar a los antígenos.
- **ANTÍGENO:** Cualquier molécula externa capaz de iniciar una respuesta inmune.
- **BASE DE DATOS:** Recopilación de uno o más archivos computarizados. En el caso de sistemas biométricos, estos archivos pueden ser lecturas del sensor biométrico, impresiones digitalizadas de huellas, plantillas, resultados de coincidencias, información sobre el usuario final, etc.
- **BIFURCACIÓN:** Punto en una huella dactilar en el que una cresta de fricción se divide para formar dos crestas.
- **BINARIZACIÓN (Procesamiento digital de imágenes):** Etapa del procesamiento digital de imágenes que consiste en llevar una imagen a solo dos escalas de intensidad 1 para blanco y 0 para negro.
- **BIOMETRÍA:** Es la ciencia que se encarga del estudio de métodos automáticos, para el reconocimiento único de seres humanos, basados en uno o más rasgos conductuales o fisiológicos. En la biometría informática se aplican técnicas matemáticas y estadísticas sobre los rasgos físicos o de conducta de un individuo, para que con el menor margen de error se pueda verificar identidades o llegar a identificar individuos.
- **CÉLULAS B (LINFOCITOS B):** Son las células de las cuales depende la inmunidad mediada por anticuerpos, con actividad específica de fijación de antígenos. Las células B dan origen a las células plasmáticas que producen anticuerpos. La letra B en su identificación corresponde al sitio en donde se lleva a cabo su maduración en este caso la médula ósea, en inglés (**B**one **N**arrow) "Véase linfocitos".

- **CÉLULAS T (LINFOCITOS T):** Son los responsables de la respuesta inmune realizada por células, así como de funciones de cooperación para que se desarrollen todas las formas de respuestas inmunes, incluida la respuesta de anticuerpos por los linfocitos B. La letra T en su identificación corresponde a que la maduración de este tipo de células se lleva a cabo en la glándula conocida como Timo. "Véase linfocitos".
- **EXTRACCIÓN DE CARACTERÍSTICAS:** Proceso de conversión de una muestra biométrica, capturada en datos biométricos para su posterior comparación con respecto a una referencia.
- **FILTRADO:** En el contexto biométrico, las huellas digitales por diversos factores internos y externos del proceso de captura presentan cierto ruido o imperfecciones, que particularmente dificulta el procesamiento de las mismas; debido a esto, es necesario mejorar la calidad de las imágenes atenuando o extrayendo el ruido y así permitir un mejor reconocimiento de las crestas o líneas que conforman la muestra, y de esta forma extraer sus puntos característicos.
- **HUELLA DACTILAR:** Es la representación de la morfología superficial de la epidermis de un dedo, en palabras más coloquiales son las formas caprichosas que adopta la piel que cubre las yemas de los dedos. Están constituidas por rugosidades que forman salientes y depresiones.
- **INSCRIPCIÓN:** Proceso de recopilación de muestra biométrica de un usuario final, conversión de la misma en referencia biométrica y almacenamiento de la referencia en la base de datos del sistema biométrico para posterior comparación.
- **LINFOCITOS:** Células representantes de la respuesta inmune aprendida. En los mamíferos principalmente existen dos categorías, Células B y células T.
- **MODO DE IDENTIFICACIÓN:** Funcionamiento bajo el cual un sistema biométrico identifica a un individuo comparando la huella de entrada con las plantillas de todos los usuarios registrados en la base de datos, es decir se realiza una comparación uno a muchos para establecer la identidad del individuo sin que ésta sea declarada.

- **MODO DE VERIFICACIÓN:** Desde el punto de vista biométrico consiste en un modo bajo el cual operan los sistemas de reconocimiento; el sistema se encarga de validar la identidad de un individuo comparando la plantilla de entrada con su plantilla correspondiente, previamente almacenada en la base de datos. En este caso el individuo que desea ser reconocido declara una identidad al sistema, y el sistema determina si la identidad suministrada es verdadera o no.
- **NORMALIZACIÓN:** Las huellas digitales presentan diferencias de intensidad por distintas razones, dificultando el proceso de identificación y localización de patrones y puntos característicos, para solucionar este problema se realiza una estandarización de las intensidades de gris de la imagen.
- **NÚCLEO DE UNA HUELLA (CORE):** El “centro” de una huella dactilar. En el patrón de anillo de cresta, el núcleo se encuentra en el centro de los espirales o círculos. En el patrón de lazo, el núcleo se encuentra en la parte superior del lazo más interno; técnicamente, el núcleo se define como el punto superior de la máxima curvatura de la cresta de fricción más interna. Dependiendo del patrón dactilar, una huella dactilar puede tener múltiples núcleos o ninguno.
- **PATÓGENO:** Del griego *pathos*, enfermedad y *genein*, engendrar. Es toda aquella entidad biológica capaz de producir enfermedad o daño en la biología de un huésped (humano, animal, vegetal, etc.) sensiblemente predispuesto.
- **PLANTILLA:** Representación digital de las características distintivas de un individuo, que contiene la información extraída de una muestra biométrica; las plantillas se utilizan durante la autenticación biométrica como base de comparación.
- **PUNTOS CARACTERÍSTICOS:** Son los datos más representativos de las huellas dactilares, y son los que al final determinan las diferencias entre un individuo y otro. Las huellas dactilares poseen un conjunto de líneas, que en forma general aparecen dispuestas paralelamente. Sin embargo, estas líneas pueden terminar abruptamente o bifurcarse, estos puntos se conocen como “Minucias”. La organización de estos puntos se presenta en

configuraciones únicas para cada individuo y permanecen inalterables a través del tiempo.

- **ANILLO DE CRESTA:** Patrón de huella dactilar en el cual las crestas son circulares, o casi circulares. Este patrón presenta dos o más deltas.
- **ARCO:** Patrón de huellas dactilares en el cual las crestas de fricción entran por un lado, se elevan en el centro y salen por el lado opuesto. Este patrón no presenta ningún delta verdadero.
- **LAZO:** Patrón de huella dactilar en el cual las crestas de fricción entran por cualquiera de los dos lados, se curvan acentuadamente y salen cerca del mismo lado por el cual entraron, como se observa a continuación. Este patrón presenta un núcleo y un delta.
- **PUNTO DELTA:** Parte del patrón de una huella dactilar que se asemeja a la letra griega delta (Δ). Técnicamente, es el punto en una cresta de fricción más cercano al punto de divergencia de los dos tipos de líneas, y está ubicado justo en frente del punto de divergencia.
- **RESPUESTA INMUNE INNATA:** Respuesta del sistema inmune que es inespecífica y no posee memoria.
- **RESPUESTA INMUNE ADAPTATIVA:** Respuesta del sistema inmune que posee memoria y aprendizaje, realizada principalmente por los anticuerpos.
- **SEGMENTACIÓN:** Es el primer paso en la mejora de la imagen; la cual consiste en separar el fondo, del resto de la imagen de la huella digital, esto permite enfocarse únicamente en la parte de interés (donde se encuentran los valles y crestas, que han de ser analizados).
- **SENSOR:** Hardware en un dispositivo biométrico que percibe una señal y realiza una tarea específica sobre ella
- **SISTEMA INMUNE BIOLÓGICO:** Es un complejo de células, estructuras moleculares y órganos que constituyen un mecanismo de defensa capaz de percibir, atacar y eliminar estructuras y microorganismos infecciosos externas que perjudican nuestro organismo. Este sistema interactúa con los demás sistemas del organismo, para mantener a dicho en un funcionamiento estable y libre de amenazas.

- **SISTEMA INMUNE ARTIFICIAL:** Es una clase de algoritmos de inteligencia artificial que nace de abstracciones de fenómenos, que ocurren en el sistema inmune biológico de los mamíferos, para tratar de resolver problemas complejos en diversos campos, especialmente en el área de la ingeniería. Los algoritmos desarrollados generalmente se basan en los principios inmunológicos, como son el proceso de selección negativa, el procesamiento distribuido, esquemas de selección clonal y teoría de redes inmunes.
- **SISTEMA BIOMÉTRICO:** Es un sistema automatizado que realiza labores de biometría. Es decir, un sistema que fundamenta sus decisiones de reconocimiento mediante una característica personal que puede ser reconocida o verificada de manera automatizada.
- **SISTEMA AUTOMATIZADO DE IDENTIFICACIÓN POR HUELLAS DACTILARES:** Sistema biométrico altamente especializado que compara una muestra de una huella dactilar, con los registros de una base de datos para determinar la identidad de un individuo. El sistema AFIS se utiliza, especialmente, para el cumplimiento de la ley, pero también se lo utiliza en casos civiles.
- **RUIDO:** Es el conjunto de perturbaciones indeseadas que tienden a desmejorar el contenido de información en una señal.

ANEXO B

DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE VERIFICACIÓN

El sistema está conformado por 3 aplicativos diferentes desarrollados en Matlab 7 R14, uno que corresponde al módulo o etapa de preprocesamiento, el modulo o etapa de alineación de patrones generados, y el módulo o etapa principal de alineación de huellas reales.

MÓDULO DE PREPROCESAMIENTO

Este módulo está conformado por las siguientes funciones

FUNCIÓN	APLICACIÓN
<i>Registro.m</i>	Función que carga la interfaz grafica del modulo de Inscripción de las impresiones dactilares
<i>Segment_huella.m</i>	Función para normalizar y segmentar la imagen de la impresión dactilar
<i>Orient_huella.m</i>	Función para estimar el campo de orientación de la impresión dactilar
<i>Plot_orient.m</i>	Función para graficar el campo de orientación de una impresión dactilar
<i>Freq_huella.m</i>	Función para estimar la frecuencia de las crestas dentro de una huella dactilar
<i>Filtrar_huella.m</i>	Función para filtrar las crestas de la impresión dactilar
<i>Extraer_minucias.m</i>	Función para extraer las minucias a partir de la impresión dactilar esqueletizada
<i>Falsa_minucia.m</i>	Función para validar la extracción de minucias y eliminar las minucias falsas

MÓDULO DE ALINEACIÓN DE PATRONES GENERADOS ALEATORIAMENTE

Este módulo está conformado por las siguientes funciones:

FUNCIÓN	APLICACIÓN
<i>Emparejamiento_puntos.m</i>	Función que carga la interfaz grafica del modulo de emparejamiento de patrones
<i>param_gen.m</i>	Función que carga la interfaz para configurar el generador de puntos aleatorios
<i>Param_red.m</i>	Función que carga la interfaz para configurar los parámetros de la red inmune artificial
<i>Ainet.m</i>	Red inmune artificial
<i>fitness.m</i>	Función para calcular la aptitud de una elemento en el repertorio de células dentro de la red inmune
<i>MPHausdorff.m</i>	Función para calcular la distancia parcial de Hausdorff modificada entre dos patrones de puntos

MÓDULO DE ALINEACIÓN DE HUELLAS REALES

Este módulo está conformado por las siguientes funciones:

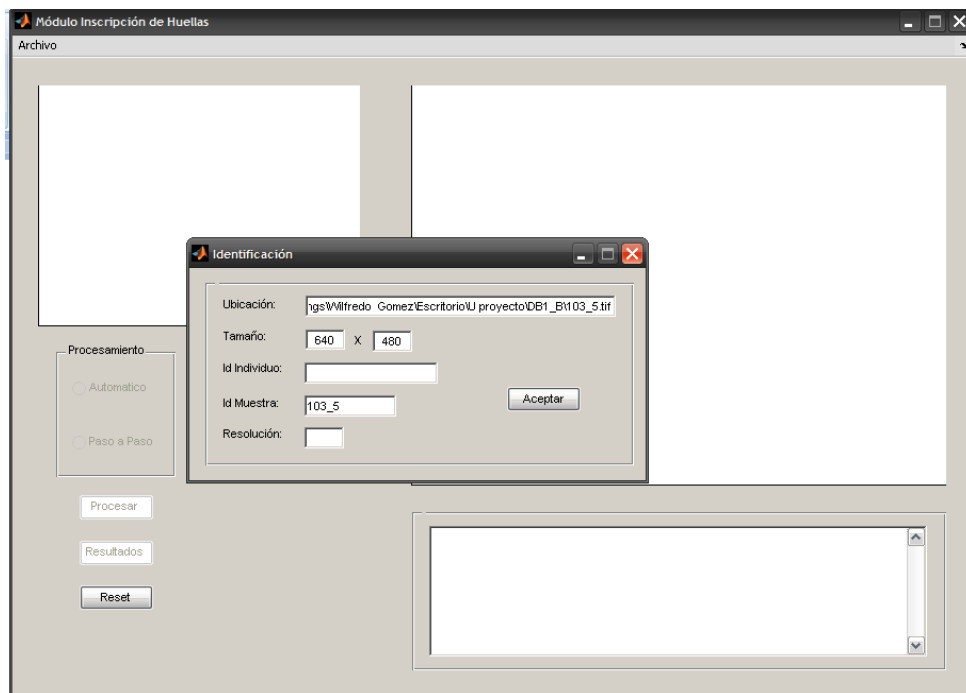
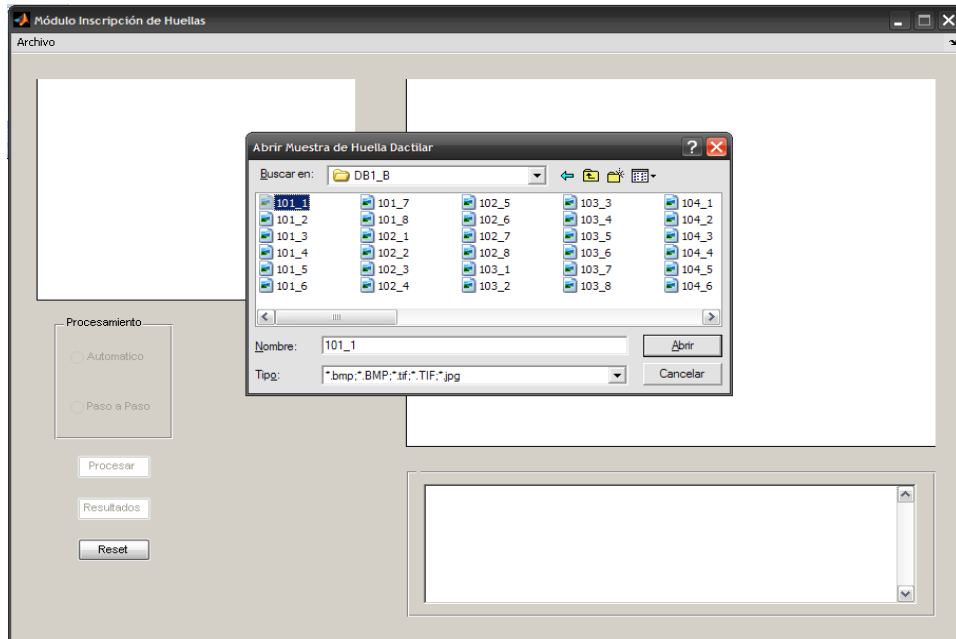
FUNCIÓN	APLICACIÓN
<i>Verificacion.m</i>	Función que carga la interfaz grafica del modulo de verificación de huellas dactilares
<i>Param_red.m</i>	Función que carga la interfaz para configurar los parámetros de la red inmune artificial
<i>Ainet.m</i>	Red inmune artificial
<i>fitness.m</i>	Función para calcular la aptitud de una elemento en el repertorio de células dentro de la red inmune
<i>MPHausdorff.m</i>	Función para calcular la distancia parcial de Hausdorff modificada entre dos patrones de puntos
<i>Actualizar_orient.m</i>	Función para aplicar una transformación geométrica a un patrón de minucias y actualizar las orientaciones de las mismas
<i>Match_huella.m</i>	Función para calcular el porcentaje de similitud entre dos huellas previamente alineadas

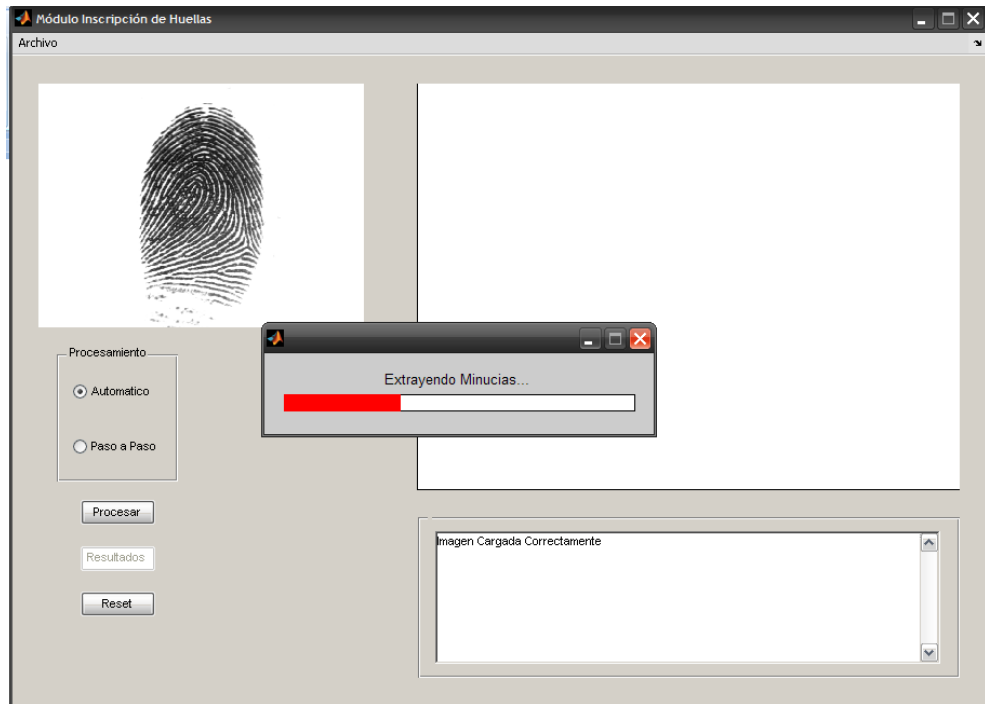
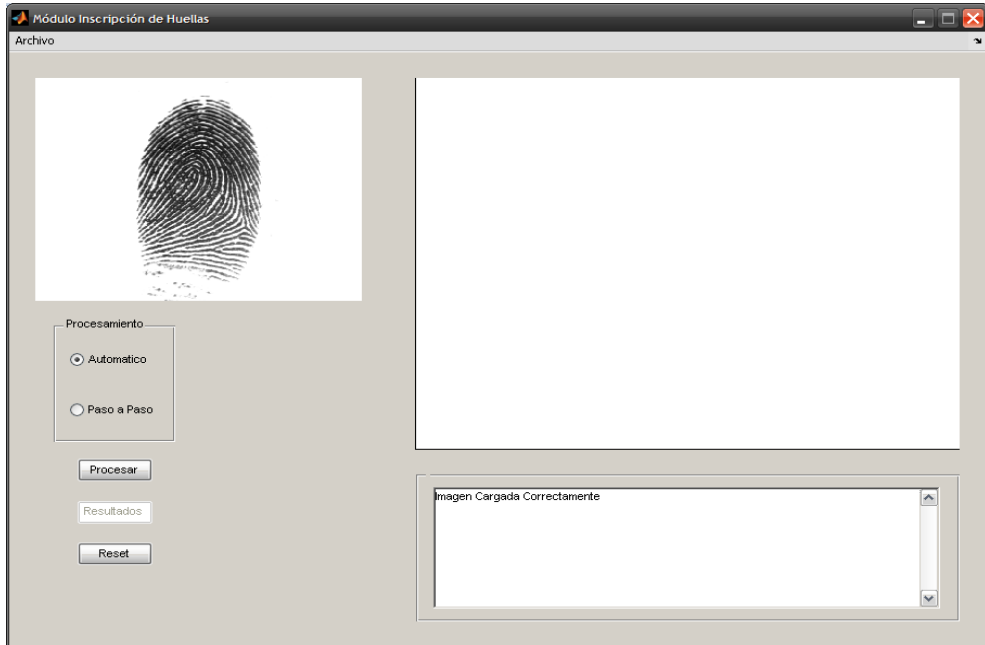
ARCHIVOS DE PLANTILLA DE UNA IMPRESIÓN DACTILAR

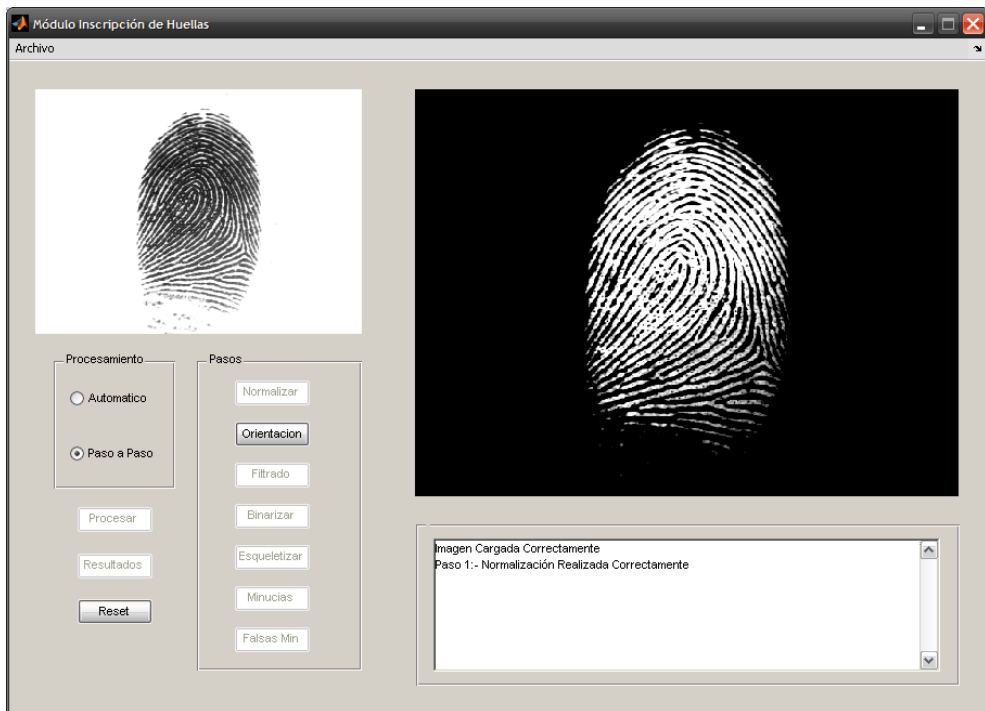
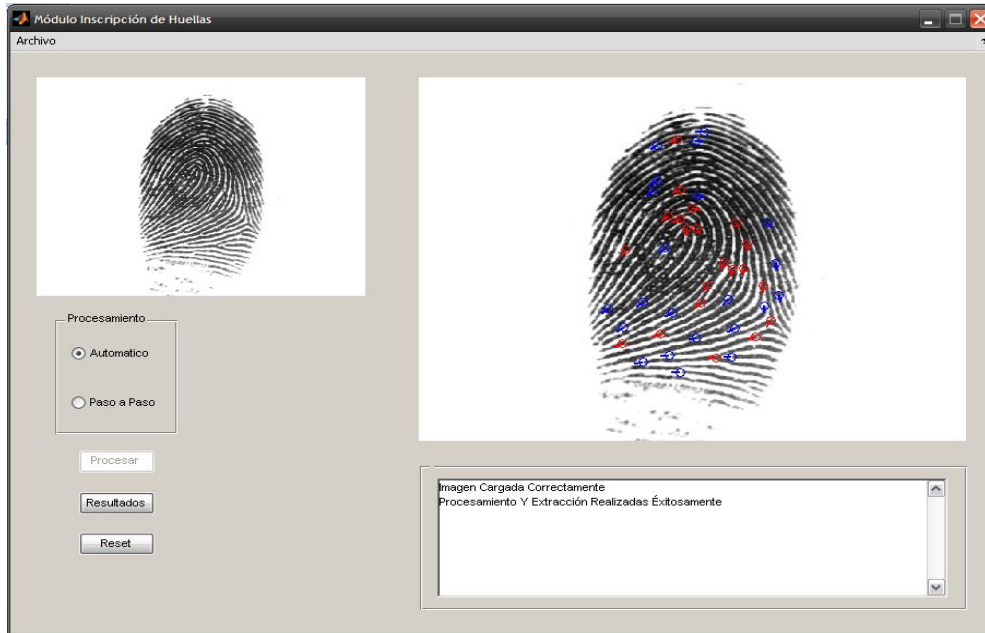
Las plantillas son archivos generados a partir de cada huella con la información característica de cada individuo y que nos permiten administrar dicha información para que sea computacionalmente procesable. Cada plantilla la conforman los campos:

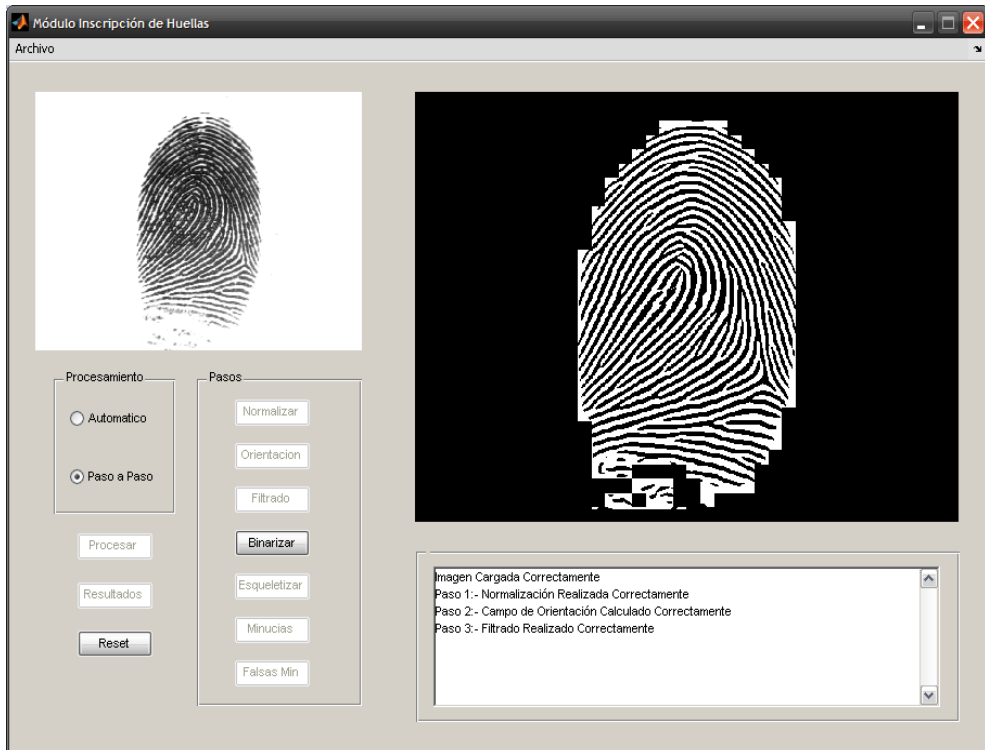
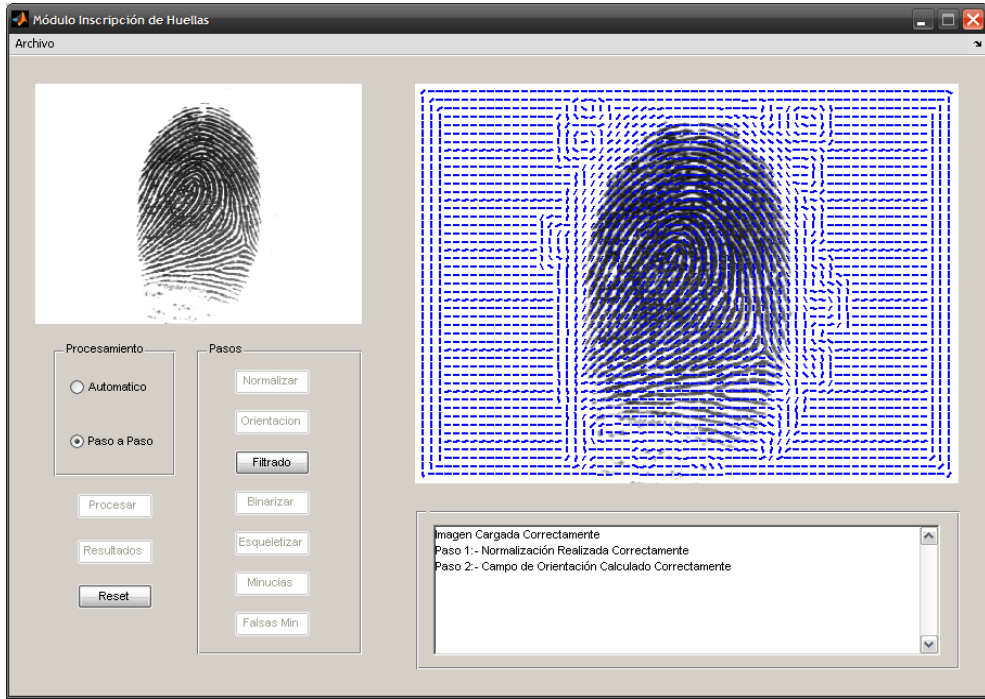
- *Id Persona*: Es el nombre o el código de identificación del individuo al que pertenece la huella
- *Id Huella*: es el identificador de cada muestra o imagen que puede tener un individuo
- *Ruta*: es la dirección donde está guardada dicha información en el disco del equipo de computo
- *Size*: Tamaño de la imagen de la huella
- *Res*: es la resolución de puntos por pulgada que tiene la imagen de la huella
- *Minutia*: es una estructura donde encontramos la información de los puntos característicos de la huella como la ubicación de dichos puntos el tipo y su orientación
- *Esq*: es una matriz que representa la imagen en forma esqueletizada.
- *Img*: Copia de la imagen de la impresión dactilar
- *Seg*: es una matriz de datos que representa la huella segmentada.

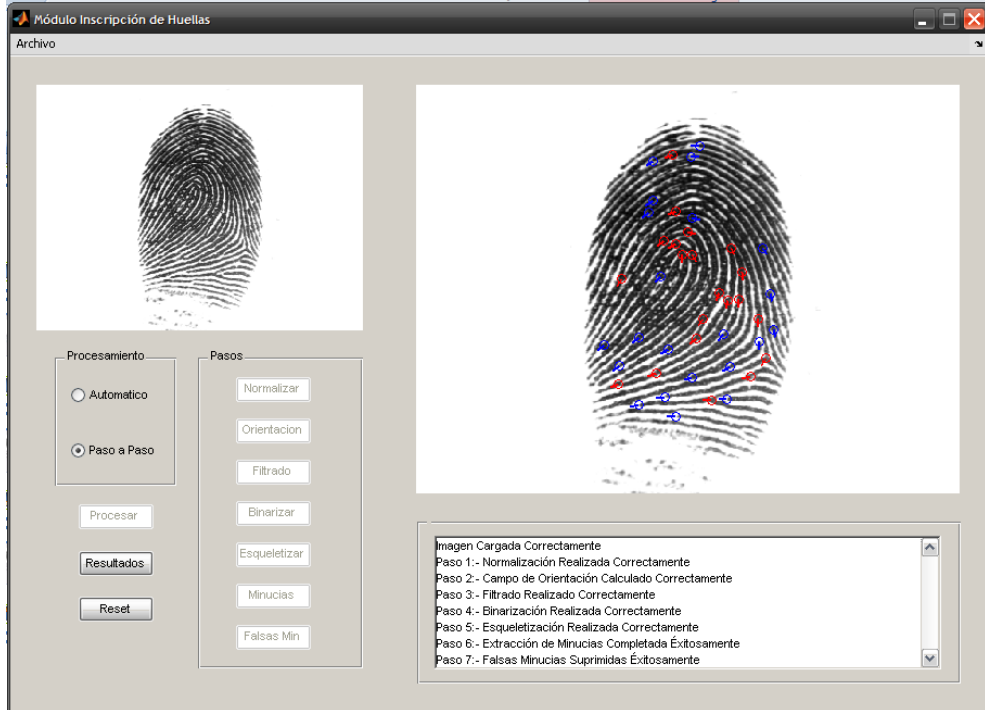
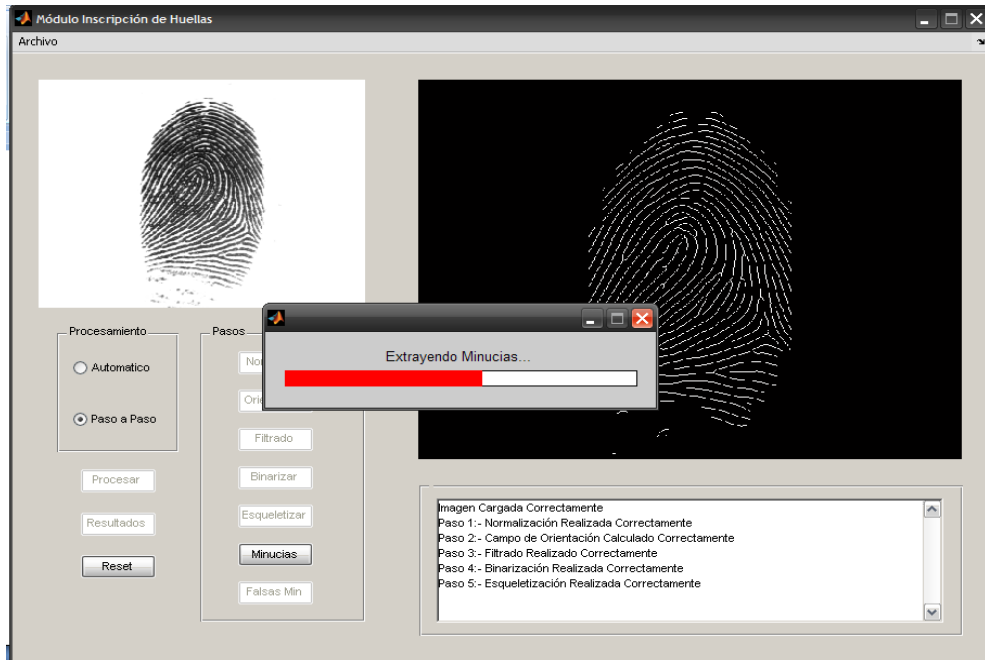
ANEXO C
CAPTURAS DEL SISTEMA DE VERIFICACIÓN
MODULO INSCRIPCIÓN (PREPROCESAMIENTO DE HUELLAS)



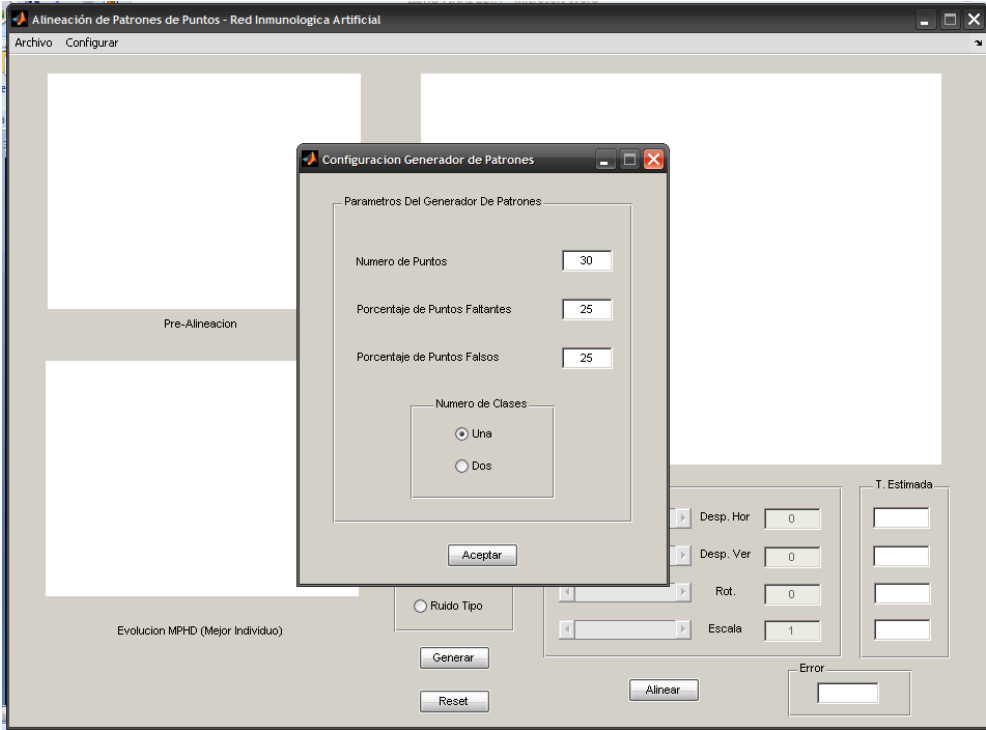
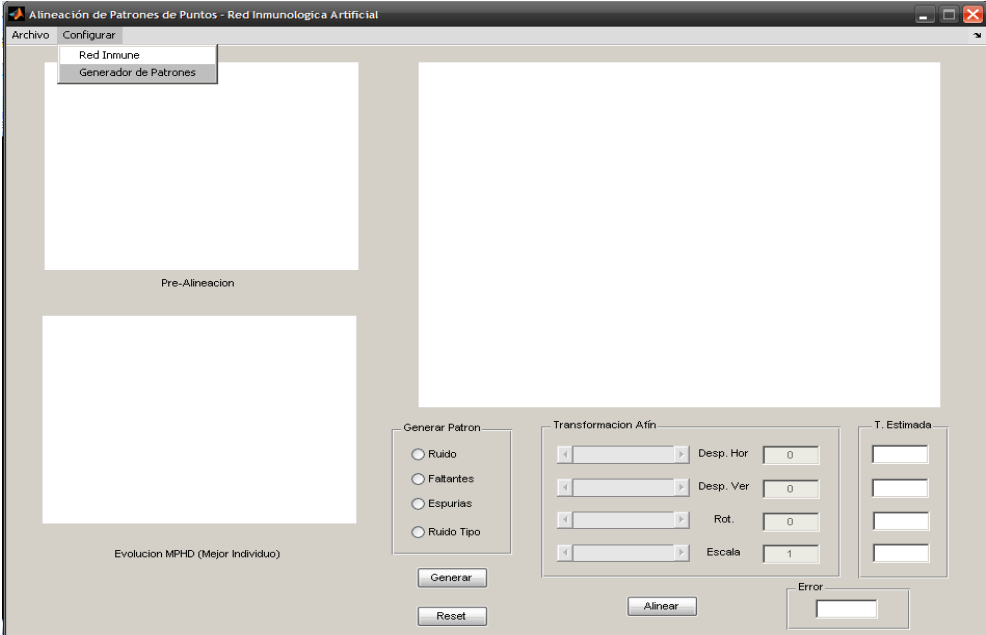


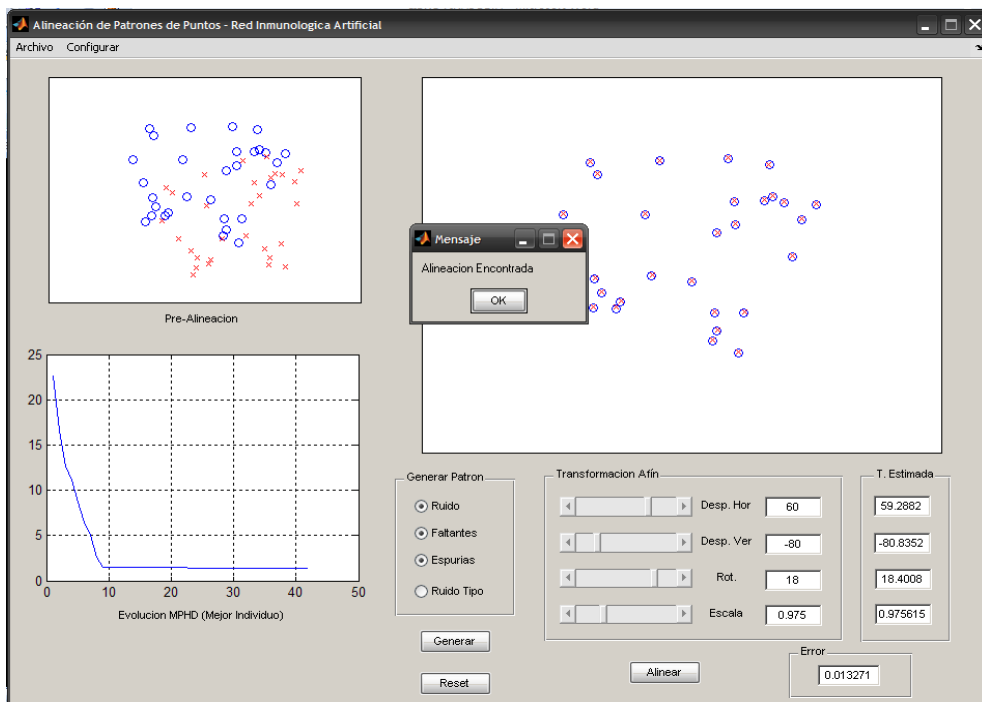
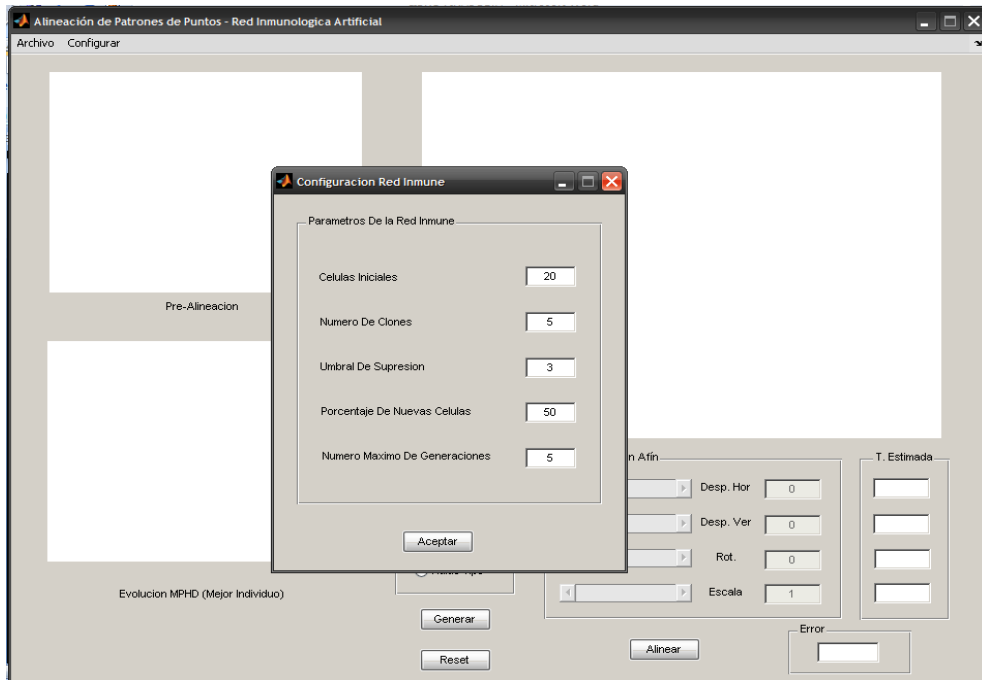




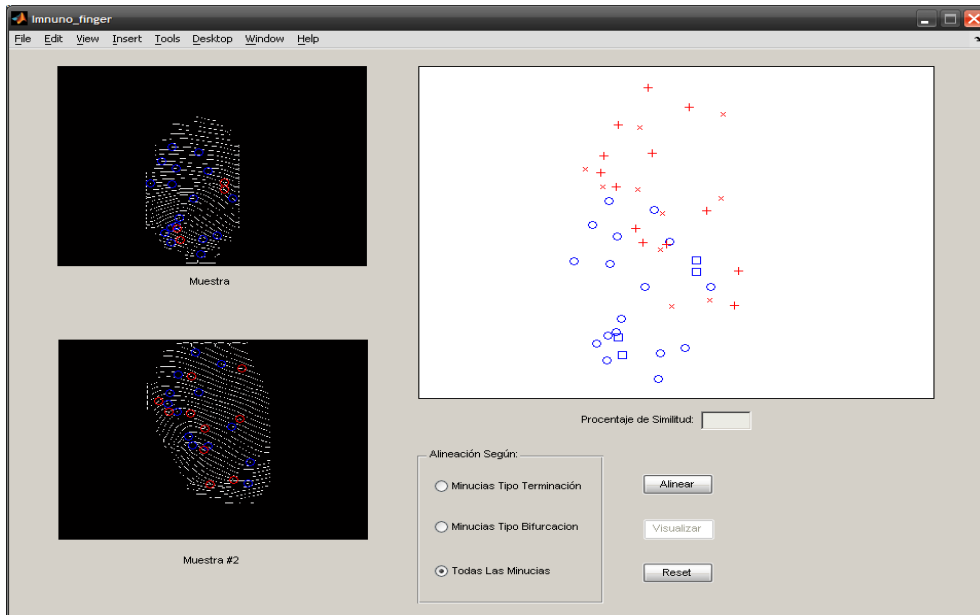
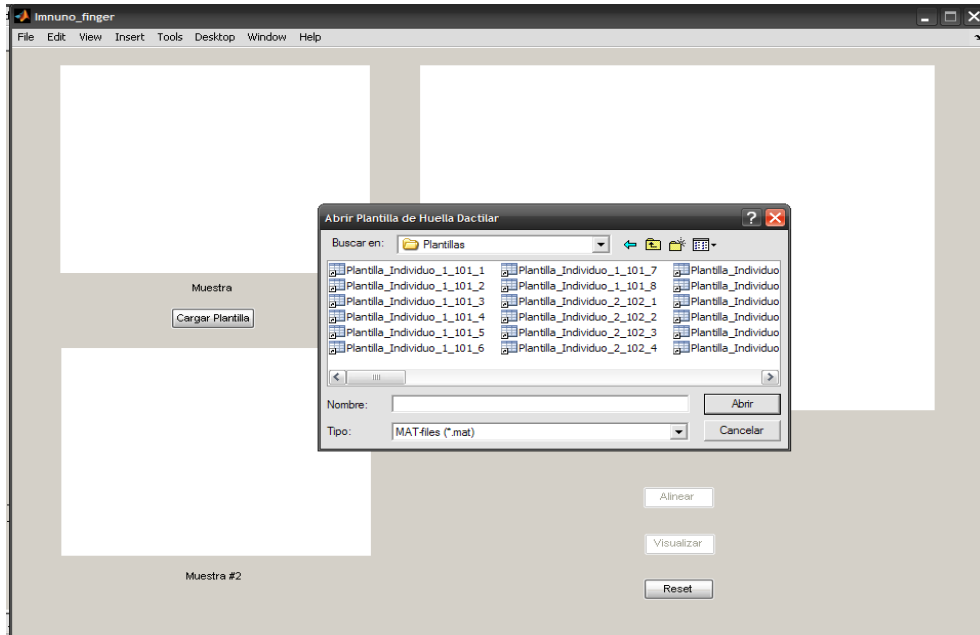


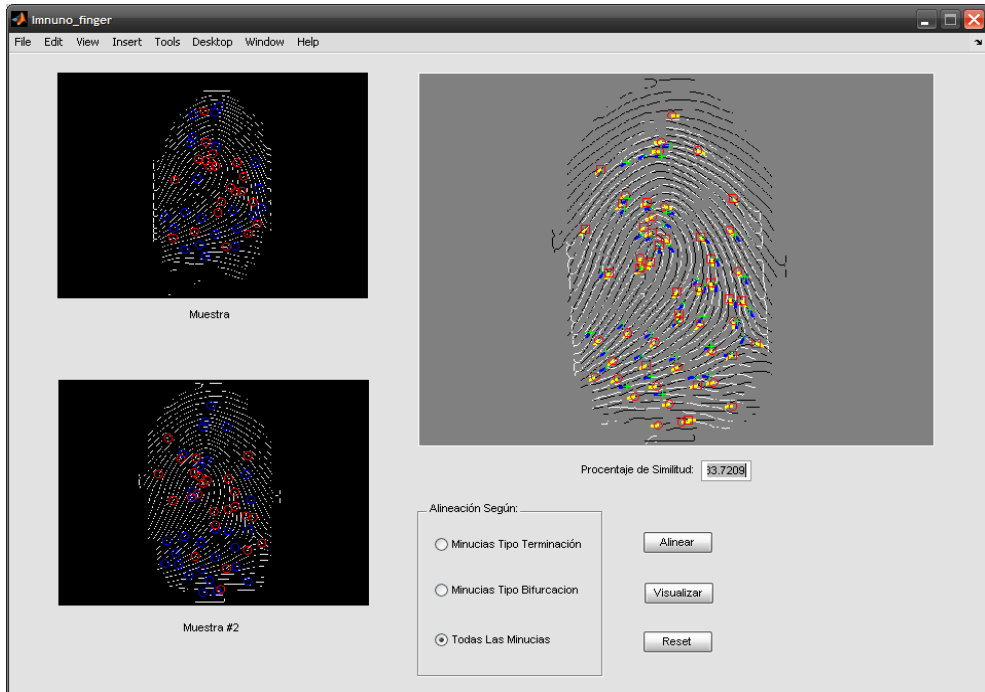
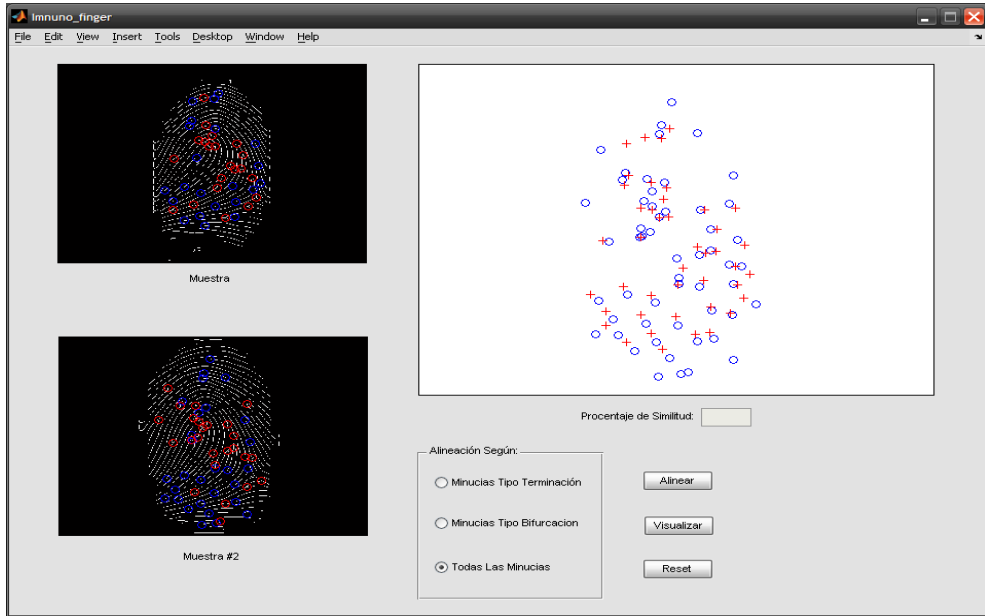
MODULO ALINEACIÓN PATRONES GENERADOS





MODULO ALINEACIÓN DE HUELLAS REALES





ANEXO D

ARTÍCULO 1

Verificación/Registro de Huellas Dactilares Usando Una Red Inmune Artificial

Fingerprint Verification/Registration Using an Artificial Immune Network

Manuel Ignacio Cuadrado Morad*, Wilfredo Ariel Gómez Bueno*, Mcs. Henry Arguello Fuentes⁺⁺
Grupo de Investigación en Ingeniería Biomédica (GIIB), Escuela de Ingeniería de Sistemas,
Universidad Industrial de Santander
manuelqadrado@gmail.com, wargobu@hotmail.com, henryarguellofuentes@hotmail.com

Resumen

En este artículo se propone una red inmune artificial encaminada a optimizar la búsqueda de los parámetros de la transformación afín entre dos conjuntos de minucias extraídas de dos diferentes impresiones dactilares para su posterior comparación.

Se usa la distancia parcial modificada de Hausdorff como métrica de similitud entre ambas muestras y se hace uso de la red inmune artificial para estimar la transformación geométrica que relaciona los conjuntos de minucias, alineando las huellas a la vez que se optimiza la medida de similitud.

Palabras clave: Red Inmune Artificial, Hausdorff, Optimización, Huella Dactilar, Alineación, Minucias.

Abstract

In this paper an artificial immune network is proposed for optimizing the task of searching the parameters of the affine transformation between two sets of minutiae extracted from two different fingerprints for later comparison.

The modified partial Hausdorff distance is used as a metric of similarity between both samples and the artificial immune network is used for

estimating the geometric transformation that relates the sets of minutiae, aligning the fingerprints while the measure of similarity is optimized.

Keywords: Artificial Immune Network, Hausdorff, Optimization, Fingerprint, Alignment, Minutiae.

1. Introducción

La identificación de individuos es un campo ampliamente trabajado en los últimos años pues se ha vuelto estrictamente necesario en las labores diarias de las personas, su uso ya ha trascendido de las instancias judiciales a casi cualquier entidad pública o privada que necesita ya sea registrar o verificar la identidades de sus empleado, sus clientes o a sus socios, por motivos ya sean de confiabilidad seguridad o eficiencia en sus diferentes procesos.

La complejidad del problema ha generado un amplio panorama de solución conformado por una gran cantidad y diversidad de técnicas, metodologías y abstracciones que han sido implementadas computacionalmente y que en el día de hoy se encuentran en los diferentes sistemas de control de acceso, registro y verificación de personas.

* Estudiantes miembros del Grupo de Investigación en Ingeniería Biomédica de la Universidad Industrial de Santander

** Profesor de planta, Escuela de Ingeniería de Sistemas e Informática, Universidad Industrial de Santander, Colombia

ARTÍCULO 2

Algoritmo Basado en Una Red Inmune Artificial para el Emparejamiento de Patrones de Puntos

An Artificial Immune Network Based Algorithm for Point Pattern Matching

Manuel Ignacio Cuadrado Morad*, Wilfredo Ariel Gómez Bueno*, Mcs. Henry Arguello Fuentes**
Grupo de Investigación en Ingeniería Biomédica (GIIB), Escuela de Ingeniería de Sistemas,
Universidad Industrial de Santander

manuelqadrado@gmail.com, wiargobu@hotmail.com, henryarguellofuentes@hotmail.com

Resumen—El emparejamiento de puntos es un proceso que consiste encontrar la correspondencia entre dos patrones de puntos buscando la alineación óptima de ambos conjuntos. La correspondencia de los patrones tiene aplicaciones en las áreas de visión artificial y reconocimiento de patrones.

En este artículo se propone un algoritmo basado en un modelo de una red inmune artificial, que usando como función de aptitud una versión modificada de la distancia parcial de Hausdorff, permite encontrar la mejor transformación geométrica que relaciona dos conjuntos de puntos.

El algoritmo propuesto fue probado experimentalmente para evaluar la efectividad y velocidad de convergencia del mismo, obteniendo resultados satisfactorios.

Aunque el algoritmo propuesto puede ser aplicado a patrones definidos en espacios n -dimensionales, en el presente trabajo solo se presentan resultados para conjuntos de puntos en dos dimensiones, y transformaciones geométricas que contemplan traslaciones, rotaciones y escalamiento.

Palabras Clave—Emparejamiento de patrones de puntos, Hausdorff, Red Inmune Artificial, Optimización.

Abstract—Point matching is a process that consists in finding the correspondence between two point patterns looking for the optimal alignment of both point sets. The pattern matching has applications in areas such computer vision and pattern recognition.

In this paper, an artificial immune network based algorithm is proposed, which using as a fitness function a modified version of the partial Hausdorff distance, allows finding the best geometric transformation that relates two point sets.

The proposed algorithm was experimentally tested in order to evaluate its effectiveness and convergence speed, obtaining good results.

Although the proposed algorithm can be applied to n -dimensional patterns, this paper only presents results for two-dimensional point sets, and geometric transformations that consist on translations, rotations and scaling.

Keywords—Point Pattern Matching, Hausdorff, Artificial Immune Network, Optimization.

INTRODUCCIÓN

Encontrar la correspondencia entre dos patrones de puntos arbitrarios es una tarea frecuente en las áreas de visión artificial y reconocimiento de patrones. De manera formal este problema se resume a:

Dados dos conjuntos de puntos definidos en el espacio R^n se necesita determinar si existe una transformación geométrica dentro de un grupo de transformaciones definidas, que haga corresponder al primer conjunto (o al menos lo suficientemente cerca) con el segundo conjunto de puntos.

* Estudiantes miembros del Grupo de Investigación en Ingeniería Biomédica de la Universidad Industrial de Santander

** Profesor de planta, Escuela de Ingeniería de Sistemas e Informática, Universidad Industrial de Santander, Colombia