

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE MADRID

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR



PROYECTO FIN DE CARRERA

**ANÁLISIS DEL IMPACTO DE DISTINTAS ESTRATEGIAS DE
PREPROCESADO EN EL RENDIMIENTO DE UN SISTEMA DE
VERIFICACIÓN BASADO EN FIRMA DINÁMICA**

Leticia Peña Latorre

JUNIO 2015

ANÁLISIS DEL IMPACTO DE DISTINTAS ESTRATEGIAS DE PREPROCESADO EN EL RENDIMIENTO DE UN SISTEMA DE VERIFICACIÓN BASADO EN FIRMA DINÁMICA

AUTOR: Leticia Peña Latorre

TUTOR: Daniel Tapias Merino

PONENTE: Julián Fierrez Aguilar

Dpto. de Tecnología Electrónica y de las Comunicaciones

Escuela Politécnica Superior

Universidad Autónoma de Madrid

Junio de 2015

Resumen

En este proyecto se estudia el rendimiento de un sistema de reconocimiento biométrico basado en firma dinámica, en presencia de diversas transformaciones geométricas en las firmas usadas para testear. El objetivo es ver cómo afectan estas transformaciones al resultado de la verificación. Las transformaciones estudiadas han sido la rotación, la traslación y el escalado. Estas variaciones se dan habitualmente de forma natural en aplicaciones de verificación de firma en entornos móviles, hacia las que se desea orientar el estudio. Una vez analizado el impacto de estas variaciones en el rendimiento del sistema, se desarrollan diversos algoritmos de compensación de los efectos encontrados, con el objetivo de mejorar la robustez del sistema frente a estas posibles variaciones en la firma.

Como punto de partida del trabajo, se realiza en primer lugar un estudio teórico de las diferentes estrategias seguidas en la verificación de firma en general, y en particular en los sistemas que usan firma dinámica. En segundo lugar, se estudian con más detalle investigaciones ya existentes en la literatura relacionadas con el tema de estudio de este Proyecto.

Una vez analizada la parte teórica, se procede a realizar el desarrollo de los algoritmos necesarios, y, posteriormente, la parte experimental, realizada en dos etapas distintas, a las que se hace referencia durante todo el trabajo como entorno simulado y entorno real. Para cada etapa se usa una base de datos distinta, aunque ambas bases de datos usan el mismo Smartphone como dispositivo de captura, para no introducir variabilidades distintas a las que se desean estudiar.

Las firmas de la primera base de datos no contienen transformaciones geométricas de por sí, por lo que se desarrollan diversos algoritmos que aplican las transformaciones deseadas sobre las firmas de forma artificial, para después pasar a evaluar el rendimiento del sistema con cada transformación.

La segunda base de datos se graba específicamente para el objeto de estudio de este proyecto, por lo que se diseña de forma que las transformaciones aplicadas en la primera base de datos de forma artificial, están ya incluidas en esta base de datos en las propias firmas iniciales de los usuarios. El objetivo de la grabación de esta nueva base de datos es doble. Por un lado, contrastar los resultados obtenidos con las transformaciones artificiales en la primera base de datos, con los resultados obtenidos con las transformaciones naturales en la segunda base de datos. Por otro lado, estudiar qué ocurre con las características temporales cuando el usuario firma con un aspecto diferente al habitual. Por ejemplo, si el usuario firma sobre una superficie más grande, ¿la presión de su trazo será mayor o menor que si firma sobre una superficie más pequeña?, ¿y qué ocurrirá con la velocidad de su trazo?

Durante la parte de desarrollo de los algoritmos de transformaciones geométricas, se realizan diversas gráficas que permiten visualizar de forma simultánea la firma original y las resultantes de las diversas transformaciones. Asimismo, se realizan gráficas multiventana que permiten visualizar otras características de la firma, a parte del aspecto de ésta, como son la primera y segunda derivada de cada coordenada y de la presión, la velocidad del trazado o su aceleración. Por otro lado, los algoritmos de compensación de los efectos encontrados, se basan fundamentalmente en la realización de normalizaciones. Por eso, previamente al diseño y desarrollo de estos algoritmos, también deben realizarse unos

pequeños estudios estadísticos relativos a algunas características de las firmas (por ejemplo, situación 'habitual' del centro de masas).

Finalmente, se realiza una recopilación de todos los resultados obtenidos, y se generan diversas gráficas que permiten comparar fácilmente el rendimiento de cada conjunto de firmas, así como el impacto de las normalizaciones estudiadas. A partir de estos resultados se extraen conclusiones y así se pueden también establecer posibles líneas de trabajo futuro.

Palabras clave

Sistema biométrico, reconocimiento de firma, firma dinámica, DTW (Dynamic Time Warping), preprocesado, normalización, transformación geométrica, rotación, inclinación, traslación, escalado, tamaño.

Abstract

This thesis is focused on the performance analysis of a biometric system based on dynamic signature in presence of several geometric transformations in the signatures used to test. The aim is to study the influence of these transformations in the result of the verification. The analyzed transformations are rotation, translation and scaling. These transformations occur naturally in signature verification applications in mobile environments. Once analyzed the effect of these variations in the system performance, several compensation algorithms are developed, with the aim of improving the robustness of the system to these possible transformations in signatures.

As a starting point for this analysis, it is performed a study of the state of the art of the different strategies implemented in signature verification systems in general, and, particularly, in the ones using dynamic signature (on-line signature). After this, it is performed a review on the previously existing research related to the subject matter of the present work.

Once analyzed the state of the art, the necessary algorithms are developed, and, after that, the testing process is performed. The experiments are divided in two phases, referred to herein as 'simulated environment' and 'real environment'. For each phase, it is used a different database, although both databases are recorded using the same device for the signatures acquisition, in order not to introduce additional variability due to external conditions, different to the aspects that are wanted to be studied.

In the first database, the signatures do not have any geometrical transformation themselves, so it is needed to develop several algorithms in order to artificially apply the desired transformations to the signatures. System performance after each transformation is assessed against initial performance.

The second database is captured specifically to the subject matter of the present work, so it is designed in such way that it contains itself the transformations artificially applied to the first database. There is a twofold objective in the acquisition of this database. Firstly, it allows to contrast the results obtained using the artificial transformations in the first database, with the results obtained using the natural transformations in the second database. Secondly, this database is used to analyze the behavior of the temporal features when the user performs its signature with an aspect slightly different to the usual. For instance, if the user signs on a bigger area, how is the pressure of its pen stroke? Is it higher or lower compared to the pressure when performing the signature in a smaller area? And, in the same way, what happens with the speed of the pen stroke?

Finally, the data of all the experiments is collected, analyzed and compared. Multiple graphs are developed in order to easily compare the performance of each signature set. Based on those results, the conclusions are drawn, and it also enables to establish future lines of work.

Key words

Biometric system, signature verification, dynamic signature, on-line signature, DTW, preprocessing, normalization, geometric transformation, rotation, translation, scaling, size.

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a mi tutor Daniel Tapias, por haberme brindado la oportunidad de realizar este Proyecto, y de esta forma haber podido profundizar en mis conocimientos sobre tratamiento de señales en general y, en concreto, sobre su aplicación a la verificación de firma. También quiero agradecer a los profesionales de Sigma Technologies que, de una forma u otra, me han apoyado durante la realización de este trabajo.

Como no, se merecen una mención especial en estas líneas de agradecimientos mis compañeros de carrera, con los que he pasado tantos momentos durante los últimos años. Gracias a ellos por animarme y por conseguir sacarme una sonrisa incluso durante esos largos días de prácticas y en las duras épocas de exámenes.

Pero, sin lugar a dudas, a las personas que más tengo que agradecer haber llegado hasta aquí, es a mi familia, y en especial a mis padres, ya que sin su apoyo incondicional y sus ánimos en los momentos más difíciles no hubiera conseguido superar estos duros años de carrera.

Muchas gracias a todos,

Leticia Peña Latorre

Junio 2015

TABLA DE CONTENIDO

Índice de figuras	14
Índice de tablas	18
1 Introducción	20
1.1 Motivación	20
1.2 Objetivos y enfoque	20
1.3 Metodología y plan de trabajo	21
1.4 Organización de la memoria	24
2 Estado del arte	25
2.1 Introducción	25
2.1.1 Biometría y modalidades biométricas: breve resumen.....	25
2.1.2 Peculiaridades de la firma como rasgo biométrico: retos.....	26
2.2 Sistemas de verificación de firma: características generales	27
2.2.1 Clasificación general	27
2.2.2 Medidas de error y rendimiento	29
2.3 Arquitectura de los sistemas de verificación de firma.....	32
2.3.1 Fases de un sistema de verificación de firma	32
2.3.2 Entrenamiento (<i>enrollement</i>).....	34
2.3.3 Preprocesado.....	34
2.3.4 Extracción de características	40
2.3.5 Cálculo de similitud (<i>matching</i>)	42
2.3.6 Bases de datos.....	47
2.4 Trabajos relacionados con el objeto de estudio de este Proyecto	48
3 Características del sistema estudiado y diseño experimental	50
3.1 Características básicas del sistema estudiado	50
3.2 Entorno simulado: <i>SigmaTech Basic</i>	50
3.2.1 Experimentos en este entorno.....	51
3.2.2 Protocolo experimental.....	52

3.3 Entorno real: <i>SigmaTech GDE</i>	54
3.3.1 Diseño y adquisición de la nueva base de datos.....	54
3.3.2 Experimentos en este entorno y protocolo experimental	58
3.4 Nomenclatura.....	59
4 Estudio y procesado previo de las Bases de Datos	60
4.1 BDD 1 (<i>SigmaTech Basic</i>).....	60
4.2 BDD 2 (<i>SigmaTech GDE</i>)	64
4.2.1 Conteo y acondicionamiento inicial	64
4.2.2 Estudio de las funciones temporales en los conjuntos de firmas escaladas	66
5 Desarrollo, pruebas y resultados	69
5.1 Entorno simulado: BDD 1 (<i>SigmaTech Basic</i>)	69
5.1.1 Evaluación inicial del sistema	69
5.1.2 Experimentos	70
5.2 Entorno real: BDD 2 (<i>SigmaTech GDE</i>)	80
5.2.1 Evaluación inicial del sistema	80
5.2.2 Experimentos	81
5.3 Comparación.....	89
6 Compensación de los efectos de las variaciones estudiadas	91
6.1 Algoritmos de compensación.....	91
6.1.1 Compensación de la influencia de la inclinación de la firma.....	91
6.1.2 Compensación de la influencia de la posición de la firma.....	94
6.1.3 Compensación de la influencia del tamaño de la firma.....	96
6.2 Rendimientos obtenidos tras las distintas compensaciones	100
6.2.1 Entorno simulado.....	101
6.2.2 Entorno real	104
7 Conclusiones y trabajo futuro.....	108
7.1 Conclusiones.....	108
7.2 Trabajo futuro	109

Glosario y acrónimos	111
Referencias	112
Anexos	116
Anexo A. Tablas de resultados	116
A.1 Resultados de los experimentos.....	116
A.2 Estudio estadístico de los centros de masas.....	118
A.3 Estudio de las funciones temporales en los conjuntos de firmas escaladas.....	120
A.4 Resultados de los algoritmos de compensación	130
A.5 Rendimiento del sistema tras aplicar los algoritmos de compensación.....	131
Anexo B. Presupuesto	134
Anexo C. Pliego de condiciones	135

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. DIAGRAMA TEMPORAL DE LA REALIZACIÓN DE LAS DISTINTAS TAREAS DEL PROYECTO.	23
FIGURA 2. CLASIFICACIÓN GENERAL DE LOS SISTEMAS DE VERIFICACIÓN DE FIRMA.....	29
FIGURA 3. EJEMPLO DE GRÁFICA DE LAS FUNCIONES DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD DE LAS PUNTUACIONES.....	30
FIGURA 4. EJEMPLO DE GRÁFICA QUE REPRESENTA LAS TASAS DE ERROR DE UN SISTEMA PARA CADA UMBRAL.	31
FIGURA 5. EJEMPLO DE CURVA ROC.....	31
FIGURA 6. EJEMPLO DE CURVA DET.	32
FIGURA 7. FASES DEL PROCESO DE VERIFICACIÓN.	33
FIGURA 8. FIRMAS CON DISTINTO <i>skew</i> . ADAPTADO DE [MAHANTA-DEKA, 2013].....	39
FIGURA 9. FIRMAS CON DISTINTO <i>slant</i> . ADAPTADO DE [MAHANTA-DEKA, 2013].....	39
FIGURA 10. CORRESPONDENCIA PUNTO A PUNTO USANDO DTW. DE [MARTINEZ-DIAZ, 2008].	44
FIGURA 11. ESTRUCTURA DE UN MODELO HMM DE IZQUIERDA A DERECHA DE N ESTADOS, CON M OBSERVABLES Y SIN SALTOS ENTRE ESTADOS. DE [MARTINEZ-DIAZ, 2008].	46
FIGURA 12. ESQUEMA DE LAS DIFERENTES ESTRATEGIAS POSIBLES PARA REALIZAR EL CÁLCULO DE SIMILITUD.	47
FIGURA 13. PROTOCOLO EXPERIMENTAL EN EL ENTORNO SIMULADO (BDD 1: <i>SIGMA TECH BASIC</i>).	53
FIGURA 14. DISEÑO BDD <i>SIGMA TECH GDE</i> : PANTALLA DE ADQUISICIÓN PARA LAS FIRMAS ESTÁNDAR	54
FIGURA 15. DISEÑO BDD <i>SIGMA TECH GDE</i> : PANTALLA DE ADQUISICIÓN PARA LAS FIRMAS INCLINADAS	55
FIGURA 16. DISEÑO BDD <i>SIGMA TECH GDE</i> : PANTALLA DE ADQUISICIÓN PARA LAS FIRMAS DESPLAZADAS (POSICIÓN SUPERIOR IZQUIERDA)	56
FIGURA 17. DISEÑO DE LA BDD <i>SIGMA TECH GDE</i> . PANTALLA DE ADQUISICIÓN PARA LAS FIRMAS ESCALADAS A RAZÓN DE 1,25	57
FIGURA 18. PROTOCOLO EXPERIMENTAL EN EL ENTORNO REAL (BDD 2: <i>SIGMA TECH GDE</i>).	58

FIGURA 19. ACONDICIONAMIENTO PREVIO DE LA <i>BDD SIGMATECH BASIC</i> : CAMBIO DE COORDENADAS Y.	61
FIGURA 20. CARACTERÍSTICAS INICIALES (GRABADAS DIRECTAMENTE DURANTE LA ADQUISICIÓN DE LA FIRMA) EN LA <i>BDD SIGMATECH BASIC</i>	62
FIGURA 21. CARACTERÍSTICAS DERIVADAS (CALCULADAS A PARTIR DE LAS GRABADAS DURANTE LA ADQUISICIÓN DE LA FIRMA) EN LA <i>BDD SIGMATECH BASIC</i>	63
FIGURA 22. CARACTERÍSTICAS INICIALES (GRABADAS DIRECTAMENTE DURANTE LA ADQUISICIÓN DE LA FIRMA) EN LA <i>BDD SIGMATECH GDE</i>	65
FIGURA 23. CARACTERÍSTICAS DERIVADAS (CALCULADAS A PARTIR DE LAS GRABADAS DURANTE LA ADQUISICIÓN DE LA FIRMA) EN LA <i>BDD SIGMATECH GDE</i>	66
FIGURA 24. VELOCIDAD Y PRESIÓN MEDIAS DE CADA CONJUNTO DE FIRMAS GRABADAS SOBRE RECUADROS DE DISTINTAS DIMENSIONES.	67
FIGURA 25. EVALUACIÓN INICIAL DEL SISTEMA CON LA <i>BDD SIGMATECH BASIC</i>	70
FIGURA 26. FIRMA ORIGINAL (EN AZUL) Y SUS VERSIONES GIRADAS SEGÚN DISTINTOS ÁNGULOS (15°, 30° Y 45°).	71
FIGURA 27. FIRMA ORIGINAL (EN AZUL) Y SUS VERSIONES DESPLAZADAS HACIA DISTINTAS DIRECCIONES (SERIE EN ‘ASPA’ ARRIBA, Y SERIE EN ‘CRUZ’ ABAJO).	72
FIGURA 28. FIRMA ORIGINAL (EN AZUL) Y SUS VERSIONES ESCALADAS SEGÚN DISTINTAS RAZONES.....	73
FIGURA 29. RENDIMIENTO CON LAS FIRMAS DE LA <i>BDD SIGMATECH BASIC</i> ROTADAS (ENTORNO SIMULADO).	74
FIGURA 30. DEPENDENCIA DE LA EER CON EL GIRO DE LA FIRMA EN LA <i>BDD SIGMATECH BASIC</i> (ENTORNO SIMULADO).	75
FIGURA 31. RENDIMIENTO CON LAS FIRMAS DE LA <i>BDD SIGMATECH BASIC</i> DESPLAZADAS (ENTORNO SIMULADO).	76
FIGURA 32. DEPENDENCIA DE LA EER CON EL DESPLAZAMIENTO EN X, Y SEGÚN LOS DISTINTOS DESPLAZAMIENTOS EN Y, EN LA <i>BDD SIGMATECH BASIC</i> (ENTORNO SIMULADO).....	77
FIGURA 33. RENDIMIENTO DE LAS FIRMAS DE LA <i>BDD SIGMATECH BASIC</i> ESCALADAS (ENTORNO SIMULADO).	78
FIGURA 34. DEPENDENCIA DE LA EER CON EL TAMAÑO DE LA FIRMA EN LA <i>BDD SIGMATECH BASIC</i> (ENTORNO SIMULADO).	79
FIGURA 35. EVALUACIÓN INICIAL DEL SISTEMA CON LAS FIRMAS ESTÁNDAR DE LA <i>BDD SIGMATECH GDE</i>	80

FIGURA 36. FIRMAS GRABADAS SOBRE LÍNEAS DE DISTINTAS INCLINACIONES EN LA BDD <i>SIGMATECH GDE</i>	81
FIGURA 37. CURVAS DET SEGÚN LA INCLINACIÓN DE LA LÍNEA DE GUÍA UTILIZADA PARA FIRMAR EN LA BDD <i>SIGMATECH GDE</i>	82
FIGURA 38. DEPENDENCIA DE LA EER CON LA INCLINACIÓN DE LA LÍNEA DE GUÍA PARA FIRMAR EN LA BDD <i>SIGMATECH GDE</i>	83
FIGURA 39. FIRMAS GRABADAS SOBRE LOS RECUADROS EN DISTINTAS POSICIONES EN LA BDD <i>SIGMATECH GDE</i>	85
FIGURA 40. RENDIMIENTO DE LAS FIRMAS GRABADAS SOBRE LAS DISTINTAS POSICIONES EN LA BDD <i>SIGMATECH GDE</i>	86
FIGURA 41. FIRMAS GRABADAS SOBRE RECUADROS DE DISTINTAS DIMENSIONES EN LA BDD <i>SIGMATECH GDE</i>	87
FIGURA 42. RENDIMIENTO DE LAS FIRMAS GRABADAS SOBRE LOS RECUADROS DE DISTINTAS DIMENSIONES EN LA BDD <i>SIGMATECH GDE</i>	88
FIGURA 43. DEPENDENCIA DE LA EER CON LAS DIMENSIONES DEL RECUADRO PARA FIRMAR EN LA BDD <i>SIGMATECH GDE</i>	89
FIGURA 44. COMPARATIVA DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN CADA UNO DE LOS ENTORNOS DE EXPERIMENTACIÓN.....	90
FIGURA 45. CÁLCULO DE LA INCLINACIÓN DE LAS FIRMAS DEL MODELO DE CADA FIRMANTE POR EL MÉTODO DE REGRESIÓN LINEAL.	92
FIGURA 46. DETECCIÓN Y CORRECCIÓN DE GIRO POR EL MÉTODO DE REGRESIÓN LINEAL.....	93
FIGURA 47. ERROR ABSOLUTO DEL ALGORITMO DE DETECCIÓN DE ÁNGULO IMPLEMENTADO.	94
FIGURA 48. NORMALIZACIÓN DE POSICIÓN INDEPENDIENTE DE USUARIO.	95
FIGURA 49. NORMALIZACIÓN DE POSICIÓN DEPENDIENTE DE USUARIO.	96
FIGURA 50. PROTOCOLO DE MEDIDA DE LOS LADOS DE UNA FIRMA.	97
FIGURA 51. EFECTO DE DEFORMACIÓN NATURAL EN FIRMAS GENUINAS.	98
FIGURA 52. RENDIMIENTO DEL ALGORITMO DE DETECCIÓN DE ESCALADO.....	98
FIGURA 53. EJEMPLO DE LA DETECCIÓN Y CORRECCIÓN DE ESCALADO.	99
FIGURA 54. PROCESO PARA EL CÁLCULO DEL RENDIMIENTO TRAS LAS COMPENSACIONES DE LOS EFECTOS GEOMÉTRICOS ESTUDIADAS.	100

FIGURA 55. RENDIMIENTO TRAS LA DETECCIÓN Y CORRECCIÓN DE GIRO EN EL ENTORNO SIMULADO.	101
FIGURA 56. RENDIMIENTO TRAS LA NORMALIZACIÓN DE POSICIÓN EN EL ENTORNO SIMULADO, FRENTE A LOS DISTINTOS DESPLAZAMIENTOS ESTUDIADOS.....	102
FIGURA 57. RENDIMIENTO DEL SISTEMA TRAS LA DETECCIÓN Y CORRECCIÓN DE ESCALADO EN EL ENTORNO SIMULADO.	103
FIGURA 58. RENDIMIENTO DEL SISTEMA TRAS LA DETECCIÓN Y CORRECCIÓN DE GIRO EN EL ENTORNO REAL.	104
FIGURA 59. RENDIMIENTO DEL SISTEMA TRAS LA DETECCIÓN Y CORRECCIÓN DE ESCALADO EN EL ENTORNO REAL.	105
FIGURA 60. RENDIMIENTO DEL SISTEMA TRAS LA NORMALIZACIÓN DE DESPLAZAMIENTO DEPENDIENTE DE USUARIO EN EL ENTORNO REAL.	106
FIGURA 61. RENDIMIENTO DEL SISTEMA TRAS LA NORMALIZACIÓN DE DESPLAZAMIENTO INDEPENDIENTE DE USUARIO EN EL ENTORNO REAL.	107
FIGURA 62. FUNCIONES DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD DE LOS CENTROS DE MASAS DE LAS FIRMAS EN LA BDD SIGMA TECH BASIC.....	119
FIGURA 63. PERFILES DE LA VELOCIDAD PARA LAS CUATRO PRIMERAS REALIZACIONES DE LA PRIMERA SESIÓN DE LOS DISTINTOS CONJUNTOS DE FIRMAS ESCALADAS: MUESTRA 1.	121
FIGURA 64. PERFILES DE LA VELOCIDAD PARA LAS CUATRO PRIMERAS REALIZACIONES DE LA PRIMERA SESIÓN DE LOS DISTINTOS CONJUNTOS DE FIRMAS ESCALADAS: MUESTRA 2.	123
FIGURA 65. PERFILES DE LA VELOCIDAD PARA LAS CUATRO PRIMERAS REALIZACIONES DE LA PRIMERA SESIÓN DE LOS DISTINTOS CONJUNTOS DE FIRMAS ESCALADAS: MUESTRA 3.	124
FIGURA 66. PERFILES DE LA PRESIÓN PARA LAS CUATRO PRIMERAS REALIZACIONES DE LA PRIMERA SESIÓN DE LOS DISTINTOS CONJUNTOS DE FIRMAS ESCALADAS: MUESTRA 1.	126
FIGURA 67. PERFILES DE LA PRESIÓN PARA LAS CUATRO PRIMERAS REALIZACIONES DE LA PRIMERA SESIÓN DE LOS DISTINTOS CONJUNTOS DE FIRMAS ESCALADAS: MUESTRA 2.	127
FIGURA 68. PERFILES DE LA PRESIÓN PARA LAS CUATRO PRIMERAS REALIZACIONES DE LA PRIMERA SESIÓN DE LOS DISTINTOS CONJUNTOS DE FIRMAS ESCALADAS: MUESTRA 3.	129

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. RESUMEN DE LAS IMPLICACIONES DEL ESCALADO DE FIRMA.	36
TABLA 2. RESUMEN DE LAS IMPLICACIONES DE LA TRASLACIÓN DE FIRMA.	37
TABLA 3. TABLA RESUMEN DE LAS IMPLICACIONES DE LA ROTACIÓN DE FIRMA.	37
TABLA 4. TABLA RESUMEN DE LAS IMPLICACIONES DEL <i>SLANT</i> EN LA FIRMA.	38
TABLA 5. DESPLAZAMIENTOS ESTUDIADOS EN LA BDD <i>SIGMA</i> TECH BASIC.	51
TABLA 6. NOMENCLATURA PARA INDICAR LA TRANSFORMACIÓN APLICADA.	59
TABLA 7. NOMENCLATURA DE LOS CONJUNTOS DE FIRMAS TRAS LOS ALGORITMOS DE COMPENSACIONES GEOMÉTRICAS.	100
TABLA 8. EFECTO DE LA INCLINACIÓN DE LA FIRMA EN EL RENDIMIENTO DEL SISTEMA.	116
TABLA 9. EFECTO DEL TAMAÑO DE LA FIRMA EN EL RENDIMIENTO DEL SISTEMA.	117
TABLA 10. EFECTO DE LA POSICIÓN DE LA FIRMA EN EL RENDIMIENTO DEL SISTEMA.	117
TABLA 11. DATOS ESTADÍSTICOS DE LAS DISTRIBUCIONES DE LOS CENTROS DE MASAS DE LAS FIRMAS EN LA BDD <i>SIGMA</i> TECH BASIC.	119
TABLA 12. RENDIMIENTO DEL ALGORITMO DE DETECCIÓN DE GIRO POR REGRESIÓN LINEAL.	130
TABLA 13. RENDIMIENTO DEL ALGORITMO DE DETECCIÓN DE ESCALADO IMPLEMENTADA.	130
TABLA 14. RENDIMIENTO DEL SISTEMA TRAS APLICAR LA COMPENSACIÓN DE INCLINACIÓN.	131
TABLA 15. RENDIMIENTO DEL SISTEMA TRAS APLICAR NORMALIZACIÓN DE POSICIÓN INDEPENDIENTE DE USUARIO.	132
TABLA 16. RENDIMIENTO DEL SISTEMA TRAS APLICAR NORMALIZACIÓN DE POSICIÓN DEPENDIENTE DE USUARIO.	132
TABLA 17. RENDIMIENTO DEL SISTEMA TRAS APLICAR LA CORRECCIÓN DE ESCALADO.	133

1 INTRODUCCIÓN

1.1 MOTIVACIÓN

Los sistemas biométrico-conductuales basados en firma han sido un objeto de estudio continuo en las últimas décadas debido a su amplia utilidad y a su alto grado de aceptación por parte de los usuarios. Las razones fundamentales de este hecho son las siguientes:

- La firma ha sido usada desde hace siglos para validar autoría o aceptación de documentos y transacciones, por lo que la utilización de un sistema que realice automáticamente la tarea de identificación o verificación de un usuario mediante su firma supone una gran ventaja.
- Por otro lado, actualmente, la mayoría de los sistemas que realizan este proceso automáticamente tienen en cuenta para ello características que van más allá de la simple forma de la firma. Esto hace que el proceso de verificación sea mucho más seguro y eficaz que si se realizase de forma tradicional por parte de una persona.
- Además, el uso masivo de Internet y la utilización cada vez más frecuente de la Red para realizar operaciones que en la vida cotidiana requieren de una firma para su validación (movimientos bancarios, solicitudes administrativas, etc.) hacen necesario el uso de sistemas automáticos de verificación de firma.

Todas las razones anteriores hacen que este tipo de sistemas estén cada vez más presentes en nuestra vida diaria, siendo necesario su estudio y perfeccionamiento continuo.

1.2 OBJETIVOS Y ENFOQUE

Si bien es cierto que los sistemas de verificación automática de firma funcionan aceptablemente en la actualidad, aún se presentan algunos problemas. Este Proyecto se encuadra en el campo de la investigación aplicada, ya que se abordarán algunos de los problemas que se dan cuando la tecnología de verificación de firma se usa en aplicaciones reales.

En este sentido, hay que tener en cuenta el uso cada vez más frecuente de dispositivos portátiles. Cada vez más habitualmente la adquisición de la firma a verificar se lleva a cabo mediante este tipo de dispositivos, los cuales no siempre ofrecen las condiciones óptimas para llevar a cabo una adquisición de firma de buena calidad. Algunos problemas que se encuentran frecuentemente son por ejemplo el no disponer de una superficie fija sobre la que apoyarse mientras se firma, o bien que el espacio disponible para firmar es demasiado pequeño. Por otro lado, la capacidad de almacenamiento y de procesado es limitada en los dispositivos

móviles, lo cual implica un reto ya que los sistemas de verificación actuales deben adaptarse a este tipo de restricciones.

Esto supone la necesidad de llevar a cabo un preprocesado previo de la firma adquirida con el doble objetivo de, por un lado, eliminar la influencia de factores externos en el posterior proceso de verificación, y, por otro lado, preparar los datos para que el posterior proceso de verificación sea lo más simple posible. El preprocesado se lleva a cabo inmediatamente después de la adquisición de la firma **[Fierrez y Ortega-García, 2007b]**, y es previo al comienzo del proceso de verificación en sí. Como parte del preprocesado, se pueden llevar a cabo diversas tareas, que pueden englobarse fundamentalmente en tres grandes bloques: tratamiento de la imagen, remuestreo y normalización.

Este Proyecto se centrará en el estudio de estrategias que tienen que ver con la normalización, cuyo objetivo es lograr la invariancia del sistema a los fenómenos de escalado, rotación y traslación de la firma. La normalización permite la adaptación de los sistemas de verificación de firma a escenarios reales, que actualmente están basados en gran medida en dispositivos portátiles, como ya se ha mencionado antes. Por otro lado, también permite la utilización de los sistemas de verificación de firma en aplicaciones que integran firmas procedentes de distintas bases de datos. Sin embargo, a pesar de estas ventajas, la normalización también puede acarrear algunos problemas en el rendimiento del sistema, debido a la posible eliminación de rasgos propios y característicos de la persona que firma.

Dadas las premisas que se acaban de presentar, los objetivos de este Proyecto de Fin de Carrera son fundamentalmente los siguientes:

- 1) Realizar un análisis del impacto que tienen distintos fenómenos derivados de las condiciones de adquisición en el posterior proceso de verificación.
- 2) Tratar de compensar el efecto de dichos fenómenos mediante un preprocesado adecuado a las circunstancias. Se evaluará el impacto de distintas estrategias de normalización en el rendimiento final del proceso de verificación. El objetivo final es determinar de qué forma se obtiene un mejor rendimiento del sistema de verificación.

1.3 METODOLOGÍA Y PLAN DE TRABAJO

En la figura 1 se incluye el diagrama de cómo se han organizado las tareas realizadas sobre una escala temporal, desde el inicio del Proyecto, hasta la entrega de la memoria y su presentación.

Se han contabilizado unas 27 horas de dedicación semanales (108 mensuales) durante los meses que figuran entre la presentación del Anteproyecto y la entrega de la memoria (septiembre 2014 – junio 2015 aproximadamente). De esta forma se han calculado un total de aproximadamente 1080 horas dedicadas al Proyecto, sin tener en cuenta en este cómputo las horas dedicadas a formación inicial, investigación sobre trabajos previamente realizados, definición de alcance y objetivos y redacción del Anteproyecto. Estas tareas se presentan en verde en el diagrama temporal. Las tareas relacionadas con el desarrollo de algoritmos se presentan en azul oscuro, mientras que las relacionadas con la realización de los experimentos (ejecución de los algoritmos implementados con los distintos conjuntos de firmas) se presentan en morado. Las tareas de realización de la memoria se presentan en azul claro. Las tareas externas (necesarias para la realización del Proyecto, pero realizadas por otras personas) se presentan en gris. Otro tipo de tareas (relacionadas fundamentalmente con la grabación de una nueva base de datos de firmas) se presentan en color rojo.



Figura 1. Diagrama temporal de la realización de las distintas tareas del Proyecto.

1.4 ORGANIZACIÓN DE LA MEMORIA

A lo largo del capítulo 2 del presente documento se realiza un estudio general del estado del arte, analizando diversas estrategias existentes para la resolución de cada una de las etapas de las que consta un sistema de verificación de firma. Posteriormente, se aborda más en profundidad la fase de preprocesado, haciendo referencia a trabajos existentes en la literatura relacionados con el estudio que se realiza en este Proyecto.

Durante el capítulo 3, se define el alcance experimental del Proyecto, determinando para ello las pruebas a realizar. Se diseña una metodología que permite analizar de forma rigurosa el impacto de los distintos fenómenos derivados de las condiciones de adquisición en el rendimiento del posterior proceso de verificación. Del mismo modo, se presentan las características básicas del sistema que se utiliza durante el Proyecto.

En el capítulo 4 se describen los desarrollos realizados previamente al inicio de los experimentos en sí. En este sentido, se explica en primer lugar el estudio y procesado previo de cada una de las bases de datos utilizadas. En el capítulo 5 se presentan los resultados de la evaluación inicial del sistema con cada BDD. Además, se explican los desarrollos que se llevan a cabo para realizar las distintas transformaciones geométricas sobre las firmas estudiadas, y también los resultados obtenidos en los diversos experimentos realizados, con cada una de las bases de datos.

Una vez que ya se sabe cómo afectan las diversas transformaciones geométricas al rendimiento del sistema, se describe, durante el capítulo 6, la parte de compensación de estos efectos. Por último, en el capítulo 7 se hace un resumen de las conclusiones obtenidas a partir de los resultados del Proyecto, en base a los rendimientos obtenidos en los distintos escenarios. También se hacen alusiones a las posibles líneas de investigación futura que deja abiertas este Proyecto.

2 ESTADO DEL ARTE

En esta sección se hará un resumen del estado del arte, desde lo más genérico (biometría en conjunto), hasta lo más específico (algoritmos implementados en cada fase de un sistema biométrico de verificación de firma). El objetivo es dar una idea de la amplitud del campo de la biometría, y, en concreto, de la verificación de firma. No se pretende explicar detalladamente el funcionamiento de cada algoritmo existente, pues la cantidad de estrategias posibles para la resolución de cada etapa son innumerables. Se explicarán con más detalle las partes relacionadas con el estudio que se desea realizar (sección dedicada al preprocesado). Por último, se incluye una sección en la que se presentan los trabajos que se han encontrado en la literatura relacionados con los experimentos que desean realizarse.

2.1 INTRODUCCIÓN

2.1.1 BIOMETRÍA Y MODALIDADES BIOMÉTRICAS: BREVE RESUMEN

La biometría es la ciencia dedicada a medir y analizar datos biológicos. Referida al campo de las tecnologías de la información, la biometría hace alusión a los sistemas que miden y analizan características del cuerpo humano a efectos de identificación o verificación.

Las modalidades biométricas son muy variadas y se dividen en dos grandes grupos, según midan características puramente físicas o anatómicas de un individuo, o bien características conductuales. Al primer grupo pertenecen por ejemplo la huella dactilar, el iris o la retina, la geometría de la mano o los patrones de las venas, el ADN o los rasgos faciales. Las características conductuales se refieren a cómo un individuo lleva a cabo una determinada acción, y entre ellas se encuentran la voz, la firma, la forma de andar o el patrón de escritura en teclado.

Determinar el mejor rasgo biométrico a usar en una aplicación concreta en ocasiones no resulta fácil. Para ello, se comparan las distintas modalidades biométricas en términos de **universalidad** (referido a si todas las personas poseen o no ese rasgo biométrico), **individualidad** (relativo al poder discriminativo entre distintas personas de ese rasgo biométrico), **facilidad de adquisición**, **aceptabilidad** (referido a la percepción social de esa modalidad biométrica), **rendimiento** (relativo a diversos factores como el tiempo de procesado o la precisión en los resultados), **resistencia a falsificaciones**, **permanencia en el tiempo**, etc. Cada rasgo biométrico destaca en algunas de las características mencionadas, pero no hay ninguno que sobresalga en todas ellas frente a todas las demás modalidades. En el caso concreto de la firma, las características en las que destaca claramente frente al resto de modalidades biométricas son la facilidad de adquisición y el alto grado de aceptación por parte de los usuarios.

Cuando un sistema biométrico se usa con el objetivo de **identificación**, se produce una comparación 1:N, entre el rasgo biométrico adquirido de la persona a la que intenta identificarse y cada uno de los modelos entrenados y almacenados en la base de datos. Por otro lado, cuando las técnicas biométricas se usan con el propósito de verificación se lleva a cabo una comparación 1:1, entre el rasgo biométrico adquirido de la persona que dice ser un individuo concreto y el modelo entrenado y almacenado en la base de datos del individuo que dice ser esa persona. Los sistemas biométricos basados en firma suelen usarse más comúnmente con la finalidad de **verificación** (también conocida como autenticación), y, por tanto, en las siguientes alusiones a lo largo de este documento se hablará siempre de verificación.

2.1.2 PECUALIARIDADES DE LA FIRMA COMO RASGO BIOMÉTRICO: RETOS

Los sistemas biométricos de verificación basados en firma se enfrentan a diversos desafíos tecnológicos, ligados fundamentalmente a los tres puntos que se enumeran a continuación:

- Alta variabilidad intra-usuario.

Por contraposición a lo que ocurre con otros rasgos biométricos, en los sistemas basados en firma la variabilidad entre firmas verdaderas de un mismo usuario puede ser muy alta. Esto se debe al hecho ya mencionado antes de que la firma es un rasgo biométrico conductual y no anatómico.

Además, hay que tener en cuenta factores que pueden agravar este problema, como son los debidos a las condiciones de adquisición, especialmente en el caso de que ésta se produzca mediante un dispositivo portátil. En ese caso, la ergonomía singular (no disponer de una superficie fija sobre la que apoyarse, espacio disponible para firmar demasiado pequeño, etc) y, en su caso, la falta de familiaridad con el dispositivo y la superficie de firma, suponen obstáculos que afectan al posterior proceso de verificación.

Por otro lado, también hay que tener en cuenta la variabilidad intra-usuario debida al paso del tiempo, que se conoce como variabilidad inter-sesión, y que también puede llegar a ser muy alta. Para minimizar el efecto de ésta, las firmas necesarias para el entrenamiento de una base de datos suelen tomarse en varias sesiones distintas. Cuanto más separadas en el tiempo sean estas sesiones, se tendrá un entrenamiento de la base de datos más preciso, y, como resultado, un sistema más robusto al paso del tiempo.

La variabilidad intra-usuario es muy difícil de modelar, ya que para ello se necesitaría una cantidad ingente de datos de entrenamiento (es decir, muchas muestras de un mismo firmante), realizadas en muchas sesiones distintas muy separadas en el tiempo. Esto generalmente no es posible, ya que un proceso de entrenamiento exhaustivo de la base de datos requiere mucho tiempo por parte de los usuarios, por lo que estos son reacios a colaborar.

- Baja variabilidad inter-usuario.

A diferencia de lo que sucede en otras modalidades biométricas, en el caso de la firma la variabilidad inter-usuario puede llegar a ser muy baja, especialmente en el caso de falsificaciones. En el caso de que el impostor haya tenido acceso visual al proceso de firma del usuario verdadero, la situación se puede complicar mucho dada la pericia de algunos de estos falsificadores.

Tal y como ocurría con la variabilidad intra-usuario, la variabilidad inter-usuario también es difícil de modelar. En este sentido, hay que tener en cuenta que, cuando se diseña un sistema, no pueden controlarse las falsificaciones, ya que normalmente no se tiene información previa de los impostores, sino que estos pueden aparecer en cualquier momento una vez que el sistema está ya implantado.

2.2 SISTEMAS DE VERIFICACIÓN DE FIRMA: CARACTERÍSTICAS GENERALES

2.2.1 CLASIFICACIÓN GENERAL

Los sistemas de verificación de firma pueden dividirse fundamentalmente en dos tipos, que se detallan a continuación.

2.2.1.1 *Sistemas estáticos u off-line*

Para el proceso de verificación usan imágenes estáticas, tal y como indica su nombre. Es decir, en este tipo de sistemas no se toman datos temporales durante la adquisición, ya que generalmente la firma adquirida se trata simplemente de una imagen escaneada a partir de una firma realizada en papel. Dentro de estos sistemas, hay varias estrategias para llevar a cabo el proceso de verificación, las cuales pueden dividirse en dos grandes bloques:

- Sistemas off-line basados en características globales.

La verificación se basa en técnicas de reconocimiento de patrones, ampliamente usadas en tratamiento de imágenes [Sabourin, 1997]. Es decir, se estudia la forma o apariencia de la firma.

- Sistemas off-line basados en características locales.

En este caso la verificación se basa en características de la firma tales como el trazo, la textura o la información estructural.

Además, cabe mencionar que en la literatura también pueden encontrarse estudios que combinan características locales y globales, entre los que se encuentra **[Fierrez-Aguilar et al., 2004]**.

2.2.1.2 Sistemas dinámicos u on-line

En este tipo de sistemas, además de la propia imagen de la firma, se dispone de datos temporales. Durante el proceso de adquisición (llevado a cabo mediante tabletas digitalizadoras o pantallas táctiles) se almacenan vectores de características en función del tiempo. Hay dos tipos de estrategias para la autenticación mediante firma en sistemas on-line:

- Verificación on-line basada en características (*feature-based systems*).
A este tipo de sistemas también se les conoce como sistemas basados en parámetros, o sistemas dinámicos basados en características globales. En ellos, las firmas son descritas a través de vectores holísticos multidimensionales (vectores de características). Algunas de las características habituales son por ejemplo la duración de la firma, la velocidad media, o el número de alzamientos (del bolígrafo sobre la superficie de firma).
- Verificación on-line basada en funciones (*function-based systems*).
A este tipo de sistemas también se les conoce como sistemas dinámicos basados en características locales. En este tipo de sistemas, las firmas se describen a través de un conjunto de secuencias temporales.
Algunas de las funciones temporales que se utilizan son básicas, es decir, señales directamente obtenidas con el dispositivo de adquisición utilizado. Entre las funciones básicas suelen encontrarse generalmente: la trayectoria en x, la trayectoria en y, la presión, y, en algunas situaciones (según lo completo que sea el dispositivo de adquisición), la inclinación del bolígrafo sobre la superficie **[Fierrez-Aguilar et al., 2005a]**. A partir de estas funciones temporales básicas (directamente adquiridas), pueden calcularse muchas otras secuencias temporales, a las que se conoce como funciones derivadas. Entre éstas se encuentran, por ejemplo, las primeras derivadas de cada coordenada, la primera derivada de la presión, o la velocidad y la aceleración en cada punto de la trayectoria.

Generalmente, los sistemas basados en funciones temporales dan un mejor resultado que los basados en características globales. También hay sistemas mixtos, que realizan la verificación a partir tanto de características locales como de funciones temporales, como el que se estudia en **[Fierrez-Aguilar et al., 2005a]**.

2.2.1.3 Resumen de la clasificación general de los sistemas de verificación de firma

Actualmente, los los sistemas estáticos están prácticamente en desuso. Con los dinámicos se obtienen mejores rendimientos, ya que se dispone de mucha más información a parte de la que es puramente la apariencia de la firma. Durante este proyecto, el sistema utilizado es un sistema dinámico, por lo que de aquí en adelante se explicará todo referido a este tipo de sistemas. Se incluye el diagrama de la figura 2 a modo de resumen de la clasificación de los sistemas de verificación de firma, explicada durante esta sección.

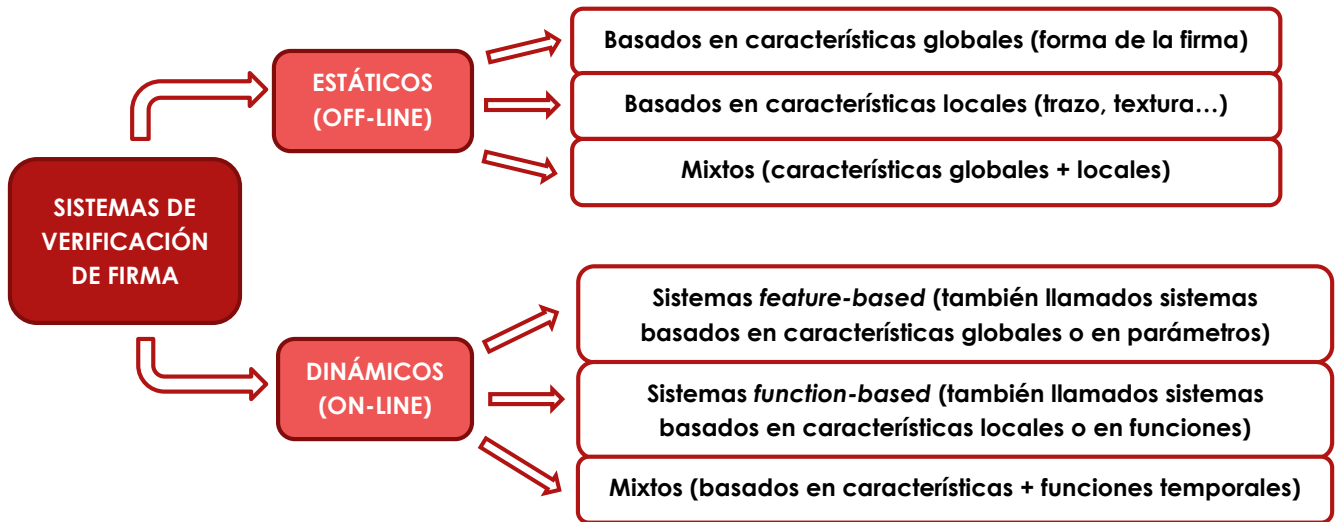


Figura 2. Clasificación general de los sistemas de verificación de firma.

El sistema que se utilizará durante este PFC es *function-based*.

2.2.2 MEDIDAS DE ERROR Y RENDIMIENTO

Tras las diversas etapas del proceso de verificación (que serán detalladas en el punto 2.3), se obtiene como resultado un score (puntuación), que determina el grado de similitud entre la firma adquirida y el modelo existente en la base de datos para la identidad reclamada por el usuario. La aceptación o no del usuario como válido depende de si el score obtenido está por encima o por debajo de un cierto umbral establecido. Por tanto, puede haber dos tipos de errores en un sistema de verificación:

- **Falsa Aceptación (FA)**, que se da cuando un impostor consigue que el sistema le acepte válidamente como el usuario que dice ser.
- **Falso Rechazo (FR)**, que se da cuando un usuario verdadero es rechazado por el sistema, considerándolo como si fuese un impostor.

La magnitud de estos errores en un sistema dado y para cada umbral elegido puede visualizarse representando las Funciones de Densidad de Probabilidad (FDPs) para las puntuaciones de usuarios verdaderos (genuinos) y para las puntuaciones de usuarios falsos (forgeries). El diagrama de la figura 3 ejemplifica una gráfica de este tipo.

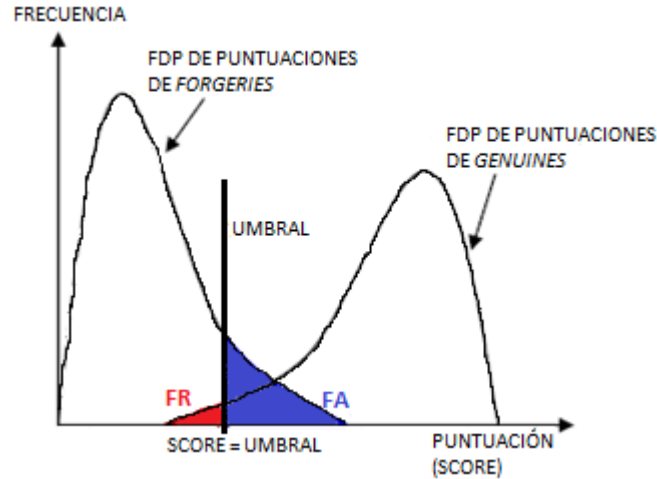


Figura 3. Ejemplo de gráfica de las Funciones de Densidad de Probabilidad de las puntuaciones.

Posteriormente, se pueden calcular las tasas asociadas a estos dos tipos de error (FA y FR), con series de pruebas para un determinado número de usuarios verdaderos y de impostores. Estas tasas de error se denominan con sus siglas en inglés: **FAR (False Acceptance Rate)**, y **FRR (False Rejection Rate)**. Al variar el umbral, las tasas de error cambian. Por un lado, si se aumenta el umbral, habrá menos falsas aceptaciones (FAR disminuye), pero también habrá más falsos rechazos (FRR aumenta). Por contraposición, disminuir el umbral aumentaría la FAR y disminuiría la FRR. Por tanto, el umbral supone un compromiso, y encontrar el punto óptimo para un determinado sistema es clave para lograr un buen rendimiento de éste.

Para comparar el rendimiento de distintos sistemas biométricos, a menudo se utiliza una tasa conocida también por sus siglas en inglés, la **EER (Equal Error Rate)**. La EER se refiere a la tasa de error de un sistema cuando el umbral se ha fijado de tal forma que la tasa de falsas aceptaciones y la tasa de falsos rechazos sean iguales ($FAR = FRR$).

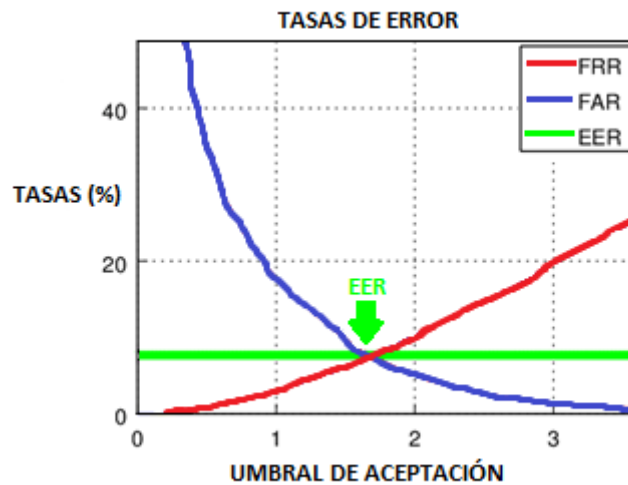


Figura 4. Ejemplo de gráfica que representa las tasas de error de un sistema para cada umbral.

Otra forma típica de presentar el rendimiento de un sistema biométrico es mediante las curvas ROC (*Receiver Operating Characteristic*) o mediante las curvas DET (*Detection Error Tradeoff*). Este tipo de gráficas permite una fácil comparación entre los sistemas para cualquier umbral de decisión. Se explican a continuación, con un ejemplo de cada una:

- Curva ROC.

Se representa la FAR en función de $(1-FRR)$, o bien la FAR en función de la FRR, tal y como se muestra en la figura 5.

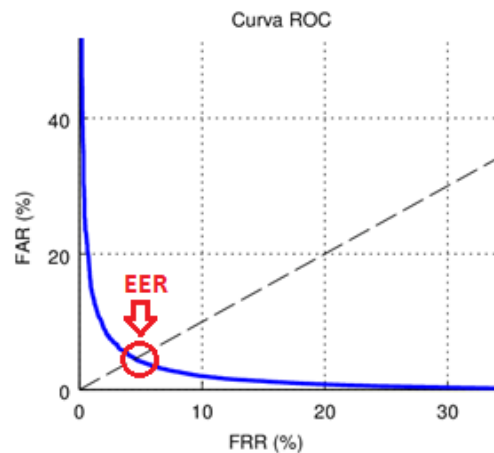


Figura 5. Ejemplo de curva ROC.

- Curva DET.

En este tipo de gráfica, se representa lo mismo que en las curvas ROC, pero en este caso se realiza un cambio de escala en los ejes, que permite visualizar mejor las tasas para las

magnitudes que suelen manejarse en los sistemas de verificación de firma, tal y como se observa en la figura 6.

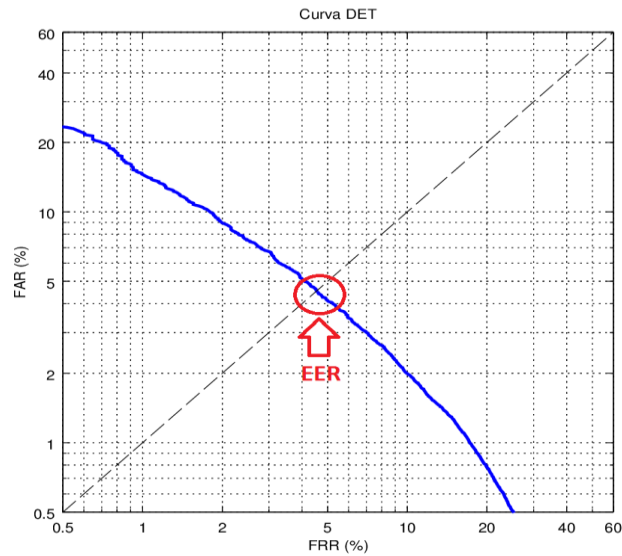


Figura 6. Ejemplo de curva DET.

2.3 ARQUITECTURA DE LOS SISTEMAS DE VERIFICACIÓN DE FIRMA

2.3.1 FASES DE UN SISTEMA DE VERIFICACIÓN DE FIRMA

Las fases típicas de un sistema de verificación de firma son las que se muestran en el diagrama de la figura 7. Se incluye también una breve descripción de cada fase a continuación, y, en las secciones sucesivas (2.3.2 – 2.3.6), se entra más en detalle en cada parte.

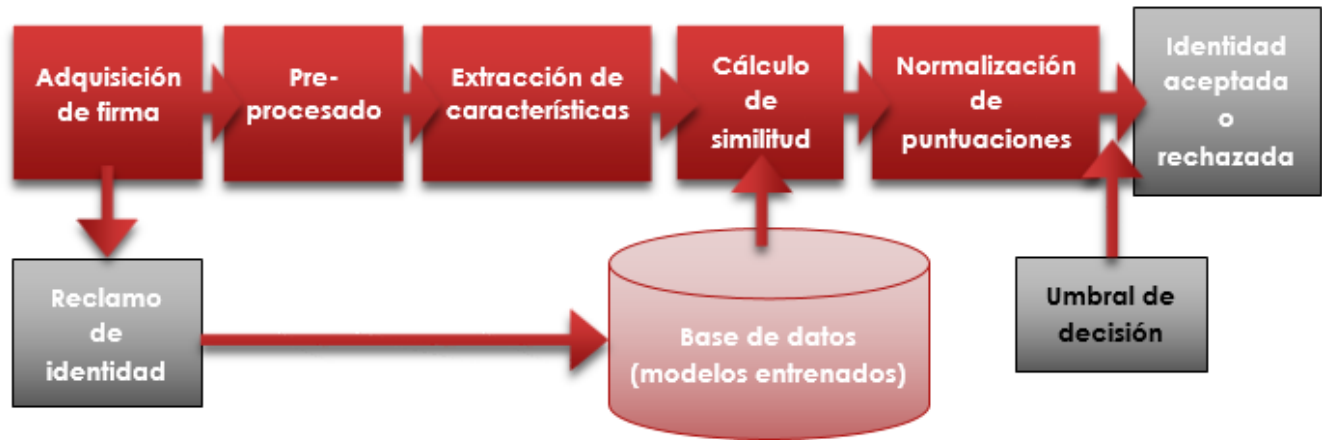


Figura 7. Fases del proceso de verificación.

- **Adquisición de firma.**

Durante esta etapa se captura la firma a ser verificada. Durante el proceso de firmado, se toman muestras que se almacenan en vectores de características con dependencia temporal. Los dispositivos de adquisición suelen ser tabletas digitalizadoras (tipo WACOM), o bien dispositivos de pantalla táctil (como PDAs o Smartphones).

- **Preprocesado.**

La etapa de preprocesado tiene dos objetivos fundamentales: por un lado, eliminar la influencia de factores externos en el posterior proceso de verificación, y, por otro lado, preparar los datos para que este proceso sea lo más simple posible. En el apartado 2.3.3 se detalla esta fase.

- **Extracción de características.**

En el apartado 2.3.4 se detallan en más profundidad las diversas técnicas existentes para la realización de la selección de características.

- **Cálculo de similitud.**

Tras esta fase el sistema devuelve una puntuación (*score*), que determina el parecido de la firma capturada con el modelo de la base de datos del usuario del cual se reclama la identidad. Hay muchos algoritmos distintos para realizar el cálculo de similitud, y su utilización depende en gran medida del enfoque del sistema (si es *feature-based* o *function-based*).

En el apartado 2.3.5 se detallan en más profundidad diversas técnicas existentes para la realización de esta fase.

- **Normalización de puntuaciones.**

Esta fase es especialmente necesaria en el caso de que se combinen puntuaciones provenientes de distintos dispositivos o en el caso de sistemas multi-biométricos [Ross et al., 2006]. Hay diversas técnicas de normalización, entre las que se encuentran las conocidas como 'target-dependent score normalization', que dan lugar a unos resultados muy buenos, mejorando generalmente el rendimiento del sistema [Fierrez-Aguilar et al., 2005b; Martinez-Diaz et al., 2007b].

- **Resultado de la verificación.**

La identidad reclamada por un usuario se da por válida cuando, tras realizar todas las fases que se acaban de detallar, la puntuación obtenida es mayor que una determinada puntuación umbral.

2.3.2 ENTRENAMIENTO (*ENROLLEMENT*)

No es una fase del proceso de verificación en sí, sino que se trata de algo previo, que se debe realizar con cada usuario nuevo que se añada a la base de datos. Pueden diferenciarse dos tipos de sistemas según cuál sea el enfoque tomado para realizar el entrenamiento:

- Sistemas basados en modelos (*model-based systems*).

En este tipo de sistemas, a partir del conjunto de firmas verdaderas de un usuario de las que se dispone para la creación de la base de datos, se crea un modelo para ese usuario, usando para ello técnicas estadísticas. Posteriormente, cuando se desea realizar una verificación, se compara la firma adquirida únicamente con el modelo generado para ese usuario.

- Sistemas basados en referencias (*reference-based systems*).

Estos sistemas almacenan las características de cada una de las firmas verdaderas de un usuario de las que se dispone para la creación de la base de datos en plantillas (*templates*). Durante el proceso de cálculo de similitud, se compara la firma adquirida con cada uno de los *templates*.

El sistema utilizado durante este trabajo es *reference-based*.

2.3.3 PREPROCESADO

Durante este apartado se describe más en profundidad la fase de preprocesado. Esta etapa se lleva a cabo inmediatamente después de la adquisición de la firma, y es previa al comienzo del proceso de verificación en sí. El objetivo ideal del preprocesado es eliminar las

características de la firma debidas a las condiciones no óptimas del proceso de adquisición (ergonomía singular, espacio disponible para firmar...), pero manteniendo al mismo tiempo las particularidades que se deban a la forma propia de firmar de cada individuo. Mantener este equilibrio es muy complicado. Por ello, decidir en qué medida se modifica la firma no siempre resulta fácil. Algunos autores defienden un menor tratamiento previo de la firma para así conservar mejor las características propias del firmante, mientras que otros abogan por llevar a cabo un preprocesado más acentuado, homogeneizando ciertas características de la firma antes de realizar el proceso de verificación como tal.

Las tareas habituales de esta fase son la aplicación de técnicas de mejora de la imagen (fundamentalmente, el filtrado), la normalización y el remuestreo, cada una de las cuales se explica más en detalle a continuación.

2.3.3.1 Filtrado y otras técnicas de mejora de la imagen

La calidad de la firma adquirida depende de muchos factores. El más importante puede que sea la calidad del dispositivo de adquisición utilizado, pero también hay que tener en cuenta otros factores externos no controlables, como la velocidad con la que firme el usuario, o su forma de escribir en sí, entre muchos otros. En numerosas ocasiones, la calidad de la imagen de la firma no es buena y esto influye en el posterior proceso de verificación. Con el objetivo de mejorar la calidad de la firma, se lleva a cabo un tratamiento de la imagen, que puede ser desde muy intenso a prácticamente inexistente. En qué medida se procesa la imagen para que su calidad mejore tiene que ser determinado cuidadosamente, ya que estas modificaciones en la firma original pueden suponer la pérdida de rasgos característicos del firmante.

De las diversas técnicas que pueden aplicarse a la imagen, la principal y más habitual es el filtrado, fundamentalmente con el objetivo de eliminar el ruido. Se suele llevar a cabo un filtrado gaussiano, que permite suavizar las pequeñas imperfecciones de la imagen, conservando al mismo tiempo la estructura general de la firma.

2.3.3.2 Normalizaciones

El eje de este Proyecto se basa en esta fase del proceso de verificación, por lo que se explicará con bastante detalle. Las normalizaciones se llevan a cabo con el objetivo de realizar algún tipo de homogeneización geométrica. Los objetivos de las tareas de normalización en los sistemas de verificación de firma son fundamentalmente los siguientes:

- Permitir la adaptación de los sistemas de verificación de firma a escenarios reales, que actualmente están basados en gran medida en dispositivos portátiles, con las dificultades

que esto conlleva para adquirir una firma con características óptimas para la verificación, debido a la ergonomía singular.

- Permitir la utilización de firmas procedentes de distintas bases de datos en un mismo sistema de verificación. Asimismo, posibilitar la utilización de distintos dispositivos de adquisición sobre un mismo sistema de verificación, sin que esto influya negativamente en el rendimiento. Esto se conoce como interoperabilidad entre sistemas.

Sin embargo, a pesar de estas ventajas, la normalización también puede acarrear algunos problemas en el rendimiento del sistema, debido a la posible eliminación de rasgos propios y característicos de la persona que firma. Esto hace que la decisión sobre la conveniencia o no de aplicar ciertas normalizaciones no siempre resulta obvia. Sobre este hecho se tratará de arrojar luz con este Proyecto, observando el rendimiento del sistema tras realizar distintas normalizaciones, y comparándolo con el rendimiento obtenido sin llevarlas a cabo. Principalmente, pueden encontrarse cuatro tipos de normalizaciones en la literatura, las cuales se explican a continuación.

ESCALA	
Causa	El tamaño del espacio disponible para firmar es variable según el dispositivo de adquisición, y además ese espacio puede ser distinto al disponible a la hora de realizar la recogida de firmas para la base de datos.
Solución	Realizar algún tipo de ajuste de la firma adquirida a un tamaño prefijado antes de iniciar el proceso de verificación. Del mismo modo, las firmas de la base de datos que conforman el modelo de ese usuario deberían ajustarse también a ese mismo tamaño. O bien, el tamaño al que ajustar la firma de entrada debería calcularse en función del tamaño de las firmas del modelo.
Posibles problemas	El tamaño de la firma es una característica propia de cada persona, y por tanto puede suponer un rasgo diferencial a la hora de realizar la verificación. Según como se realice la normalización puede perderse esta información propia y diferencial del individuo.

Tabla 1. Resumen de las implicaciones del escalado de firma.

DESPLAZAMIENTO	
Causa	En ocasiones, el tamaño del espacio disponible para firmar es muy grande en comparación con el tamaño de la firma, lo cual puede repercutir en distintas posiciones de la firma dentro del espacio disponible.

Solución	Una opción para lograr invarianza a traslación sería comparar las coordenadas de la firma adquirida y la almacenada en la base de datos relativas a un punto de referencia (por ejemplo: coordenadas relativas al punto de comienzo, coordenadas relativas al centro de masas, coordenadas relativas al punto anterior ($\Delta x, \Delta y$)... [Ortega-Garcia, 2013]). Otra posible opción sería, que aunque el sistema de verificación comparase coordenadas absolutas, se realizase una normalización de posición previa de la firma a ser verificada, de forma que se eliminasen los posibles efectos derivados de desplazamientos no deseados.
Posibles problemas	En principio, con esta normalización no se pierde información característica de la firma de cada persona que pueda repercutir en un peor rendimiento del sistema de verificación.

Tabla 2. Resumen de las implicaciones de la traslación de firma.

ROTACIÓN O SKEW (ÁNGULO DE LA FIRMA CON RESPECTO A LA HORIZONTAL)	
Causa	La forma en que el individuo sujete el dispositivo de adquisición (especialmente en el caso de que se trate de un dispositivo portátil), así como la superficie de firma poco habitual, pueden hacer que éste firme con una inclinación distinta a la habitual. Asimismo, el ángulo también puede verse afectado por otros factores internos del firmante, como su estado psicológico o físico en el momento que firma. En la figura 8 se observa un ejemplo de esta transformación geométrica.
Solución	Para lograr la invarianza a rotación se debe detectar el ángulo de giro que tiene la firma respecto a un eje prefijado, para lo cual existen diversas técnicas [Mahanta-Deka, 2013] . Posteriormente se rota la firma según el ángulo detectado, pero en el sentido contrario.
Posibles problemas	La inclinación es una característica propia y diferencial de la firma de cada persona, y por tanto puede suponer un rasgo que ayude a la hora de realizar la verificación. Normalizando a ángulo nulo se pierde esta información propia y diferencial del individuo. Otra posibilidad es realizar algún tipo de ajuste en el ángulo de la firma de entrada que desea verificarse, de forma que ésta no se deje a ángulo nulo, sino con el ángulo característico de ese firmante, calculado de alguna forma a partir de las firmas que conforman el modelo de ese firmante.

Tabla 3. Tabla resumen de las implicaciones de la rotación de firma.

SLANT (ángulo debido a la inclinación de las letras de la firma con la vertical)

Causa	<p>Este tipo de variación es mucho menos común que las explicadas anteriormente, ya que no atañe a una característica geométrica de la firma con respecto al resto del espacio, sino a la geometría interna dentro de la propia firma.</p> <p>El <i>slant</i>, en ocasiones, puede verse afectado por factores externos, como la superficie de firma poco habitual (tableta digitalizadora, PDA o Smartphone, por contraposición a la firma tradicional sobre papel), o el bolígrafo usado para realizar la firma. Como ocurre con el ángulo de <i>skew</i>, el <i>slant</i> también puede estar influido por otros factores internos (del firmante), como el estado psicológico o físico de esa persona en el momento que firma. En la figura 9 se observa un ejemplo de esta transformación.</p>
Solución	<p>Para normalizar el ángulo de <i>slant</i> se debe primero detectar cuál es este ángulo, y posteriormente corregirlo mediante un tipo de mapeado conocido como 'transformación shear' [Mahanta-Deka, 2013].</p>
Posibles problemas	<p>Generalmente, la inclinación de las letras de la firma de un individuo es una característica muy diferencial de la firma, y como tal puede resultar útil para realizar la verificación. Es más complicado que un firmante cambie la inclinación habitual de las letras de su firma, en comparación a la posibilidad de variación de las otras características vistas anteriormente.</p> <p>La normalización a <i>slant</i> nulo implica mucha pérdida de información propia y diferencial del individuo, y, en principio, no parece que pueda haber beneficios en la verificación. Por otro lado, hay que tener en cuenta que no en todas las firmas pueden encontrarse letras medianamente legibles como tal. Algunas constan del nombre de la persona claramente legible con alguna floritura, pero en otras el nombre manuscrito está tan desdibujado que apenas puede leerse, y algunas simplemente constan de unos cuantos trazos que nada tienen que ver con un nombre manuscrito. Por tanto, la normalización de <i>slant</i> no es para nada universal, ya que no es aplicable en general en todas las firmas. Por tanto, esta normalización no parece muy beneficiosa en verificación de firma, aunque sí que podría resultar útil en otros escenarios, como por ejemplo en reconocimiento de texto manuscrito.</p>

Tabla 4. Tabla resumen de las implicaciones del *slant* en la firma.



Figura 8. Firmas con distinto skew. Adaptado de [Mahanta-Deka, 2013].

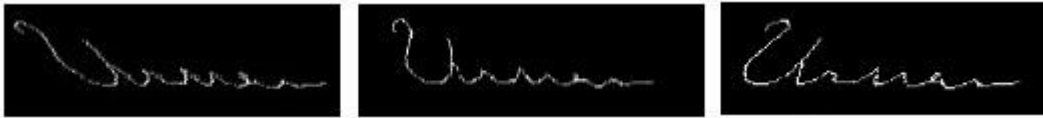


Figura 9. Firmas con distinto slant. Adaptado de [Mahanta-Deka, 2013].

Por otro lado, hay que tener en cuenta que la posible influencia (positiva o negativa) de las distintas posibilidades de normalización de las firmas en el rendimiento de la verificación dependerá de los métodos utilizados para llevar a cabo las distintas fases del proceso de verificación (fundamentalmente la extracción de características y el cálculo de similitud). No todos los sistemas tienen porqué responder igual a las distintas normalizaciones, y, mientras que en unos pueden ser beneficiosas, en otros pueden influir negativamente.

2.3.3.3 Remuestreo

El remuestreo consiste fundamentalmente en una reducción o normalización del número de muestras, para obtener puntos equidistantes en el espacio (ya que, durante la adquisición de la firma, las muestras que se capturan están generalmente equiespaciadas en el tiempo, no en su ubicación espacial) [Ortega-Garcia, 2013].

El problema que presenta el remuestreo es el mismo que en otras fases del preprocesado: la pérdida potencial de información. Por un lado, los datos temporales se pierden, ya que durante el remuestreo queda eliminada toda la información relativa a la velocidad del bolígrafo sobre la superficie de muestreo. Por eso, en caso de que durante la verificación quieran tenerse en cuenta características temporales (que suele ser lo habitual), esta información temporal debe ser extraída previamente al proceso de remuestreo. Sin embargo, las características relativas a la forma de la firma suelen ser más fiables cuando se ha llevado a cabo un remuestreo. Además, el remuestreo también es necesario como paso previo al proceso de filtrado (explicado en el punto 2.3.1.1), para asegurar que la firma es filtrada uniformemente. Si no se realizase un proceso de remuestreo de la firma antes del filtrado, los segmentos de la firma en los que la velocidad era más baja serían filtrados más intensamente que los segmentos con velocidad de escritura alta.

Por otro lado, la señal adquirida suele contener información redundante e innecesaria para la verificación. Las tasas de muestreo de los dispositivos de adquisición actuales (tanto si se trata de dispositivos fijos como si son móviles) superan con mucho las frecuencias máximas observadas en las funciones temporales de las firmas. A modo ilustrativo, mientras que las tasas de muestreo de los dispositivos rondan los 100 Hz (o los superan en muchos casos), las frecuencias máximas observadas en las firmas están en torno a 20-30 Hz. Esto da una idea de la importancia que tiene el remuestreo en la eliminación de toda esa información redundante e innecesaria que incrementa los requerimientos en cuanto a tiempo de procesado y espacio de almacenamiento, sin aportar ninguna mejora al rendimiento del sistema.

Hay puntos que contienen información muy útil para la verificación y que por tanto es preferible conservar, a los que se conoce como puntos críticos. Estos puntos son por ejemplo los que marcan el comienzo y el final de la firma, o los que marcan un cambio de trayectoria. La pérdida de esta información importante para la verificación se suele evitar mediante la inserción de estos puntos críticos como guía de remuestreo. [Ortega-Garcia, 2013].

2.3.4 EXTRACCIÓN DE CARACTERÍSTICAS

Hay infinidad de características de la firma que podrían considerarse, especialmente en el caso de sistemas que usan características globales (*feature-based*). A priori, podría pensarse que cuantas más características se usasen, mejor sería el rendimiento del sistema, si bien esto no es lo que ocurre en la realidad. Esto es debido a que el rendimiento estadístico de un clasificador baja cuando los datos de entrenamiento disponibles son muy pocos comparados con el número de dimensiones del vector de características. Esto es precisamente lo que ocurre en los sistemas de verificación de firma, en los que generalmente se dispone de pocos datos de entrenamiento, y, además, la longitud media de cada firma digitalizada es solamente de unos cientos de muestras. Esto hace necesario seleccionar solo unas cuantas características en cada caso, ya que, en caso contrario, el vector de características generado sería demasiado grande. Existen numerosos estudios en los que se valora la repercusión de las características de la firma seleccionadas en el rendimiento del proceso de verificación. Del mismo modo, en la literatura disponible se encuentran numerosos métodos posibles para la selección de las características óptimas a usar.

A continuación se hace un repaso de varios de los algoritmos que pueden utilizarse para realizar la selección de las características óptimas:

- **Algoritmo de fuerza bruta.**

Se trata de probar el rendimiento obtenido con todas las posibles combinaciones de características dado un vector de características de una cierta dimensión. Es decir, si se

dispone de un vector de características de dimensión N , deberían probarse todas las posibles combinaciones de entre 1 y N características, lo que significa un total de

$$\sum_{i=1}^N \binom{N}{i}$$

combinaciones.

Obviamente, este algoritmo, si bien es el ideal, resulta inviable en la práctica, debido al gran número de combinaciones posibles que deberían ser probadas. Por eso, suelen usarse otros algoritmos subóptimos, pero cuya aplicación práctica en sistemas reales resulta viable (explicados en los puntos siguientes).

- **Scalar Feature Selection.**

Se clasifica cada característica individualmente en términos de su poder de discriminación. Las N características que obtengan un mayor poder de discriminación serán elegidas por tanto como las óptimas. El criterio en cuanto a cómo determinar el poder de discriminación de una característica es variable. En algunos estudios se toma alguna medida de distancia, como [Fierrez-Aguilar et al., 2005a] que usa la distancia de Mahalanobis con este fin. En otros estudios se utilizan otras medidas, como por ejemplo la EER. El problema de este tipo de algoritmos es que no tienen en cuenta la posible correlación entre características, aunque también han sido propuestas algunas técnicas que resuelven este problema [Theodoridis and Koutroumbas, 2006].

- **Sequential Forward Selection (Selección Secuencial Hacia Adelante).**

En este algoritmo se selecciona primero la característica con más poder discriminante de entre todas las disponibles. Luego, se selecciona la combinación más discriminativa de entre todas las posibles parejas formadas por la característica seleccionada al principio y cualquiera de las demás. Así, se va ampliando el grupo de características óptimas seleccionadas hasta llegar al número deseado [Pudil et al., 1994; Jain and Zongker, 1997].

- **Sequential Backward Selection (Selección Secuencial Hacia Atrás).**

Este algoritmo comienza eliminando la característica menos discriminativa de entre todas las disponibles. A partir de ahí, funciona de forma análoga al algoritmo de *Forward* ya explicado, solo que en lugar de añadir una característica en cada iteración, elimina una.

- **Sequential Forward Floating Search Selection (SFFS).**

Un problema que presenta el algoritmo de Sequential Forward Selection explicado antes es que, una vez que una característica se ha añadido al vector de características óptimas, ya no puede ser eliminada. Este problema se resuelve en el algoritmo de SFFS, con la solución presentada en [Theodoridis and Koutroumbas, 2006].

- **Sequential Backward Floating Search Selection (SBFS).**

Análogamente a lo explicado en el punto anterior, el problema que presenta el algoritmo de *Sequential Backward Selection* explicado antes es que, una vez que una característica se ha eliminado del vector de características óptimas, ya no puede volver a ser añadida posteriormente. En [Theodoridis and Koutroumbas, 2006] se presenta la solución a este problema, haciendo uso de técnicas análogas a las del algoritmo SFFS.

- **Redes Neuronales y Algoritmos Genéticos (Neural Networks and Genetic Algorithms).**

Este tipo de algoritmos aplicados a la selección de las características óptimas han sido estudiados en [Galbally et al., 2007a], tomando la EER como criterio de optimización. El problema de los algoritmos genéticos es que no siempre obtienen el mismo conjunto de características óptimas; es decir, en distintas ejecuciones del algoritmo, éste puede dar como resultado distintos vectores de características.

- **Algoritmo Branch and Bound.**

Por contraposición al resto de algoritmos explicados hasta ahora (a excepción del de fuerza bruta), el algoritmo de Branch and Bound sí da lugar a una solución óptima. El problema es que esta técnica solo es aplicable cuando el criterio de optimización crece monótonamente con el tamaño del subconjunto de características.

De entre todos estos métodos de selección de las características, el SFFS (*Sequential Forward Feature Selection*) parece ser el que da lugar a unos mejores resultados. Es decir, sin dar lugar al conjunto óptimo (ya que éste solo puede ser generado por el algoritmo de fuerza bruta, o por el algoritmo *Branch and Bound*), el SFFS obtiene el resultado más similar posible al óptimo.

2.3.5 CÁLCULO DE SIMILITUD (MATCHING)

Al inicio de esta fase, se suele realizar una tarea conocida como prealineamiento, con el objetivo de mejorar el rendimiento del sistema. El prealineamiento se realiza entre las muestras de la firma de entrada y las muestras almacenadas en el modelo correspondiente (en los sistemas basados en modelos), o entre las muestras de la firma de entrada y las muestras de cada firma del conjunto de firmas de referencia (en los sistemas basados en referencias). Algunas estrategias de prealineamiento comunmente utilizadas son por ejemplo el alineamiento respecto a un punto común de referencia (como el centro geométrico, el centro de masas, o el punto de inicio de la firma), el alineamiento basado en la inclinación o el escalado a un tamaño de marco fijado. Esto está por tanto muy en línea con lo descrito durante el apartado de preprocesado.

En cuanto al proceso propiamente de cálculo de similitud, existen distintas estrategias para realizarlo, y su utilización también depende en gran medida del enfoque del sistema (si es *feature-based* o *function-based*).

2.3.5.1 Cálculo de similitud en sistemas *feature-based*

En sistemas basados en características, cada firma es descrita mediante un igual número de características globales, es decir, los vectores de características de todas las firmas son de igual longitud. En este tipo de sistemas, para realizar el cálculo de similitud se suelen utilizar técnicas basadas en la medida de distancias (como la distancia de Mahalanobis, la distancia Euclídea o la distancia Euclídea ponderada), o bien técnicas basadas en clasificadores estadísticos (como los GMM, las ventanas de Parzen [Nanni and Lumini, 2005; Martinez-Diaz et al., 2007b] o las Redes Neuronales). A continuación se explican brevemente algunos de estos métodos:

- **Distancia euclídea.**

La distancia euclídea entre la firma \mathbf{x} y la \mathbf{y} se define como:

$$d(x, y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2}$$

El problema que presenta este método de cálculo de similitud es que la escala y la importancia de la dimensión individual del vector de características no se tienen en cuenta.

- **Distancia de Mahalanobis.**

La distancia de Mahalanobis entre la firma \mathbf{x} y un conjunto de referencia de media \mathbf{m} , y matriz de covarianza Σ se define como:

$$d(x, m) = (x - m)^T \cdot \Sigma^{-1} \cdot (x - m)$$

Los modelos de los usuarios $C = (m, \Sigma)$ son creados a partir de un conjunto de firmas de entrenamiento. Las puntuaciones (scores) se obtienen a partir del inverso de la distancia de Mahalanobis, como sigue:

$$s(x, C) = ((x - m)^T \Sigma^{-1} (x - m))^{-1/2}$$

La gran ventaja de este método es que proporciona unos resultados razonables a un coste computacional bajo. El problema que presenta este método es que es necesario

disponer de suficiente cantidad de datos para estimar la matriz de covarianzas. Se pueden encontrar referencias a este método en [Galbally et al., 2007b].

- **GMM (Gaussian Mixture Models, Modelos de Mezclas Gaussianas).**

A diferencia de las medidas de distancia anteriormente explicadas, los GMM son modelos estadísticos. Pueden ser considerados como un HMM de un solo estado, y han mostrado un alto rendimiento en verificación de firma.

Se puede encontrar más información sobre estos modelos en estudios como [Richiardi and Drygajlo, 2003] o [Martinez-Diaz et al., 2007a].

2.3.5.2 Cálculo de similitud en sistemas function-based

La particularidad que se presenta en este tipo de sistemas es que los vectores temporales que definen cada firma tienen longitud variable. Esto supone un reto a la hora de realizar el cálculo de similitud, ya que debe encontrarse una medida de distancia / similitud adecuada a este problema. En los sistemas *feature-based*, tal y como se explicaba en la sección anterior, no existe este problema, ya que todos los vectores de características tienen igual longitud.

En los sistemas basados en funciones se utilizan fundamentalmente dos técnicas para la resolución de la fase de matching: HMM (*Hidden Markov Models*) o DTW (*Dynamic Time Warping*).

- **DTW (Dynamic Time Warping, Alineamiento Temporal Dinámico): comparación local.**

Este modelo para el cálculo de similitud es determinista, y se basa en buscar la correspondencia entre la firma modelo y la firma que se está testeando punto a punto, tal y como muestra la figura 10.

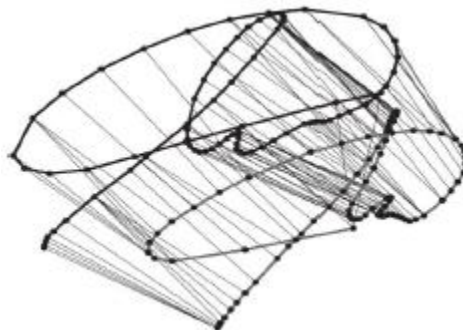


Figura 10. Correspondencia punto a punto usando DTW. De [Martinez-Diaz, 2008].

Este algoritmo consigue comparar el parecido entre dos secuencias temporales que pueden ser de distinto tamaño. El objetivo final del algoritmo es calcular el camino óptimo entre dos secuencias de muestras que minimice una medida de distancia dada. Al hacerse la comparación punto a punto, este tipo de estrategia para el cálculo de similitud se conoce como comparación local. Puede encontrarse la explicación detallada del algoritmo en diversas fuentes de la literatura, como por ejemplo en **[Sakoe-Chiba, 1978]** o **[Kholmatov and Yanikoglu, 2005]**.

Aunque DTW ha sido reemplazado en los últimos años por estrategias más poderosas como HMMs en otro tipo de sistemas biométricos (como aplicaciones de reconocimiento de habla), sigue siendo muy indicado para el caso de sistemas de verificación de firma, ya que funciona bien con un conjunto pequeño de datos de entrenamiento, que suele ser el caso que se da en estos sistemas.

El sistema de verificación que se utiliza durante este proyecto está basado en DTW.

• **HMMs (Hidden Markov Models, Modelos Ocultos de Markov): comparación regional.**

En la estrategia de cálculo de similitud mediante HMMs, se realiza un modelado estadístico de las regiones de la firma. Al hacerse la comparación segmento a segmento (en lugar de punto a punto, como ocurría con DTW), este tipo de estrategia para el cálculo de similitud se conoce como comparación regional. Las funciones temporales se convierten en secuencias de vectores de características u observaciones, cada uno describiendo propiedades de un segmento de la firma.

Un HMM representa un proceso estocástico doble, en el que se asume que el sistema que se quiere modelar está regido por una cadena de Markov subyacente de parámetros desconocidos ('ocultos'), pero de la que se sabe que tiene un número finito de estados y un conjunto de funciones aleatorias que generan símbolos observables asociados a cada estado **[Yang et al., 1995]**. El objetivo es determinar esos parámetros desconocidos a partir de las observaciones. En el ámbito de la biometría, las observaciones suelen modelarse mediante GMMs, a los que ya se hizo referencia en la sección 2.3.5.1.

La estructura básica de un HMM usando GMMs para modelar los observables es la siguiente:

- Número de estados (modelos ocultos): N .
- Número de símbolos observables en cada estado (mezclas de Gaussianas): M .
- Matriz de probabilidad de transiciones entre estados $A = \{ a_{ij} \}$, que describe la probabilidad de pasar del estado i al estado j .

La figura 11 muestra un ejemplo de posible configuración de HMM. La estructura que se muestra en este caso es un modelo HMM de izquierda a derecha de N estados, con M componentes GMMs y sin saltos entre estados.

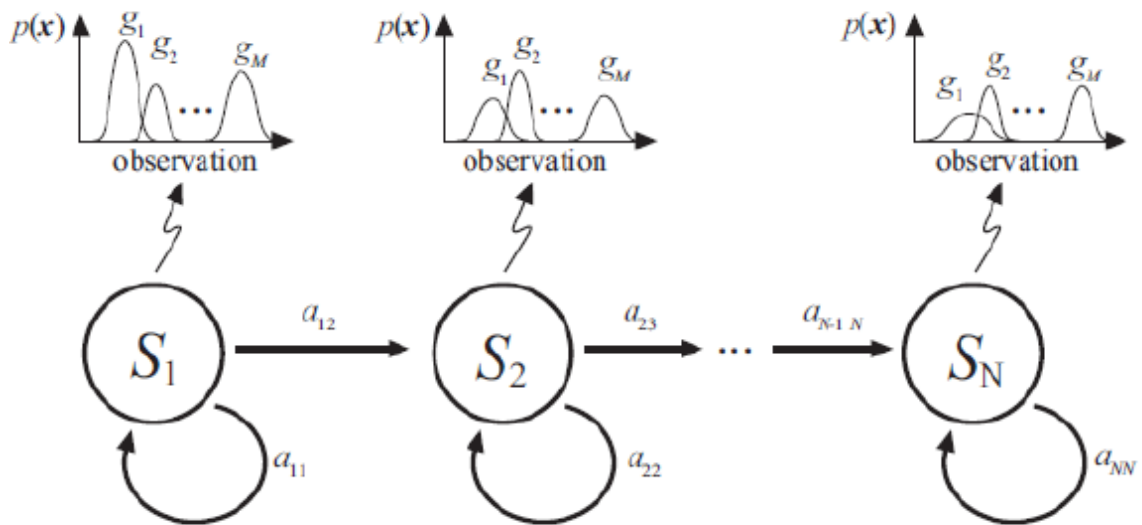


Figura 11. Estructura de un modelo HMM de izquierda a derecha de N estados, con M observables y sin saltos entre estados. De [Martinez-Diaz, 2008].

En los sistemas de verificación de firma, encontrar una estructura adecuada para el HMM, que consiga dar un buen rendimiento, no es una tarea trivial. Por un lado, la elección de un modelo demasiado simple puede repercutir en la incapacidad del sistema para llevar a cabo una modelización correcta de las firmas de los usuarios, especialmente en realizaciones complejas de las firmas. Sin embargo, como un modelo simple tiene menos parámetros que estimar, su estimación será más robusta que para los modelos complejos. Por otro lado, si el HMM es demasiado complejo, puede no ser capaz de modelar las realizaciones futuras debido a un sobreajuste de parámetros (*overfitting*). Por tanto, tanto el número de estados (N) como el número de GMMs por estado (M) son parámetros a evaluar para obtener un sistema óptimo [Fierrez-Aguilar et al., 2007].

En cuanto a la configuración, la mayoría de los sistemas propuestos consideran una conformación de izquierda a derecha con una única sucesión de estados, también conocidos como topología Bakis. La figura 11 ilustra precisamente esa configuración.

2.3.5.3 Resumen de las estrategias de matching según el tipo de sistema

Como resumen de lo comentado anteriormente, se presenta el esquema de la figura 12, con las distintas estrategias existentes para realizar la fase de cálculo de similitud según el tipo de sistema:

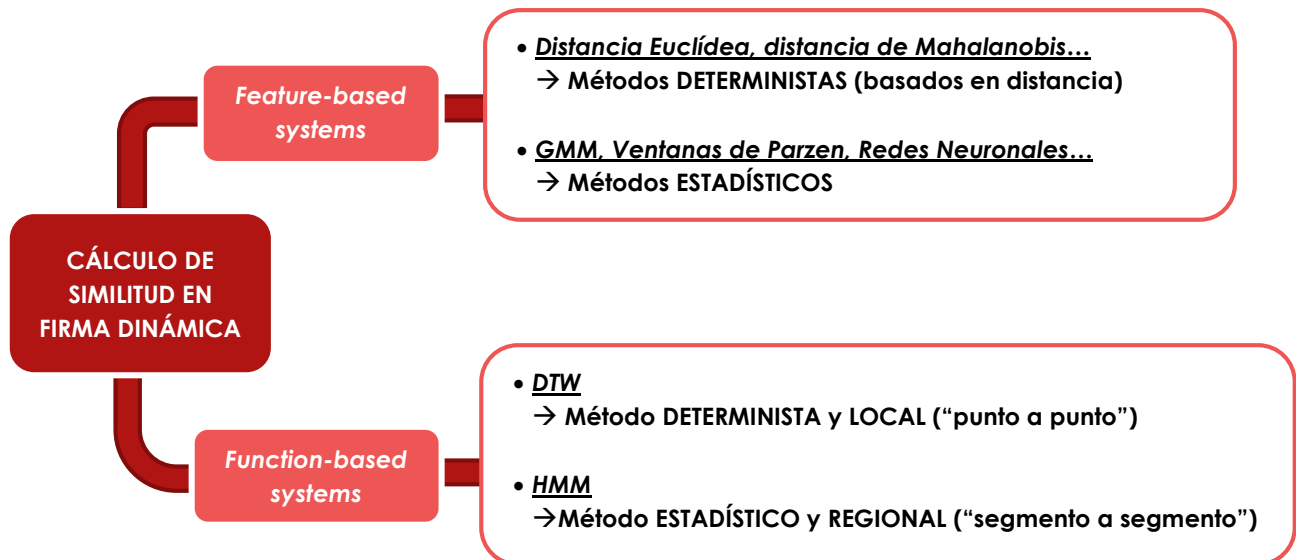


Figura 12. Esquema de las diferentes estrategias posibles para realizar el cálculo de similitud.

La fusión de los sistemas basados en características y basados en funciones han demostrado proporcionar un rendimiento mejor que considerando cada uno de los sistemas por separado [Fierrez-Aguilar et al., 2005a].

2.3.6 BASES DE DATOS

Existen bases de datos de firma dinámica tanto públicas como privadas. Desgraciadamente, las BDD privadas suelen ser más completas, lo cual hace que se utilicen más en las investigaciones que las BDD públicas. Lo ideal sería poder probar distintos sistemas de verificación con la misma base de datos, para así poder establecer una comparación justa entre ellos. Sin embargo, esto no es posible si cada grupo de investigación o marca comercial usa una BDD privada y distinta a todas las demás. Para explicar la falta de grandes bases de datos públicas hay que pensar en los problemas legales y de privacidad que pueden darse.

Por otro lado, hay que tener en cuenta los factores culturales que influyen en la firma. Por ejemplo, mientras que en América del Norte las firmas son muy básicas, constando en muchas ocasiones únicamente del nombre manuscrito, en Europa suelen tender a ser más desdibujadas, de forma que la mayor parte de las veces ni siquiera puede leerse un nombre o unas iniciales. Las diferencias son aún mayores en Asia, ya que los caracteres asiáticos constan de un mayor número de trazos más cortos, en comparación con las firmas europeas o americanas.

Algunas de las BD públicas que pueden encontrarse son por ejemplo:

- PHILIPS Database.
- MCVT Signature Subcorpus (2003).
- BIOMET Signature Subcorpus (2003).
- SVC Database (2004).
- MyIDEA (2005).
- BioSecure DS1 – Internet (2008).
- BioSecure DS2 – Escritorio (2008).
- BioSecure DS3 – Escenario Móvil (2008).

La información disponible sobre estas BD en la literatura es amplia, por lo que no pasarán a describirse con detalle aquí las características de cada Base de Datos.

Durante este Proyecto se utilizarán dos bases de datos: una de ellas creada por la empresa Sigma Technologies (BDD *SigmaTech Basic*), y la segunda de ellas propia, creada específicamente para el objeto de estudio de este trabajo (BDD *SigmaTech GDE*). En posteriores secciones se explican con detalle las características de estas dos Bases de Datos.

2.4 TRABAJOS RELACIONADOS CON EL OBJETO DE ESTUDIO DE ESTE PROYECTO

En esta sección se presentará un resumen de estudios encontrados en la literatura relacionados con temas de normalización. Tras la revisión detallada de estos estudios es posible determinar más concretamente y entender mejor el alcance de este Proyecto.

En **[Arujo et al., 2007]** se estudia la influencia del tamaño de la firma en el proceso de verificación en un sistema basado en DTW. Se utiliza una base de datos que incluye firmas de tres tamaños diferentes, usando una tableta WACOM como dispositivo de adquisición. Participaron 20 usuarios distintos, adquiriéndose un total de 1828 firmas. Los resultados de este estudio se presentan mediante la FRR (False Rejection Rate), medida fijando la FAR (False Acceptance Rate) a cero. El sistema fue entrenado con 8 firmas de tamaño medio, y, tras esto, fue testeado con 4 firmas de cada tamaño (4 pequeñas, 4 medianas y 4 grandes). Se utilizaron 25 características de la firma para la verificación. Se obtuvo una FRR mínima para las firmas de

tamaño medio, que era con las que se había entrenado el sistema, mientras que para las firmas de tamaño pequeño y grande se obtuvieron unas FRR mayores. Posteriormente, se aplica una estrategia de selección de características con la que se intenta compensar el efecto negativo en el rendimiento del sistema de la variación de tamaño en las firmas. Con este objetivo, se realiza un segundo experimento en el que, en lugar de tener en cuenta para la verificación todas las características usadas en el primer experimento (un total de 35), se seleccionan solo las 20 características que presentaban menor desviación en la FRR comparando las firmas de distintos tamaños. Con esta selección de características se obtienen unos resultados más homogéneos en términos de FRR para las firmas de los tres tamaños distintos. Las tablas con los resultados exactos pueden encontrarse en el artículo referido.

En [Chadha et al., 2011] se propone un método de detección y eliminación de la rotación, el escalado y la traslación de la firma adquirida, al que se denomina como *RST Cancellation*. En este estudio no se investiga cómo afectan estas tres características de la firma adquirida (rotación, escalado y traslación) en el rendimiento del sistema de verificación final. Simplemente, se observa el rendimiento del método propuesto para detectar y eliminar las características. La adquisición de las firmas para la base de datos se realiza mediante una tableta WACOM Bamboo.

Para la eliminación de la **rotación**, la detección del ángulo se realiza mediante el cálculo de la correlación cruzada entre *la imagen* que conforma la firma de referencia y *la imagen* que conforma la firma introducida. Según explica el artículo, los resultados de la detección del ángulo mediante esta técnica fueron buenos, si bien solo se comprueba el rendimiento de este algoritmo con 10 firmas, lo cual no es muy representativo. La **traslación** se elimina mediante una técnica de recorte. Se calculan las filas y columnas que bordean los píxeles 'límites' de la firma, y esas filas y columnas se eliminan. El resultado es una imagen que contiene solo los píxeles de la firma (todos los píxeles correspondientes a fondo se eliminan). Para eliminar el **escalado** es necesario calcular primero el factor de escalado, que se obtiene en este estudio dividiendo el tamaño de *la imagen* de la firma de referencia entre el tamaño de *la imagen* de la firma adquirida. Los resultados obtenidos en cuanto a la detección del factor de escalado no son tan buenos como en el caso del ángulo de rotación (aunque, de nuevo, solo se comprueba este método con 10 firmas, una muestra muy pequeña para determinar si este método es aceptable o no). En algunas muestras, hay bastante diferencia entre el factor de escalado detectado y el real, siendo el porcentaje de error máximo de casi el 40%.

3 CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA ESTUDIADO Y DISEÑO EXPERIMENTAL

Durante este capítulo se describen primeramente algunas características básicas del sistema estudiado, así como los experimentos contemplados dentro del alcance del Proyecto, y el protocolo a seguir durante toda la etapa experimental. Durante la etapa experimental se usan dos bases de datos distintas. Por tanto, dependiendo de la base de datos utilizada en cada caso, este capítulo se divide en dos grandes bloques; por un lado el llamado entorno simulado (en el que se usa la BDD *SigmaTech Basic*) y, por otro lado, el llamado entorno real (en el que se usa la BDD *SigmaTech GDE*).

3.1 CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DEL SISTEMA ESTUDIADO

El sistema base del que se parte es una adaptación comercial realizada por la empresa Sigma Technologies S.L. de un sistema de verificación previamente desarrollado por el departamento de ATVS de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Autónoma de Madrid (EPS, UAM). Por temas de confidencialidad, no se pueden describir los detalles de los algoritmos internos. A continuación se describen únicamente algunas características básicas del sistema:

- El sistema es *function-based*, y usa características básicas (coordenadas x, y; instante de tiempo de cada muestra y presión) y algunas características derivadas (velocidad, aceleración...).
- Con respecto a la fase de cálculo de similitud, el algoritmo implementado es DTW.
- En cuanto al entrenamiento, el sistema es *reference-based*.

3.2 ENTORNO SIMULADO: SIGMATECH BASIC

La base de datos que se utiliza para realizar los experimentos durante el llamado entorno simulado fue creada por la empresa *Sigma Technologies*. Esta base de datos es una de las más grandes existentes actualmente (cuenta con unos 550 usuarios, a cada uno de los cuales se pidió firmar 20 veces en 2 sesiones distintas, con 10 firmas por sesión). La diferencia de tiempo intersesión es de dos semanas. Todas las firmas de la base de datos son verdaderas (no se realizaron falsificaciones). Las características medidas y almacenadas fueron cuatro: coordenadas (x e y), presión del bolígrafo en la tableta (p), e instante de tiempo en el que se recoge cada muestra (t). El dispositivo de adquisición fue un Samsung Galaxy Note 1. La tasa de muestreo es de 200 Hz. En la sección 4.1 se explican otros detalles de esta BDD, obtenidos tras el estudio y procesado previo de ésta.

3.2.1 EXPERIMENTOS EN ESTE ENTORNO

- **Influencia en la inclinación de la firma.**

Para medir la influencia de la inclinación de la firma en el rendimiento del sistema, se giran las firmas existentes en la base de datos original según varios ángulos distintos. El barrido de ángulos elegido es de -15° a 45° , a pasos de 5° . Se decide no estudiar ángulos mayores a 45° ni menores que -15° , ya que el objetivo del Proyecto es observar casos que pueden darse en la realidad, para poder aplicar el análisis a la consecución de mejores resultados en productos comerciales reales. Es muy poco probable que un usuario firme con una inclinación que difiera en más de 45° positivos o 15° negativos respecto a su orientación habitual, ni siquiera en aplicaciones móviles o en condiciones de captura muy malas (usuario de pie, sosteniendo el aparato de captura, etc).

- **Influencia de la posición de la firma.**

Para medir la influencia de la posición de la firma en el plano, se generan ocho firmas desplazadas en el plano respecto a la firma original de cada usuario. Se definen los ocho espacios según se traslade la firma:

- Serie A: desplazamientos en forma de 'aspa' (es decir, hacia arriba y hacia la derecha, hacia arriba y hacia la izquierda, hacia abajo y hacia la izquierda o hacia abajo y hacia la derecha).
- Serie B: desplazamientos en forma de 'cruz' (es decir, solo hacia arriba, solo hacia la derecha, solo hacia la izquierda o solo hacia abajo).

Las ocho posiciones posibles son las incluidas la tabla 5.

Serie	A				B			
Nº	1	2	3	4	1	2	3	4
dx (píxeles)	+87	+87	-87	-87	0	-87	0	+87
dy (píxeles)	+87	-87	-87	+87	+87	0	-87	0

Tabla 5. Desplazamientos estudiados en la BDD SigmaTech Basic.

- **Influencia del tamaño de la firma.**

Para medir la influencia del tamaño de la firma en el rendimiento del sistema, se escalan las firmas existentes en la base de datos original según varios factores distintos. El barrido de factores elegido es del 50% al 125%, a pasos de 5%. De esta forma, se podrá observar

cuál es la influencia tanto del aumento del tamaño (factores mayores de 100%) como de la disminución de tamaño (factores menores de 100%).

3.2.2 PROTOCOLO EXPERIMENTAL

Los modelos de los usuarios son entrenados con las 4 primeras firmas genuinas de la primera sesión. Las 6 firmas restantes de la primera sesión y la segunda sesión al completo (16 firmas en total) son utilizadas para realizar el testeo. De esta forma, se obtienen las puntuaciones genuinas para cada sesión.

Las puntuaciones para el caso de impostores accidentales (*random forgery*) se obtienen comparando el modelo de cada usuario con una firma genuina del resto de usuarios de la base de datos. Como no se dispone de *skilled forgeries* en esta BDD, no es posible obtener puntuaciones de este tipo en los experimentos.

Para los diversos experimentos una vez hechas las transformaciones geométricas sobre las firmas originales, también se utilizan para testear las 6 últimas firmas de la primera sesión y las 10 de la segunda sesión. Se comparan estos conjuntos de firmas modificadas con el modelo entrenado a partir de las 4 primeras firmas de la primera sesión del conjunto de firmas originales. El protocolo experimental descrito se presenta de forma gráfica en la figura 13.

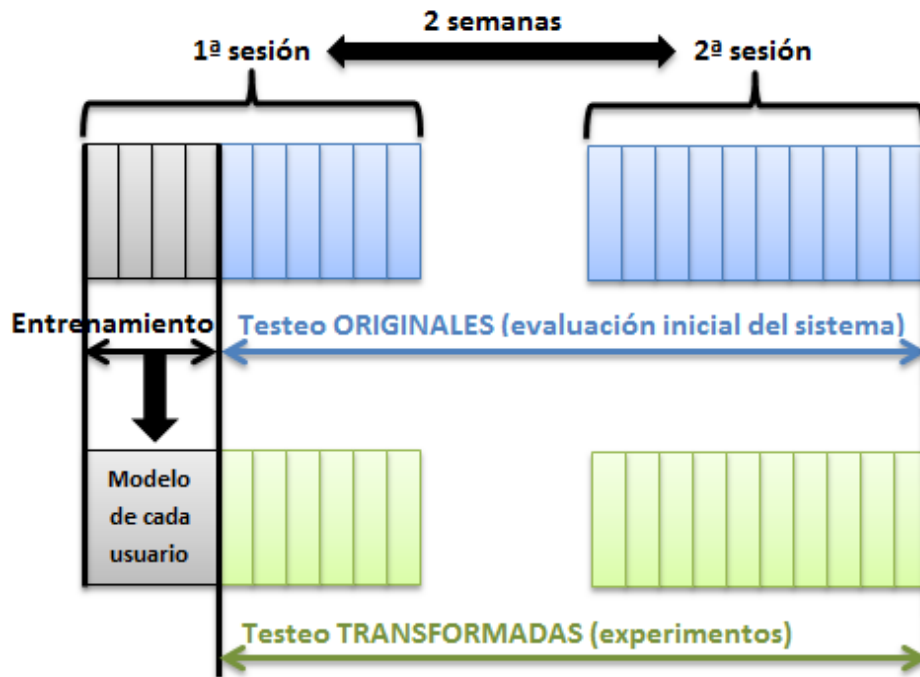


Figura 13. Protocolo experimental en el entorno simulado (BDD 1: *SigmaTech Basic*).

3.3.1 DISEÑO Y ADQUISICIÓN DE LA NUEVA BASE DE DATOS

Se decide grabar la nueva base de datos con el mismo Smartphone utilizado para grabar la base de datos de la que se disponía inicialmente (*SigmaTech Basic*), es decir un Samsung Galaxy Note 1. El propósito de esto es no introducir variabilidades adicionales a las que desean medirse, y poder hacer posteriormente una comparación lo más justa posible entre los resultados obtenidos con ambas bases de datos. Para cada persona, se graba lo siguiente:

- **Conjunto de firmas estándar.**

El recuadro disponible para firmar para este conjunto es de 5,4 cm de ancho por 5,4 cm de alto. Se recogen 10 firmas estándar por cada usuario y sesión. Este es el conjunto de firmas en el que se piden más realizaciones (10 por usuario y sesión, frente a las 5 realizaciones pedidas en los otros conjuntos). Esto es necesario para que haya firmas estándar suficientes para, por un lado, entrenar el sistema (generar el modelo de cada usuario), y, por otro lado, poder obtener una evaluación del sistema con esta base de datos en condiciones normales (en ausencia de transformaciones geométricas).

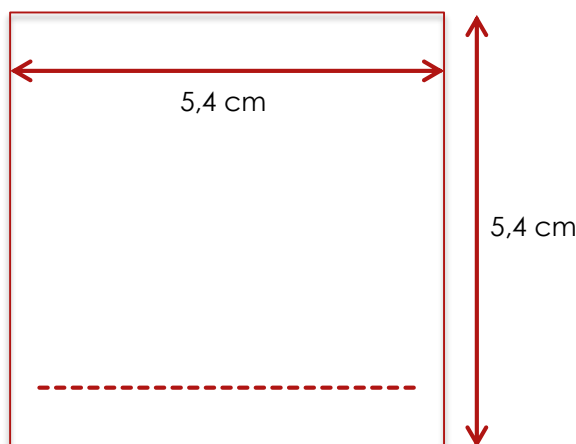


Figura 14. Diseño BDD *SigmaTech GDE*: pantalla de adquisición para las firmas estándar.

- **Conjuntos de firmas giradas.**

Se recogen, tanto para la primera como para la segunda sesión, 5 firmas con una inclinación de 10°, 5 firmas con una inclinación de 20°, y 5 firmas con una inclinación de 30°. El recuadro en estos casos tiene las mismas dimensiones que para el conjunto de

firmas estándar, pero se añade una línea punteada según la inclinación deseada en cada caso, que sirve de guía para firmar.

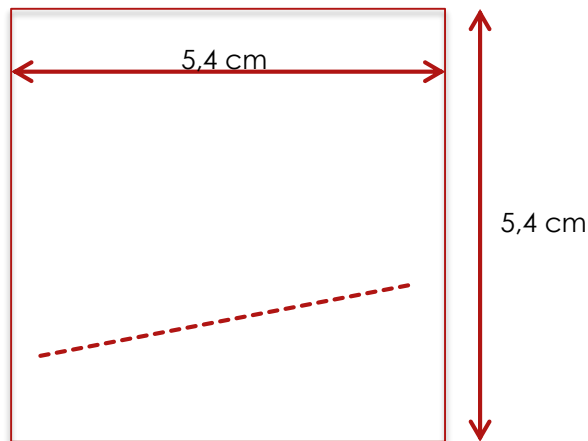


Figura 15. Diseño BDD SigmaTech GDE: pantalla de adquisición para las firmas inclinadas.

- **Conjuntos de firmas desplazadas.**

Sobre la base de una zona cuadrada de 7 cm de lado (todo el ancho disponible de la pantalla del *Smartphone*), aparecen recuadros de 5,4 cm de lado tomando como punto base cada una de las esquinas del área inicial (superior derecho, superior izquierdo, inferior izquierdo e inferior derecho). Se recogen 5 firmas por usuario y por sesión en cada uno de los recuadros descritos, pidiéndole a la persona que realice la firma centrada en la zona que aparece en blanco en cada caso. El orden de aparición de estos cuatro recuadros será aleatorio.

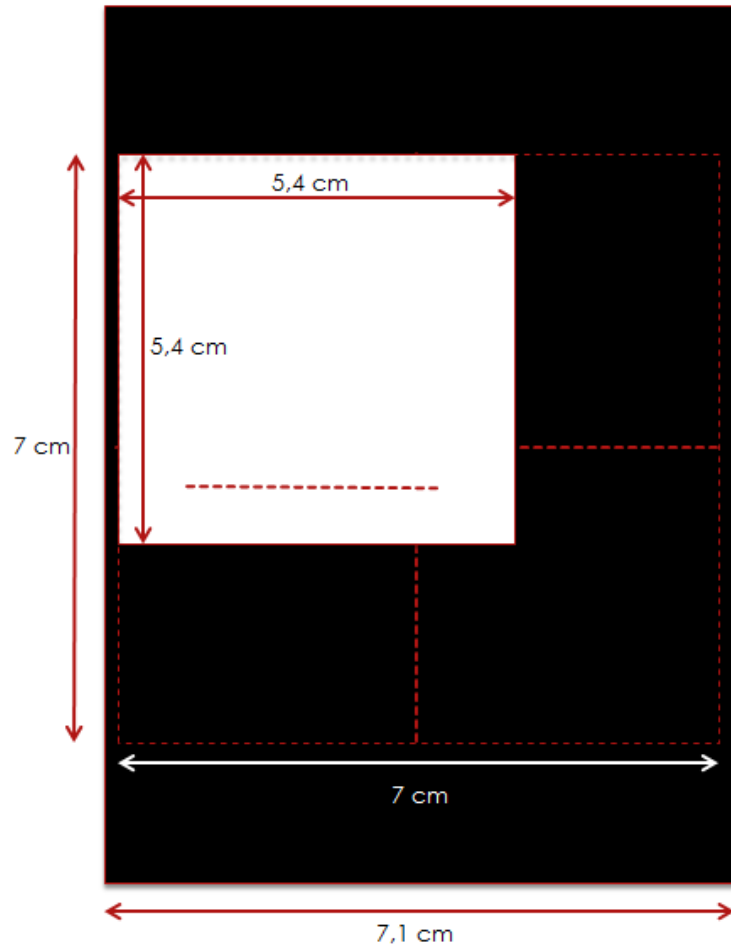


Figura 16. Diseño BDD *SigmaTech GDE*: pantalla de adquisición para las firmas desplazadas (posición superior izquierda).

- **Conjunto de firmas escaladas.**

Se recogen 5 firmas para cada usuario y sesión sobre un recuadro de lado 6,75 cm (razón de 1,25 respecto al lado del recuadro inicial). Se le pide al usuario que use la mayor área posible dentro de este recuadro. Del mismo modo, se recogen 5 firmas por usuario y por sesión sobre un recuadro de lado 4,05 cm (razón de 0,75 respecto al lado del recuadro estándar) y otras 5 firmas por usuario y por sesión sobre un recuadro de lado 2,7 cm (razón de 0,5 respecto al lado del recuadro estándar).

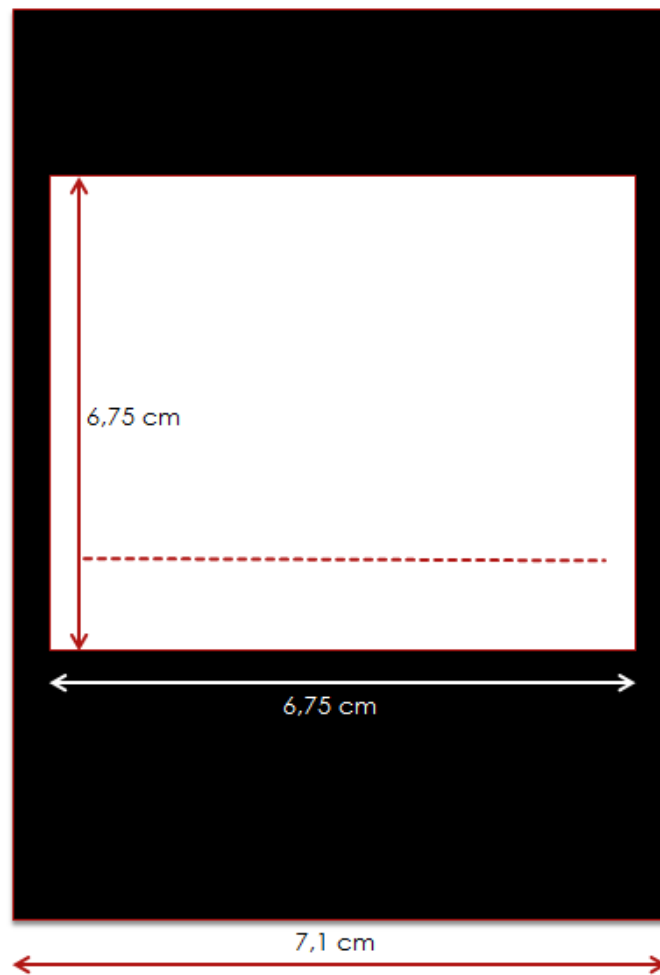


Figura 17. Diseño de la BDD SigmaTech GDE. Pantalla de adquisición para las firmas escaladas a razón de 1,25.

En total, se consiguió grabar a un total de 33 usuarios con ambas sesiones completas. La separación entre sesiones fue de unas 2 semanas.

3.3.2 EXPERIMENTOS EN ESTE ENTORNO Y PROTOCOLO EXPERIMENTAL

En este caso no hay que aplicar transformaciones geométricas a las firmas adquiridas previamente a la realización de los experimentos, puesto que las variaciones que desean estudiarse ya están incluidas en la base de datos en sí, tal cual es adquirida. Los modelos de los usuarios son entrenados con las 5 primeras realizaciones de la primera sesión del conjunto de firmas estándar. Las 5 firmas restantes de la primera sesión y la segunda sesión al completo (15 firmas en total) son utilizadas para realizar la evaluación de referencia. Para realizar las evaluaciones del rendimiento con las firmas inclinadas, desplazadas y escaladas, se compara el modelo creado para cada usuario con las 5 firmas recogidas para cada una de los escenarios de adquisición estudiados, y para cada una de las sesiones. De esta forma, se obtienen las puntuaciones genuinas para la primera y para la segunda sesión en todos los experimentos contemplados.

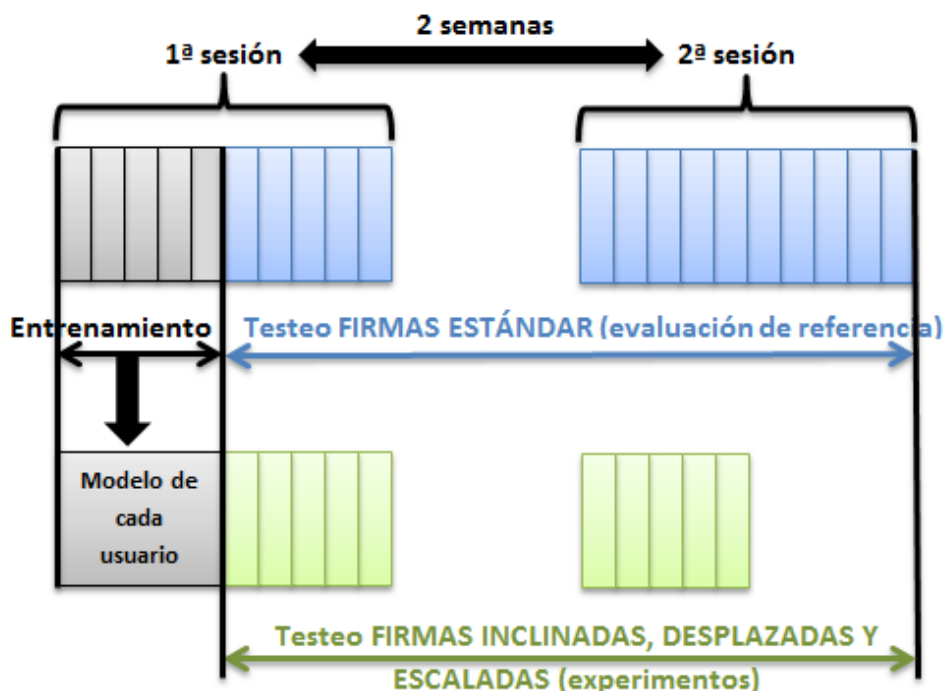


Figura 18. Protocolo experimental en el entorno real (BDD 2: SigmaTech GDE).

Las puntuaciones para el caso de impostores accidentales (*random forgeries*) se obtienen comparando el modelo de cada usuario con una firma genuina del resto de usuarios de la base de datos, para el conjunto de firmas que corresponda en cada caso. Como no se dispone de *skilled forgeries*, no es posible obtener puntuaciones de este tipo para realizar los experimentos.

3.4 NOMENCLATURA

Durante la sección relativa a pruebas y experimentos, para presentar los resultados se usan nombres del tipo:

cadenaA - cadenaB - cadenaC

donde:

- **'cadenaA'** indica si el conjunto de firmas es del llamado 'Entorno Simulado' o bien del llamado 'Entorno Real'. Es decir, indica si la base de datos utilizada es la *BDD SigmaTech Basic*, o bien si es la *BDD SigmaTech GDE*.
- **'cadenaB'** indica la transformación aplicada en cada caso:

TRANSFORMACIÓN	NOMENCLATURA	EJEMPLOS
Giros	Se indica con una 'G' de giro, seguido del número de grados que se rota la firma, en sentido contrario a las agujas del reloj.	G15 / G30 / G45 / G-5 / G-10
Desplazamientos	Se indica con una 'D' de desplazamiento, seguido de la letra A o B (que se refieren a 'serie A' o 'serie B', según se ha explicado en el apartado 3.2.1.2), y, por último, un dígito que indica la posición dentro de la serie en cada caso, según lo presentado en la tabla V.	DA1 / DB2 / DB4
Escalado	Se indica con una 'E' de 'Escalado' seguida de la razón de escalado, en porcentaje.	E50 / E75 / E125

Tabla 6. Nomenclatura para indicar la transformación aplicada.

En el caso de que se trate de las firmas iniciales o estándar de la BDD (sin rotar, desplazar, ni escalar), se indica mediante una 'O' de 'Originales'.

- **'cadenaC'** indica si los resultados se refieren a firmas de la primera sesión (S1), a firmas de la segunda (S2), o bien a ambas (SA).

Con esta nomenclatura, podría tenerse por ejemplo la cadena **ES - G10 - S1**, que indicaría las firmas de la primera sesión de la *BDD SigmaTech Basic*, rotadas 10 grados en sentido contrario a las agujas del reloj. La cadena **ER - G20 - S2** haría referencia al conjunto de firmas de la BDD *SigmaTech GDE*, adquiridas durante la segunda sesión, y usando una línea como guía de firma con una inclinación de 20°. Otro ejemplo podría ser **ES - DB2 - SA**, que haría referencia al conjunto de firmas de ambas sesiones de la *BDD SigmaTech Basic*, desplazadas a la posición B2 (según lo explicado en la tabla 5). En algunas ocasiones, una de las tres cadenas descritas puede no tener sentido, por lo que no aparecería.

4 ESTUDIO Y PROCESADO PREVIO DE LAS BASES DE DATOS

Durante este capítulo se presenta el análisis realizado en las bases de datos utilizadas durante la realización de este Proyecto. La diferencia fundamentalmente reside en que, en el entorno simulado, las pruebas se realizan sobre una base de datos disponible creada con anterioridad a la realización del presente trabajo (*SigmaTech Basic*). Tras los experimentos realizados con esta BDD, se realizarán otras pruebas sobre otra BDD grabada específicamente para el objeto de estudio de este Proyecto (*SigmaTech GDE*), al que se hará referencia en el presente documento como entorno real. La realización de esta parte de la investigación requiere la creación de una nueva base de datos con unas características específicas, la cual se debe diseñar y recoger previamente a la realización de los experimentos.

4.1 BDD 1 (*SIGMATECH BASIC*)

Si bien el acondicionamiento y procesado iniciales de la BDD no forman parte de los objetivos propios del Proyecto, es necesario realizar estas tareas previamente al comienzo de los experimentos en sí. Disponer de una base de datos bien conocida y estructurada, es algo esencial para cualquier proyecto de este tipo. Si bien se disponía de la BDD *SigmaTech Basic* ya grabada, ésta nunca había sido estudiada y procesada tras su grabación. Además, la BDD fue grabada en condiciones poco controladas. Por tanto, al inicio del Proyecto no se conocían a ciencia cierta varios datos básicos para comenzar a hacer los experimentos con esta BDD. Estos datos básicos son: número exacto de firmantes distintos (se sabía que eran alrededor de 550); número de sesiones efectivamente grabadas por cada usuario (se pidieron 2 sesiones por usuario); y número de firmas por cada usuario y por cada sesión (se pidieron 10 firmas por usuario y sesión). Tras desarrollar y ejecutar varios scripts de recuento se obtiene que:

- Se dispone de un total de **520 usuarios distintos**.
- De 137 de esos 520 usuarios distintos, solo se dispone de la primera sesión grabada (10 firmas).
- De los restantes se dispone de ambas sesiones grabadas (20 firmas en total).

Esto hace un total de **9030 firmas**, por lo que la BDD tiene unas dimensiones considerables. Esto es muy beneficioso para un estudio como el que se realiza en este Proyecto, ya que se traduce en que los resultados obtenidos tienen un peso estadístico considerable como para ser considerados muy fiables y ajustados a la realidad.

Por otro lado, al realizar las primeras gráficas para estudiar las características de algunas firmas se observan dos efectos no deseados, debidos al propio proceso de adquisición del dispositivo utilizado:

- Las coordenadas y están adquiridas en base a un origen de coordenadas distinto al habitualmente utilizado, que, por comodidad, es el que se desea usar también durante este Proyecto. Por tanto se realiza un cambio de las coordenadas y a todas las firmas de la BDD, tal y como muestra la figura 19.
- Las muestras de tiempo están adquiridas en base a un origen temporal que no es 0. En este sentido, se resta la muestra de tiempo inicial de cada firma a todas las demás muestras de esa firma, de forma que se obtienen los instantes temporales de muestreo respecto a 0, tal y como se desea.

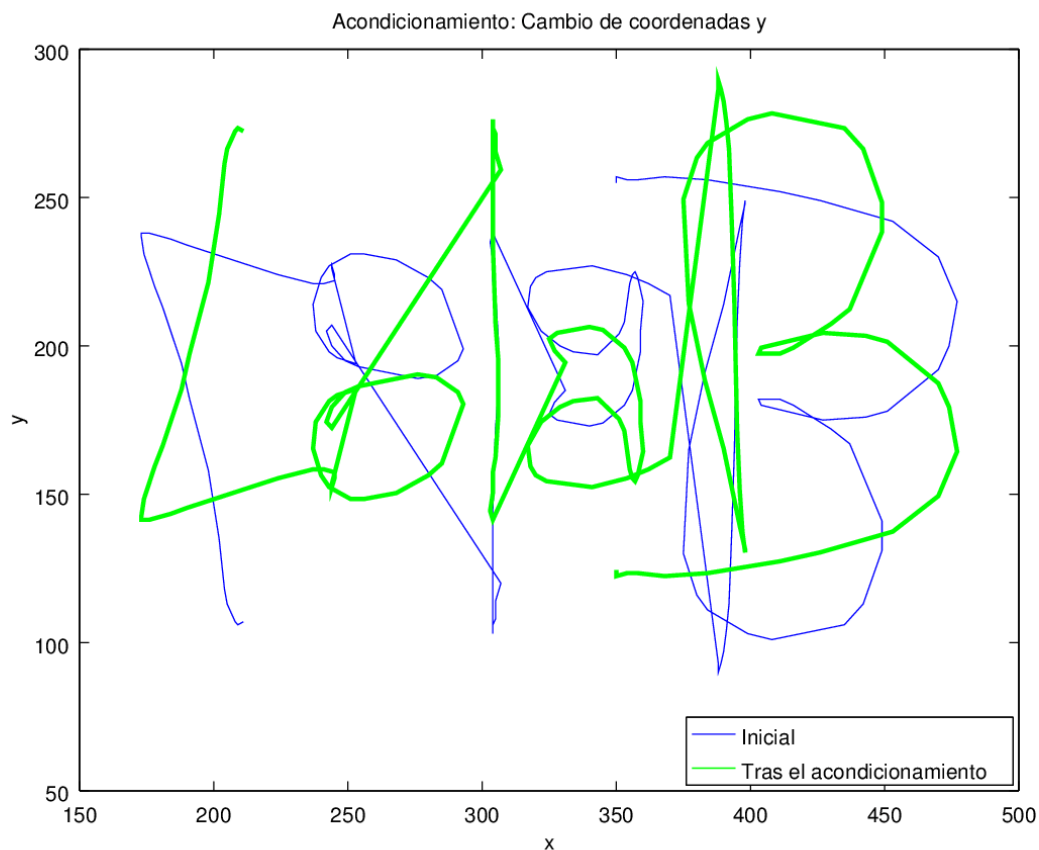


Figura 19. Acondicionamiento previo de la BDD SigmaTech Basic: cambio de coordenadas y.

Posteriormente a estos pequeños ajustes, se procede a realizar diversas gráficas que muestran las características iniciales (adquiridas) y otras derivadas (calculadas a partir de las adquiridas). Así, se observan las variabilidades entre distintas realizaciones de la firma de un usuario, propias de este rasgo biométrico-conductual, al igual que la variabilidad entre firmas de sesiones distintas de un mismo firmante (variabilidad inter-sesión). Estos rasgos pueden ser observados, para la primera firma de un usuario dado y para cada sesión, en las figuras 20 y 21.

En cuanto al cálculo de las características derivadas presentadas en las figuras, tres de ellas se basan únicamente en realizar la primera derivada sobre una característica adquirida de la firma (dx , dy , dp). La velocidad del trazo se calcula a partir de las derivadas en x y en y , utilizando la fórmula $v = \sqrt{dx^2 + dy^2}$, obtenida de [Tolosana, 2014].

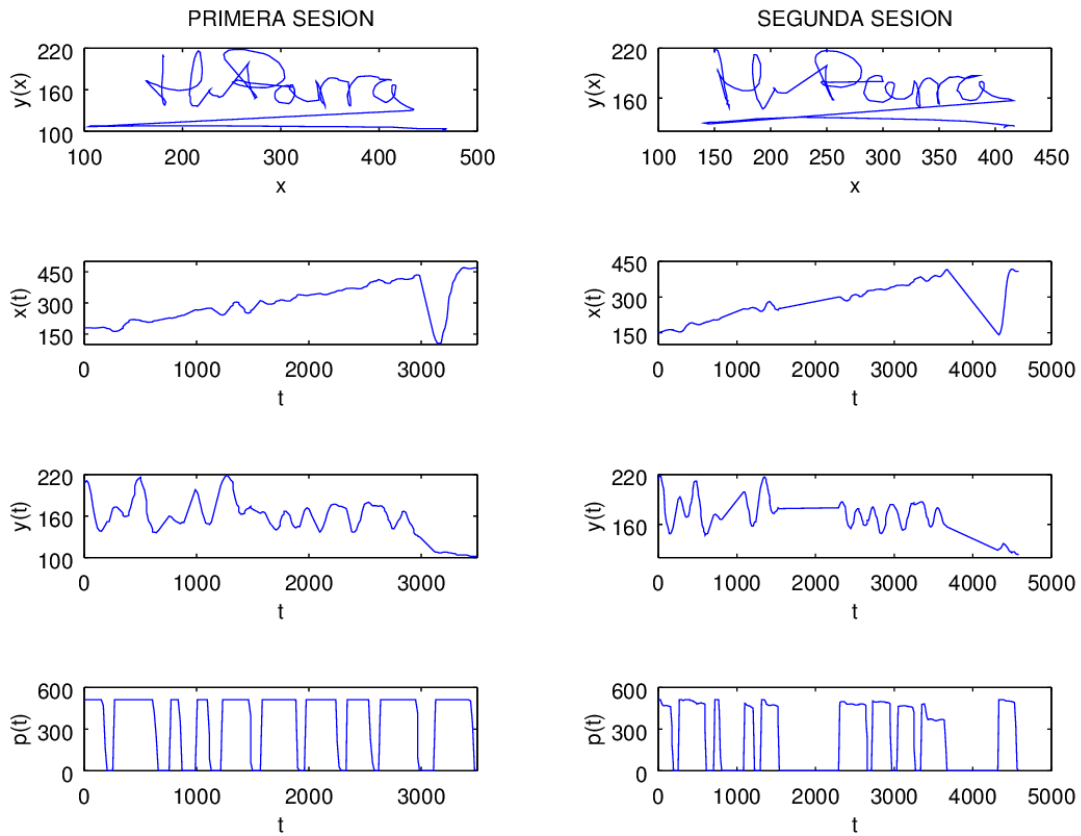


Figura 20. Características iniciales (grabadas directamente durante la adquisición de la firma) en la BDD SigmaTech Basic.

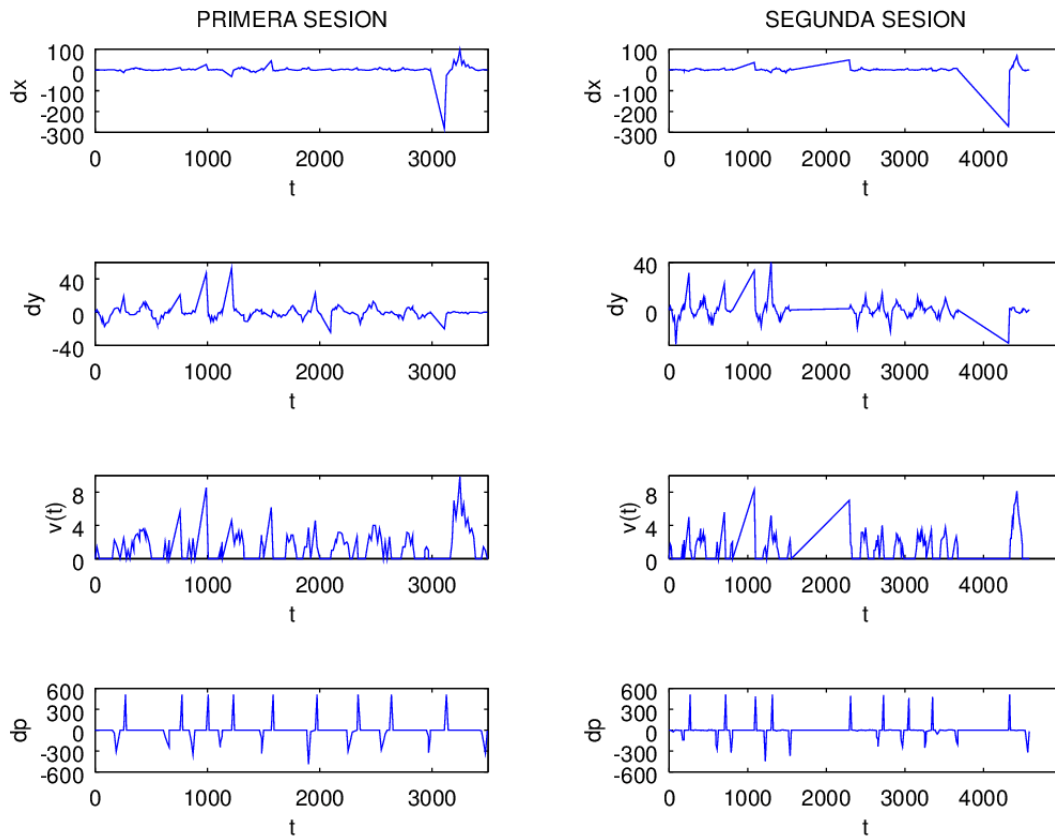


Figura 21. Características derivadas (calculadas a partir de las grabadas durante la adquisición de la firma) en la BDD SigmaTech Basic.

4.2.1 CONTEO Y ACONDICIONAMIENTO INICIAL

Esta base de datos fue grabada en condiciones mucho más controladas, por lo que en su procesamiento inicial ya no fue necesario llevar a cabo toda la parte de recuento de número de firmas, número de usuarios y sesiones por usuario. Sí que se realizó sin embargo el cambio de coordenadas y, y el cambio del origen temporal para que todas las muestras partan de 0, puesto que las firmas fueron grabadas con el mismo dispositivo que la base de datos ya descrita antes, por lo que los datos adquiridos presentaban los mismos 'problemas' en ambas BDD. La BDD *SigmaTech GDE* tiene las siguientes características:

- Se dispone de un total de **33 usuarios distintos**.
- De ambos se dispone de ambas sesiones grabadas, con una diferencia entre sesiones de unas 2 semanas.
- En cada sesión se cuenta con 60 firmas de cada usuario:
 - 10 firmas estándar
 - 5 firmas sobre línea de guía inclinada 10°.
 - 5 firmas sobre línea de guía inclinada 20°.
 - 5 firmas sobre línea de guía inclinada 30°.
 - 5 firmas sobre recuadro desplazado arriba a la derecha.
 - 5 firmas sobre recuadro desplazado arriba a la izquierda.
 - 5 firmas sobre recuadro desplazado abajo a la derecha.
 - 5 firmas sobre recuadro desplazado abajo a la izquierda.
 - 5 firmas sobre recuadro de tamaño aumentado un 25% respecto al recuadro estándar.
 - 5 firmas sobre recuadro de tamaño disminuido un 25% respecto al recuadro estándar.
 - 5 firmas sobre recuadro de tamaño disminuido un 50% respecto al recuadro estándar.

Esto hace un total de **3960 firmas**, por lo que, en total, se consiguió una BDD de dimensiones bastante aceptables. Hubiera sido deseable disponer de más usuarios, y de más de 5 firmas para cada conjunto de transformaciones (10 firmas, por ejemplo, como en el caso de las firmas estándar). Sin embargo, esta base de datos se grabó sin fondos, por lo que no resulta tan sencillo convencer a los usuarios para que participen sin nada a cambio. Por otro lado, hay que recordar que con el dimensionamiento descrito ya se graban 60 firmas por usuario y por sesión, que es un número considerable de firmas. Aumentar de 5 a 10 el número de firmas por usuario y por sesión para cada conjunto de transformaciones, hubiera dado lugar a 110

firmas por usuario y por sesión, un número demasiado grande y poco viable de conseguir para una base de datos grabada sin fondos como se comentaba anteriormente.

Se realizan dos gráficas similares a las ya presentadas para la BDD 1, en las que se observan las funciones adquiridas y algunas derivadas para una firma estándar, tomando una realización de ese firmante de la primera sesión y otra de la segunda sesión.

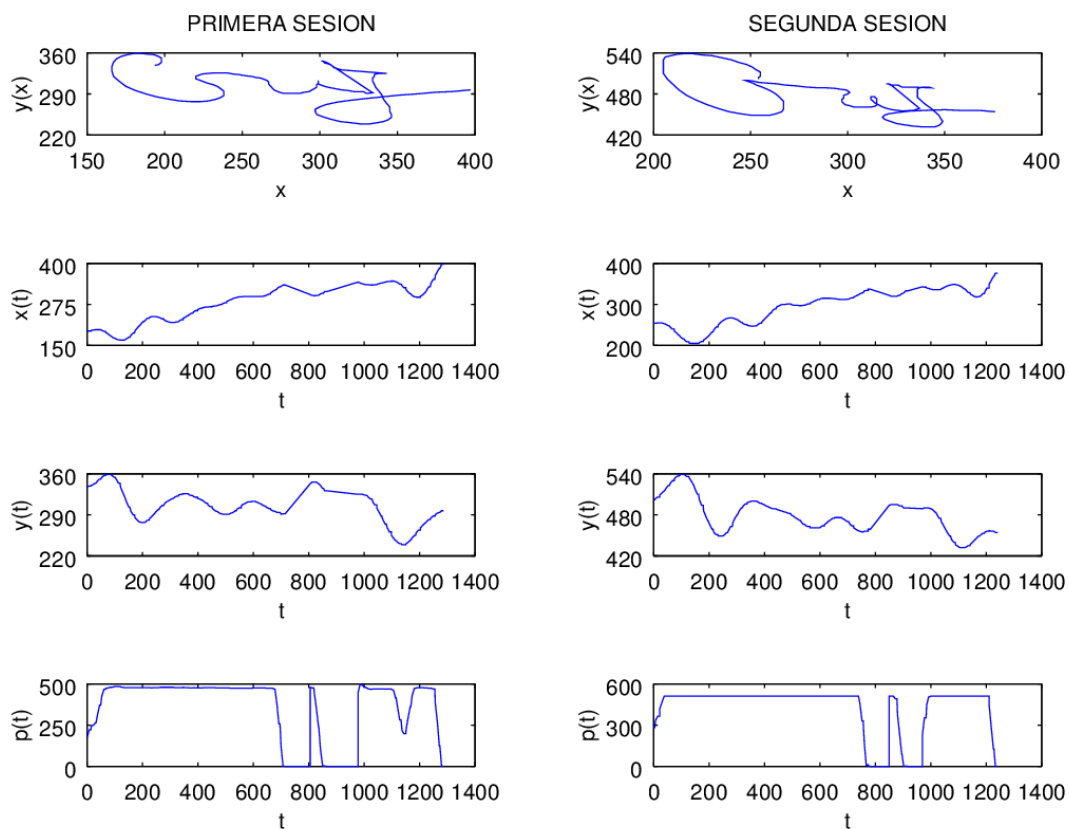


Figura 22. Características iniciales (grabadas directamente durante la adquisición de la firma) en la BDD SigmaTech GDE.

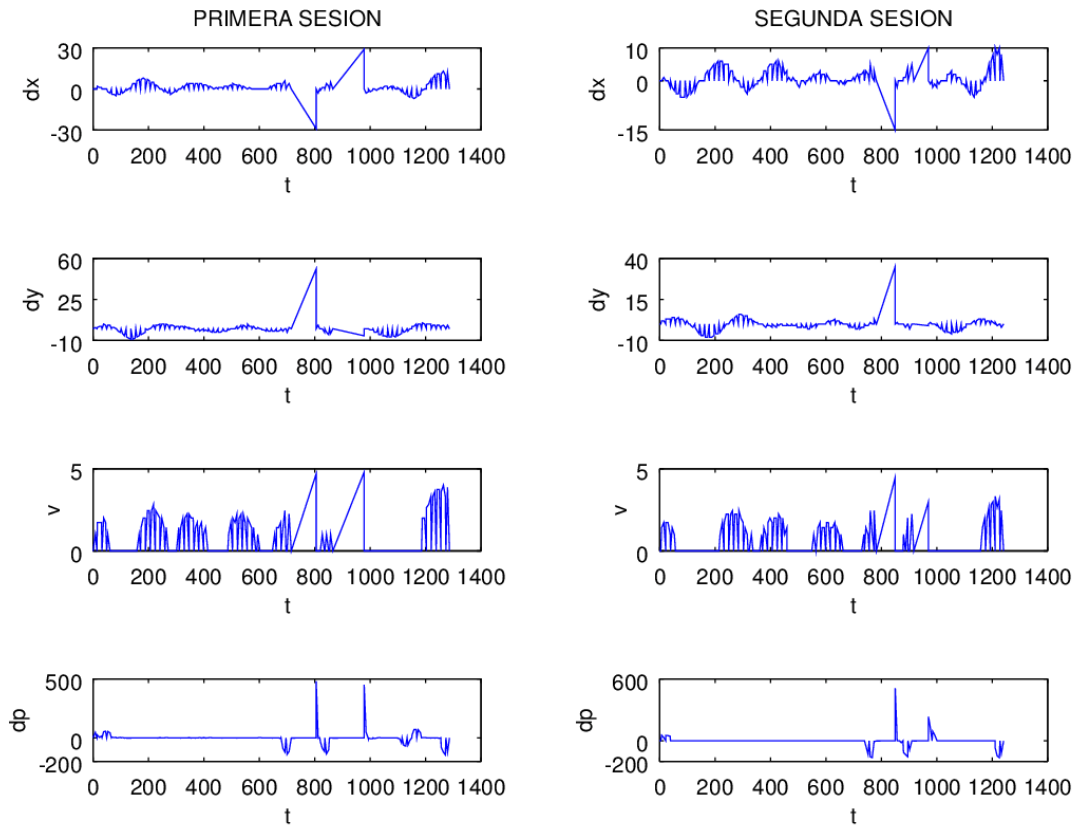


Figura 23. Características derivadas (calculadas a partir de las grabadas durante la adquisición de la firma) en la BDD SigmaTech GDE.

4.2.2 ESTUDIO DE LAS FUNCIONES TEMPORALES EN LOS CONJUNTOS DE FIRMAS ESCALADAS

Uno de los objetivos del Proyecto era observar si alguna de las transformaciones geométricas en la firma tiene efecto también sobre otras características temporales (distintas de las coordenadas x e y). Las características analizadas han sido la velocidad y la presión del trazo. Este estudio se orienta fundamentalmente sobre las firmas escaladas, ya que se presupone que los giros y desplazamientos no tienen por qué afectar particularmente a la velocidad o la presión, ya que no afectan a la geometría interna de la firma, sino a cómo está posicionada la firma respecto a su alrededor.

En este sentido, se han obtenido las velocidades y presiones medias de cada conjunto de firmas según su tamaño (firmas estándar, firmas grabadas sobre recuadro al 50% sobre el estándar, al 75%, y al 125%). La presión es una característica básica, mientras que para el

cálculo de la velocidad se utilizó la fórmula ya descrita anteriormente (pag. 59). En la figura 24 se muestran los resultados obtenidos. En el caso de la presión, no se disponen de unidades como tal, pero se sabe que los niveles de presión posibles del dispositivo de adquisición utilizado iban de 0 a 128.

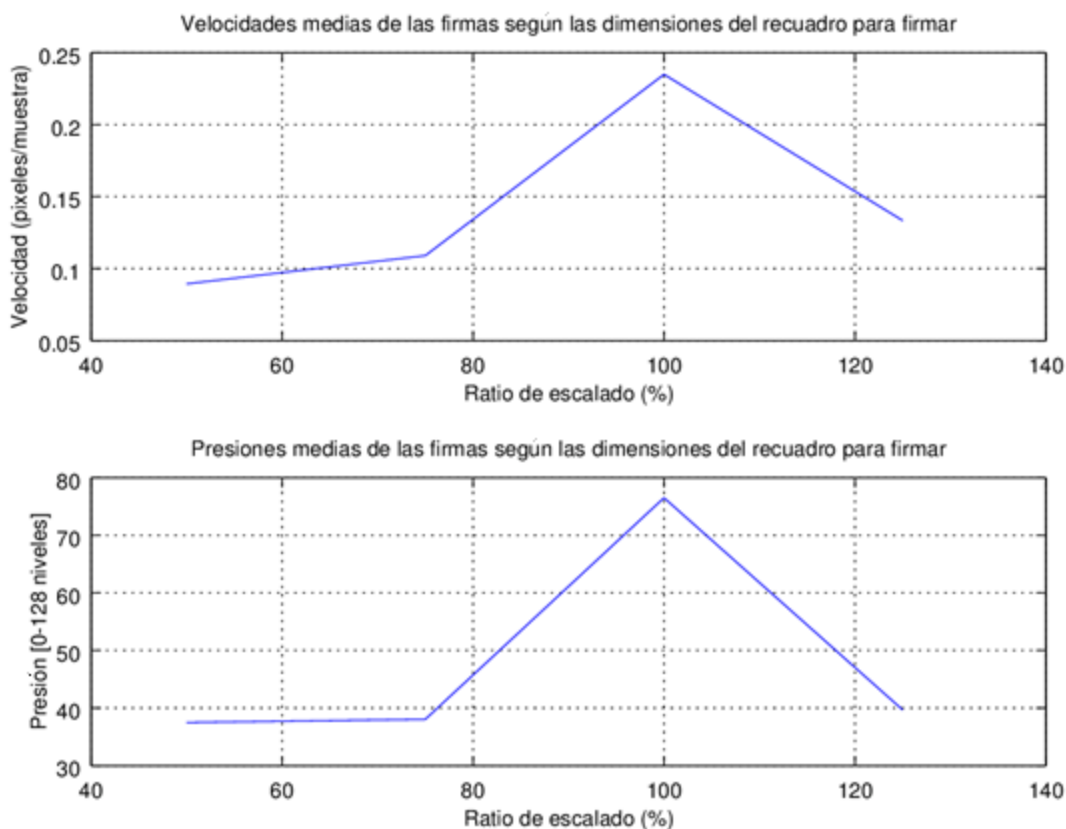


Figura 24. Velocidad y presión medias de cada conjunto de firmas grabadas sobre recuadros de distintas dimensiones.

La **velocidad media** y **presión media** de mayores magnitudes se obtienen en las firmas grabadas sobre el recuadro estándar. Para el resto de conjuntos, la velocidad y la presión media son menores, tanto en el caso de las firmas grabadas en el recuadro de mayor tamaño como en los casos de recuadros más pequeños que el estándar. Parece por tanto que el tamaño de la firma tiene influencia en estas características (al menos en su media).

Se desea conocer también si el escalado tiene algún efecto, además de en la velocidad y presión media, en los perfiles de éstas (es decir, en la forma de las funciones temporales en sí). Para ello, se analizan las gráficas temporales de velocidad de los distintos conjuntos de firmas escaladas de los 33 firmantes. Tras el análisis se concluye que el aumento o disminución del

tamaño no tiene ningún efecto particular sobre el perfil temporal de la velocidad. Del mismo modo, se analizan los perfiles temporales de la presión para los conjuntos de firmas escaladas de cada uno de los 33 firmantes. En el caso de la presión, se observa una mayor variabilidad entre los perfiles temporales de un mismo firmante que en el caso de las gráficas de la velocidad. Sin embargo, esta variabilidad se observa ya de por sí entre las gráficas de las distintas firmas del conjunto estándar. Las variaciones observadas luego para los distintos conjuntos escalados no son mayores que las observadas entre las realizaciones de las firmas estándar. Por tanto, al igual que en el caso de la velocidad, se concluye que el cambio en tamaño de la firma no tiene impacto sobre el perfil temporal de la presión, más allá de las variabilidades propias que puedan producirse ya entre las distintas realizaciones sin existir un cambio de tamaño.

En el anexo A.3 se presentan, como muestra, las gráficas temporales (tanto de la velocidad como de la presión) de las cuatro primeras realizaciones de la primera sesión de tres firmantes distintos.

5 DESARROLLO, PRUEBAS Y RESULTADOS

5.1 ENTORNO SIMULADO: BDD 1 (*SIGMATECH BASIC*)

5.1.1 EVALUACIÓN INICIAL DEL SISTEMA

Para tener una referencia con la que poder comparar posteriormente los resultados obtenidos en cada experimento, es necesario realizar una evaluación inicial del rendimiento del sistema con la base de datos original (es decir, sin aplicar a las firmas ninguna transformación geométrica).

En la figura 25 pueden observarse las curvas DET obtenidas en esta evaluación inicial del sistema con la base de datos *SigmaTech Basic*, presentando por separado los resultados para la primera y segunda sesión, así como el resultado de evaluar globalmente las firmas de ambas sesiones. Los datos numéricos concretos de EER son: **4.23 % para las firmas de la primera sesión, 4.81 % para las firmas de la segunda sesión y 4.55 % para el conjunto total de las firmas** (es decir, teniendo en cuenta ambas sesiones). Tanto observando la gráfica de las curvas DET como a partir de los datos numéricos, se extrae que el rendimiento usando solo las firmas de la segunda sesión es peor que el rendimiento obtenido usando solo las firmas de la primera sesión. Es decir, que la variabilidad intersesión está afectando al rendimiento del sistema. Esto era esperable, ya que suele ser la tendencia habitual que se observa al evaluar cualquier sistema con una base de datos que conste de diversas sesiones. También hay que tener en cuenta que durante la grabación de la base de datos, se pidió a los usuarios que las firmas fuesen inventadas, por razones legales y de protección de datos fundamentalmente. Esto puede hacer que el paso del tiempo influya incluso más que en el caso de que se usasen firmas reales, y que una diferencia de solo dos semanas entre sesiones repercuta realmente en la buena realización de las firmas, y por tanto en el rendimiento obtenido.

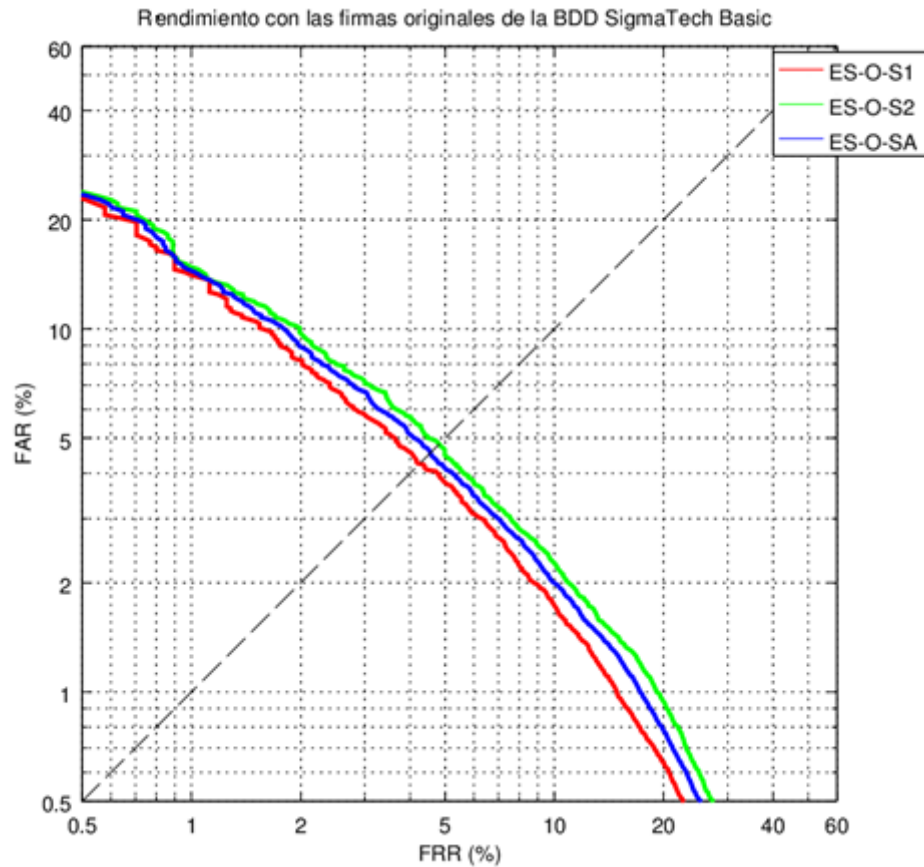


Figura 25. Evaluación inicial del sistema con la BDD SigmaTech Basic.

5.1.2 EXPERIMENTOS

5.1.2.1 Realización de las transformaciones geométricas

En esta sección se describen brevemente los algoritmos utilizados para llevar a cabo las transformaciones geométricas descritas en la sección 3.2.1. Además, se incluyen diversas gráficas de las transformaciones realizadas:

- **Giros.**

Como punto de referencia para realizar las rotaciones se utiliza el centro de masas de la firma, y como ángulo nulo se toma la horizontal. Para realizar la rotación es necesario por

tanto poner primero todos los puntos respecto al centro de masas de la firma. Posteriormente, se realiza un cambio a coordenadas polares, y así se puede llevar a cabo el giro sobre el punto deseado. Finalmente, se deshacen estos dos cambios para escribir en el archivo de salida la firma rotada en coordenadas cartesianas y respecto al origen de coordenadas, no respecto a su centro de masas.

En la figura 26 se puede observar una firma original y sus versiones giradas según tres ángulos distintos (15° , 30° y 45°), usando como punto de referencia para el giro el centro de masas de la firma.

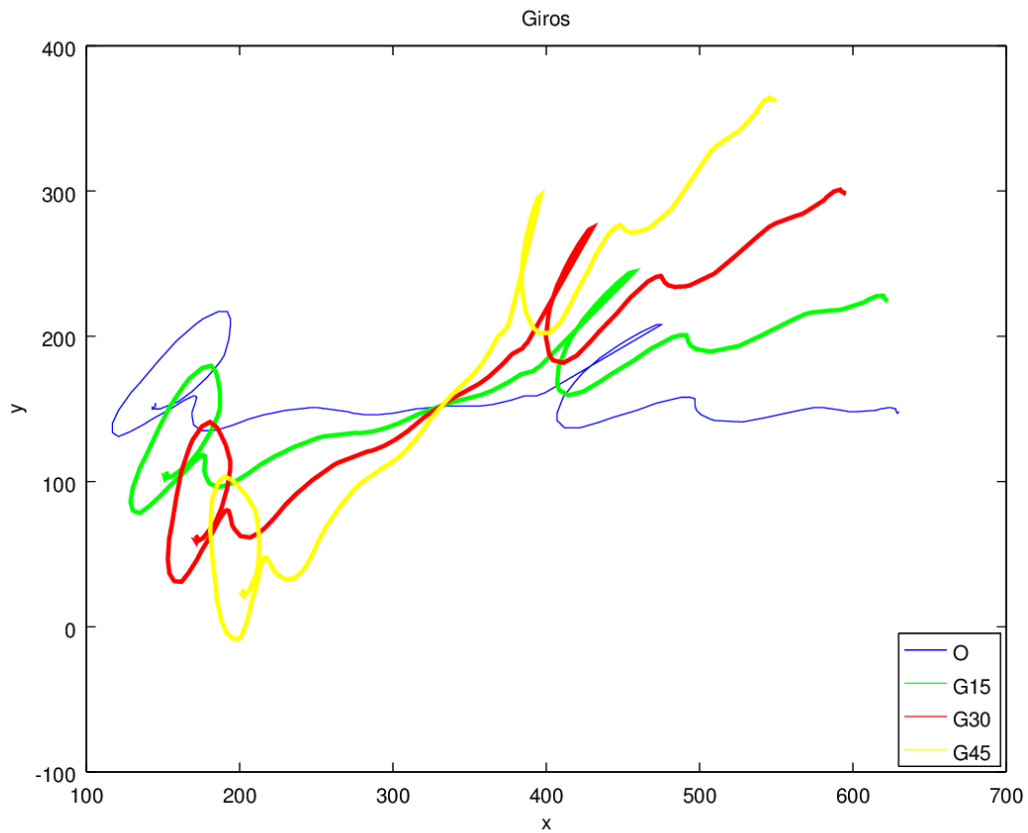


Figura 26. Firma original (en azul) y sus versiones giradas según distintos ángulos (15° , 30° y 45°).

- **Desplazamientos.**

En el caso de los desplazamientos no es necesario hacer ningún cambio de coordenadas como en el caso de la rotación. Simplemente se suma o resta a cada coordenada (x, y) el número de unidades asignadas para cada conjunto desplazado.

En la figura 27 pueden observarse las versiones desplazadas según lo descrito en la tabla 5, junto con la firma original correspondiente.

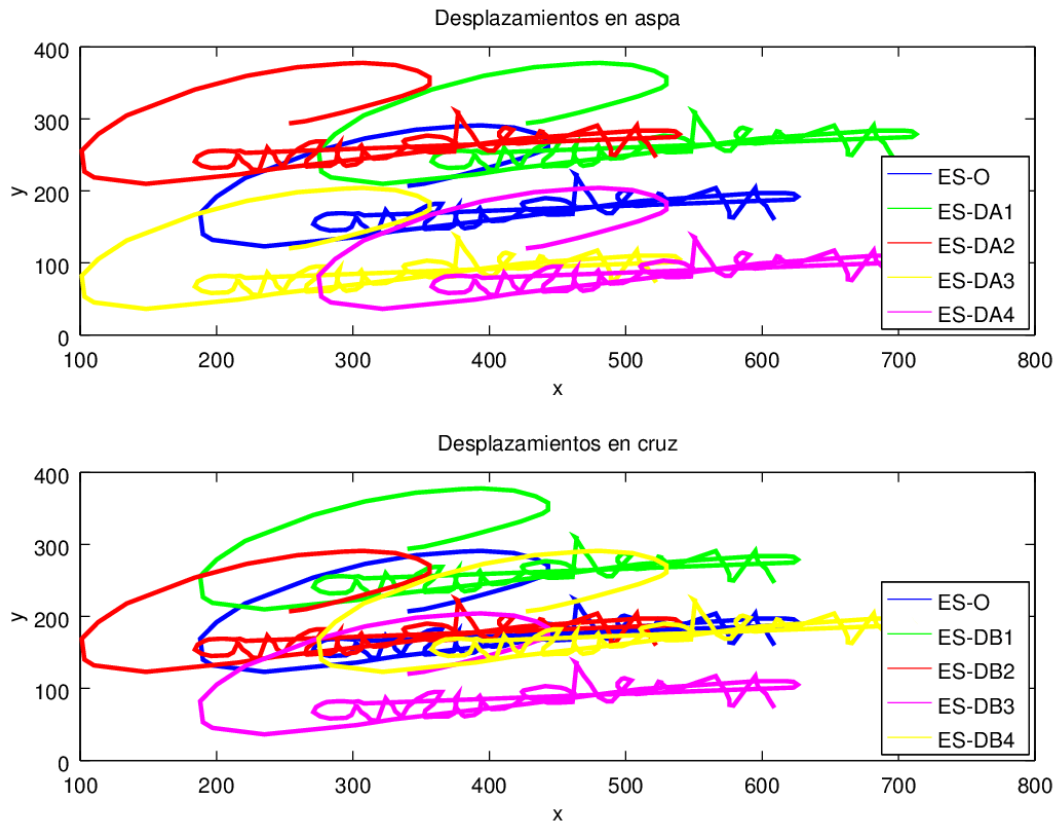


Figura 27. Firma original (en azul) y sus versiones desplazadas hacia distintas direcciones (serie en 'aspa' arriba, y serie en 'cruz' abajo).

- **Escalado.**

El algoritmo de escalado se implementa como una homotecia, tomando como centro de esta transformación afín el centro de masas de la firma. La razón de escalado aplicada en cada caso es precisamente la razón de la homotecia. Los pasos son similares al caso del giro, y son los siguientes:

- 1) Se calculan las coordenadas de la firma respecto de su centro de masas (esto es equivalente a decir que se toma el centro de masas como origen de coordenadas).
- 2) Se cambia a coordenadas polares: $(x_o, y_o) \rightarrow (\rho_o, \Theta)$
- 3) Se realiza el escalado multiplicando cada ρ por la razón (k) deseada en cada caso: $\rho_{final} = k * \rho_o$
- 4) Se vuelve a coordenadas cartesianas: $(\rho_{final}, \Theta) \rightarrow (x_{finalAUX}, y_{finalAUX})$
- 5) Se vuelven a poner los puntos x e y de la firma respecto al origen de coordenadas, obteniendo así como resultado cada punto de la firma resultante escalada.

$$(x_{final}, y_{final}) = (x_{finalAUX} + x_{CM}, y_{finalAUX} + y_{CM})$$

En la figura 28 puede observarse las diferentes versiones escaladas de una firma según las razones 50%, 75% (disminución del tamaño original) y 125% (aumento del tamaño original).

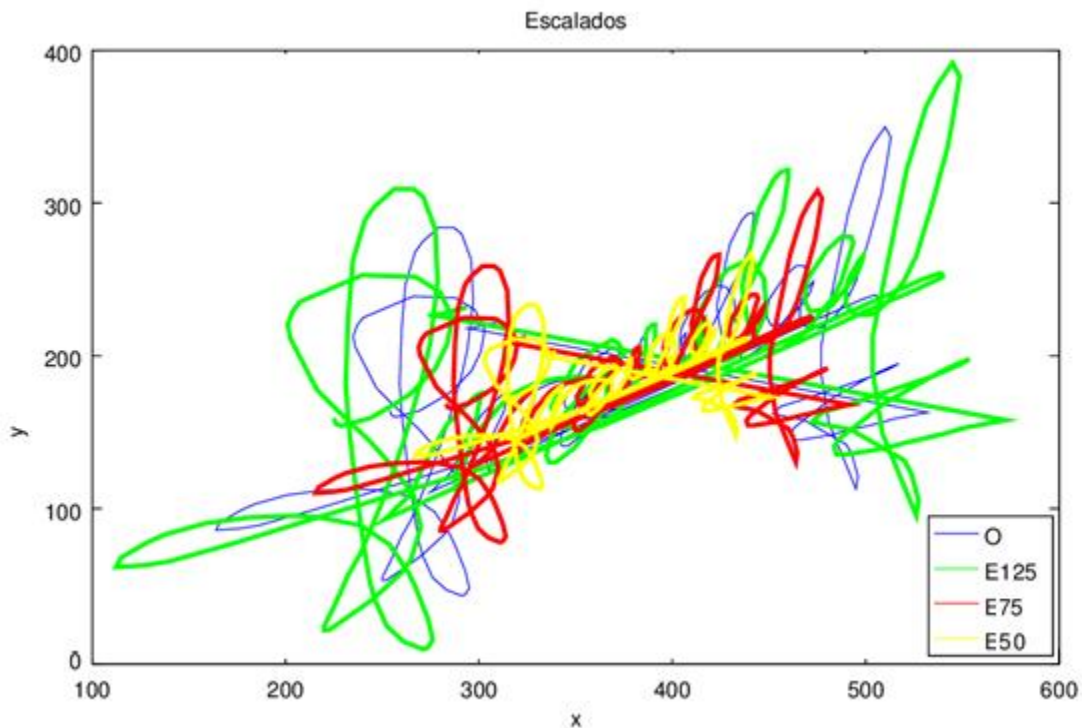


Figura 28. Firma original (en azul) y sus versiones escaladas según distintas razones.

5.1.2.2 Evaluación del rendimiento en cada caso

5.1.2.2.1 Giros

Mediante los experimentos realizados se ha demostrado que las variaciones en el ángulo de giro de un firmante tienen una influencia considerable en el rendimiento del sistema. Según va aumentando el ángulo de giro se observan empeoramientos significativos en los resultados obtenidos, que pueden observarse en las figuras 29 y 30. La tendencia observada en el empeoramiento del rendimiento es la misma en ambos sentidos de giro de la firma (es decir, hacia ángulos negativos y hacia ángulos positivos).

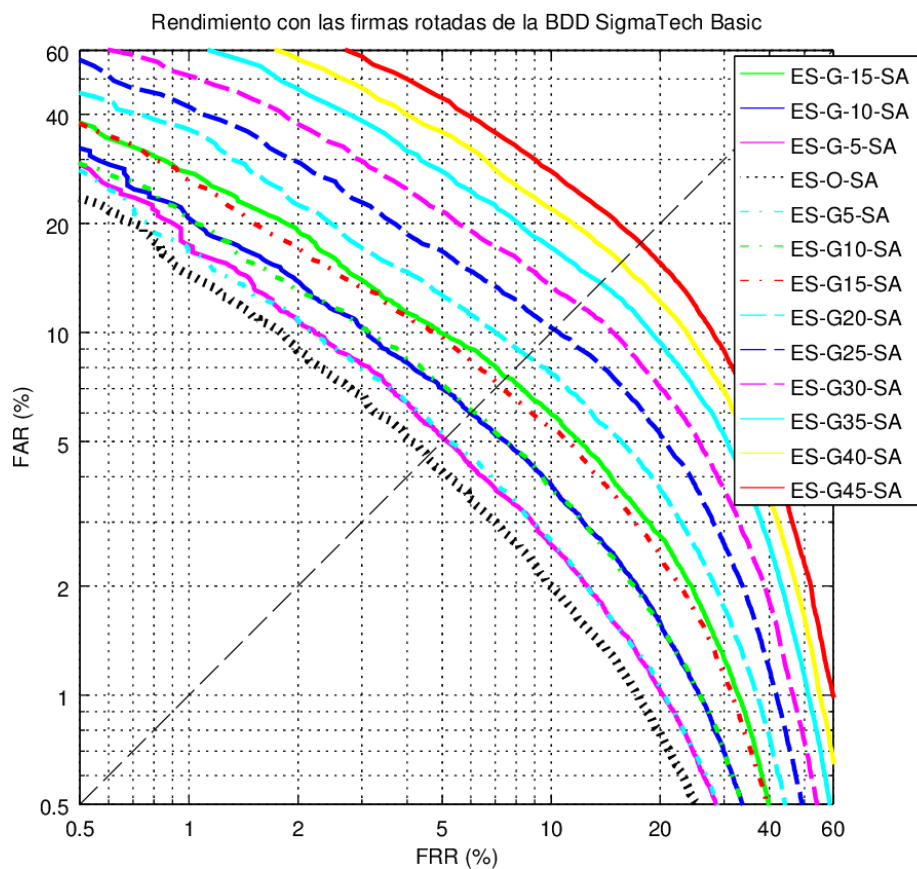


Figura 29. Rendimiento con las firmas de la BDD SigmaTech Basic rotadas (entorno simulado).

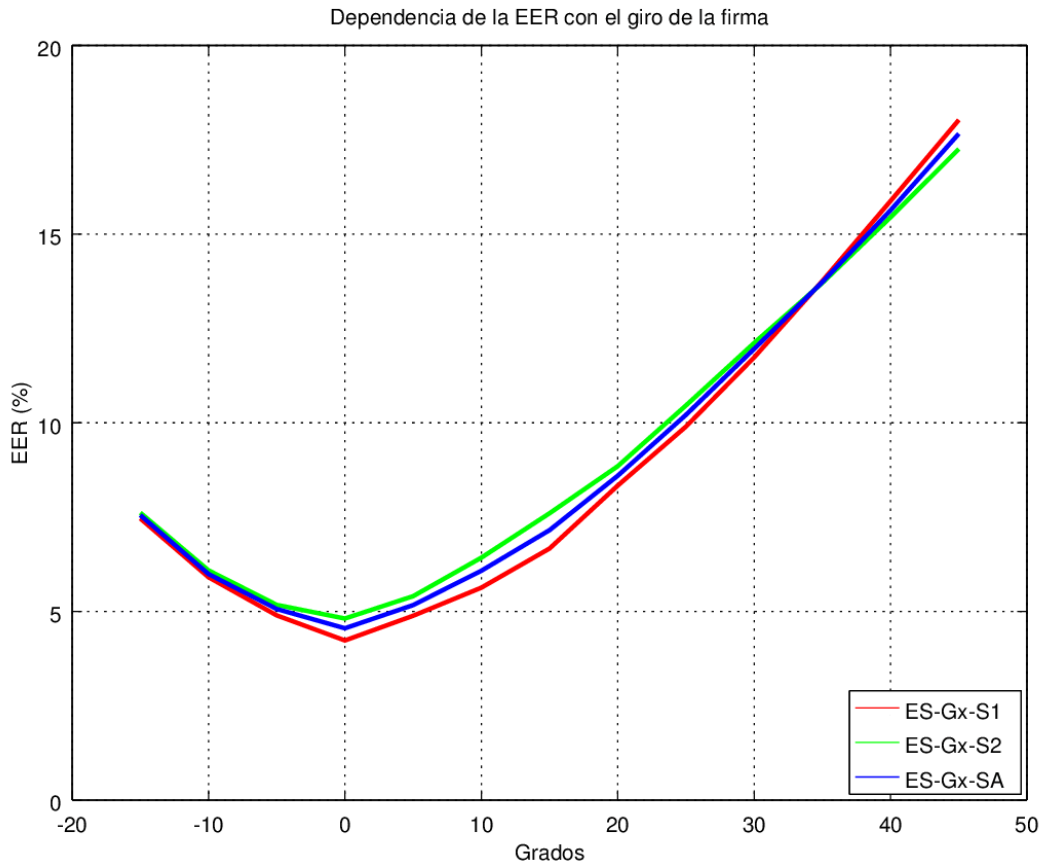


Figura 30. Dependencia de la EER con el giro de la firma en la BDD SigmaTech Basic (entorno simulado).

5.1.2.2 Desplazamientos

En el caso de los desplazamientos, se obtienen unos resultados muy interesantes, ya que no corresponden con lo que se esperaba antes de realizarlos. Previamente a la realización de los experimentos, se tenía la idea de que el rendimiento del sistema dependería de la distancia a la firma original (del módulo del vector de desplazamiento). Sin embargo, se obtiene que el desplazamiento en la coordenada y apenas afecta, mientras que el desplazamiento en la coordenada x influye en gran medida en el resultado de la verificación. Además, el desplazamiento en x, afecta más si es hacia la izquierda (hacia x negativos) que si es hacia la derecha (hacia x positivos), para igual módulo del vector dx en cada caso. En la figura 31 se observa este efecto, ya que se superponen las curvas DET obtenidas para los conjuntos de firmas:

- DA2, DA3 y DB2 (alineadas todas en dx = -87 píxeles, con dy distintos).
- DA1, DA4 y DB4 (alineadas todas en dx = +87 píxeles, con dy distintos).

- O, DB1 y DB3 (alineadas en $dx = 0$ píxeles, con dy distintos). Cabe mencionar que en este caso no hay un solapamiento total entre la serie obtenida con el conjunto de firmas originales y las otras dos series con $dx=0$ (si bien se observa que ese solapamiento es prácticamente del 100%).

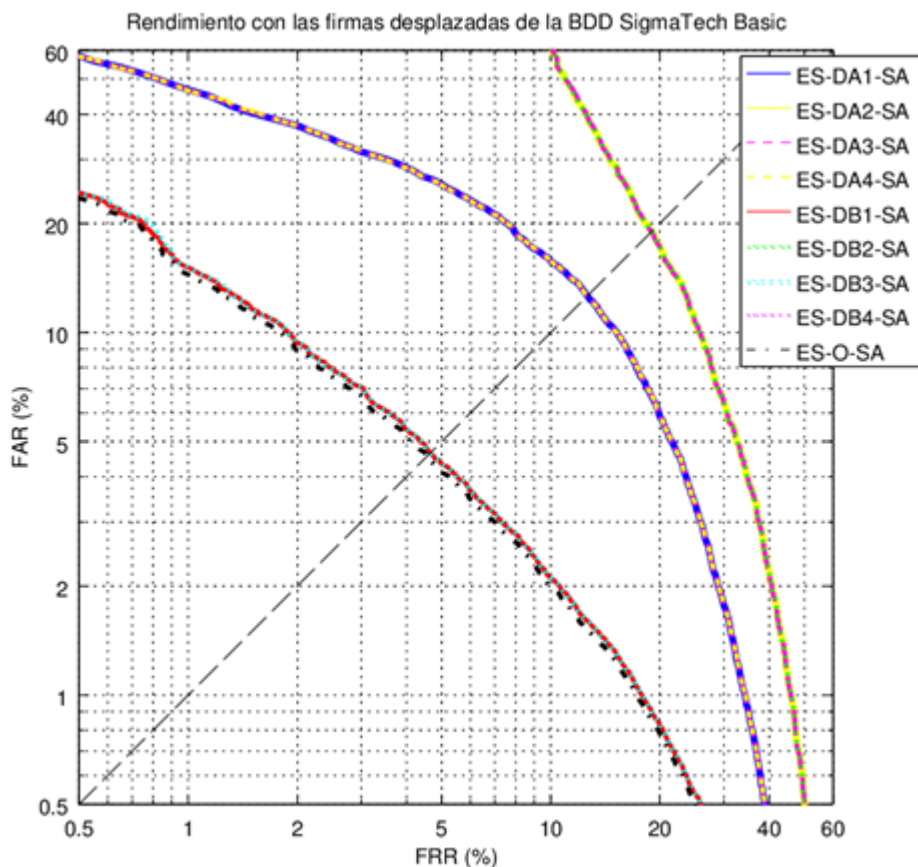


Figura 31. Rendimiento con las firmas de la BDD SigmaTech Basic desplazadas (entorno simulado).

Para una mejor comprensión de este fenómeno, en la figura 32, se presenta la dependencia de la EER con el desplazamiento en x de la firma, para los distintos conjuntos según su desplazamiento en y . En el caso de la gráfica superior, sus datos provienen por tanto de los conjuntos de firmas DA2, DB1 y DA1. Los de la representación del centro, de los conjuntos de firmas DB2, DB4 y las originales (sin desplazar). Y, los de la gráfica de la parte inferior, de los conjuntos DA3, DB2 y DA4. Comparando las gráficas, se observa que las EER obtenidas para los distintos desplazamientos en y son iguales.

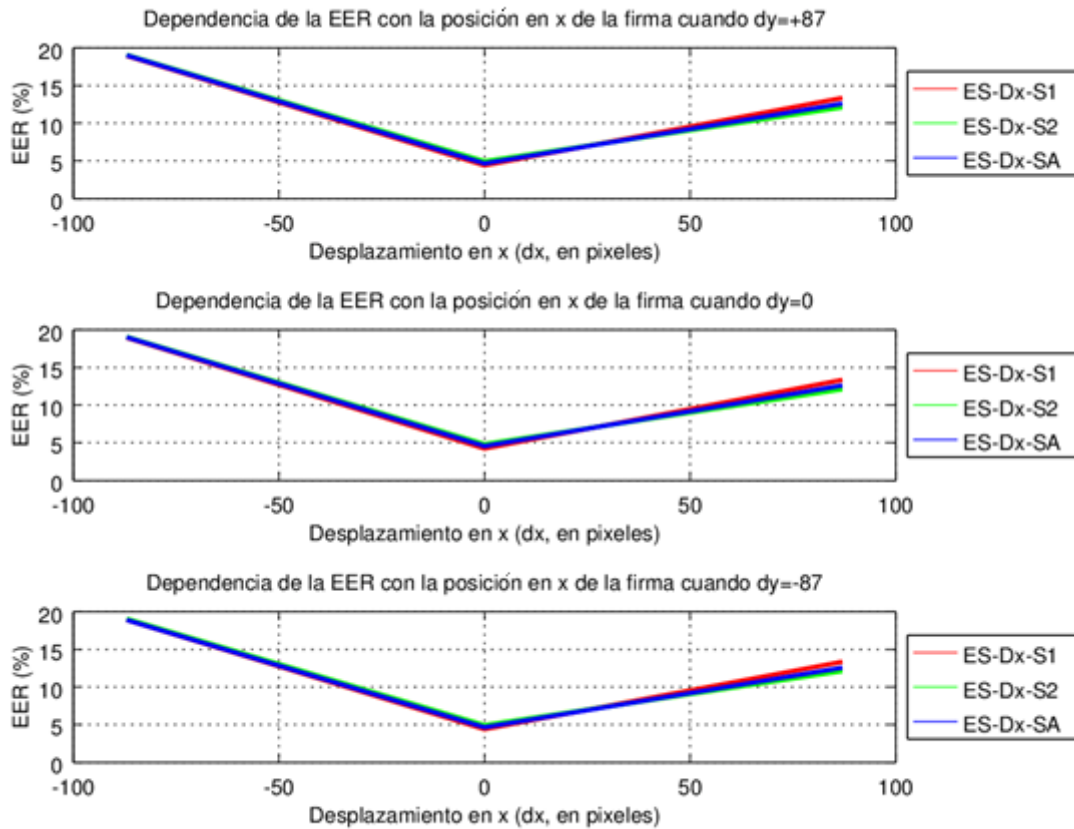


Figura 32. Dependencia de la EER con el desplazamiento en x, y según los distintos desplazamientos en y, en la BDD SigmaTech Basic (entorno simulado).

5.1.2.2.3 Escalados

Por último, se presentan las gráficas correspondientes a los resultados obtenidos con las firmas escaladas (figuras 33 y 34). Se observa, como en el caso de la rotación, que el tamaño de la firma también tiene un impacto bastante grande en el rendimiento del sistema, tanto en el caso del aumento de tamaño como en el caso de la disminución de tamaño.

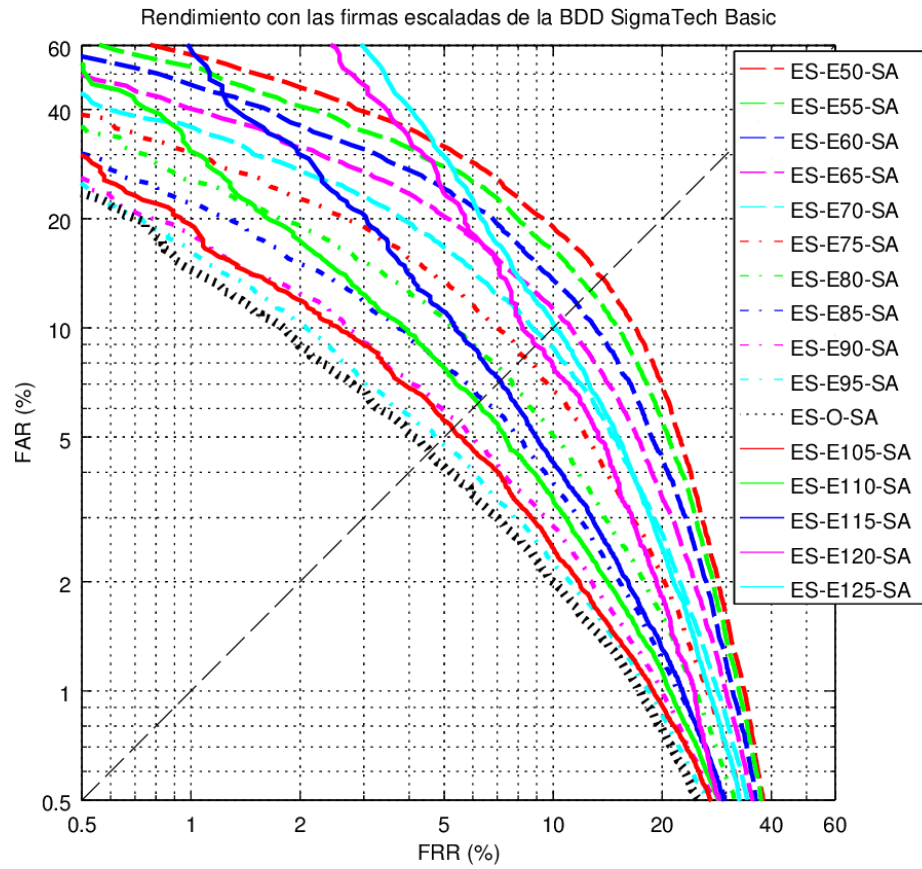


Figura 33. Rendimiento de las firmas de la BDD *SigmaTech Basic* escaladas (entorno simulado).

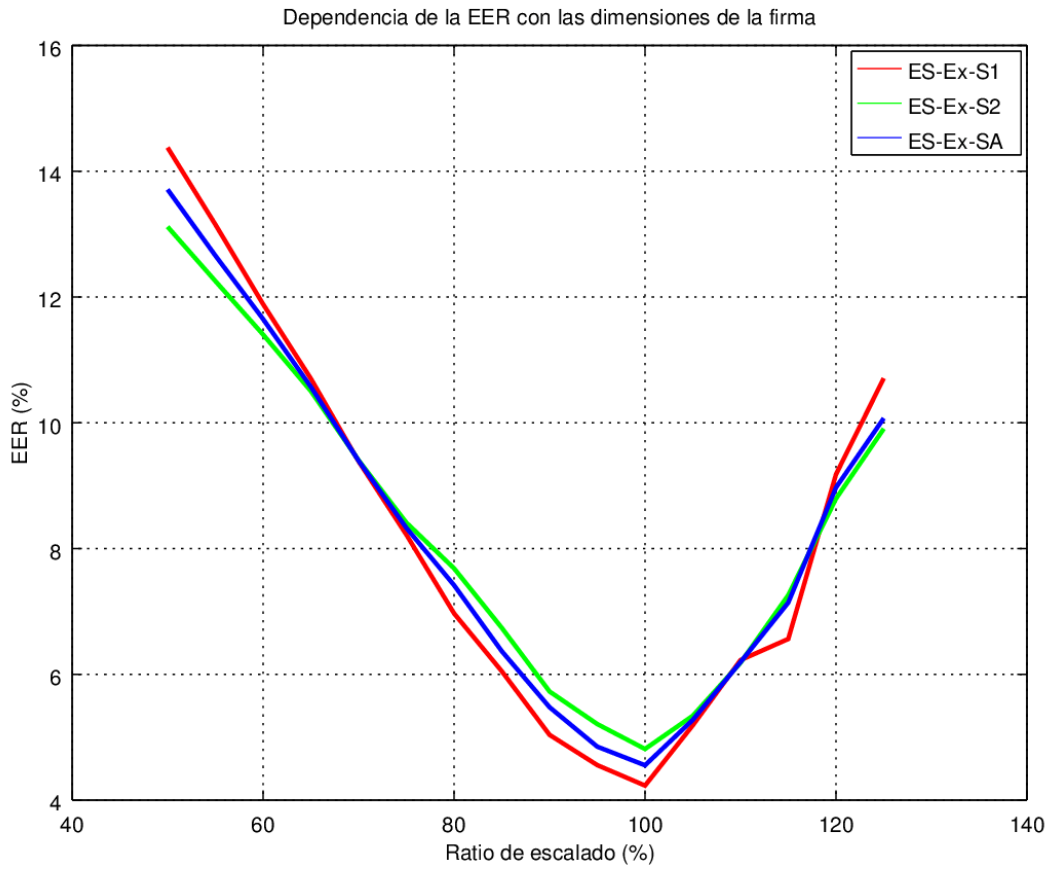


Figura 34. Dependencia de la EER con el tamaño de la firma en la BDD *SigmaTech Basic* (entorno simulado).

5.2.1 EVALUACIÓN INICIAL DEL SISTEMA

Para tener una referencia sobre la que después comparar los resultados con las distintas transformaciones se realiza inicialmente una evaluación del sistema únicamente con el conjunto de firmas estándar de la BDD SigmaTech GDE. Se obtiene una EER de **1.31%** utilizando únicamente las firmas de la **primera sesión**, mientras que tomando solo las firmas de la **segunda sesión** se obtiene una EER de **4.53%**, obteniéndose un **resultado global de EER del 3.40%**. Destaca por tanto la gran diferencia entre sesiones que hay en este caso, ya que los resultados de EER para la primera y la segunda sesión difieren en más de 3 puntos porcentuales, mientras que en la evaluación del sistema con la BDD SigmaTech Basic, la diferencia entre sesiones era menor del 0.5 %. Las curvas obtenidas se presentan en la figura 35.

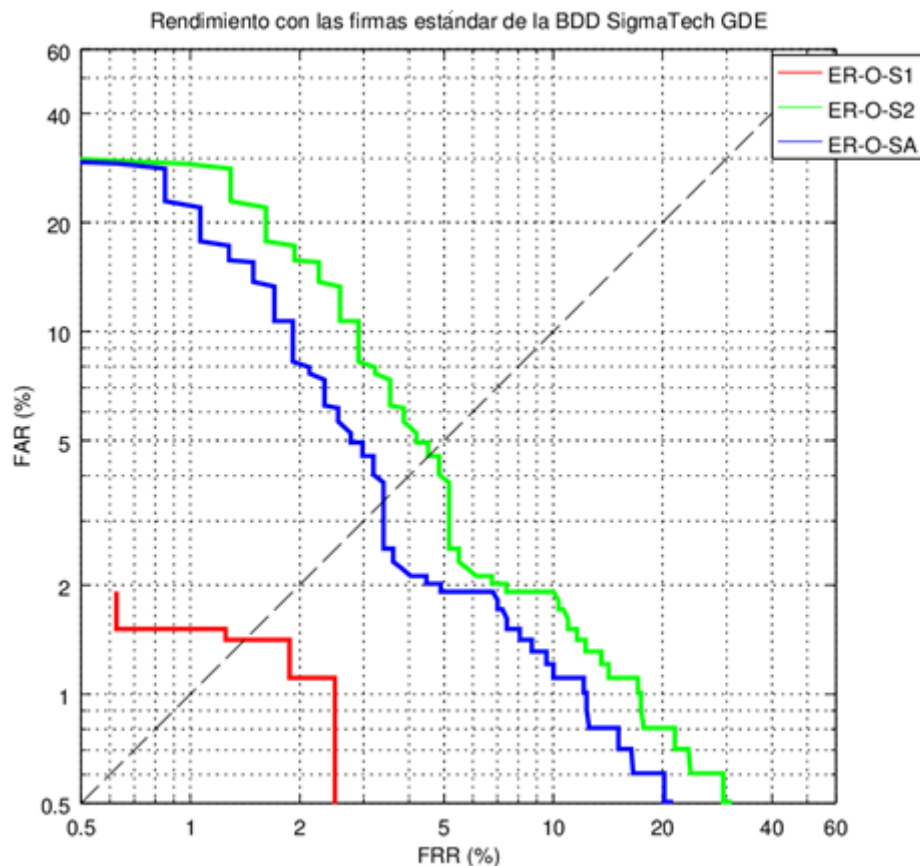


Figura 35. Evaluación inicial del sistema con las firmas estándar de la BDD SigmaTech GDE.

5.2.2 EXPERIMENTOS

5.2.2.1 Rendimiento de las firmas grabadas sobre una línea de guía inclinada

En la figura 36 se observan diversas firmas grabadas sobre las líneas de guía de distintas inclinaciones en la BDD SigmaTech GDE. Las firmas presentadas corresponden a la primera realización de la primera sesión de cada conjunto (estándar, giradas 10°, 20° y 30°). De cara a la representación en estas gráficas, se ha realizado una normalización de las firmas de los conjuntos girados respecto al centro de masas de la firma del conjunto estándar del firmante correspondiente. Esta normalización se ha llevado a cabo con el objetivo de poder observar mejor las inclinaciones entre las firmas. Sin embargo, a la hora de evaluar el rendimiento de las firmas inclinadas, no se realizó ninguna normalización previa.

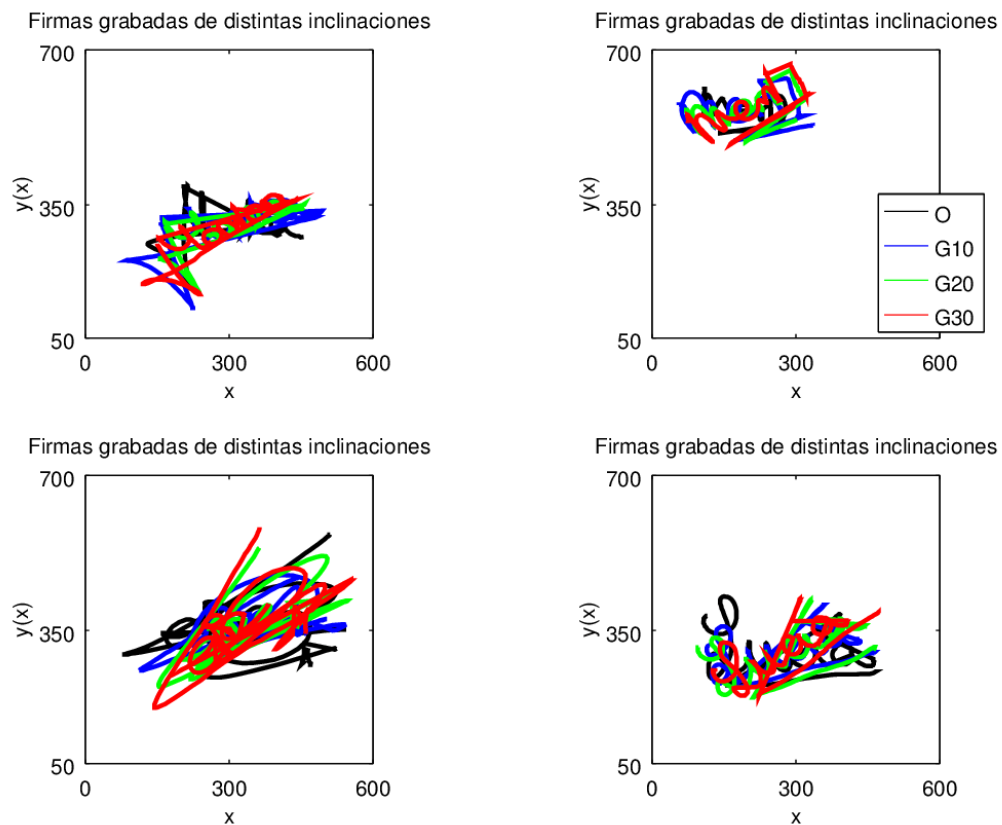


Figura 36. Firmas grabadas sobre líneas de distintas inclinaciones en la BDD SigmaTech GDE.

En la figura 37 se muestran las curvas DET de las firmas adquiridas con las líneas de guía con las distintas inclinaciones, junto con la curva obtenida para las firmas estándar, para facilitar el análisis y comparación de los resultados.

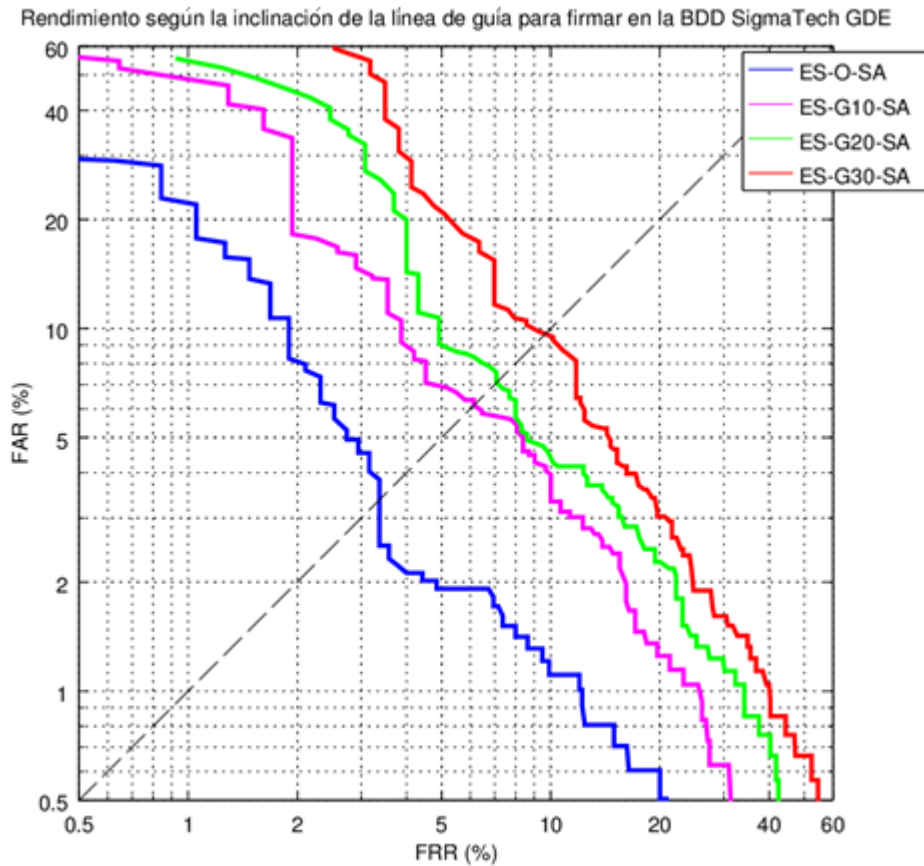


Figura 37. Curvas DET según la inclinación de la línea de guía utilizada para firmar en la BDD SigmaTech GDE.

En la figura 38 se representa la EER respecto a la inclinación de la línea utilizada como guía al adquirir la firma, incluyendo un desglose por sesiones. Hay que tener en cuenta que solo se dispone de datos con las líneas de guía inclinadas 10, 20 y 30 grados (el resto de la gráfica son interpolaciones). El rendimiento presentado en la gráfica para ángulo de giro nulo, es el obtenido con el conjunto de firmas estándar, grabado según se describió en la etapa de diseño de la BDD. El resto de la gráfica son interpolaciones (no se dispone de datos para otros ángulos distintos a 0, 10, 20 y 30). En el anexo A.1 pueden encontrarse los datos numéricos de EER concretos para cada conjunto de firmas y para cada sesión.

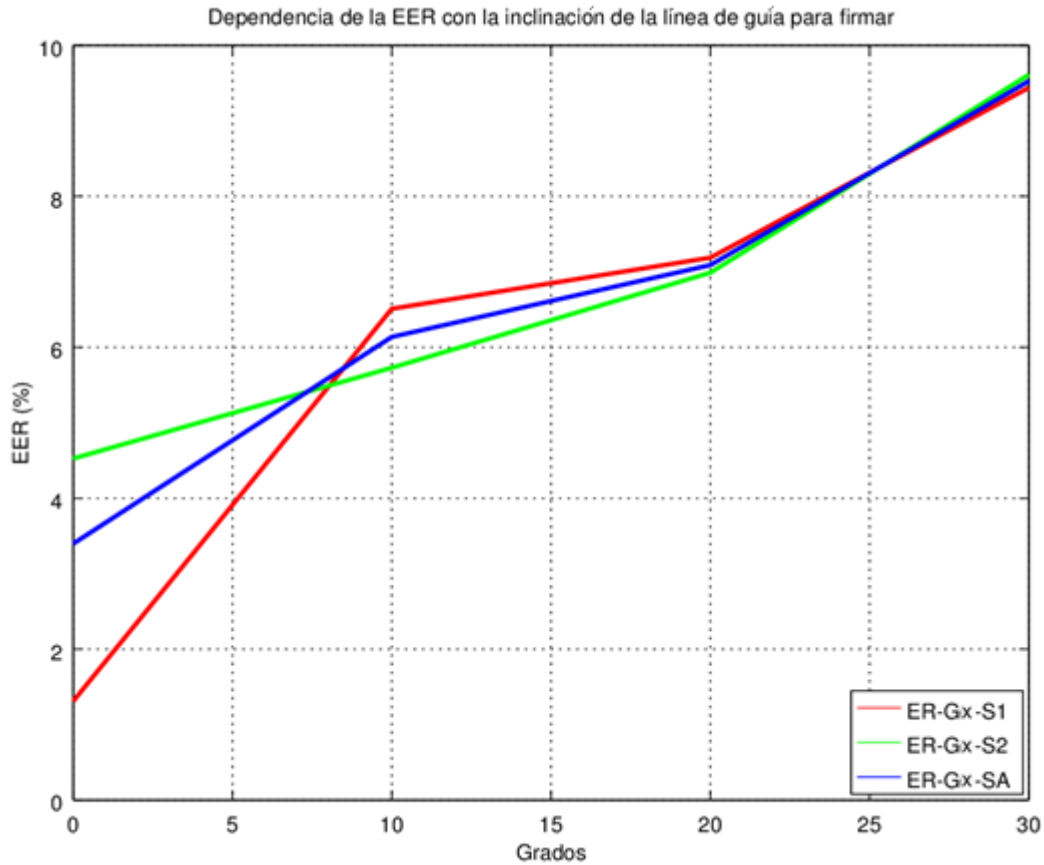


Figura 38. Dependencia de la EER con la inclinación de la línea de guía para firmar en la BDD SigmaTech GDE.

En la figura 38 puede observarse un efecto curioso en la EER obtenida para los conjuntos de firmas grabadas sobre las líneas de guía inclinadas 10 grados: el rendimiento obtenido para la segunda sesión es mejor que el rendimiento obtenido para la primera sesión. En el conjunto de firmas inclinadas 20 grados, este efecto se sigue produciendo, pero de forma mucho menos acentuada (los rendimientos por sesiones están más igualados). Por último, en el caso de las firmas inclinadas 30 grados, la tendencia se invierte, obteniéndose para la primera sesión un rendimiento mejor que para la segunda (si bien hay una diferencia muy pequeña). A partir de la tendencia descrita, se cree que este efecto se debe a que las firmas giradas fueron las primeras en grabarse, según el orden en el que iban apareciendo las distintas pantallas en la aplicación de adquisición de esta base de datos. Los usuarios practicaron varias veces su firma previamente al comienzo de la grabación, pero no sobre el teléfono, sino sobre papel. La imposibilidad de eliminar una firma una vez adquirida, y la ausencia de pruebas previas sobre el teléfono, hacen que el proceso de familiarización con la ergonomía singular de la superficie de firmado durante las primeras realizaciones de cada usuario influyan en el rendimiento obtenido.

Independientemente de las diferencias entre sesiones, si se presta atención únicamente a la línea azul de la figura 38, que presenta los datos obtenidos para el total de las firmas de la BDD, se concluye que este experimento reafirma los resultados ya obtenidos previamente en el caso del llamado 'entorno simulado' (aplicando artificialmente los giros sobre las firmas). **La inclinación de las firmas tiene una influencia para nada despreciable en el rendimiento del sistema.** En la sección 5.3 se presenta una comparación más detallada entre los resultados obtenidos en cada uno de los entornos de experimentación.

5.2.2.2 Rendimiento de las firmas grabadas sobre recuadros en distintas posiciones

En la figura 39 se muestran las firmas desplazadas a las distintas posiciones de cuatro firmantes distintos. Asimismo, se presentan las firmas en la posición estándar en negro. Para cada posición, se presentan las cinco primeras realizaciones de la primera sesión. Hay que tener en cuenta que las posiciones en las que se sitúan las firmas de los distintos conjuntos están sometidas a cierta variabilidad. Esto es debido a que, al ser los recuadros bastante amplios, hay un cierto margen en cuanto al lugar concreto en el que cada usuario firma dentro de cada recuadro. Este efecto se observa en las firmas representadas en la fila inferior.

En la figura 40 se muestran las curvas DET de las firmas estándar y de las adquiridas en las distintas posiciones. Analizando la gráfica, vemos que las líneas roja y azul están prácticamente superpuestas. Por otro lado, las líneas negra, verde y rosa, se sitúan también por la misma zona, y se cruzan y superponen en diversos puntos, siendo estas tres curvas mucho mejores en rendimiento que las líneas roja y azul. Comparando esto con la posición en el plano que corresponde a cada color, se concluye que los resultados obtenidos refuerzan lo mismo que ya se obtuvo en los experimentos en el entorno simulado: **el desplazamiento en y no afecta al rendimiento en la verificación posterior, mientras que el desplazamiento en x tiene un efecto considerable.**

Con una base de datos de mayores dimensiones que la grabada, seguramente se podrían haber obtenido superposiciones más perfectas entre las curvas DET para los conjuntos situados en un mismo eje x, ya que al tener mayor número de firmas se minimizarían los efectos de variación en el rendimiento debidos a la 'calidad' de las realizaciones de las firmas en sí.

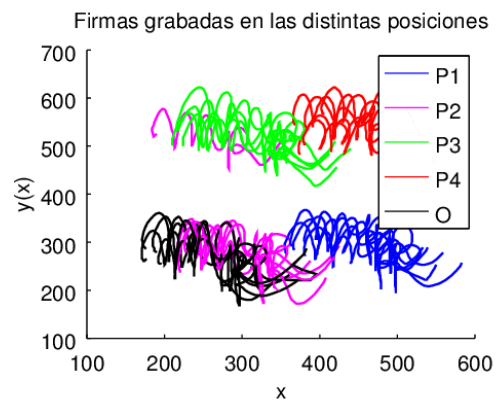
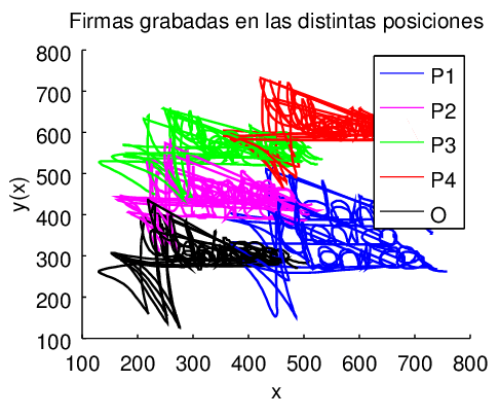
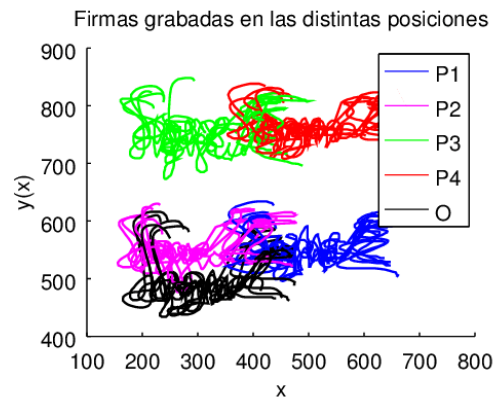
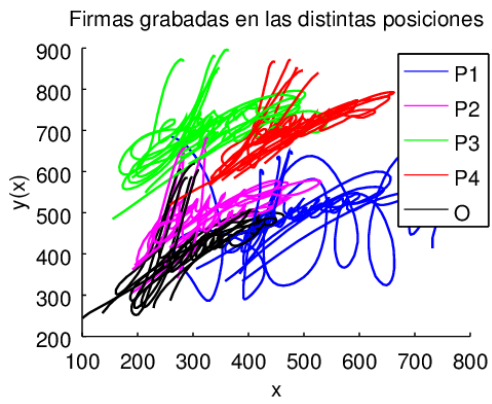


Figura 39. Firmas grabadas sobre los recuadros en distintas posiciones en la BDD *SigmaTech GDE*.

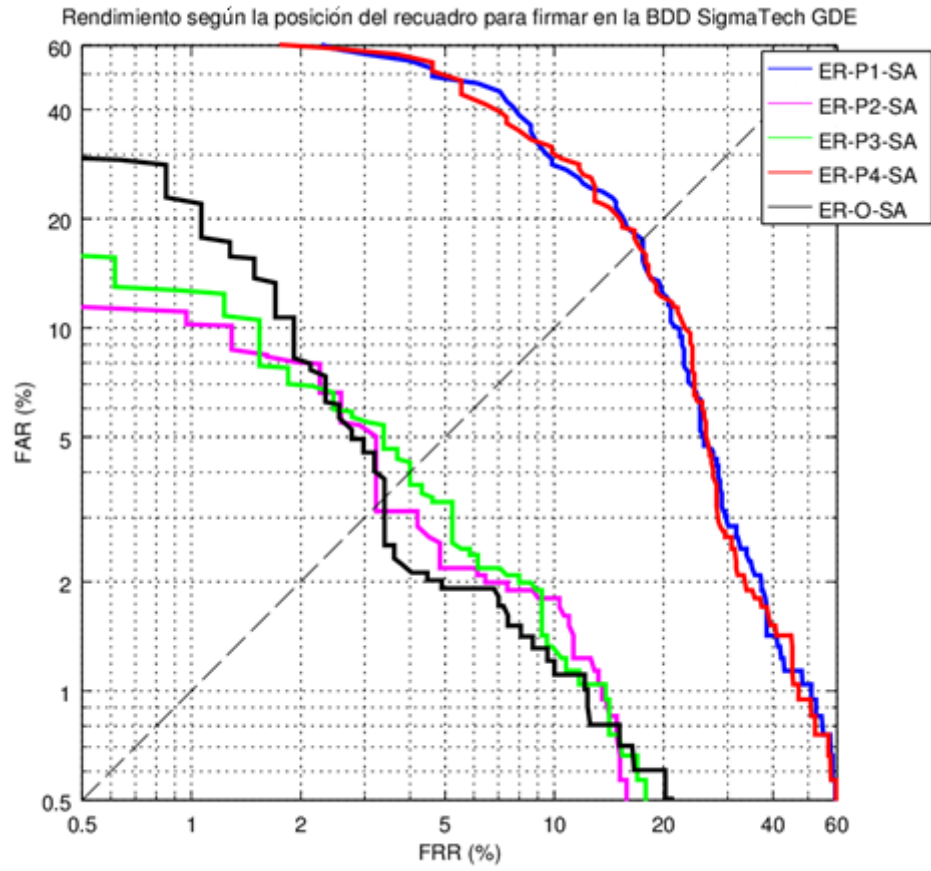


Figura 40. Rendimiento de las firmas grabadas sobre las distintas posiciones en la BDD SigmaTech GDE.

5.2.2.3 Rendimiento de las firmas grabadas sobre recuadros de distintas dimensiones

En la figura 41 se presentan diversas firmas grabadas sobre los recuadros de distintos tamaños en la BDD *SigmaTech GDE*. Las firmas representadas corresponden con la primera realización de la primera sesión del conjunto que corresponda en cada caso. Al igual que en el caso de las firmas inclinadas, a efectos de representación se realiza una normalización de las posiciones de las firmas respecto al centro de masas de la firma del conjunto estándar del firmante correspondiente. Esta normalización se ha llevado a cabo con el objetivo de poder observar mejor los escalados entre las firmas. Sin embargo, a la hora de evaluar el rendimiento de las firmas escaladas, no se realizó ninguna normalización previa.

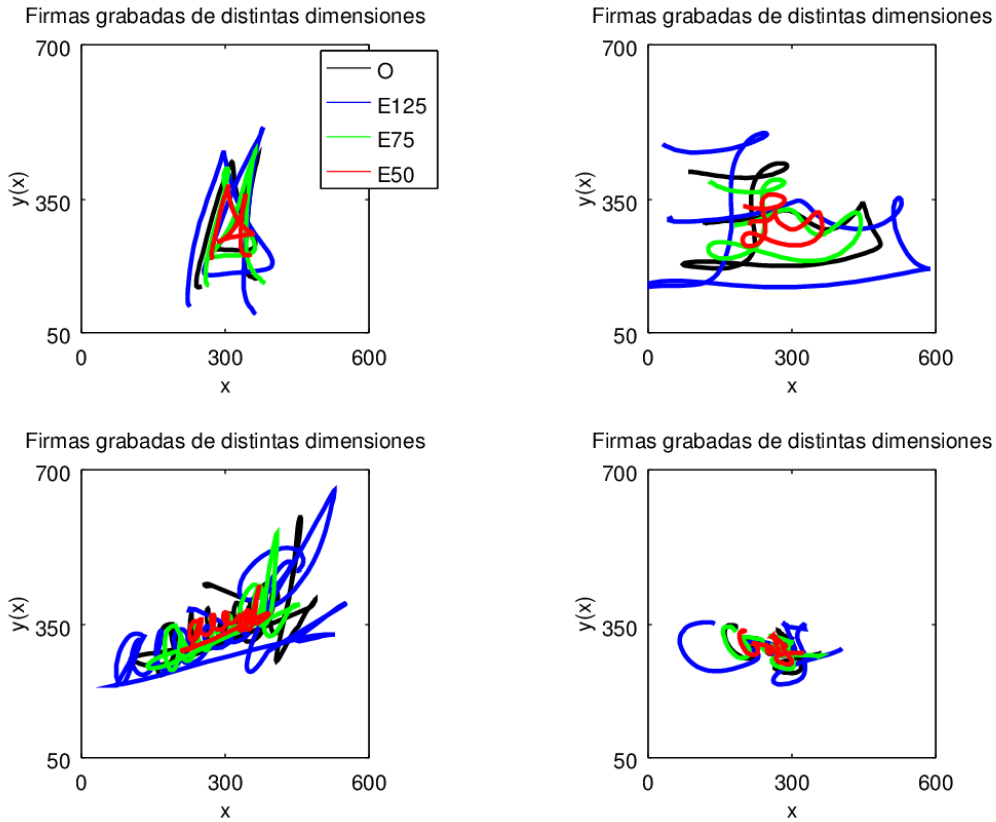


Figura 41. Firmas grabadas sobre recuadros de distintas dimensiones en la BDD *SigmaTech GDE*.

En las figuras 42 y 43 se presentan los resultados obtenidos en estos experimentos. Destaca el gran aumento de la EER para el conjunto de firmas grabadas en un recuadro de tamaño disminuido a la mitad respecto al de las firmas del conjunto estándar. Las tasas de error obtenidas para los conjuntos de firmas E75 y E125 son peores que las del conjunto estándar,

pero no tan altas como las del conjunto antes mencionado (E50). En el anexo A.1 pueden encontrarse los datos numéricos de EER concretos para cada conjunto de firmas y para cada sesión.

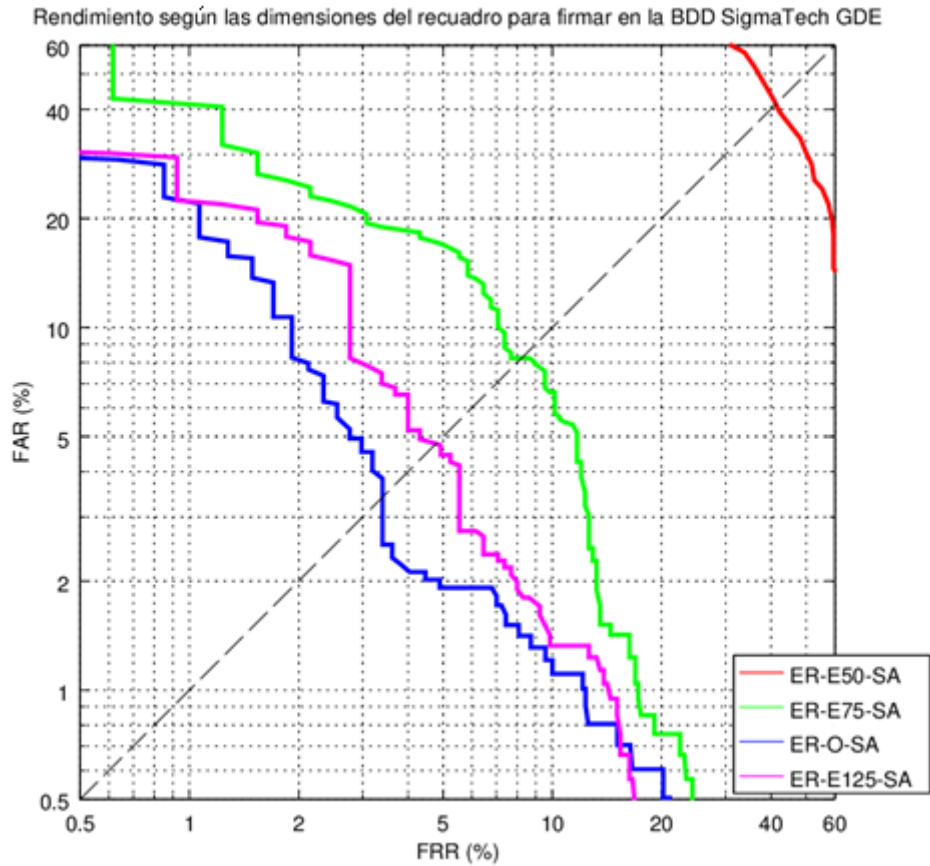


Figura 42. Rendimiento de las firmas grabadas sobre los recuadros de distintas dimensiones en la BDD SigmaTech GDE.

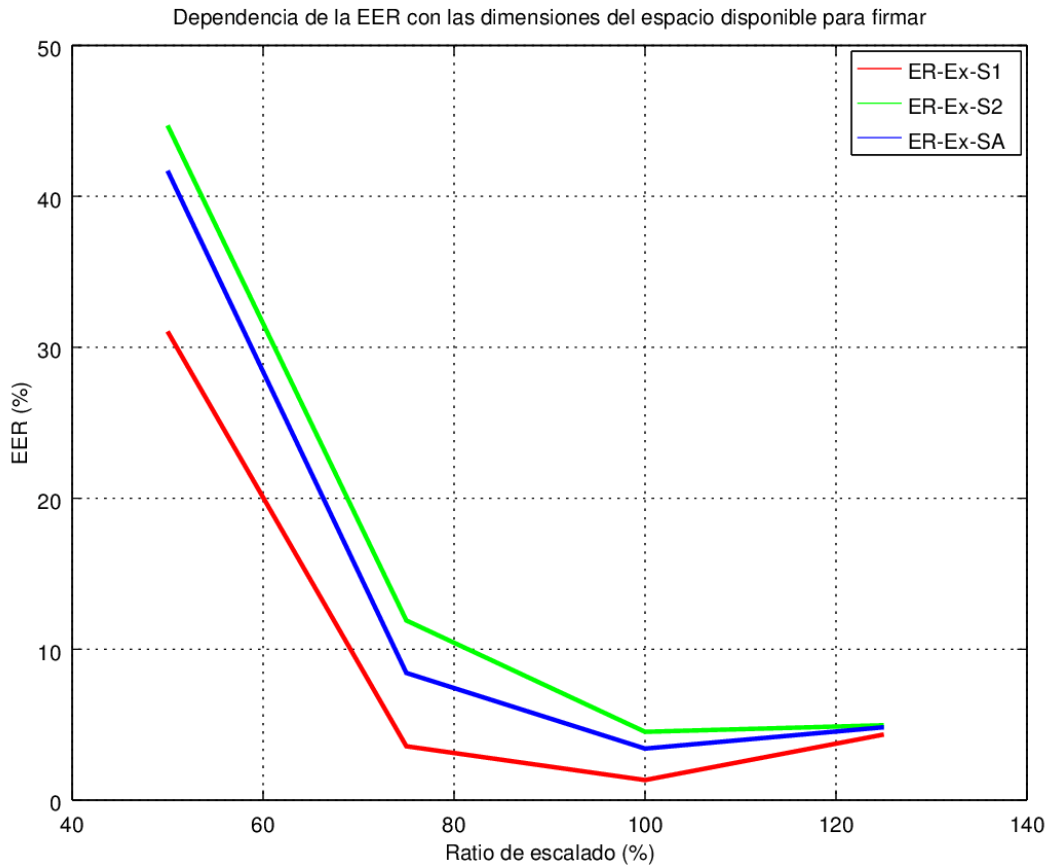


Figura 43. Dependencia de la EER con las dimensiones del recuadro para firmar en la BDD *SigmaTech GDE*.

5.3 COMPARACIÓN

Las tendencias de los resultados observados en ambas bases de datos han sido muy similares en los distintos experimentos realizados. Para el caso de los resultados de la experimentación con las firmas de distintas dimensiones y con las firmas con distintas inclinaciones, se ha realizado una gráfica (figura 44) que permite comparar fácilmente los resultados en cada una de las bases de datos utilizadas. En las representaciones se observa que los resultados obtenidos en ambos entornos de experimentación siguen la misma tendencia, siendo la única excepción el caso de las firmas escaladas al 50 % de su tamaño estándar. Para estas firmas, los resultados obtenidos en el entorno real (BDD *SigmaTech GDE*) son mucho peores que los obtenidos en el entorno simulado (BDD *SigmaTech Basic*, aplicando el escalado a posteriori). Por tanto, puede decirse que las expectativas de aumento de la EER para las firmas

muy pequeñas, que ya vaticinaban los resultados obtenidos en el entorno simulado, en la realidad son mucho peores.

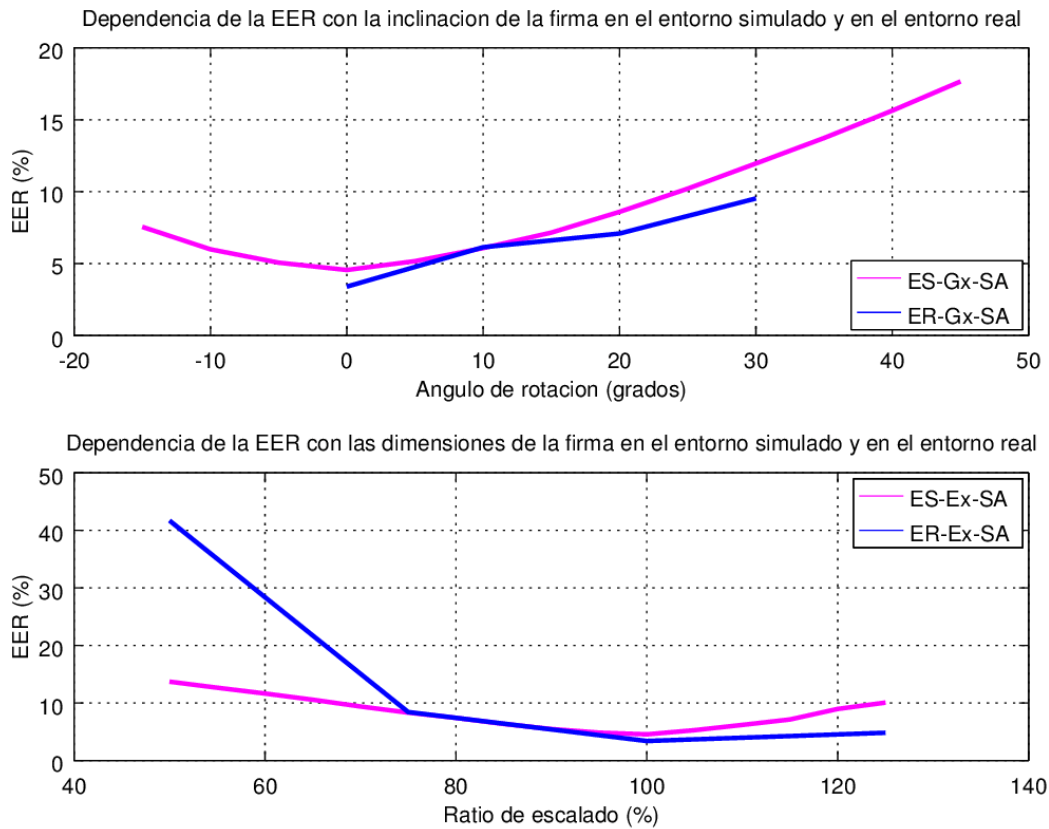


Figura 44. Comparativa de los resultados obtenidos en cada uno de los entornos de experimentación.

Para el caso de los experimentos del impacto de los desplazamientos sobre el rendimiento del sistema, también se han observado efectos similares en ambos entornos de experimentación. En ambos casos, se ha visto que el desplazamiento de la firma en y no afecta (o afecta insignificativamente) al rendimiento del sistema, mientras que el desplazamiento de la firma en x sí tiene un impacto considerable.

La obtención de resultados similares en los dos escenarios de experimentación seguidos, con dos bases de datos con distintas características, dota al estudio de una gran fiabilidad.

6 COMPENSACIÓN DE LOS EFECTOS DE LAS VARIACIONES ESTUDIADAS

6.1 ALGORITMOS DE COMPENSACIÓN

6.1.1 COMPENSACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA INCLINACIÓN DE LA FIRMA

Para compensar los efectos negativos de la inclinación de la firma en el rendimiento del sistema, no se elimina toda la inclinación de la firma de entrada, dejándola con inclinación nula, sino que se calcula la inclinación de la firma de entrada 'no habitual' de ese firmante, y se elimina únicamente esa inclinación. Esta estrategia puede considerarse por tanto una especie de normalización, pero dependiente de usuario. Con esto se pretende conservar la inclinación del firmante que supone una característica propia y diferencial de éste, y que por tanto puede ayudar en el proceso de verificación.

Para detectar la inclinación de las firmas, se implementa un algoritmo basado en el cálculo de la **regresión lineal** sobre la nube de puntos que conforma cada firma. El algoritmo implementado sigue estos pasos:

- 1) Se obtienen, por regresión lineal, los parámetros a y b de la recta de ajuste de cada una de las cuatro firmas de referencia del firmante correspondiente a la firma de entrada. Una vez que se tiene cada recta, se obtiene el ángulo correspondiente a la pendiente de cada una de las cuatro rectas obtenidas.

$$\text{Recta obtenida} \rightarrow y = ax + b$$

$$\text{Ángulo obtenido} \rightarrow \alpha_{ref} = \arctg(a)$$

- 2) Se calcula la media de los cuatro ángulos obtenidos, con lo que se obtiene el ángulo 'de referencia' de la firma. Éste es el ángulo característico de la propia firma en sí, y por tanto un rasgo diferencial de cada individuo, el cual no desea eliminarse.
- 3) Se obtiene, de nuevo por regresión lineal, la recta correspondiente a la firma de entrada, y el ángulo de inclinación α_{in} de esta firma a partir de esta recta.
- 4) Se calcula la diferencia entre el ángulo de la firma de entrada y el ángulo de referencia, que es por tanto la desviación respecto al 'ángulo habitual' que desea eliminarse (la inclinación 'no habitual' de la firma).
- 5) Se gira la firma de entrada según el ángulo obtenido en el paso 4, de forma que queda 'alineada' con las firmas de referencia.

Previamente a su implementación, se tenían dudas acerca de cómo iba a resultar este método en el caso de firmas de forma más bien redondeada, es decir, firmas que no tienen una línea de tendencia clara. Se temía que pudiese dar lugar a efectos extraños (por ejemplo, generar una línea de regresión vertical en algunas firmas...), si bien finalmente los resultados son mucho mejores de lo esperado. En la figura 45 se pueden observar, para 4 usuarios distintos, sus cuatro firmas de referencia con sus correspondientes rectas de regresión lineal. Se han elegido firmas con formas distintas, para poder visualizar cómo funciona el método en diversos casos. Se observa que los resultados son buenos incluso en firmas en las que no se esperaba que este método tan sencillo funcionase bien, como es el caso de las firmas de los recuadros superior izquierdo (con forma redondeada y con un trazo que 'se sale' de la forma principal de la firma) o inferior derecho (con una componente vertical importante).

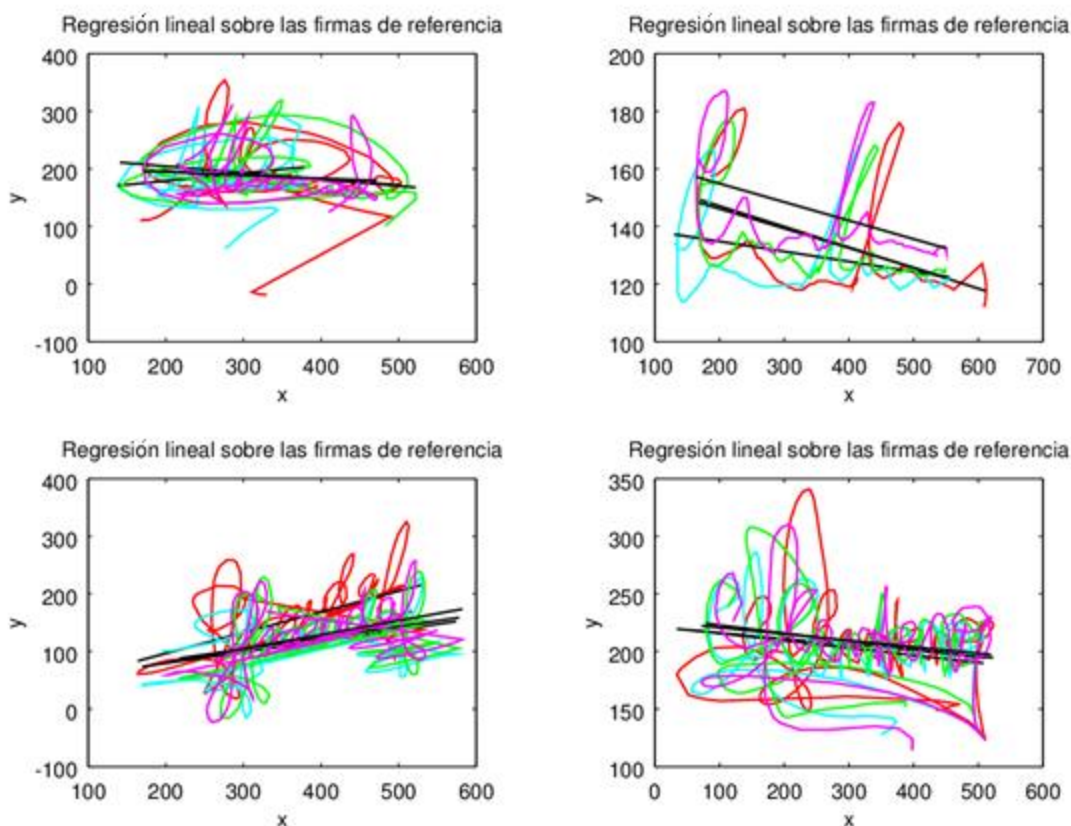


Figura 45. Cálculo de la inclinación de las firmas del modelo de cada firmante por el método de regresión lineal.

En la figura 46 se presenta una firma (distinta a las cuatro de referencia de este firmante), sus versiones rotadas 10 y 20 grados, y las firmas resultantes tras aplicar el algoritmo de compensación de ángulo explicado a cada una de las rotadas. Se observa que el algoritmo

funciona a la perfección en este caso, ya que las firmas en las que se ha aplicado la compensación de ángulo (en línea discontinua) coinciden prácticamente con la firma original previa a la rotación (en negro). Además, se escogió para representar la corrección de ángulo un usuario en el que sus firmas de referencia daban lugar a ángulos bastante distintos (ver ventana superior derecha de la figura 46).

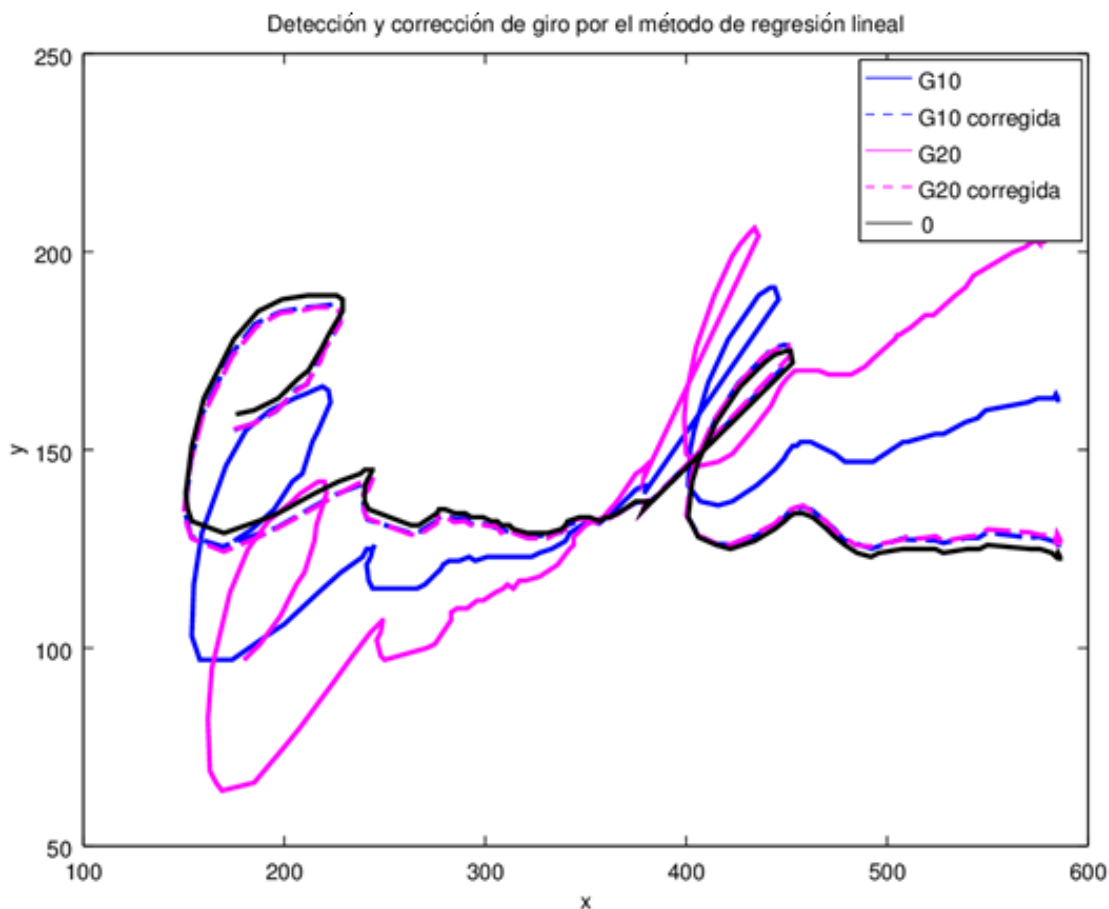


Figura 46. Detección y corrección de giro por el método de regresión lineal.

El error absoluto medio del algoritmo descrito de detección de ángulo es de 5.3° , si bien hay grandes diferencias entre conjuntos. En los casos en los que la firma está rotada un ángulo pequeño este algoritmo da lugar a resultados mucho mejores que en los casos en los que el ángulo rotado es grande. En el anexo se pueden revisar los resultados numéricos exactos de error absoluto medio, error relativo medio, y ángulo medio detectado para cada conjunto de firmas rotadas. En la figura 47 se presenta el error absoluto al que da lugar este algoritmo para cada conjunto de firmas rotadas, en su evaluación con la base de datos *SigmaTech Basic*.

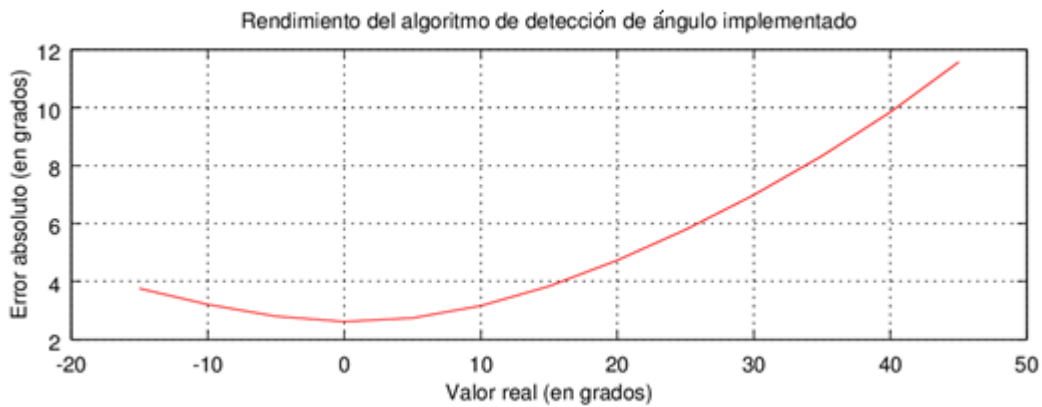


Figura 47. Error absoluto del algoritmo de detección de ángulo implementado.

Nota: el error absoluto se calcula mediante su fórmula habitual,

$$E_{abs} = |\text{Valor calculado} - \text{Valor real}|$$

6.1.2 COMPENSACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA POSICIÓN DE LA FIRMA

Para este propósito, la idea es realizar una normalización de la posición de cada firma de entrada, la cual se plantea de dos formas distintas. Por un lado, se realiza una normalización independiente de usuario, y por otro lado, una normalización dependiente de usuario. Previsiblemente, esta segunda estrategia traerá resultados mejores que la primera, al adaptarse a cada usuario. En este sentido, se realiza un pequeño estudio estadístico de los centros de masas de las firmas, cuyos resultados se presentan en el anexo A.2.

El algoritmo de **normalización de posición independiente de usuario** sitúa una firma de entrada, sea cual sea su posición inicial, de forma que su centro de masas sea el centro de masas medio calculado para todos los modelos. En la figura 48 se presentan tres firmas resultantes de esta normalización, junto con sus firmas originales respectivas (previas a la normalización), y el centro de masas medio calculado de todos los modelos.

En el caso de la **normalización de posición dependiente de usuario**, la normalización se realiza respecto al centro de masas medio de las cuatro primeras realizaciones de la primera sesión del usuario correspondiente. Este tipo de normalización se ilustra en la figura 49.

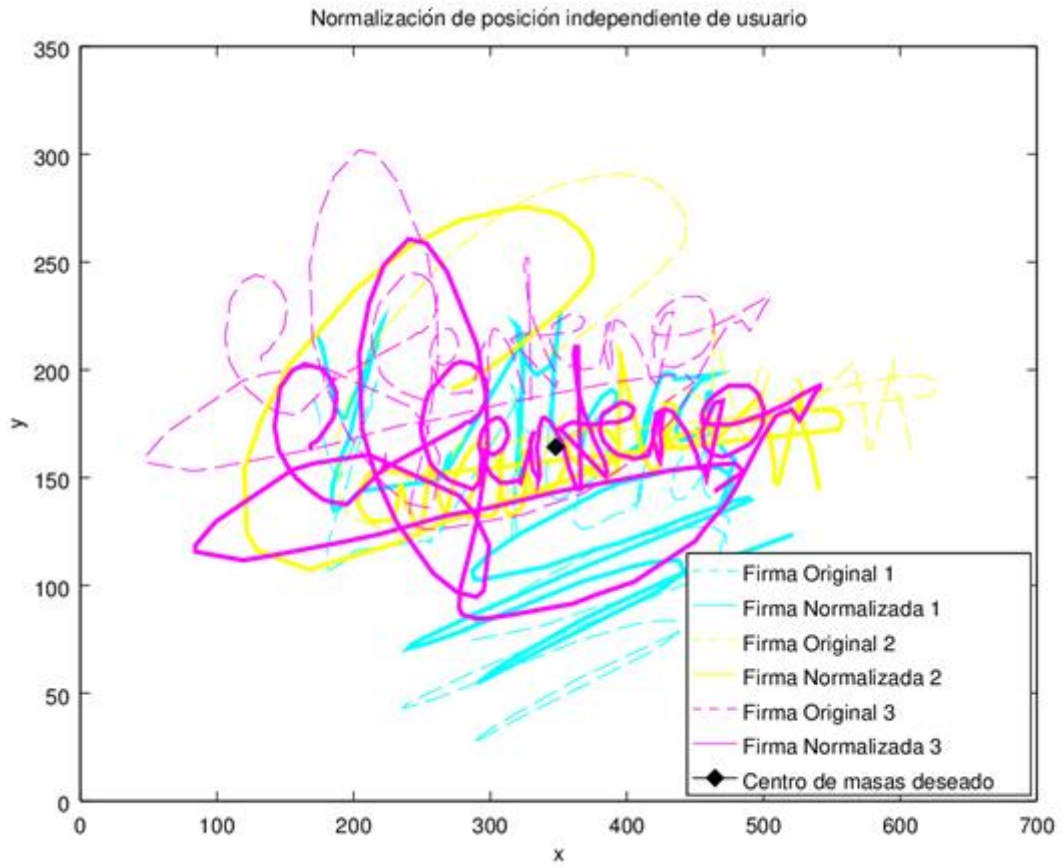


Figura 48. Normalización de posición independiente de usuario.

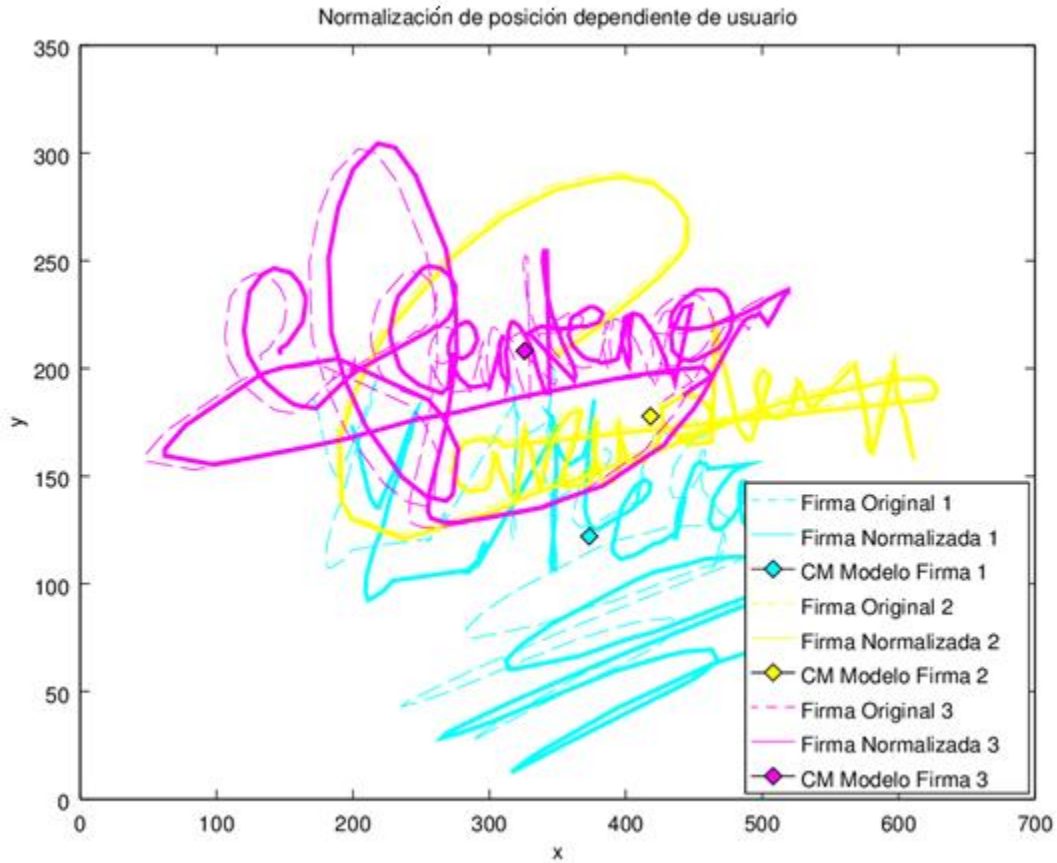


Figura 49. Normalización de posición dependiente de usuario.

6.1.3 COMPENSACIÓN DE LA INFLUENCIA DEL TAMAÑO DE LA FIRMA

Para compensar los efectos del tamaño de la firma se ha implementado un algoritmo de normalización dependiente de usuario, siguiendo pues una estrategia similar a la utilizada para compensar la inclinación no deseada de las firmas. En este caso no tendría sentido implementar una normalización independiente de usuario (como en el caso de la compensación de los efectos de la posición de la firma) ya que esto implicaría:

- Por un lado, deformar las firmas, modificando su ratio x/y .

Así como en el caso de la posición puede suponerse que a grandes rasgos todos los usuarios firmarán sobre una misma zona 'habitual', las formas de las firmas pueden ser muy diferentes entre usuarios (unas firmas son más cuadradas, otras son más alargadas...). La

normalización del tamaño de las firmas independiente de usuario por tanto modificaría el ratio x/y, en lugar de escalar la firma proporcionalmente en cada lado.

- Por otro lado, eliminar la información del tamaño habitual de la firma de cada firmante, que es un rasgo propio y característico de cada firma, y que por tanto puede ayudar en el proceso de verificación, por lo cual no desea eliminarse.

La detección de escalado se realiza mediante un algoritmo simple basado en la medida de la longitud de los "lados" de la firma (entendiendo por "lados" las dimensiones del rectángulo en el que se encuadraría la firma tomando dos líneas horizontales y otras dos verticales sin dejar espacio libre respecto a las coordenadas mínima y máxima en cada caso).



Figura 50. Protocolo de medida de los lados de una firma.

Se describen a continuación los pasos llevados a cabo para el cálculo de la razón de escalado y su corrección:

- 1) Se calculan las longitudes de los lados x e y de la firma de entrada: x_{IN} e y_{IN} .
- 2) Se calculan las longitudes de los lados x e y de las cuatro firmas de referencia del usuario que corresponda según la firma de entrada. Como siempre, las firmas de referencia son las cuatro primeras realizaciones de la primera sesión (la firma de entrada nunca será una de éstas). Así se obtienen las dimensiones x_{REF} e y_{REF} .
- 3) Se calcula el ratio de cambio de cada lado, dividiendo la longitud de referencia entre la longitud de ese lado en la firma de entrada.

$$razon_x = \frac{x_{IN}}{x_{REF}} \quad \quad \quad razon_y = \frac{y_{IN}}{y_{REF}}$$

- 4) La razón de escalado de la firma se considera como la media entre las razones calculadas para cada lado:

$$razon_{DETECTADA} = \frac{razon_x + razon_y}{2}$$

Con este método (considerando el escalado de cada lado por separado, y calculando después la media) se pretenden neutralizar efectos de 'deformación' que en ocasiones se dan en firmas genuinas de un mismo usuario. Estos efectos pueden estar causados, por ejemplo, porque un trazo hacia uno de los lados se extienda más de lo normal pero manteniendo el resto de la firma en sus dimensiones habituales (es decir, que no se tratase de una firma escalada en sí).

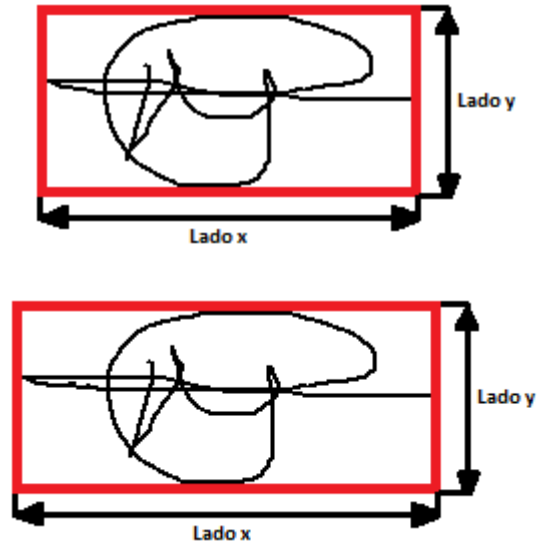


Figura 51. Efecto de deformación natural en firmas genuinas.

En la figura 52 se representan los errores absolutos en la detección de la razón de escalado para cada conjunto de firmas. El error absoluto, cuya media es de 8.69%, está entre el 5% y el 11%. En el anexo pueden encontrarse los resultados numéricos concretos presentados en esta gráfica, junto con los errores relativos y la razón de escalado media detectada para cada conjunto de firmas.



Figura 52. Rendimiento del algoritmo de detección de escalado.

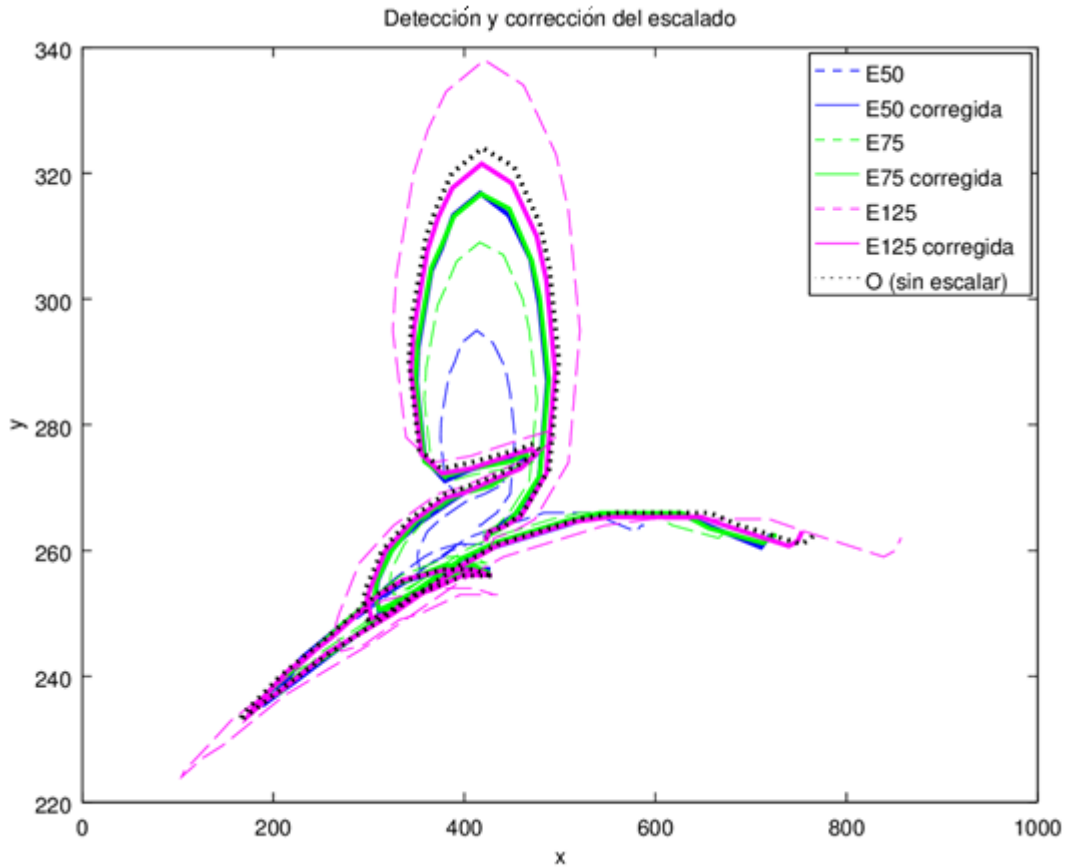


Figura 53. Ejemplo de la detección y corrección de escalado.

En la figura 53 pueden observarse, en línea discontinua, las versiones escaladas de una firma según tres razones distintas (50%, 75% y 100%). En el mismo color que cada una de las firmas escaladas, pero en línea continua, se presenta la firma resultante de la corrección del escalado en cada caso. Como puede apreciarse, para esta firma concreta, la corrección de su versión escalada al 125% resulta mejor que las correcciones de los escalados al 50% y al 75%. Es decir, las firmas resultantes de esas dos correcciones están más alejadas de la firma original (sin escalar, en línea punteada y de color negro), que en el caso de la firma corregida de la versión escalada al 125%.

6.2 RENDIMIENTOS OBTENIDOS TRAS LAS DISTINTAS COMPENSACIONES

En esta sección se presentan los rendimientos obtenidos tras aplicar los distintos algoritmos presentados en la sección anterior para la compensación de las distintas transformaciones geométricas. El proceso seguido para calcular estos rendimientos es el que aparece en la figura 54. Por un lado, se tienen como referencia, como en el resto de experimentos, las cuatro primeras realizaciones de la primera sesión del conjunto de firmas originales. Las dieciséis firmas restantes (con las que se realiza el testeo), son las resultantes de aplicar los algoritmos de compensación descritos en la sección anterior, a las firmas obtenidas con las distintas transformaciones geométricas aplicadas anteriormente.

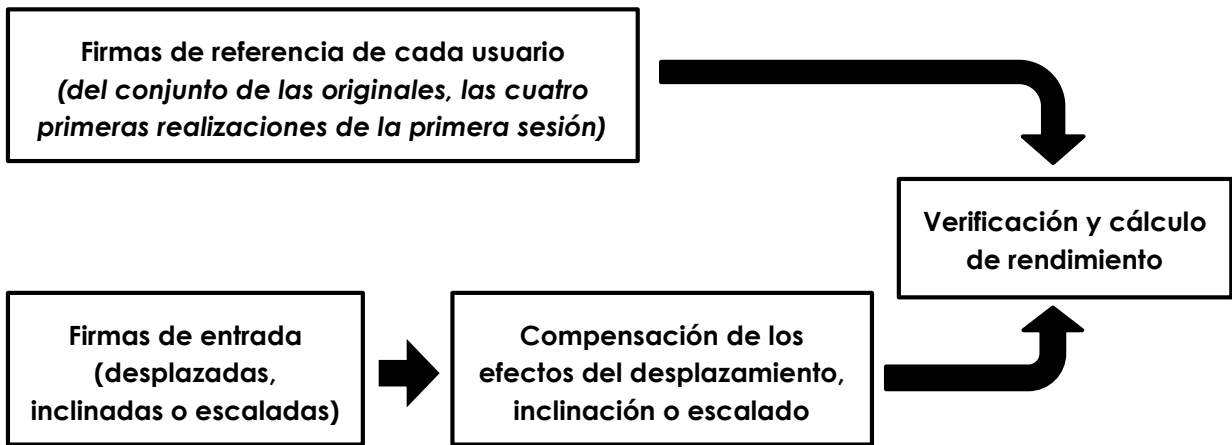


Figura 54. Proceso para el cálculo del rendimiento tras las compensaciones de los efectos geométricos estudiadas.

En esta sección se incluyen nuevas cadenas en los nombres no descritas anteriormente, en la sección dedicada a la nomenclatura, y cuyo significado se incluye en la tabla 7.

Siglas	Significado
CG	Compensación de giro
CDIU	Compensación de desplazamiento independiente de usuario
CDDU	Compensación de desplazamiento dependiente de usuario
CE	Compensación de escalado

Tabla 7. Nomenclatura de los conjuntos de firmas tras los algoritmos de compensaciones geométricas.

6.2.1 ENTORNO SIMULADO

En este caso, el proceso de **compensación de la inclinación** estudiado resulta en una mejora del rendimiento significativa para las firmas giradas un ángulo mayor de 5° en valor absoluto, tal y como puede observarse en la figura 55. Para las firmas sin girar previamente, la EER aumenta un poco (menos de un 1%) respecto al caso de las firmas originales a las que no se les ha aplicado el algoritmo de regresión lineal. En el anexo A.5 pueden revisarse los resultados numéricos concretos para cada conjunto de firmas giradas.

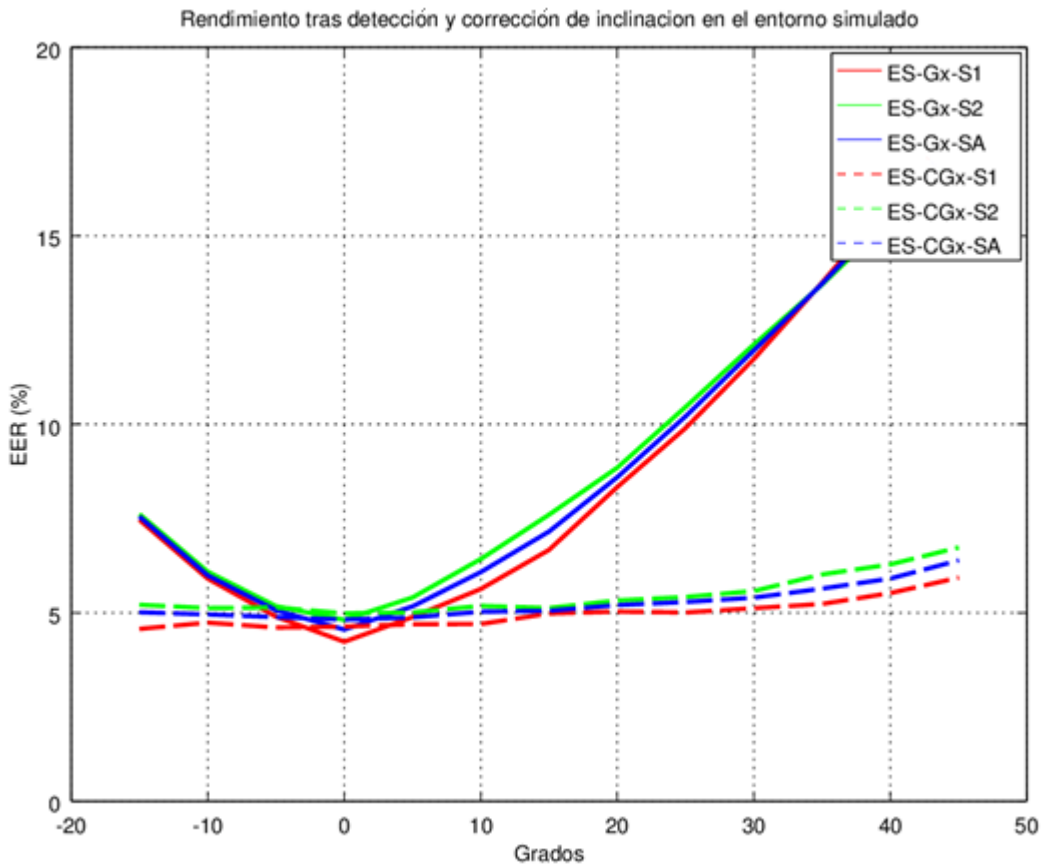


Figura 55. Rendimiento tras la detección y corrección de giro en el entorno simulado.

En el caso de los algoritmos de **compensación de los efectos del desplazamiento**, el proceso para este entorno es determinista. Es decir, como estos algoritmos colocan las firmas de entrada siempre en la misma posición, sea cual sea la posición inicial de la firma, dan lugar a los mismos resultados sea cual sea el conjunto 'desplazado' de firmas de entrada. Los resultados obtenidos son mejores para el caso de la normalización de posición dependiente de usuario, en comparación con el caso de normalizar independientemente del usuario. En la

figura 56 se pueden observar gráficamente los resultados obtenidos, mientras que en el anexo se incluye la tabla con los resultados numéricos concretos para cada conjunto de firmas.

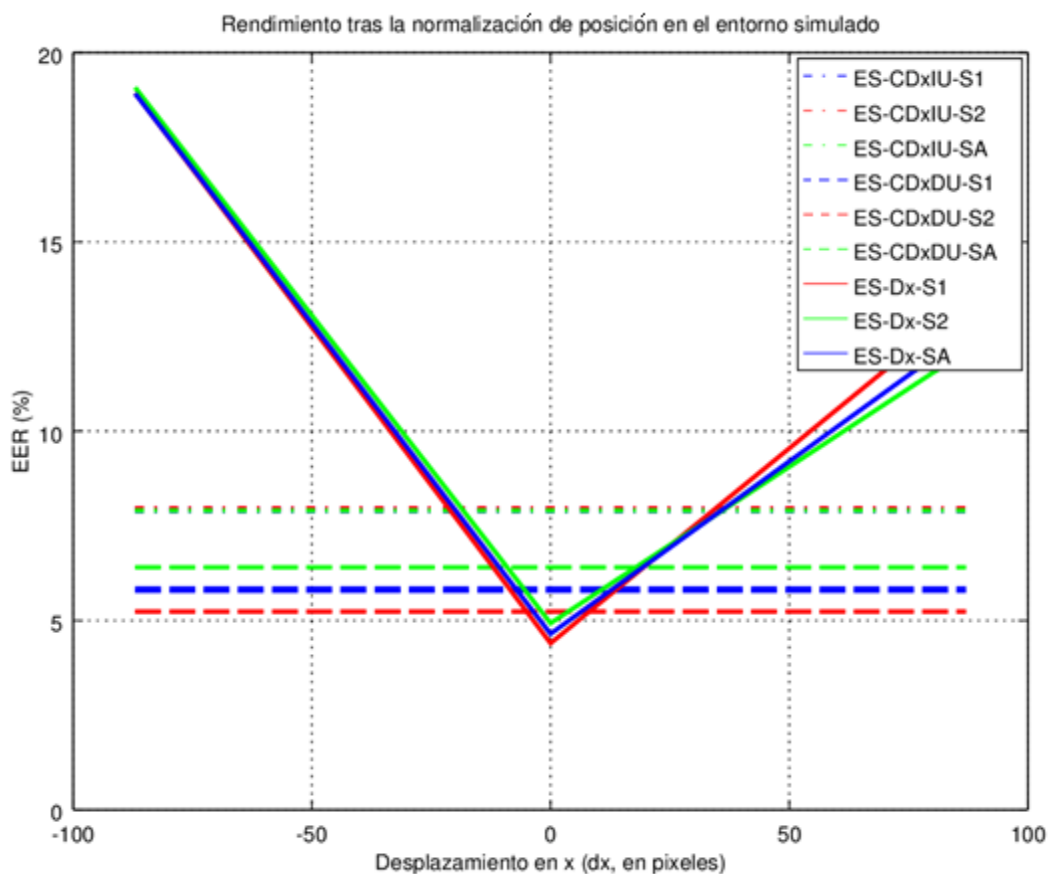


Figura 56. Rendimiento tras la normalización de posición en el entorno simulado, frente a los distintos desplazamientos estudiados.

El caso de la **corrección de escalado**, ésta depende precisamente del tamaño detectado (por tanto, este algoritmo no es determinista, como el caso de la posición). En la figura 57 se puede ver la EER obtenida para cada conjunto de firmas de partida. A su vez, puede compararse con la EER obtenida inicialmente para las distintas firmas escaladas, sin aplicárseles posteriormente corrección de tamaño. Los resultados de rendimiento del sistema tras la compensación del escalado son bastante homogéneos, es decir, para todos los escalados aplicados, tras corregir ese escalado, se obtiene finalmente una EER similar. Se observa que para las firmas originales (o, lo que es lo mismo, firmas con escalado de ratio 100%), el rendimiento obtenido empeora respecto al rendimiento inicial, sin incorporar este algoritmo de compensación. Lo mismo ocurre con los conjuntos de firmas a los que se les ha aplicado un escalado muy pequeño, de en torno al 5-10% (bien de aumento o bien de disminución de tamaño). Esto se debe a que en algunos de estos casos se está detectando un ratio de

escalado superior o inferior al real, con lo que corregir la firma según ese ratio detectado está trayendo consecuencias negativas para el rendimiento del sistema, puesto que se hace que la firma se aleje más de las que se tienen como referencia, en lugar de hacerla más similar.

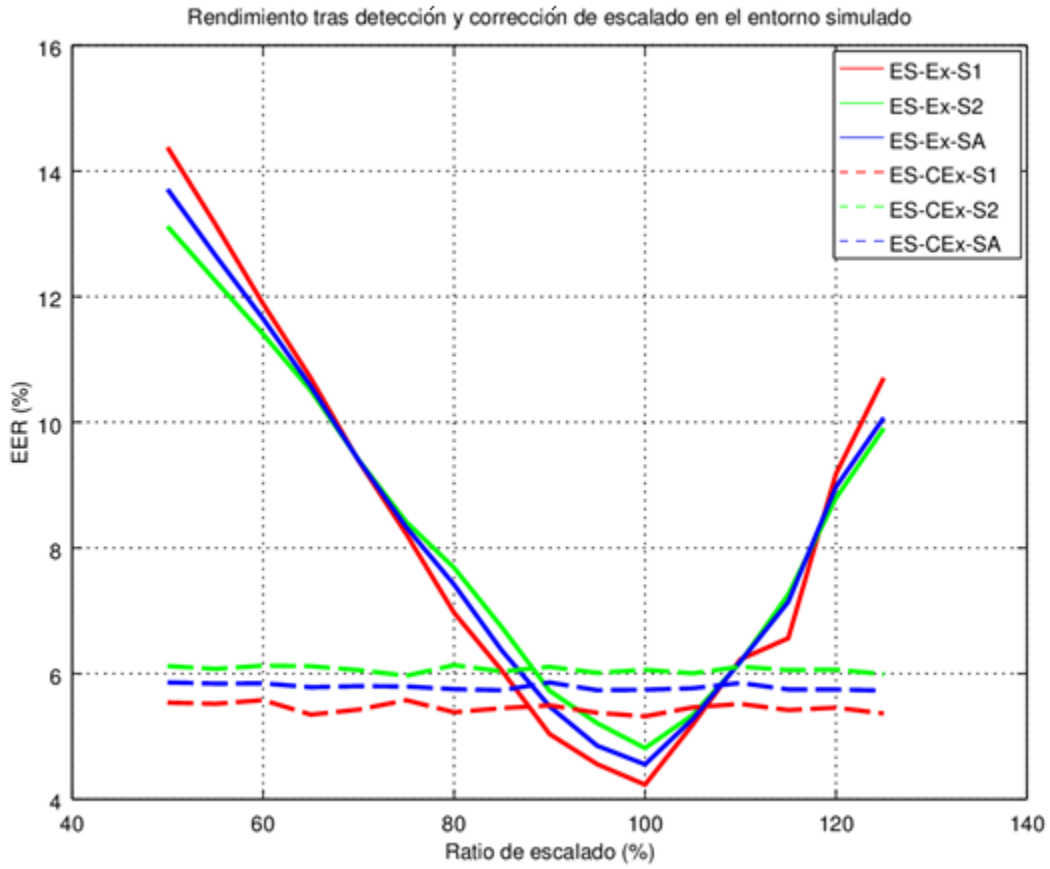


Figura 57. Rendimiento del sistema tras la detección y corrección de escalado en el entorno simulado.

6.2.2 ENTORNO REAL

Utilizando la BDD *SigmaTech GDE*, el algoritmo de **compensación de la inclinación** da lugar en una mejora del rendimiento global (tomando tanto los datos de ambas sesiones) para todos los conjuntos de firmas giradas, tal y como puede observarse en la figura 58. Para las firmas del conjunto estándar, la EER aumenta un poco (menos del 0.5%) respecto al caso de las firmas estándar a las que no se les ha aplicado el algoritmo de regresión lineal. En el anexo A.5 pueden revisarse los resultados numéricos concretos para cada conjunto de firmas giradas.

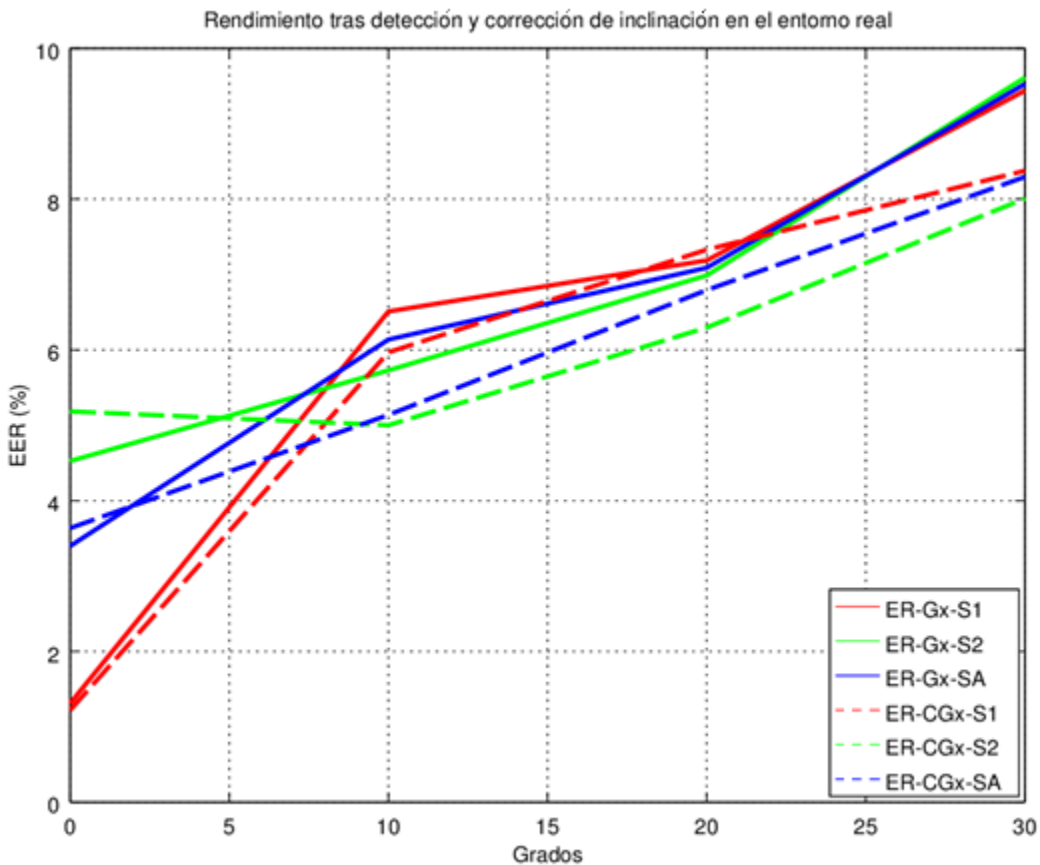


Figura 58. Rendimiento del sistema tras la detección y corrección de giro en el entorno real.

En la figura 59 se representa la EER obtenida para cada conjunto de firmas escaladas. El rendimiento mejora en todos los conjuntos de firmas (incluso en las firmas estándar). Sin embargo,

la mejora de la EER es mucho menor de lo que se esperaba tras haber visto los resultados de rendimiento en la *BDD SigmaTech Basic*.

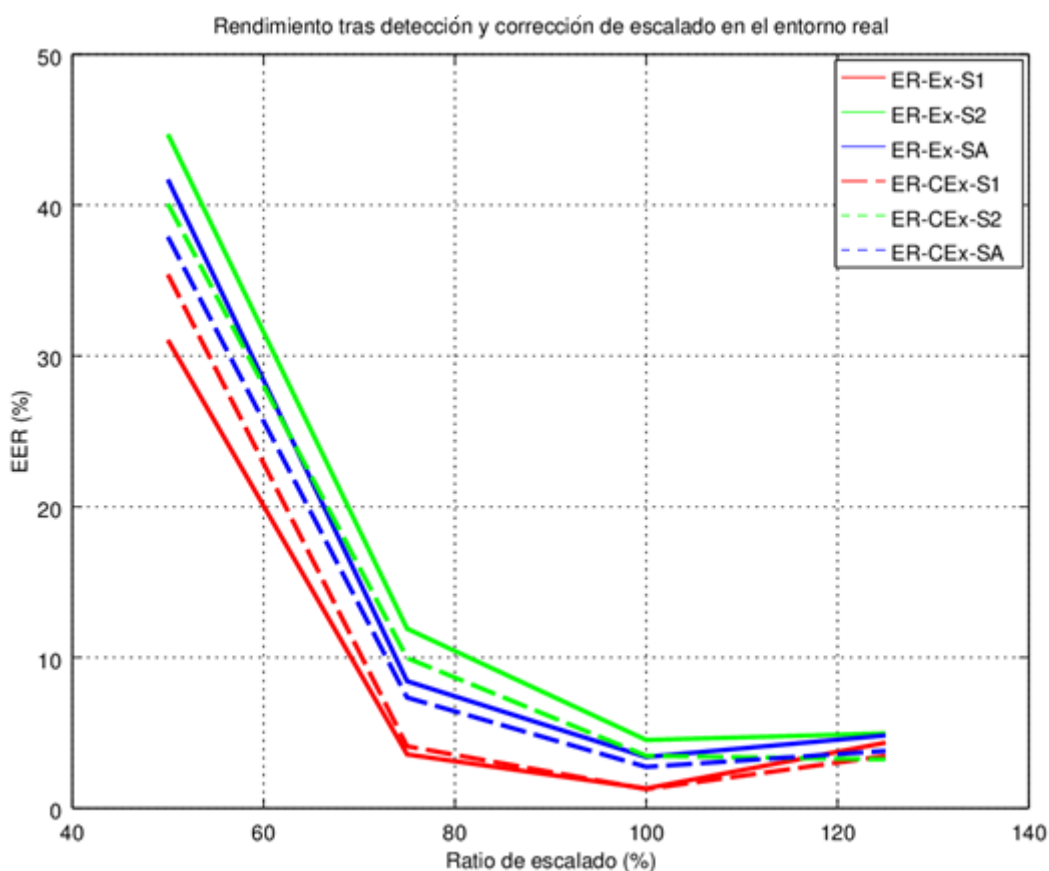


Figura 59. Rendimiento del sistema tras la detección y corrección de escalado en el entorno real.

En el caso de los algoritmos de **compensación de los efectos del desplazamiento**, en este caso el proceso no es determinista, como ocurría cuando se usaba la *BDD SigmaTech Basic*. Los algoritmos aplicados colocan las firmas de entrada siempre en la misma posición, sea cual sea la posición inicial de la firma, pero en este caso los conjuntos 'desplazados' de las firmas de entrada son distintos en cada caso (son realizaciones distintas de las firmas, y no las mismas realizaciones desplazadas a las distintas posiciones, como ocurría antes). En este caso se presentan los resultados mediante las curvas DET (ver figuras 60 y 61). Los resultados obtenidos son mucho mejores para el caso de la normalización de posición dependiente de usuario, en comparación con el caso de normalizar independientemente del usuario. En el anexo A.5 se incluye la tabla con los resultados numéricos concretos para cada conjunto de firmas y para cada tipo de normalización.

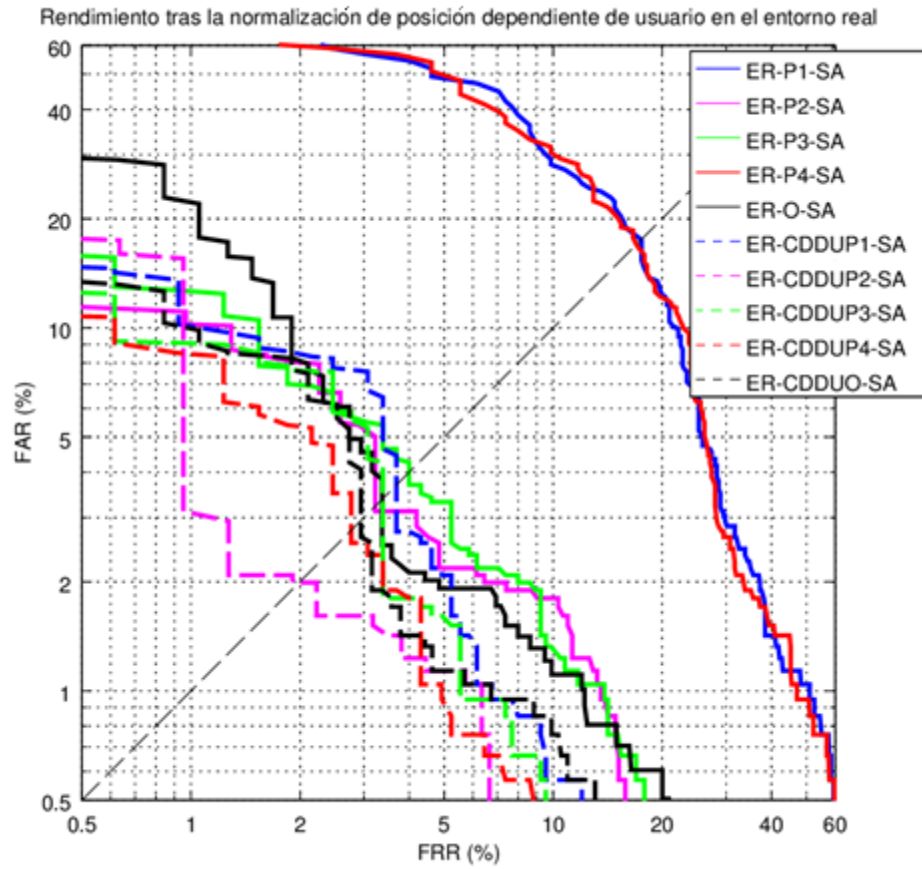


Figura 60. Rendimiento del sistema tras la normalización de desplazamiento dependiente de usuario en el entorno real.

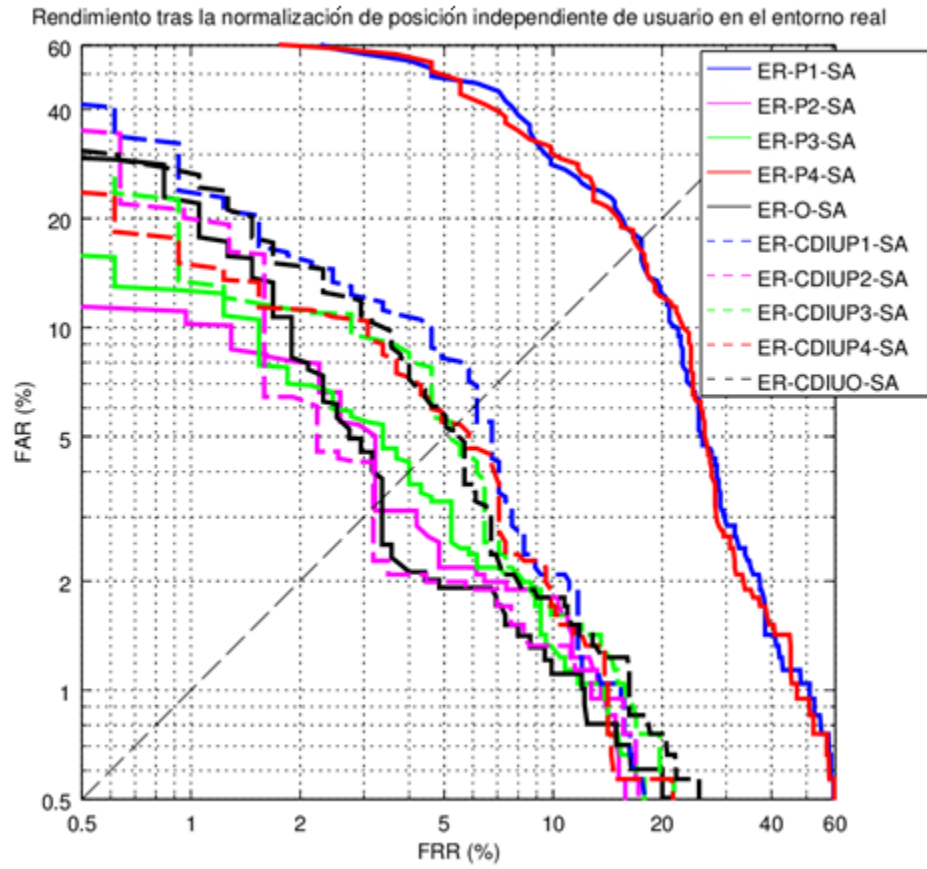


Figura 61. Rendimiento del sistema tras la normalización de desplazamiento independiente de usuario en el entorno real.

7 CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

7.1 CONCLUSIONES

El presente trabajo muestra el gran impacto que tienen las variaciones geométricas de las firmas en los sistemas de verificación de firma dinámica basados en DTW. La realización de los experimentos con dos bases de datos con distintas características, obteniéndose resultados similares en ambas, dota al estudio de una gran fiabilidad. Por tanto, los efectos geométricos deben ser muy tenidos en cuenta en la aplicación de los sistemas de verificación de firma en productos reales, especialmente en entornos móviles, en los que se producirán con más frecuencia: un simple giro debido a una determinada sujeción del móvil al firmar puede empeorar el funcionamiento del sistema notablemente.

Por otro lado, se analizaron las posibles repercusiones en otras características de la firma distintas de la propia apariencia en sí, cuando el usuario firma con un tamaño distinto al habitual. A raíz del análisis, se obtuvo que tanto la presión media como la velocidad media de las firmas escaladas son menores que en el caso de las firmas estándar. En cuanto a los perfiles temporales de la velocidad y de la presión, no se ha visto que el aumento o disminución del tamaño tenga ningún efecto particular sobre la forma de estas funciones.

La implementación de distintos algoritmos para compensar los efectos geométricos estudiados ha dado en general unos resultados satisfactorios.

En las dos bases de datos utilizadas, el proceso de compensación de la inclinación estudiado resulta en una mejora del rendimiento para las firmas giradas un ángulo mayor de 5° en valor absoluto (si bien esta mejora es más significativa en el entorno simulado que en el entorno real). En general, puede decirse que sería recomendable incluir este algoritmo en las aplicaciones en las que, por su naturaleza, sea bastante frecuente que el usuario firme con una inclinación de su firma distinta a la habitual (aplicaciones móviles fundamentalmente, en las que el usuario no se apoye sobre una superficie para firmar, y sea él mismo el que mantenga el dispositivo mientras firma).

En cuanto a la compensación de los posibles desplazamientos en la zona de firmado, el algoritmo de normalización de posición dependiente de usuario da lugar a unos resultados muy buenos, en especial en el llamado entorno real (BDD *SigmaTech GDE*). En el caso del entorno simulado, la inserción de este algoritmo mejora el rendimiento del sistema para conjuntos de firmas desplazadas más de 10 píxeles en valor absoluto respecto a su posición habitual. En el caso del entorno real, la inserción de este algoritmo siempre se traduce en una mejora de la EER (para todos los conjuntos de firmas a los que se ha aplicado). La inserción de este algoritmo sería totalmente aconsejable en aplicaciones en las que la superficie disponible para firmar sea muy muy grande (*Tablets*), ya que en estos casos las posibilidades de una gran variabilidad en

la posición de la firma, son altas. En el caso de *Smartphones*, al disponer de una superficie de firmado más pequeña, grandes variaciones en desplazamiento son menos probables. Sin embargo, aun siendo los desplazamientos bastante pequeños, en general puede esperarse que la inserción de este algoritmo también repercutirá en un mejor rendimiento en aplicaciones en *Smartphones*, por lo que también sería recomendable su uso en este tipo de dispositivos.

En el caso de la compensación de escalado, en el entorno simulado el rendimiento del sistema solo mejora en el caso de conjuntos de firmas cuyo escalado aplicado hace que su tamaño difiera en más de un $\pm 10\%$ del tamaño original. En el entorno real, la inserción de este algoritmo repercute en una mejora de la EER en todos los casos, si bien esta mejora es bastante pequeña. En la práctica, sí que sería aconsejable por tanto utilizar este algoritmo fundamentalmente en aplicaciones en las que la superficie disponible para firmar sea pequeña, lo cual sucede a menudo en *Smartphones*. En estos casos, es muy probable que firmantes que tengan que reducir el tamaño de su firma para ajustarla al área disponible. En el caso contrario, es decir, aplicaciones con una superficie para firmar muy grande (fundamentalmente *Tablets*), habría que valorar la inserción o no de este algoritmo, ya que no siempre el hecho de que el usuario disponga de más superficie útil para el firmado significa que éste realmente vaya a firmar realmente más grande de lo habitual.

Lo ideal en todos los casos sería tener algoritmos cuya inserción previa al proceso de verificación no empeorase en ningún caso el rendimiento del sistema (ni siquiera con firmas adquiridas de forma óptima, y sin ninguna variación geométrica de las estudiadas respecto a las firmas de referencia de ese usuario). Sin embargo, esto es complicado de conseguir, ya que cualquier modificación sobre la firma original puede en principio repercutir en un empeoramiento del rendimiento, precisamente por estar modificando la firma inicial del usuario.

7.2 TRABAJO FUTURO

A partir de este Proyecto, es posible establecer dos posibles líneas de trabajo futuro, siendo ambas complementarias y no excluyentes.

1) Por un lado, se podría **profundizar en la investigación** en sí, realizando un estudio más exhaustivo sobre los temas analizados en el presente trabajo:

- **Mejora de las características de las BDD** empleadas para la investigación.

En este sentido, sería deseable realizar un estudio similar al presentado en este documento pero utilizando una BDD que contase con *skilled forgeries*, ya que ninguna de las bases de datos utilizadas en este Proyecto contaban con este tipo de firmas. Además, sería beneficioso realizar un estudio con una base de datos similar a la BDD *SigmaTech GDE* (que contenía ya de por sí las transformaciones a

estudiar), pero contado con más usuarios. Asimismo, también sería deseable contar con más de 5 firmas para cada transformación estudiada en esta BDD. Sin embargo, hay que recordar que para cada usuario de esta base de datos era necesario grabar ya 60 firmas en cada sesión, un número bastante elevado. Por tanto, para hacer una base de datos de este estilo más completa sería necesario seguramente contar con fondos y ofrecer algún tipo de remuneración a los usuarios por participar.

- o Análisis de **otros posibles algoritmos de compensación de los efectos geométricos**, o mejoras sobre los ya implementados.

Por ejemplo, análisis en profundidad de la detección de ángulo por correlación.

- o Estudio del impacto en el rendimiento del sistema de **transformaciones geométricas combinadas**.

Es decir, cómo resultaría la verificación en conjuntos de firmas que estuviesen por ejemplo rotadas y desplazadas al mismo tiempo, escaladas y rotadas, o cualquier otra combinación posible entre las tres transformaciones estudiadas por separado. En este sentido, y según los resultados, habría que realizar también un algoritmo de compensación que contemplase las tres transformaciones. Éste algoritmo podría ser una combinación de los ya implementados por cada transformación por separado, o bien podrían utilizarse otras estrategias (por ejemplo, que mediante la correlación, se detectasen y corrigiesen tanto la rotación como el escalado).

- 2) Por otro lado, se podría avanzar ya en el desarrollo y **aplicación de los algoritmos** de compensación implementados en este Proyecto **sobre productos reales**. En este sentido, los algoritmos se aplicarían sobre productos en dispositivos móviles (fundamentalmente, *Smartphones*), que es el área hacia la que se ha orientado todo el estudio.

GLOSARIO Y ACRÓNIMOS

BDD	Base de Datos
DET	Detection Error Trade-off
DTW	Dynamic Time Warping
EER	Equal Error Rate: tasa de error cuando el sistema satisface la condición $FAR = FRR$
FA	False Acceptance
FR	False Rejection
FAR	False Acceptance Rate
FRR	False Rejection Rate
GMM	Gaussian Mixture Models
HMM	Hidden Markov Models
ROC	Receiver Operating Characteristic
SFFS	Sequential Forward Floating Search
SKEW	Ángulo de la firma con respecto a la horizontal
SLANT	Ángulo debido a la inclinación de las letras de la firma, medido respecto al eje vertical

REFERENCIAS

[Arujo et al., 2007]

R. S. A. Arujo, G. D. C. Cavalcanti, E. C. B. C. Filho. "An Approach to Improve Accuracy Rate of On-line Signature Verification Systems of Different Sizes", AiLeader Technologies, Recife, PE, Brazil, 2007.

[Chadha et al., 2011]

Aman Chadha, Divya Jyoti, M. Mani Roja. "Rotation, Scaling and Translation Analysis of Biometric Signature Templates". Int. J. Comp. Tech. Appl., Vol 2 (5), 1419-1425, Octubre 2011.

[Fierrez-Aguilar et. Al., 2004]

J. Fierrez-Aguilar, N. Alonso-Hermira, G. Moreno-Marquez, and J. Ortega-Garcia. An off-line signature verification system based on fusion of local and global information. In D. Maltoni and A. K. Jain, editors, Proc. of Intl. Workshop on Biometric Authentication, BIOAW, pages 295–306. Springer LNCS-3087, 2004.

[Fierrez-Aguilar et al., 2005a]

J. Fierrez-Aguilar, L. Nanni, J. Lopez-Penalba, J. Ortega-Garcia, and D. Maltoni. "An online signature verification system based on fusion of local and global information", in Proc. of IAPR Intl. Conf. on Audio- and Video-Based Biometric Person Authentication, AVBPA, pages 523–532. Springer LNCS-3546, 2005a.

[Fierrez-Aguilar et al., 2005b]

J. Fierrez-Aguilar, J. Ortega-Garcia, and J. Gonzalez-Rodriguez. "Target dependent score normalization techniques and their application to signature verification". IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, part C, 35(3):418–425, 2005b.

[Fierrez-Aguilar et al., 2007]

J. Fierrez, D. Ramos-Castro, J. Ortega-Garcia, and J. Gonzalez-Rodriguez. "HMM-based on-line signature verification: feature extraction and signature modeling". Pattern Recognition Letters, 28(16): 2325–2334, 2007.

[Fierrez y Ortega-Garcia, 2007b]

J. Fierrez, J. Ortega-Garcia. "*Handbook of Biometrics*", capítulo *On-line signature verification*. Eds. A. K. Jain, A. Ross y P. Flynn, Springer, 2008.

[Galbally et al., 2007a]

Javier Galbally, Julian Fierrez, Manuel R. Freire, Javier Ortega-Garcia. "*Feature Selection Based on Genetic Algorithms for On-Line Signature Verification*". IEEE 1-4244-1300-1/07, 2007.

[Galbally et al., 2007b]

J. Galbally, J. Fierrez, J. Ortega-Garcia. "*Bayesian hill-climbing attack and its application to signature verification*", in Proc. IAPR International Conference on Biometrics, ICB, volume 4642 of LNCS, pages 386_395. Springer, August 2007.

[Jain and Zongker, 1997]

A.K.Jain, D.Zongker. "*Feature selection: evaluation, application, and small sample performance*", IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 19(2):153–158, 1997.

[Kholmatov and Yanikoglu, 2005]

Kholmatov and B. Yanikoglu. "*Identity authentication using improved online signature verification method*". Pattern Recognition Letters, 26(15):2400–2408, 2005.

[Mahanta-Deka, 2013]

L. B. Mahanta, Alpana Deka. "*Skew and Slant Angles of Handwritten Signature*", International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering, Vol. 1, Issue 9, November 2013.

[Martinez-Diaz et al., 2007a]

M. Martinez-Diaz, J. Fierrez, J. Ortega-Garcia. "*Universal background models for dynamic signature verification*". In Proc. IEEE Conference on Biometrics: Theory, Applications and Systems, BTAS, pages 1–6, September 2007b.

[Nanni and Lumini., 2005]

L. Nanni and A. Lumini, "Ensemble of parzen window classifiers for on-line signature verification. *Neurocomputing*", págs. 217_224. 2005.

[Ortega-Garcia, 2013]

J. Ortega-Garcia. "Autenticación biométrica de firma manuscrita sobre dispositivos móviles de captura", II Encuentro Nacional Sobre Firma Electrónica en los Servicios Públicos, EPS-UAM, Octubre 2013.

[Pudil et al., 1994]

P.Pudil, J.Novovicova, J.Kittler. "Floating search methods in feature selection. *Pattern Recognition Letters*", 15:1119–1125, 1994.

[Richiardi and Drygajlo, 2003]

J. Richiardi and A. Drygajlo. "Gaussian mixture models for on-line signature verification", In Proc. ACM SIGMM Multimedia, Workshop on Biometrics methods and applications (WBMA), pages 115_122, Berkeley, USA, November 2003.

[Ross et al., 2006]

A. Ross, K. Nandakumar, and A. K. Jain. "Handbook of Multibiometrics." Springer, 2006.

[Sabourin, 1997]

R. Sabourin. "Off-line signature verification: recent advances and perspectives", volume 1339, chapter Lecture Notes in Computer Science, LNCS, pages 84–98. Springer, 1997.

[Sakoe-Chiba, 1978]

Hiroaki Sakoe, Seibi Chiba. "Dynamic programming algorithm optimization for spoken word recognition". *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, (1):43_49, 1978.

[Theodoridis and Koutroumbas, 2006]

Sergios Theodoridis, Konstantinos Koutroumbas. "Pattern Recognition". Ed. IAPR, 3rd edition: 978-0-12-369531-4, 2006.

[Tolosana, 2014]

Rubén Tolosana Moranchel. "*Estudio de Interoperabilidad en Sistemas Biométricos de Firma Manuscrita Dinámica*". PFC, EPS-UAM, 2014.

[Van et al., 2007]

B. L. Van, S. Garcia-Salicetti, and B. Dorizzi. "On using the Viterbi path along with HMM likelihood information for online signature verification". *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, Part B*,37(5):1237 – 1247, 2007.

[Yang et al., 1995]

L. Yang, B. K. Widjaja, R. Prasad. "Application of Hidden Markov Models for signature verification". *Pattern Recognition*, p.161-170, 1995.

ANEXO A. TABLAS DE RESULTADOS

A.1 RESULTADOS DE LOS EXPERIMENTOS

En este apartado se presentan los resultados de los experimentos, tanto en el caso del llamado entorno simulado (es decir, aplicando los algoritmos de las distintas transformaciones geométricas sobre la BDD 1 ya grabada), como en el caso del llamado entorno real (es decir, utilizando la BDD 2, con las transformaciones geométricas ya de por sí incluidas y no aplicadas posteriormente). En cada tabla se presentan los resultados desglosados según se refieran a la primera sesión, a la segunda, o bien a ambas. Por otro lado, los datos correspondientes a la evaluación inicial del sistema (es decir, de las firmas originales, sin rotar, escalar ni desplazar) se presentan en cada tabla resaltados en negrita y cursiva para facilitar el análisis de los resultados.

Efecto de la inclinación de la firma en el rendimiento del sistema				
	Giro (en grados)	EER (en %)		
		S1	S2	SA
Entorno simulado	-15	7.463878	7.614404	7.551321
	-10	5.907286	6.087688	5.991497
	-5	4.895787	5.174255	5.064858
	0	4.231493	4.813421	4.554301
	5	4.886286	5.404847	5.169255
	10	5.630716	6.425410	6.078781
	15	7.401420	8.366703	7.956869
	20	8.336424	8.849948	8.597063
	25	9.899510	10.458876	10.210055
	30	11.733379	12.115021	11.958888
	35	13.757508	13.706905	13.729614
	40	15.877544	15.447644	15.632456
45	18.024202	17.254346	17.658540	
Entorno real	0	1.311706	4.526210	3.397920
	10	6.510417	5.729167	6.137433
	20	7.187500	6.988636	7.089598
	30	9.440371	9.611742	9.527417

Tabla 8. Efecto de la inclinación de la firma en el rendimiento del sistema.

Efecto del tamaño de la firma en el rendimiento del sistema				
	Razón de escalado (en %)	EER (en %)		
		S1	S2	SA
Entorno simulado	50	14.375000	13.116157	13.708480
	55	13.152605	12.253132	12.658098
	60	11.886023	11.402678	11.648569
	65	10,702627	10,504551	10,571723
	70	9.386857	9.404138	9.396380
	75	8.221339	8.412934	8.329108
	80	6.969301	7.685187	7.417364
	85	6.048799	6.738804	6.367663
	90	5.038165	5.727419	5.477377
	95	4.556933	5.209343	4.850199
	100	4.231493	4.813421	4.554301
	105	5.189436	5.341251	5.276544
	110	6.226527	6.184536	6.194473
	115	6.562531	7.259518	7.140631
120	9.179933	8.793101	8.970757	
125	10.707379	9.904577	10.071252	
Entorno real	50	31.044387	44.691811	41.691641
	75	3.570076	11.903409	8.427010
	100	1.311706	4.526210	3.397920
	125	4.346591	4.962121	4.828963

Tabla 9. Efecto del tamaño de la firma en el rendimiento del sistema.

Efecto de la posición de la firma en el rendimiento del sistema				
	Posición	EER (en %)		
		S1	S2	SA
Entorno simulado	Original	4.231493	4.813421	4.554301
	DA1	13.353342	12.101265	12.608821
	DA2	18.956993	19.082609	19.016619
	DA3	18.927000	19.076550	18.917303
	DA4	13.356307	12.115431	12.573031
	DB1	4.396491	4.941796	4.652862
	DB2	18.956993	19.082609	19.016619
	DB3	4.399455	4.928185	4.646594
	DB4	13.353342	12.101265	12.608821
Entorno real	Original	1.311706	4.526210	3.397920
	P1	18.323864	16.174242	17.481352
	P2	2.026515	5.176136	3.222752
	P3	2.443182	5.558712	3.941288
	P4	17.310606	16.410985	16.984266

Tabla 10. Efecto de la posición de la firma en el rendimiento del sistema.

A.2 ESTUDIO ESTADÍSTICO DE LOS CENTROS DE MASAS

El objetivo de este estudio (realizado con la *BDD SigmaTech Basic*) es tener información relativa a los dos puntos siguientes:

- i) Conocer si los centros de masas de las firmas de *distintos* usuarios están más bien dispersos, o si, por el contrario, están bastante concentrados. Para que una normalización homogénea (es decir, independiente de usuario) tenga resultados positivos en el rendimiento del sistema, sería necesario que los centros de masas de las firmas de distintos usuarios estuviesen concentrados.
- ii) Conocer si los centros de masas de las firmas de referencia (firmas utilizadas para generar los modelos) pueden considerarse extrapolables a las posteriores adquisiciones de la firma (realizaciones utilizadas para testear).

Con este fin, se implementa un algoritmo que calcula los centros de masas de todas las firmas existentes en la BDD. Por otro lado, se modifica este algoritmo para calcular separadamente solo los centros de masas de las firmas utilizadas para el entrenamiento (es decir, en este caso se utilizan solo los archivos que contienen las cuatro primeras realizaciones de la primera sesión de cada usuario). A continuación, se obtienen las distribuciones de los centros de masas para cada conjunto de firmas (en línea discontinua las distribuciones resultantes del total de firmas, y en línea continua las distribuciones resultantes utilizando únicamente las firmas de referencia). Estas distribuciones se presentan en la figura 62, a partir de la cual se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Los centros de masas de las firmas de distintos usuarios están más bien dispersos, si bien esta dispersión es mayor en el eje x que en el eje y (aproximadamente el doble, según podemos observar con la anchura de la FDP).
- Las distribuciones obtenidas para los centros de masas de las firmas utilizadas para entrenar, son absolutamente extrapolables a las distribuciones obtenidas con todas las firmas de la BDD. En el caso de las distribuciones correspondientes a toda la BDD, el perfil es más homogéneo, como es lógico debido al mayor número de muestras utilizadas para calcular la distribución en este caso.
- Se podría modelar con una FDP Gaussiana la situación de los centros de masas de un número elevado de firmas.

Los datos numéricos concretos (media y desviación típica) se incluyen en la tabla 11.

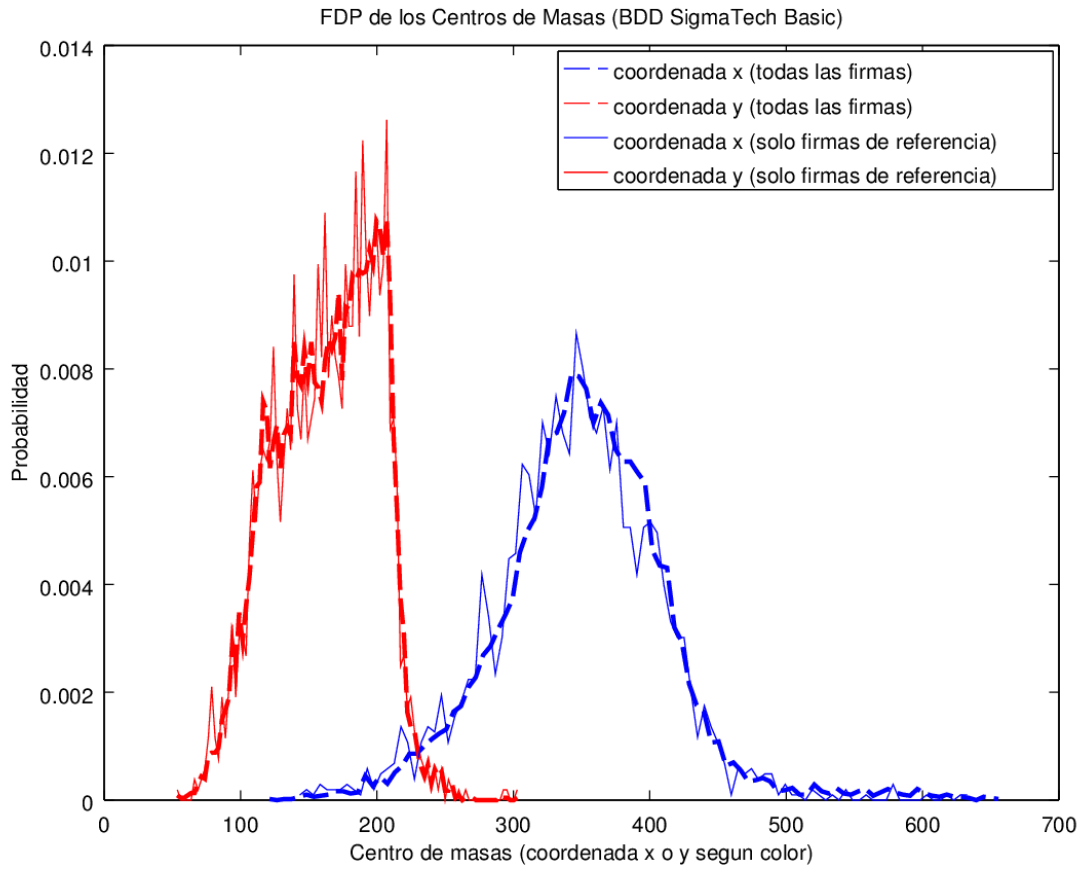


Figura 62. Funciones de densidad de probabilidad de los centros de masas de las firmas en la BDD SigmaTech Basic.

Estadísticas del centro de masas (BDD SigmaTech Basic)		
	Coordenada x	Coordenada y
Firmas usadas para generar los modelos	Media: 347,93	Media: 164,28
	Desviación típica: 60,427	Desviación típica: 37,182
Total de firmas de la BDD	Media: 354,74	Media: 164,52
	Desviación típica: 62,175	Desviación típica: 36,831

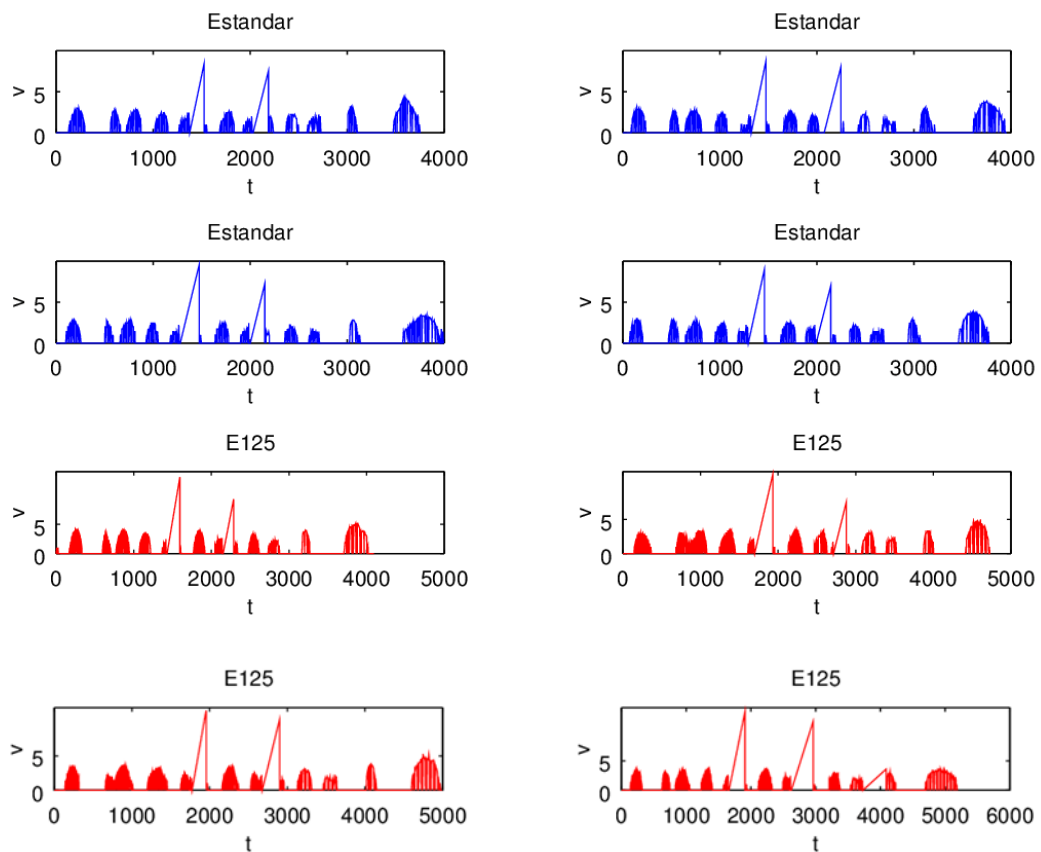
Tabla 11. Datos estadísticos de las distribuciones de los centros de masas de las firmas en la BDD SigmaTech Basic.

A.3 ESTUDIO DE LAS FUNCIONES TEMPORALES EN LOS CONJUNTOS DE FIRMAS ESCALADAS

Se presentan cuatro gráficas por cada conjunto de firmas (firmas estándar, firmas grabadas sobre recuadro al 50% respecto al estándar, al 75, y al 125%). Las gráficas corresponden a las cuatro primeras realizaciones de la primera sesión del conjunto correspondiente en cada caso.

A.3.1 VELOCIDAD

MUESTRA 1



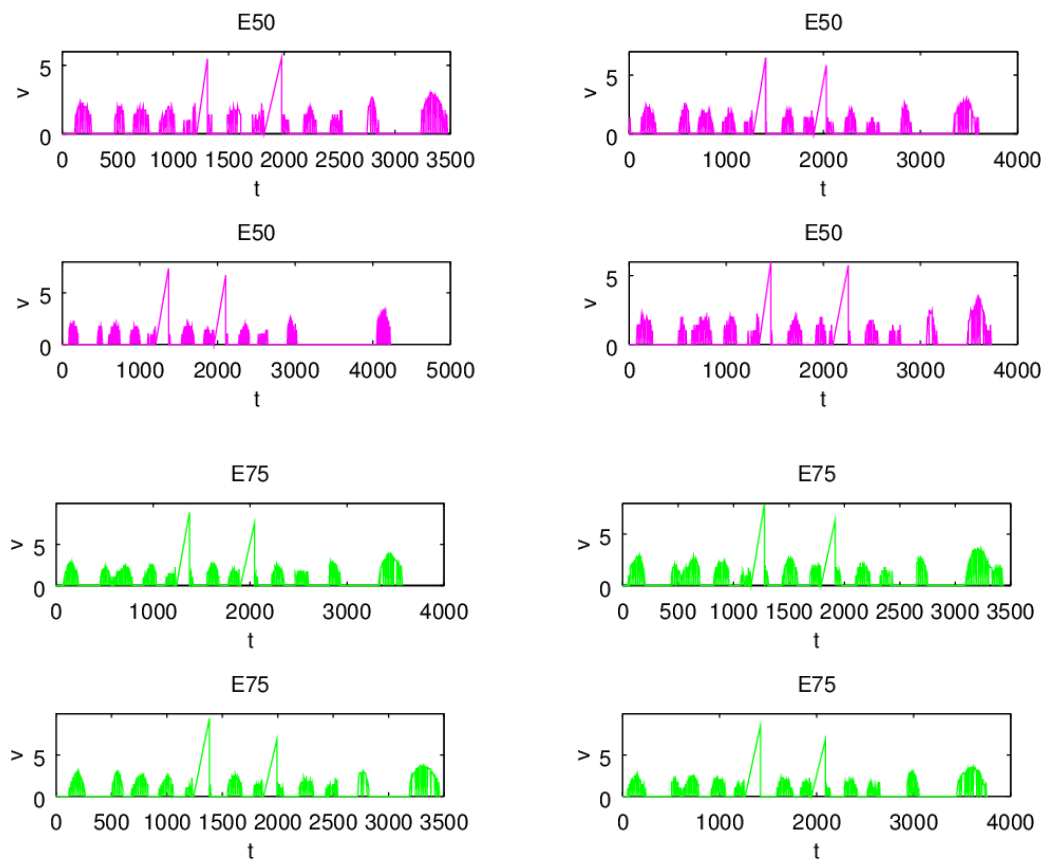
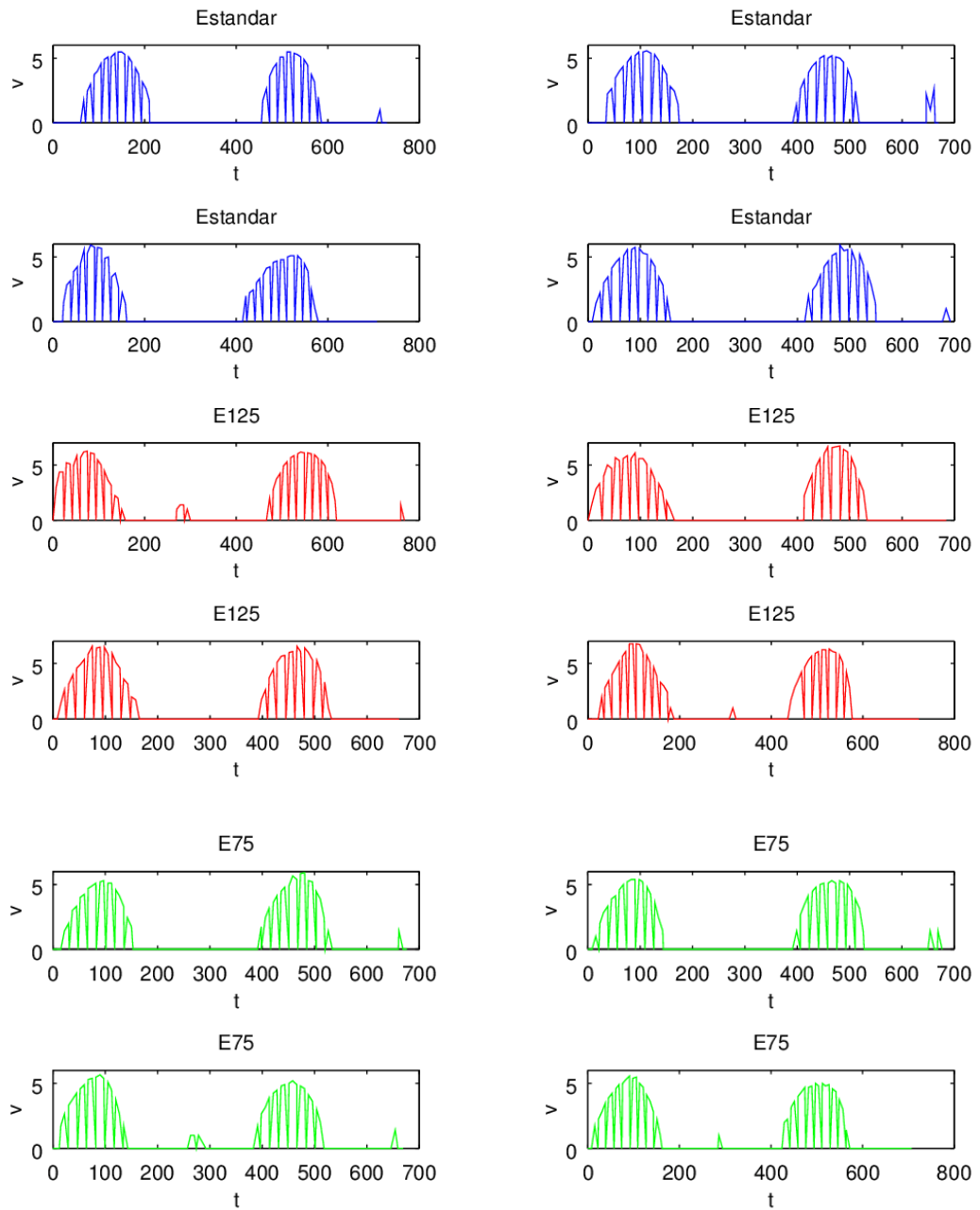


Figura 63. Perfiles de la velocidad para las cuatro primeras realizaciones de la primera sesión de los distintos conjuntos de firmas escaladas: muestra 1.

MUESTRA 2



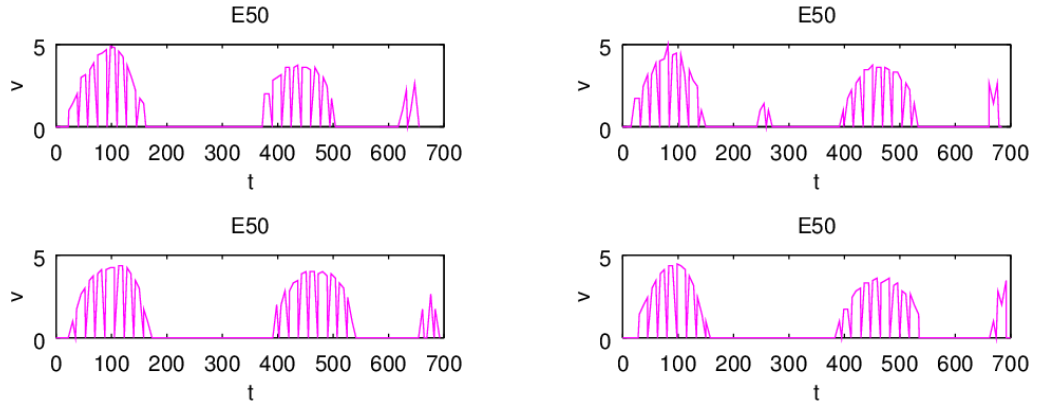
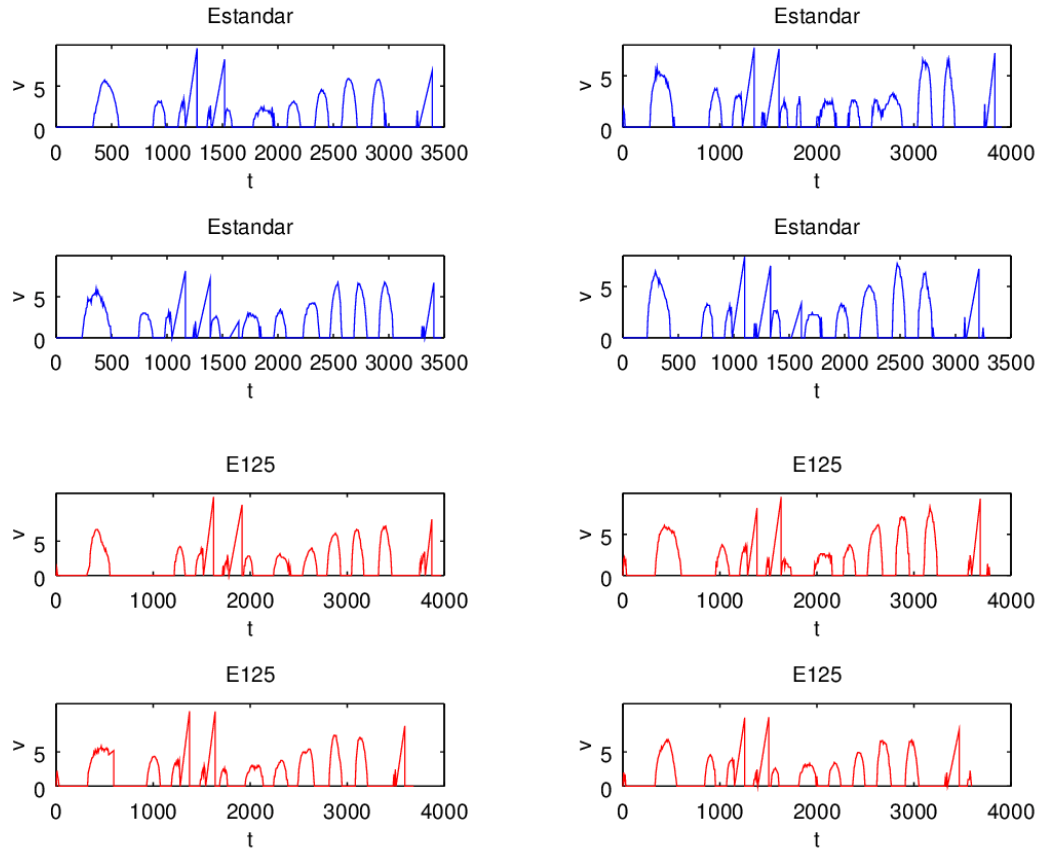


Figura 64. Perfiles de la velocidad para las cuatro primeras realizaciones de la primera sesión de los distintos conjuntos de firmas escaladas: muestra 2.

MUESTRA 3



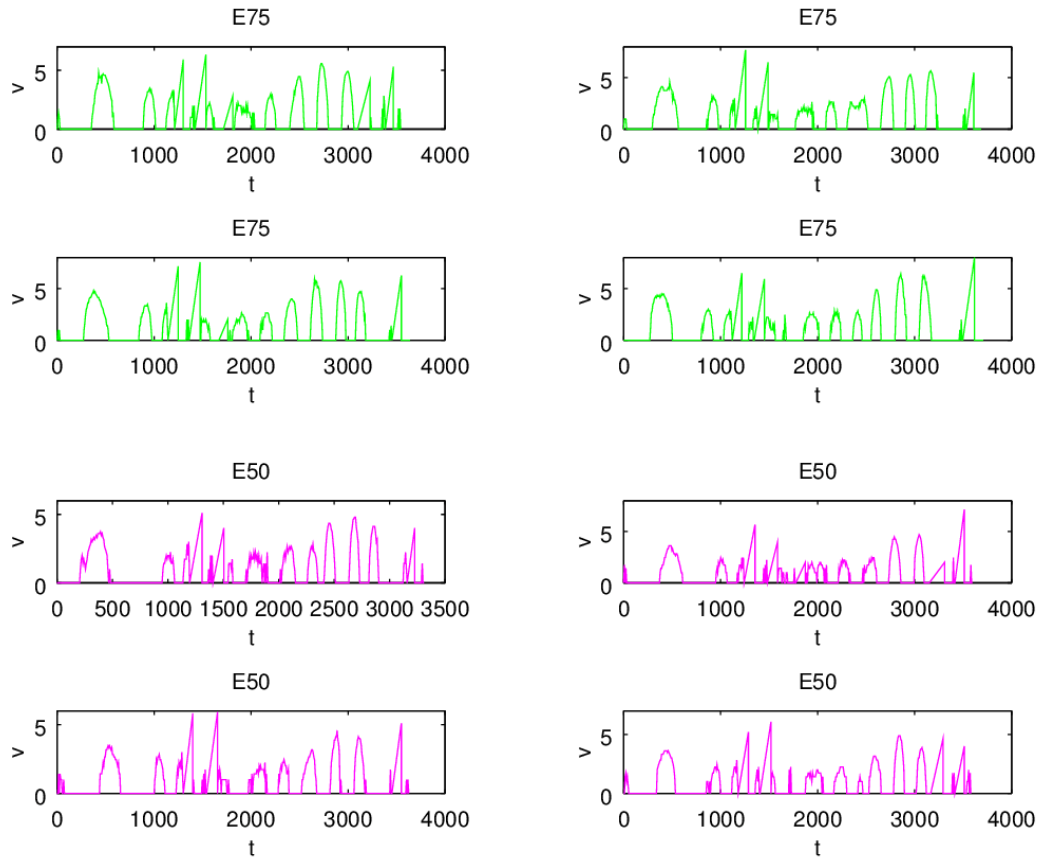
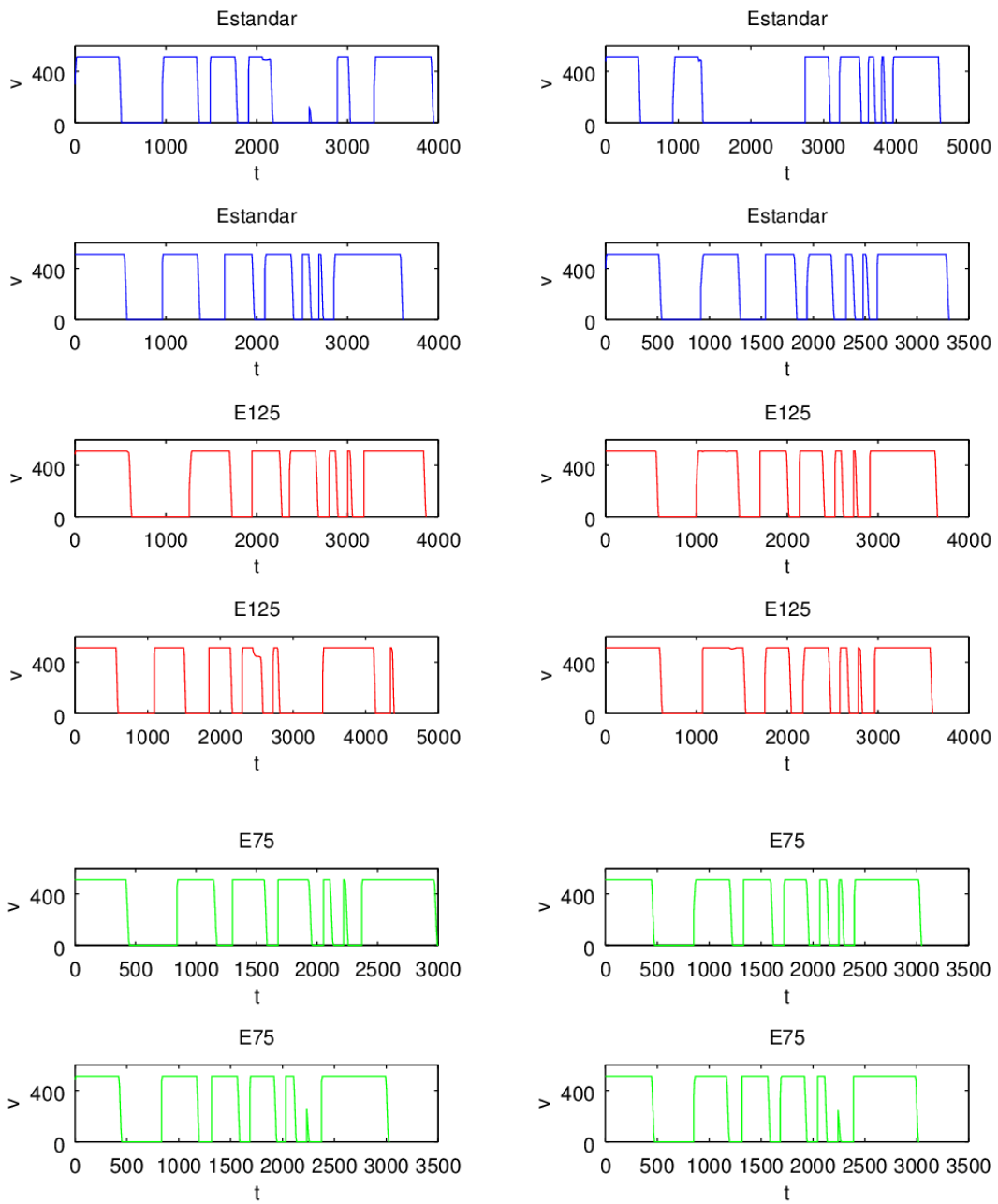


Figura 65. Perfiles de la velocidad para las cuatro primeras realizaciones de la primera sesión de los distintos conjuntos de firmas escaladas: muestra 3.

A.3.2 PRESIÓN

MUESTRA 1



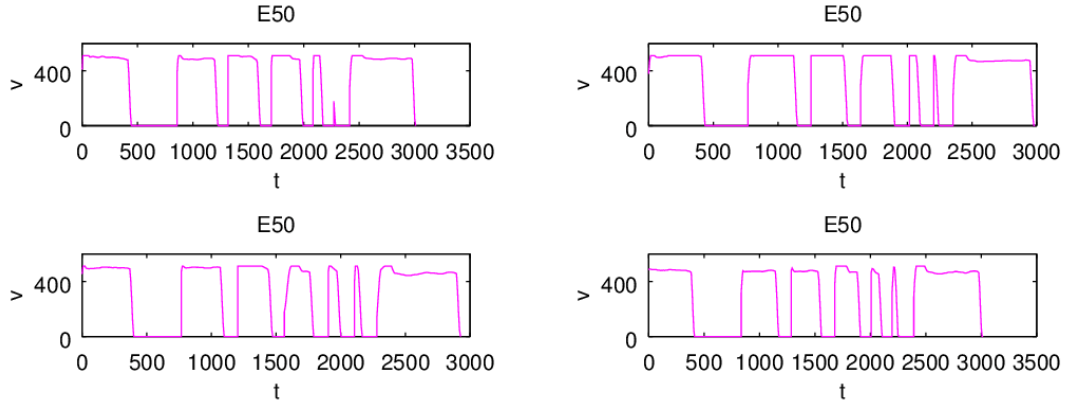
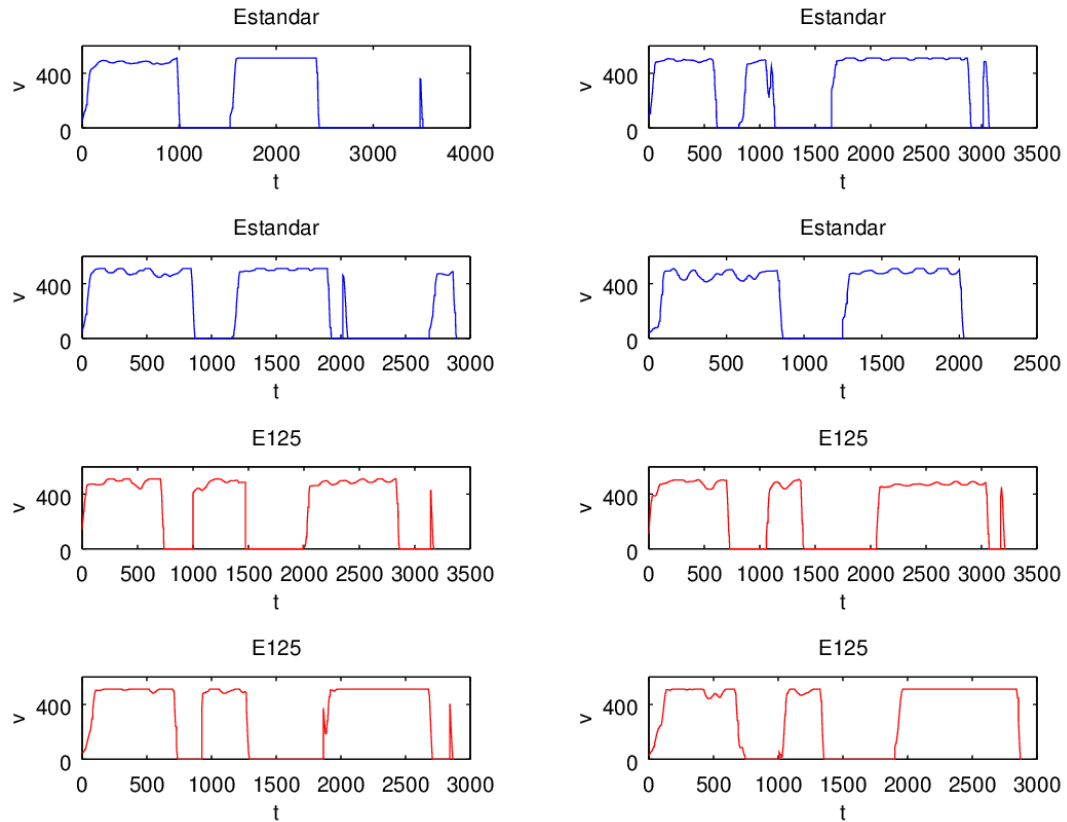


Figura 66. Perfiles de la presión para las cuatro primeras realizaciones de la primera sesión de los distintos conjuntos de firmas escaladas: muestra 1.

MUESTRA 2



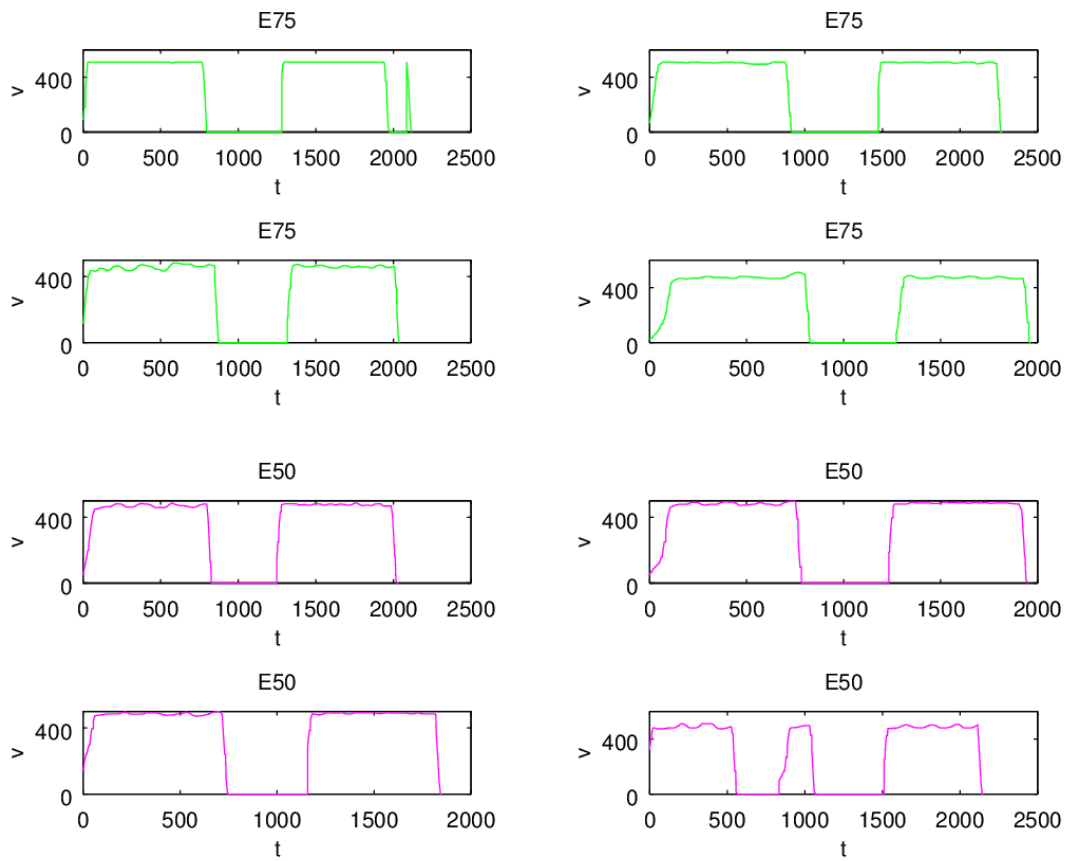
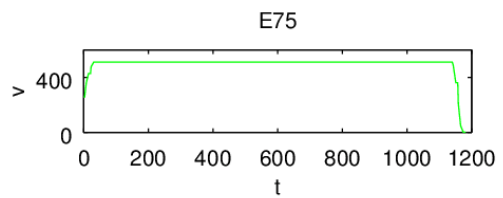
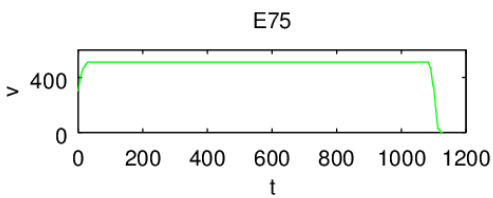
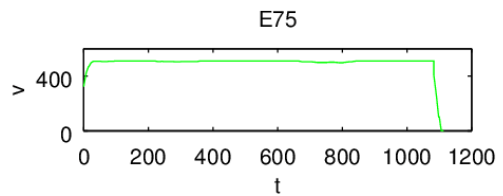
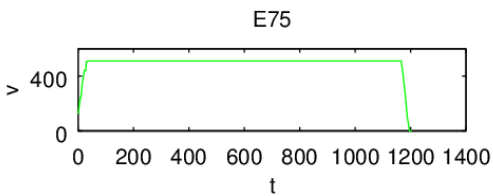
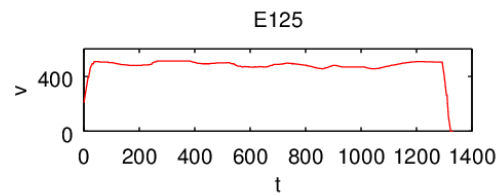
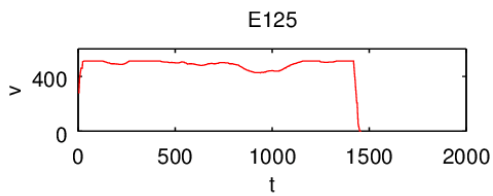
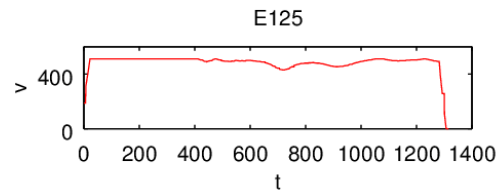
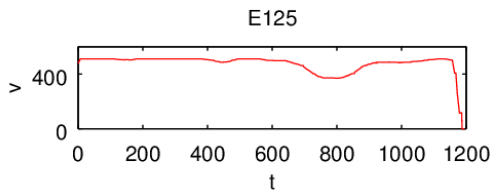
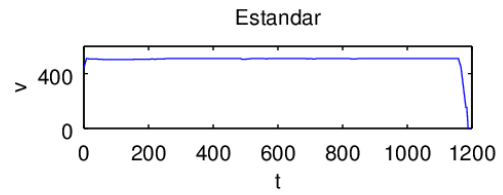
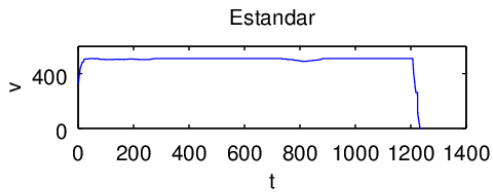
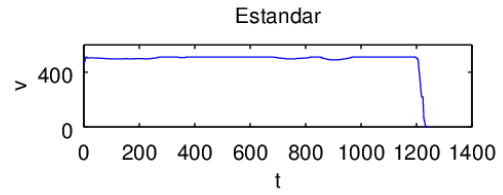
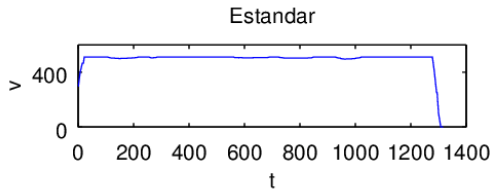


Figura 67. Perfiles de la presión para las cuatro primeras realizaciones de la primera sesión de los distintos conjuntos de firmas escaladas: muestra 2.

MUESTRA 3



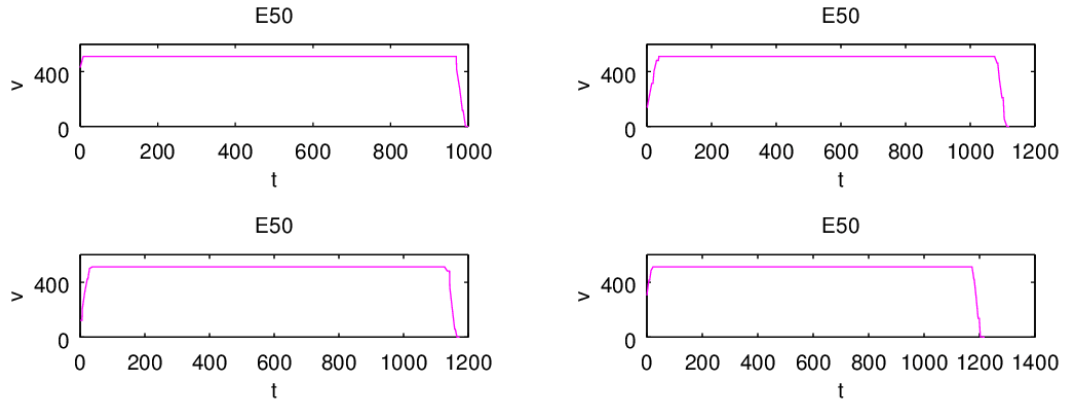


Figura 68. Perfiles de la presión para las cuatro primeras realizaciones de la primera sesión de los distintos conjuntos de firmas escaladas: muestra 3.

A.4 RESULTADOS DE LOS ALGORITMOS DE COMPENSACIÓN

	Ángulo de giro aplicado (en °)	Ángulo Detectado Medio (en °)	Error Absoluto Medio (%)	Error Relativo Medio (%)
BDD SigmaTech Basic	-15	-8.508755	3.756193	25.041287
	-10	-5.633209	3.205671	32.056709
	-5	-2.740347	2.797190	55.943801
	0	0.138598	2.612710	---
	5	2.987252	2.737484	54.749680
	10	5.803763	3.159627	31.596266
	15	8.566844	3.834712	25.564745
	20	11.262019	4.730046	23.650232
	25	13.879211	5.786784	23.147138
	30	16.404400	6.984347	23.281158
	35	18.815815	8.332223	23.806350
	40	21.086613	9.843589	24.608974
	45	23.157285	11.568433	25.707629

Tabla 12. Rendimiento del algoritmo de detección de giro por regresión lineal.

	Razón de Escalado Real (%)	Razón Detectada Media (%)	Error Absoluto Medio (%)	Error Relativo Medio (%)
BDD SigmaTech Basic	50	51.488144	5.025664	10.051328
	55	56.008923	6.122487	11.131794
	60	46.852207	5.281860	8.803099
	65	65.853713	7.478205	11.504930
	70	70.859392	8.047211	11.496015
	75	75.867805	8.592039	11.456052
	80	80.873737	9.121666	11.402082
	85	85.841592	9.618628	11.316033
	90	90.780355	10.075397	11.194886
	95	95.661333	10.479052	11.030581
	100	77.328195	8.308655	8.308655
	105	105.095122	10.946062	10.424821
	110	109.537436	10.911019	9.919108
	115	113.695583	10.586128	9.205329
	120	117.440453	9.858462	8.215385
125	120.662320	8.598956	6.879165	

Tabla 13. Rendimiento del algoritmo de detección de escalado implementada.

A.5 RENDIMIENTO DEL SISTEMA TRAS APLICAR LOS ALGORITMOS DE COMPENSACIÓN

Se añaden en cada tabla, además de los resultados obtenidos tras aplicar los algoritmos de compensación, los datos de EER obtenidos para el caso de las firmas sin compensar (en la columna de ambas sesiones). El objetivo de esto es poder comparar fácilmente los resultados previos a la compensación, y los obtenidos tras insertar los algoritmos descritos en la sección 6 en la fase de preprocesado.

Efecto de la compensación de inclinación en el rendimiento del sistema					
	Giro (en grados)	EER (en %)			
		S1	S2	SA	
		Tras compensación	Tras compensación	Tras compensación	Previa a compensación
Entorno simulado	-15	4.571754	5.210825	5.013879	7.551321
	-10	4.737846	5.122763	4.955244	5.991497
	-5	4.607325	5.140906	4.885461	5.064858
	0	4.634008	4.983839	4.818000	4.554301
	5	4.694318	5.008380	4.876084	5.169255
	10	4.701431	5.182208	5.027480	6.078781
	15	4.980565	5.124801	5.051815	7.956869
	20	5.030320	5.325665	5.202917	8.597063
	25	5.007079	5.418187	5.285498	10.210055
	30	5.120010	5.575995	5.400560	11.958888
	35	5.233641	6.016543	5.640884	13.729614
	40	5.521999	6.282793	5.907573	15.632456
45	5.930185	6.730295	6.389459	17.658540	
Entorno real	0	1.221591	5.184812	3.636065	3.397920
	10	5.968750	5.001427	5.137950	6.137433
	20	7.329545	6.297348	6.793706	7.089598
	30	8.377016	8.008700	8.295310	9.527417

Tabla 14. Rendimiento del sistema tras aplicar la compensación de inclinación.

Rendimiento del sistema tras aplicar la normalización de posición independiente de usuario					
	Posición	EER (en %)			
		S1	S2	SA	
		Tras compensación	Tras compensación	Tras compensación	Previa a compensación
Entorno simulado	Original				4.554301
	DA1				12.608821
	DA2				19.016619
	DA3				18.917303
	DA4	7.963297	7.903832	7.921097	12.573031
	DB1				4.652862
	DB2				19.016619
	DB3				4.646594
	DB4				12.608821
Entorno real	Original	4.251894	5.744135	5.235746	3.397920
	P1	4.251894	7.897727	6.107226	17.481352
	P2	4.264828	2.041667	3.154857	3.222752
	P3	4.251894	6.846591	5.266900	3.941288
	P4	3.901515	6.297348	5.468094	16.984266

Tabla 15. Rendimiento del sistema tras aplicar normalización de posición independiente de usuario.

Rendimiento del sistema tras aplicar la normalización de posición dependiente de usuario					
	Posición	EER (en %)			
		S1	S2	SA	
		Tras compensación	Tras compensación	Tras compensación	Previa a compensación
Entorno simulado	Original				4.554301
	DA1				12.608821
	DA2				19.016619
	DA3				18.917303
	DA4	5.234413	6.403520	5.812703	12.573031
	DB1				4.652862
	DB2				19.016619
	DB3				4.646594
	DB4				12.608821
Entorno real	Original	1.268939	3.829423	2.941487	3.397920
	P1	1.714015	6.202652	3.645396	17.481352
	P2	1.363636	2.041667	1.946699	3.222752
	P3	1.666667	5.606061	3.396853	3.941288
	P4	1.126894	4.867424	2.757721	16.984266

Tabla 16. Rendimiento del sistema tras aplicar normalización de posición dependiente de usuario.

Efecto de la compensación de escalado en el rendimiento del sistema					
	Razón de escalado (en %)	EER (en %)			
		S1	S2	SA	
		Tras compensación	Tras compensación	Tras compensación	Previa a compensación
Entorno simulado	50	5.538125	6.119272	5.859153	13.708480
	55	5.518557	6.074908	5.840811	12.658098
	60	5.577818	6.126244	5.844895	11.648569
	65	5.346761	6.116777	5.782554	10.571723
	70	5.426518	6.055811	5.800603	9.396380
	75	5.576364	5.965457	5.794663	8.329108
	80	5.384598	6.134308	5.751777	7.417364
	85	5.449164	6.034835	5.734214	6.367663
	90	5.493977	6.107600	5.858482	5.477377
	95	5.375239	6.011655	5.735328	4.850199
	100	5.319289	6.059709	5.742231	4.554301
	105	5.462158	6.003383	5.766405	5.276544
	110	5.517443	6.110548	5.850392	6.194473
	115	5.419124	6.056449	5.746986	7.140631
120	5.457440	6.063050	5.746022	8.970757	
125	5.363916	5.990330	5.729388	10.071252	
Entorno real	50	35.393377	40.080157	37.894571	41.691641
	75	4.104950	9.963002	7.342817	8.427010
	100	1.268939	3.478739	2.741527	3.397920
	125	3.469968	3.243835	3.800988	4.828963

Tabla 17. Rendimiento del sistema tras aplicar la corrección de escalado.

1) Ejecución Material

- Compra de ordenador personal (Software incluido)..... 700 €
- Alquiler de impresora láser durante 6 meses 50 €
- Material de oficina 50 €
- Total de ejecución material..... 800 €

2) Gastos generales

- 16% sobre Ejecución Material 128 €

3) Beneficio Industrial

- 6% sobre Ejecución Material 48 €

4) Honorarios Proyecto

- 1080 horas a 6 € / hora 6480 €

5) Material fungible

- Gastos de impresión 60 €
- Encuadernación 200 €

6) Subtotal del presupuesto

- Subtotal Presupuesto 7716 €

7) I.V.A. aplicable

- 21% Subtotal Presupuesto 1620 €

8) Total presupuesto

- Total Presupuesto 9336 €

Madrid, Junio de 2015

El Ingeniero Jefe de Proyecto

Fdo.: Leticia Peña Latorre

Ingeniero de Telecomunicación

Esta sección contiene las condiciones legales que guiarán la realización, en este proyecto, de una *investigación del impacto de distintas estrategias de preprocesado en el rendimiento de un sistema de verificación basado en firma dinámica*. En lo que sigue, se supondrá que el proyecto ha sido encargado por una empresa cliente a una empresa consultora con la finalidad de realizar dicho estudio. Dicha empresa ha debido desarrollar una línea de investigación con objeto de elaborar el proyecto. Esta línea de investigación, junto con el posterior desarrollo de los programas está amparado por las condiciones particulares del siguiente pliego.

Supuesto que la utilización industrial de los métodos recogidos en el presente proyecto ha sido decidida por parte de la empresa cliente o de otras, la obra a realizar se regulará por las siguientes:

Condiciones generales

1. La modalidad de contratación será el concurso. La adjudicación se hará, por tanto, a la proposición más favorable sin atender exclusivamente al valor económico, dependiendo de las mayores garantías ofrecidas. La empresa que somete el proyecto a concurso se reserva el derecho a declararlo desierto.
2. El montaje y mecanización completa de los equipos que intervengan será realizado totalmente por la empresa licitadora.
3. En la oferta, se hará constar el precio total por el que se compromete a realizar la obra y el tanto por ciento de baja que supone este precio en relación con un importe límite si este se hubiera fijado.
4. La obra se realizará bajo la dirección técnica de un Ingeniero Superior de Telecomunicación, auxiliado por el número de Ingenieros Técnicos y Programadores que se estime preciso para el desarrollo de la misma.
5. A parte del Ingeniero Director, el contratista tendrá derecho a contratar el resto del personal, pudiendo ceder esta prerrogativa a favor del Ingeniero Director, quien no estará obligado a aceptarla.
6. El contratista tiene derecho a sacar copias a su consta de los planos, pliego de condiciones y presupuestos. El Ingeniero autor del proyecto autorizará con su firma las copias solicitadas por el contratista después de confrontarlas.
7. Se abonará al contratista la obra que realmente ejecute con sujeción al proyecto que sirvió de base para la contratación, a las modificaciones autorizadas por la

superioridad o a las órdenes que con arreglo a sus facultades le hayan comunicado por escrito al Ingeniero Director de obras siempre que dicha obra se haya ajustado a los preceptos de los pliegos de condiciones, con arreglo a los cuales, se harán las modificaciones y la valoración de las diversas unidades sin que el importe total pueda exceder de los presupuestos aprobados. Por consiguiente, el número de unidades que se consignan en el proyecto o en el presupuesto, no podrá servirle de fundamento para entablar reclamaciones de ninguna clase, salvo en los casos de rescisión.

8. Tanto en las certificaciones de obras como en la liquidación final, se abonarán los trabajos realizados por el contratista a los precios de ejecución material que figuran en el presupuesto para cada unidad de la obra.
9. Si excepcionalmente se hubiera ejecutado algún trabajo que no se ajustase a las condiciones de la contrata pero que sin embargo es admisible a juicio del Ingeniero Director de obras, se dará conocimiento a la Dirección, proponiendo a la vez la rebaja de precios que el Ingeniero estime justa y si la Dirección resolviera aceptar la obra, quedará el contratista obligado a conformarse con la rebaja acordada.
10. Cuando se juzgue necesario emplear materiales o ejecutar obras que no figuren en el presupuesto de la contrata, se evaluará su importe a los precios asignados a otras obras o materiales análogos si los hubiere y cuando no, se discutirán entre el Ingeniero Director y el contratista, sometiéndolos a la aprobación de la Dirección. Los nuevos precios convenidos por uno u otro procedimiento, se sujetarán siempre al establecido en el punto anterior.
11. Cuando el contratista, con autorización del Ingeniero Director de obras, emplee materiales de calidad más elevada o de mayores dimensiones de lo estipulado en el proyecto, o sustituya una clase de fabricación por otra que tenga asignado mayor precio o ejecute con mayores dimensiones cualquier otra parte de las obras, o en general, introduzca en ellas cualquier modificación que sea beneficiosa a juicio del Ingeniero Director de obras, no tendrá derecho sin embargo, sino a lo que le correspondería si hubiera realizado la obra con estricta sujeción a lo proyectado y contratado.
12. Las cantidades calculadas para obras accesorias, aunque figuren por partida alzada en el presupuesto final (general), no serán abonadas sino a los precios de la contrata, según las condiciones de la misma y los proyectos particulares que para ellas se formen, o en su defecto, por lo que resulte de su medición final.
13. El contratista queda obligado a abonar al Ingeniero autor del proyecto y director de obras así como a los Ingenieros Técnicos, el importe de sus respectivos honorarios

facultativos por formación del proyecto, dirección técnica y administrativa en su caso, con arreglo a las tarifas y honorarios vigentes.

14. Concluida la ejecución de la obra, será reconocida por el Ingeniero Director que a tal efecto designe la empresa.
15. La garantía definitiva será del 4.
16. La forma de pago será por certificaciones mensuales de la obra ejecutada, de acuerdo con los precios del presupuesto, deducida la baja si la hubiera.
17. La fecha de comienzo de las obras será a partir de los 15 días naturales de replanteo oficial de las mismas y la definitiva, al año de haber ejecutado la provisional, procediéndose si no existe reclamación alguna, a la reclamación de la fianza.
18. Si el contratista al efectuar el replanteo, observase algún error en el proyecto, deberá comunicarlo en el plazo de quince días al Ingeniero Director de obras, pues transcurrido ese plazo será responsable de la exactitud del proyecto.
19. El contratista está obligado a designar una persona responsable que se entenderá con el Ingeniero Director de obras, o con el delegado que éste designe, para todo relacionado con ella. Al ser el Ingeniero Director de obras el que interpreta el proyecto, el contratista deberá consultarle cualquier duda que surja en su realización.
20. Durante la realización de la obra, se girarán visitas de inspección por personal facultativo de la empresa cliente, para hacer las comprobaciones que se crean oportunas. Es obligación del contratista, la conservación de la obra ya ejecutada hasta la recepción de la misma, por lo que el deterioro parcial o total de ella, aunque sea por agentes atmosféricos u otras causas, deberá ser reparado o reconstruido por su cuenta.
21. El contratista, deberá realizar la obra en el plazo mencionado a partir de la fecha del contrato, incurriendo en multa, por retraso de la ejecución siempre que éste no sea debido a causas de fuerza mayor. A la terminación de la obra, se hará una recepción provisional previo reconocimiento y examen por la dirección técnica, el depositario de efectos, el interventor y el jefe de servicio o un representante, estampando su conformidad el contratista.
22. Hecha la recepción provisional, se certificará al contratista el resto de la obra, reservándose la administración el importe de los gastos de conservación de la misma hasta su recepción definitiva y la fianza durante el tiempo señalado como plazo de

garantía. La recepción definitiva se hará en las mismas condiciones que la provisional, extendiéndose el acta correspondiente. El Director Técnico propondrá a la Junta Económica la devolución de la fianza al contratista de acuerdo con las condiciones económicas legales establecidas.

23. Las tarifas para la determinación de honorarios, reguladas por orden de la Presidencia del Gobierno el 19 de Octubre de 1961, se aplicarán sobre el denominado en la actualidad "Presupuesto de Ejecución de Contrata", anteriormente llamado "Presupuesto de Ejecución Material", que hoy designa otro concepto.

Condiciones particulares

La empresa consultora, que ha desarrollado el presente proyecto, lo entregará a la empresa cliente bajo las condiciones generales ya formuladas, debiendo añadirse las siguientes condiciones particulares:

1. La propiedad intelectual de los procesos descritos y analizados en el presente trabajo, pertenece por entero a la empresa consultora representada por el Ingeniero Director del Proyecto.
2. La empresa consultora se reserva el derecho a la utilización total o parcial de los resultados de la investigación realizada para desarrollar el siguiente proyecto, bien para su publicación o bien para su uso en trabajos o proyectos posteriores, para la misma empresa cliente o para otra.
3. Cualquier tipo de reproducción aparte de las reseñadas en las condiciones generales, bien sea para su uso particular de la empresa cliente, o para cualquier otra aplicación, contará con autorización expresa y por escrito del Ingeniero Director del Proyecto, que actuará en representación de la empresa consultora.
4. En la autorización se ha de hacer constar la aplicación a que se destinan sus reproducciones así como su cantidad.
5. En todas las reproducciones se indicará su procedencia, explicitando el nombre del proyecto, nombre del Ingeniero Director y de la empresa consultora.
6. Si el proyecto pasa la etapa de desarrollo, cualquier modificación que se realice sobre él, deberá ser notificada al Ingeniero Director del Proyecto y a criterio de éste, la empresa consultora decidirá aceptar o no la modificación propuesta.
7. Si la modificación se acepta, la empresa consultora se hará responsable al mismo nivel que el proyecto inicial del que resulta el añadirla.

8. Si la modificación no es aceptada, por el contrario, la empresa consultora declinará toda responsabilidad que se derive de la aplicación o influencia de la misma.
9. Si la empresa cliente decide desarrollar industrialmente uno o varios productos en los que resulte parcial o totalmente aplicable el estudio de este proyecto, deberá comunicarlo a la empresa consultora.
10. La empresa consultora no se responsabiliza de los efectos laterales que se puedan producir en el momento en que se utilice la herramienta objeto del presente proyecto para la realización de otras aplicaciones.
11. La empresa consultora tendrá prioridad respecto a otras en la elaboración de los proyectos auxiliares que fuese necesario desarrollar para dicha aplicación industrial, siempre que no haga explícita renuncia a este hecho. En este caso, deberá autorizar expresamente los proyectos presentados por otros.
12. El Ingeniero Director del presente proyecto, será el responsable de la dirección de la aplicación industrial siempre que la empresa consultora lo estime oportuno. En caso contrario, la persona designada deberá contar con la autorización del mismo, quien delegará en él las responsabilidades que ostente.

