



Departamento de Electrónica
Universidad de Málaga

Tesis Doctoral

Propuesta y Evaluación de Algoritmos para la Corrección de Errores en Sensores Táctiles

José Antonio Sánchez Durán

Málaga, noviembre 2015



Publicaciones y
Divulgación Científica

AUTOR: José Antonio Sánchez Durán

 <http://orcid.org/0000-0001-8503-9593>

EDITA: Publicaciones y Divulgación Científica. Universidad de Málaga



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional:

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode>

Cualquier parte de esta obra se puede reproducir sin autorización pero con el reconocimiento y atribución de los autores.

No se puede hacer uso comercial de la obra y no se puede alterar, transformar o hacer obras derivadas.

Esta Tesis Doctoral está depositada en el Repositorio Institucional de la Universidad de Málaga (RIUMA): riuma.uma.es



Departamento de Electrónica
Universidad de Málaga

Tesis Doctoral

Propuesta y Evaluación de Algoritmos para la Corrección de Errores en Sensores Táctiles

Presentada por: José Antonio Sánchez Durán

Dirigida por: Dr. Fernando Vidal Verdú
Profesor Titular de Universidad del
Departamento de Electrónica

Dr. José Antonio Hidalgo López
Profesor Titular de Universidad del
Departamento de Electrónica

Málaga, noviembre 2015



Dr. Fernando Vidal Verdú y Dr. José Antonio Hidalgo López,
Profesores Titulares de Universidad del Departamento de Electrónica
de la Universidad de Málaga

CERTIFICAN: que D. José Antonio Sánchez Durán, Ingeniero en Informática por la
Universidad de Málaga ha realizado bajo nuestra dirección la Tesis
Doctoral que tiene por título “Propuesta y Evaluación de Algoritmos
para la Corrección de Errores en Sensores Táctiles”. Y que ha alcanzado
los objetivos de investigación propuestos, estando debidamente
cualificada para su defensa.

Málaga, a 12 de Noviembre 2015

Fdo.: Fernando Vidal Verdú

Fdo.: José Antonio Hidalgo López

*A mi madre por su entrega infinita y amor hacia nosotros,
a mi padre porque siempre quiso verme llegar aquí,
y a mi hermana por todo su apoyo.*

Agradecimientos

Quiero dedicar unas palabras para agradecer sinceramente a todas aquellas personas, amigos e instituciones que han contribuido y me han apoyado a realizar esta tesis.

En primer lugar quiero agradecer a mis directores por aportar sus conocimientos, tiempo y esfuerzo en alcanzar los mejores objetivos posibles. A Fernando Vidal por su extenso conocimiento y dedicación absoluta al proyecto, guiándome en todo momento sobre las mejores líneas de investigación a seguir. A José A. Hidalgo por aportar soluciones e ideas para abrir nuevos caminos a explorar en los momentos de dudas que siempre surgen y que me han ayudado a concluir este trabajo.

Muy especialmente, quiero agradecer a mis amigos y compañeros Óscar y Julián por toda su ayuda a lo largo de estos años, aportando de forma desinteresada sus conocimientos y trabajo, y haciendo mucho más agradable el seguir con la tarea diaria. Un placer compartir todo este tiempo y espero que sigámoslo haciendo en futuros proyectos.

Gracias al Centro Tecnológico Cidetec por su colaboración en este trabajo y al departamento de Electrónica de la Universidad de Málaga, por su continuo apoyo en todo este tiempo. También quiero mencionar la financiación aportada por el Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica y los Fondos FEDER mediante los proyectos TEC2009-14446-C02-01 y TEC2012-38653-C02-01.

Quiero dedicar mi más sentido agradecimiento a mi madre por aguantarme en buenos y malos momentos, a mi hermana por no dudar en prestarme su ayuda cuando la necesité, a mis tíos Gualli, Pepi y Rafa y a mis primas M^a José, Auxi, Inma e Inés, por su apoyo y cariño con el que siempre me tratan.

Por último, no puedo olvidarme de mis amigos, Susana, Soledad, Virginia, Merche, Mari, Julián, Juan, David y todos los peques, M^a José, Lola, José Antonio y Óscar, por sus continuas muestras de ánimo y cariño, haciéndome más llevadero los momentos de mayor trabajo en los que por dedicarme a él, los tuve que abandonar en muchas ocasiones y que espero me dejen recuperar y compartir muy pronto. Gracias a todos.

Índice

Introducción.....	1
Objetivos.....	5
Estructura de la Tesis.....	6
Capítulo 1. Antecedentes.....	9
1.1. Introducción.....	9
1.2. Antecedentes.....	10
1.3. Errores y Limitaciones de los Sensores Táctiles.....	18
1.3.1. Histéresis.....	18
1.3.2. No Linealidad.....	23
1.3.3. Dispersión.....	24
1.3.4. Deriva.....	25
1.3.5. Cambio de Resolución Espacial.....	27
1.4. Proceso de Corrección de la Histéresis e Identificación de Parámetros.....	27
1.4.1. Mínimos Cuadrados.....	29
1.4.2. Algoritmos Genéticos.....	31
Capítulo 2. Sensores Táctiles y Caracterización.....	37
2.1. Introducción.....	37
2.2. Sensores Táctiles.....	38
2.2.1. Sensor Táctil basado en una PCB.....	38
2.2.1.1. Descripción.....	38
2.2.1.2. Electrónica de Acondicionamiento y de Adquisición.....	40
2.2.1.3. Software de Control.....	42
2.2.2. Sensor de Tekscan.....	43
2.2.2.1. Descripción y Electrónica de Adquisición.....	43
2.2.2.2. Software I-Scan.....	44
2.3. Entorno Experimental.....	45
2.3.1. Plataforma Neumática de Tekscan.....	45
2.3.1.1. Descripción.....	45
2.3.1.2. Software de Control.....	47

2.3.2. Plataforma Motorizada.....	49
2.3.2.1. Descripción.....	49
2.3.2.2. Software de Control.....	51
2.3.3. Plataforma Manual Prensa/Balanza	52
2.3.3.1. Descripción.....	52
2.3.4. Aplicaciones Matlab.....	54
2.4. Caracterización de los Sensores Táctiles	55
2.4.1. Histéresis	55
2.4.1.1. Caracterización de la Histéresis del Sensor basado en una PCB.....	55
2.4.1.2. Caracterización de la Histéresis del Sensor de Tekscan.....	58
2.4.2. No Linealidad.....	60
2.4.2.1. Caracterización de la No Linealidad del Sensor basado en una PCB ..	60
2.4.2.2. Caracterización de la No Linealidad del Sensor de Tekscan.....	60
2.4.3. Dispersión	61
2.4.3.1. Caracterización del Sensor basado en una PCB	61
2.4.3.2. Caracterización del Sensor de Tekscan	62
2.4.4. Deriva.....	64
2.4.4.1. Caracterización del Sensor basado en una PCB	64
2.4.4.2. Caracterización del Sensor de Tekscan	66
2.4.5. Cambio de Resolución Espacial.....	67
2.4.5.1. Sensor basado en una PCB	67
2.4.5.2. Sensor de Tekscan	67
Capítulo 3. Influencia de los Errores en Parámetros de Alto Nivel.....	69
3.1. Introducción	69
3.2. Parámetros de la imagen táctil	71
3.2.1. Objetos de Muestra	72
3.2.2. Momentos Geométricos y Elipse. Parámetros a estudio.....	74
3.3. Influencia de la Histéresis en la Elipse	77
3.4. Influencia de la Deriva en la Elipse	81
3.5. Influencia de la Dispersión en la Elipse.....	85
3.6. Influencia del Cambio de Resolución en la Elipse	88

3.7. Análisis de Resultados y Conclusiones sobre la Influencia de los Errores en la Elipse	91
Capítulo 4. Aplicación a Sensores Táctiles de Algoritmos de Corrección de Errores	97
4.1. Introducción	97
4.1.1. Operadores <i>Play</i>	98
4.1.2. Modelo Clásico de Prandtl-Ishlinskii	102
4.2. Modelo Generalizado de Prandtl-Ishlinskii	105
4.2.1. Identificación de Parámetros del Modelo GPI	108
4.2.2. Selección de Funciones Envolventes para el Modelo GPI	110
4.3. Modelo Modificado de Prandtl-Ishlinskii	119
4.3.1. Identificación de Parámetros del Modelo MPI	121
4.4. Modelo Basado en Curvas Dominantes	122
4.4.1. Identificación de Parámetros del Modelo POLY	125
4.5. Análisis de Resultados y Conclusiones	126
Capítulo 5. Propuesta de Algoritmos de Corrección de Errores	133
5.1. Introducción	133
5.2. El Método General ELAM	134
5.3. Método ELAM_1	140
5.3.1. Introducción	140
5.3.2. Modelo Directo Curvas Descendentes ELAM_1	141
5.3.2.1. Estrategia a la derecha del punto intermedio	142
5.3.2.2. Estrategia a la izquierda del punto intermedio	143
5.3.3. Modelo Directo Curvas Ascendentes ELAM_1	144
5.3.3.1. Estrategia a la derecha del punto intermedio	146
5.3.3.2. Estrategia a la izquierda del punto intermedio	147
5.4. Método ELAM_2	148
5.4.1. Introducción	148
5.4.2. Modelo Directo Curvas Ascendentes	149
5.5. Método ELAM_3	150
5.5.1. Introducción	150
5.5.2. Modelo Directo Curvas Ascendentes ELAM_3	151

5.5.2.1. Estrategia a la derecha del punto intermedio.....	152
5.5.2.2. Estrategia a la izquierda del punto intermedio	153
5.6. Modelo General Inverso	154
5.7. Modelo Inverso ELAM_1	155
5.7.1. Modelo Inverso Curvas Descendentes ELAM_1	155
5.7.1.1. Estrategia a la derecha del punto intermedio.....	156
5.7.1.2. Estrategia a la izquierda del punto intermedio	157
5.7.2. Modelo Inverso Curvas Ascendentes ELAM_1	158
5.7.2.1. Estrategia a la derecha del punto intermedio.....	158
5.7.2.2. Estrategia a la izquierda del punto intermedio	159
5.8. Modelo Inverso ELAM_2.....	160
5.8.1. Modelo Inverso Curvas Ascendentes ELAM_2	160
5.9. Modelo Inverso ELAM_3.....	162
5.9.1. Modelo Inverso Curvas Ascendentes ELAM_3	162
5.9.1.1. Estrategia a la derecha del punto intermedio.....	162
5.9.1.2. Estrategia a la izquierda del punto intermedio	163
5.10. Identificación de parámetros del Modelo ELAM.....	164
5.11. Análisis de Resultados y Conclusiones	165
5.11.1. Introducción	165
5.11.2. Comparativa de Modelos de Compensación de Histéresis	165
5.11.3. Compensación de la Matriz Completa y con Objetos.....	174
Conclusiones y Líneas Futuras de Trabajo	179
Conclusiones.....	179
Líneas Futuras de Trabajo.....	182
Publicaciones en Revistas y Congresos	183
Publicaciones que Avalan la Tesis	183
Otras Publicaciones Relacionadas.....	185
Anexo I. Aplicaciones de Matlab.....	187
I.1. Aplicación de Análisis de una Imagen Táctil.....	188
I.2. Aplicación de Gestión de los Modelos de Compensación de Histéresis.....	192
I.3. Aplicación de Gestión de Cuadrantes.....	195
Anexo II. Implementación del Algoritmo ELAM_3	199

Anexo III. Resultados de Pruebas con Objetos..... 205
Bibliografía..... 221

Índice de Figuras

Figura 1. Salida del sensor basado en una PCB flexible con histéresis y no linealidad...	3
Figura 2. Diagrama funcional de un sistema táctil.	4
Figura 1-1. No linealidad de histéresis con múltiples ramas.	20
Figura 1-2. Señales de entrada diferentes con los mismos valores extremos.....	20
Figura 1-3. Misma salida de un transductor con histéresis para las entradas $x_1(t)$ y $x_2(t)$	21
Figura 1-4. Esquema de un bucle de histéresis.....	22
Figura 1-5. Esquema general de un bucle de histéresis de un sensor.....	23
Figura 1-6. Esquema general del error de no linealidad.....	23
Figura 1-7. Ejemplo del equilibrado de la dispersión mostrada por un sensor táctil. a) Sensor sin equilibrar. b) Sensor equilibrado.....	25
Figura 1-8. Esquema general de la deriva de un sensor táctil.	26
Figura 1-9. Esquema de compensación de Histéresis para un Sensor Táctil.	28
Figura 1-10. Diagrama de flujo de un algoritmo genético simple.....	32
Figura 2-1. Sensor táctil basado en PCB.	39
Figura 2-2. Vista de la sección y superior de un electrodo.....	40
Figura 2-3. Detalle de la placa de circuito impreso flexible.....	40
Figura 2-4. Electrónica de acondicionamiento del sensor táctil basado en una PCB.....	41
Figura 2-5. Placa de acondicionamiento y conexión con el sensor táctil.....	41
Figura 2-6. Sistema de Adquisición NI-USB 6259.	42
Figura 2-7. Ventana de captura de la imagen táctil del sensor en 2D y 3D.	43
Figura 2-8. Sensor de Tekscan 5051/P1/3056T1/20.	44
Figura 2-9. Interfaz de adquisición de datos de Tekscan.	44
Figura 2-10. Aplicación I-Scan mostrando varias capturas del sensor.....	45
Figura 2-11. Esquema del dispositivo de equilibrado/calibración PB100E de Tekscan.46	
Figura 2-12. Plataforma neumática PB100E de Tekscan y regulador Pneumax 171E2N.TD0009.	46
Figura 2-13. Sistema completo de medida de la respuesta de los sensores táctiles a presiones uniformes.....	47
Figura 2-14. Ventana de control de la plataforma de medida neumática.....	49

Figura 2-15. Plataforma motorizada.....	50
Figura 2-16. Ventana de control de la plataforma motorizada.....	51
Figura 2-17. Plataforma manual con prensa y balanza.....	53
Figura 2-18. Medida de la deriva con la balanza y un peso fijo.....	53
Figura 2-19. Comportamiento descendente de las curvas de histéresis del sensor táctil basado en una PCB.....	56
Figura 2-20. Comportamiento ascendente de las curvas de histéresis del sensor táctil basado en una PCB.....	56
Figura 2-21. Curvas descendentes obtenidas en varios ciclos diferenciados por colores. En la zona inferior se muestra la desviación estándar de cada muestra representada en las curvas.....	57
Figura 2-22. Comportamiento de histéresis del sensor 5051 de Tekscan.	59
Figura 2-23. Cuantificación del error de linealidad para el sensor basado en una PCB. 60	
Figura 2-24. Dispersión observada en el sensor táctil basado en una PCB ante una presión uniforme de 40 PSI.....	61
Figura 2-25. Cuadrante 3 del sensor de 16x16 tácteles basado en una PCB.....	62
Figura 2-26. Dispersión en el sensor táctil de Tekscan.	62
Figura 2-27. Caracterización de la deriva del sensor basado en una PCB.	65
Figura 2-28. Cambio de resolución en el sensor 5051 de Tekscan. a) 44×44. b) 22×22. c) 11×11.....	67
Figura 3-1. Parámetros de la elipse utilizada para describir un objeto en tareas de manipulación.	71
Figura 3-2. Diferentes objetos utilizados en la caracterización de los sensores táctiles. A) Abridor. B) Fresa. C) Llave. D) Barra. E) Silbato. F) Tuerca.	72
Figura 3-3. a) Objetos de aluminio totalmente plano. b) Agujero para un correcto ajuste con el actuador de fuerza.	73
Figura 3-4. Detalle del acoplamiento entre la punta del actuador y el objeto situado sobre el sensor táctil.	73
Figura 3-5. Desplazamiento de los ejes de coordenadas para obtener los momentos centrales.	75
Figura 3-6. Variaciones de los parámetros de control provocadas por la histéresis del sensor basado en una PCB.....	80

Figura 3-7. Deriva de la <i>Salida Agregada</i> registrada por el sensor basado en una PCB con el objeto abridor para diferentes subidas y bajadas de la fuerza.	82
Figura 3-8. Deriva de la <i>Salida Agregada</i> registrada por el sensor de Tekscan con el objeto <i>abridor</i> para diferentes subidas y bajadas de la fuerza.....	83
Figura 3-9. Variaciones de los parámetros provocados por la deriva del sensor basado en una PCB.....	84
Figura 3-10. Variaciones de los parámetros provocados por la deriva del sensor de Tekscan.....	85
Figura 3-11. Variaciones de los parámetros provocadas por el error de dispersión en el sensor de Tekscan.....	87
Figura 3-12. Variaciones de los parámetros provocados por una disminución al 50% de la resolución de las imágenes táctiles obtenidas con el sensor de Tekscan.....	89
Figura 3-13. Variaciones de los parámetros provocados por una disminución al 25% de la resolución de las imágenes táctiles obtenidas con el sensor de Tekscan.....	90
Figura 3-14. Comparación de la influencia de diferentes no idealidades en los parámetros de la Tabla 3-1 (percentil 80%).	94
Figura 3-15. Comparación de la influencia de diferentes no idealidades en los parámetros de la Tabla 3-1 (desviación máxima).	94
Figura 4-1. Mecanismo de carritos para describir el operador <i>play</i> . a) Posición inicial de los elementos del operador. b) Inicio de la trayectoria sin arrastre. c) Trayectoria con arrastre ascendente. d) Trayectoria de regreso sin arrastre.....	100
Figura 4-2. Mecanismo de carritos para describir el operador <i>play</i> . e) Trayectoria con arrastre descendente. f) Trayectoria de avance sin arrastre. g) Trayectoria con arrastre ascendente hasta cerrar el bucle de histéresis.....	101
Figura 4-3. No linealidad de histéresis compleja	103
Figura 4-4. Operador <i>Play</i> Clásico.....	104
Figura 4-5. Operador <i>Play</i> Generalizado.....	106
Figura 4-6. Resultados con funciones envolventes del tipo tangente hiperbólica y seis operadores. a) Modelo GPI. b) Operadores <i>play</i> . c) Muestras medidas, obtenidas con el modelo y valor absoluto del error. d) Zoom del error cometido.	112

Figura 4-7. Resultados con funciones envolventes del tipo tangente hiperbólica y un sólo operador. a) Modelo GPI. b) Operadores play. c) Muestras medidas, obtenidas con el modelo y valor absoluto del error. d) Zoom del error cometido.	112
Figura 4-8. Resultados con funciones envolventes del tipo exponencial y cuatro operadores. a) Modelo GPI. b) Operadores play. c) Muestras medidas, obtenidas con el modelo y valor absoluto del error. d) Zoom del error cometido.	113
Figura 4-9. Resultados con funciones envolventes del tipo exponencial y un solo operador. a) Modelo GPI. b) Operadores play. c) Muestras medidas, obtenidas con el modelo y valor absoluto del error. d) Zoom del error cometido.	113
Figura 4-10. Resultados con funciones envolventes del tipo lineal saturada y cuatro operadores. a) Modelo GPI. b) Operadores play. c) Muestras medidas, obtenidas con el modelo y valor absoluto del error. d) Zoom del error cometido.	114
Figura 4-11. Resultados con funciones envolventes del tipo lineal saturada y un sólo operador. a) Modelo GPI. b) Operadores play. c) Muestras medidas, obtenidas con el modelo y valor absoluto del error. d) Zoom del error cometido.	114
Figura 4-12. Resultados de la compensación de la histéresis con distintas funciones envolventes y número de operadores n	118
Figura 4-13. Operador <i>Play</i> OSP.....	120
Figura 4-14. Modelo basado en Curvas Dominantes.	123
Figura 4-15. Ilustración de los diferentes mapeos de la salida del sensor táctil sobre la presión registrada.....	127
Figura 4-16. Presión registrada frente a la presión de entrada para el mapeo lineal en (b), y para el mapeo no lineal (c) de la salida del sensor en (a).	128
Figura 4-17. Método GPI con $n=4$ operadores play. (a) Modelo para las curvas descendentes. (b) Modelo para las curvas ascendentes.	130
Figura 4-18. Método MPI con polinomio de tercer grado y $n=10$ operadores OSP. (a) Modelo para las curvas descendentes. (b) Modelo para las curvas ascendentes.	130
Figura 4-19. Método POLY con polinomio de grado seis. (a) Modelo para las curvas descendentes. (b) Modelo para las curvas ascendentes.	131
Figura 5-1. Mapeo lineal de una curva patrón a una curva objetivo.	135
Figura 5-2. Puntos intermedios y tramos en curvas patrón y objetivo.	138

Figura 5-3. Construcción del tramo derecho de las curvas descendentes con ELAM_1.	143
Figura 5-4. Construcción del tramo izquierdo de las curvas descendentes con ELAM_1.	144
Figura 5-5. Construcción del tramo derecho de las curvas ascendentes con ELAM_1.	146
Figura 5-6. Construcción del tramo izquierdo de las curvas ascendentes con ELAM_1.	147
Figura 5-7. Construcción de las curvas ascendentes con ELAM_2.	150
Figura 5-8. Construcción del tramo derecho de las curvas ascendentes con ELAM_3.	152
Figura 5-9. Construcción del tramo izquierdo de las curvas ascendentes con ELAM_3.	153
Figura 5-10. Construcción del tramo derecho del modelo inverso ELAM_1 para las curvas descendentes.....	156
Figura 5-11. Construcción del tramo izquierdo del modelo inverso ELAM_1 para las curvas descendentes.....	157
Figura 5-12. Construcción del tramo derecho del modelo inverso ELAM_1 para las curvas ascendentes.....	158
Figura 5-13. Construcción del tramo izquierdo del modelo inverso ELAM_1 para las curvas ascendentes.....	159
Figura 5-14. Construcción de las curvas ascendentes del modelo inverso con ELAM_2.	161
Figura 5-15. Construcción del tramo derecho del modelo inverso ELAM_3 para las curvas ascendentes.....	162
Figura 5-16. Construcción del tramo izquierdo del modelo inverso ELAM_3 para las curvas ascendentes.....	163
Figura 5-17. Modelos obtenidos con el método ELAM_1. (a) Modelo para las curvas descendentes. (b) Modelo para las curvas ascendentes.	168
Figura 5-18. Modelos obtenidos con el método ELAM_2. (a) Modelo para las curvas descendentes. (b) Modelo para las curvas ascendentes.	168

Figura 5-19. Modelos obtenidos con el método ELAM_3. (a) Modelo para las curvas descendentes. (b) Modelo para las curvas ascendentes.	169
Figura 5-20. (a) Datos medidos en curvas descendentes, modelo ELAM_3 y valor absoluto del error. (b) Imagen ampliada del error.	171
Figura 5-21. (a) Datos medidos en curvas ascendentes, modelo ELAM_3 y valor absoluto del error. (b) Imagen ampliada del error.	171
Figura 5-22. Compensación para las curvas descendentes con el método ELAM_3. (a) Modelo directo ELAM_3. (b) Modelo inverso ELAM_3. (c) Presión de salida del sensor frente a la presión real después de la compensación con el método ELAM_3.	174
Figura 5-23. Compensación para las curvas ascendentes con el método ELAM_3. (a) Modelo directo ELAM_3. (b) Modelo inverso ELAM_3. (c) Presión de salida del sensor frente a la presión real después de la compensación con el método ELAM_3.	174
Figura I-1. Cálculo de la elipse y sus parámetros. Cálculo de la Curva de Deriva.	189
Figura I-2. Representación de una imagen con presión uniforme y distancia absoluta producto de la deriva.	190
Figura I-3. Representación de una imagen plana del sensor de Tekscan en 3D.	191
Figura I-4. Gestión del modelo GPI.	193
Figura I-5. Gestión del Modelo ELAM.	194
Figura I-6. Aplicación que examina todos los tácteles del sensor por cuadrantes.	196
Figura I-7. Matriz compensada con el modelo ELAM_3 con un modelo por táctel. ...	197
Figura I-8. Representación de los modelos inversos en cada táctel.	198
Figura II-1. Rutina para calcular los parámetros del método ELAM_3 para un sensor.	200
Figura II-2. Cálculo de los parámetros del modelo con un Algoritmo Genético.	200
Figura II-3. Diagrama de Flujo de la función Calcular_Modelo para la versión ELAM_3.	201
Figura II-4. Aplicar la compensación de la histéresis con el método ELAM_3 a una salida del sensor en tiempo real.	202
Figura II-5. Rutina para aplicar el modelo inverso ELAM_3 a los voltajes de salida del sensor para obtener la presión aplicada al mismo.	203

Índice de Tablas

Tabla 2-1. Secuencia de presiones para caracterizar el sensor táctil basado en una PCB.	57
Tabla 2-2. Imágenes táctiles del sensor basado en una PCB obtenidas a partir de una presión uniforme en un ciclo ascendente-descendente.....	58
Tabla 2-3. Secuencia de presiones para caracterizar la histéresis del sensor de Tekscan.	59
Tabla 2-4. Resumen de valores de los errores de histéresis y no linealidad con respecto al fondo de escala.	61
Tabla 2-5. Equilibrado del sensor táctil de Tekscan.....	63
Tabla 2-6. Imágenes táctiles de la evolución de la deriva en el sensor basado en una PCB.	66
Tabla 3-1. Parámetros obtenidos del procesamiento de una imagen táctil utilizados en tareas de control.....	76
Tabla 3-2. Imágenes táctiles y elipse para los ciclos de histéresis con el sensor basado en una PCB y los objetos Anillo, Estrella, Abridor y Barra.....	78
Tabla 3-3. Imágenes táctiles del objeto <i>abridor</i> con el sensor basado en una PCB para evaluar el efecto de la deriva en los parámetros de la Tabla 3-1.....	82
Tabla 3-4. Imágenes táctiles del objeto <i>abridor</i> con el sensor de Tekscan para evaluar el efecto de la deriva en los parámetros de la Tabla 3-1.	83
Tabla 3-5. Imágenes táctiles para el objeto <i>abridor</i> con y sin equilibrado.	86
Tabla 3-6. Imágenes táctiles del objeto estrella obtenidas con el sensor de Tekscan junto con las imágenes obtenidas tras aplicar una reducción de la resolución al 50% y al 25%.	88
Tabla 3-7. Comparación de la influencia de diferentes no idealidades en los parámetros de la Tabla 3-1 (percentil 80%).	92
Tabla 3-8. Comparación de la influencia de diferentes no idealidades en los parámetros de la Tabla 3-1 (desviación máxima).	93
Tabla 4-1. Parámetros de los modelos GPI utilizando distintas funciones envolventes y número de operadores.....	116
Tabla 4-2. Errores cometidos y complejidad estimada de los modelos GPI.....	116

Tabla 4-3. Errores de linealidad de la presión de salida del sensor con respecto a la presión de entrada ejercida, después de compensar la salida del sensor con el mapeo realizado con el método GPI y diferentes funciones envolventes y número de operadores.....	119
Tabla 4-4. Errores de histéresis en la presión registrada frente a las curvas de presión de entrada para las distintas propuestas del voltaje de salida del sensor frente al mapeo de presiones registradas (ver Figura 4-15)	128
Tabla 4-5. Parámetros de los modelos GPI, MPI y POLY para las curvas de histéresis de bajadas del sensor táctil.	129
Tabla 4-6. Parámetros de los modelos GPI, MPI y POLY para las curvas de histéresis de subidas del sensor táctil.	129
Tabla 5-1. Parámetros de los modelos para las curvas de histéresis de bajadas del sensor táctil.	166
Tabla 5-2. Parámetros de los modelos para las curvas de histéresis de subidas del sensor táctil.	166
Tabla 5-3. Error medio y error máximo de los modelos de histéresis para las curvas descendentes.	169
Tabla 5-4. Error medio y error máximo de los modelos de histéresis para las curvas ascendentes.	170
Tabla 5-5. Imágenes del bucle de histéresis medido antes de la compensación.	175
Tabla 5-6. Imágenes del bucle de histéresis después de la compensación con el método ELAM_3.....	176
Tabla 5-7. Imágenes del bucle de histéresis medido antes de la compensación con el objeto Anillo.....	176
Tabla 5-8. Imágenes del bucle de histéresis con el objeto Anillo después de la compensación con el método ELAM_3.	177
Tabla III-1. Prueba de Histéresis con Objeto Aro y Valores de Parámetros con Plataforma Motorizada.....	206
Tabla III-2. Prueba de Histéresis con Objeto Estrella y Valores de Parámetros con Plataforma Motorizada.	207
Tabla III-3. Prueba de Histéresis con Objeto Abridor y Valores de Parámetros con Plataforma Motorizada.	208

Tabla III-4. Prueba de Histéresis con Objeto Abridor en Diagonal y Valores de Parámetros con Plataforma Motorizada.	209
Tabla III-5. Prueba de Histéresis con Objeto Barra y Valores de Parámetros con Plataforma Motorizada.	210
Tabla III-6. Prueba de Histéresis con Objeto Silbato y Valores de Parámetros con Plataforma Manual.	211
Tabla III-7. Prueba de Histéresis con Objeto Llave y Valores de Parámetros con Plataforma Manual.	212
Tabla III-8. Prueba de Histéresis con Objeto Fresa y Valores de Parámetros con Plataforma Manual.	213
Tabla III-9. Pruebas de Deriva con Objetos y Plataforma Motorizada.	214
Tabla III-10. Prueba de Cambio de Resolución con Objeto Aro y Valores de Parámetros con Plataforma Motorizada.	215
Tabla III-11. Prueba de Cambio de Resolución con Objeto Estrella y Valores de Parámetros con Plataforma Motorizada.	216
Tabla III-12. Prueba de Cambio de Resolución con Objeto Abridor y Valores de Parámetros con Plataforma Motorizada.	217
Tabla III-13. Prueba de Cambio de Resolución con Objeto Abridor en Diagonal y Valores de Parámetros con Plataforma Motorizada.	218
Tabla III-14. Prueba de Cambio de Resolución con Objeto Barra y Valores de Parámetros con Plataforma Motorizada.	219

Glosario

1 PSI = 6.89475729 Kpascales.

CAN: Controller Area Network: Controlador de Área de Red.

DAQ: Data Acquisition: Módulo de Adquisición de Datos.

ELAM: External Loop Adaptation Method: Método de Adaptación del Bucle Externo.

FPGA: Field Programmable Gate Array: Matriz de Puertas Programables en Campo.

FS: Full Scale: Fondo de Escala.

FSR: Force Sensing Resistor: Resistencia Sensible a la Fuerza.

GPI: Generalized Prandtl-Ishlinskii: Método de Prandtl-Ishlinskii Generalizado.

MEMS: Microelectromechanical Systems: Sistemas Micro-electro-mecánicos.

MPI: Modified Prandtl-Ishlinskii: Método de Prandtl-Ishlinskii Modificado.

PCB: Printed Circuit Board: Placa de Circuito Impreso.

PET: Tereftalato de Polietileno.

PI: Prandtl-Ishlinskii.

POLY: Polynomial Method: Método basado en Polinomios.

SMA: Shape Memory Alloy: Aleación con Memoria de Forma.

USB: Universal Serial Bus; Bus Serie Universal.

Introducción

La robótica es una de las ramas de la tecnología de mayor auge en las últimas décadas y se encuentra en continua expansión. Uno de los objetivos fundamentales de las investigaciones realizadas en este campo es el desarrollo de robots capaces de interactuar de forma autónoma con un entorno que no está completamente definido o que puede variar con el tiempo, es decir, que presenta incertidumbres. En especial, en los últimos tiempos, se ha producido un cambio de paradigma en la robótica con la aparición de nuevos tipos de robots destinados a coexistir activamente con los seres humanos [Yan *et al.* 2014]. El desarrollo de máquinas dedicadas a la rehabilitación y a la asistencia de personas como robots médicos, robots sociales, bio-robots o robots humanoides, implica abordar problemas de seguridad, y en concreto la necesidad de un manejo preciso y suave de objetos que no pongan en peligro la integridad de los humanos con los que interactúan. Por tanto, se hace necesario integrar en ellos capacidades de percepción del entorno en aras de alcanzar un funcionamiento autónomo que permita adaptarse a las condiciones cambiantes de su espacio de operación.

De entre todas las modalidades posibles de percepción, el sentido del tacto es especialmente importante en aplicaciones robóticas que requieren de un contacto físico con objetos, ya que permite la evaluación de propiedades de los objetos como su forma, tamaño, textura, o dureza. Los sensores táctiles proporcionan estas capacidades de percepción, por lo que se han desarrollado una amplia variedad de dispositivos [Dahiya *et al.* 2010]. Estos sensores son básicamente matrices de unidades de detección, denominadas tácteles, que miden la fuerza de contacto y proporcionan la salida del sensor táctil como un mapa de fuerzas o imagen táctil. A partir de esta imagen táctil es posible obtener los parámetros de control a emplear por ejemplo, en complejas tareas de

manipulación. En particular, es frecuente el cálculo de los momentos de la imagen táctil y de la elipse que se obtiene de ellos para tener información de la forma, tamaño y orientación del contacto, así como de la fuerza ejercida en él [Gorges *et al.* 2014].

Sin embargo, pese a la gran variedad de dispositivos desarrollados en la últimas décadas, no hay una presencia efectiva de los sensores táctiles en las plataformas robóticas existentes (como iCub, ASIMO, Robonaut, HRP o instrumentos biomédicos), es decir, que los datos táctiles no participan realmente en la realización de las tareas del robot [Dahiya *et al.* 2013]. Uno de los aspectos que puede afectar a tal hecho, es la presencia de errores en la respuesta de los sensores táctiles ante estímulos de entrada, como la histéresis, la no linealidad, la deriva o la dispersión entre táctiles, que pueden influir en las imágenes táctiles generadas y por tanto, en los parámetros de contacto calculados a partir de ellas. Estos errores se deben fundamentalmente a la necesidad de hacer sensores que cubran un área grande y sean flexibles. Una propuesta de sensores precisos basados en MEMS construidos en silicio supone un coste excesivo. Además, se suele añadir una capa exterior para proteger al sensor y mejorar las características de la superficie de contacto, por lo que el rendimiento de éste se ve afectado. Concretamente, si esta capa es de goma, las propiedades visco-elásticas harán que aparezcan histéresis y deriva, y su no uniformidad a lo largo de la superficie hará que aparezca dispersión en la respuesta de distintos táctiles. En cualquier caso, para alcanzar un coste razonable, estos sensores se implementan normalmente con materiales flexibles y elásticos que comportan la aparición de las limitaciones mencionadas, como la histéresis. En concreto, encontramos histéresis tanto en sensores basados en principios capacitivos [Horii *et al.* 2014] como en sensores piezo-resistivos [Shimojo *et al.* 2004; Castellanos-Ramos *et al.* 2010], que constituyen la mayoría de los sensores reportados y comercializados.

En este contexto surgen dos alternativas. Por una parte, dado que sabemos que la piel humana tiene propiedades visco-elásticas y está constituida por un conjunto de mecanorreceptores sujetos a múltiples fuentes de error, cabe preguntarse si las limitaciones de los sensores táctiles se pueden tolerar si se ve al sensor como un conjunto de unidades sensoras y se analiza el error en los parámetros extraídos de este conjunto. En segundo lugar, podemos hacer una aproximación más individualizada centrándonos en el táctel como unidad sensora e intentando corregir los errores de la misma. Ambas alternativas se exploran en esta tesis.

Aunque generalizables, las pruebas de esta tesis se realizan con un sensor piezo-resistivo desarrollado en colaboración con el centro tecnológico CIDETEC [Cidetec 2015] en el marco de un proyecto de investigación coordinado del Plan Nacional de I+D+i. El sensor se construye con una lámina con película de polímero conductor sobre una matriz de electrodos hecha en una placa de circuito impreso flexible. El resultado es un sensor de bajo coste, pero que presenta un error notable de histéresis y no linealidad, como se observa en la Figura 1, así como deriva y dispersión de la respuesta entre distintos tácteles. A efectos de comparación y realización de algunas pruebas específicas, también se trabaja con un sensor comercial de Tekscan [Tekscan 2015d]. Con estos sensores se harán pruebas experimentales para saber el impacto de los errores y limitaciones de los sensores táctiles sobre los parámetros que definen la elipse asociada a una imagen táctil y definida a partir de los momentos de dicha imagen.

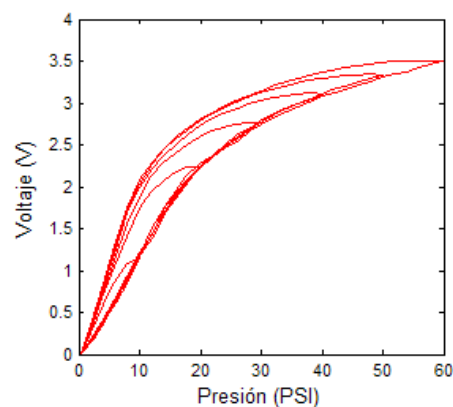


Figura 1. Salida del sensor basado en una PCB flexible con histéresis y no linealidad.

Por otra parte, siguiendo la segunda alternativa mencionada arriba, se comparan y proponen algoritmos de corrección de la histéresis del sensor, que asimismo corrigen la no linealidad y también la dispersión en la respuesta de los distintos tácteles cuando se aplican presiones al sensor táctil. Hay muy pocas aportaciones en el contexto de los sensores táctiles en este sentido. En [Schmitz *et al.* 2011] se modela el comportamiento visco-elástico del material con el que está hecho el sensor, y en [Horii *et al.* 2014] se introducen cadenas de Markov para hacer depender la salida de la historia reciente. El primer caso no es generalizable a otras causas de histéresis, como la adherencia entre dos superficies, y el segundo conduce a un modelado específico y muy complejo, centrado en el sensor en conjunto y no en la corrección de la histéresis de cada táctel. En esta tesis se

exploran y comparan propuestas hechas para compensar ciclos de histéresis de formas variadas en otras aplicaciones, principalmente para control de actuadores [Al Janaideh *et al.* 2011]. Asimismo, dado el interés en los sensores inteligentes capaces de hacer un pre-procesado local, y en particular en las propuestas de electrónica de acondicionamiento basadas en FPGAs [Vidal-Verdú, Oballe-Peinado, *et al.* 2011; Oballe-Peinado *et al.* 2012], en esta tesis se hace una propuesta de algoritmo de corrección de histéresis que usa operaciones matemáticas sencillas, con el objetivo de que se puedan implementar en módulos que trabajen en paralelo en la FPGA local.

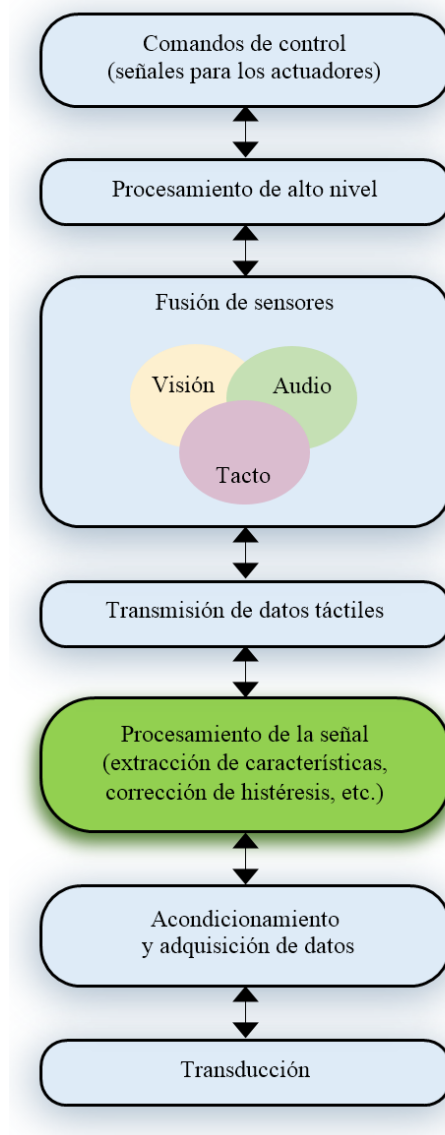


Figura 2. Diagrama funcional de un sistema táctil.

Por tanto, esta tesis se puede englobar en un esquema general de integración de un sensor táctil en actividades robóticas. En la Figura 2 se muestra un diagrama de bloques de un sistema táctil [Dahiya *et al.* 2013], en el que se destaca la etapa en la que se desarrolla el trabajo de esta tesis. En concreto, se centra en la tercera etapa, dedicada al procesamiento de las señales obtenidas directamente del transductor y de su electrónica de acondicionamiento, extrayendo las características fundamentales de la imagen táctil y compensando los errores y limitaciones propias del sensor para alcanzar un aprovechamiento efectivo de la información táctil en las aplicaciones de alto nivel.

A continuación se especifican los objetivos concretos de esta tesis y se describe la estructura de la memoria.

Objetivos

Los objetivos concretos de esta tesis que se desprenden de lo expuesto anteriormente son:

- Estudiar y analizar la influencia de los errores del sensor táctil sobre los parámetros de control obtenidos de las imágenes táctiles. La respuesta de la matriz de sensores ante el contacto con un objeto, determina una imagen táctil que puede ser reducida a una elipse cuyos parámetros se utilizan como información de control en tareas de manipulación robótica. Esta elipse, obtenida a partir de los momentos geométricos de la imagen táctil, muestra información sobre la localización de los contactos, la fuerza ejercida, la forma, el tamaño, y la orientación del objeto. En concreto se pretende evaluar la influencia de los errores y limitaciones del sensor táctil en los parámetros que definen esta elipse.
- Evaluar algoritmos de corrección o compensación de los errores, a partir de las propuestas desarrolladas para otros tipos de sensores o actuadores. Fundamentalmente, se han encontrado varios métodos de compensación de la histéresis observada en la respuesta de actuadores piezoeléctricos que pueden ser aplicados a los sensores táctiles. Estos métodos consiguen no sólo una compensación del error de histéresis, sino que también pueden eliminar la no linealidad de la respuesta de los dispositivos y equilibrar las salidas obtenidas por varios sensores de una matriz.

- Proponer nuevos algoritmos de corrección de errores específicos para los sensores táctiles. En concreto para ciclos de histéresis no simétricos y con una marcada no linealidad. Asimismo, las propuestas se orientan a la posibilidad de su implementación en la electrónica local, basada en una FPGA, del sensor táctil inteligente.

La consecución de estos objetivos debe constituir un aporte al desarrollo de algoritmos de extracción de parámetros de control en tareas de manipulación robótica. Mediante las propuestas de compensación de errores, se pretende conseguir que un sensor táctil de bajo coste pueda ser empleado en aplicaciones que exijan precisión en las medidas de la presión aplicada sobre ellos con la misma eficiencia que otros construidos con tecnologías más caras.

Estructura de la Tesis

El presente documento está dividido en 5 capítulos y las conclusiones cuyos contenidos se describen brevemente a continuación.

- En el primer capítulo se realiza una exposición sobre el entorno de investigaciones en el que se desarrolla esta tesis, mostrando la evolución histórica en el desarrollo de los sensores táctiles y de su integración en sistemas robóticos, así como los antecedentes relacionados con el desarrollo de algoritmos de corrección de errores en sensores y actuadores. Se definen y describen los errores y limitaciones a analizar: histéresis, no linealidad, deriva, dispersión y resolución espacial limitada. Finalmente, se expone el procedimiento general de corrección de histéresis de un sensor y los métodos de identificación de los parámetros de corrección utilizados.
- El segundo capítulo está dedicado a la descripción de los sensores táctiles utilizados en este estudio, mostrando su estructura y características fundamentales. También se explican las plataformas de medida empleadas para caracterizarlos y obtener así una descripción de los errores que presentan. Se detallan los componentes que las integran y las distintas pruebas desarrolladas. Por último, se incluye la caracterización de los sensores táctiles en estudio para cada uno de los errores y limitaciones planteados.

- En el capítulo tercero, se realiza un análisis de la influencia de los errores caracterizados en el capítulo anterior, sobre los parámetros de control que se utilizan habitualmente en tareas de manipulación robótica. Se analizan los resultados obtenidos y se alcanzan unas conclusiones a tener en cuenta en el desarrollo de aplicaciones que pretendan un uso efectivo de los sensores táctiles.
- En el cuarto capítulo se seleccionan y describen varios métodos que modelan la histéresis de algunos tipos de actuadores y que se utilizan para su compensación. Se identifican los parámetros de dichos modelos para ajustarlos a las características de la curva de histéresis del sensor táctil de bajo coste y se evalúan los resultados.
- El quinto capítulo se dedica a la propuesta de un nuevo algoritmo (ELAM) para obtener el modelo de la histéresis del sensor táctil de bajo coste que permita su compensación de una forma más precisa que la que se consigue con los otros métodos evaluados en el capítulo anterior. Se describen tres propuestas diferentes que permiten mejorar los resultados obtenidos con los otros métodos e ilustran la capacidad de adaptación del modelo a casos particulares. Se muestran los resultados obtenidos con los modelos ELAM y se comparan con los que se obtienen al aplicar los otros métodos. Se analizan dichos resultados y se destacan las virtudes y defectos del método aportado por esta tesis. Se muestran resultados con una matriz completa de tácteles y se demuestra la compensación de los errores de histéresis, no linealidad y dispersión.
- Finalmente se incluye una sección de Conclusiones en la que se resumen las aportaciones realizadas y las conclusiones alcanzadas en esta tesis. Se muestran las posibles líneas de futuros trabajos y se enumeran las publicaciones realizadas fruto del trabajo de esta tesis.

El texto incluye además una serie de anexos con información relevante y complementaria. En el Anexo I se describen las aplicaciones en Matlab desarrolladas para facilitar el trabajo con los sensores. En el Anexo II, se muestran algunos diagramas de flujo que ilustran el funcionamiento del algoritmo ELAM propuesto en esta tesis. Finalmente, en el Anexo III se muestran algunos resultados obtenidos en la caracterización de los sensores táctiles al estar en contacto con objetos de determinadas formas.

Capítulo 1. Antecedentes

1.1. Introducción

En este capítulo se introducen el contexto y los conceptos básicos relacionados con los trabajos realizados en esta tesis. Dado el interés creciente en investigación y aplicación en sensores táctiles, se han publicado recientemente numerosos artículos de revisión, como por ejemplo [Tiwana *et al.* 2012], donde se hace una revisión de las tecnologías de sensado táctil y su aplicación en ingeniería biomédica, [Yogeswaran *et al.* 2015], donde se realiza una revisión de materiales usados y avances en la electrónica para la realización de pieles para robots, o [Dahiya *et al.* 2013], donde se analizan los aspectos necesarios para una aplicación efectiva de la tecnología de sensado táctil. Otras revisiones de la tecnología recientes se pueden encontrar en [Dahiya *et al.* 2010; Kappasov *et al.* 2015; Yousef *et al.* 2011], en los dos últimos casos orientadas a la aplicación en manipulación con manos robóticas. Asimismo en [Silvera-Tawil *et al.* 2015; Yan *et al.* 2014] se pone de manifiesto la importancia de la tecnología de sensado táctil en la interacción hombre-robot, necesaria por ejemplo en un robot de asistencia.

Una revisión actual y profunda de los antecedentes y situación de la investigación y aplicación de los sensores táctiles se puede encontrar en los anteriores artículos, aquí se hará un repaso de los aspectos más fundamentales que permitan seguir la tesis y situarla en el contexto general y en el particular del desarrollo del trabajo de investigación que presenta. Para hacer una primera contextualización del trabajo, en la Figura 2 se muestra un diagrama de bloques de un sistema táctil [Dahiya *et al.* 2013]. El trabajo de investigación aquí mostrado se centra en la tercera etapa, es decir en algoritmos de procesado, y concretamente de corrección de errores.

Este capítulo se organiza en los siguientes apartados. En el apartado 1.2 se describe el contexto general y el más cercano al trabajo de esta tesis. En el apartado 1.3 se exponen los conceptos de los errores fundamentales que presentan los sensores táctiles, y en el apartado 1.4, se incluye el proceso a seguir para la compensación del error de no linealidad de histéresis y los métodos de optimización utilizados para obtener los parámetros de configuración de los distintos algoritmos estudiados y propuestos para realizar dicha compensación.

1.2. Antecedentes

El sentido del tacto es uno de los elementos fundamentales del sistema sensorial en los seres humanos y se encuentra localizado en la piel, el mayor órgano del cuerpo [Schiffman 2000]. Un ser humano puede vivir a pesar de ser ciego, sordo y carecer de los sentidos del gusto y el olfato, pero le es imposible sobrevivir sin las funciones que desempeña la piel [Montagu 2004]. A través de este sentido, es posible percibir cualidades de los objetos como la presión, dureza, textura, tamaño, aspereza o suavidad, forma, temperatura, etc. Es necesario para detectar el deslizamiento de un objeto, para rodarlo entre los dedos sin que se caiga y para desarrollar la conciencia del propio cuerpo definiendo nuestra individualidad [Dahiya et al. 2011]. La importancia y transcendencia de todas estas cualidades, hace de esta capacidad un aspecto muy importante a tener en cuenta por el campo de la robótica.

Desde la antigüedad, el hombre ha buscado desarrollar máquinas que imiten las habilidades humanas y que puedan sustituirlos en la realización de determinadas tareas. En 1495, ya Leonardo Da Vinci propuso el diseño del primer robot humanoide con su “Caballero Mecánico” [Taddei 2006]. La revolución industrial de los siglos XVIII y XIX impulsó el uso de maquinaria industrial en forma de dispositivos automáticos que ayudasen o sustituyeran al hombre en la realización de tareas pesadas y repetitivas. El concepto de robot fue introducido en 1920 por el dramaturgo checo Karel Capek [Wikipedia 2015b] en su obra “*Los Robots Universales de Rossum*”, mientras que fue el escritor de ciencia ficción Isaac Asimov [Wikipedia 2015a] quien en 1942 popularizó, a través de sus obras, el término robótica estableciendo “*Las Tres Leyes de Robótica*”. Las investigaciones en inteligencia artificial para emular el procesamiento de información

humana con computadores electrónicos, provocó el desarrollo de los primeros robots en los años 50. Del desarrollo de robots que operan en entornos estructurados y perfectamente definidos de una línea de producción industrial, actualmente, se ha evolucionado hacia los sistemas móviles autónomos e inteligentes capaces de desenvolverse por sí mismos en entornos desconocidos, complejos y parcialmente cambiantes sin necesidad de supervisión por seres humanos. Estos dispositivos dedicados a la rehabilitación y a la asistencia de personas, robots médicos, robots sociales, bio-robots o robots humanoides, deben interactuar con las personas de manera segura, sin causarles daño a ellas, a sí mismos o a los objetos con los que deben trabajar [Lumelsky 2005].

Para alcanzar esta autonomía y seguridad, los robots hoy en día están equipados con numerosos sensores que tratan de reproducir las capacidades de percepción de los seres humanos. El sentido del tacto es especialmente importante en aplicaciones robóticas que requieren de un contacto físico con objetos. Sin embargo, han sufrido un desarrollo bastante tardío con respecto a otras modalidades de percepción, el sentido de la vista, la audición, el olfato o incluso el gusto [Lee et al. 1999]. Hoy en día, los sensores táctiles juegan un papel fundamental en aplicaciones de manipulación robótica para detectar el contacto con objetos [Dahiya et al. 2013; Cannata et al. 2005; Schmitz et al. 2010], y mejoran el desarrollo de productos comerciales como las manos robóticas artificiales [Barrett Technology, Inc. 2015; SCHUNK 2015]. Se utilizan en la detección del deslizamiento [Maldonado-Lopez et al. 2009; Ito et al. 2012; Schürmann et al. 2012], en la determinación de los parámetros de control en tareas de agarre [Schill et al. 2012; Gorges et al. 2014; Li et al. 1989; Howe et al. 1990; Berger et al. 1991] y en la estimación de parámetros como la fuerza de contacto (normal o tangencial), la textura, la temperatura o la dureza [Drimus et al. 2011, 2012; Seminara et al. 2015; Schmidt et al. 2006; Shikida et al. 2003; Howe et al. 1993]. Por ejemplo, en [Schmid et al. 2008] se utiliza la información obtenida de una matriz de sensores táctiles para abrir una puerta con un robot humanoide; en [Wang et al. 2011] se utiliza la información obtenida con un sensor táctil para controlar un manipulador móvil; en [Namiki et al. 1996; Grzyb et al. 2009] se emplea la información táctil junto con la información visual para mejorar el agarre de objetos, y en [Bjorkman et al. 2013] se propone un método para determinar la forma de los objetos a partir de la información registrada con un sensor táctil.

Este desarrollo de sensores táctiles para la robótica comenzó en los años 70, aunque a un ritmo más lento en comparación con otras modalidades sensoriales como la visión [Cutkosky et al. 2007; Lee 2000]. En [Nicholls et al. 1989] sólo se recogen cinco publicaciones en esta década, pero es en los años 80, cuando aparecen una amplia variedad de dispositivos de detección táctil [Dahiya et al. 2013]. Se prestó especial atención al desarrollo de sensores táctiles y matrices de sensores táctiles destinados al reconocimiento de objetos [Cutkosky et al. 2007; Dario et al. 1985; Jayawant 1989; De Rossi et al. 2006; Howe 1994; Escaida Navarro et al. 2012; Liu et al. 2012; Göger et al. 2009; Gorges et al. 2010]. La aparición de manos robóticas con múltiples dedos integradas en brazos robóticos, incrementó el interés en la utilización de los sensores táctiles para mantener el control en tiempo real durante la realización de tareas de manipulación [Howe et al. 1993; Dario et al. 1985; Jacobsen et al. 1988; Howe 1994; Tegin et al. 2005; Kappassov et al. 2015; Yousef et al. 2011]. Posteriormente, aprovechando las investigaciones en nuevos diseños y materiales que permitieran la flexibilidad mecánica y la adaptabilidad de los sensores, surgió el interés en el desarrollo de pieles artificiales que cubrieran amplias zonas del robot [Um et al. 1998; Cheung et al. 1989, 1992 ; De Rossi et al. 2005]. Hoy en día, con la aparición de robots en continua interacción con humanos, se hace imprescindible proporcionar la capacidad de detección continua distribuida por todo el cuerpo, creando un sistema de piel artificial compuesta de grandes áreas o conjuntos de sensores táctiles [Mukai et al. 2008; Silvera-Tawil et al. 2015; Yan et al. 2014].

Los sensores táctiles son matrices compuestas por elementos individuales de detección denominados tácteles y pueden ser clasificados según el principio de transducción que emplean [Cutkosky et al. 2007; Dahiya et al. 2010]. Habitualmente, se componen de un transductor y de un circuito con electrónica de acondicionamiento para obtener una señal eléctrica correspondiente a la presión ejercida sobre él. Se han propuesto muchos enfoques diferentes para la fabricación de estos sensores. La mayoría de ellos se basan en principios piezo-resistivos o capacitivos, aunque se pueden encontrar otras implementaciones basadas en otros principios como el óptico o el piezoeléctrico.

Los sensores táctiles piezo-resistivos, basan su funcionamiento en la variación de la resistencia eléctrica en función de la fuerza de contacto con la superficie o de la localización de dicho contacto. Este tipo de sensores suelen ser sensibles y económicos,

pero consumen mucha energía. Para grandes áreas de detección son los más utilizados. Una aproximación común consiste en colocar una lámina de material piezo-resistivo encima de una matriz de electrodos construida sobre una placa de circuito impreso (PCB) [Castellanos-Ramos *et al.* 2010]. La electrónica para el acondicionamiento de la señal suele ser más simple y menos propensa a errores que la de otros tipos de sensores [Cannata *et al.* 2006; Shimojo *et al.* 2004; Vidal-Verdú, Oballe-Peinado, *et al.* 2011]. Este sistema de detección táctil ha sido utilizado en manos antropomórficas [Weiss *et al.* 2004; Kim *et al.* 2006; Göger *et al.* 2009; Weiss Robotics 2015]. La transducción piezo-resistiva es muy popular entre los sistemas micro-electromecánicos (MEMS) y los sensores táctiles basados en silicio [Beebe *et al.* 1995; Wolffenbuttel *et al.* 1991; Huang *et al.* 2010; Beccai *et al.* 2008]. Asimismo, dispositivos comerciales como las resistencias sensibles a la fuerza (FSR) de Interlink [Interlink Electronics 2015] han sido utilizados en sistemas táctiles experimentales y en robots [Liu *et al.* 1995; Vidal-Verdú, Barquero, *et al.* 2011]. La compañía Tekscan fabrica sensores piezo-resistivos muy finos impresos en sustratos plásticos con un principio de funcionamiento similar [Tekscan 2015d]. Sin embargo, estos sensores de Tekscan y los FSR están impresos en finas láminas flexibles pero no elásticas, por lo que su ajuste a áreas tridimensionales no es perfecto. En [Kane *et al.* 2000] se desarrolla un sensor táctil fino y flexible cubierto con una goma conductora capaz de cubrir y ajustarse a objetos en tres dimensiones que es probado en una mano robótica de cuatro dedos para agarrar diferentes objetos. Los sensores táctiles basados en principios piezo-resistivos suelen tener bajos precios, una buena sensibilidad, bajo ruido y una electrónica sencilla, pero presentan algunos inconvenientes como una respuesta no lineal y con bastante histéresis.

Los sensores capacitivos han sido utilizados ampliamente en robótica principalmente porque son dispositivos muy sensibles y que se pueden fabricar con un tamaño muy pequeño [Lee *et al.* 2006; Paschen *et al.* 1998]. Esto permite construir matrices de sensores con una gran densidad [Schmidt *et al.* 2006]. Además, otra de sus características es que su funcionamiento no se ve afectado por la temperatura [Maheshwari *et al.* 2008]. Estas características, les hacen muy populares entre los sensores basados en MEMS [De Souza *et al.* 1997; Bekhti *et al.* 2014] y se han desarrollado productos comerciales como en [PPS 2015]. Sin embargo, la presencia de una gran dispersión entre los táctiles y de una alta histéresis, son algunas de sus desventajas.

Por último, se pueden destacar otros sensores táctiles como los basados en principios ópticos [Hellard et al. 2006; Heo et al. 2006], que utilizan los cambios en la intensidad de la luz para medir la presión. Otras opciones, son los sensores basados en principios piezo-eléctricos [Dahiya et al. 2007], o los basados en ultrasonidos [Ando et al. 1995].

Independientemente del medio de transducción utilizado, un sensor táctil debe proporcionar suficiente información del contacto con los objetos como para que sea efectiva su utilización en un robot [Dahiya et al. 2013]. Sin embargo, estos sensores muestran algunos errores en su funcionamiento que afectan a la imagen táctil, como la histéresis, la no linealidad, la deriva y la dispersión [Dahiya et al. 2010; Sánchez-Durán, Hidalgo-López, et al. 2015]. El propio transductor táctil debe ser diseñado para minimizar estos errores [Castellanos-Ramos et al. 2015], y la electrónica de adquisición también permite reducir errores como la diafonía o *crossstalk* [D'Alessio 1999][Liu et al. 2010]. Aún así, se hace necesario compensar esos errores mediante software para obtener una respuesta del sensor de mayor precisión. Por lo general, los sensores táctiles pueden incluir una electrónica suficientemente potente, como para procesar la gran cantidad de datos de la matriz táctil en tiempo real [Oballe-Peinado et al. 2009; Vidal-Verdú, Oballe-Peinado, et al. 2011] y posibilitar la implementación de algoritmos de corrección de errores, convirtiéndolos en sensores táctiles inteligentes.

Para obtener los parámetros de estos algoritmos de corrección de errores se hace necesario implementar procedimientos de calibración. Esto se hace comúnmente, cuando los sensores se utilizan como instrumentos para caracterizar las interfaces de contacto, por lo que no son parte del sistema examinado. Para llevar a cabo tales calibraciones, un dispositivo neumático ejerce una presión uniforme sobre la superficie del sensor y se obtienen los parámetros de corrección [Papaiouannou et al. 2008; Misiewicz et al. 2015]. Sin embargo, estos procedimientos tienen algunas limitaciones. En primer lugar, el sensor se suele calibrar sobre una superficie plana, pero la interfaz de contacto puede tener una forma diferente, y las interferencias que produce la flexión del sensor, aparecen después de que se haya realizado la calibración cuando el sensor se coloca en el sistema bajo prueba. En segundo lugar, la calibración debe tener en cuenta que la respuesta puede variar en función del acoplamiento de los objetos en contacto [Hartmann et al. 2009]. En tercer lugar, la calibración se debe repetir a menudo, ya que la respuesta del sensor cambia significativamente con el tiempo y el entorno circundante, por lo que el procedimiento

anterior podría significar que el sensor necesitase ser desmontado y montado de nuevo en las manos robóticas, por ejemplo, cosa que podría ser engorrosa o incluso imposible.

En este contexto, cabe preguntarse cómo influyen los errores en términos prácticos en sistemas en los que la calibración es difícil, como pueden ser las manos artificiales. En este caso, para tareas de manipulación [Schmid *et al.* 2008], es común hacer un pre-procesado de la imagen y reducirla a un conjunto de parámetros obtenidos a partir de los momentos geométricos de la imagen táctil que muestran información sobre la localización de los contactos, la presión ejercida, la forma, el tamaño y la orientación del objeto [Chen *et al.* 1995; Zhang *et al.* 2000]. En concreto, el momento de orden cero proporciona la fuerza de contacto. Los momentos de primer orden, determinan la localización del centroide de la imagen táctil, lo que permite que se sepa si el contacto se hace con el centro de la yema del dedo o del agarre, aspecto que supone una información clave en el agarre del robot [Platt *et al.* 2010]. Por otro lado, los momentos de segundo orden proporcionan información acerca de las dimensiones y orientación del objeto y se utilizan en tareas de manipulación complejas como por ejemplo, la apertura de una puerta [Schmid *et al.* 2008]. A partir de estos momentos, se puede obtener una elipse cuya ubicación, forma, tamaño y orientación se asemeja a las propiedades del contacto relacionado. Esta información del contacto podría utilizarse también para otras tareas como el reconocimiento de objetos. Este reconocimiento se podría lograr con rapidez, si estuviera siendo visualizado, mediante el análisis y el procesado de una imagen con una resolución suficientemente alta, pero un enfoque más práctico consistiría en explorar los objetos a partir de los sucesivos contactos que se obtienen con una mano robótica [Bjorkman *et al.* 2013]. En esta tesis, además de a nivel de táctel, se evaluará el impacto de los errores y de los algoritmos de corrección propuestos en estos parámetros de alto nivel.

Para reducir algunos de los errores mencionados, en esta tesis se exploran algoritmos propuestos por otros autores para otros sensores o actuadores, y se hacen aportaciones originales. Prácticamente todos los sensores y actuadores basados en materiales inteligentes presentan no linealidades de histéresis complejas no deseadas cuando se accionan con amplitudes suficientemente altas. Para compensar estas no linealidades, por ejemplo, en actuadores piezoeléctricos, se han hecho muchos esfuerzos, que incluyen el control anticipativo como el enfoque más utilizado [Rakotondrabe *et al.* 2010; Leang

et al. 2009]. Básicamente, esta compensación consiste en desarrollar un modelo matemático de la histéresis del actuador que pueda ser invertido, y añadir este modelo invertido en cascada antes de la entrada al actuador para así conseguir una respuesta lineal. De la misma forma, se podría utilizar el modelo invertido de la no linealidad de histéresis de un sensor táctil para colocarlo detrás de la salida del sensor y así compensar su comportamiento de histéresis y obtener una respuesta lineal. En el caso de trabajar con una matriz de sensores, también se conseguiría reducir la dispersión entre los distintos tácteles, ya que automáticamente se equilibran las salidas de los diferentes tácteles. Por tanto, el principal objetivo de este método es eliminar errores en el sensor y obtener un modelo de la histéresis del sensor lo más preciso posible.

Los métodos de modelado de histéresis más comúnmente utilizados son los modelos fenomenológicos de histéresis frente a los modelos de histéresis basados en la física. Los modelos de histéresis basados en la física son más difíciles de implementar al requerir de ecuaciones diferenciales complejas que precisan de una elevada capacidad de cálculo y de tiempo de resolución [Smith 2005]. Sin embargo, los métodos fenomenológicos se construyen a partir de datos experimentales sin tener en cuenta las propiedades físicas de los actuadores o sensores [Mayergoyz 1991]. De entre este tipo de modelos, el método más conocido para modelar y compensar la histéresis en actuadores y sensores, es el modelo de Preisach [Visintin 1994; Visone 2008]. Este modelo es difícil de implementar debido a la gran cantidad de información (datos) que requiere para conseguir una buena aproximación. En contraste, el modelo de Prandtl-Ishlinskii (PI) [Brokate *et al.* 1996; Zareinejad *et al.* 2009] se ha convertido en un modelo más popular y muy efectivo para compensar las no linealidades de histéresis, ya que, aun siendo una subclase del modelo de Preisach, y a diferencia de este, su implementación es mucho más sencilla y su inversa puede ser calculada analíticamente. El modelo clásico de PI (CPI) aproxima la respuesta del sensor con una suma ponderada de operadores play de histéresis [Kuhnen *et al.* 2001], pero solo puede ser utilizado para modelar curvas de histéresis simétricas. Para poder modelar bucles de histéresis asimétricos, se han propuesto distintas alternativas como el modelo generalizado de Prandtl-Ishlinskii (GPI) [Al Janaideh *et al.* 2011], que se basa en la utilización de dos funciones envolventes diferentes para combinar con los operadores play. Como un caso especial de este modelo GPI, se propone un modelo de Prandtl-Ishlinskii que combina dos operadores play asimétricos diferentes para caracterizar

independientemente, la rama ascendente y la descendente de la histéresis de un actuador piezoeléctrico [Jiang *et al.* 2010]. Otra alternativa para el modelado y compensación de las no linealidades de histéresis asimétricas es descrita por un modelo modificado de Prandtl-Ishlinskii (MPI), que utiliza un operador play clásico como operador básico, mediante la sustitución de su función de entrada lineal por una función de entrada generalizada basada en un polinomio de tercer grado [Gu *et al.* 2014]. También es posible encontrar métodos de compensación de la histéresis basados en la utilización de dos funciones continuas dominantes, una ascendente y otra descendente, que convergen en un punto de retorno sin saturación de la memoria [Zhang *et al.* 2012; Lining *et al.* 2004]. Las funciones dominantes se construyen con polinomios de orden elevado (POLY), a partir de las cuales se genera todo el modelo de la histéresis de un actuador piezoeléctrico a través de una transformación no lineal del eje de coordenadas. Finalmente, en [Horii *et al.* 2014] se propone un método de compensación de la histéresis de un sensor táctil flexible utilizando un proceso Gaussiano e integrando la propiedad de Markov de la entrada del sensor.

También se pueden encontrar propuestas para reducir la deriva de los actuadores o sensores, como en [Mokaberi *et al.* 2008] y en [Jung *et al.* 2000] empleando funciones logarítmicas para modelar la deriva, o en [Rakotondrabe *et al.* 2010] usando modelos lineales dinámicos, o en [Croft *et al.* 2000] utilizando operadores similares a los operadores play usados para compensar la histéresis.

Las propuestas de algoritmos de corrección en esta tesis van dirigidas a la implementación como un pre-procesado en la electrónica local. Este pre-procesamiento podría incluso ser obligatorio para poder adaptarse al rendimiento limitado que presentan los buses de comunicaciones y a la capacidad de procesamiento en tiempo real de la unidad central de control. Por ejemplo, la comunicación en robots humanoides, se realiza generalmente a través de buses como el USB o Ethernet, mientras que otros buses que garantizan una cierta latencia, como el bus CAN, se dedican a tareas críticas en tiempo real, como las de manipulación [Kaynov 2010; Göger *et al.* 2006]. Para asegurar esta latencia, el bus CAN limita la longitud de los campos de datos de sus mensajes a 8 bytes. Teniendo en cuenta que una mano robótica con tres dedos equipados con el sistema de sensores táctiles DSA 9200 de Weiss Robótica (sensores 9205 y 9210) [SCHUNK 2015; Weiss Robotics 2015], tienen 462 tácteles, y que por lo general hay más dispositivos en el bus, se puede tardar

varios milisegundos en enviar toda la imagen táctil [Vidal-Verdú, Barquero, et al. 2011]. Por otra parte, estos datos en bruto, deben ser procesados por una unidad central que realiza el control y modifica en consecuencia, las fuerzas de agarre. La información registrada por la piel con respecto a la forma del área de contacto, a la fricción y a la dirección de las fuerzas en la yema del dedo, comienzan a influir en la fuerza ejercida por la punta del dedo tras 70 ms aproximadamente en la manipulación humana como se indica en [Flanagan et al. 2006]. Por lo tanto, teniendo en cuenta las otras fuentes de datos y las tareas de control que deben ser atendidas, se debe realizar el pre-procesamiento de los datos en bruto para reducir la información a comunicar y la carga de procesamiento en la unidad central. Dada la naturaleza matricial de los sensores táctiles, las FPGAs son dispositivos idóneos para hacer el pre-procesado local, gracias a su capacidad de procesado en paralelo que se explota en sensores similares como los de visión [Díaz et al. 2008].

1.3. Errores y Limitaciones de los Sensores Táctiles

A continuación, en este apartado se presentan y describen los principales errores y limitaciones que se encuentran en los sensores táctiles y que son objeto de estudio en esta tesis.

1.3.1. Histéresis

La histéresis se puede definir como la tendencia de un material a conservar una de sus propiedades en ausencia del estímulo que la ha generado. Este fenómeno, provoca que la salida de un sistema muestre una dependencia temporal no sólo con respecto a los estímulos de entrada actuales, sino también con respecto a los estímulos anteriores. La dependencia surge porque la historia afecta al valor de un estado interno. Para predecir sus futuras salidas, será necesario conocer el estado interno o su historia, es decir, el sistema guarda algún tipo de memoria de su comportamiento anterior. La histéresis está presente en muchas áreas de la ciencia. En física se puede observar en fenómenos como la plasticidad, el ferromagnetismo, la ferroelectricidad, la superconductividad o la fricción. Efectos de memoria de forma han sido observados y explotados en muchos materiales modernos. También puede encontrarse en campos como la ingeniería, la

mecánica, la química, la biología, la economía o incluso en psicología. Sin embargo, esta ubicuidad del fenómeno provoca que el significado del termino histéresis varíe de un área a otra, por lo que son necesarias definiciones más formales de este comportamiento en términos matemáticos.

En la década de los 70, un grupo de matemáticos rusos liderados por M. A. Krasnoselskii desarrollaron una teoría matemática más formal de los sistemas con histéresis que derivó en la monografía fundamental [Krasnosel'skii et al. 1989] donde se introduce el concepto de operador de histéresis. Es importante destacar que los efectos de memoria se pueden dividir en dos tipos: los que son dependientes de la velocidad con la que se aplican las entradas al sistema (*rate-dependent*) y los independientes de la velocidad (*rate-independent*). Un ejemplo simple de un efecto de memoria dependiente de la velocidad es el caso de un sistema cuya señal de entrada sinusoidal es transformada en otra señal de salida sinusoidal igual pero desfasada en el tiempo. Si la entrada se reduce a cero, la salida continúa respondiendo durante un tiempo finito. Esto constituye una memoria del pasado pero limitada, ya que desaparece a medida que la salida decae a cero. El retraso de fase depende de la frecuencia de la entrada, y tiende a cero a medida que disminuye la frecuencia. Sin embargo, los sistemas con histéresis independientes de la velocidad, presentan una memoria persistente del pasado que permanece cuando los transitorios desaparecen. Este concepto fue introducido por [Truesdell et al. 2004] y es considerada la principal característica de la histéresis, por lo que muchos autores identifican la histéresis únicamente con este tipo de efecto de memoria independiente de la velocidad [Visintin 1994].

Para entender este concepto de memoria independiente de la velocidad, en [Mayergoyz 1991] se propone la siguiente descripción de la histéresis escalar utilizando el lenguaje propio de teoría de control. Consideremos un transductor, que puede ser caracterizado por una entrada $x(t)$ y una salida $y(t)$. Este transductor se denomina un transductor con histéresis si su relación entrada-salida es una no linealidad con múltiples ramas en el que las transiciones de rama a rama se producen cuando la entrada alcanza sus valores extremos. Esta no linealidad con múltiples ramas se muestra en la Figura 1-1. El término independiente de la velocidad (*rate-independent*) significa que las ramas con tales no linealidades de histéresis, son determinadas solo por los antiguos valores extremos de la entrada, mientras que la velocidad de las variaciones de la entrada entre los puntos

extremos no tienen influencia en las ramas. Este concepto se ilustra en la Figura 1-2 y en la Figura 1-3. En la Figura 1-2 se muestran dos señales de entrada distintas $x_1(t)$ y $x_2(t)$ que tienen los mismos valores extremos pero que varían de forma diferente entre esos valores. Entonces, para un transductor con histéresis, esas dos entradas proporcionarán el mismo gráfico x - y , Figura 1-3, a condición de que el estado inicial del transductor sea el mismo para ambas entradas.

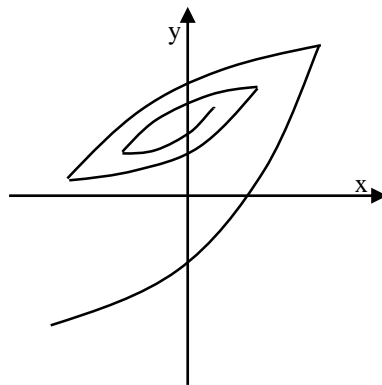


Figura 1-1. No linealidad de histéresis con múltiples ramas.

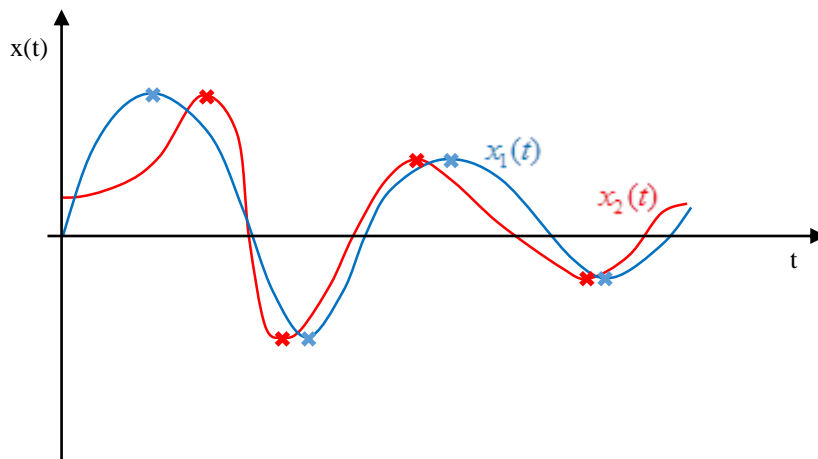


Figura 1-2. Señales de entrada diferentes con los mismos valores extremos.

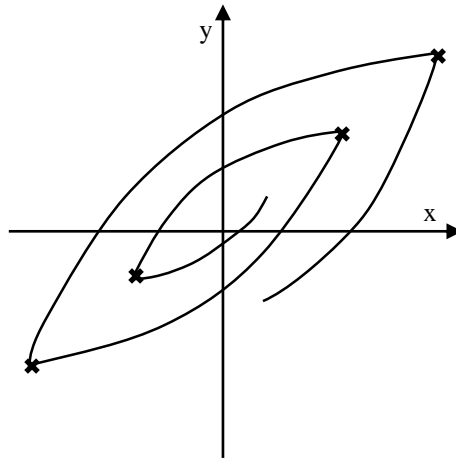


Figura 1-3. Misma salida de un transductor con histéresis para las entradas $x_1(t)$ y $x_2(t)$.

En la literatura existente, el fenómeno de histéresis está generalmente relacionado con la formación de bucles o ciclos de histéresis. Esto puede ser engañoso y crear la impresión de que un bucle es la esencia de la histéresis. En este sentido, la definición dada de histéresis hace hincapié en el hecho de que la ramificación dependiente de la historia constituye la esencia de histéresis. Así, un bucle es un caso particular de ramificación en el que la señal de entrada toma valores de ida y vuelta entre dos valores extremos consecutivos, mientras que la ramificación tiene lugar para variaciones arbitrarias de la entrada. Por tanto, una vez definida la histéresis como un efecto de memoria independiente de la velocidad, se puede definir formalmente el concepto de bucle de histéresis (*hysteresis loops*) [Visintin 1994]. Consideremos un sistema cuyo estado está caracterizado por dos variables escalares x e y , las cuales suponemos que dependen continuamente del tiempo, denotado por t . Las variables x e y jugarán el papel de variables independiente y dependiente, respectivamente. Observando la Figura 1-4 se asumen las siguientes reglas. Si x crece desde x_1 hasta x_2 , entonces el par (x, y) se mueve a lo largo de la curva ABC; por el contrario, si x decrece desde x_2 hasta x_1 , entonces (x, y) se mueve a lo largo del camino CDA. Por otra parte, si x invierte su movimiento cuando $x_1 < x(t) < x_2$, entonces (x, y) se mueve por el interior de la región S limitada por el bucle mayor ABCDA; este comportamiento debe ser descrito por el modelo específico. En los ejemplos típicos el par (x, y) puede alcanzar cualquier punto del interior de S mediante una elección adecuada de la función de entrada $x(t)$. En cualquier caso, asumimos que la evolución de y es determinada únicamente por la de x ; cosa que se precisará más tarde mediante la formulación del concepto de *operador de histéresis*. Hay que tener en cuenta

que siempre que $x_1 < x(t) < x_2$, $y(t)$ no está determinado por el valor de $x(t)$ en el mismo instante; sino que $y(t)$ depende de la evolución previa de x (efecto memoria), y posiblemente también del estado inicial del sistema. En muchos ejemplos, pero no en todos los casos, el estado del sistema en el instante t está completamente caracterizado por el par $(x(t), y(t))$. Además, como se ha indicado anteriormente, el camino del par $(x(t), y(t))$ es independiente de la velocidad de cambio de x , por lo que en cualquier instante t , $y(t)$ depende sólo del valor de $x: [0, t] \rightarrow \mathbb{R}$, y del orden en el que se han alcanzado los valores. Por lo que no hay dependencia de las derivadas de x , que incluso puede que no existan.

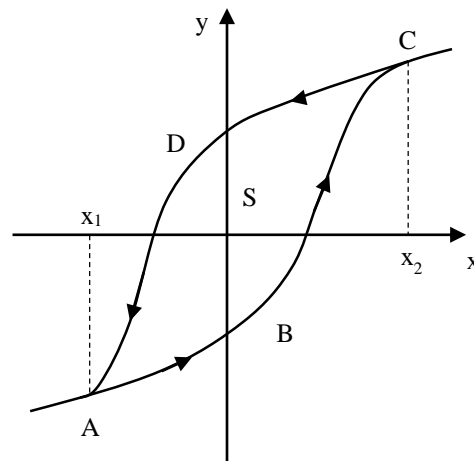


Figura 1-4. Esquema de un bucle de histéresis.

Por lo tanto, cuando hablemos de no linealidades de histéresis en esta tesis, nos estaremos refiriendo a bucles de histéresis con el comportamiento descrito anteriormente y basados en un efecto de memoria independiente de la velocidad. En el caso de sensores y actuadores que se basan en materiales inteligentes que presentan no linealidades de histéresis, se pueden producir oscilaciones en las respuestas de los sistemas de control en los que se integran limitando la precisión del transductor inteligente [Al Janaideh *et al.* 2009; Tao *et al.* 1995] y por tanto limitando las aplicaciones en los que se integren. Los ejemplos más conocidos de no linealidades complejas de histéresis en sistemas con materiales inteligentes son los sensores y actuadores basados en materiales piezoeléctricos, magnetostrictivos y de aleaciones con memoria de forma (shape memory

alloy, SMA) [Kuhnen et al. 2001; Banks et al. 2000]. La Figura 1-5, muestra un esquema general del error de histéresis presentado por un ciclo formado por una curva de carga en rojo, y una curva de descarga en azul.

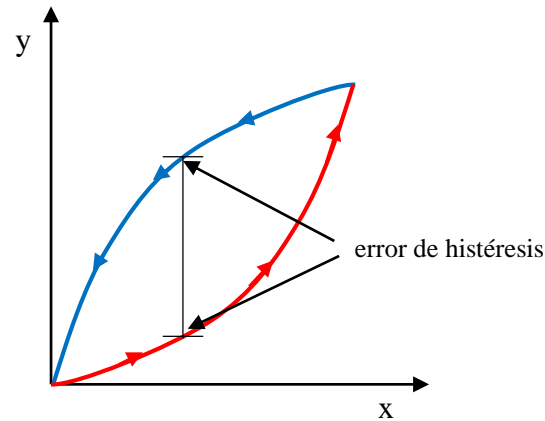


Figura 1-5. Esquema general de un bucle de histéresis de un sensor.

1.3.2. No Linealidad

La linealidad expresa el grado de coincidencia entre una curva de calibración y una línea recta determinada [Pallás Areny 2004]. Según cómo se elija esa línea recta, se puede hablar de linealidad independiente, linealidad ajustada al cero, linealidad terminal, linealidad a través de los extremos o linealidad teórica. Una respuesta lineal por parte de un sensor o actuador, permite predecir fácilmente el valor de salida del sensor ante un valor determinado del estímulo de entrada.

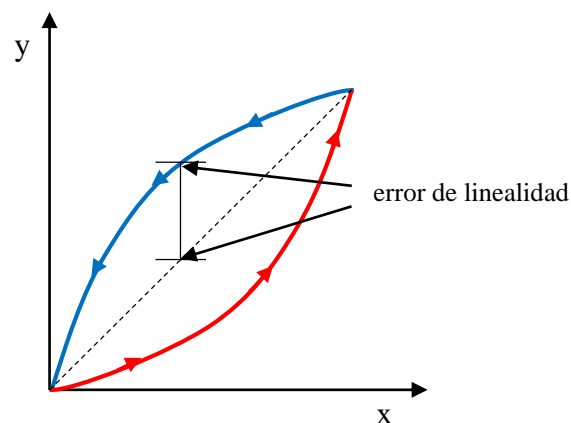


Figura 1-6. Esquema general del error de no linealidad.

Para estimar el error de linealidad de los sensores táctiles en estudio, se han tomado como curvas de calibración las curvas de histéresis medidas en el apartado anterior. La cuantificación de la no linealidad se realizará con respecto a la recta formada por los valores extremos de las curvas de histéresis medidas experimentalmente. La Figura 1-6, muestra el error de linealidad de una de las ramas del bucle de histéresis con respecto a la recta de los valores extremos que es tomada como referencia.

1.3.3. Dispersión

Los sensores táctiles están constituidos por una matriz de elementos de detección individuales denominados tácteles. Se puede observar, que ante la aplicación de una presión uniforme sobre toda la superficie del sensor, la respuesta de cada táctel es diferente y aparecen variaciones importantes en los valores de salida de cada uno de ellos. La dispersión debe ser corregida mediante un proceso de calibración que iguale la respuesta de todos los tácteles ante el mismo estímulo de entrada.

Ante el problema de la dispersión en la respuesta de cada uno de los tácteles de la matriz de un sensor táctil, es posible realizar un equilibrado del sensor que minimice el efecto de este error sobre las imágenes táctiles [Papaioannou et al. 2008]. Algunos fabricantes incluyen algoritmos dentro de sus aplicaciones de control que permiten realizar este proceso de equilibrado. Este es el caso del fabricante de sensores Tekscan, que ofrece esta posibilidad a través de su software I-Scan. El equilibrado es un proceso que elimina las variaciones en la salida obtenida entre varios tácteles ante la aplicación de una presión uniforme sobre todos ellos. Partiendo de la premisa de que la respuesta de todos los tácteles debería de ser la misma, el software de control calcula una matriz de equilibrado para cada nivel de presión uniforme diferente, que contiene un factor de corrección para cada uno de los tácteles [Tekscan 2006]. El número de matrices de equilibrado se escoge de forma que se cubra todo el rango de funcionamiento del sensor. Una vez calculadas las matrices de equilibrado, el sensor está preparado para corregir la salida natural con dispersión de los tácteles. Cada vez que se obtiene una nueva matriz de salida del sensor como respuesta a un estímulo determinado, se multiplica esa matriz por la matriz de equilibrado correspondiente a la presión aplicada para conseguir una respuesta uniforme de todos los tácteles del sensor. En el caso de detectarse una salida en bruto del sensor

que no corresponda exactamente a ninguna de las matrices de equilibrado, se realiza una interpolación lineal a tramos estableciendo como valores extremos dos matrices de equilibrado que acoten el valor medido. Este proceso se realiza táctel a táctel, ya que para cada uno de ellos, se tiene un factor de corrección individual. Para conseguir calcular las matrices de equilibrado, se aplican varias presiones uniformes con algún dispositivo calibrador. El software I-Scan permite calcular hasta diez matrices de equilibrado. Sin embargo, este equilibrado del sensor no es permanente y sólo muestra buenos resultados en caso de que no se manipule el sensor táctil como se ilustrará en el apartado 2.4.3.2. La Figura 1-7(a) muestra un ejemplo de la dispersión observada por la respuesta de un sensor sin equilibrar ante la aplicación de una presión uniforme, mientras que la Figura 1-7(b) muestra la misma respuesta del sensor cuando se aplica un algoritmo de equilibrado a todos sus tácteles.

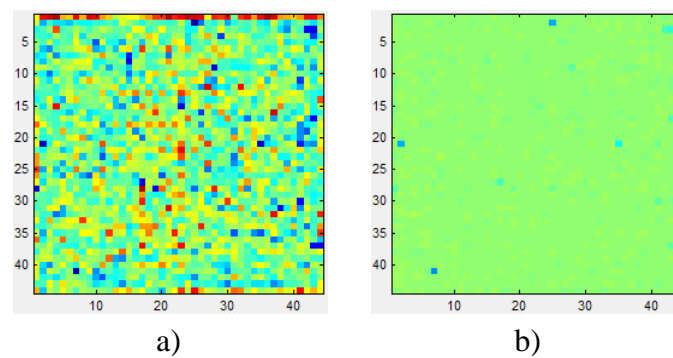


Figura 1-7. Ejemplo del equilibrado de la dispersión mostrada por un sensor táctil. a) Sensor sin equilibrar. b) Sensor equilibrado.

1.3.4. Deriva

Otra fuente común de errores en los sensores táctiles es la deriva, definida como la variación de la salida del sensor en el tiempo cuando la presión ejercida sobre el mismo no cambia. En la Figura 1-8, se muestra un esquema general del error de deriva presentado en la respuesta de un sensor táctil. Ante la aplicación y mantenimiento de una presión constante, la respuesta y del sensor, experimenta una variación de valor a lo largo del tiempo.

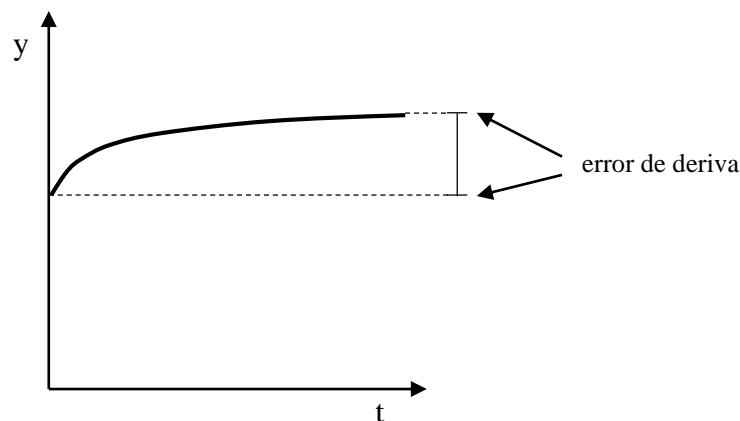


Figura 1-8. Esquema general de la deriva de un sensor táctil.

La deriva es otro tipo de error que se observa en la respuesta de algunos sensores y actuadores ante unos estímulos de entrada que permanecen fijos durante el tiempo. Como se estudiará en la sección 3.4, los sensores táctiles presentan este tipo de errores y ejercen cierta influencia sobre las imágenes táctiles que generan. Por tanto, se hace necesario compensar estos errores generados por la deriva sobre todo en sistemas que requieran determinar con precisión la presión ejercida sobre el sensor.

En la literatura al respecto, se han propuesto diferentes modelos para compensar la deriva. En [Mokaberi et al. 2008] y en [Jung et al. 2000] se utiliza una función logarítmica para construir un modelo del comportamiento de la deriva que se aplica a la respuesta del actuador. Otra opción se aplica en [Croft et al. 2000] mediante el modelado de la deriva por un operador lineal dinámico compuesto de varios operadores elementales de primer orden. Para eliminar la deriva, se invierte el modelo calculado de la misma y se aplica como un controlador *feed-forward*. En [Rakotondrabe et al. 2010] se propone un método sencillo para reducir el fenómeno de la deriva en un voladizo piezoeléctrico oscilante (*piezoelectric cantilever*). Se trata de crear un modelo lineal dinámico de la deriva que no necesita ser invertido.

Sin embargo, todos estos métodos asumen la caracterización de la deriva del sensor por una única curva. Esto se comprobará que para nuestro sensor táctil basado en una PCB no es así, y que la curva de deriva no sólo es diferente para distintos niveles de presión, sino que su forma también depende de si el escalón de presión previo es ascendente o descendente. Tal efecto, también es observado en otro tipo de sensores táctiles como en [Drimus et al. 2014]. Por tanto, es necesario desarrollar un algoritmo más complejo que

permita corregir la deriva de estos sensores. Esta tarea se prevé compleja por lo que ha sido propuesta como una línea futura a seguir por esta tesis.

1.3.5. Cambio de Resolución Espacial

La resolución espacial es la distancia entre los centros de dos tácteles y supone una medida del nivel de detalle que puede observarse en una imagen táctil. Representa el tamaño del mínimo objeto que puede ser detectado por el sensor. En muchas aplicaciones que utilizan sensores táctiles, la resolución del sensor es sacrificada debido al elevado coste que supone construir sensores con muchos tácteles. El error cometido por este motivo, es asumido en muchas tareas de manipulación robótica limitando la capacidad de determinadas aplicaciones. El error cometido por un cambio de resolución en un sensor táctil, puede influir en los parámetros de control obtenidos a partir de la imagen táctil, por lo que su valor puede ser tomado como referencia para el alcanzado por otros errores.

1.4. Proceso de Corrección de la Histéresis e Identificación de Parámetros

La respuesta no lineal y con histéresis que presentan los sensores táctiles, es el principal error que influye sobre los parámetros de control utilizados en tareas de manipulación robótica. Se hace necesario implementar algoritmos fenomenológicos que modelen los bucles de histéresis medidos experimentalmente y utilizar procedimientos que permitan aplicar los modelos inversos calculados a la salida del sensor para compensar las no linealidades de histéresis. Además, corrigiendo este error, se puede alcanzar un equilibrado de la respuesta de los sensores basados en matrices de tácteles que minimicen el error de dispersión.

La Figura 1-9 ilustra el procedimiento para compensar la histéresis seguido por los cuatro métodos evaluados y comparados en esta tesis. La presión ejercida sobre un táctel es identificada por $p(t)$ y su voltaje de salida por $v(t)$. La función $H(p(t))$ representa la salida con su correspondiente histéresis medida en el sensor. El objetivo es encontrar un modelo $H_m(p(t))$ que se ajuste a los datos experimentales $H(p(t))$ con la mayor precisión posible, con el menor coste computacional, y que pueda ser invertible para

obtener $H_m^{-1}(v(t))$. Una vez que se invierte dicho modelo, se podrá obtener $p_m(t)$ que idealmente debería ser igual a $p(t)$. Cada uno de los cuatro métodos a comparar, utilizan una expresión matemática diferente para obtener $H_m(p(t))$ y emplean un número determinado de parámetros que deberán ser identificados por algún método de minimización de errores.

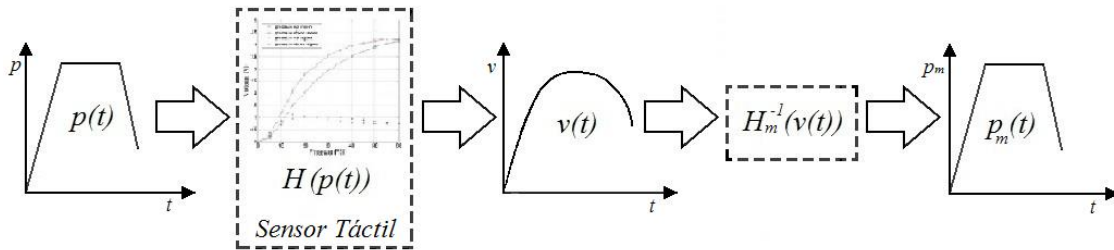


Figura 1-9. Esquema de compensación de Histéresis para un Sensor Táctil.

Se han desarrollado para este propósito varios algoritmos de identificación como el método de los mínimos cuadrados, los algoritmos genéticos o el método de optimización por nube de partículas [Liu et al. 2013][Chan et al. 2007][Yang et al. 2013]. En este trabajo, utilizamos fundamentalmente, algoritmos genéticos debido a que son métodos paralelos capaces de trabajar simultáneamente con varias soluciones lo que les permite explorar un mayor campo de soluciones. Esta característica, les permite descartar mínimos locales que no correspondan a una solución óptima. Son métodos que permiten trabajar con muchos parámetros simultáneamente, a los que se pueden poner restricciones mediante el empleo de penalizaciones. Además, son métodos sencillos de implementar y que utilizan operadores probabilísticos y no determinísticos [Goldberg 1989].

El proceso de identificación de parámetros permitirá seleccionar el conjunto de parámetros que configuren cada uno de los modelos de histéresis $H_m(p(t))$ a comparar en los capítulos 4 y 5. Al tratarse de modelos fenomenológicos, se utilizan un conjunto de M muestras de valores de salida medidos del sensor táctil $\{y(t_1), \dots, y(t_j), \dots, y(t_M)\}$, a partir de los cuales, el vector de parámetros X puede ser derivado computacionalmente minimizando la siguiente función de error

$$J(X) = \sum_{j=1}^M (y_m(t_j) - y(t_j))^2 \quad (1.1)$$

donde y_m son las muestras de salida de cada modelo de histéresis $H_m(p(t))$.

Los métodos que se tratan en el Capítulo 4 y el propuesto en el Capítulo 5, son utilizados para modelar las curvas de histéresis (ver Figura 2-19 y Figura 2-20) del sensor táctil basado en una PCB. Como paso previo a la construcción, validación y comparación de los modelos propuestos, es necesario llevar a cabo el proceso de identificación de los parámetros que permitan adaptar los modelos a los datos experimentales con la mayor precisión posible. Para realizar este proceso, se recogen en la literatura al respecto varios algoritmos de identificación o métodos de aproximación adecuados para este tipo de modelos como el método de los mínimos cuadrados [Al Janaideh et al. 2009], [Kuhnen et al. 2001] y [Liu et al. 2013], los algoritmos genéticos [Chan et al. 2007], las redes neuronales [Li et al. 2012] o el método de optimización por nube de partículas [Yang et al. 2013] y [Li et al. 2011]. En nuestro caso, se ha utilizado el método de mínimos cuadrados en los resultados de la sección 4.2.2, pero ante la complejidad mostrada por algunas de las curvas de histéresis de algunos táctiles del sensor basado en una PCB, fue necesario buscar otros métodos que garantizaran la obtención de una buena solución para los parámetros de los modelos. Se comprobó que para algunos casos, el método de los mínimos cuadrados quedaba atrapado en mínimos locales que no ofrecían una solución adecuada al problema. Por este motivo, para los resultados mostrados en los capítulos 4 y 5, se ha utilizado un método de aproximación basado en algoritmos genéticos, ya que son capaces de implementar procesos en paralelo para explorar simultáneamente un amplio rango de soluciones utilizando operadores probabilísticos [Goldberg 1989]. Esta característica les permite descartar mínimos locales que no corresponden a la solución óptima. En los siguientes apartados, se describen los dos métodos utilizados a lo largo de esta tesis para obtener los parámetros en cada una de las propuestas evaluadas. Los resultados de la aplicación de estos parámetros a los modelos propuestos para compensar la histéresis del sensor táctil, serán discutidos en los capítulos 4 y 5.

1.4.1. Mínimos Cuadrados

El método de los mínimos cuadrados es una técnica de optimización matemática dentro del campo del análisis numérico, en la que, a partir de un conjunto ordenado de puntos en el espacio, cuyas coordenadas están formadas por una variable independiente y otra

variable dependiente, trata de encontrar la función continua dentro de una familia de funciones, que mejor se aproxime a los datos o puntos, es decir, que mejor se ajuste, de acuerdo con el criterio de obtener el mínimo error cuadrático [Burden 2011]. En su forma más simple, este método intenta minimizar la suma de cuadrados de las diferencias en las ordenadas (llamadas residuos) entre los puntos generados por la función elegida y los correspondientes valores de los datos. Esta técnica se usa habitualmente en el ajuste de curvas y muchos problemas de optimización pueden expresarse también en forma de mínimos cuadrados.

A continuación, incluimos la descripción formal del método básico de optimización por mínimos cuadrados [Wikipedia 2015c; Burden 2011].

Dados un conjunto de n puntos $\{(x_k, y_k)\}_{k=1}^n$ en el plano real, y $\{f_j(x)\}_{j=1}^m$ una base de m funciones linealmente independientes en un espacio de funciones, se pretende encontrar una función $f(x)$ que sea combinación lineal de las funciones base, de modo que $f(x_k) \approx y_k$, es decir,

$$f(x) = \sum_{j=1}^m c_j \cdot f_j(x) \quad (1.2)$$

Por tanto, se trata de hallar los m coeficientes c_j que hagan que la función $f(x)$ proporcione la mejor aproximación para los puntos dados (x_k, y_k) . El criterio de "mejor aproximación" puede variar, pero en general se basa en aquél que minimice una "acumulación" del error individual (en cada punto) sobre el conjunto total. En primer lugar, el error (con signo positivo o negativo) de la función $f(x)$ en un solo punto, (x_k, y_k) , se define como:

$$e_k = y_k - f(x_k) \quad (1.3)$$

pero se intenta medir y minimizar el error en todo el conjunto de la aproximación, $\{(x_k, y_k)\}_{k=1}^n$. En matemáticas, existen diversas formas de definir el error, sobre todo cuando éste se refiere a un conjunto de puntos (y no sólo a uno), a una función, etc. Dicho error (el error "total" sobre el conjunto de puntos considerado) suele definirse con alguna de las siguientes fórmulas:

$$\text{Error máximo: } E_{\infty}(f) = \max(|e_k|)$$

$$\text{Error medio: } E_m(f) = \frac{\sum_{k=1}^n |e_k|}{n}$$

$$\text{Error cuadrático medio: } E_{cm}(f) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (e_k)^2}{n}}$$

La aproximación por mínimos cuadrados se basa en la minimización del error cuadrático medio. En concreto, en las primeras aproximaciones que se realizaron de los modelos de histéresis a los datos experimentales, se utilizó la función de mínimos cuadrados *lsqnonlin* de las herramientas de optimización de *Matlab*.

1.4.2. Algoritmos Genéticos

Los algoritmos genéticos son métodos adaptativos utilizados generalmente para resolver problemas de búsqueda y optimización de parámetros. Se basan en el proceso que siguen las poblaciones en la naturaleza, a lo largo de las generaciones, de selección natural y el principio de supervivencia del más fuerte. Este proceso lleva a la evolución biológica de los seres vivos que fue postulada por Darwin en su obra “*El origen de las Especies*” [Darwin 1859]. Los algoritmos genéticos, tratan de imitar este comportamiento para crear soluciones a los problemas del mundo real que van evolucionando hacia valores óptimos.

El desarrollo de los algoritmos genéticos se debe en gran medida a John Holland, que estableció unos principios básicos que fueron utilizados en posteriores desarrollos [Holland 1975]. Dichos principios están bien descritos por otros autores como Goldberg, del que se puede extraer una definición más formal, “los Algoritmos Genéticos son algoritmos de búsqueda basados en la mecánica de selección natural y de la genética natural. Combinan la supervivencia del más apto entre estructuras de secuencias con un intercambio de información estructurado, aunque aleatorizado, para construir así un algoritmo de búsqueda que tenga algo de las genialidades de las búsquedas humanas” [Goldberg 1989].

Estos algoritmos genéticos han sido utilizados en muy variadas ramas de la ciencia como herramientas para solucionar problemas de optimización. Por ejemplo, en [Chan et al. 2007] se utilizan para identificar los parámetros de un modelo de histéresis de un actuador

con una válvula electromecánica instalado en un sistema neumático. Otro ejemplo se expone en [Reddy *et al.* 2005], donde se emplean para la optimización de las estrategias de sistemas de propulsión eléctricos para vehículos espaciales. Finalmente, en [Marian *et al.* 2006] se utilizan los algoritmos genéticos para optimizar procesos de ensamblaje de componentes mecánicos.

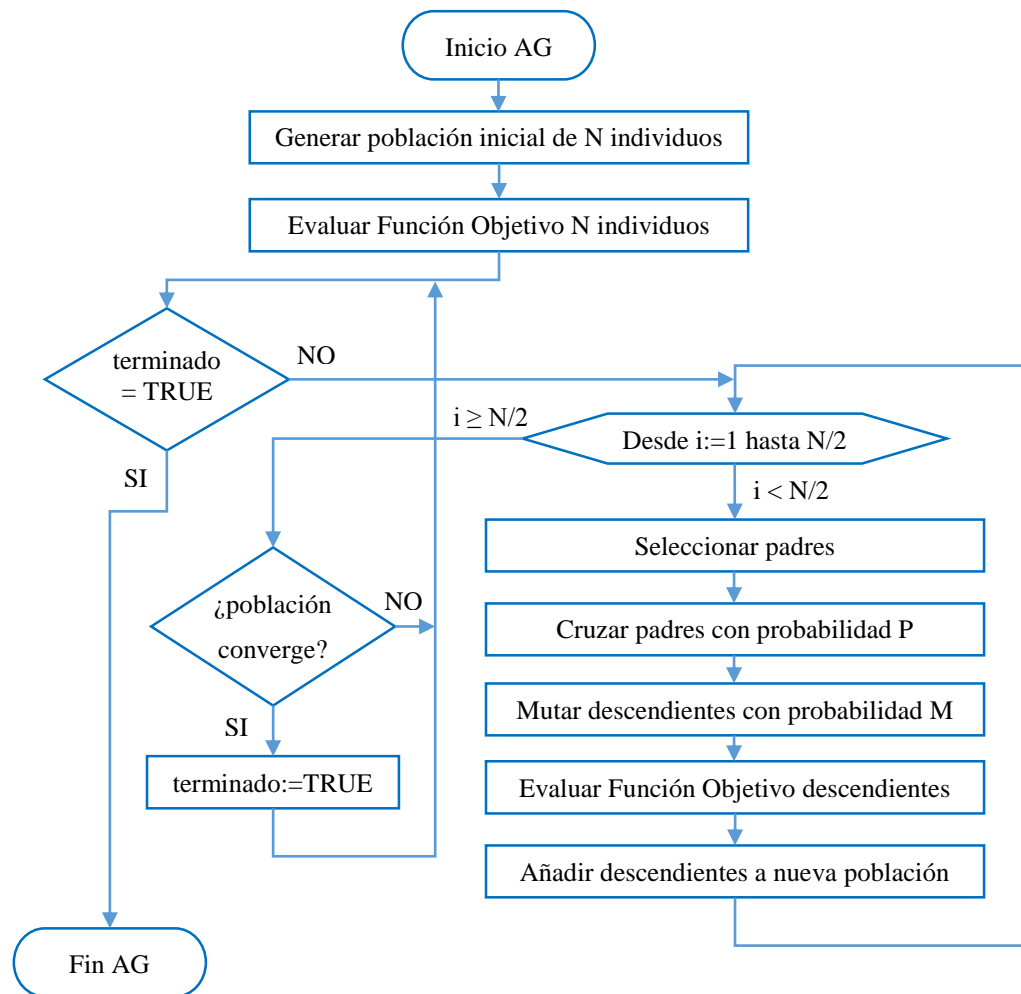


Figura 1-10. Diagrama de flujo de un algoritmo genético simple.

Básicamente, para alcanzar la solución a un problema, un algoritmo genético parte de un conjunto inicial de individuos, llamado población, generalmente generados aleatoriamente. Cada individuo, representa una posible solución al problema, y estará compuesto de un conjunto de valores de los parámetros que configuran dicha solución. Cada individuo, recibe una puntuación o valoración relacionada con la bondad de dicha solución y que se deduce de la evaluación de una función objetivo. Al igual que sucede en la naturaleza, los individuos con mayor puntuación, serán seleccionados para

reproducirse entre sí y producir una nueva generación de individuos que aúnen las características de sus padres. Esta operación se denomina cruce, y en ella se combina el material genético de los progenitores para producir nuevas soluciones. Los hijos generados podrán sufrir, con una cierta probabilidad, pequeños cambios o modificaciones en sus genes, produciéndose una mutación. De esta forma, se forma una nueva población de individuos o generación, que sustituye a la anterior y que presenta la propiedad de que contiene una mayor proporción de buenas características en comparación con la población anterior. En la Figura 1-10, se muestra el diagrama de flujo correspondiente al pseudocódigo de un algoritmo genético simple.

Así pues, los elementos principales que componen un algoritmo genético son:

- **Población:** Conjunto formado por varias soluciones al problema. Debe tener el tamaño idóneo ya que las poblaciones pequeñas pueden no cubrir adecuadamente el espacio de búsqueda, mientras que las poblaciones grandes pueden aumentar el coste computacional.
- **Función Objetivo:** Es la función que debe ser evaluada para establecer el grado de ajuste de un individuo al problema.
- **Selección:** Proceso por el que se asigna mayor probabilidad de reproducción a aquellos individuos con mejor adaptación al problema, es decir, a los considerados más aptos.
- **Cruce:** Proceso por el que los individuos seleccionados como padres serán recombinados para producir descendientes que compartirán parte de los genes de cada uno de los progenitores.
- **Mutación:** Proceso por el que algunos de los genes o características de un nuevo descendiente, pueden ser ligeramente modificados.
- **Reemplazo:** Proceso que permite producir una nueva población en la que los nuevos individuos sustituyen a otros de la población anterior si son más válidos.

Los algoritmos genéticos por tanto, son métodos de búsqueda estocásticos, es decir, que dos ejecuciones distintas pueden dar soluciones distintas. Son algoritmos de búsqueda múltiple con los que se pueden obtener varias soluciones como respuesta y son los algoritmos de optimización que más espacio de posibles soluciones son capaces de examinar. Su grado de convergencia a una solución es muy rápido al principio, y casi enseguida se satura. Es una búsqueda paramétrica robusta, es decir, que salvo que se

escojan los parámetros del algoritmo muy mal, siempre se consigue converger a una solución razonablemente buena. Y finalmente, como última característica, se puede destacar que son métodos paralelos, por lo que buscan en diferentes puntos del espacio de soluciones de forma paralela.

Por tanto, entre las principales ventajas de los algoritmos genéticos se pueden destacar las siguientes:

- Son intrínsecamente paralelos, por lo que pueden explorar el espacio de soluciones en varias direcciones y evaluar varias soluciones a la vez, descartando soluciones sub-óptimas y continuando con las mejores. Operan de forma simultánea con varias soluciones en lugar de en forma secuencial como las técnicas tradicionales.
- Cuando se usan en problemas de optimización (maximizar una función objetivo), es más difícil que queden atrapados en mínimos locales (falsas soluciones) que otras técnicas tradicionales.
- Pueden manipular muchos parámetros a la vez, por lo que son interesantes cuando se necesitan resolver varios objetivos.
- No necesitan conocimientos previos sobre el problema a resolver ya que realizan cambios aleatorios sobre las soluciones candidatas.
- Son muy fáciles de ejecutar en las modernas arquitecturas masivas en paralelo y utilizan operadores probabilísticos y no determinísticos como otras técnicas.

Pero también presentan algunas desventajas como:

- No garantizan que se converja a una solución óptima, aunque en la mayoría de situaciones se encontrará una buena solución.
- Pueden converger prematuramente, tardar mucho en converger o no converger nunca, dependiendo de cómo se configure el algoritmo genético en términos de tamaño de la población, número de generaciones, tipo de mutaciones, etc. Es decir, es necesario elegir con cierta corrección los parámetros de control del algoritmo.
- En algunos casos, el coste computacional puede ser elevado.

Por todas estas razones, se eligieron los algoritmos genéticos como el método de optimización de los parámetros de los métodos de compensación de la histéresis del

sensor táctil evaluados en este trabajo. Inicialmente se utilizó el método de los mínimos cuadrados, pero se comprobó que ante algunas curvas de histéresis, la búsqueda de la solución se quedaba atrapada en mínimos locales que estaban muy lejos de ser una solución con la que se pudiera trabajar en el proceso de compensación de la histéresis. Al trabajar con algoritmos genéticos sin embargo, siempre se ha logrado conseguir buenas aproximaciones incluso con curvas de histéresis con formas bastante complejas que presentan algunos tácteles del sensor.

Capítulo 2. Sensores Táctiles y Caracterización

2.1. Introducción

Un objetivo fundamental de esta tesis, consiste en la implementación de algoritmos de corrección de los errores que pueden presentar los sensores táctiles. Se pretende que mediante estos algoritmos se minimice la influencia que tienen estos errores sobre los parámetros de control que se utilizan en tareas de manipulación robótica. Para lograr este objetivo, el trabajo sigue una metodología basada inicialmente en la caracterización de un sensor táctil propenso a errores. Gracias a los datos recogidos de este sensor, se puede estudiar la influencia de esos errores sobre los parámetros que configuran la elipse que engloba a la imagen táctil capturada por una matriz de sensores. El sensor táctil a estudiar es un sensor basado en principios piezo-resistivos de bajo coste, por lo que la magnitud de los errores que presenta es mayor a la de otros comerciales cuyo precio es mucho más elevado. La elección de este sensor ha sido precisamente por este motivo, ya que permite analizar todos los posibles errores que pueden mostrar los sensores táctiles. Para comparar la magnitud de estos errores, se utiliza un sensor comercial de la empresa Tekscan que está prácticamente libre de alguna de estas interferencias.

Para poder caracterizar estos sensores, se han utilizado unas plataformas de medida que permiten la aplicación de presiones sobre la superficie del sensor táctil. Una primera plataforma, se utiliza para aplicar presiones uniformes sobre toda la superficie del sensor, de forma que es posible obtener la respuesta de todos los táctiles en el mismo instante de tiempo. Esto permitirá realizar el estudio de los errores de histéresis, no linealidad, deriva y dispersión. El problema principal que presenta esta plataforma es que presenta una ranura de escasos milímetros que no permite intercalar un objeto para poder obtener una imagen táctil cuando se ejerce una fuerza sobre él. Por este motivo, se utiliza una segunda

plataforma que permite controlar la fuerza aplicada al objeto, y así obtener una imagen táctil de la respuesta de la matriz de sensores. Esta imagen permite calcular la elipse que mejor se adapta a la figura obtenida. De ella, se obtiene información sobre la posición del objeto en la matriz, su orientación y la distribución de la fuerza ejercida en el objeto. Además de estas dos plataformas, se utilizó en trabajos preliminares una tercera plataforma manual para trabajar con los objetos.

Por estos motivos, en este capítulo se describen los dos sensores objeto de estudio y las tres plataformas que se han utilizado en las medidas. Se exponen las características de los sensores, la electrónica de adquisición de datos y el software necesario para su manejo. También se describe la estructura de las plataformas y su control para obtener unas medidas precisas que permitan caracterizar correctamente los sensores. Finalmente, se exponen los resultados de la caracterización de ambos sensores para los distintos errores y limitaciones que son estudiados en este trabajo: histéresis, no linealidad, dispersión, deriva y resolución espacial limitada.

2.2. Sensores Táctiles

En esta sección se describen los dos sensores táctiles utilizados para obtener la descripción de los errores a estudiar en esta tesis.

2.2.1. Sensor Táctil basado en una PCB

2.2.1.1. Descripción

Este primer sensor táctil se compone de un conjunto de electrodos y unas pistas de direccionamiento fabricados sobre una placa de circuito impreso flexible (PCB). Encima de estos electrodos, se coloca una fina película de polímero conductor como material piezo-resistivo. Concretamente, se deposita una tinta a base de agua conductora de este polímero, mediante una técnica de recubrimiento por centrifugado (“*spin-coating*”), sobre una hoja de plástico flexible de tereftalato de polietileno (PET), obteniéndose una película fina, conductora, lisa y homogénea [Castellanos-Ramos *et al.* 2010]. Esta técnica desarrollada por el centro tecnológico Cidetec [Cidetec 2015] permite fabricar sensores

táctiles ligeros a un precio barato, por lo que se consigue que esta tecnología pueda ser aplicada a superficies de gran área. Además, la flexibilidad tanto de la PCB como de la lámina conductora, facilita la incorporación de este sensor a superficies curvas. Se trata por tanto, de una técnica apropiada para el desarrollo de pieles artificiales acopladas a robots humanoides. La lámina presenta una rugosidad visible al microscopio con un tamaño medio de grano de 50 nm, que supone una cuestión clave ya que el principio de funcionamiento del sensor es la variación del área efectiva de contacto entre el polímero y los electrodos a nivel microscópico y el cambio de la conductancia como consecuencia de ello [Ochoteco *et al.* 2008]. De esta forma, se produce una variación de la resistencia entre los electrodos cuando se aplican diferentes presiones sobre el material. El sensor completo consta de una matriz de 16x16 tácteles y presenta una resolución espacial de 2.54 mm. Un táctel es una unidad de detección de presiones individual formada por dos electrodos y una lámina flexible. En la Figura 2-1, se muestra una imagen de la placa de circuito impreso flexible, junto con un detalle de la disposición de los electrodos. En la Figura 2-2 se puede observar un esquema con unas vistas de la sección y de la parte superior de un táctel. La Figura 2-3 muestra la flexibilidad del conjunto formado por la PCB y la lámina para adaptarse a superficies curvas.

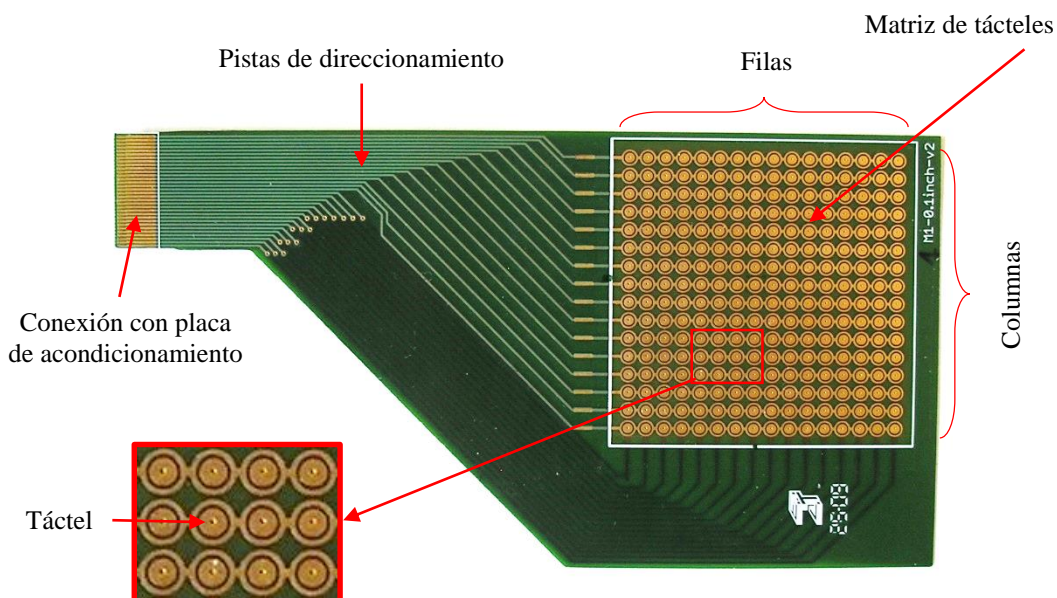


Figura 2-1. Sensor táctil basado en PCB.

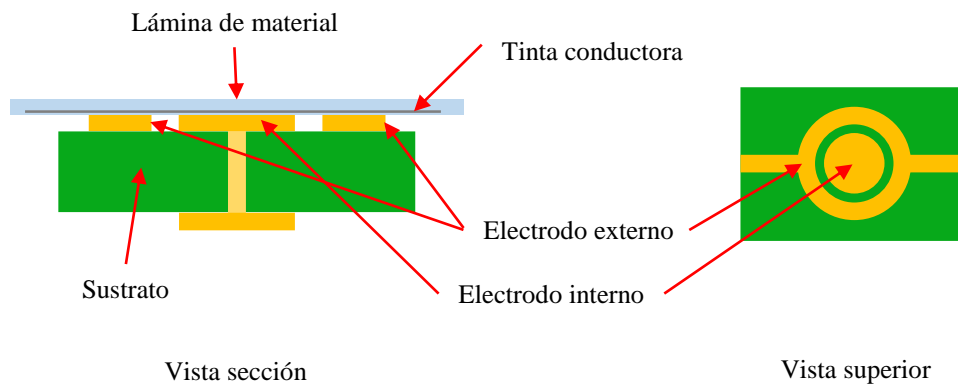


Figura 2-2. Vista de la sección y superior de un electrodo.

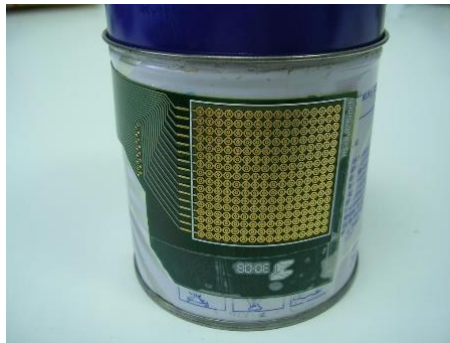


Figura 2-3. Detalle de la placa de circuito impreso flexible.

2.2.1.2. Electrónica de Acondicionamiento y de Adquisición

Las lecturas de todo el conjunto táctil se registran por medio de una electrónica de interfaz conocida diseñada para tener un buen funcionamiento estático, por lo que se utilizan unos relés electromecánicos para implementar los interruptores que seleccionan las filas a medida que se escanea la matriz de sensores. Una vez seleccionada cada fila, la lectura de la columna completa se realiza mediante el dispositivo de adquisición de datos de la Figura 2-6. En la Figura 2-4 se muestra un esquema del circuito de acondicionamiento. En la Figura 2-5 se observa la placa de acondicionamiento y su conexión con el sensor táctil.

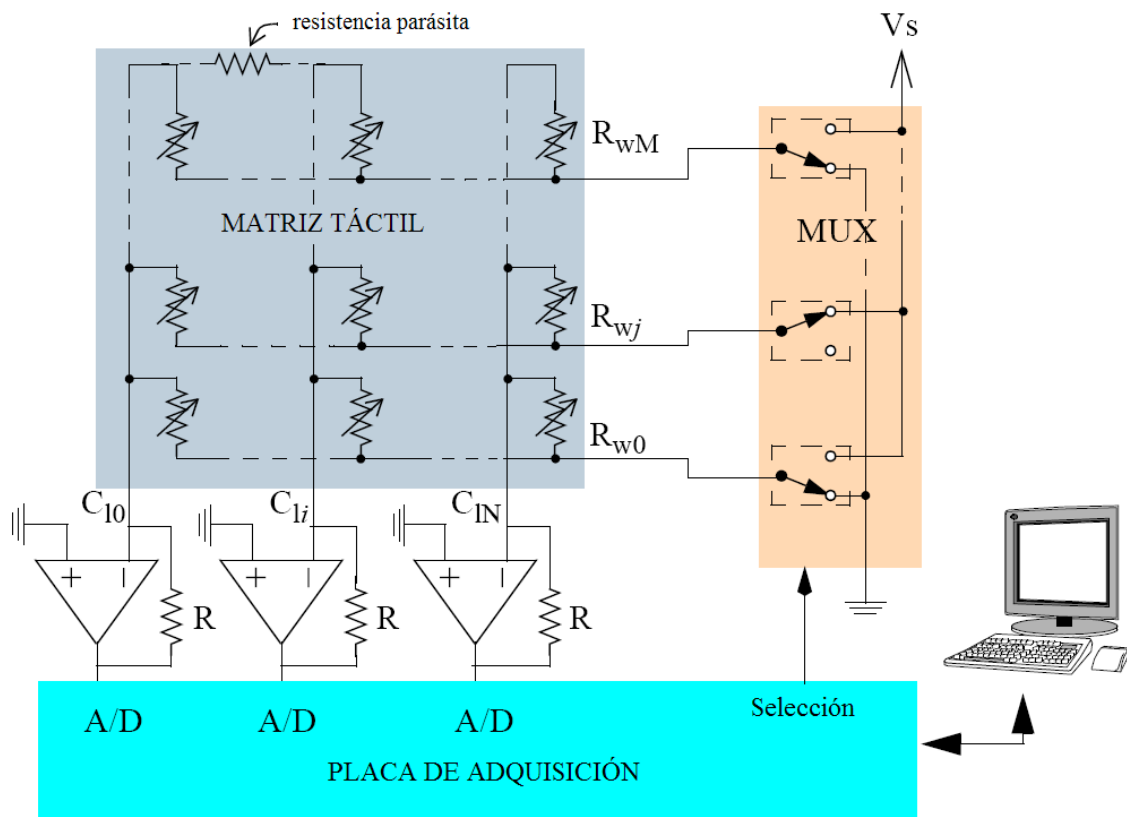


Figura 2-4. Electrónica de acondicionamiento del sensor táctil basado en una PCB.

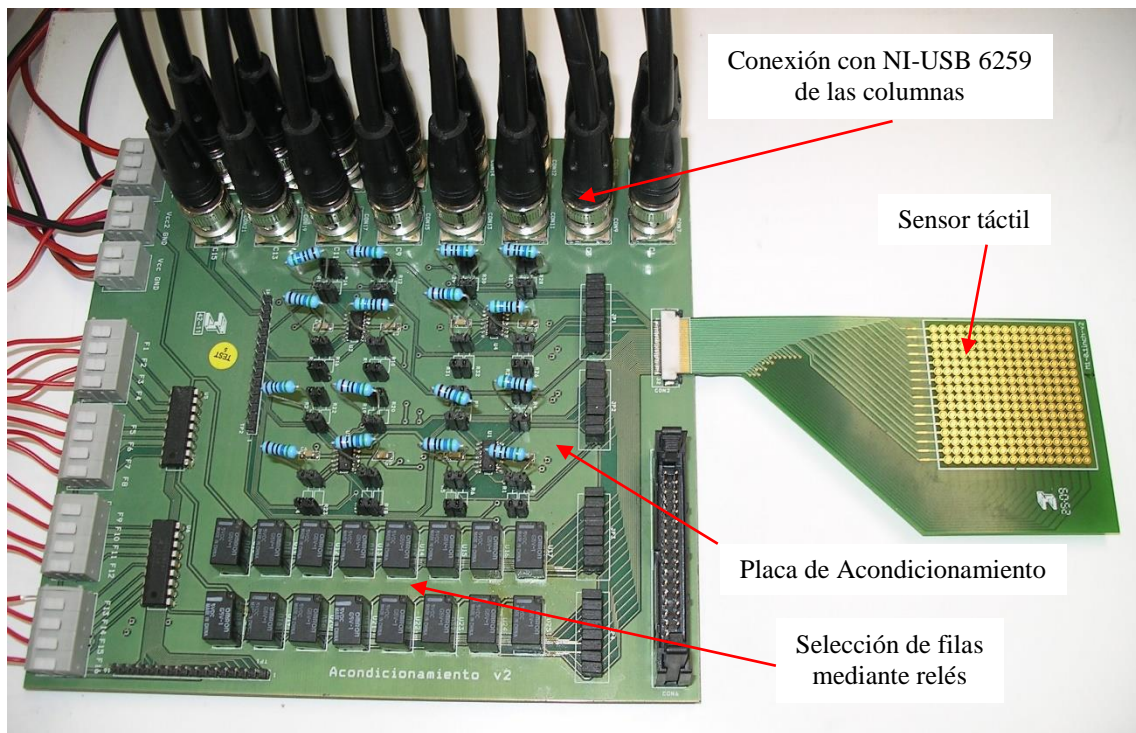


Figura 2-5. Placa de acondicionamiento y conexión con el sensor táctil.

La adquisición de datos se realiza con el dispositivo NI-USB 6259 de National Instruments [National Instruments 2015]. Se trata de un módulo de adquisición de datos DAQ de 16 bits y una velocidad de muestreo multicanal máxima de 1.00 MS/s. Se multiplexan sus dieciséis entradas analógicas para escanear 16x16 tácteles en nuestras plataformas de pruebas. La Figura 2-6 muestra el dispositivo.

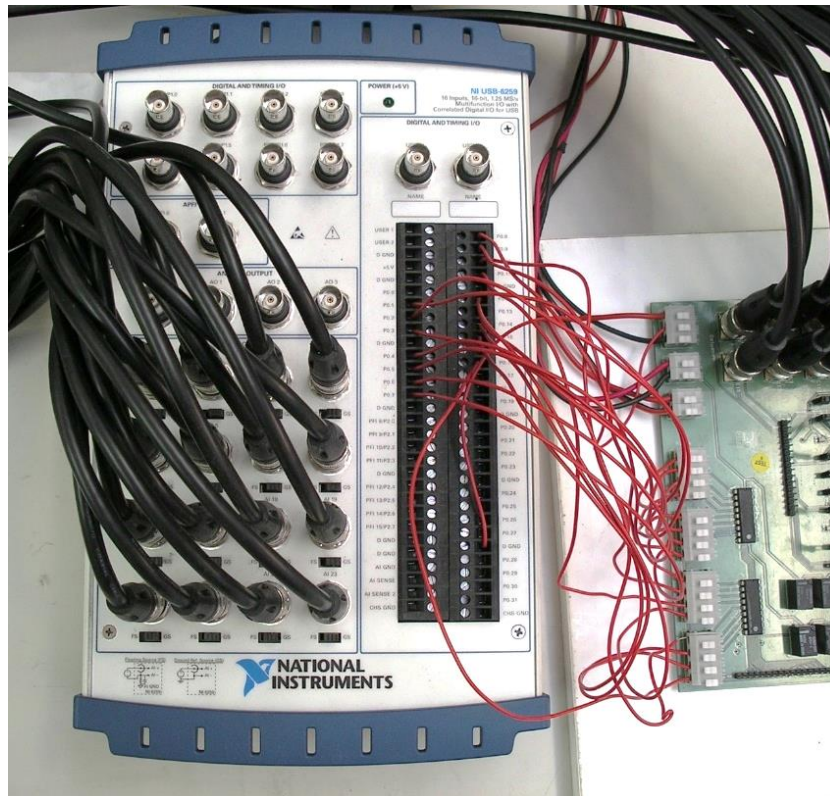


Figura 2-6. Sistema de Adquisición NI-USB 6259.

2.2.1.3. Software de Control

El sistema de adquisición de datos, se conecta mediante conexión USB a un computador en donde a través de una aplicación desarrollada en Labview v10, se realiza la lectura de la respuesta de todos los tácteles de la matriz ante un estímulo. Esta aplicación muestra la imagen táctil obtenida del sensor y almacena los datos en archivos para su posterior estudio.

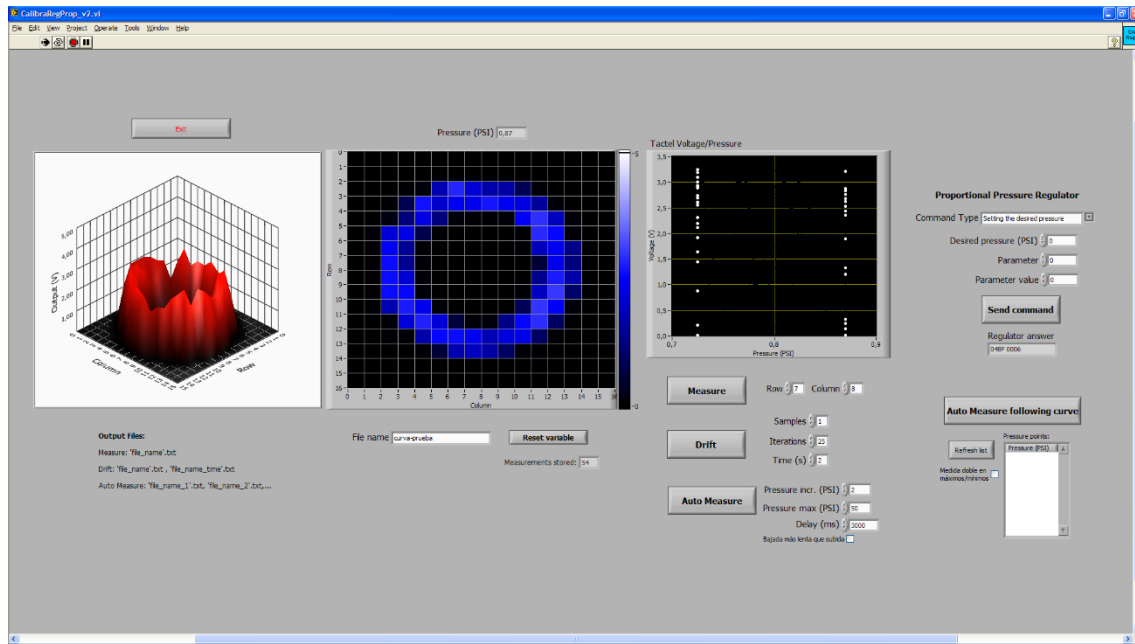


Figura 2-7. Ventana de captura de la imagen táctil del sensor en 2D y 3D.

2.2.2. Sensor de Tekscan

2.2.2.1. Descripción y Electrónica de Adquisición

El segundo sensor es también un sensor piezo-resistivo fabricado con tecnología de impresión en plástico de Tekscan. Concretamente se trata del modelo 5051/P1/3056T1/20 [Tekscan 2015d], y será utilizado para extraer medidas sobre los errores que presenta y poder comparar sus magnitudes con el sensor basado en una PCB. El sensor presenta una estructura simétrica en el eje z donde dos capas idénticas, con pistas conductoras junto con una tinta sensible sobre ellas, se disponen en columnas y filas, de forma que cada cruce de la matriz es un táctel. El sensor así construido queda como una lámina fina con un espesor de 0.102 mm. Consta de 44 filas y 44 columnas, por lo que dispone de 1936 tácteles con una resolución espacial de 1.27 mm. La Figura 2-8 muestra una imagen del sensor.

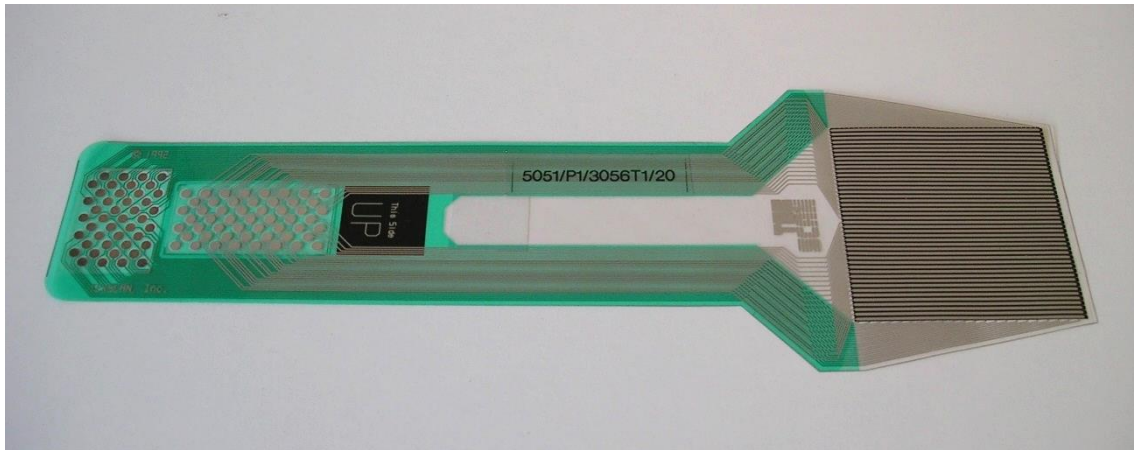


Figura 2-8. Sensor de Tekscan 5051/P1/3056T1/20.

El sistema de adquisición utilizado por Tekscan para este tipo de sensores, consiste en un interfaz que se conecta a un puerto USB del ordenador, y permite la lectura de los datos de la matriz de sensores. Este dispositivo permite una velocidad de barrido de 100 Hz y presenta una resolución digital de 8 bits [Tekscan 2015a].



Figura 2-9. Interfaz de adquisición de datos de Tekscan.

2.2.2.2. Software I-Scan

Tekscan proporciona la aplicación de ordenador I-Scan [Tekscan 2015b] para analizar las lecturas realizadas sobre la matriz de sensores. Esta aplicación permite mostrar los datos de distribución de la presión y las imágenes táctiles en tiempo real, y almacenarlos en múltiples formatos. Es posible capturar imágenes individuales así como grabar, reproducir y guardar películas o secuencias de imágenes táctiles. Es posible crear y personalizar los gráficos de los datos del vídeo correspondiente o exportarlo como un

archivo ASCII para su uso con otros programas. La Figura 2-10 muestra un ejemplo de esta aplicación.

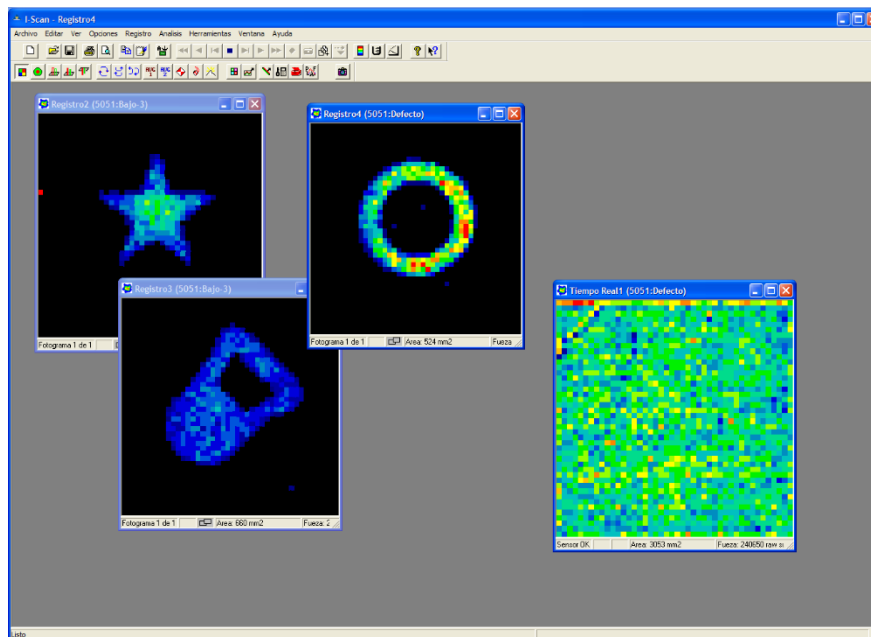


Figura 2-10. Aplicación I-Scan mostrando varias capturas del sensor.

La aplicación I-Scan permite equilibrar la respuesta de todos los tácteles del sensor utilizando para ello el dispositivo PB100E descrito en la sección 2.3.1.1.

2.3. Entorno Experimental

Para analizar el comportamiento de la salida del sensor táctil se utilizan dos plataformas de medición diferentes. Los sensores de estos equipos proporcionan las medidas de presión en unidades PSI, que equivalen a 6894.76 pascales en unidades del sistema internacional.

2.3.1. Plataforma Neumática de Tekscan

2.3.1.1. Descripción

La primera plataforma de medida se basa en el dispositivo de equilibrado/calibración comercial neumático de Tekscan, PB100E [Tekscan 2015c], para obtener lecturas de toda la matriz táctil sometida a una presión uniforme sobre toda su superficie. El sensor se

introduce por una ranura en un compartimento cuya pared inferior es rígida, mientras que la pared superior es flexible. Esta pared superior se compone de una cámara de aire formada por una membrana que cuando el dispositivo está presurizado, se llena de aire y ejerce una presión uniforme sobre el sensor. La Figura 2-11 muestra un esquema del dispositivo.

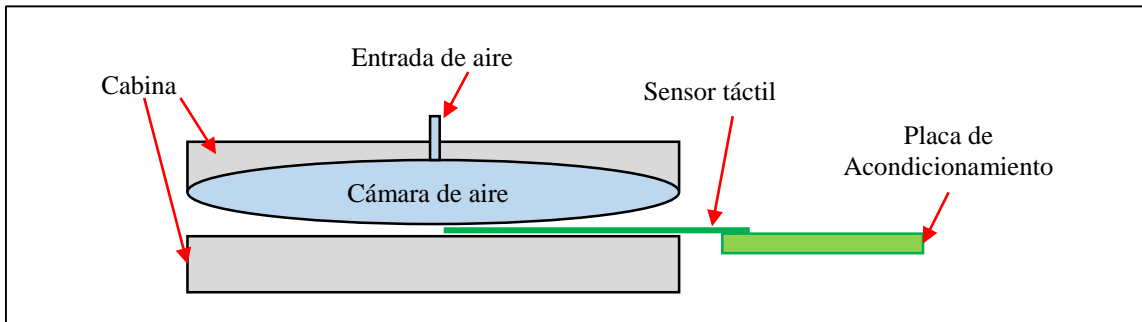


Figura 2-11. Esquema del dispositivo de equilibrado/calibración PB100E de Tekscan.

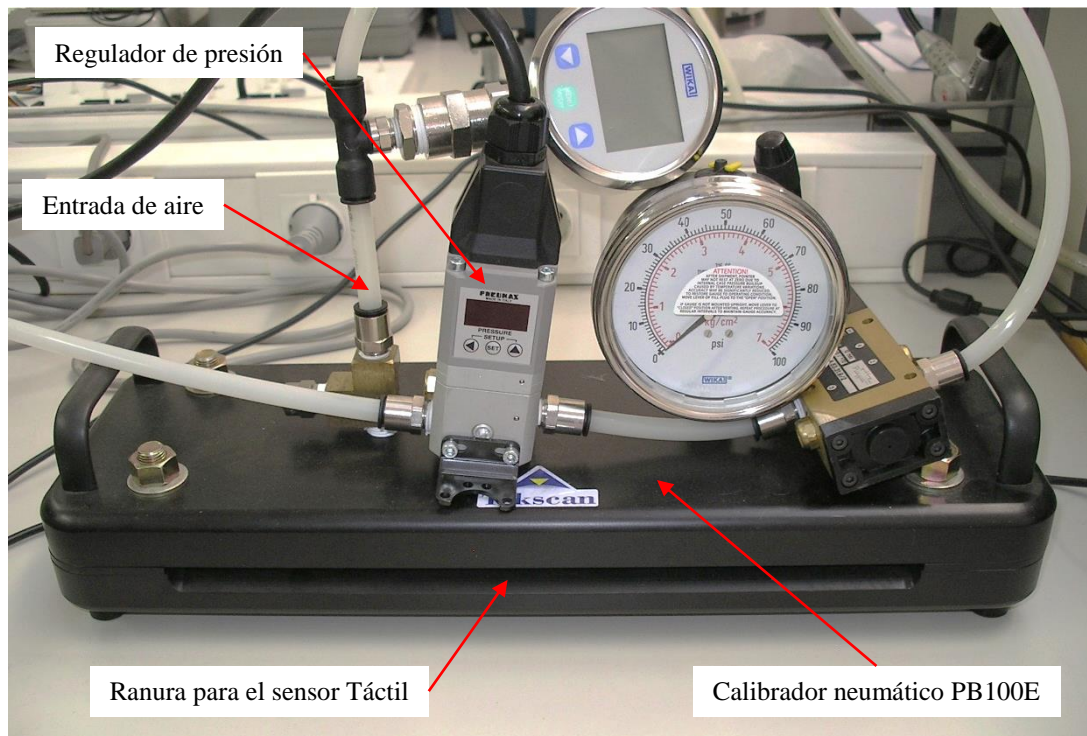


Figura 2-12. Plataforma neumática PB100E de Tekscan y regulador Pneumax 171E2N.TD0009.

A la entrada de aire de la cámara, se añade una electro-válvula Pneumax 171E2N.TD0009 [Pneumax 2015], que permite regular el flujo de aire proveniente de un compresor Herkules de 10 bares, para ajustar la presión deseada seleccionada en un software de

ordenador. El regulador presenta una conexión RS-232 para su control desde el computador. Su sensibilidad es de $< \pm 0.3\% F.S.$ En la Figura 2-12, se observa el dispositivo junto con el regulador y unos manómetros de control de la presión aplicada.

La Figura 2-13 muestra la disposición de todos los dispositivos para realizar la medida de la respuesta de un sensor táctil ante la aplicación de una presión uniforme.

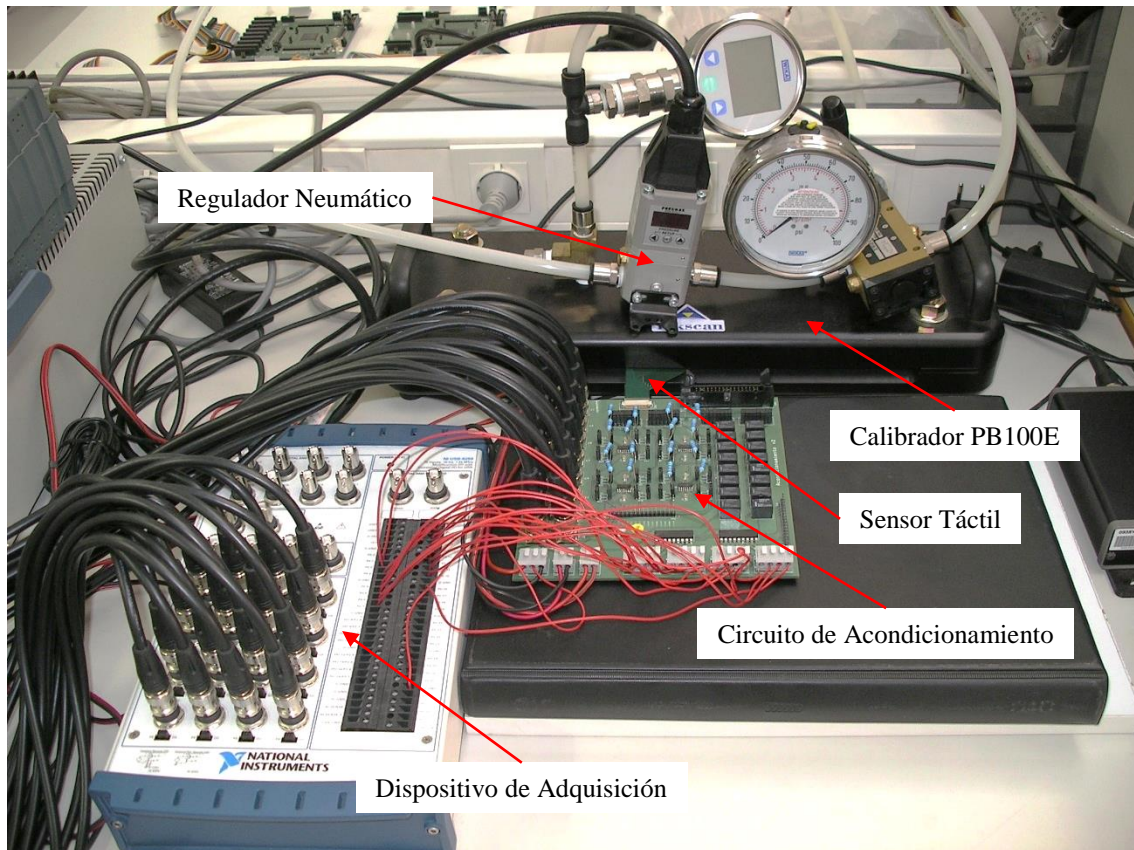


Figura 2-13. Sistema completo de medida de la respuesta de los sensores táctiles a presiones uniformes.

2.3.1.2. Software de Control

Un programa de ordenador, permite el control del dispositivo para realizar distintas pruebas sobre los sensores táctiles. En la Figura 2-14 se muestran los controles en la aplicación que permiten realizar las distintas medidas. Mediante el botón “Send Command” es posible aplicar la presión en unidades PSI seleccionada en el campo “Desired pressure (PSI)”. La aplicación envía el valor correspondiente al regulador para fijar la presión en el equilibrador PB100E de forma uniforme sobre todos los tácteles del

sensor táctil. Mediante el botón “*Measure*”, se realiza una lectura de la respuesta del sensor ante tal presión de entrada a través del sistema de adquisición de la Figura 2-6. Mediante el código programado en Labview, se controlan los relés de la placa de acondicionamiento de la Figura 2-5 para hacer una lectura de toda la matriz activando cada fila de forma secuencial. El resultado del voltaje de salida de cada táctel, es almacenado en un fichero con extensión .txt para su posterior tratamiento. El valor registrado por el regulador, es leído para incorporarlo al archivo con todas las medidas.

A través de esta aplicación, es posible realizar de forma automática las pruebas de medida de la deriva y de la histéresis que presenta el sensor y que son fundamentales para su caracterización. En la prueba de deriva, botón “*Drift*” en la Figura 2-14, se aplica la presión uniforme seleccionada en el campo “*Desired pressure (PSI)*” y se realizan el número de medidas indicadas en el campo “*Iterations*” con un intervalo entre muestras indicado por el campo “*Time (s)*”. De esta forma se puede estudiar el comportamiento de cada táctel del sensor en el tiempo ante la aplicación de una presión fija. Cuando el valor del voltaje de salida del sensor aumenta durante el tiempo de ejecución de esta prueba, se dice que el sensor presenta deriva en su salida.

Mediante la opción “*Auto Measure*”, es posible programar un ciclo de presiones de entrada a aplicar sobre el sensor para medir su comportamiento de histéresis. Al pulsar este botón, se aplica una secuencia sucesiva de presiones ascendentes empezando en 0 PSI y terminando en el valor indicado por el campo “*Pressure max (PSI)*”. El incremento de presión entre muestra y muestra estará indicado por el campo “*Pressure incr. (PSI)*”. Desde que se fija la nueva presión hasta que el sistema de adquisición toma la nueva muestra, transcurrirá el tiempo indicado en el campo “*Delay (ms)*”. Una vez alcanzada la máxima presión indicada en la prueba, se repite una secuencia descendente de presiones hasta volver al valor inicial de 0 PSI. De esta forma se realiza un ciclo completo de presiones de entrada y se puede leer el comportamiento de salida del sensor mediante el sistema de adquisición. El resultado permitirá cuantificar el error de histéresis que presente el sensor táctil.

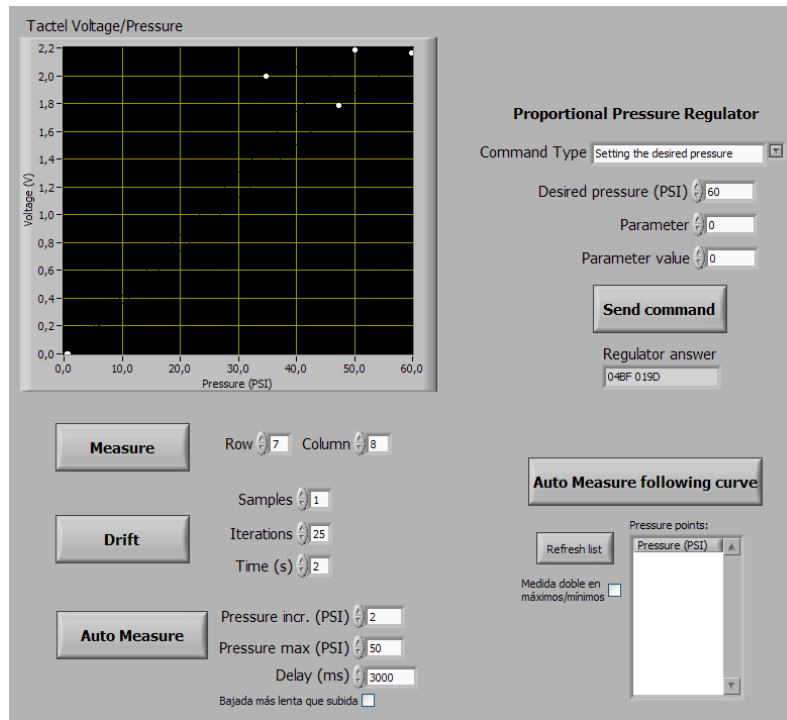


Figura 2-14. Ventana de control de la plataforma de medida neumática.

2.3.2. Plataforma Motorizada

2.3.2.1. Descripción

Para poder estudiar como influyen los errores que presentan los sensores táctiles en las imágenes utilizadas en manipulación de objetos, es necesario realizar medidas de estos errores cuando se aplica una fuerza sobre un objeto determinado sobre la superficie del sensor.

La segunda plataforma se utiliza para obtener la respuesta del sensor ante la presión ejercida por un objeto con forma conocida sobre la superficie del sensor. Para asegurar un buen contacto entre la superficie del objeto y el sensor táctil, se añade una pieza de tela encima de la lámina de material piezo-resistivo. Los objetos utilizados son descritos en la sección 3.2.1. Debido a que estos objetos tienen un grosor que impide introducirlos en la ranura del dispositivo PB100E de la primera plataforma, para poder aplicar una fuerza sobre ellos, se utiliza una plataforma motorizada con un actuador lineal T-NA08A50 [Zaber T-NA08A50 2015] y dos actuadores T-LA60A [Zaber T-LA60A 2015] de Zaber Technologies (ver Figura 2-15). El actuador T-NA08A50 permite ejercer una

fuerza en el eje z, mientras que los actuadores T-LA60A permiten el desplazamiento de una superficie de soporte para el sensor táctil a lo largo de los ejes x e y. Se añade un sensor Nano17 de ATI Industrial Automation [ATI Industrial Automation 2015] en la punta del motor del eje vertical para registrar la fuerza real ejercida sobre los objetos y luego sobre el sensor. El actuador vertical presenta un recorrido máximo de 50.8 mm, su velocidad máxima de desplazamiento es de 8 mm/s y la fuerza máxima recomendada por el fabricante que puede ejercer es de 50 N. Todos los elementos se conectan a un computador mediante un puerto RS-232.

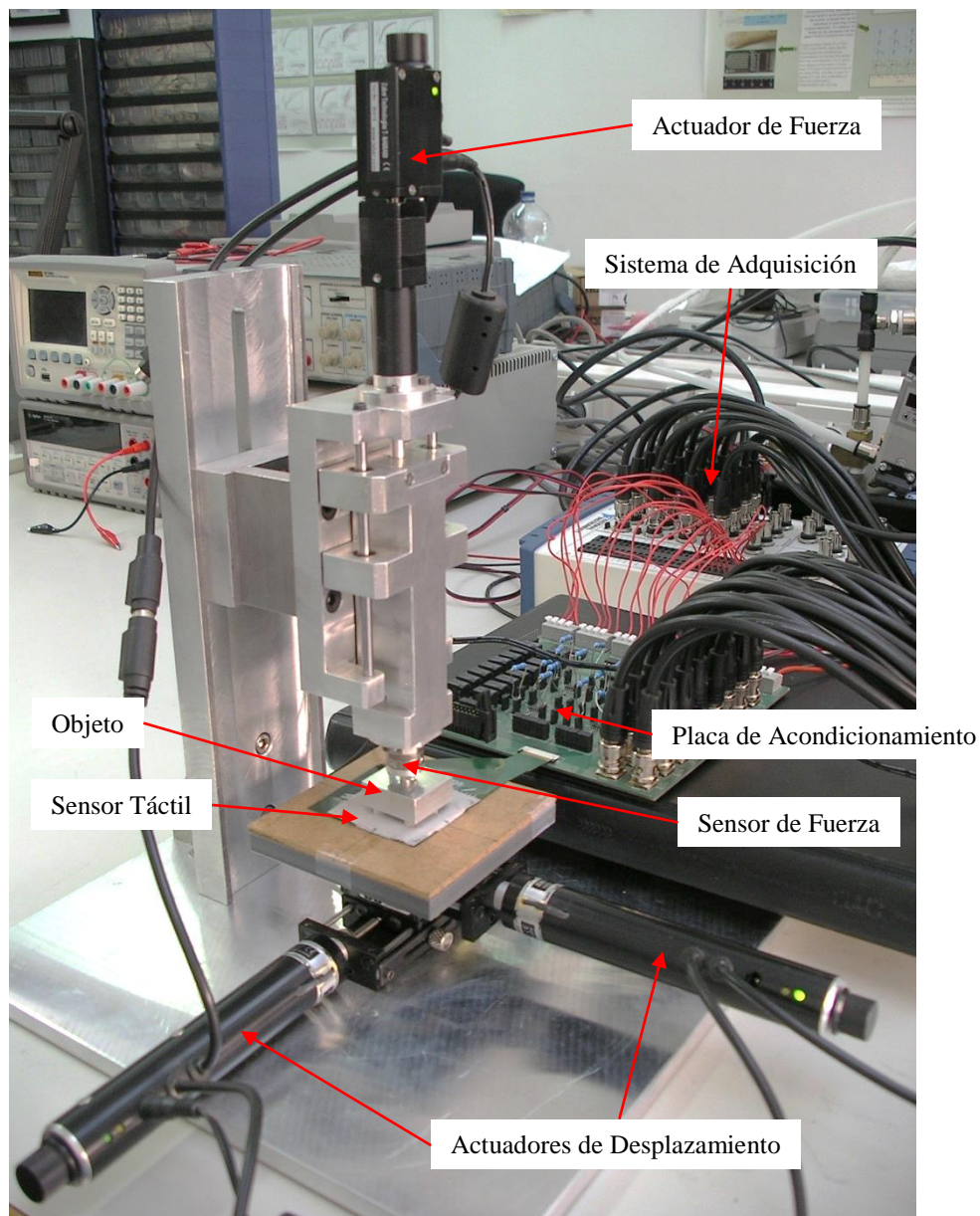


Figura 2-15. Plataforma motorizada.

2.3.2.2. Software de Control

La plataforma es controlada desde una aplicación desarrollada en Labview. La Figura 2-16 muestra la ventana de control de esta plataforma motorizada. La aplicación permite controlar la posición de la superficie de soporte mediante los controles de la sección “Actuators control / Move absolute” que actúan sobre la posición de los actuadores de los ejes x e y. Además, se puede controlar la posición del actuador vertical mediante el campo “Z-actuator final position”. A continuación, se puede realizar una lectura de la fuerza ejercida, gracias al sensor Nano17, y de la salida del sensor táctil a través del botón “Measure”. De esta forma se obtiene la imagen táctil generada por el objeto en el sensor táctil. La fuerza aplicada se muestra en la sección “Force (N)”, donde es posible detectar no sólo la fuerza normal aplicada, sino también las fuerzas tangenciales.

Al igual que en la plataforma neumática, desde esta aplicación es posible controlar las pruebas que permiten caracterizar los errores de deriva e histéresis del sensor táctil. Una vez posicionado el actuador vertical y ejerciendo una fuerza sobre un objeto, es posible realizar una medida de la deriva del sensor ante la imagen táctil generada por el objeto. El número de medidas a tomar durante la prueba se especifica en el campo “Iterations”, mientras que el intervalo de tiempo a transcurrir entre muestra y muestra, está especificado en el campo “Time (s)”. El botón “Drift” permite realizar esta prueba.

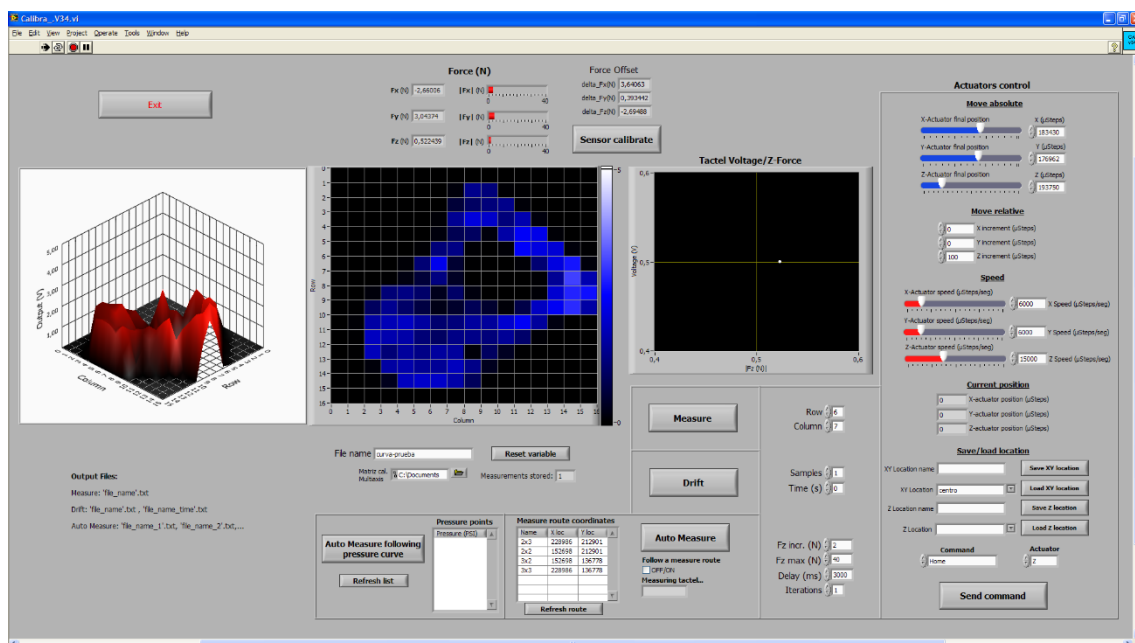


Figura 2-16. Ventana de control de la plataforma motorizada.

La prueba de histéresis, se realiza mediante el botón “*Auto Measure*”. Se realizará un ciclo de presiones ascendentes y descendentes con los valores extremos de 0 N y un valor máximo especificado en el campo “*Fz max. (N)*”. El incremento de fuerzas vendrá indicado por el campo “*Fz incr. (N)*” y el tiempo desde que se fija la fuerza hasta que se toma la medida por el sistema de adquisición, estará indicado en el campo “*Delay (ms)*”. De esta forma es posible establecer cual es la curva de histéresis del sensor para la imagen táctil generada por un objeto.

2.3.3. Plataforma Manual Prensa/Balanza

2.3.3.1. Descripción

Esta tercera plataforma se desarrolló antes de la construcción de la plataforma motorizada para caracterizar el comportamiento de los sensores táctiles ante la presencia de un objeto sobre su superficie. Algunos de los resultados mostrados en el Anexo III fueron realizados con este entorno de medida. Con ella se desarrollaron trabajos previos de caracterización y permitió establecer un punto de partida para valorar la influencia de los errores de deriva y de histéresis sobre las imágenes táctiles y como consecuencia, sobre los parámetros que se utilizan en el control de tareas de manipulación robótica [*Sanchez-Duran et al. 2010*]. A pesar de la validez de los resultados, se estimó que la plataforma podía introducir determinados errores que podrían ser solucionados con una nueva plataforma que permitiera automatizar las pruebas y conseguir mayor precisión en los resultados. Los defectos detectados, permitieron desarrollar adecuadamente la segunda plataforma.

Este sistema se basa en una prensa manual y una balanza sobre la que se sitúa el sensor táctil y el objeto a presionar sobre él. La prensa permite aplicar una fuerza sobre el objeto y registrar la imagen táctil generada por el sensor mediante el sistema de adquisición. La balanza ofrece la medida de la fuerza aplicada y hace posible su registro. En la Figura 2-17, se muestra el conjunto.

Para caracterizar la histéresis, se aplicó una secuencia de fuerzas ascendente y después descendente, hasta conseguir completar un ciclo. El control de la fuerza es manual, por lo se detectaron varios problemas que podrían influir en las medidas aunque no las invalidaban en su totalidad. En primer lugar, no era posible fijar una presión exactamente

igual en la secuencia ascendente y en la secuencia descendente de presiones. En segundo lugar, la gran sección de la rosca de la manivela de la prensa, provocaba que la fuerza no fuera lo suficientemente estable durante mucho tiempo. Finalmente, se observó que la fuerza aplicada por la superficie de la prensa sobre el objeto, no era perfectamente ortogonal, por lo que la imagen táctil obtenida podía no ser exacta.

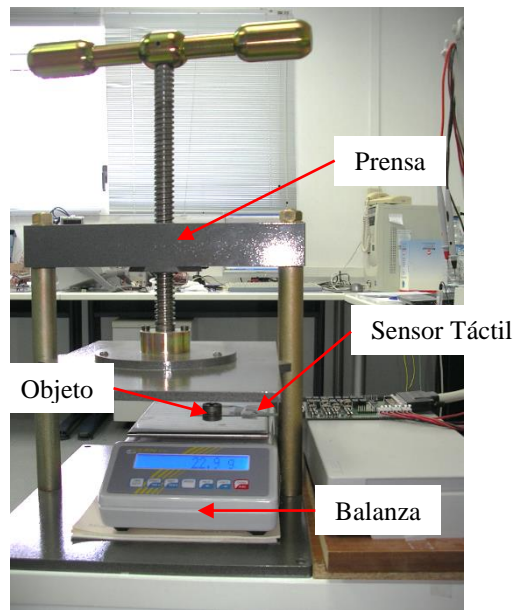


Figura 2-17. Plataforma manual con prensa y balanza.

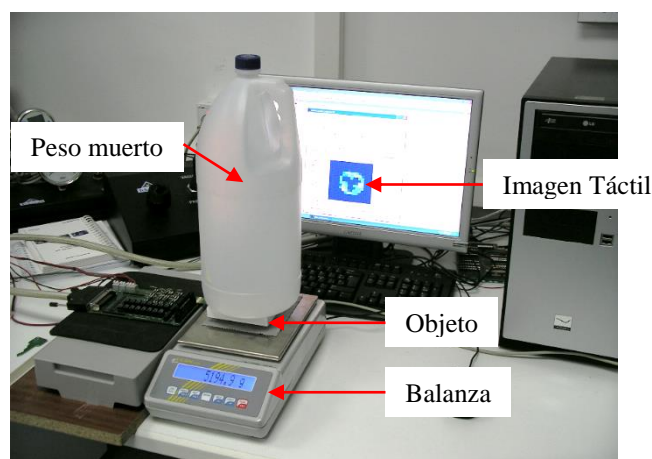


Figura 2-18. Medida de la deriva con la balanza y un peso fijo.

Para realizar las pruebas de deriva, se aplicó una garrafa de agua para aplicar un peso muerto sobre el objeto. El problema principal de esta prueba fue conseguir que el peso permaneciera estable sobre la pequeña superficie del objeto y que la fuerza aplicada fuera ortogonal.

2.3.4. Aplicaciones Matlab

Como herramientas de trabajo, se han desarrollado varias aplicaciones en Matlab para la realización de esta tesis. Estas aplicaciones tienen los siguientes objetivos:

- Permitir la gestión y tratamiento de los datos obtenidos con las plataformas de medida sobre los sensores a estudio en este trabajo.
- Realizar el cálculo de los parámetros que configuran la elipse que mejor se ajusta a una imagen táctil obtenida por el sensor.
- Habilitar el estudio de la influencia que ejercen los errores que presentan los sensores sobre dichos parámetros.
- Implementar métodos de compensación de los errores, en especial de las no linealidades de histéresis.
- Permitir trabajar con todos los tácteles del sensor, mostrando la respuesta de cada uno de ellos, y los modelos que mejor se ajusten a ellos.
- Facilitar el tratamiento de una curva de histéresis individual, perteneciente a uno de los tácteles, o a la curva media de todo el sensor o de los tácteles de un cuadrante.
- Almacenar todos los datos referentes a estas pruebas para generar estadísticas y facilitar su análisis.

Para cumplir con todos estos objetivos, se han desarrollado principalmente tres entornos de trabajo en Matlab. Una primera aplicación para el Análisis de una Imagen Táctil. Una segunda para la Gestión de los Modelos de Compensación de la Histéresis. Y finalmente, una tercera aplicación para el trabajo con las matrices de sensores de forma completa y por cuadrantes.

En el Anexo I, se proporciona una explicación más exhaustiva de estas aplicaciones, y se muestran varias capturas de imágenes con las ventanas de interfaz desarrolladas.

2.4. Caracterización de los Sensores Táctiles

2.4.1. Histéresis

2.4.1.1. Caracterización de la Histéresis del Sensor basado en una PCB

Para caracterizar la histéresis del sensor táctil basado en una PCB descrito en la sección 2.2.1, se aplican unas secuencias de presiones uniformes sobre toda la matriz de tácteles. La presión ejercida sobre el sensor es aumentada y posteriormente disminuida, conformando una serie de ciclos de presiones que permiten cuantificar el error de histéresis. Este error de histéresis corresponderá a la diferencia registrada en el voltaje de salida del sensor para una misma presión aplicada, cuando estas presiones están ejercidas en las ramas ascendentes y descendentes de cada ciclo. Se utiliza la plataforma neumática descrita en la sección 2.3.1 para aplicar las presiones sobre la superficie del sensor.

Se han configurado dos secuencias diferentes de ciclos de presiones que permiten determinar el comportamiento del sensor en dos situaciones distintas. En la Figura 2-19, se observa la respuesta del sensor ante la aplicación de seis ciclos consecutivos de presiones con diferentes puntos de retorno para una misma curva ascendente. De esta forma, se puede caracterizar el comportamiento del sensor ante una secuencia de presiones descendentes. En la Figura 2-20, se caracteriza el comportamiento del sensor para una secuencia de presiones ascendentes configurando seis ciclos de presiones con diferentes puntos de inicio de las subidas para una misma curva descendente. Las secuencias de presiones están realizadas con una variación de presión de 2 psi entre muestras y se pueden observar en la Tabla 2-1. Las curvas tanto de la Figura 2-19 como de la Figura 2-20, muestran la media de la salida de todos los tácteles del sensor para cada una de las presiones ejercidas con la plataforma neumática cuando cada ciclo se repite 5 veces. El intervalo de tiempo que transcurre entre la aplicación de una nueva presión y el registro del voltaje de salida proporcionado por el sensor para cada táctel, es de aproximadamente 2 segundos. Para cuantificar el error de histéresis, se evalúa el error máximo y el error medio referenciándolos al máximo valor de salida registrado para obtener un porcentaje del error relativo con respecto al fondo de escala. El fondo de escala medido para esta curva es de 3.5 V. El error máximo debido a la histéresis es del 25.3%

con respecto al fondo de escala, mientras que el error medio es del 10% con respecto al fondo de escala. En la Figura 2-21, se muestran los ciclos que permiten obtener las curvas descendentes del sensor en diferentes colores para que puedan ser identificadas correctamente. Se incluye en la parte inferior de la gráfica, la desviación estándar de la muestra obtenida para cada presión como media de las 5 repeticiones medidas.

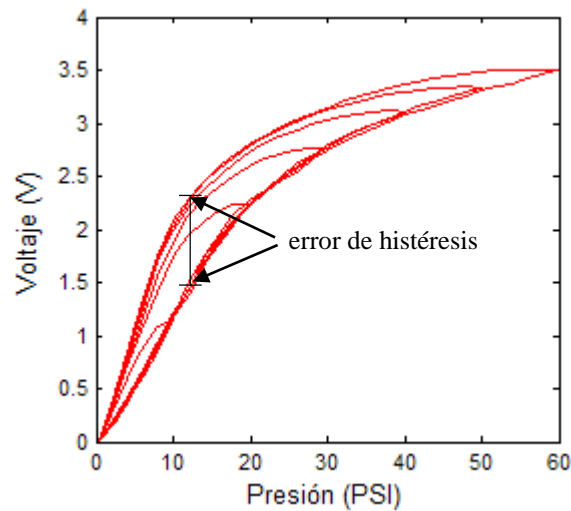


Figura 2-19. Comportamiento descendente de las curvas de histéresis del sensor táctil basado en una PCB.

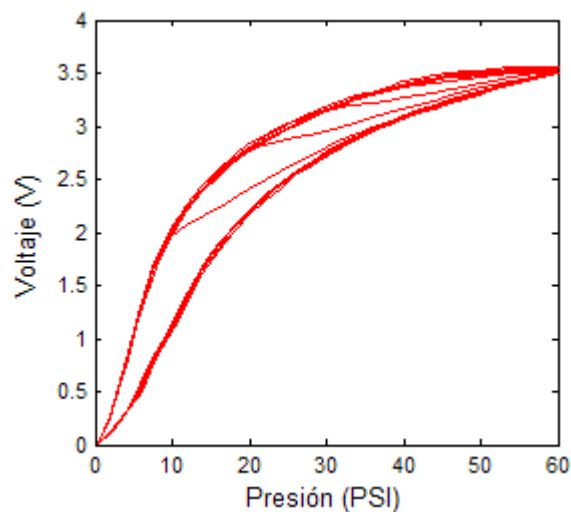


Figura 2-20. Comportamiento ascendente de las curvas de histéresis del sensor táctil basado en una PCB.

Tabla 2-1. Secuencia de presiones para caracterizar el sensor táctil basado en una PCB.

Secuencias de presiones para medir las curvas descendentes (ver Figura 2-19):

PSI: 0 → 60 → 0 → 50 → 0 → 40 → 0 → 30 → 0 → 20 → 0 → 10 → 0

Secuencias de presiones para medir las curvas ascendentes (ver Figura 2-20):

PSI: 0 → 60 → 10 → 60 → 0 → 60 → 20 → 60 → 0 → 60 → 30 → 60 → 0 → 60 → 40 → 60 → 0 → 60 → 50 → 60 → 0

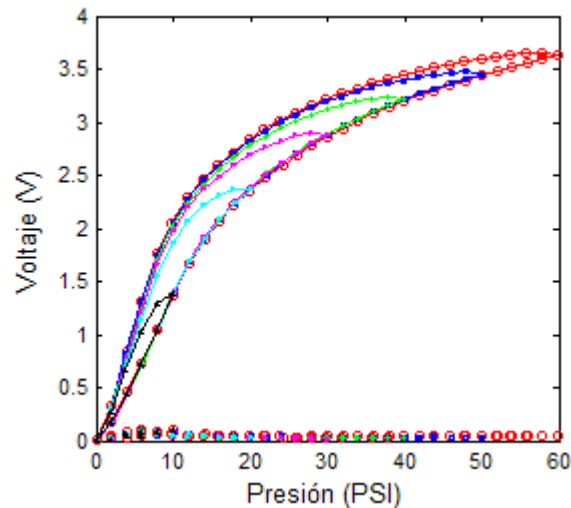
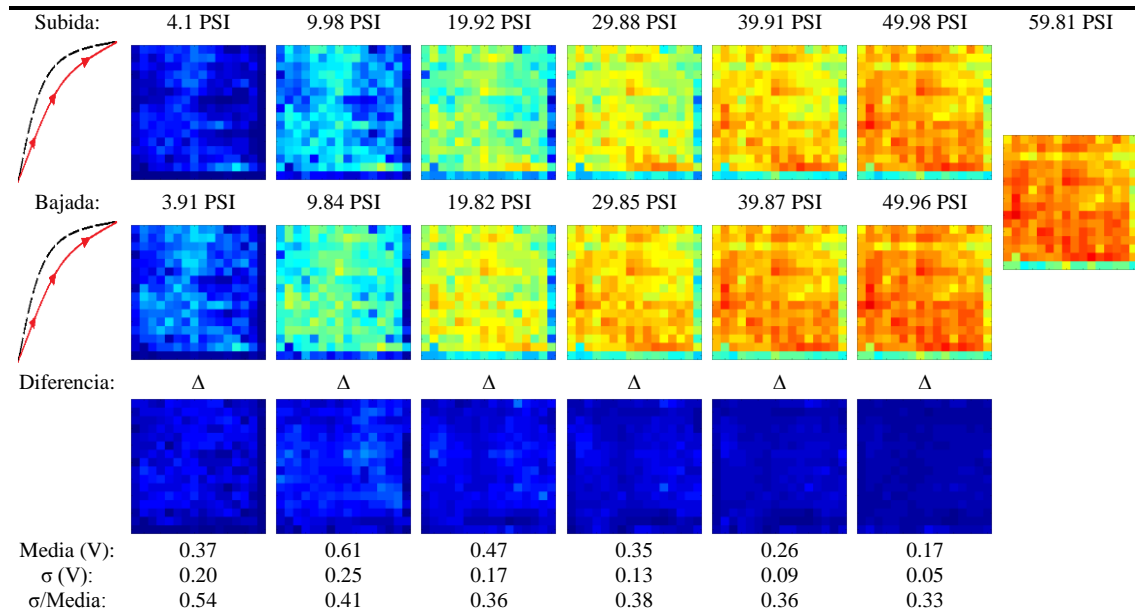


Figura 2-21. Curvas descendentes obtenidas en seis ciclos diferenciados por colores. En la zona inferior se muestra la desviación estándar de cada muestra representada en las curvas.

En la Tabla 2-2, se muestran algunas capturas de las imágenes táctiles generadas por el sensor, correspondientes a las presiones uniformes aplicadas durante las ramas ascendentes y descendentes de un ciclo de histéresis. En dicha tabla, se observan en la primera fila las imágenes correspondientes a la secuencia de presiones ascendentes, mientras que en la segunda, se muestran las correspondientes a las descendentes. Por columnas, se pueden comparar las imágenes obtenidas para la misma presión en las dos secuencias y en la tercera fila, se muestra la imagen correspondiente a la diferencia de las capturas para esa misma presión. Se puede observar que las presiones reales ejercidas en una misma columna no son exactamente iguales, ya que para realizar la prueba correctamente, se evitó la realización de fluctuaciones de presión para conseguir un valor exacto. Se trató de garantizar que las secuencias de presiones fueran continuas ascendentes o continuas descendentes para obtener una curva de histéresis correcta. La ligera falta de exactitud observada, corresponde a esta estrategia y a las limitaciones en

la capacidad de control de la plataforma de medida. Finalmente, se puede comprobar cómo las imágenes táctiles registradas en las secuencias de bajada son más intensas que las obtenidas en las secuencias de subida, demostrando la clara presencia de histéresis.

Tabla 2-2. Imágenes táctiles del sensor basado en una PCB obtenidas a partir de una presión uniforme en un ciclo ascendente-descendente.



2.4.1.2. Caracterización de la Histéresis del Sensor de Tekscan

La caracterización de la histéresis del sensor 5051 de Tekscan descrito en la sección 2.2.2 puede ser observada en la Figura 2-22. Para obtener estas curvas de histéresis, se aplica una secuencia de presiones uniformes sobre todo el sensor, y se representa en la gráfica el valor medio de la salida de todos los tácteles. Debido a que el rango de presiones en el que trabaja el sensor 5051 es de 20 psi, se configuran cuatro ciclos de histéresis con máximos en 20, 15, 10 y 5 psi respectivamente, como se indica en la Tabla 2-3. Para obtener la curva de histéresis, se toman los datos del sensor en bruto y no se realiza ningún equilibrado ni calibración de las que permite realizar el software de control I-Scan (ver sección 2.2.2.2). Se utiliza el sistema de adquisición descrito en la sección 2.2.2.1 que codifica la respuesta del sensor en una escala de 256 valores (8 bits).

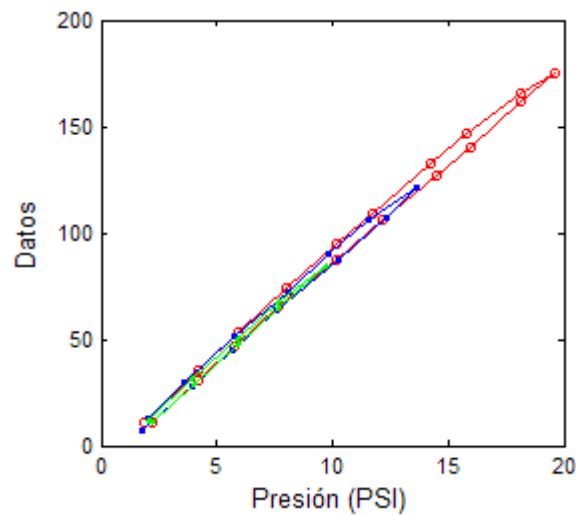


Figura 2-22. Comportamiento de histéresis del sensor 5051 de Tekscan.

Tabla 2-3. Secuencia de presiones para caracterizar la histéresis del sensor de Tekscan.

Secuencias de presiones para medir las curvas descendentes (ver Figura 2-22):

PSI: 0 → 20 → 0 → 15 → 0 → 10 → 0 → 5 → 0

Como se puede observar en la Figura 2-22, el sensor 5051 presenta una baja histéresis y su respuesta es bastante lineal. Por este motivo, únicamente se ha caracterizado el sensor para obtener las curvas descendentes. El fondo de escala registrado para este sensor es de 174.68. El valor máximo de histéresis registrado en la curva es del 4.81% con respecto al fondo de escala, mientras que el valor medio es del 1.71% con respecto al fondo de escala.

Es interesante resaltar en este punto, que el sensor de bajo coste basado en una placa de circuito impreso flexible presenta un error de histéresis mucho mayor que la observada en el comercial fabricado por Tekscan. Por otra parte, la linealidad es también mucho más alta en el segundo que en el primer sensor. Este comportamiento no se debe sólo a la tecnología de PCB, sino también a otros factores como el tamaño y la geometría de los electrodos; a las propiedades mecánicas del material sensible situado encima de los electrodos; y la adherencia y del interfaz entre ambos [Castellanos-Ramos *et al.* 2010; Barber 2013]. Sin embargo, ya que uno de los objetivos de esta tesis es comparar el impacto del error de histéresis sobre las imágenes táctiles con el de otras fuentes de error, se considera apropiado utilizar el sensor basado en una PCB a pesar de su limitado rendimiento desde el punto de vista de un táctel.

2.4.2. No Linealidad

2.4.2.1. Caracterización de la No Linealidad del Sensor basado en una PCB

En la Figura 2-23, se muestra la curva de histéresis medida en el sensor táctil de bajo coste y una representación de cómo se estima el error de linealidad. Se estima el error de linealidad con respecto al máximo valor de salida medido en el sensor, considerado el fondo de escala. En este caso, su valor es de 3.5 V. El error máximo de no linealidad es del 47.36% con respecto al fondo de escala, y el valor medio es del 24.69% del fondo de escala.

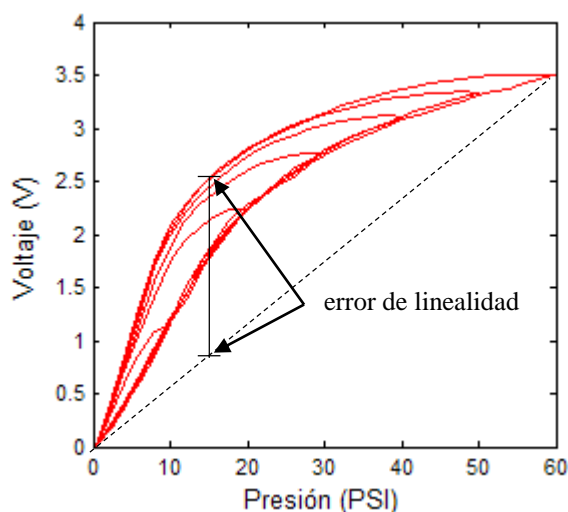


Figura 2-23. Cuantificación del error de linealidad para el sensor basado en una PCB.

2.4.2.2. Caracterización de la No Linealidad del Sensor de Tekscan

La estimación del error de no linealidad del sensor de Tekscan con respecto a las curvas representadas en la Figura 2-22, determinan que el error máximo de no linealidad es del 5.43% con respecto al fondo de escala, y el valor medio es del 2.12% del fondo de escala.

En la Tabla 2-4, se muestra un resumen con los valores máximos y medios de los errores de histéresis y no linealidad de ambos sensores.

Tabla 2-4. Resumen de valores de los errores de histéresis y no linealidad con respecto al fondo de escala.

Sensor	Histéresis		No Linealidad	
	máximo	medio	máximo	medio
Basado en PCB	25.30%	10.00%	47.36%	24.69%
Tekscan	4.81%	1.71%	5.43%	2.12%

2.4.3. Dispersión

2.4.3.1. Caracterización del Sensor basado en una PCB

En la Figura 2-24, se muestra la respuesta del sensor táctil basado en una PCB ante la aplicación de una presión uniforme de 40 PSI sobre toda la superficie del sensor con la plataforma neumática descrita en la sección 2.3.1. La máxima respuesta posible a obtener en cada táctel es de 5 V, y se puede observar una gran dispersión en los valores obtenidos por los diferentes tácteles. También es posible observar que la respuesta de los tácteles situados en los bordes del sensor pueden sufrir un comportamiento anómalo, especialmente en el borde inferior.

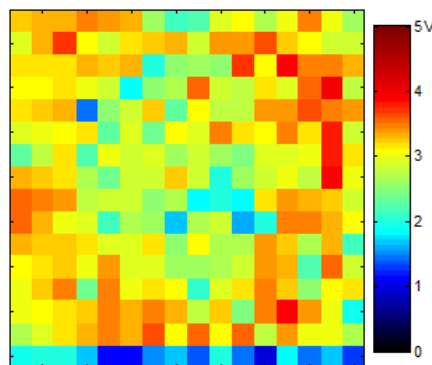


Figura 2-24. Dispersión observada en el sensor táctil basado en una PCB ante una presión uniforme de 40 PSI.

En la Figura 2-25, se muestran las respuestas de los tácteles del cuadrante formado por las filas 5 a 8 y las columnas 1 a 8 ante la prueba de histéresis descrita en la sección 2.4.1.1. Se puede observar la dispersión tanto en los valores de salida como en la forma de las curvas de histéresis de cada táctel. La compensación de esta dispersión es fundamental para que el comportamiento del sensor sea uniforme.

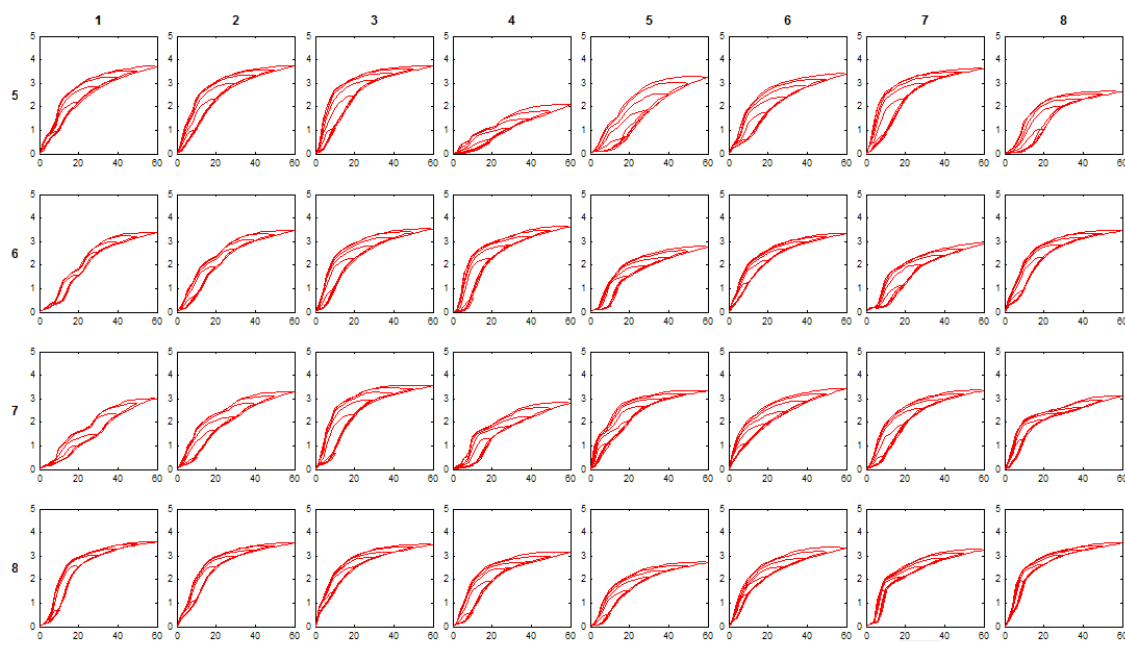


Figura 2-25. Cuadrante 3 del sensor de 16x16 tácteles basado en una PCB.

2.4.3.2. Caracterización del Sensor de Tekscan

El sensor de Tekscan presenta una resolución de 44×44 tácteles, y en la Figura 2-26, se puede observar la respuesta de la matriz completa ante la aplicación de una presión uniforme de 15 PSI con la plataforma neumática de la sección 2.3.1. El valor máximo de salida del sensor es de 255 ya que es codificada con 8 bits. Se puede observar la gran dispersión obtenida en la respuesta de cada táctel del sensor y también los efectos de borde. Para equilibrar la salida del sensor, es posible realizar un proceso de calibración utilizando el dispositivo neumático PB100E descrito en la sección 2.3.1.1.

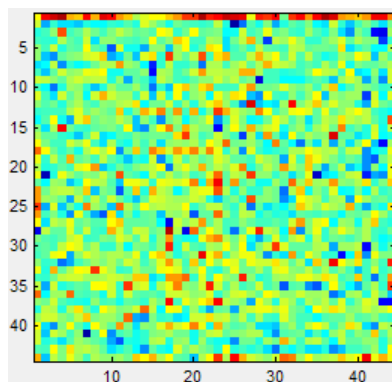
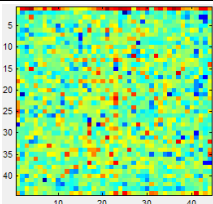
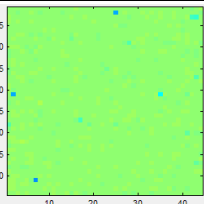
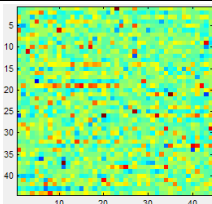
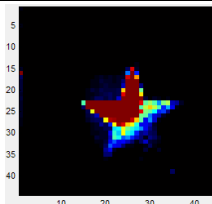
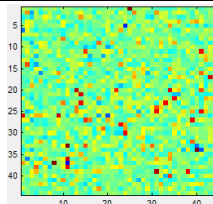


Figura 2-26. Dispersión en el sensor táctil de Tekscan.

Tabla 2-5. Equilibrado del sensor táctil de Tekscan.

a)	b)	c)	d)	e)
				
Presión: 15 PSI	Presión: 15 PSI	Presión: 15 PSI	Fuerza: 4 Kg	Presión: 15 PSI
Media: 126.66	Media: 129.57	Media: 128.09		Media: 127.28
Desviación (σ): 27.87	Desviación (σ): 2.89	Desviación (σ): 23.62		Desviación (σ): 21.60
σ^*100/FS 10.93 %	σ^*100/FS 1.13 %	σ^*100/FS 9.26 %		σ^*100/FS 8.47 %
$\sigma /Media$ 0.22	$\sigma /Media$ 0.022	$\sigma /Media$ 0.18		$\sigma /Media$ 0.17

El software I-Scan descrito en la sección 2.2.2.2, permite realizar un equilibrado de todos los táctiles, sin embargo, es necesario destacar, que esta calibración tiene una duración muy limitada y puede ser alterada si la forma del sensor cambia. Para demostrar este comportamiento, se ha realizado un experimento cuyos resultados están mostrados en la Tabla 2-5. La imagen de la columna (a) de dicha tabla, muestra la salida del sensor 5051 de Tekscan cuando se aplica una presión uniforme de 15 PSI sobre toda su superficie, mientras que la imagen de la columna (b), muestra la misma salida una vez que el sensor está equilibrado con el procedimiento recomendado por el fabricante. Este procedimiento se basa en introducir el sensor en el calibrador PB100E y aplicar una presión uniforme. El software I-Scan es capaz de reconocer la diferencia que muestran cada uno de los táctiles en su salida, y compensarlas para que el valor sea el mismo [Tekscan 2015e]. Posteriormente a este proceso, el sensor se extrae de la ranura y se agita en el aire, de modo que se dobla suavemente y a continuación, se inserta de nuevo en el calibrador para realizar una nueva medida. El software mantiene los datos de la calibración, sin embargo, la respuesta obtenida en la columna (c) muestra que la imagen de la matriz no es tan uniforme como la mostrada en la columna (b) obtenida inmediatamente después del equilibrado. Si el sensor se coloca sobre una superficie rígida y se presionan diferentes objetos sobre su superficie (como una estrella en el caso de la imagen de la columna (d)), la respuesta de nuevo, se ve alterada como se observa en la imagen de la columna (e) cuando se inserta en el dispositivo de calibración. Teniendo en cuenta que los sensores táctiles en robótica se montan generalmente en superficies curvas, el proceso de calibración es muy difícil que se pueda llevar a cabo después del proceso de fabricación.

Además, los sensores táctiles se cubren habitualmente con capas protectoras flexibles que sufren de desgaste, por lo que es entendible que se produzca una gran dispersión en la salida generada por cada táctel. Por estos motivos, la dispersión es un error que es comúnmente aceptado en aplicaciones prácticas, y por tanto su influencia sobre los parámetros que controlan la acción robótica, puede servir como referencia para comparar con la obtenida por otros tipos de errores.

Además de las imágenes que describen el procedimiento de evaluación del equilibrado del sensor táctil de Tekscan, en la Tabla 2-5, se muestran para cada columna, el valor medio obtenido en la salida del sensor por todos los tácteles; la desviación típica de dichos valores; el porcentaje de desviación con respecto al fondo de escala; y el valor del cociente entre la desviación típica y la media. Con esta información, se puede observar cómo la mejora de la uniformidad de la salida del sensor tras el proceso de equilibrado es evidente, y que en las posteriores pruebas, las salidas obtenidas presentan un comportamiento prácticamente igual que el obtenido con los valores iniciales (columna (a)), por tanto la calibración queda sin efecto.

2.4.4. Deriva

2.4.4.1. Caracterización del Sensor basado en una PCB

Para el sensor táctil basado en una PCB, se toman 255 muestras cada 5 segundos con el sistema de adquisición descrito en las Secciones 2.2.1.2 y 2.2.1.3. La lectura de la salida del sensor necesita aproximadamente de 1 segundo, por lo que la duración total de la prueba es de 25 minutos. Se caracteriza la deriva del sensor para una secuencia de presiones ascendentes y después descendentes. De esta forma se puede comprobar el comportamiento relacionado con la histéresis del sensor. Concretamente, se realizan medidas para la secuencia de presiones 10 psi → 30 psi → 50 psi → 30 psi → 10 psi. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 2-27. En dicha figura, se muestra la suma de todos los voltajes de salida registrados por los tácteles del sensor para diferentes incrementos y decrementos de la presión uniforme sobre la superficie del sensor. Como se puede observar en esta imagen, la deriva es mayor en los instantes iniciales de la prueba y después continúa aumentando más lentamente. Es destacable decir que la deriva

registrada es diferente para cada nivel de presión, tanto en magnitud como en tendencia, por lo que complica cualquier estrategia de compensación. La deriva registrada, es mayor para presiones bajas, aunque se observan algunos saltos en la curva provocados por que la regulación de la presión es más difícil cuando se aplica un valor bajo. Además, se puede comprobar que para una misma presión uniforme aplicada, la curva de deriva es diferente si se sigue una secuencia ascendente de presiones o una secuencia descendente.

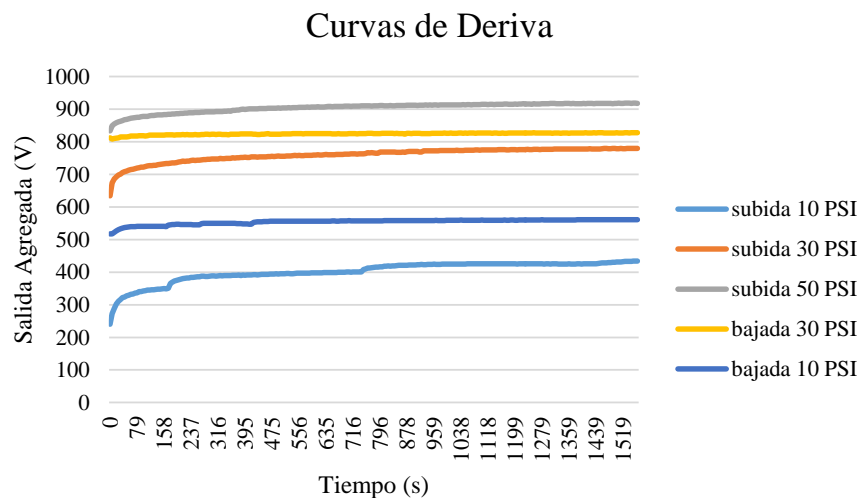
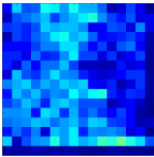
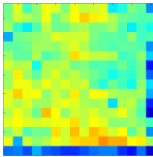
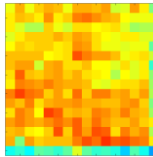
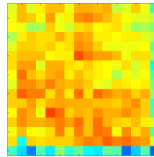
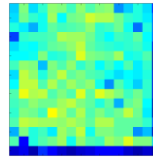
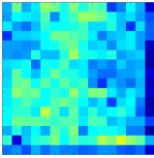
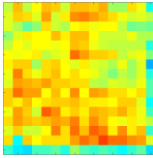
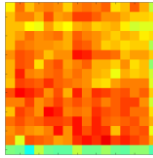
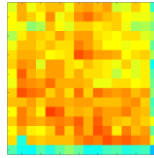
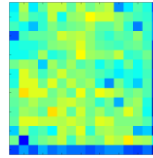
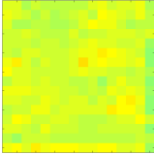
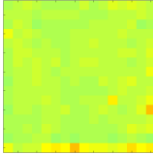
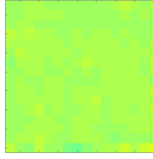
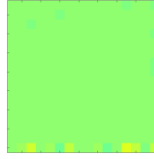
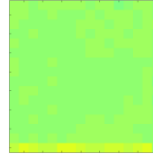
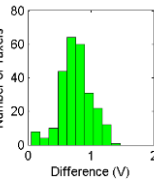
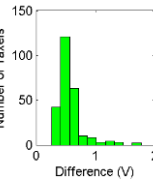
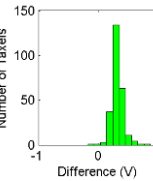
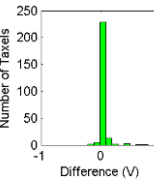
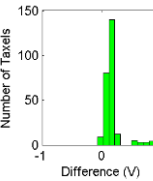


Figura 2-27. Caracterización de la deriva del sensor basado en una PCB.

En la Tabla 2-6, se muestran las imágenes táctiles iniciales y finales de las distintas pruebas de deriva realizadas con presiones uniformes. De esta forma, se puede observar la evolución de la salida de cada uno de los tácteles cuando la presión se mantiene estable. En la tercera fila de la tabla, se muestra la imagen para cada prueba, obtenida de la resta de la imagen inicial y de la final. Es decir, se representa la distancia absoluta entre las dos imágenes. Como se puede comprobar, la deriva registrada en cada táctel es diferente y la dispersión es más acentuada para presiones bajas que para las altas. Los histogramas de la última fila, muestran esta dispersión, que también presenta un valor menor para la secuencia descendente de presiones frente a la secuencia ascendente.

Tabla 2-6. Imágenes táctiles de la evolución de la deriva en el sensor basado en una PCB.

Presión:	10PSI	30PSI	50PSI	30PSI	10PSI
Primera Imagen →					
Media (V):	0.94	2.47	3.25	3.17	2.02
σ (V):	0.53	0.61	0.45	0.49	0.68
Última Imagen →					
Media (V):	1.69	3.04	3.58	3.23	2.19
σ (V):	0.53	0.46	0.44	0.47	0.64
Distancia Absoluta →					
Media (V):	0.76	0.57	0.33	0.06	0.17
σ (V):	0.24	0.22	0.10	0.09	0.14
Histograma de Deriva →					

2.4.4.2. Caracterización del Sensor de Tekscan

Para caracterizar el sensor de Tekscan se realizan pruebas de deriva similares a las descritas en el apartado anterior. Dado que la máxima presión soportada por este sensor es de 20 psi, se realizan pruebas de deriva sólo a 10 y 15 psi.

La deriva observada es menor que en el sensor basado en una PCB, así que de nuevo el sensor de Tekscan es una buena opción como referencia para estimar el impacto de la deriva en los parámetros de control de las tareas robóticas. En concreto, se obtienen derivas en torno al 5% con respecto al fondo de escala mientras que en el sensor basado en una PCB, se registran derivas de hasta el 15% de su correspondiente fondo de escala.

2.4.5. Cambio de Resolución Espacial

2.4.5.1. Sensor basado en una PCB

El sensor basado en una PCB descrito en la sección 2.2.1, presenta una matriz de 16×16 tácteles. La distancia entre los puntos centrales de los tácteles en las direcciones de cada fila y columna, o resolución espacial, es de 2.54 mm.

2.4.5.2. Sensor de Tekscan

El sensor comercial 5051 de Tekscan está formado por una matriz de 44×44 tácteles con una resolución espacial de 1,27 mm. La alta resolución de este sensor, permite que mediante software, se puedan fusionar varios tácteles creando así una imagen de más baja resolución. Esta resolución conseguida artificialmente es comparable a la de otros sensores táctiles comerciales utilizados en manos robóticas. Como ejemplo, indicar que la resolución del DSA 9205 de Weiss Robotics [Weiss Robotics 2015] presenta una resolución de 3.4 mm. De esta forma, se podrá estudiar la influencia que tiene una resolución limitada sobre los parámetros de control utilizados en tareas robóticas que están calculados a partir de la imagen táctil obtenida con el sensor. En la Figura 2-28, se muestra una imagen táctil obtenida mediante la aplicación de una presión uniforme sobre la superficie del sensor. La imagen (a) representa la respuesta del sensor táctil con su resolución real de 44×44 tácteles, mientras que las imágenes (b) y (c), representan la misma respuesta del sensor una vez reducida su resolución a 22×22 tácteles, y 11×11 tácteles, respectivamente.

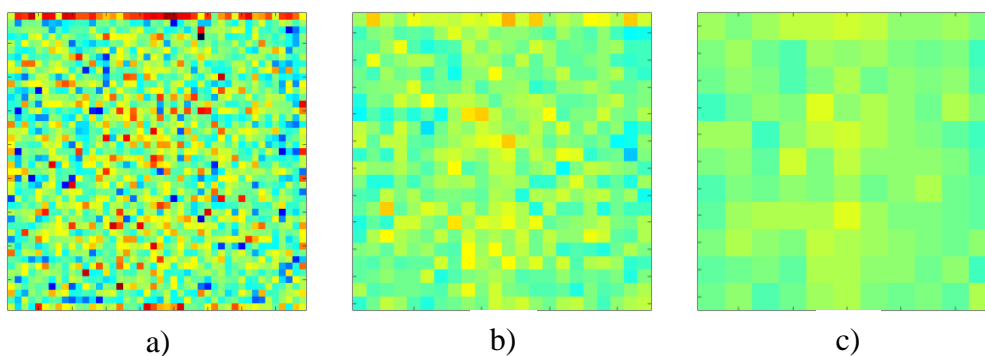


Figura 2-28. Cambio de resolución en el sensor 5051 de Tekscan. a) 44×44 . b) 22×22 . c) 11×11 .

Capítulo 3. Influencia de los Errores en Parámetros de Alto Nivel

3.1. Introducción

Los sensores táctiles al igual que la mayoría de sensores y actuadores basados en materiales inteligentes, sufren la presencia de muchos tipos de interferencias y errores como la diafonía, la no linealidad, la histéresis, la dispersión o la deriva. Como consecuencia, es necesario realizar una calibración del sensor para compensar estas desviaciones. Este proceso puede ser difícil de llevar a cabo en sensores montados en manos artificiales para robots o en prótesis donde el sensor generalmente se dobla para cubrir una superficie curva. Por otra parte, el procedimiento de calibración se debe repetir a menudo ya que los parámetros de corrección pueden ser fácilmente alterados por el tiempo y las condiciones del entorno. Sin embargo, la necesidad de realizar esta intensiva y compleja calibración podría ser menos determinante. Esto se debe a que los algoritmos de manipulación utilizados en tareas robóticas, no utilizan habitualmente el conjunto completo de datos de la imagen táctil obtenida con el sensor, sino que se basan en el cálculo de algunos parámetros basados en los momentos geométricos de la imagen táctil. Estos parámetros pueden verse levemente influidos por los errores e interferencias comunes, de forma que sus variaciones sean del orden de las causadas por otras limitaciones de los sensores táctiles generalmente aceptadas como puede ser la reducción de la resolución espacial, y en este capítulo se aporta información para estimar el grado de cumplimiento de esta suposición.

En este capítulo, se analizan los errores presentados por los dos sensores táctiles descritos en el Capítulo 2. Se tratan de dos sensores basados en principios piezo-resistivos, el sensor comercial de Tekscan, y otro de bajo coste basado en una PCB más propenso a errores.

Se han realizado medidas sobre ambos en el apartado 2.4 para caracterizar sus comportamientos y evaluar los errores de no linealidad, histéresis y deriva. Al tratarse ambos sensores de matrices de tácteles, también se caracterizó la dispersión observada en la salida ofrecida por los mismos ante la aplicación de una presión uniforme. El error de diafonía, es decir, la distorsión que puede ejercer un táctel sobre otro de sus vecinos, es corregido por la electrónica de acondicionamiento, por lo que no ha sido objeto de estudio en este trabajo. Para obtener los datos referentes a estos errores, se han empleado las plataformas de medida descritas en el Capítulo 2.

Las imágenes táctiles obtenidas de los sensores cuando se les aplica una fuerza o presión sobre su superficie, refleja la respuesta de cada táctel a ese estímulo. Dichas imágenes pueden reflejar el contacto de un objeto con la superficie del sensor y pueden ser reducidas a una elipse que las englobe por completo, a partir de la cual es posible determinar la orientación de la imagen, su tamaño, la fuerza ejercida y la forma del objeto. Esta información es obtenida a partir de los parámetros que configuran esa elipse y que pueden ser obtenidos a partir de los momentos geométricos de la imagen. Estos parámetros serán la longitud de los ejes de la elipse, el ángulo en el que se encuentran, el área de la imagen y el valor de la presión media de todos los tácteles en contacto con el objeto. En este capítulo se incluye un estudio sobre la influencia de los errores y limitaciones de los sensores táctiles sobre los parámetros que describen la elipse. Fundamentalmente, se utiliza el sensor basado en una PCB para determinar el impacto de la histéresis y la deriva. El sensor de Tekscan debido a que presenta una buena linealidad, baja histéresis y alta resolución, permite la comparación de la influencia de los diferentes errores aislados de los demás. Además, la resolución puede ser cambiada por software y se puede estudiar su efecto sobre los parámetros descritos anteriormente. La dispersión en la respuesta de los diferentes tácteles también puede ser aislada en este sensor de otras interferencias con el objeto de equilibrar las salidas de todos los tácteles. Aunque el tema es complejo y en este trabajo se presentan los resultados de un número limitado de experimentos, es suficiente para proporcionar unas indicaciones claras sobre el peso de estas no idealidades en el rendimiento del sensor para las aplicaciones a las que se destinen los sensores táctiles.

3.2. Parámetros de la imagen táctil

Los errores descritos en el Capítulo 1 y caracterizados en el Capítulo 2, pueden ejercer mayor o menor influencia sobre las aplicaciones de un sensor táctil, como por ejemplo en tareas de manipulación robótica. La escasa presencia efectiva de los sensores táctiles en las actividades robóticas puede verse afectada por estos errores, por lo que es necesario realizar un estudio de su influencia sobre algunos parámetros de control utilizados habitualmente en estas tareas. Las imágenes táctiles suelen ser reducidas a un conjunto de parámetros que proporcionan suficiente información para la tarea correspondiente, pero que suponen una cantidad de datos muy inferior con respecto a los datos de la matriz completa del sensor. Habitualmente, estos parámetros se reducen a aquellos que configuran la elipse que mejor engloba a la imagen táctil generada por el sensor ante el contacto con un objeto.

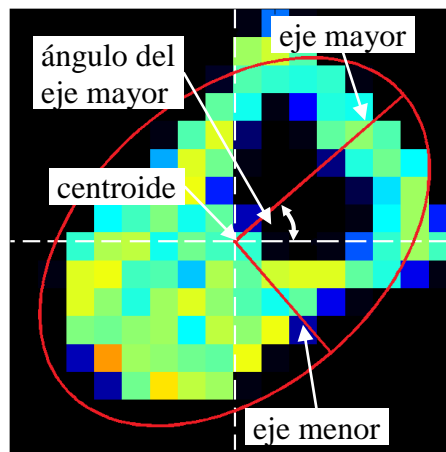


Figura 3-1. Parámetros de la elipse utilizada para describir un objeto en tareas de manipulación.

En la Figura 3-1, se muestra un conjunto de parámetros, sobre una imagen táctil de ejemplo, que proporciona información útil para tareas de control, reconocimiento o manipulación [Gorges *et al.* 2014]. La construcción de la elipse se basa en una familia de parámetros o propiedades numéricas denominadas momentos y que son habitualmente utilizados en aplicaciones de reconocimiento de patrones y análisis de formas [Mukundan *et al.* 1998], ofreciendo información sobre la posición del objeto, su forma, tamaño y

orientación. Se usan en [Schill et al. 2012] como entrada de algoritmos de clasificación y aprendizaje de la estabilidad del agarre. En [Drimus et al. 2011] se parte de series en el tiempo del primer y segundo momentos para conocer la elasticidad del objeto con el que se contacta. En una secuencia de imágenes, pueden ser utilizados incluso para reconstruir el movimiento del objeto [Rocha et al. 2004].

Para estudiar la influencia de los errores, se utilizan los objetos que se describen a continuación y la plataforma de medidas de la sección 2.3.2, para aplicar diferentes patrones de presiones sobre los sensores táctiles. Se añade una pieza de tela entre los objetos y la superficie del sensor para mejorar el contacto. El objetivo es evaluar el cambio de los parámetros descritos en la Tabla 3-1 debido a la histéresis, la deriva, la dispersión y la limitación de la resolución.

3.2.1. Objetos de Muestra

En la Figura 3-2 y en la Figura 3-3 se observan los objetos utilizados para caracterizar los sensores para los distintos errores. Estos objetos fueron seleccionados para estudiar la influencia de los errores sobre las imágenes táctiles con distinta forma. Se estudian objetos con simetría radial, simetría longitudinal y sin ningún tipo de simetría.



Figura 3-2. Diferentes objetos utilizados en la caracterización de los sensores táctiles.
A) Abridor. B) Fresa. C) Llave. D) Barra. E) Silbato. F) Tuerca.

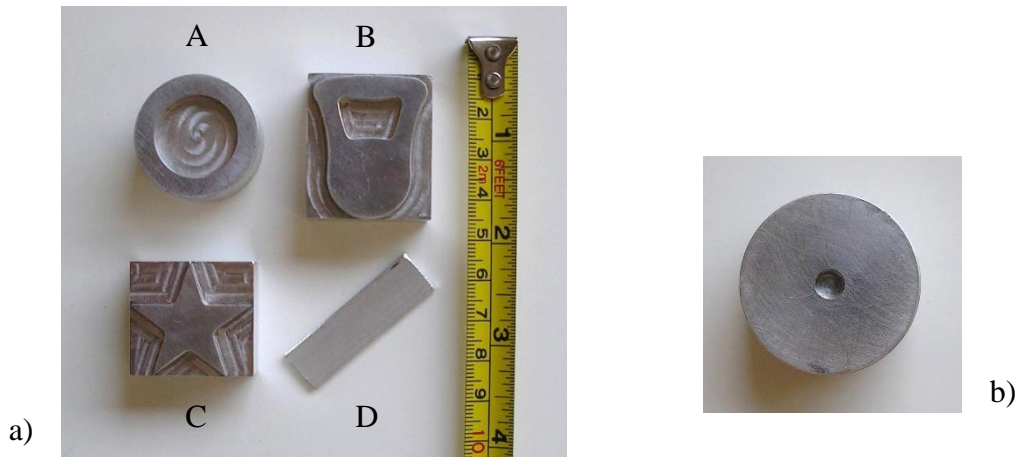


Figura 3-3. a) Objetos de aluminio totalmente planos: A) Aro, B) Abridor, C) Estrella, D) Barra. b) Agujero para un correcto ajuste con el actuador de fuerza.

Para asegurar que la aplicación de la fuerza sobre el objeto es totalmente ortogonal, se dispuso la fabricación de unos objetos de aluminio cuyas caras fueran totalmente planas para situarlos sobre los sensores táctiles. Además se les añadió un agujero en su cara posterior para ajustar el émbolo de la plataforma motorizada y que no se produjera ningún tipo de desajuste en el acoplamiento del actuador y el objeto y por tanto que la fuerza aplicada no tuviera componentes tangenciales. La Figura 3-3(a) muestra los objetos y un detalle del agujero en la Figura 3-3(b). La Figura 3-4 muestra un detalle del acoplamiento.

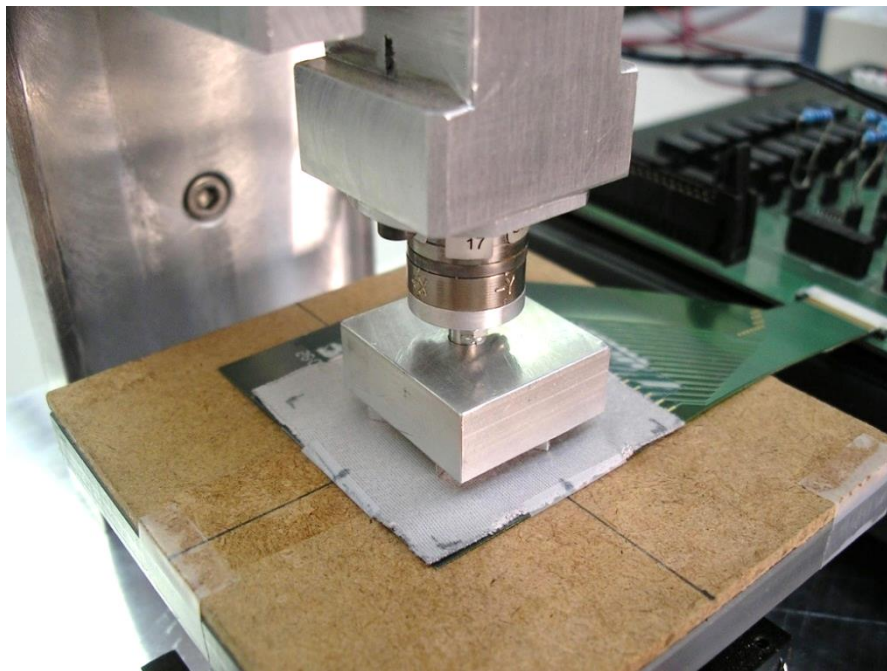


Figura 3-4. Detalle del acoplamiento entre la punta del actuador y el objeto situado sobre el sensor táctil.

3.2.2. Momentos Geométricos y Elipse. Parámetros a estudio.

La geometría de una región plana se basa en el tamaño, la posición, la orientación y la forma. Todas estas características están relacionadas con una familia de propiedades numéricas que se pueden obtener de una determinada imagen y que se denominan momentos. Su utilización permite conocer bastante información de una imagen con la ventaja de que no sólo utiliza los bordes de la figura, sino que tiene en cuenta todos los píxeles de la misma. El elemento fundamental de una imagen se denomina píxel, que se corresponde con cada elemento de la matriz que compone la imagen. En el caso de las imágenes táctiles obtenidas a partir de los sensores táctiles, cada uno de los elementos de la matriz se denomina táctel.

Si consideramos un objeto situado en una región α , formada por N filas y M columnas, que está determinado por los puntos en los que $f(x, y) > 0$, definimos el momento simple de orden (i, j) como

$$m_{ij} = \iint x^i y^j f(x, y) dx dy \quad (3.1)$$

En el caso de trabajar con sensores táctiles, se obtiene una imagen digital definida por la función $f(x, y)$, donde (x, y) son las coordenadas del táctel dentro de la matriz, y $f(x, y)$ es el valor de la salida generada por ese táctel. Por tanto, al tratarse de imágenes digitales, las integrales se pueden convertir en sumatorios y el momento de orden (i, j) se define ahora como

$$M_{ij} = \sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^M x^i y^j f(x, y) \quad i, j > 0 \quad (3.2)$$

donde $f(x, y)$ es la salida del táctel con coordenadas (x, y) , y N y M son el número de filas y columnas de la matriz del sensor táctil, respectivamente.

El centroide de un objeto representado en una imagen táctil se puede obtener a partir de los momentos simples de orden 0 y 1. El centroide es el punto de un objeto que tiene la misma cantidad de objeto en cualquier dirección, y es tomado como punto de referencia del objeto. Está determinado por las coordenadas (X, Y) , de forma que el área de la figura que queda a la derecha e izquierda de X es la misma, al igual que el área que queda por

encima y por debajo del punto Y . Por otro lado, el momento simple de orden 0 representa el área de la figura en imágenes binarias. Para imágenes en las que el valor de $f(x, y)$ puede tomar distintos valores dentro de un rango determinado, el centro de masas reemplaza al centroide como el punto que deja la misma cantidad de objeto en cualquier dirección teniendo en cuenta el peso de cada táctel (ver Figura 3-1). Por lo tanto, el centroide podría no estar centrado físicamente en el objeto. En esta tesis, el centro de masas será denominado también centroide, y tendrá en cuenta la salida multivaluada del táctel y no la binaria.

Los momentos centrales se usan para reconocer una imagen independientemente de su localización con respecto a los ejes de coordenadas (ver Figura 3-5), y están definidos a partir de las coordenadas del centroide como

$$CM_{ij} = \sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^M (x-X)^i (y-Y)^j f(x, y) \quad i, j > 0 \quad (3.3)$$

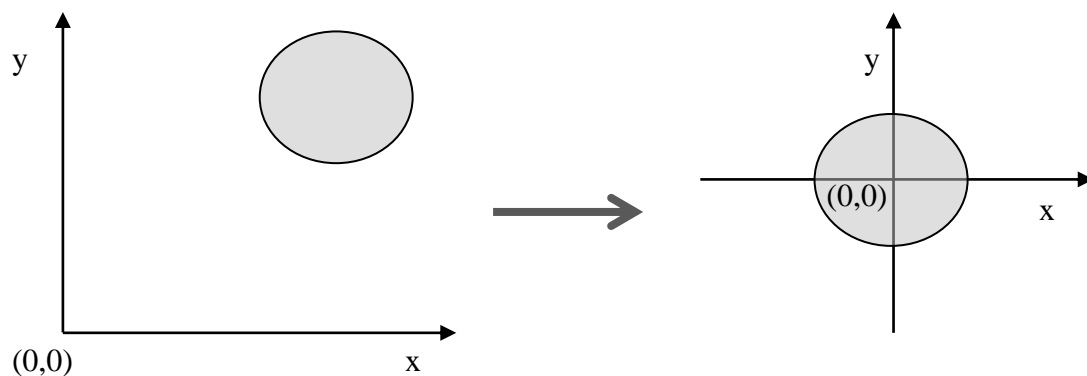


Figura 3-5. Desplazamiento de los ejes de coordenadas para obtener los momentos centrales.

Los momentos centrales de orden 2 son esenciales para el reconocimiento de formas y de patrones en el campo del análisis de imágenes y forman los componentes del tensor de inercia, matriz de rotación o matriz de covarianza, permitiendo determinar tanto el ángulo de rotación como la excentricidad del objeto. Una representación adecuada de la estructura global de un objeto (tamaño, posición y orientación), es mediante su elipse de inercia. Esta elipse está centrada en el centroide del objeto y sus ejes son las rectas que pasan por este punto y cuyos momentos centrales de orden 2 son máximos y mínimos.

Estas rectas son perpendiculares y corresponden a los vectores propios de la matriz de rotación del objeto.

La Tabla 3-1 muestra las expresiones utilizadas para computar los parámetros etiquetados en la Figura 3-1, además del *Área* y la *Salida Agregada* a partir de las ecuaciones (3.2) y (3.3). Por otro lado, los valores I_1 e I_2 en la Tabla 3-1, corresponden a los vectores propios de la matriz de covarianza de la imagen obtenidos como

$$I_k = \frac{(CM_{20} + CM_{02}) - (-1)^k \sqrt{(CM_{20} - CM_{02})^2 + 4CM_{11}^2}}{2} \quad k = 1, 2 \quad (3.4)$$

La función $b(x, y)$ es utilizada para obtener una imagen binaria a partir de la original, de tal forma que $b(x, y) = 1$ si $f(x, y) > 0$ y $b(x, y) = 0$ para cualquier otro caso.

Tabla 3-1. Parámetros obtenidos del procesamiento de una imagen táctil utilizados en tareas de control.

Parámetro	Ecuación	Variación de a hasta b (%)
<i>Centroide</i>	$X = \frac{M_{10}}{M_{00}}$ $Y = \frac{M_{01}}{M_{00}}$	$\frac{\sqrt{(X_a - X_b)^2 + (Y_a - Y_b)^2}}{L} \times 100$
<i>Eje Mayor</i>	$2 \cdot \sqrt{\frac{I_1}{CM_{00}}}$	$\frac{ valor(a) - valor(b) }{L} \times 100$
<i>Eje Menor</i>	$2 \cdot \sqrt{\frac{I_2}{CM_{00}}}$	
<i>Ángulo</i>	$\tan^{-1} \left(\frac{\max(I_1, I_2) - CM_{20}}{CM_{11}} \right)$	$\frac{ valor(a) - valor(b) }{180^\circ} \times 100$
<i>Área</i>	$\sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^M b(x, y)$	$\frac{ valor(a) - valor(b) }{L^2} \times 100$
<i>Salida Agregada</i>	$\sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^M f(x, y)$	$\left \frac{valor(a) - valor(b)}{\left(\frac{valor(a) + valor(b)}{2} \right)} \right \times 100$

La columna de la derecha de la Tabla 3-1 muestra cómo se calcula la variación de los distintos parámetros para estudiar la influencia de los errores sobre los mismos. La

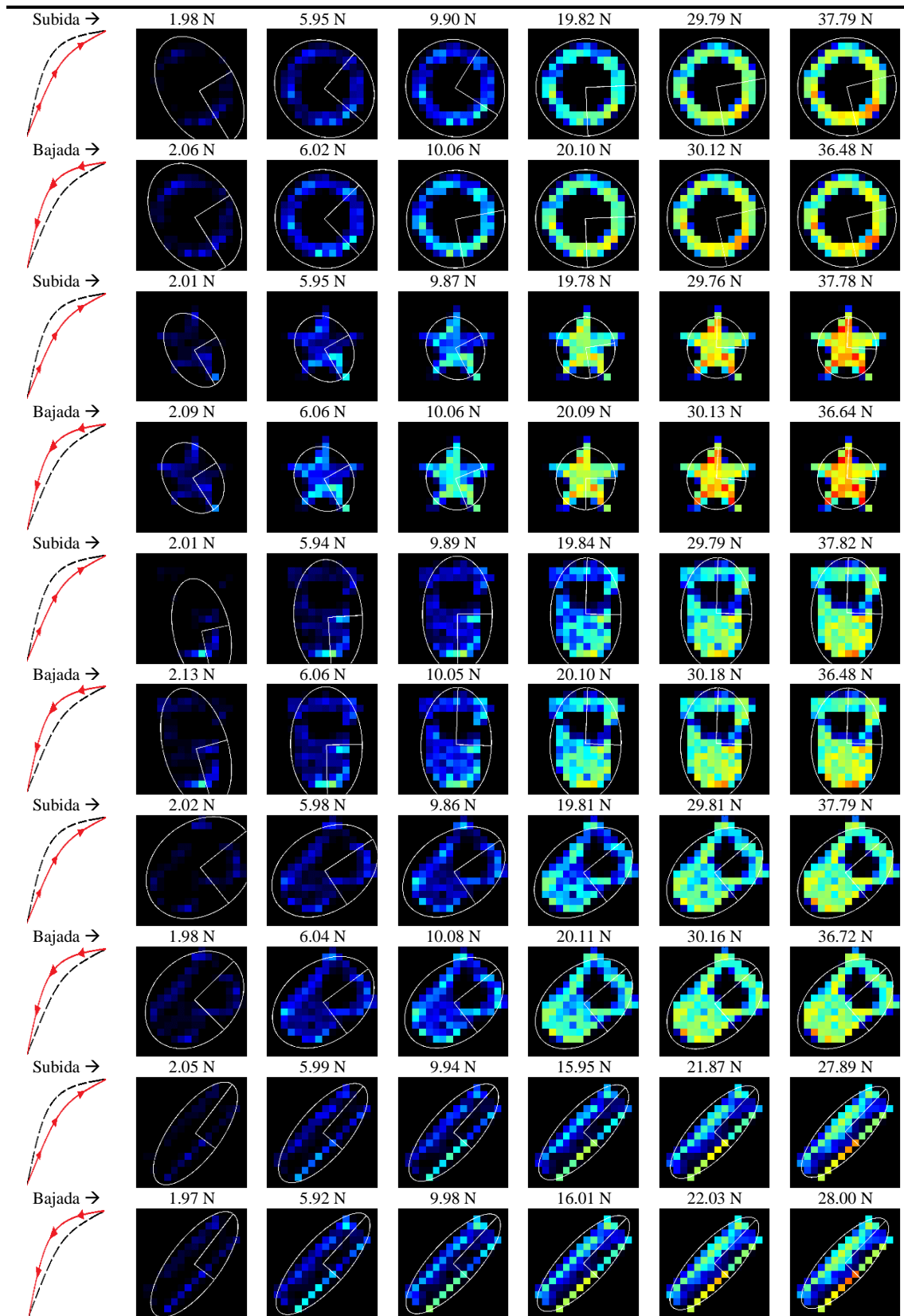
mayoría de ellos están expresados como cambios relativos con respecto al fondo de escala. Sin embargo, el valor del fondo de escala no es evidente y tiene que permitir la comparación entre los resultados obtenidos con diferentes sensores y objetos, así como ajustar su significado como valor de referencia máximo. Dado que los objetos en la Figura 3-3 se construyeron para ajustarse al tamaño del sensor basado en una PCB y para aprovechar su resolución espacial, es decir, haciéndolos grandes considerando el tamaño de un táctel, se eligió la longitud de los lados de la matriz de este sensor, $L = 40,64$ mm, como referencia de la escala completa para los parámetros relacionados con el tamaño o la traslación, mientras que 180° fue tomado como el fondo de escala para el parámetro *Ángulo*.

Por último, cabe destacar que la variación del parámetro de *Salida Agregada* se calcula con respecto a la expresión $value(a) + value(b)/2$ en el lugar de con respecto al fondo de escala. La razón es que las salidas de los sensores utilizados en este trabajo, el basado en una PCB y el de Tekscan, tienen diferentes unidades como se puede ver en la Figura 2-19 y en la Figura 2-22. Además, los experimentos no siempre tienen el mismo rango de fuerza ya que la salida de algunos tácteles se satura dependiendo del área de contacto. Por lo tanto, la mejor manera de proporcionar unos resultados significativos y válidos para hacer comparaciones es utilizando las expresiones de la Tabla 3-1. Sin embargo, hay que tener en cuenta que este parámetro tomará magnitudes grandes para valores pequeños de la expresión $value(a) + value(b)/2$, por lo que debe ser un aspecto a considerar en el análisis de los resultados de los experimentos.

3.3. Influencia de la Histéresis en la Elipse

Para evaluar la influencia que ejerce la histéresis sobre la elipse calculada para la imagen obtenida con el sensor táctil, se utiliza la plataforma motorizada de medidas para aplicar unas secuencias de fuerzas ascendentes y descendentes sobre los objetos mostrados en la Figura 3-3 una vez que se sitúan sobre la superficie del sensor. Una vez registradas las imágenes para varios ciclos de fuerzas, se calculan los parámetros descritos en la Tabla 3-1 para cada una de las imágenes. Se comparan los resultados obtenidos para las imágenes de cada objeto correspondientes a fuerzas similares ejercidas en cada secuencia ascendente y descendente.

Tabla 3-2. Imágenes táctiles y elipse para los ciclos de histéresis con el sensor basado en una PCB y los objetos Anillo, Estrella, Abridor y Barra.



Ya que los errores de histéresis y no linealidad del sensor comercial de Tekscan son muy bajos, en esta sección se muestran únicamente los resultados de los experimentos llevados a cabo con el sensor basado en una PCB. La Tabla 3-2 muestra algunas imágenes táctiles seleccionadas de todas las registradas para los diferentes objetos en el experimento descrito anteriormente, así como su correspondiente elipse. Encima de cada imagen se indica la fuerza a la que se registró. Se comparan las imágenes obtenidas aproximadamente para la misma presión en la secuencia ascendente y en la secuencia descendente de fuerzas. De esta forma, se puede observar cómo las imágenes obtenidas en las secuencias de bajada son más intensas que las de subida para una misma fuerza debido a la histéresis que presenta el sensor.

La Figura 3-6, muestra los resultados de estas pruebas a partir del conjunto completo de datos recogidos. Las variaciones de los parámetros de la Tabla 3-1 se muestran en dos tipos de gráficos para cada uno ellos. El gráfico de la parte superior muestra la variación (tal como se expresa en la Tabla 3-1) de los parámetros a lo largo del ciclo de histéresis para diferentes objetos utilizados en las pruebas. El gráfico en la parte inferior resume la información en cinco valores estadísticos significativos: valor máximo, valor mínimo, media, percentil al 80% y percentil al 60%.

A partir de los gráficos de la Figura 3-6, se pueden extraer algunas características de la influencia de la histéresis sobre los parámetros de las imágenes. En primer lugar, se observa que las variaciones son mayores para valores pequeños de la fuerza aplicada sobre los objetos. Esto se debe principalmente a que la forma de la huella del objeto no está completamente definida para esos valores de fuerza como se puede ver en la Tabla 3-2. Los mayores cambios que se producen en la ubicación del *Centroide* son para fuerzas bajas, aunque son pequeños. El peor comportamiento de este parámetro se observa en el objeto *abridor* situado en posición vertical. Es de destacar que es peor que el observado para el *abridor* en posición diagonal, por lo que vemos que la ubicación del objeto en el sensor también tiene cierta influencia. Esto se debe principalmente a la dispersión registrada entre los diferentes táctiles. En cuanto a la *Salida Agregada*, hay que tener en cuenta que es un parámetro calculado de forma diferente y que está relacionado con la lectura del sensor y no está referenciado al fondo de escala. Por lo tanto, la Figura 3-6(c) muestra un comportamiento bastante uniforme con respecto a la variación de las fuerzas aplicadas. El parámetro *Área* está poco afectado por la histéresis con excepción

nuevamente de la zona correspondiente a las fuerzas bajas. Las variaciones de la forma del objeto, es decir, el tamaño de los ejes, son un poco más grandes para el objeto *barra* y el objeto *abridor* ya que tienen una forma oblonga. Finalmente, también se puede observar que los objetos con simetría radial como el *anillo* y la *estrella* muestran los errores más grandes en la orientación, como se indica por el parámetro *Ángulo*.

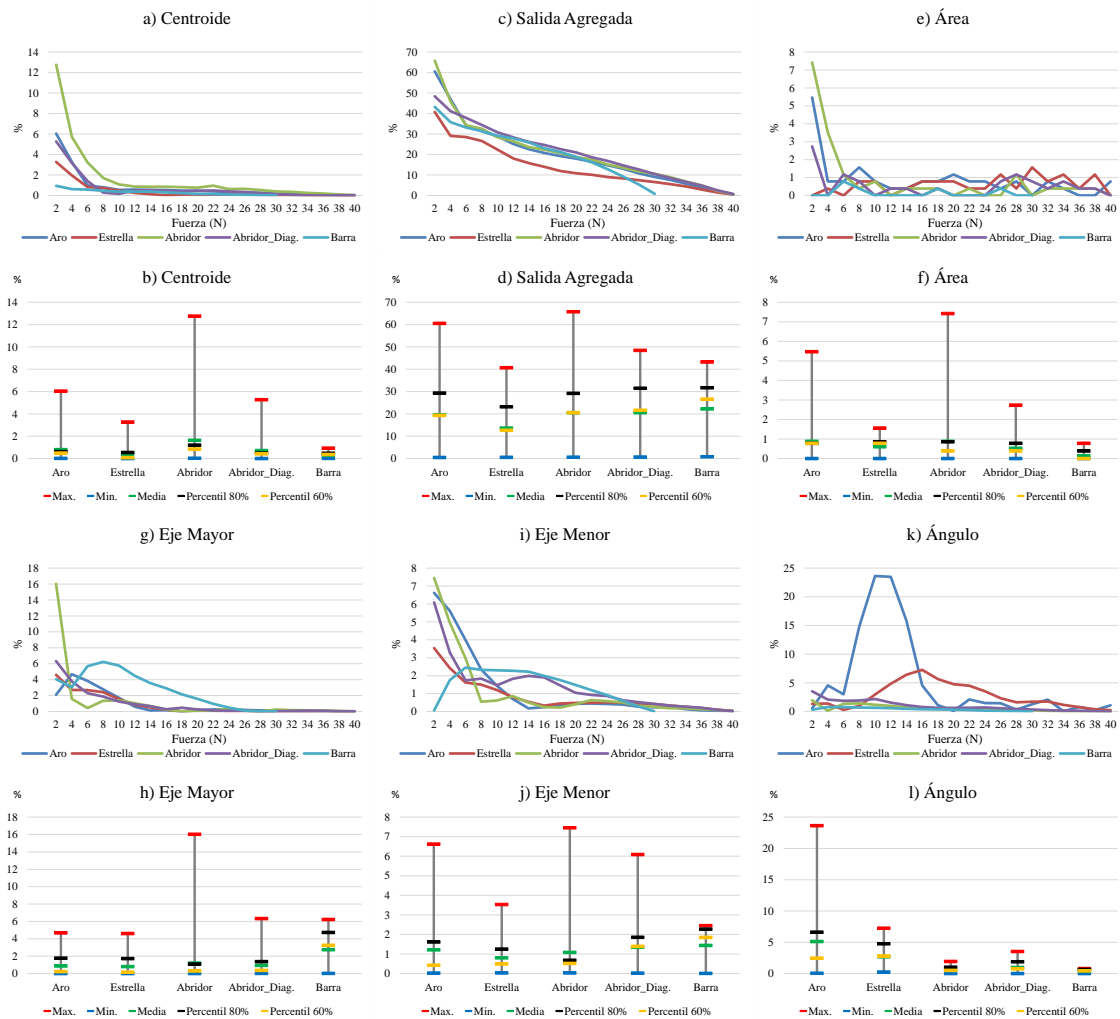


Figura 3-6. Variaciones de los parámetros de control provocadas por la histéresis del sensor basado en una PCB.

3.4. Influencia de la Deriva en la Elipse

Para estimar el impacto que ejerce la deriva sobre los parámetros de la Tabla 3-1, se registran los cambios sufridos por los parámetros cuando se mantiene una fuerza constante sobre la superficie del sensor durante un tiempo prolongado. Se utiliza la plataforma motorizada para aplicar una fuerza sobre los objetos situados encima del sensor táctil basado en una PCB siguiendo la secuencia 10 N \rightarrow 20 N \rightarrow 30 N \rightarrow 40 N \rightarrow 30 N \rightarrow 20 N \rightarrow 10 N (en el caso del objeto *barra*, la máxima fuerza posible ejercida fue de 38 N). Se registran 255 muestras durante 25 minutos que dura la prueba con cada una de las fuerzas. El experimento se repite con el sensor de Tekscan 5051/P1/3056T1/20, pero en este caso al utilizar el sistema de adquisición I-Scan, se registran 900 muestras en 30 minutos. Aunque la deriva de este sensor es menor que el del basado en una PCB, no es despreciable y vale la pena considerar su efecto en este estudio.

Los resultados de las derivas para el objeto etiquetado como *abridor* se muestran en la Tabla 3-3 y en la Tabla 3-4 para el sensor basado en una PCB y el sensor de Tekscan, respectivamente. De nuevo, se puede observar que para el sensor basado en una PCB, la deriva es mayor para la trayectoria ascendente de fuerzas que para la descendente. También se puede ver, que los histogramas en la Tabla 3-3 son más simétricos que los de la Tabla 3-4. En realidad, en la Tabla 3-3, se registran valores positivos de la deriva para casi todos los táctiles, mientras que para el sensor de Tekscan en la Tabla 3-4 se registran algunos valores negativos en la deriva. Esto es algo a tener en cuenta cuando se comparan las distancias absolutas de ambas tablas, ya que puede enmascarar un efecto mayor de la deriva cuando se calcula un promedio como se realiza en la Figura 3-7 con respecto a la Figura 3-8, o en la Figura 3-9(c) con respecto a la Figura 3-10(c), aunque también puede verse como un efecto de compensación positiva cuando se obtienen los parámetros de la Tabla 3-1. Esto puede explicar el diferente comportamiento observado en la Figura 3-9 y en la Figura 3-10. Generalmente hablando, hay una regla bastante clara que es seguida por las gráficas de la Figura 3-9 en el sentido de que las diferencias registradas en la deriva disminuyen para presiones altas y también para las secuencias descendentes con respecto a las ascendentes, mientras que las curvas son más uniformes a lo largo del eje x en la Figura 3-10. Sin embargo, se puede observar una excepción para los objetos en posición diagonal, para los cuales los resultados son peores, es decir, la orientación del

objeto en el sensor, tiene también su influencia sobre la deriva. Para ambos sensores, se observa una mayor variación en el parámetro Ángulo en los objetos con simetría radial como el anillo y la estrella.

Tabla 3-3. Imágenes táctiles del objeto *abridor* con el sensor basado en una PCB para evaluar el efecto de la deriva en los parámetros de la Tabla 3-1.

Fuerza (N):	10	20	30	40	30	20	10
Primera Imagen							
Media (V):	0.34	0.45	0.86	1.10	1.08	0.81	0.39
σ (V):	0.60	0.73	1.22	1.51	1.49	1.17	0.65
Última Imagen							
Media (V):	0.51	0.64	0.99	1.21	1.10	0.84	0.48
σ (V):	0.85	0.96	0.14	1.64	1.51	1.20	0.74
Distancia Absoluta							
Media (V):	0.17	0.19	0.13	0.10	0.02	0.02	0.08
σ (V):	0.30	0.31	0.20	0.15	0.04	0.07	0.17
Histograma							

Curvas de Deriva del Abridor en Diagonal

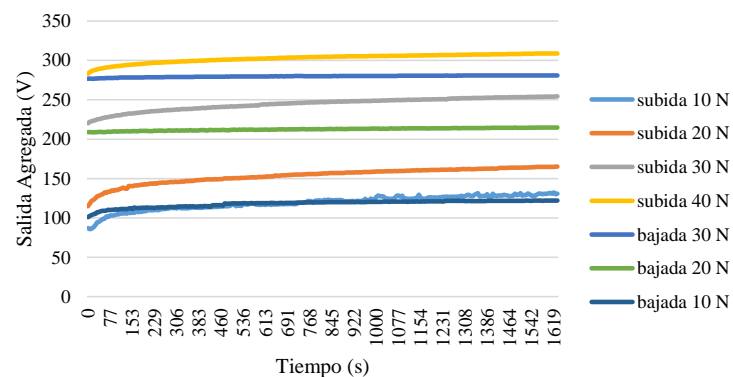


Figura 3-7. Deriva de la *Salida Agregada* registrada por el sensor basado en una PCB con el objeto abridor para diferentes subidas y bajadas de la fuerza.

Tabla 3-4. Imágenes táctiles del objeto *abridor* con el sensor de Tekscan para evaluar el efecto de la deriva en los parámetros de la Tabla 3-1.

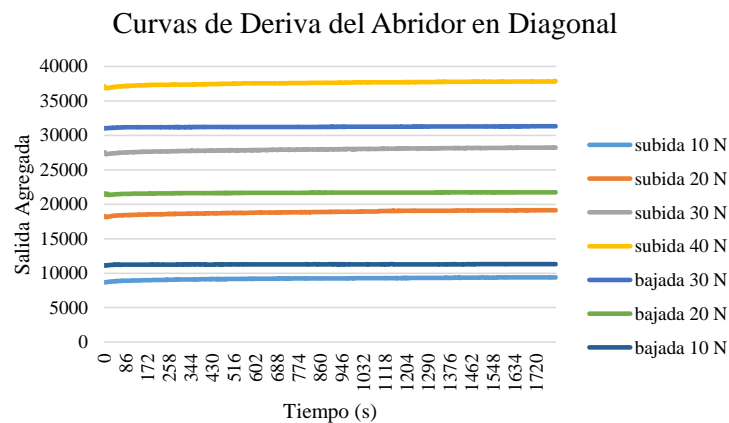
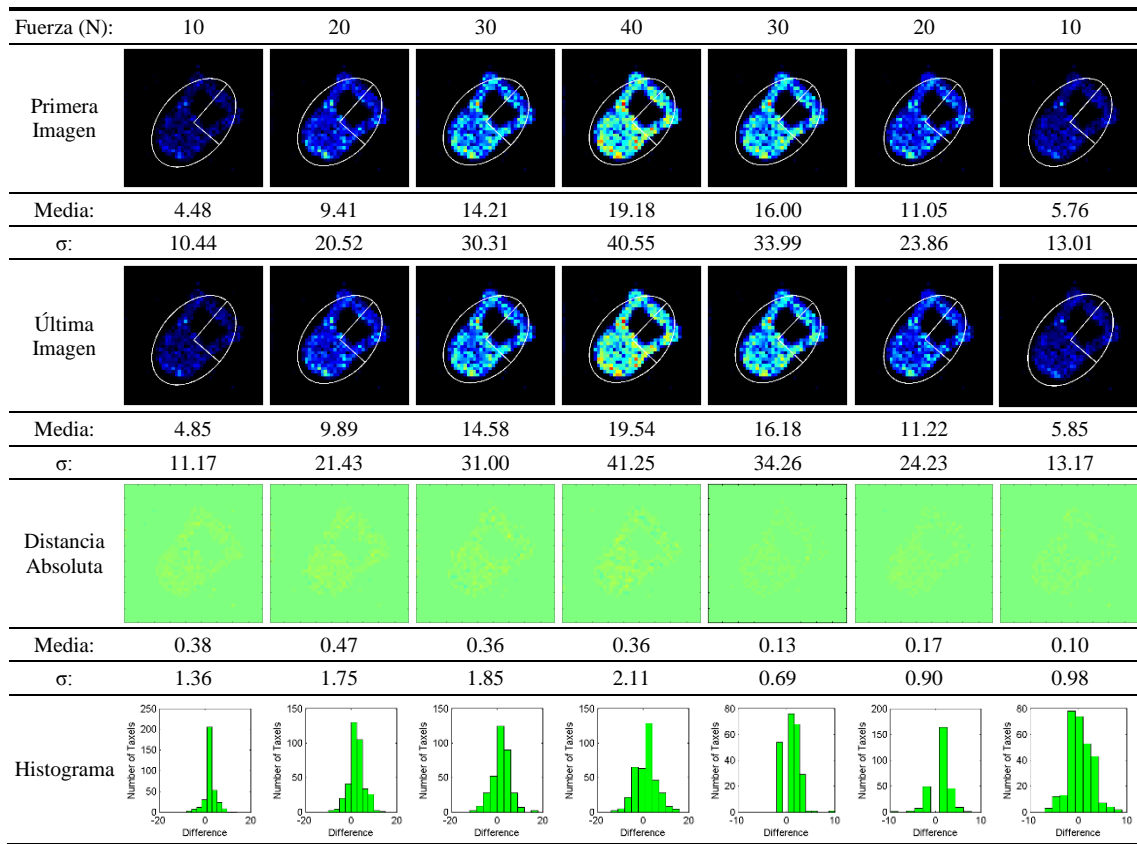


Figura 3-8. Deriva de la *Salida Agregada* registrada por el sensor de Tekscan con el objeto *abridor* para diferentes subidas y bajadas de la fuerza.

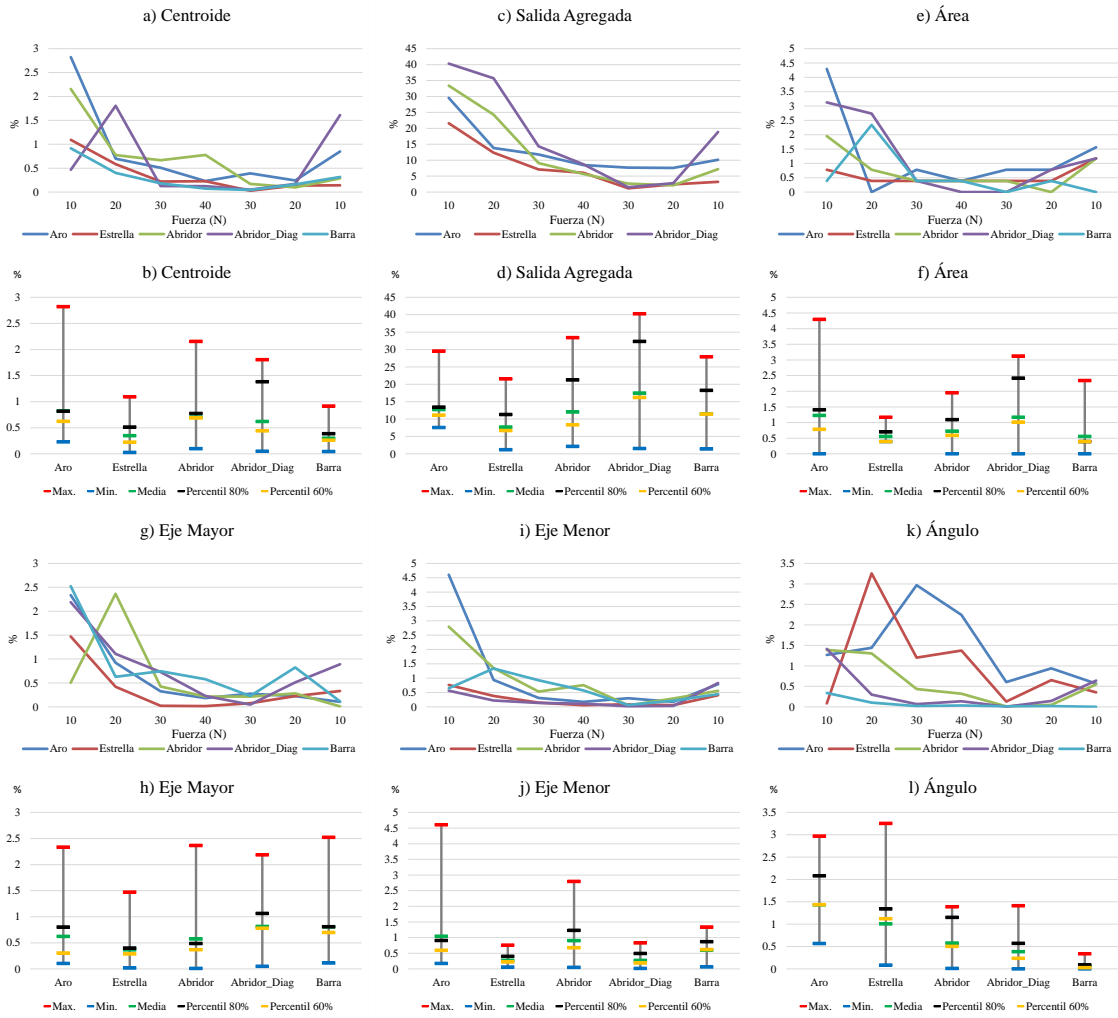


Figura 3-9. Variaciones de los parámetros provocados por la deriva del sensor basado en una PCB.



Figura 3-10. Variaciones de los parámetros provocados por la deriva del sensor de Tekscan.

3.5. Influencia de la Dispersión en la Elipse

Para estudiar la influencia de la dispersión en los parámetros de la elipse, se utilizan los datos recogidos con el sensor de Tekscan debido a que el resto de errores presenta valores muy bajos, y por tanto, deben interferir muy poco en el error de dispersión. Para comprobar el efecto de la dispersión, se realizan pruebas con objetos con el sensor sin equilibrar, y posteriormente equilibrado. Sin embargo, como se expuso en la sección 2.4.3.2, la duración del equilibrado es efímera en el momento que se manipula el sensor. Debido a que la manipulación de los objetos sobre el sensor llevaría a esta pérdida de equilibrado, la comprobación del efecto de la dispersión no se puede realizar

experimentalmente, por lo que se propone un método mixto o indirecto para su evaluación.

El experimento consiste en registrar la salida del sensor para una serie de 10 presiones uniformes aplicadas con la plataforma neumática sobre el sensor de Tekscan. Estas presiones tomaron los valores 2.1, 4.3, 6.2, 8.3, 9.7, 12.3, 13.7, 16.2, 17.7 y 20.1 psi. Para cada una de estas presiones, la imagen de salida de todo el sensor, se equilibra con el software de I-Scan y se guarda. De este modo, para cada una de las presiones uniformes aplicadas sobre la superficie del sensor, se tienen las imágenes almacenadas en bruto sin equilibrar, y las imágenes equilibradas. Posteriormente, para obtener los datos correspondientes a cada uno de los objetos o geometrías, se aplica una máscara binaria a las imágenes descritas anteriormente. Esta máscara se ha obtenido de lecturas del sensor con una fuerza uniforme ejercida sobre el objeto en las pruebas de determinación de la histéresis.

Tabla 3-5. Imágenes táctiles para el objeto *abridor* con y sin equilibrado.

Presión:	2.1 PSI	4.3 PSI	6.2 PSI	8.3 PSI	9.7 PSI
Imagen No Equilibrada →					
Imagen Equilibrada →					
Presión:	12.3 PSI	13.7 PSI	16.2 PSI	17.7 PSI	20.1 PSI
Imagen No Equilibrada →					
Imagen Equilibrada →					

Los resultados obtenidos de la dispersión para el objeto *abridor* en posición vertical, son mostrados Tabla 3-5. El mismo experimento es realizado con los demás objetos y las variaciones de los parámetros de la Tabla 3-1 se presentan en las gráficas de la Figura 3-11. Aparte de la magnitud de los errores que se utilizará para comparar esta fuente de error con las demás, no se pueden extraer conclusiones claras de la Figura 3-11.



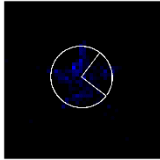
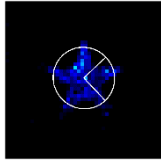
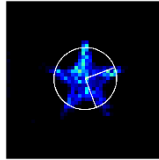
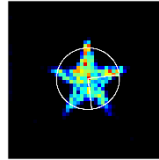
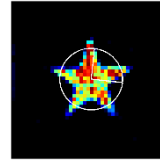
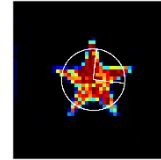
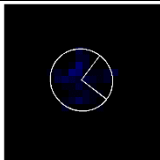
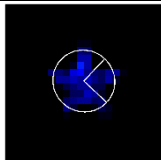
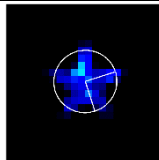
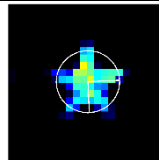
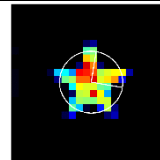
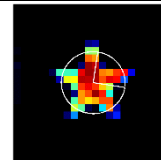
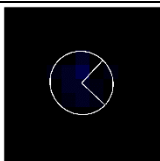
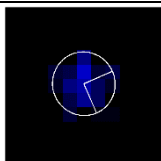
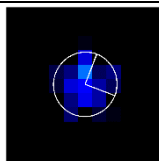
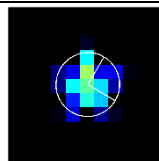
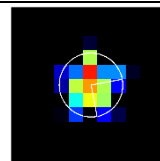
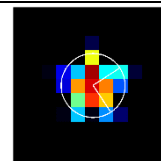
Figura 3-11. Variaciones de los parámetros provocadas por el error de dispersión en el sensor de Tekscan.

Por último, hay que indicar que ya que el propósito de este trabajo es explorar el impacto de las diferentes fuentes de error y no comparar los sensores en sí mismos, el sensor comercial de Tekscan se utilizó para obtener los resultados de esta sección debido a su muy buen comportamiento en términos de linealidad, histéresis o deriva, permitiendo así un cierto aislamiento de la influencia del error de dispersión con respecto a los demás.

3.6. Influencia del Cambio de Resolución en la Elipse

Finalmente, se realizan unos experimentos para comprobar el efecto de la resolución limitada del sensor en los parámetros de control de la Tabla 3-1. Para ello, se utiliza el sensor de Tekscan con el fin de registrar su salida bajo diferentes fuerzas ejercidas sobre distintos objetos con la plataforma neumática. Una vez obtenidas las imágenes táctiles, se reduce la resolución para volver a calcular los parámetros de control. Se aplica un filtro a la imagen, de forma que cuatro tácteles adyacentes se fusionan para ser sustituidos por un solo táctel virtual calculado como la media de las salidas de los tácteles originales. De esta forma se consigue la imagen táctil de un sensor con la resolución reducida al 50% del original. Puesto que el sensor de Tekscan, tiene una resolución de 44×44 tácteles, con la reducción al 50% obtenemos un sensor virtual de 22×22 tácteles. Posteriormente, a partir de los datos reales del sensor, se fusionan los tácteles en grupos de nueve para conseguir un sensor virtual con una resolución reducida al 25%, es decir, de 11×11 tácteles.

Tabla 3-6. Imágenes táctiles del objeto estrella obtenidas con el sensor de Tekscan junto con las imágenes obtenidas tras aplicar una reducción de la resolución al 50% y al 25%.

Fuerza (N)	2.04	6.01	9.92	19.80	29.80	35.75
44x44 →						
22x22 → (50%)						
11x11 → (25%)						

Las imágenes táctiles obtenidas para el objeto estrella se muestran en la Tabla 3-6, mientras que las variaciones de los parámetros de la Tabla 3-1 para todos los objetos utilizados en las pruebas, se muestran en la Figura 3-12 para una reducción de la resolución al 50%, y en la Figura 3-13 para una reducción al 25%. Se observa un

comportamiento bastante uniforme de todos los parámetros en estas figuras, aunque las variaciones más altas se producen para fuerzas bajas en las que la huella del objeto no está bien definida todavía. Sí se observan valores de la variación bastante grandes para los parámetros *Centroide*, *Salida Agregada* y *Área*, mientras que los errores son menores en la estimación de la forma del objeto (ejes de la elipse), y muy pequeños para la orientación (parámetro *Ángulo*), excepto en el caso del objeto *estrella*, para el que se produce un impacto significativo de la reducción de la resolución sobre los parámetros de la elipse.

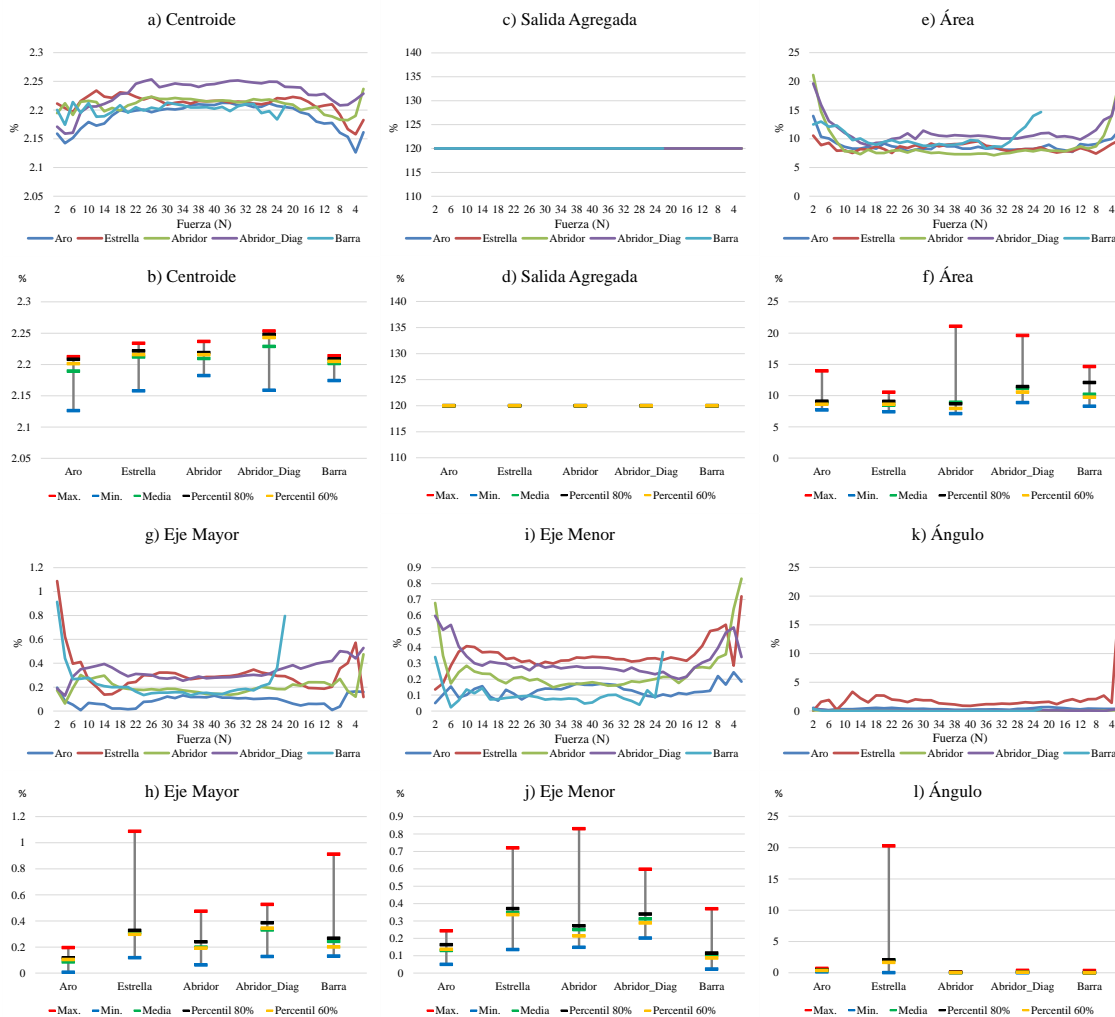


Figura 3-12. Variaciones de los parámetros provocados por una disminución al 50% de la resolución de las imágenes táctiles obtenidas con el sensor de Tekscan.

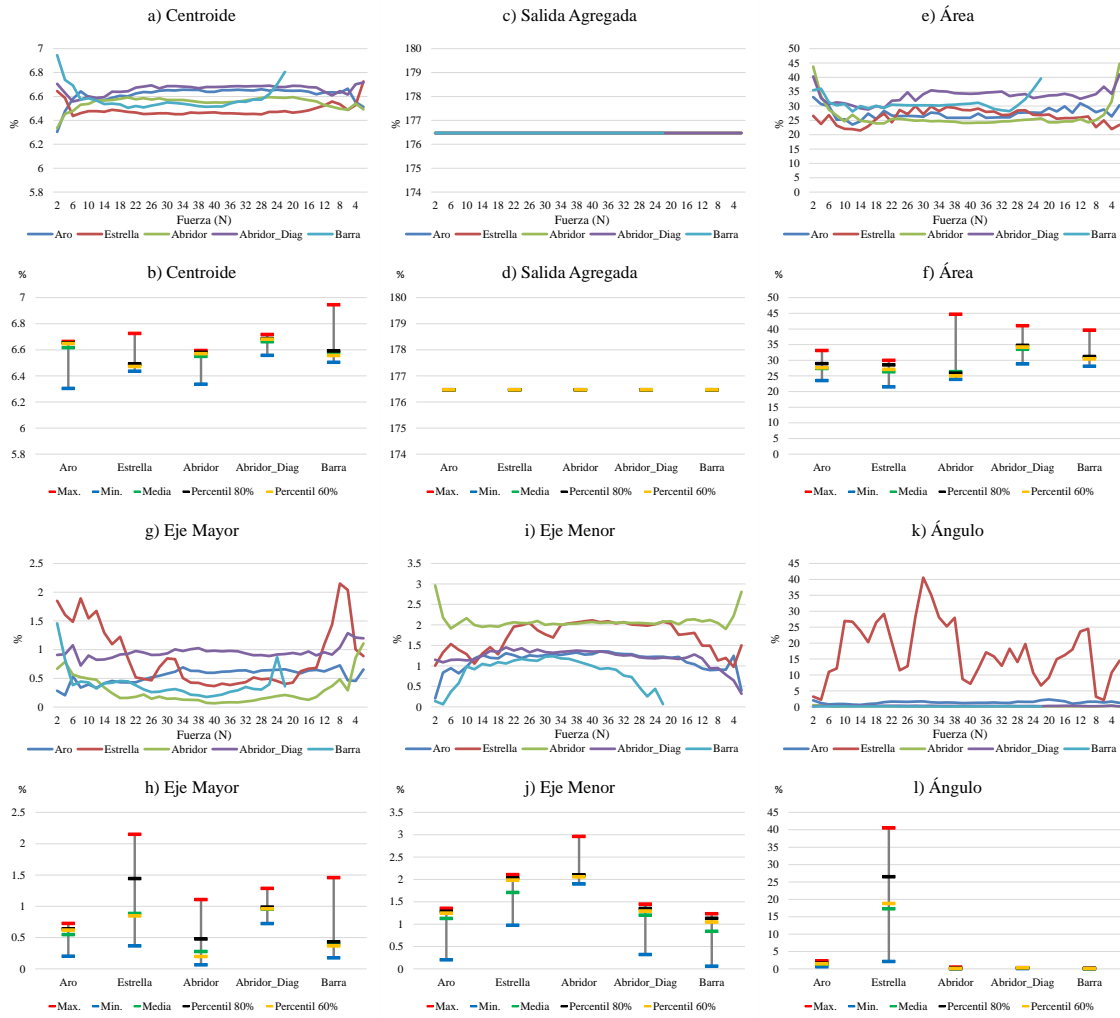


Figura 3-13. Variaciones de los parámetros provocados por una disminución al 25% de la resolución de las imágenes táctiles obtenidas con el sensor de Tekscan.

3.7. Análisis de Resultados y Conclusiones sobre la Influencia de los Errores en la Elipse

Como se ha comentado en la introducción de este capítulo, el objetivo fundamental del estudio de los errores en los sensores táctiles es ver la influencia que ejercen estas no idealidades comunes en ciertos parámetros de alto nivel. Además de algunas conclusiones parciales ya comentadas anteriormente, esta sección tiene como objetivo comparar el efecto que producen sobre los parámetros de la elipse las diferentes fuentes de error. Para este propósito, se resumen y reorganizan algunos datos en la Tabla 3-7 y en la Tabla 3-8. Además, la misma información se muestra gráficamente en la Figura 3-14 y en la Figura 3-15. Estas tablas y figuras muestran las variaciones relativas causadas por la histéresis, la deriva, la dispersión, y la resolución espacial limitada sobre los parámetros de la Tabla 3-1 calculados para los objetos de la Figura 3-3(a). La información reflejada en la Tabla 3-8 y en la Figura 3-15 se obtiene a partir del conjunto completo de datos, mientras que la mostrada en la Tabla 3-7 y en la Figura 3-14 se obtiene a partir del percentil 80 de los datos. Hay que resaltar, que en las secciones anteriores se encontraron grandes variaciones de los parámetros para fuerzas pequeñas debido a que las imágenes táctiles, para estos niveles de fuerza, no definían completamente la huella de los objetos, por lo que las conclusiones no pueden ser lo suficientemente fiables. Por tanto, la discusión se centra principalmente en los resultados obtenidos para el percentil 80 de los datos con el fin de eliminar estos valores atípicos indicados anteriormente. A continuación, se analizan cada uno de los parámetros de la Tabla 3-1.

Tabla 3-7. Comparación de la influencia de diferentes no idealidades en los parámetros de la Tabla 3-1 (percentil 80%).

CENTROIDE	Anillo	Estrella	Abridor	Abridor Diag.	Barra
Histéresis Sensor PCB	0,62	0,54	1,21	0,49	0,48
Deriva Sensor PCB	0,82	0,51	0,78	1,38	0,38
Deriva Sensor Tekscan	0,35	0,12	0,14	0,18	0,21
Dispersión Tekscan	0,83	0,30	1,23	0,58	0,68
50% Resolución Tekscan	2,21	2,22	2,22	2,25	2,21
25% Resolución Tekscan	6,65	6,49	6,58	6,69	6,59
SALIDA AGREGADA	Anillo	Estrella	Abridor	Abridor Diag.	Barra
Histéresis Sensor PCB	29,36	23,19	29,20	31,50	31,72
Deriva Sensor PCB	13,43	11,30	21,24	32,34	18,24
Deriva Sensor Tekscan	4,02	3,68	4,77	4,43	2,63
Dispersión Tekscan	5,14	5,13	3,85	3,99	3,67
ÁREA	Anillo	Estrella	Abridor	Abridor Diag.	Barra
Histéresis Sensor PCB	0,78	0,86	0,86	0,78	0,39
Deriva Sensor PCB	1,41	0,70	1,09	2,42	0,39
Deriva Sensor Tekscan	0,39	0,27	0,55	0,20	1,41
Dispersión Tekscan	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
50% Resolución Tekscan	9,10	9,08	8,69	11,45	12,11
25% Resolución Tekscan	28,91	28,52	25,88	34,79	31,17
EJE MAYOR	Anillo	Estrella	Abridor	Abridor Diag.	Barra
Histéresis Sensor PCB	1,78	1,72	1,10	1,38	4,73
Deriva Sensor PCB	0,80	0,40	0,49	1,06	0,81
Deriva Sensor Tekscan	0,17	0,33	0,32	0,26	0,88
Dispersión Tekscan	1,22	0,51	0,58	0,61	1,67
50% Resolución Tekscan	0,12	0,33	0,24	0,39	0,27
25% Resolución Tekscan	0,64	1,44	0,48	0,99	0,43
EJE MENOR	Anillo	Estrella	Abridor	Abridor Diag.	Barra
Histéresis Sensor PCB	1,62	1,26	0,68	1,85	2,28
Deriva Sensor PCB	0,91	0,40	1,23	0,49	0,87
Deriva Sensor Tekscan	0,07	0,24	0,33	0,67	2,35
Dispersión Tekscan	1,27	0,76	1,34	0,23	0,12
50% Resolución Tekscan	0,16	0,37	0,27	0,34	0,12
25% Resolución Tekscan	1,29	2,04	2,10	1,35	1,13
ÁNGULO	Anillo	Estrella	Abridor	Abridor Diag.	Barra
Histéresis Sensor PCB	6,61	4,77	1,02	1,88	0,65
Deriva Sensor PCB	2,08	1,34	1,15	0,57	0,09
Deriva Sensor Tekscan	1,80	1,63	0,16	0,11	0,36
Dispersión Tekscan	6,55	10,08	0,63	0,52	0,11
50% Resolución Tekscan	0,49	2,06	0,09	0,12	0,02
25% Resolución Tekscan	1,67	26,52	0,13	0,32	0,14

Tabla 3-8. Comparación de la influencia de diferentes no idealidades en los parámetros de la Tabla 3-1 (desviación máxima).

CENTROIDE	Anillo	Estrella	Abridor	Abridor Diag.	Barra
Histéresis Sensor PCB	6,04	3,28	12,76	5,28	0,94
Deriva Sensor PCB	2,82	1,09	2,16	1,81	0,91
Deriva Sensor Tekscan	0,41	0,23	0,16	0,53	0,47
Dispersión Tekscan	1,12	0,72	1,42	0,64	1,81
50% Resolución Tekscan	2,21	2,23	2,24	2,25	2,21
25% Resolución Tekscan	6,66	6,73	6,59	6,72	6,95
SALIDA AGREGADA	Anillo	Estrella	Abridor	Abridor Diag.	Barra
Histéresis Sensor PCB	60,60	40,72	65,77	48,44	43,29
Deriva Sensor PCB	29,56	21,58	33,41	40,30	27,88
Deriva Sensor Tekscan	5,88	5,89	6,44	8,08	6,79
Dispersión Tekscan	7,00	6,11	6,60	5,60	5,10
50% Resolución Tekscan	120,00	120,00	120,00	120,00	120,00
25% Resolución Tekscan	176,47	176,47	176,47	176,47	176,47
ÁREA	Anillo	Estrella	Abridor	Abridor Diag.	Barra
Histéresis Sensor PCB	5,47	1,56	7,42	2,73	0,78
Deriva Sensor PCB	4,30	1,17	1,95	3,13	2,34
Deriva Sensor Tekscan	0,49	0,68	0,68	0,29	2,15
Dispersión Tekscan	0,59	0,20	0,78	0,39	0,29
50% Resolución Tekscan	13,96	10,55	21,09	19,63	14,65
25% Resolución Tekscan	33,11	29,98	44,73	41,02	39,65
EJE MAYOR	Anillo	Estrella	Abridor	Abridor Diag.	Barra
Histéresis Sensor PCB	4,68	4,61	16,03	6,33	6,23
Deriva Sensor PCB	2,34	1,47	2,37	2,19	2,52
Deriva Sensor Tekscan	0,32	0,35	0,39	0,32	1,10
Dispersión Tekscan	1,28	2,51	1,18	0,67	1,93
50% Resolución Tekscan	0,20	1,09	0,48	0,53	0,91
25% Resolución Tekscan	0,73	2,15	1,11	1,29	1,46
EJE MENOR	Anillo	Estrella	Abridor	Abridor Diag.	Barra
Histéresis Sensor PCB	6,62	3,53	7,46	6,08	2,45
Deriva Sensor PCB	4,61	0,76	2,80	0,83	1,34
Deriva Sensor Tekscan	0,12	0,31	0,63	4,39	3,91
Dispersión Tekscan	1,45	1,04	1,58	0,57	0,42
50% Resolución Tekscan	0,24	0,72	0,83	0,60	0,37
25% Resolución Tekscan	1,36	2,11	2,96	1,45	1,24
ÁNGULO	Anillo	Estrella	Abridor	Abridor Diag.	Barra
Histéresis Sensor PCB	23,62	7,25	1,94	3,52	0,79
Deriva Sensor PCB	2,97	3,26	1,39	1,41	0,34
Deriva Sensor Tekscan	2,81	3,08	0,27	1,46	0,85
Dispersión Tekscan	8,14	11,22	0,67	0,70	0,17
50% Resolución Tekscan	0,70	20,27	0,14	0,40	0,37
25% Resolución Tekscan	2,31	40,54	0,52	0,36	0,18

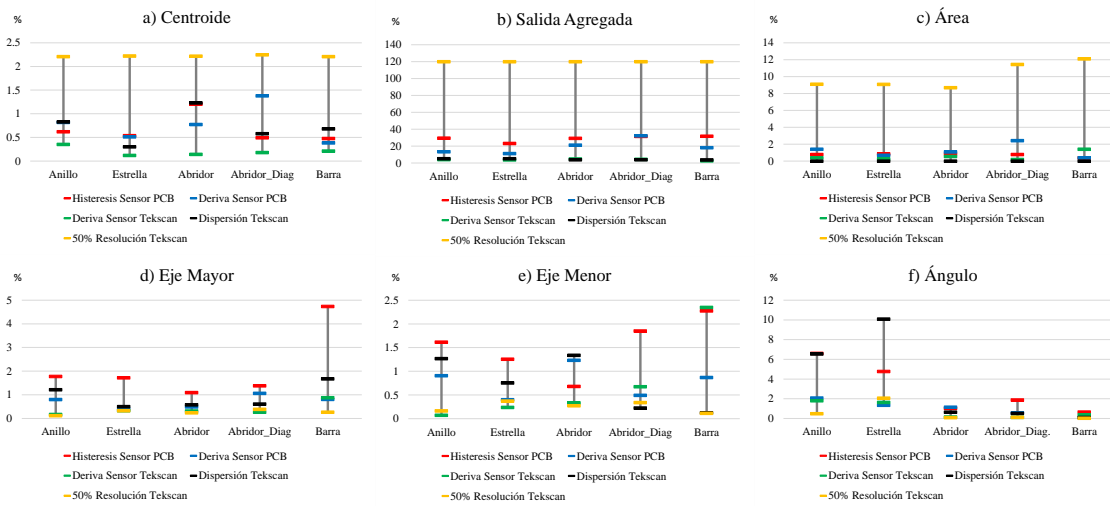


Figura 3-14. Comparación de la influencia de diferentes no idealidades en los parámetros de la Tabla 3-1 (percentil 80%).

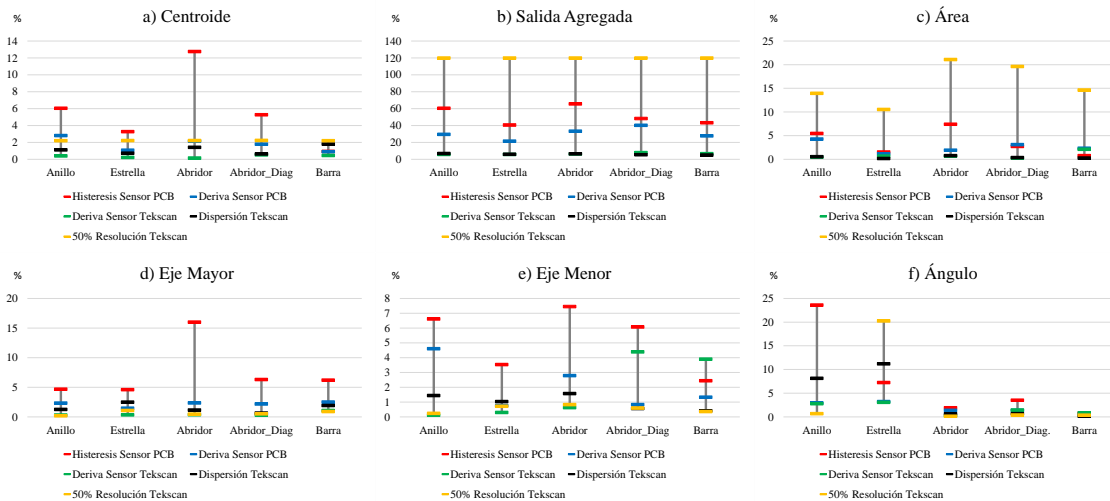


Figura 3-15. Comparación de la influencia de diferentes no idealidades en los parámetros de la Tabla 3-1 (desviación máxima).

El centroide (localización del contacto): La variación más grande es debida al error de la resolución espacial limitada. Es necesario destacar que una reducción de la resolución al 50%, consigue que se obtenga un sensor táctil cuya resolución sigue siendo mayor que la del sensor basado en una PCB. El cambio en la localización del centroide por esta razón es bastante mayor en comparación con las otras fuentes de error, cuyo efecto sobre el resultado presentan un grado similar, a excepción de la deriva del sensor de Tekscan, que no tiene prácticamente ninguna influencia.

Salida Agregada (fuerza de contacto): La histéresis y la deriva del sensor basado en una PCB tienen una gran influencia, por lo que la estimación de este parámetro tiene un error significativo para este sensor. La variación causada por la dispersión y la deriva del sensor de Tekscan es mucho más pequeña, pero bastante significativa en comparación con el efecto sobre otros parámetros. Para este parámetro, no tiene sentido observar el efecto de la resolución espacial limitada ya que únicamente introduce un factor de escala en todos los casos.

Área (tamaño del contacto): La mayor variación se produce por la resolución espacial limitada y su valor es bastante alto. La deriva del sensor basado en una PCB tiene una influencia moderada, y la de la histéresis es ligeramente más pequeña, mientras que la deriva del sensor de Tekscan tiene un efecto pequeño sobre este parámetro. Por otra parte, la dispersión no tiene ningún efecto considerando el percentil 80 ya que una vez que la fuerza es lo suficientemente alta, el objeto está bien definido en la imagen táctil y el área no cambia. Si tenemos en cuenta todo el conjunto de datos, tiene una baja influencia.

Ejes mayores y menores (forma del contacto y su tamaño): Aquí, la mayor variación se debe a la histéresis, pero el cambio debido a la dispersión está cerca, en términos generales. El error causado por la deriva del sensor basado en una PCB también es bastante similar pero más pequeño, mientras que la deriva del sensor de Tekscan tiene un impacto pequeño. También vale la pena destacar que la resolución espacial limitada cambia muy poco estos resultados.

Ángulo (orientación del contacto): Como se ha mencionado en los apartados anteriores, el efecto de los errores sobre la orientación es mayor en objetos con simetría radial que el observado en objetos con simetría axial. La histéresis tiene una muy alta influencia en este parámetro pero el efecto de la dispersión es aún más grande. El impacto de la deriva es menor pero no despreciable y tiene un valor similar en el sensor de Tekscan y en el sensor basado en una PCB. La resolución tiene una influencia similar, pero el cambio es mayor en la estrella que en el anillo, lo que parece lógico.

De acuerdo con lo expuesto anteriormente, el objetivo de este estudio es averiguar hasta qué punto algunos parámetros importantes utilizados en tareas de manipulación con manos robóticas obtenidos a partir de las imágenes táctiles generadas por los sensores táctiles, se ven afectados por las principales limitaciones y errores de estos sensores. Se

ha utilizado un sensor de bajo coste basado en una PCB propenso a errores así como un comercial con un mejor comportamiento en términos generales. En resumen, la histéresis y la deriva del sencillo sensor de bajo coste basado en una PCB provoca fundamentalmente el error en la estimación de la fuerza de contacto y también de la forma de contacto (ejes mayor y menor). Sin embargo, la influencia de la dispersión del sensor de Tekscan es similar en la estimación de la forma de contacto. Por otra parte, el error en la orientación de los objetos con simetría axial es pequeño en todos los casos, mientras que puede ser mayor si el objeto tiene simetría radial (aunque puede ser menos importante en este caso). Además, el impacto de la resolución espacial limitada está lejos de ser despreciable cuando se estiman la localización del contacto (centroide) y el tamaño (área).

Podemos concluir que hay fuentes de error que son difíciles de reducir en el caso de las manos robóticas tales como la dispersión y otros aceptados como la resolución espacial limitada, que tienen un impacto similar en los parámetros de alto nivel utilizados en robótica, a otras limitaciones como la histéresis o la deriva. Parece que los sensores simples de bajo coste son lo suficientemente buenos como para proporcionar información relacionada con la distribución espacial como la orientación, la forma o la localización del contacto, aunque no son buenos para proporcionar otras informaciones como la fuerza de contacto, que es la suma de las salidas de todos los táctiles. Por tanto, para este último caso es necesario emplear algoritmos de corrección, fundamentalmente para el error de no linealidad de histéresis, que reduzcan la alteración de los parámetros de alto nivel. Asimismo estos algoritmos mejoran la exactitud del resto de los datos relacionados con la distribución espacial, por tanto son una contribución a la mejora del rendimiento global de los sensores táctiles.

Capítulo 4. Aplicación a Sensores Táctiles de Algoritmos de Corrección de Errores

4.1. Introducción

En este capítulo se estudian algunas propuestas de otros autores para compensar los errores descritos en el Capítulo 1 y caracterizados en el Capítulo 2. Fundamentalmente, se analizan algoritmos desarrollados para la compensación del error de histéresis que sirven para corregir también los errores de no linealidad y de dispersión. Además, estos factores son los que introducen mayor error en la respuesta del sensor táctil. Se realiza la identificación de parámetros de los modelos de histéresis evaluados que permiten la aplicación de estos métodos a los bucles de histéresis del sensor táctil basado en una PCB caracterizado en el Capítulo 2. Los resultados serán evaluados y se extraídas unas conclusiones sobre su ajuste a los datos experimentales. Además, se compara la compensación de la histéresis mediante un modelo con otras soluciones menos complejas. Para el error de dispersión, en el apartado 2.4.3.2, se ha analizado la solución de equilibrado planteada por el fabricante Tekscan para sus sensores basados en matrices de táctiles. En esta tesis no se proponen algoritmos de corrección del error causado por la deriva, labor que se presume muy compleja a raíz de los datos experimentales obtenidos, y se deja como trabajo futuro.

La respuesta no lineal y con histéresis que presentan los sensores táctiles, es el principal error que influye sobre los parámetros de control utilizados en tareas de manipulación robótica. No se han encontrado algoritmos específicos para sensores táctiles, por lo que se ha recurrido fundamentalmente al estudio de propuestas realizadas para actuadores piezo-eléctricos. De entre todas las propuestas, destacan los algoritmos basados en los

denominados operadores *play*. Los más utilizados son los modelos de Prandtl-Ishlinskii, ya que son más sencillos de implementar y sus inversas se pueden calcular analíticamente.

En el apartado 1.4, se expone el procedimiento general de compensación de histéresis que se basa en la construcción de un modelo del bucle de histéresis que presenta el sensor táctil, para que una vez invertido, pueda ser aplicado en cascada con la salida del sensor y así obtener una respuesta que se ajuste con precisión al estímulo aplicado al sensor (ver Figura 1-9). El proceso de identificación de parámetros utiliza un conjunto de M muestras de valores de salida medidos del sensor táctil $\{y(t_1), \dots, y(t_j), \dots, y(t_M)\}$ para seleccionar el conjunto de parámetros que mejor configuren cada uno de los modelos de histéresis $H_m(p(t))$ a comparar en esta tesis. El vector de parámetros X puede ser derivado computacionalmente minimizando la función de error de la ecuación (1.1).

4.1.1. Operadores *Play*

Hay muchos fenómenos físicos que exhiben histéresis. Muchos sistemas se considera que presentan histéresis cuando esta es la característica predominante, pero es cierto que la histéresis también ocurre en otros muchos casos como un efecto secundario. Los mecanismos que gobiernan la aparición de la histéresis no son muchos y pueden ser representados por modelos de ingeniería denominados operadores [Visintin 1994]. Los operadores más característicos son: el operador de relé que describe el comportamiento con histéresis de un relé o de un interruptor; el operador *play* basado en la histéresis mostrada por el movimiento enlazado de dos carritos; o el operador stop que modela el comportamiento elástico de un muelle. Todos estos operadores producen relaciones de entrada-salida continuas. Para ilustrar el comportamiento de histéresis se va a describir el operador *play*, ya que es el más utilizado por los métodos dedicados a compensar las no linealidades de histéresis en sensores y actuadores basados en materiales inteligentes.

Para explicar el funcionamiento del operador *play*, se considera el dispositivo de la Figura 4-1(a), que representa la posición inicial de dos carritos que se mueven horizontalmente en el mismo plano vertical aunque a diferentes niveles. El carrito de arriba se mueve por una vía x que se corresponde con el eje de abscisas de un sistema de coordenadas. El carrito inferior, se mueve por otra vía y que corresponde al eje de ordenadas. El carrito de arriba arrastra al de abajo por medio de un eje vertical que se acopla a uno de los dos

extremos del carrito inferior. Suponiendo que la inercia está dominada por la fricción, y que por tanto es nula, la relación entre el eje de abscisas x y el eje de ordenadas y de los puntos A y B (posiciones centrales de cada carrito) se representan en los sistemas de coordenadas de la Figura 4-1 y de la Figura 4-2. En cada fila de estas figuras, se representa un tramo del movimiento de los carritos y su gráfica correspondiente hasta completar el bucle de histéresis.

La Figura 4-1(a), como se ha comentado anteriormente, representa la posición inicial en la que los dos carritos están alineados en la posición $(A,B) = (0,0)$. En el siguiente nivel, Figura 4-1(b), el carrito de arriba ha recorrido una distancia igual a r , denominado umbral del operador *play*, y que representa la distancia del centro del carrito inferior a uno de sus extremos, es decir, la anchura del operador. A partir de ese momento, Figura 4-1(c), el movimiento de los dos carritos es simultáneo y comienza la trayectoria ascendente del bucle de histéresis. Este movimiento conjunto de los dos elementos móviles, continúa hasta que el carrito de arriba se detiene e invierte el sentido de su trayectoria. A partir de ese momento, Figura 4-1(d), el carrito de arriba mantiene su movimiento, mientras que el inferior permanece detenido hasta que el eje de arrastre toque su otro extremo. Nuevamente, Figura 4-2(e), los dos carritos se mueven simultáneamente hasta que se vuelva a invertir el sentido del movimiento del carrito superior. La Figura 4-2(f) representa la vuelta del eje hacia el otro extremo, permaneciendo el carrito inferior inmóvil. Finalmente, el último tramo ascendente en Figura 4-2(g) lleva a cerrar el ciclo de histéresis completamente.

Como se puede observar, el comportamiento descrito es independiente de la velocidad con la que se mueven los carritos y el ciclo de histéresis puede aparecer si se completa el recorrido. Como vimos en el apartado 1.3.1, esta propiedad de independencia con la velocidad es una característica esencial de los bucles de histéresis, por lo que el operador *play* sirve para el modelado de sistemas que presenten no linealidades de histéresis.

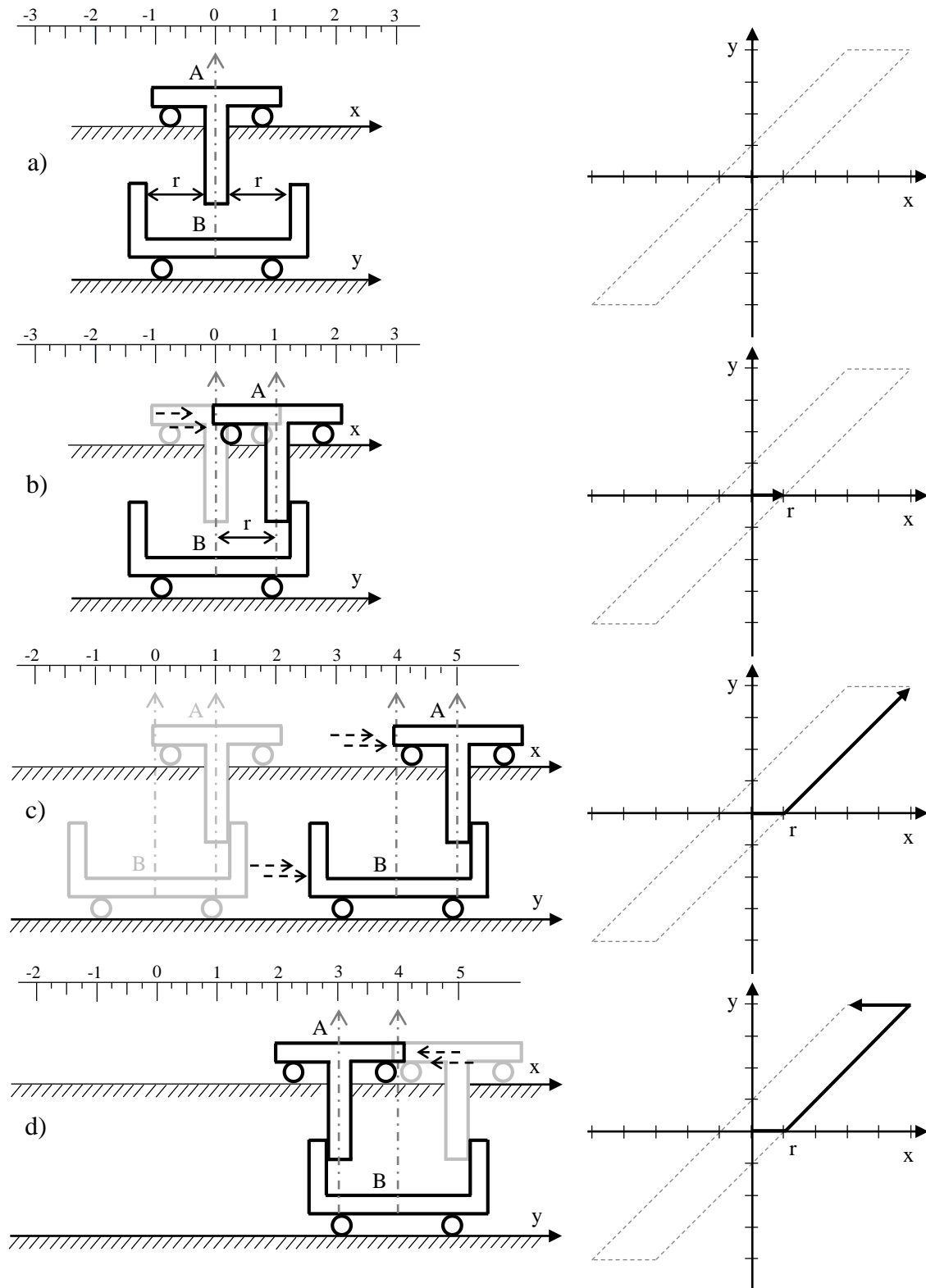


Figura 4-1. Mecanismo de carritos para describir el operador *play*. a) Posición inicial de los elementos del operador. b) Inicio de la trayectoria sin arrastre. c) Trayectoria con arrastre ascendente. d) Trayectoria de regreso sin arrastre.

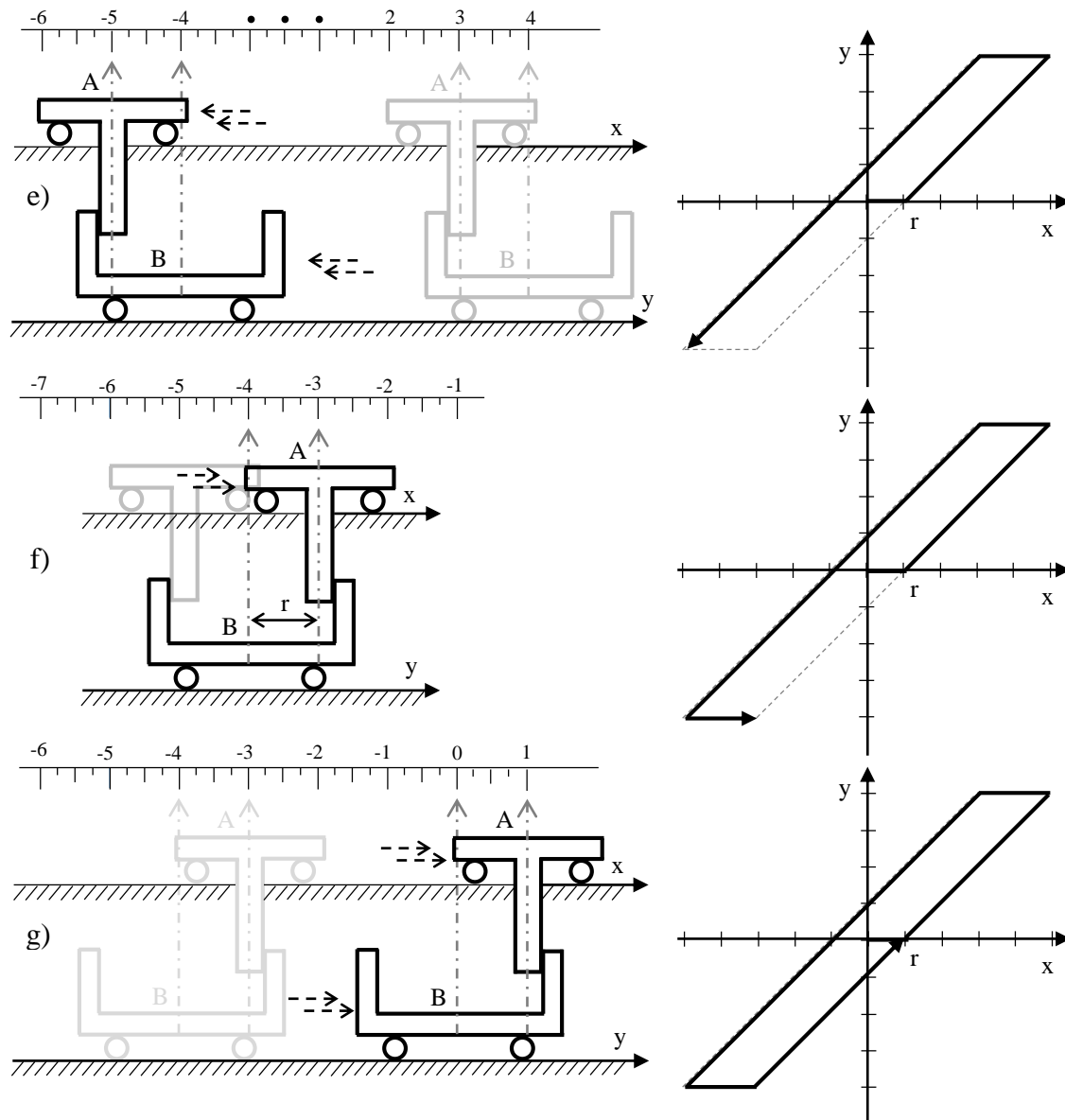


Figura 4-2. Mecanismo de carritos para describir el operador *play*. e) Trayectoria con arrastre descendente. f) Trayectoria de avance sin arrastre. g) Trayectoria con arrastre ascendente hasta cerrar el bucle de histéresis.

El comportamiento de histéresis descrito en las figuras anteriores, puede ser expresado en forma de operador [Brokate et al. 1996] para un umbral $r \geq 0$ y una señal de entrada x , como

$$y(t) = H_r[x](t) \tag{4.1}$$

Formalmente, esta función de salida es válida para cualquier función de entrada monótona a tramos $x: [0, t_E] \rightarrow \mathbb{R}$ y está definida inductivamente con

$$H_r[x](t_0) = H(x(t_0), y_0, r) \quad (4.2)$$

como condición inicial de la salida en el instante t_0 , y con

$$H_r[x](t) = H(x(t), H_r[x](t_i), r) \quad (4.3)$$

para $t_i < t \leq t_{i+1}$, $0 \leq i \leq N-1$, donde N es el número de muestras, y_0 es un valor inicial independiente de la salida y con

$$H(x, y, r) = \max\{x - r, \min\{x + r, y\}\} \quad (4.4)$$

donde $0 = t_0 < t_1 < \dots < t_N = t_E$ es una partición de $[0, t_E]$ tal que la función x es monótona en cada uno de los sub-intervalos $[t_i, t_{i+1}]$. Al operador H_r definido de esta forma, se le denomina operador *play* y su salida es continua e independiente de la velocidad. Obsérvese que el argumento del operador está escrito entre corchetes para indicar una dependencia funcional, ya que mapea una función a otra función.

4.1.2. Modelo Clásico de Prandtl-Ishlinskii

Las no linealidades de histéresis están relacionadas por la literatura matemática con el concepto de efecto de memoria independiente de la velocidad [Brokate et al. 1996; Mayergoyz 1991; Visintin 1994]. Esto significa que el valor de salida actual de un sistema con histéresis, no sólo depende del valor de la señal de entrada en el momento presente, sino que también depende del orden en el que se dan sus amplitudes, especialmente la de los valores extremos, y no de su velocidad en el pasado.

A principio del siglo XX, Madelung [Madelung 1905] investigó experimentalmente las ramificaciones y bucles de la histéresis ferromagnética que se derivan de la propiedad de memoria independiente de la velocidad y estableció las siguientes tres reglas a partir de sus observaciones (ver Figura 4-3):

- Cualquier curva C_1 que parta desde un punto de retorno A en la trayectoria de entrada-salida, está determinada únicamente por las coordenadas del punto A .
- Si cualquier punto B en la curva C_1 llega a convertirse en un nuevo punto de retorno, entonces se origina una nueva curva C_2 desde el punto B que regresa al punto A .

- Si la curva C_2 continua más allá del punto A , entonces seguirá por la continuación de la trayectoria C que llevó al punto A antes de que fuera atravesada por el ciclo C_1 - C_2 .

Además de estas tres reglas de Madelung, se observa una cuarta propiedad en materiales elasto-plásticos, ferroeléctricos, ferromagnéticos y en los bucles de histéresis de sensores o actuadores basados en materiales inteligentes. Esta propiedad, es la que diferencia las no linealidades de histéresis complejas de las no complejas, y se expresa como:

- Dado un punto D dentro de la región de histéresis Ω que no sea un punto extremo, puede ser atravesado por más de una rama que pertenezca a sub-ciclos internos diferentes.

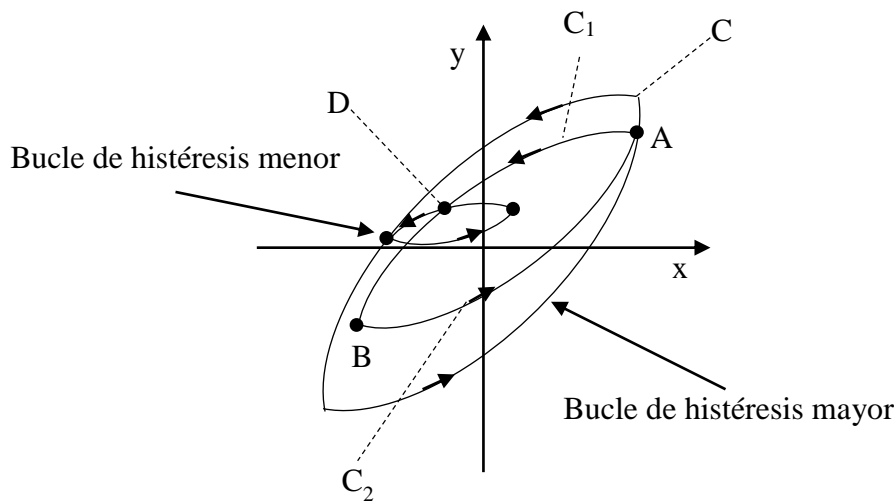


Figura 4-3. No linealidad de histéresis compleja.

Los operadores de histéresis, debido a su carácter fenomenológico, pueden ser empleados en el modelado de no linealidades de histéresis complejas sin tener en cuenta la física subyacente [Krasnosel'skii et al. 1989]. La idea básica consiste en construir un modelo de las histéresis complejas reales a partir de la superposición ponderada de varios operadores de histéresis elementales. Estos operadores elementales son no linealidades de histéresis no complejas basadas en estructuras matemáticas simples que pueden ser caracterizados por uno o varios parámetros.

El modelo clásico de Prandtl-Ishlinskii (*CPI*) sigue esta idea para modelar curvas de histéresis complejas [Kuhnen 2003; Kuhnen et al. 2001] basándose en uno de los

operadores elementales más conocidos e importantes, el operador *play* descrito en la sección anterior. Las ecuaciones (4.1), (4.2), (4.3) y (4.4) representan a un operador *play* caracterizado por el parámetro del umbral r , Figura 4-4.

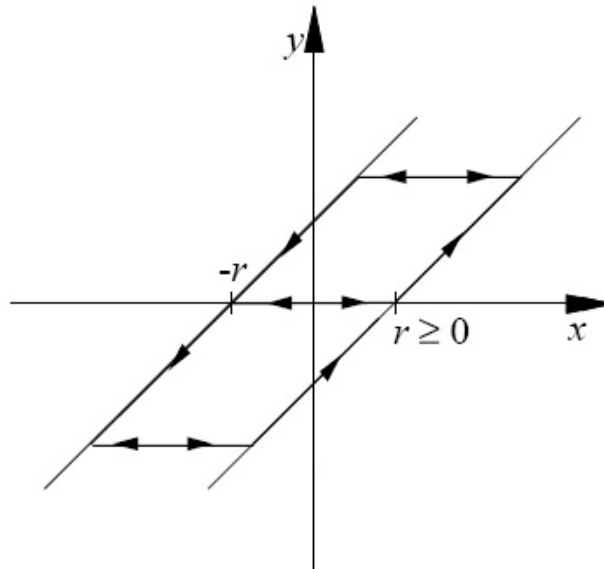


Figura 4-4. Operador *Play* Clásico.

El operador o modelo de Prandtl-Ishlinskii consiste en una superposición ponderada de muchos operadores *play* con diferentes valores de umbral. De acuerdo con este concepto, el nuevo operador queda definido como

$$y_{CPI}(t) = \int_0^R p(r) \cdot H_r[x](t) dr \quad (4.5)$$

donde $p(r)$ es una función de densidad integrable positiva que sirve como ponderación de los operadores *play*. Esta función de densidad normalmente se desvanece para valores altos de r , y es identificada a partir de datos experimentales obtenidos del sensor, actuador o material específico a modelar. Los umbrales r de los operadores son tomados como $0 = r_0 < r_1 < \dots < r_n = R$.

Esta expresión puede ser aproximada si se utiliza un número finito n de operadores, con lo que puede ser formulada como

$$y_{CPI}(t) = \sum_{i=0}^n p(r_i) \cdot H_{r_i}[x](t) \quad (4.6)$$

Para definir completamente el modelo, será necesario introducir un conjunto de valores iniciales en la expresión (4.2) $y_0 = (y_{00}, y_{01} \dots y_{0n})$, siendo n el número de operadores *play* a utilizar.

Por tanto, el modelo clásico de Prandtl-Ishlinskii será obtenido a partir de un conjunto de parámetros X que definen la función de densidad $p(r)$ y los valores de los umbrales de los operadores *play* r . La salida del modelo *CPI* $y_{CPI}(t)$, será utilizada en (1.1) para obtener este conjunto de parámetros X .

Aplicando los parámetros X al modelo *CPI*, se obtiene el modelo $H_{CPI}(p(t))$ de la Figura 1-9 como:

$$H_{CPI}(p(t)) = y_{CPI}(t) \quad (4.7)$$

Una vez obtenido el modelo directo clásico de Prandtl-Ishlinskii, es necesario invertirlo para poder compensar las no linealidades de histéresis del sensor o actuador como último paso en el esquema de la Figura 1-9. Sin embargo, el modelo *CPI* no es adecuado a las características mostradas por los bucles de histéresis del sensor táctil objeto de estudio en este trabajo. Observando el esquema de la Figura 4-4, se observa que el operador *play* es simétrico en su concepción, por lo que el modelo de Prandtl-Ishlinskii clásico *CPI* sirve para modelar curvas de histéresis simétricas, pero presenta serios problemas para modelar bucles de histéresis con ciertas asimetrías. Como se puede observar en la Figura 2-19, el bucle de histéresis del sensor táctil basado en una PCB presenta una marcada asimetría en su forma, por lo que es necesario buscar alternativas que ajusten el modelo con más precisión a los datos obtenidos experimentalmente.

4.2. Modelo Generalizado de Prandtl-Ishlinskii

El modelo generalizado de Prandtl-Ishlinskii (*GPI*) [Al Janaideh et al. 2011] proporciona un modelo para $H(p(t))$ en el esquema de la Figura 1-9, denominado $H_{GPI}(p(t))$. Este modelo propone una modificación del modelo clásico de Prandtl-Ishlinskii (*CPI*) mediante la incorporación al operador *play* de unas funciones envolventes que generalizan su comportamiento. El nuevo modelo se obtiene a partir de una superposición ponderada de un conjunto de operadores *play* generalizados con diferentes valores de

umbral r , con $r \in R_0^+$. Ya que la curva de histéresis del sensor táctil (ver Figura 2-19) es marcadamente asimétrica, es necesario utilizar estos operadores generalizados (ver Figura 4-5) frente a los clásicos operadores *play*. Nótese que un incremento de la señal de entrada, corresponde con un incremento de la salida a lo largo de la curva γ_l , mientras que una disminución de la señal de entrada corresponde con una disminución de la salida a lo largo de la curva γ_r . Ambas curvas son diferentes, por lo que se deben modelar unos bucles asimétricos. Las únicas condiciones son que estas funciones denominadas envolventes, γ_l y γ_r , sean funciones monótonas y continuas con $\gamma_l - r \leq \gamma_r + r$.

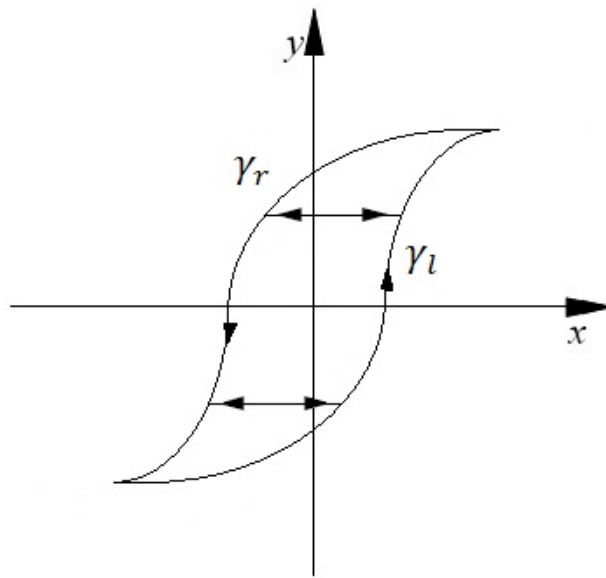


Figura 4-5. Operador *Play* Generalizado.

El operador generalizado de la Figura 4-5 se define a partir de las ecuaciones del operador *play* clásico (4.2) y (4.3), pero la expresión (4.4) es reemplazada por la siguiente ecuación

$$H(x, y, r) = \max \{ \gamma_l(x) - r, \min \{ \gamma_r(x) + r, y \} \} \quad (4.8)$$

donde H es la función generalizada del modelo definida a partir de las funciones envolventes γ_l y γ_r .

La salida del modelo generalizado de Prandtl-Ishlinskii cuando se utiliza un número finito n de operadores, queda expresada por tanto como

$$y_{GPI}(t) = \sum_{i=0}^n p(r_i) \cdot H_{r_i}[x](t) \quad (4.9)$$

De esta forma, el modelo generalizado de Prandtl-Ishlinskii será obtenido a partir de un conjunto de parámetros X que definen las funciones envolventes γ_l y γ_r , la función de densidad $p(r)$ y los valores de los umbrales de los operadores $play r$. La salida del modelo GPI $y_{GPI}(t)$, será utilizada en (1.1) para obtener este conjunto de parámetros X .

Aplicando los parámetros X al modelo GPI , se obtiene el modelo $H_{GPI}(p(t))$ de la Figura 1-9 como:

$$H_{GPI}(p(t)) = y_{GPI}(t) \quad (4.10)$$

Una vez obtenido el modelo directo GPI del sensor o actuador, es necesario realizar la inversión del modelo para compensar sus no linealidades de histéresis. Este paso es el último en el esquema de la Figura 1-9. Una vez que se obtenga el modelo inverso, este mapeará la salida proporcionada por el sensor para generar la nueva salida $p_m(t)$, que idealmente será lineal y no presentará histéresis.

La inversa del modelo generalizado de Prandtl-Ishlinskii también es un modelo de Prandtl-Ishlinskii [Al Janaideh et al. 2011], por lo que es posible escribir la salida del modelo como

$$x_{GPI}(t) = \sum_{i=0}^n p'(r'_i) \cdot H_{r'_i}^{-1}[y](t) \quad (4.11)$$

donde H^{-1} es el operador generalizado inverso, p' es la función de densidad y r' son los umbrales del nuevo modelo inverso.

El operador inverso generalizado puede ser expresado de forma similar al modelo directo como

$$H_{r'}^{-1}[y](t) = H^{-1}(y(t), H_{r'}^{-1}[y](t_i), r') \quad (4.12)$$

para $t_i < t \leq t_{i+1}$, $0 \leq i \leq N-1$, donde N es el número de muestras y con la condición inicial para la señal de salida en el instante t_0 dada por

$$H_{r'}^{-1}[y](t_0) = H^{-1}(y(t_0), x_0, r') \quad (4.13)$$

donde x_0 es un valor inicial independiente de la salida y H^{-1} es la función generalizada inversa definida a partir de las funciones envolventes γ_l^{-1} y γ_r^{-1} como

$$H^{-1}(y, x, r') = \max\{\gamma_l^{-1}(y) - r', \min\{\gamma_r^{-1}(y) + r', x\}\} \quad (4.14)$$

Los umbrales del modelo inverso son positivos y están relacionados con los umbrales del modelo directo mediante la siguiente ecuación

$$r_j' = \sum_{i=0}^j p(r_i) \cdot (r_j - r_i) \quad (4.15)$$

donde $j = 0, 1, 2, 3, \dots, n$, siendo n el número de operadores *play*.

La función de densidad del modelo inverso calcula los valores de los pesos que ponderan los operadores *play* a partir de la función de densidad del modelo directo para $j = 0, 1, 2, 3, \dots, n$ como

$$p'(r_j) = - \frac{p(r_j)}{\left(p(r_0) + \sum_{i=1}^j p(r_i)\right) \cdot \left(p(r_0) + \sum_{i=1}^{j-1} p(r_i)\right)} \quad (4.16)$$

y

$$p'(r_0) = - \frac{1}{p(r_0)} \quad (4.17)$$

4.2.1. Identificación de Parámetros del Modelo GPI

Para completar la definición del modelo *GPI* de la expresión (4.9), es necesario especificar las funciones envolventes, la función de densidad y la forma de obtener los umbrales de los operadores *play* para conseguir un ajuste preciso del modelo a los datos experimentales. Este último paso, dependerá de la forma concreta del bucle de histéresis del sensor, actuador o material a modelar, y será determinado por el diseñador del modelo.

Para los resultados de este trabajo, los umbrales de los operadores y la función de densidad son tomados de [Al Janaideh et al. 2011] y sus expresiones son

$$r_i = \alpha \cdot i \quad (4.18)$$

donde $i = 0, 1, 2, \dots, n$ y α es una constante real positiva, y

$$p(r_i) = \rho \cdot e^{-\tau \cdot r_i} \quad (4.19)$$

donde $\rho > 0$ y τ son constantes reales.

Resaltar que la función de densidad $p(r)$ se desvanece para valores altos del umbral r y que no existe un criterio general para su selección. Generalmente, se selecciona completamente por el diseñador. Una vez que la estructura de la función de densidad $p(r)$ está fijada, los parámetros que intervienen en la función de densidad serán determinados por el proceso de identificación a partir de datos experimentales. El parámetro α para establecer los valores de los umbrales de los operadores, también será identificado mediante el mismo método.

En cuanto a la elección del número de operadores n , desde el punto de vista teórico, la selección de un número mayor de operadores debería conseguir una descripción más precisa de los bucles de histéresis. Sin embargo, en aplicaciones reales, se comprueba que un aumento del número de operadores no mejora la precisión del ajuste de forma significativa. Ya que la complejidad del modelo se ve aumentada con el número de operadores *play* empleados, es recomendable utilizar el menor número posible de operadores siempre que se consiga un ajuste del modelo a los datos medidos suficientemente preciso.

La elección de las funciones envolventes utilizadas en la expresión (4.8), resulta determinante para que el ajuste sea preciso ya que son los elementos que dan forma al bucle de histéresis final. Debido a esto, se han realizado experimentos para determinar la estructura de estas funciones envolventes y para seleccionar el número de operadores *play* adecuado para los propósitos expuestos. Este proceso de selección está explicado en la siguiente sección 4.2.2.

De acuerdo con tales experimentos realizados para el mismo sensor utilizado en esta tesis, es suficiente el empleo de $n = 4$ operadores *play* en la implementación del modelo *GPI*, y las funciones envolventes seleccionadas se escriben mediante las siguientes expresiones:

$$\gamma_l(x) = a_3 - a_0 \cdot e^{(a_2 - a_1 \cdot x)} \quad (4.20)$$

$$\gamma_r(x) = b_3 - b_0 \cdot e^{(b_2 - b_1 \cdot x)} \quad (4.21)$$

donde $a_0 > 0$, $a_1 > 0$, $a_2, a_3, b_0 > 0$, $b_1 > 0$, b_2, b_3 son constantes reales.

Estas funciones envolventes basadas en funciones exponenciales proporcionan un buen ajuste, con una complejidad computacional media con respecto a otras alternativas como las basadas en funciones de tangentes hiperbólicas.

4.2.2. Selección de Funciones Envolventes para el Modelo GPI

Para la selección de las funciones envolventes γ_l y γ_r a utilizar en el método *GPI*, la función hiperbólica está indicada en [Al Janaideh et al. 2011] como un buen punto de partida. Además, se van a estudiar otras dos propuestas basadas en la función exponencial, y en una función lineal con control de la saturación [Sánchez-Durán et al. 2011, 2012]. Las tres propuestas son las siguientes:

- a. Funciones envolventes hiperbólicas

$$\gamma_l(x) = a_0 \tanh(a_1 \cdot x + a_2) + a_3 \quad (4.22)$$

$$\gamma_r(x) = b_0 \tanh(b_1 \cdot x + b_2) + b_3 \quad (4.23)$$

donde $a_0 > 0$, $a_1 > 0$, $a_2, a_3, b_0 > 0$, $b_1 > 0$, b_2, b_3 son constantes reales.

- b. Funciones envolventes exponenciales

$$\gamma_l(x) = a_3 - a_0 \cdot e^{(a_2 - a_1 \cdot x)} \quad (4.24)$$

$$\gamma_r(x) = b_3 - b_0 \cdot e^{(b_2 - b_1 \cdot x)} \quad (4.25)$$

donde $a_0 > 0$, $a_1 > 0$, $a_2, a_3, b_0 > 0$, $b_1 > 0$, b_2, b_3 son constantes reales.

- c. Funciones envolventes lineales y saturadas

$$\gamma_l(x) = a_1 \cdot x + a_0, \quad 0 \leq \gamma_l(x) \leq \max(y) \quad (4.26)$$

$$\gamma_r(x) = b_1 \cdot x + b_0, \quad 0 \leq \gamma_r(x) \leq \max(y) \quad (4.27)$$

donde a_0 , a_1 , b_0 y b_1 son constantes reales e y es la salida medida en el sensor.

Para evaluar la eficiencia de las anteriores propuestas para corregir los errores de histéresis observados en la salida del sensor táctil, se realizó el siguiente experimento. Primero, se utilizó la plataforma de medidas descrita en la sección 2.3.1 para obtener la salida del sensor Figura 2-19 aplicando una secuencia de presiones uniformes sobre su superficie. Se configuran seis ciclos donde la presión va alternativamente aumentando y disminuyendo. Una vez que los datos experimentales son obtenidos, el primer paso para compensar la histéresis es encontrar el modelo $H_m(p(t))$ de la Figura 1-9. En este caso, ya que se trata de un problema de identificación de parámetros no lineal, se utiliza la función de mínimos cuadrados *lsqnonlin* de la librería de optimización de Matlab (ver apartado 1.4.1), para minimizar la función de error (1.1) y obtener el conjunto de parámetros $X = \{a_0, a_1, a_2, a_3, b_0, b_1, b_2, b_3, \alpha, \rho, \tau\}$ del modelo generalizado *GPI* para las distintas funciones envolventes definidas anteriormente. Las siguientes figuras (Figura 4-6 a Figura 4-11) muestran los resultados obtenidos con este procedimiento. En cada una de ellas, se representan en la gráfica *a*) los datos de salida obtenidos del sensor (en rojo) y el modelo obtenido con el método *GPI* (en azul) y la combinación de funciones envolventes y número de operadores elegidos para el caso. Estas curvas se representan en función de la presión de entrada ejercida. En la gráfica *b*) se muestran los operadores *play* generalizados para cada uno de los umbrales calculados. En la gráfica *c*), se observan los datos medidos (en rojo), la salida del modelo (en azul) y el error cometido por el modelo (en negro). Finalmente, en la gráfica *d*), se observa un zoom del error cometido. La Tabla 4-1 contiene los valores de los parámetros encontrados para cada caso y la Tabla 4-2 resume los resultados estimando los errores cometidos por cada uno de los modelos propuestos.

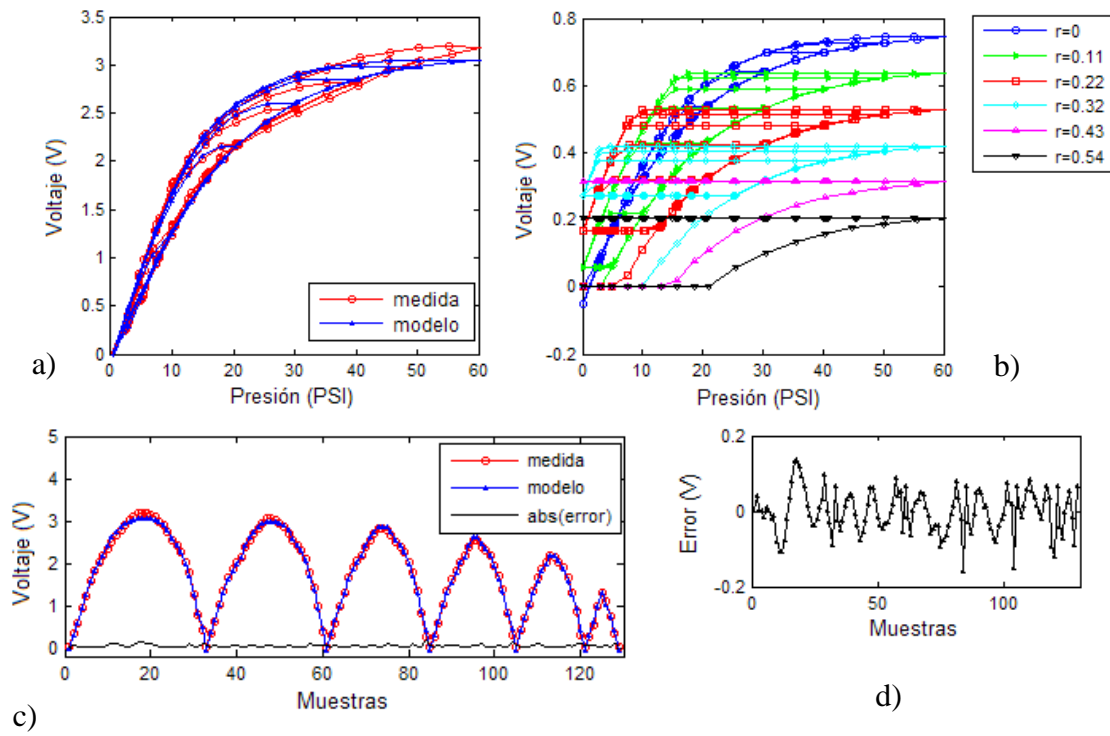


Figura 4-6. Resultados con funciones envolventes del tipo tangente hiperbólica y seis operadores. a) Modelo GPI. b) Operadores play. c) Muestras medidas, obtenidas con el modelo y valor absoluto del error. d) Zoom del error cometido.

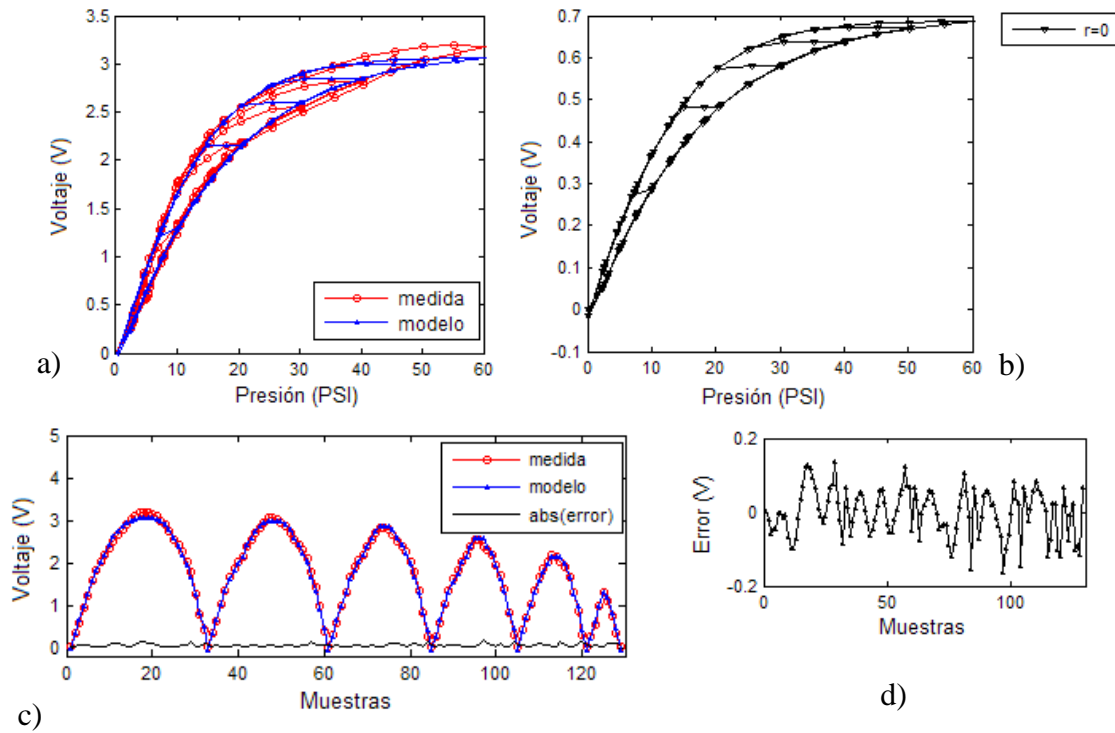


Figura 4-7. Resultados con funciones envolventes del tipo tangente hiperbólica y un sólo operador. a) Modelo GPI. b) Operadores play. c) Muestras medidas, obtenidas con el modelo y valor absoluto del error. d) Zoom del error cometido.

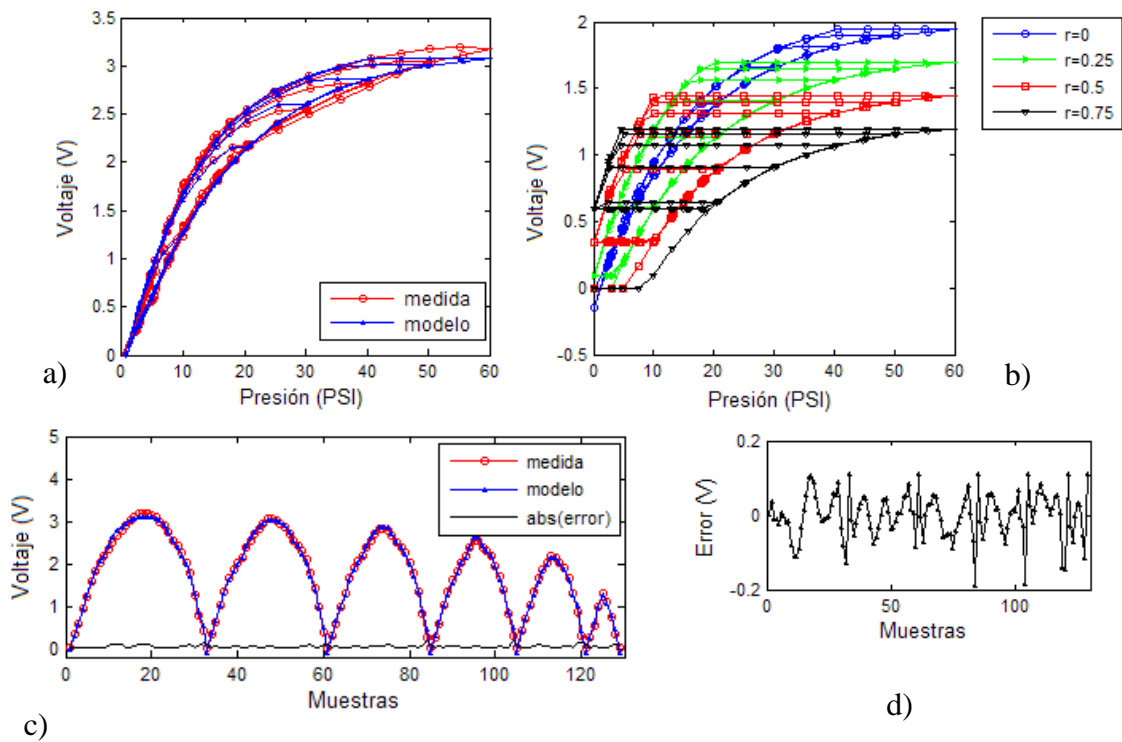


Figura 4-8. Resultados con funciones envolventes del tipo exponencial y cuatro operadores. a) Modelo GPI. b) Operadores play. c) Muestras medidas, obtenidas con el modelo y valor absoluto del error. d) Zoom del error cometido.

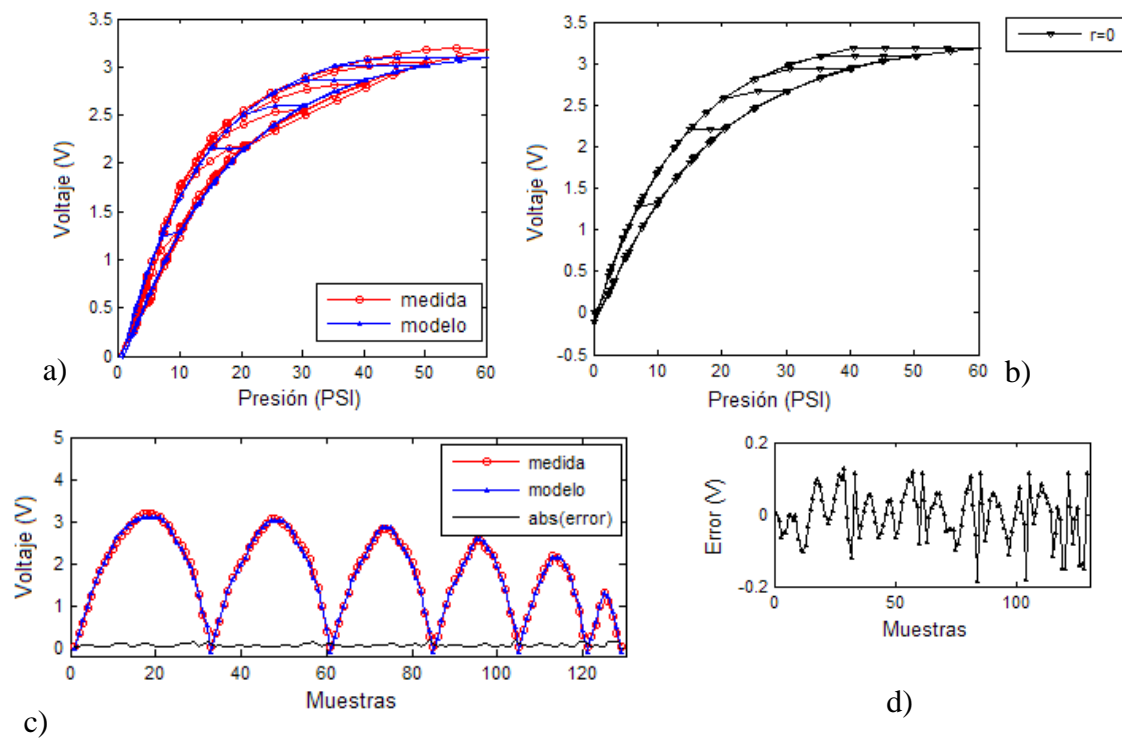


Figura 4-9. Resultados con funciones envolventes del tipo exponencial y un solo operador. a) Modelo GPI. b) Operadores play. c) Muestras medidas, obtenidas con el modelo y valor absoluto del error. d) Zoom del error cometido.

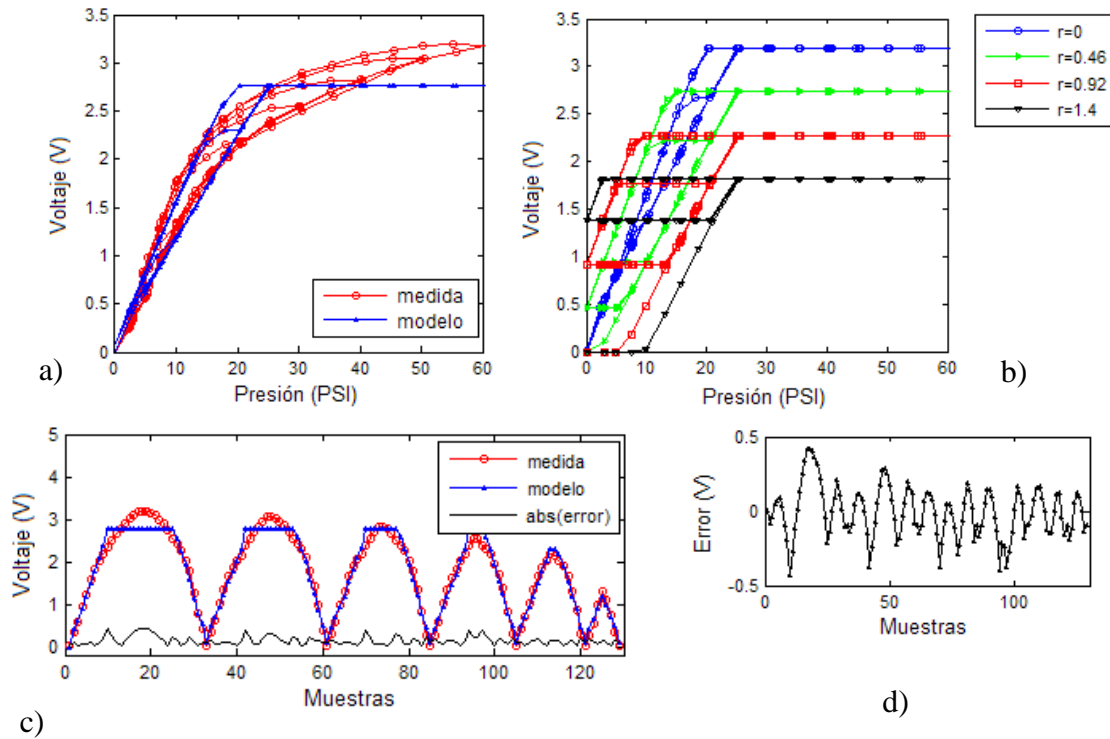


Figura 4-10. Resultados con funciones envolventes del tipo lineal saturada y cuatro operadores. a) Modelo GPI. b) Operadores play. c) Muestras medidas, obtenidas con el modelo y valor absoluto del error. d) Zoom del error cometido.

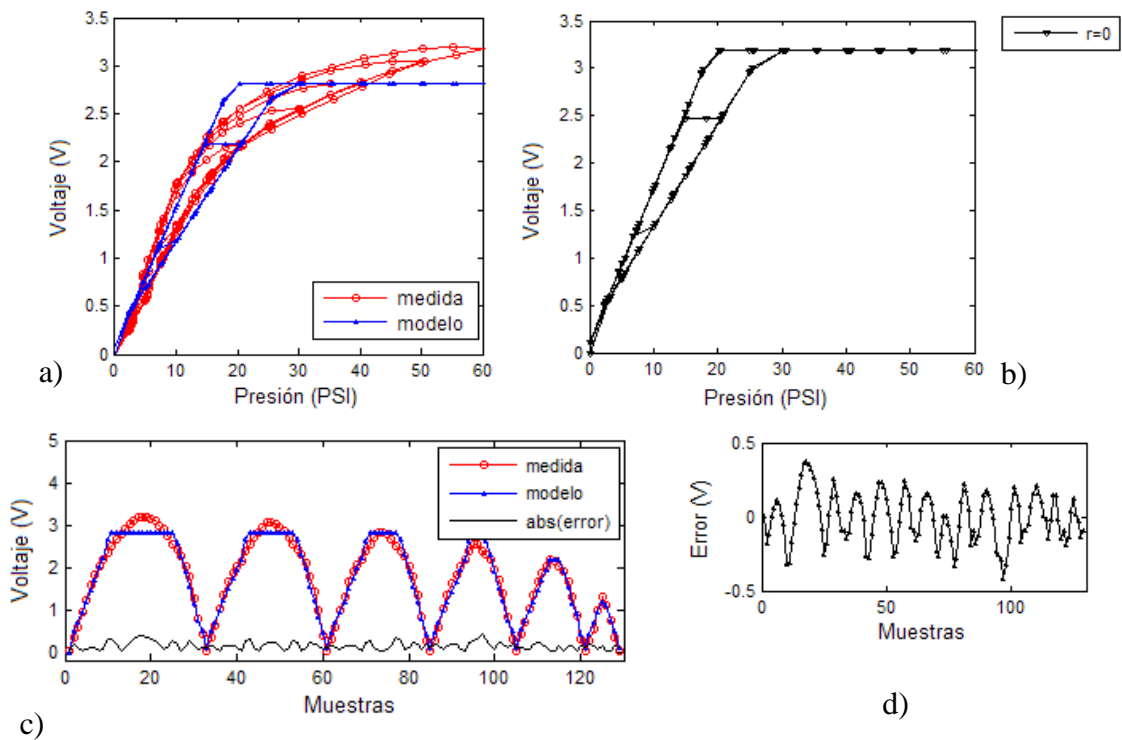


Figura 4-11. Resultados con funciones envolventes del tipo lineal saturada y un sólo operador. a) Modelo GPI. b) Operadores play. c) Muestras medidas, obtenidas con el modelo y valor absoluto del error. d) Zoom del error cometido.

Con el fin de comparar estos resultados, la eficiencia computacional del procedimiento de identificación no se ha tenido en cuenta ya que se realiza en un paso previo a la ejecución del algoritmo, pero sí la complejidad del modelo en sí mismo ya que sólo esta última tiene influencia en aplicaciones a ejecutarse en tiempo real. Por lo tanto, el error de la aproximación y de la complejidad del modelo son las principales cuestiones a considerar en esta comparación.

Con respecto a los errores cometidos por la aproximación de los modelos a los datos experimentales del sensor, se puede observar claramente (ver Figura 4-10 y Figura 4-11) que la función lineal no logra una solución suficientemente buena y que son demasiado grandes. Tanto los errores máximos como los medios, se alejan mucho de los conseguidos por las otras funciones envolventes (ver Tabla 4-2). La tangente hiperbólica y las funciones exponenciales obtienen unos resultados muchos mejores, aunque numéricamente se observan muy pocas diferencias entre ambas propuestas. Por otra parte, la diferencia mostrada en los errores por las distintas propuestas cuando se aumenta el número de operadores es pequeña. Sin embargo, si se realiza una inspección minuciosa de los bucles de histéresis de los modelos obtenidos, se observa que se obtiene un mejor ajuste en las curvas de bajada internas para un mayor número de operadores. Cuando se utiliza un solo operador, se puede apreciar como las curvas descendentes realizan una vuelta plana que no se ajusta a la curvatura mostrada por los datos experimentales. Veremos más adelante que esta diferencia tiene consecuencias relevantes cuando se invierte el modelo.

Con respecto a la complejidad, la función lineal es obviamente la más simple, aunque la aproximación que obtiene es bastante pobre como se mencionó anteriormente. La tangente hiperbólica es la función más compleja, sobre todo en el caso de buscar una implementación del modelo en un sistema en tiempo real basado, por ejemplo, en una FPGA. En realidad, estas funciones de tangente hiperbólica se podrían expresar como una combinación de funciones exponenciales. Por lo tanto, estableciendo un compromiso entre el error cometido y la complejidad, parece que la mejor elección se debe basar en las funciones exponenciales para integrarlas en el modelo GPI como funciones envolventes.

Tabla 4-1. Parámetros de los modelos GPI utilizando distintas funciones envolventes y número de operadores.

Parámetros	n = 6; tanh	n = 1; tanh	n = 4; exp	n = 1; exp	n = 4; lineal saturado	n = 1; lineal saturado
a_0	6.7244	3.5221	1.0158	2.5465	0.1823	0.2433
a_1	0.0322	0.0313	0.0603	0.0570	0.1216	0.1085
a_2	1.3737	1.0671	0.7329	0.3176	---	---
a_3	-5.9624	-2.8172	1.9999	3.2939	---	---
b_0	0.8727	0.7967	0.9241	1.5261	0.0039	0.1077
b_1	0.0541	0.0571	0.0665	0.0741	0.1650	0.1620
b_2	0.0824	0.1193	0.8862	0.8188	---	---
b_3	-0.1220	-0.1084	2.0913	3.3452	---	---
α	0.1079	0.5010	0.2487	0.5010	0.4584	0.5010
ρ	3.2318	4.4629	1.2188	0.9723	0.7280	0.8828
τ	12.821	0.0000	5.2746	0.0000	3.6291	0.0000

Tabla 4-2. Errores cometidos y complejidad estimada de los modelos GPI.

Modelo	Error Medio (V)	Error Medio (%)	Error máximo (V)	Error máximo (%)	Complejidad
n = 6; tanh	0.0448	1.407	0.1600	5.0181	alta
n = 1; tanh	0.0524	1.6446	0.1645	5.1583	alta
n = 4; exp	0.0466	1.4622	0.1900	5.9563	media
n = 1; exp	0.0552	1.7332	0.1837	5.7593	media
n = 4; lineal saturado	0.1384	4.3393	0.4251	13.3255	baja
n = 1; lineal saturado	0.1398	4.3853	0.4195	13.1523	baja

Sin embargo, para poder comparar y evaluar la eficacia de las diferentes opciones seleccionadas de funciones envolventes y número de operadores, es necesario completar el proceso de compensación de histéresis descrito en la Figura 1-9. Por lo tanto, el modelo $H_m(p(t))$ tiene que ser invertido para obtener $H_m^{-1}(v(t))$. Es necesario tener en cuenta algunas restricciones a la hora de mostrar los resultados y compararlos. En primer lugar, la aproximación con funciones lineales se descartó ya que el error medido en la aproximación del modelo H_m era demasiado grande. En segundo lugar, se observaron también grandes errores para valores altos de la presión de salida, especialmente cuando se invirtió el modelo. Esto se debió principalmente a dos factores. En primer lugar, las funciones envolventes elegidas proporcionan modelos que no son capaces de ajustarse con precisión a los datos experimentales para valores altos de la presión de entrada. En esta región de la curva, su forma es muy plana y el modelo da una curva saturada. Esta región saturada no parece ser muy relevante cuando se evalúa el error en la aproximación del modelo directo H_m . Sin embargo, los errores en esta región son muy grandes cuando

se calcula el modelo inverso y se ejecuta el procedimiento de compensación completo. Una posible solución consiste en tomar funciones envolventes más complejas que no se saturan. Sin embargo, las funciones envolventes con estas condiciones que probamos con éxito no se pueden invertir analíticamente. En el futuro, se podrían emplear métodos numéricos para hacer frente a este enfoque. Aquí evaluamos el rendimiento del procedimiento con las funciones envolventes que pueden ser invertidas analíticamente. Se observa que este procedimiento proporciona resultados bastante buenos si reducimos el rango de entrada a 30 psi para nuestro sensor. En realidad, como se indica por encima de esos valores, la curva de entrada-salida del sensor es casi plana en la trayectoria de retorno y esto significa que no es muy útil su empleo en ese rango. Por lo tanto, nos centraremos en el rango reducido en donde el sensor táctil presenta un mejor comportamiento.

En la Figura 4-12 y en la Tabla 4-3, se muestran los resultados del procedimiento de compensación final para diferentes funciones envolventes y diferente número de operadores. Los gráficos en la Figura 4-12(a, b, c, d) muestran la curva experimental (en rojo) y el modelo directo (en azul), mientras que los de la Figura 4-12(e, f, g, h) muestran el modelo inverso para cada propuesta evaluada. Por último, los gráficos de la Figura 4-12(i, j, k, l) muestran los resultados de la comparación de las presiones de entradas reales aplicadas al sensor con las presiones de salida proporcionadas por cada procedimiento de compensación en distintos ciclos de presiones ascendentes y descendentes. Conviene destacar que la función envolvente exponencial es de nuevo la mejor opción en este caso. Por otra parte, se hace evidente que un incremento en el número de operadores proporciona un mejor resultado. La Tabla 4-3 ofrece algunas cifras para cuantificar el rendimiento de los procedimientos propuestos. Se muestran los valores absolutos de los errores máximos y promedio de linealidad, así como su porcentaje con respecto al fondo de escala (FE). Los errores de linealidad se miden con respecto a una línea recta ideal con pendiente de valor 1 en la presión registrada de salida frente a la curva de presión de entrada aplicada al sensor en cada instante. Es de destacar de nuevo que el procedimiento funciona mejor cuando las curvas del modelo no se saturan, situación que corresponde a valores bajos de la presión de entrada. Esto se observa claramente en la Figura 4-12(i, j, k, l) donde el resultado de los procedimientos de corrección propuestos es muy bueno para los valores de presión de hasta 20 psi.

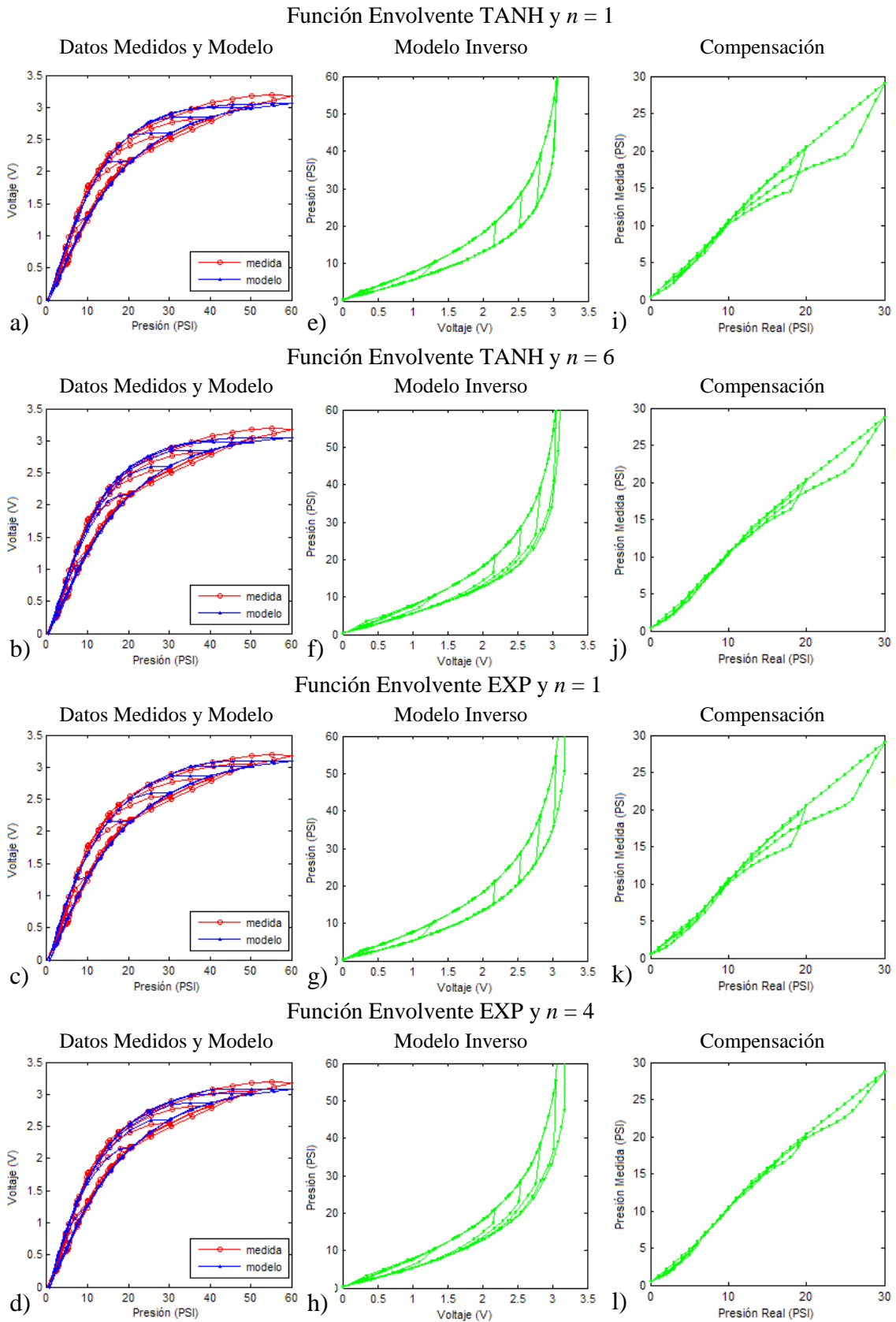


Figura 4-12. Resultados de la compensación de la histéresis con distintas funciones envolventes y número de operadores n .

Tabla 4-3. Errores de linealidad de la presión de salida del sensor con respecto a la presión de entrada ejercida, después de compensar la salida del sensor con el mapeo realizado con el método GPI y diferentes funciones envolventes y número de operadores.

Tipo de mapeo	error de linealidad	error de linealidad	error de linealidad	error de linealidad
	promedio (kPa)	promedio (% FE)	máximo (kPa)	máximo (% FE)
n = 6; tanh	3.611	1.7403	26.94	12.9854
n = 1; tanh	4.932	2.3769	40.41	19.4763
n = 4; exp	3.406	1.6416	18.12	8.7337
n = 1; exp	4.569	2.2018	33.49	16.1415
n = 4; lineal saturado	32.79	15.8008	71.13	34.2755
n = 1; lineal saturado	8.113	3.9097	22.02	10.6142

4.3. Modelo Modificado de Prandtl-Ishlinskii

El modelo modificado de Prandtl-Ishlinskii (MPI) utiliza los operadores clásicos *play* para modelar histéresis asimétricas como las presentadas por nuestro sensor táctil (ver Figura 2-19). A pesar de que el modelo clásico de Prandtl-Ishlinskii (CPI) solo puede modelar curvas simétricas de histéresis, este modelo MPI propone sustituir la función lineal de entrada del modelo CPI por una función de entrada generalizada. De esta forma, pueden ser determinadas las no linealidades de histéresis asimétricas no solo por la superposición ponderada de un conjunto de operadores *play* clásicos, sino también por la función de entrada generalizada [Gu et al. 2014]. Las principales ventajas de este modelo con respecto al GPI es que, al seguir usando operadores *play* clásicos, su descripción matemática es más simple, el número de parámetros a identificar es menor y su inversa puede ser calculada analíticamente a partir de la inversa del modelo CPI.

El modelo clásico de Prandtl-Ishlinskii (CPI) [Kuhnen et al. 2001] se basa en la combinación de operadores *play* clásicos con diferentes umbrales r como se ha descrito en la sección 4.1.2.

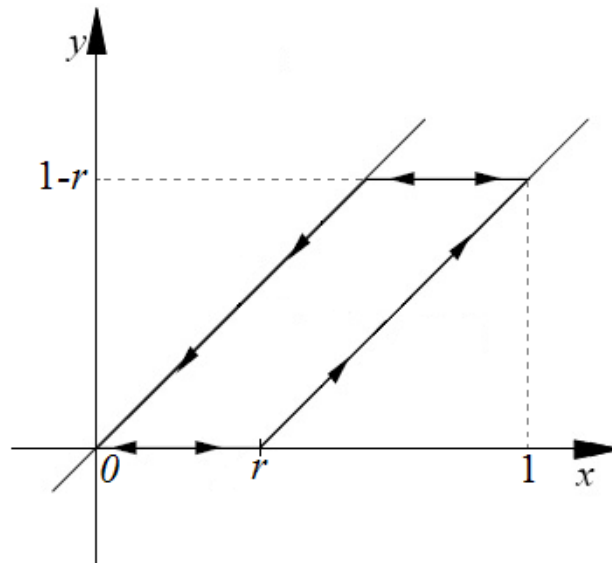


Figura 4-13. Operador *Play* OSP.

Es destacable que en [Gu et al. 2014], se propone modificar el operador *play* de la expresión (4.4), por un operador *play* de un lado (o positivo) (OSP: *One Side Play*) cuando el sensor o actuador a modelar solo funciona con señales de excitación positivas. De esta forma, el operador *play* (OSP) (ver Figura 4-13) se expresa como

$$H_{OSP}(x, y, r) = \max \{x - r, \min \{x, y\}\} \quad (4.28)$$

La salida del modelo CPI de la expresión (4.5) puede ser expresada de la siguiente forma utilizando el operador OSP para modelar curvas asimétricas de histéresis

$$y_{CPI}(t) = p_0 \cdot x(t) + \int_0^R p(r) \cdot H_{OSP_r}[x](t) dr \quad (4.29)$$

donde $p(r)$ es la función de densidad arbitraria y p_0 es una constante positiva.

Este modelo por tanto, se compone de un conjunto de operadores OSP ponderados por una función de densidad $p(r)$, y una función lineal de entrada $p_0 \cdot x(t)$. El modelo modificado de Prandtl-Ishlinskii [Gu et al. 2014] propone sustituir esta función lineal, por una función generalizada $g(x(t))$ que permita modelar histéresis asimétricas. La salida del modelo así construido queda

$$y_{MPI}(t) = g(x(t)) + \int_0^R p(r) \cdot H_{OSP_r}[x](t) dr \quad (4.30)$$

Utilizando un número finito n de operadores OSP la expresión puede ser aproximada como

$$y_{MPI}(t) = g(x(t)) + \sum_{i=0}^n b(r_i) \cdot H_{OSP_{r_i}}[x](t) \quad (4.31)$$

donde $b(r_i) = p(r_i)(r_i - r_{i-1})$ son los coeficientes de pesos para los umbrales r_i .

El conjunto de parámetros X del modelo MPI se puede identificar usando la expresión (1.1) sustituyendo $y_m(t)$ por $y_{MPI}(t)$. El modelo $H_{MPI}(p(t))$ a incluir en la Figura 1-9 es:

$$H_{MPI}(p(t)) = y_{MPI}(t) \quad (4.32)$$

4.3.1. Identificación de Parámetros del Modelo MPI

El modelo MPI es también un modelo basado en operadores *play*, pero en este caso de tipo clásico. Por lo tanto, al igual que con el modelo GPI, será necesario seleccionar un número de operadores n a utilizar, unos umbrales para dichos operadores, y una función de densidad. Los criterios para la selección de estos elementos en el modelo GPI son también válidos para el modelo MPI. En esta tesis, elegimos estos elementos de acuerdo con lo propuesto en [Gu et al. 2014], por lo que se selecciona un número de 10 operadores *play* clásicos. Las expresiones para los umbrales de los operadores r_i y la función de densidad $p(r)$ son

$$r_i = \frac{i-1}{n} \|v(t)\|_{\infty} \quad (4.33)$$

con $i = 1, 2, \dots, n$ y $\|v(t)\|_{\infty} = 1$ en el caso normalizado, y

$$p(r_i) = \rho \cdot e^{-\tau \cdot (r_i-1)^2} \quad (4.34)$$

donde $\rho > 0$ y τ son constantes reales.

Para conseguir la asimetría que presenta el bucle de histéresis del sensor táctil con este modelo, es necesario definir la función generalizada $g(x(t))$ de la expresión (4.31).

Nuevamente, utilizando la propuesta de [Gu *et al.* 2014], esta función generalizada se elige como un polinomio de grado tres, como

$$g(x(t)) = a_3 \cdot x^3 + a_2 \cdot x^2 + a_1 \cdot x \quad (4.35)$$

La selección de la función de entrada generalizada no es única y se pueden elegir otras formas, pero la utilización de un polinomio de tercer grado parece una buena elección para aproximar curvas con diferentes formas. Además, los polinomios de tercer grado han sido generalmente reconocidos como una elección efectiva para describir bucles de histéresis [Ru *et al.* 2005; Bashash *et al.* 2008]. En este estudio, el polinomio seleccionado es el que alcanza un mejor ajuste a la curva de histéresis del sensor táctil basado en una PCB.

4.4. Modelo Basado en Curvas Dominantes

Aparte de los modelos propuestos hasta ahora, en la literatura al respecto, se han propuesto métodos para compensar la histéresis que utilizan estructuras matemáticas que no se construyen con operadores *play*. Este es el caso del modelo descrito en [Zhang *et al.* 2012], que se basa en la construcción del modelo de histéresis de un actuador piezoeléctrico a partir de las curvas externas de los datos de histéresis. Este bucle externo, se compone de una curva dominante ascendente para cuando los valores de entrada aumentan, y de una curva dominante descendente para cuando los valores de entrada disminuyen. Todas las curvas ascendentes convergen en un mismo punto denominado *punto de destino superior* (x_u, y_u) , mientras que todas las curvas descendentes convergen en un mismo *punto de convergencia inferior* (x_0, y_0) (ver Figura 4-14). El resto de curvas de histéresis, pueden adoptar su forma a partir de estas curvas dominantes, las cuales pueden ser expresadas como dos funciones continuas y monótonas, $f_{ra}(x)$ y $f_{rd}(x)$, respectivamente. En [Zhang *et al.* 2012] se proponen polinomios de tercer orden para implementar estas funciones dominantes, por lo que en este trabajo, llamamos a este modelo POLY.

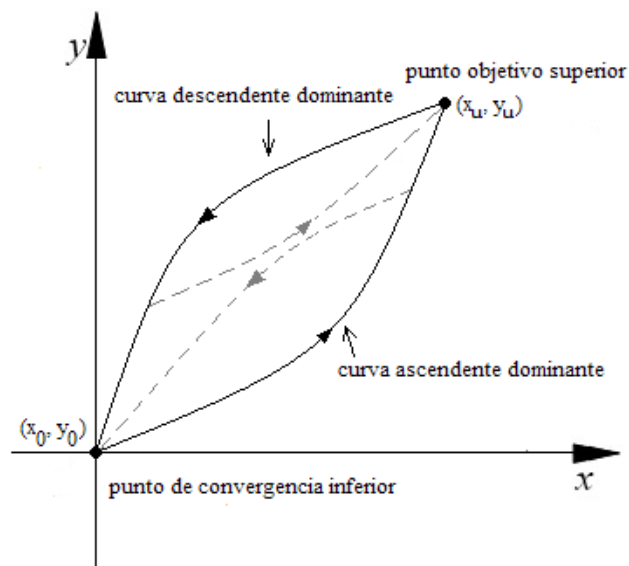


Figura 4-14. Modelo basado en Curvas Dominantes.

A continuación, se describe como se construyen todas las curvas ascendentes y descendentes del ciclo de histéresis de un sensor o actuador utilizando este modelo [Zhang *et al.* 2012].

Para cualquier trayectoria ascendente que comience en el punto (x_1, y_1) y termine en el punto (x_2, y_2) , se obtiene la siguiente función:

$$y_a(x) = k_a \cdot f_{ra}(x) + b_a \quad (4.36)$$

donde $y_a(x)$ representa la trayectoria de histéresis ascendente entre los puntos (x_1, y_1) y (x_2, y_2) cuando la entrada x varía entre x_1 y x_2 , y donde k_a y b_a están dadas como

$$k_a = \frac{y_u - y_1}{f_{ra}(x_u) - f_{ra}(x_0)} \quad (4.37)$$

y

$$b_a = y_1 - k_a \cdot f_{ra}(x_0) \quad (4.38)$$

donde x_0 y x_u son el valor inicial y el valor de convergencia superior para x de la curva dominante descrita en la Figura 4-14.

Reemplazando los valores de k_a y b_a en (4.36), se obtiene

$$y_a(x, x_1, y_1, x_2, y_2) = y_1 + \frac{y_u - y_1}{f_{ra}(x_u) - f_{ra}(x_0)} \cdot (f_{ra}(x) - f_{ra}(x_0)) \quad (4.39)$$

Una vez que el valor inicial de la trayectoria ascendente (x_1, y_1) está decidido, las curvas de histéresis se obtienen a partir de la curva dominante. Sin embargo, cuando el valor inicial x_1 sustituye a x en (4.39), la expresión resultante es

$$y_a(x_1) = y_1 + \frac{y_u - y_1}{f_{ra}(x_u) - f_{ra}(x_0)} \cdot (f_{ra}(x_1) - f_{ra}(x_0)) \neq y_1 \quad (4.40)$$

Por este motivo, la función que define las trayectorias ascendentes para cualquier trayectoria que comience en el punto (x_1, y_1) y termine en el punto (x_2, y_2) , es modificada y queda como

$$y_{POLY_a}(x) = y_1 + \frac{y_u - y_1}{f_{ra}(x_u) - f_{ra}(x_0)} \cdot (f_{ra}(m \cdot x + (1-m) \cdot x_u) - f_{ra}(x_0)) \quad (4.41)$$

donde $m = (x_u - x_0) / (x_u - x_1)$, (x_0, y_0) es el punto de convergencia inferior y (x_u, y_u) es el punto de convergencia superior de las curvas dominantes (ver Figura 4-14). De esta forma, cuando $x = x_1$, $y_a(x_1) = y_1$ y cuando $x = x_u$, entonces $y_a(x_u) = y_u$. Esto demostraría, que este modelo puede empezar con un desplazamiento inicial y alcanzar el punto de convergencia superior.

De forma similar, la curva descendente para cualquier trayectoria que comience en el punto (x_1, y_1) y termine en el punto (x_2, y_2) , se define como

$$y_{POLY_d}(x) = y_1 + \frac{y_0 - y_1}{f_{rd}(x_0) - f_{rd}(x_u)} \cdot (f_{rd}(n \cdot x + (1-n) \cdot x_0) - f_{rd}(x_u)) \quad (4.42)$$

donde $n = (x_0 - x_u) / (x_0 - x_1)$.

La salida del modelo puede ser expresada como

$$y_{POLY}(x(t)) = \begin{cases} y_{POLY_a}(x(t)) & \text{si } x(t_i) \geq x(t_{i-1}) \\ y_{POLY_d}(x(t)) & \text{si } x(t_i) < x(t_{i-1}) \end{cases} \quad (4.43)$$

Después de identificar el conjunto de parámetros X de las funciones dominantes, reemplazando $y_m(t)$ por $y_{POLY}(t)$ en la expresión (1.1), el modelo $H_{POLY}(p(t))$ a incluir en la Figura 1-9 es:

$$H_{POLY}(p(t)) = y_{POLY}(x(t)) \quad (4.44)$$

4.4.1. Identificación de Parámetros del Modelo POLY

En este modelo, los únicos parámetros que deben ser identificados son los coeficientes de los polinomios $f_{ra}(x)$ y $f_{rd}(x)$. Aunque en [Zhang *et al.* 2012] se proponen polinomios de tercer grado, se realizaron distintas pruebas para seleccionar los polinomios que mejor ajustaran el modelo a los datos experimentalmente medidos. De esta forma se han seleccionado para adaptar el modelo POLY a las curvas de histéresis del sensor táctil basado en una PCB de la Figura 2-19, polinomios de grado seis, y las expresiones de las funciones dominantes quedan como

$$f_{ra}(x) = \sum_{i=0}^6 a_i \cdot x^{6-i} \quad (4.45)$$

y

$$f_{rd}(x) = \sum_{i=0}^6 b_i \cdot x^{6-i} \quad (4.46)$$

Es conveniente destacar, que los mejores resultados se consiguieron con polinomios de grado diez, pero que teniendo en cuenta un equilibrio entre la precisión y el número de parámetros requeridos por el modelo, parece que la elección de unos polinomios de grado seis es más adecuada.

4.5. Análisis de Resultados y Conclusiones

Antes de comparar los resultados obtenidos con los diferentes modelos estudiados en este capítulo para las curvas de histéresis del sensor basado en una PCB, es interesante comparar el resultado de un método de compensación como el GPI con los obtenidos con otros procedimientos que no tienen en cuenta la corrección de la histéresis. Esta simple comparación ayudará a establecer en qué medida es importante la implementación de la compensación del error de no linealidad de histéresis. Por otra parte, esto es especialmente relevante si estos algoritmos se ejecutan en la electrónica local de un sensor inteligente, ya que los recursos son limitados y se debe elegir el algoritmo más simple a menos que otra opción esté justificada. Para este propósito, se procesaron los datos con dos métodos habituales diferentes además de las propuestas realizadas anteriormente para el modelo GPI en el apartado 4.2.2. En primer lugar, se supone que los datos del sensor se registran de una manera directa, por lo que corresponden a una relación lineal perfecta sin histéresis, por lo tanto, cada valor de voltaje proveniente de la salida del sensor se identifica con un valor de presión de una manera lineal, como se ilustra en la curva (a) de la Figura 4-15. Dando un paso más adelante, se puede realizar una cierta compensación de la no linealidad observada. Este método toma una curva no lineal como salida pero no tiene en cuenta la histéresis. La curva (b) en la Figura 4-15 ilustra esta idea. Esta curva se obtiene a partir de un promedio de las salidas correspondientes a las trayectorias ascendentes y descendentes de presión para obtener una sola curva intermedia para ambos caminos. Ahora hay una relación no lineal entre la salida del sensor y la presión mostrada o registrada por el sistema de medición. Esta relación proporciona una lectura más cercana al valor de la presión real ejercida que la dada por el mapeo lineal. Finalmente, el método GPI tiene en cuenta la histéresis y asume la relación de entrada-salida (c) en la Figura 4-15. Para un valor dado de la presión de entrada P , las compensaciones (a) y (b) proporcionan dos valores diferentes de presión para las trayectorias ascendente $P_{asc.}$ y descendente $P_{desc.}$ de presión de entrada, mientras que el método GPI propuesto, idealmente proporciona un sólo valor P^c de presión registrada por el sensor. El valor $P^{a_{asc.}}$, corresponde al valor de salida registrado por el sensor cuando se realiza una compensación lineal (a) sobre la salida de voltaje del sensor cuando se aplica la presión de entrada P en una secuencia ascendente de presiones. El valor $P^{a_{desc.}}$ corresponde a la misma situación pero para una secuencia descendente de presiones. Los valores $P^{b_{asc.}}$ y

$P^b_{desc.}$ se corresponden a las compensaciones realizadas mediante el método (b), es decir, una compensación no lineal sin tener en cuenta la histéresis. Es conveniente destacar también que el procedimiento propuesto aproxima no sólo los ciclos de histéresis medidos y utilizados para obtener el modelo GPI, sino todos los otros bucles posibles que se puedan dar en el rango de entrada.

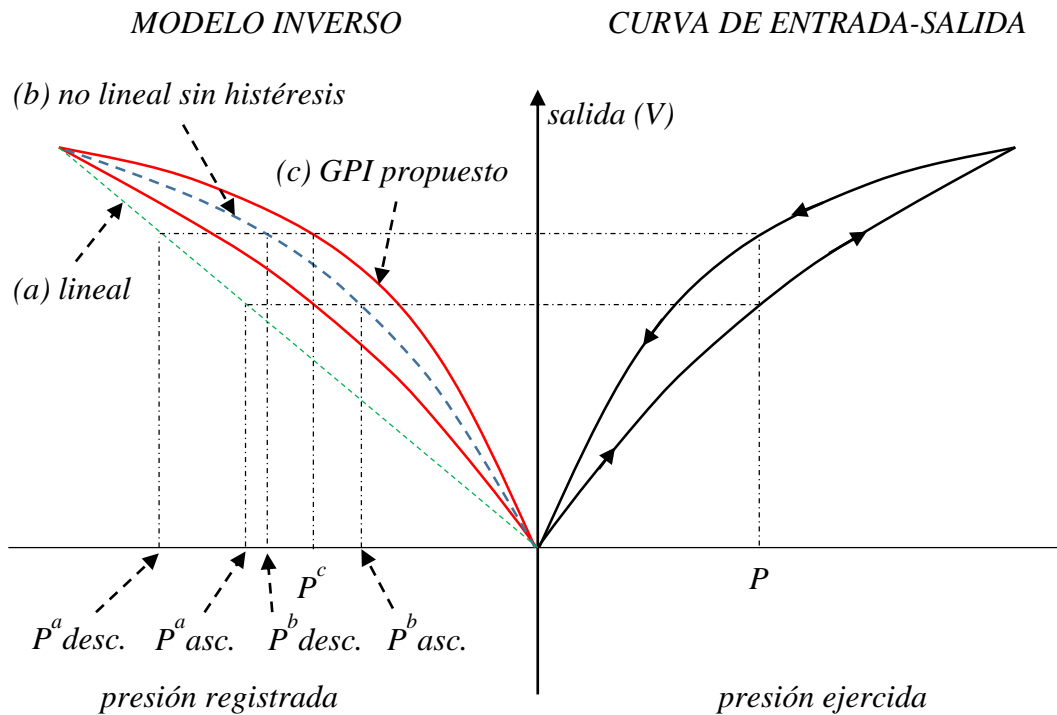


Figura 4-15. Ilustración de los diferentes mapeos de la salida del sensor táctil sobre la presión registrada.

La Figura 4-16(a) muestra las curvas calculadas para la aproximación lineal (en azul) y para la no lineal (en negro) descritos anteriormente, mientras que la Figura 4-16(b) y la Figura 4-16(c) muestran la presión registrada frente a la curva de presión de entrada con ambos métodos de compensación, respectivamente. De la Figura 4-12 en sus apartados (i, j, k, l), se deduce que el error de compensación es muy reducido con el procedimiento GPI propuesto, especialmente con las funciones envolventes exponenciales y cuatro operadores. La Tabla 4-4 muestra los datos de los errores de medición de este modelo propuesto y para las otras propuestas que no compensan la histéresis. Hay que tener en cuenta que el error causado por la histéresis es mucho menor en el caso del procedimiento propuesto. Finalmente, vale la pena mencionar que el valor más grande del error de

histéresis medido en la curva experimental es del 15,69% para un rango de entrada de 206kPa (30 psi), mientras que este error es del 6,45% después de aplicar el procedimiento de compensación. Además, se observa que este error es mucho más pequeño para valores bajos de la presión de entrada, donde la compensación es muy buena, como puede verse en la Figura 4-12. El valor promedio a lo largo del rango de entrada del error de histéresis medido en la curva experimental es del 7,20% para un rango de entrada de 206kPa (30 psi), mientras que este error es del 1,51% después de aplicar el procedimiento de compensación. Todos estos porcentajes están referenciados al fondo de escala de la curva de histéresis medida experimentalmente del sensor táctil.

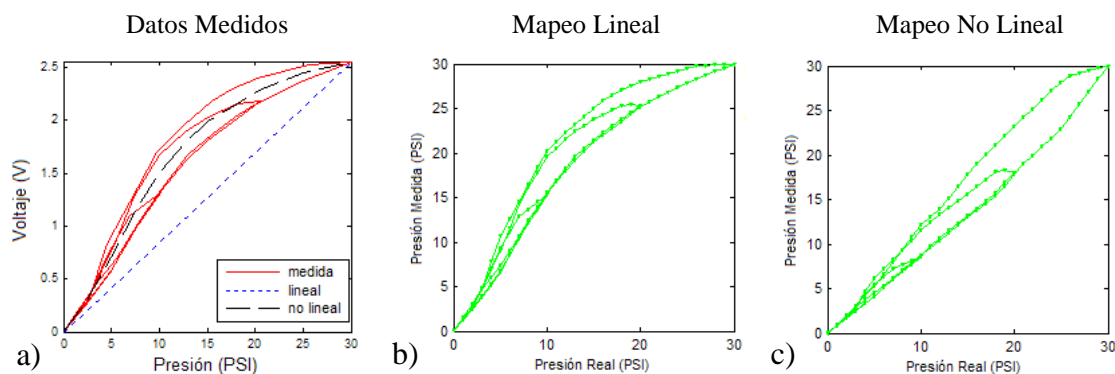


Figura 4-16. Presión registrada frente a la presión de entrada para el mapeo lineal en (b), y para el mapeo no lineal (c) de la salida del sensor en (a).

Tabla 4-4. Errores de histéresis en la presión registrada frente a las curvas de presión de entrada para las distintas propuestas del voltaje de salida del sensor frente al mapeo de presiones registradas (ver Figura 4-15).

Tipo de mapeo	error de histéresis	error de histéresis	error de histéresis	error de histéresis
	promedio (kPa)	promedio (% FE)	máximo (kPa)	máximo (% FE)
n = 4; exp	2.98	1.51	12.76	6.45 (en 172.3 kPa)
lineal	14.88	7.20	32.40	15.69 (en 68.9 kPa)
no lineal	15.65	7.58	39.96	19.35 (en 124.1 kPa)

Por tanto, una vez demostrada la conveniencia de utilizar un método de compensación de la histéresis para poder conseguir una respuesta del sensor táctil de mayor precisión, a continuación se comparan los resultados obtenidos con los métodos GPI, MPI y POLY para las curvas de histéresis del sensor basado en una PCB. Para realizar la comparativa, se ha tomado como ciclos de histéresis a modelar, los obtenidos como la media aritmética de la respuesta de todos los tácteles del sensor ante la aplicación de unas secuencias de

presiones como las explicadas en la Tabla 2-1 de la sección 2.4.1.1. Se obtienen dos ciclos distintos de histéresis, uno que modela el comportamiento de las trayectorias descendentes, Figura 2-19, y otro que modela el comportamiento de las trayectorias ascendentes, Figura 2-20.

Para cada uno de los métodos, se ha realizado un proceso de identificación de parámetros mediante algoritmos genéticos, que permite obtener la mejor configuración de los métodos para obtener los modelos que mejor se ajustan a los datos experimentales, de acuerdo con lo expuesto en las secciones 4.2.1, 4.3.1 y 4.4.1. Los parámetros identificados para cada método que permiten la mejor adaptación de los modelos a los datos de histéresis obtenidos experimentalmente para las curvas descendentes y las ascendentes, respectivamente, se muestran en la Tabla 4-5 y en la Tabla 4-6.

Tabla 4-5. Parámetros de los modelos GPI, MPI y POLY para las curvas de histéresis de bajadas del sensor táctil.

GPI				MPI		POLY			
n	4	b_1	0.0825	n	10	a_0	$1.36e^{-9}$	b_0	$9.04e^{-10}$
a_0	0.5754	b_2	-1.9648	ρ	1.6492	a_1	$-2.74e^{-7}$	b_1	$-1.44e^{-7}$
a_1	0.0524	b_3	0.2972	τ	0.1942	a_2	$2.13e^{-5}$	b_2	$6.93e^{-6}$
a_2	1.1216	α	1.7531	a_1	$3.96e^{-5}$	a_3	$-7.69e^{-4}$	b_3	$5.29e^{-6}$
a_3	1.6350	ρ	4.4935	a_2	0.1410	a_4	0.0109	b_4	-0.0100
b_0	13.0421	τ	1.5428	a_3	-0.0049	a_5	0.0704	b_5	0.3132
						a_6	-0.0244	b_6	-0.1864

Tabla 4-6. Parámetros de los modelos GPI, MPI y POLY para las curvas de histéresis de subidas del sensor táctil.

GPI				MPI		POLY			
n	4	b_1	0.1168	n	10	a_0	$1.65e^{-9}$	b_0	$1.20e^{-9}$
a_0	1.9620	b_2	-0.1206	ρ	3.0226	a_1	$-3.37e^{-7}$	b_1	$-2.08e^{-7}$
a_1	0.0477	b_3	-3.2440	τ	0.2255	a_2	$2.66e^{-5}$	b_2	$1.21e^{-5}$
a_2	-0.1324	α	3.4384	a_1	$3.68e^{-5}$	a_3	$-9.93e^{-4}$	b_3	$-2.05e^{-4}$
a_3	3.7234	ρ	0.8893	a_2	0.1502	a_4	0.0157	b_4	-0.0057
b_0	1.6743	τ	-0.1617	a_3	-0.0047	a_5	0.0281	b_5	0.2762
						a_6	-0.0108	b_6	-0.1651

Las gráficas de la Figura 4-17, de la Figura 4-18 y de la Figura 4-19, muestran los resultados obtenidos por los métodos GPI, MPI y POLY, respectivamente, para las curvas de histéresis descendentes (gráficas (a)), y para las ascendentes (gráficas (b)) del sensor táctil basado en una PCB. A continuación, se tratan de extraer algunas conclusiones sobre la precisión de los modelos y su posible implementación en sistemas en tiempo real.

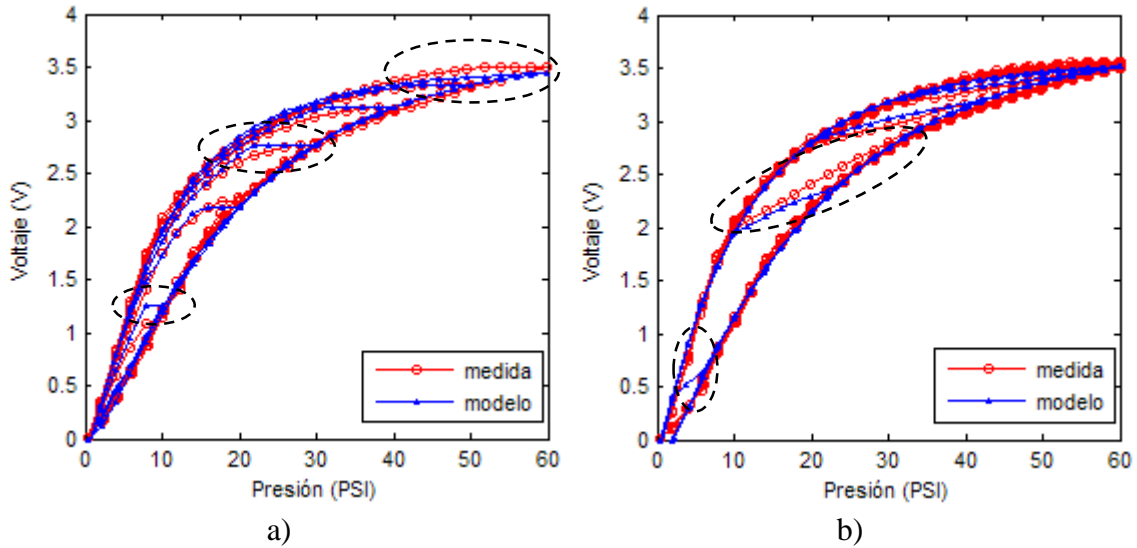


Figura 4-17. Método GPI con $n=4$ operadores play. (a) Modelo para las curvas descendentes. (b) Modelo para las curvas ascendentes.

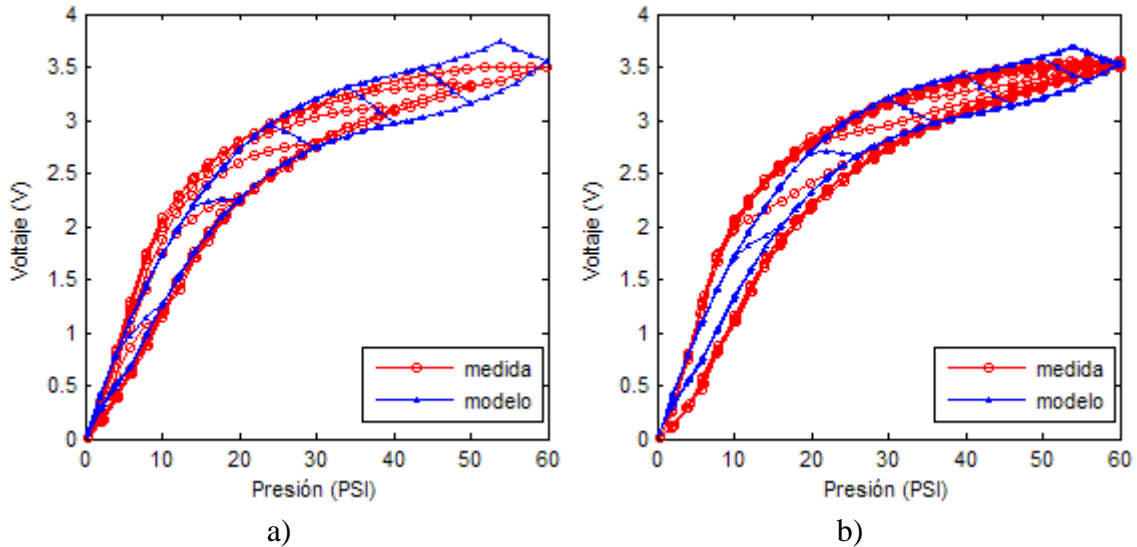


Figura 4-18. Método MPI con polinomio de tercer grado y $n=10$ operadores OSP. (a) Modelo para las curvas descendentes. (b) Modelo para las curvas ascendentes.

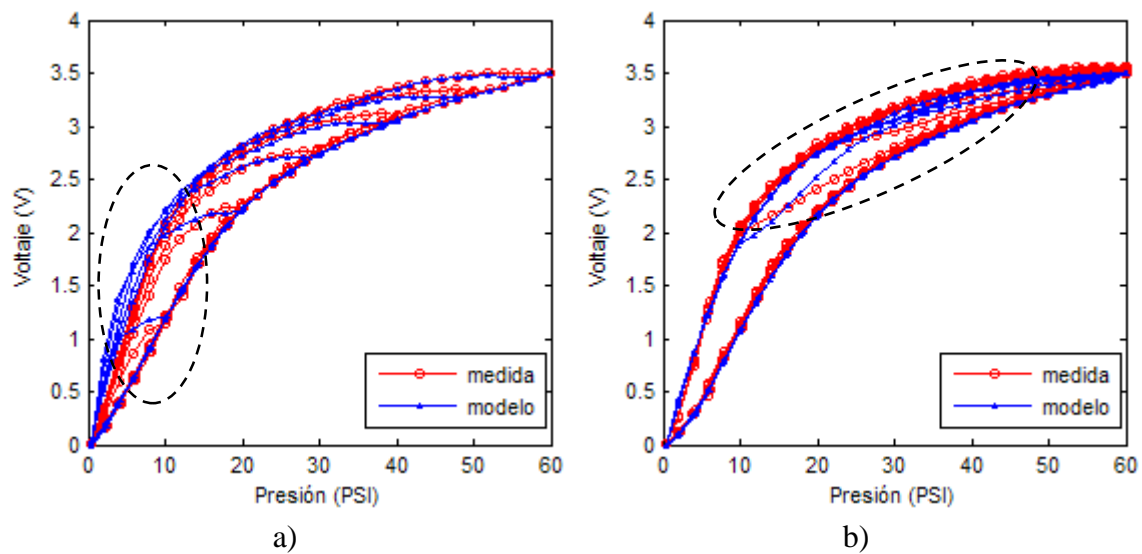


Figura 4-19. Método POLY con polinomio de grado seis. (a) Modelo para las curvas descendentes. (b) Modelo para las curvas ascendentes.

Lo primero que se puede observar tanto en la Figura 4-18(a) como en la Figura 4-18(b), es que el modelo MPI es el que alcanza un peor ajuste a los datos experimentales. Este modelo, tal y como se explicó en la sección 4.3, se compone de un conjunto de operadores play clásicos simétricos y de una función generalizada empleada para modelar la asimetría del bucle de histéresis del sensor táctil. Ya que las curvas externas de subida y bajada de los datos experimentales presentan diferencias en su forma, es muy difícil encontrar una única función generalizada que permita ajustarse eficientemente a ambas curvas externas. Se han realizado pruebas con polinomios de distintos grados, y el mejor resultado se consiguió utilizando un polinomio de grado tres como el mostrado en la ecuación (4.35). Puesto que el resultado obtenido con este modelo no es satisfactorio para las curvas de histéresis del sensor basado en una PCB, seguramente porque los operadores play clásicos están inicialmente destinados al ajuste de bucles simétricos, no se realizará más discusión sobre el mismo.

El modelo GPI, obtiene un ajuste bastante bueno para las curvas descendentes, aunque se observan algunas desviaciones resaltadas en la Figura 4-17(a). El modelo se satura para valores altos de la señal de entrada, por lo que el ajuste en esa zona no es bueno. Este problema se repite al inicio de cada curva descendente interna. En cuanto a las curvas ascendentes, el modelo presenta un pobre comportamiento en el ajuste de las curvas de subida internas, como se puede comprobar en la Figura 4-17(b). El motivo principal de

estas desviaciones, radica en la dificultad de encontrar unas funciones envolventes para las expresiones (4.20) y (4.21) que se ajusten con precisión a las curvas externas en todo su rango de entrada.

Con respecto al modelo POLY, este muestra una gran dificultad para ajustar las curvas descendentes (ver Figura 4-19(a)). Se observa que las curvas descendentes del modelo están desplazadas a la izquierda con respecto a los datos experimentales. Como vemos, esto es debido a que no se puede encontrar un polinomio en la expresión (4.46) que se ajuste con precisión a la curva externa descendente del sensor táctil. En cuanto a las curvas ascendentes (ver Figura 4-19(b)), el modelo no puede ajustar bien las curvas internas por el mismo motivo.

Por tanto, como se puede comprobar, ninguno de los tres métodos analizados en este capítulo, ajustan sus modelos con precisión los bucles de histéresis que presenta el sensor táctil basado en una PCB. Especialmente, para las curvas ascendentes, el modelado por estos métodos presenta serias deficiencias, por lo que se hace necesario o recomendable buscar algún nuevo tipo de procedimiento que mejore la respuesta del sensor y permita su utilización efectiva en tareas de manipulación robótica. Además, otro aspecto importante a tener en cuenta, es la complejidad del método GPI en términos matemáticos. Considerando que uno de los objetivos es la implementación de los algoritmos de compensación de la histéresis en tiempo real en dispositivos como las FPGAs, se prevé cierta dificultad en la programación de funciones matemáticas complejas como las exponenciales que componen la estructura del método que mejor resultado presenta para los bucles de histéresis del sensor táctil.

Capítulo 5. Propuesta de Algoritmos de Corrección de Errores

5.1. Introducción

En este capítulo, se presenta un nuevo método para modelar y compensar las no linealidades de histéresis de un sensor táctil piezo-resistivo basado en una placa de circuito impreso flexible. La principal motivación que impulsa el desarrollo de este método está relacionada con la necesidad de implementar dicha compensación en sistemas que desarrollen determinadas tareas en tiempo real. Este tipo de sistemas requieren de sensores táctiles inteligentes que contengan una electrónica local lo suficientemente potente como para procesar la gran cantidad de datos que provienen de una matriz de tácteles a utilizar, por ejemplo, en tareas de manipulación robótica. Estos sistemas presentan arquitecturas cuyos elementos de control pueden estar basados en FPGAs (*Field Programmable Gate Array*) [Oballe-Peinado et al. 2009][Vidal-Verdú, Oballe-Peinado, et al. 2011]. Las FPGAs de última generación son dispositivos que constan de bloques lógicos y de módulos dedicados a la implementación de operaciones aritméticas complejas, como los DSP, cuya ventaja principal radica en la ejecución en paralelo de procesos [Cofer et al. 2005]. La necesidad de implementar algoritmos con operaciones matemáticas complejas afecta a la velocidad y al consumo de energía y de recursos del sistema, por lo que es necesario reducir al máximo la complejidad de las operaciones a ejecutar.

La precisión del ajuste del modelo a los datos experimentales, es otra fuente de motivación que puede adquirir gran importancia a la hora de utilizar el sensor táctil en aplicaciones que requieran de una medida exacta de la presión ejercida sobre su superficie. La necesidad de compensar curvas de histéresis con formas complejas, provoca que los métodos estudiados anteriormente, no se ajusten con precisión al

comportamiento de los sensores, y por tanto que no puedan ser utilizados de forma eficiente en tales aplicaciones.

Un análisis de los métodos de compensación de la histéresis estudiados en el capítulo 4 (GPI, MPI y POLY), nos muestra la presencia de operadores play, funciones exponenciales, logaritmos, tangentes hiperbólicas, potencias y polinomios de grado elevado, que prevén una complicada implementación en dispositivos como las FPGAs. Por lo tanto, el desarrollo de un método basado en operaciones matemáticas más sencillas se entiende como fundamental para alcanzar sistemas táctiles rápidos y eficientes que trabajen en tiempo real. Si además, se tiene en cuenta la posibilidad de trabajar con matrices con un gran número de tácteles (por ejemplo, $16 \times 16 = 256$), cada uno de los cuales debe ser compensado en tiempo real con su propio modelo de histéresis, dependiendo de la aplicación, la compensación debe realizarse a la máxima velocidad posible o con el menor consumo posible de recursos.

El objetivo del método, no es sólo la eliminación de la histéresis, sino que debe eliminar la no linealidad observada en la respuesta del sensor y también corregir la dispersión mostrada por los distintos tácteles. Al aplicar el método a una matriz de sensores, cada táctel debe ser compensado con su propio modelo de histéresis, por lo que se realiza automáticamente un equilibrado de todos ellos.

5.2. El Método General ELAM

El nuevo enfoque propuesto en esta tesis para la compensación de la histéresis de un sensor táctil, consiste en la adaptación del bucle externo (*External Loop Adaptation Method: ELAM*) de las curvas de histéresis medidas experimentalmente para construir todo el comportamiento con histéresis del sensor. A partir de los datos experimentales es posible obtener por interpolación lineal las dos curvas externas de todo el ciclo de histéresis para cualquier valor de entrada x , una para la trayectoria externa ascendente y otra para la trayectoria externa descendente. Estas curvas serán las curvas patrones para generar todas las curvas objetivo internas del bucle de histéresis, por lo que las llamamos P_a y P_d , respectivamente. La adaptación se realiza mediante un mapeo (transformación) lineal a tramos de las curvas patrón a todas las posibles curvas internas del bucle de

histéresis. Para este proceso, sólo es necesario conocer los puntos de inicio y final de cualquier trayectoria interna. La adaptación se puede realizar utilizando distintas estrategias, dando lugar a distintas versiones del método ELAM. En este capítulo se muestran tres versiones diferentes que permiten entender el proceso seguido para obtener el método más preciso y que demuestra la capacidad de la propuesta ELAM para adaptarse a las curvas de histéresis con formas complejas.

A continuación, para ilustrar el comportamiento general del método ELAM, se explica la adaptación de una curva genérica patrón, a una curva genérica objetivo de la que sólo se conocen sus puntos de inicio y final. La Figura 5-1 muestra el proceso de mapeo.

Dada una curva patrón P , conocida y definida para todos sus puntos de entrada, su forma determinará la trayectoria objetivo T de la que sólo se conocen sus puntos inicial (x_{iT}, y_{iT}) y final (x_{fT}, y_{fT}) . Los puntos inicial y final de la curva patrón son (x_{iP}, y_{iP}) y (x_{fP}, y_{fP}) .

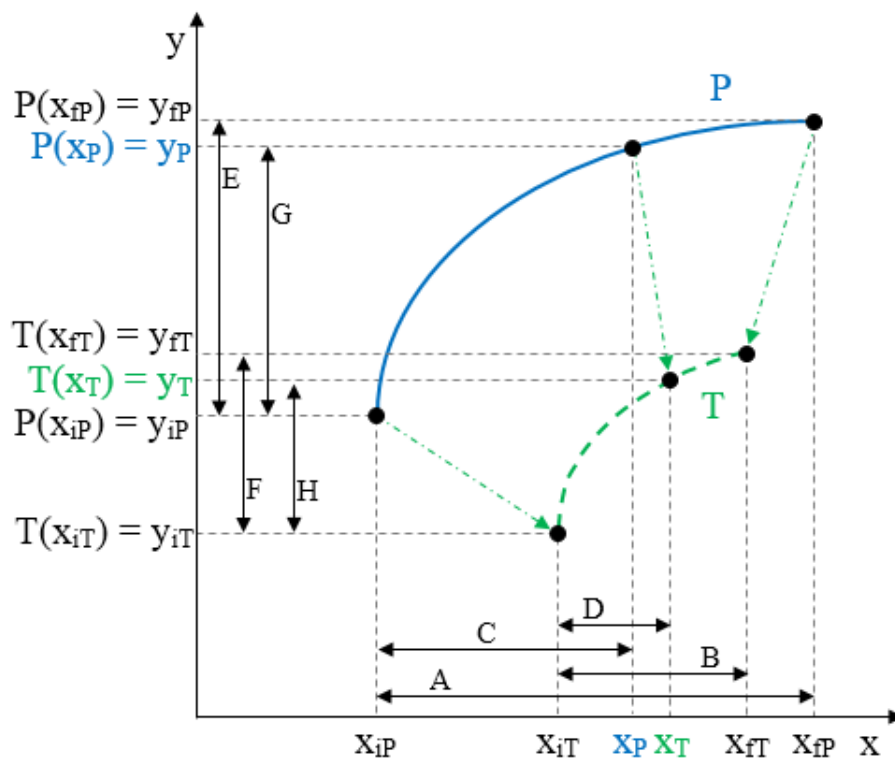


Figura 5-1. Mapeo lineal de una curva patrón a una curva objetivo.

Es posible encontrar para cada valor de entrada x_T en la trayectoria T , un valor correspondiente x_P en la curva patrón P , de tal forma que el valor de salida $T(x_T) = y_T$

en la curva objetivo a generar, es calculado a partir del valor de salida de x_p en la curva patrón, es decir $P(x_p) = y_p$.

Observando la Figura 5-1, el segmento A corresponde a la amplitud de la proyección en el eje x de la curva patrón, mientras que el segmento B corresponde a la amplitud de la proyección en el mismo eje de la curva objetivo. Para producir el escalado a lo largo del eje x , se establece una correspondencia entre el segmento A y el segmento B . Para cada valor x_p , el segmento C define su distancia al punto inicial de la curva patrón P , mientras que para cada valor x_T , el segmento D define su distancia al punto inicial de la trayectoria objetivo T . Para calcular el valor de x_p a partir del valor de x_T , se debe establecer una correspondencia entre la relación entre los segmentos C y D y entre los segmentos A y B , de tal forma que obtenemos

$$\begin{aligned} A &\rightarrow B \\ C &\rightarrow D \end{aligned} \quad (5.1)$$

y sustituyendo cada segmento, la relación se expresa como

$$\begin{aligned} x_{fp} - x_{ip} &\rightarrow x_{fT} - x_{iT} \\ x_p - x_{ip} &\rightarrow x_T - x_{iT} \end{aligned} \quad (5.2)$$

Despejando el valor de x_p , se obtiene la siguiente igualdad que puede ser representada por una función X_p dependiente del valor de entrada x_T y de los extremos de las curvas T y P

$$x_p = x_{ip} + \frac{(x_{fp} - x_{ip}) \cdot (x_T - x_{iT})}{(x_{fT} - x_{iT})} = X_p(x_T, x_{iT}, x_{fT}, x_{ip}, x_{fp}) \quad (5.3)$$

Del mismo modo, se realiza el mapeo con respecto al eje y . Los segmentos E y F definen la amplitud de la proyección en el eje y de las curvas patrón y objetivo, respectivamente. La distancia de las coordenadas y_p e y_T a los puntos iniciales de las curvas P y T , definen los segmentos G y H , respectivamente. La relación entre los segmentos a lo largo del eje y queda como

$$\begin{aligned} E &\rightarrow F \\ G &\rightarrow H \end{aligned} \quad (5.4)$$

y sustituyendo cada segmento, la relación en el eje y se expresa como

$$\begin{aligned} y_{fP} - y_{iP} &\rightarrow y_{fT} - y_{iT} \\ y_P - y_{iP} &\rightarrow y_T - y_{iT} \end{aligned} \quad (5.5)$$

El valor de salida de la curva objetivo y_T , se obtiene de esta relación y puede ser identificada por la función Y_T dependiente del valor obtenido por interpolación lineal $y_P = P(x_P)$ y de los valores extremos en el eje y de las curvas T y P :

$$y_T = y_{iT} + \frac{(y_P - y_{iP}) \cdot (y_{fT} - y_{iT})}{(y_{fP} - y_{iP})} = Y_T(y_P, y_{iT}, y_{fT}, y_{iP}, y_{fP}) \quad (5.6)$$

Estas dos funciones X_P e Y_T serán utilizadas en cada uno de los tramos en los que se dividirán las trayectorias objetivo con el fin de obtener los valores de todos los puntos del modelo de histéresis.

Un aspecto clave del método ELAM, es la introducción de dos puntos intermedios, uno en la curva T , (x_{sT}, y_{sT}) , y otro en la P , (x_{sP}, y_{sP}) , de forma que el punto intermedio en P se corresponde con el punto intermedio en T (ver Figura 5-2). Estos dos puntos dividen cada una de las curvas en dos segmentos, uno derecho y otro izquierdo, de forma que junto con las ecuaciones (5.3) y (5.6) se puede realizar un mapeo diferente entre los tramos derechos y los tramos izquierdos de las curvas. El tramo derecho de la curva patrón P_r se mapea sobre el tramo derecho de la curva objetivo T_r , y el tramo izquierdo de P , P_l , se mapea sobre el tramo izquierdo de T , T_l . Así se consigue ajustar el modelo calculado de histéresis con mayor precisión a los datos medidos experimentalmente. La localización del punto intermedio en T , es determinada por los parámetros α y β que son identificados mediante un algoritmo de minimización de errores. El criterio seguido consiste en establecer una relación lineal del punto intermedio (x_{sT}, y_{sT}) con la amplitud del intervalo en el que se desarrolla la trayectoria objetivo. El intervalo a lo largo del eje x es $\Delta x = (x_{fT} - x_{iT})$, mientras que a lo largo del eje y es $\Delta y = (y_{fT} - y_{iT})$. Las coordenadas de este punto intermedio se obtienen a partir de las expresiones

$$x_{sT} = \alpha \cdot \Delta x + x_{iT} \quad (5.7)$$

$$y_{sT} = \beta \cdot \Delta y + y_{iT} \quad (5.8)$$

con $x_{iT} < x_{sT} < x_{fT}$, $y_{iT} < y_{sT} < y_{fT}$, y donde $\alpha, \beta \in [0,1]$.

La localización del punto intermedio en P , (x_{sP}, y_{sP}) , es determinada por el diseñador del modelo y se pueden seguir distintas estrategias como veremos en las tres versiones del método ELAM propuestas en esta tesis.

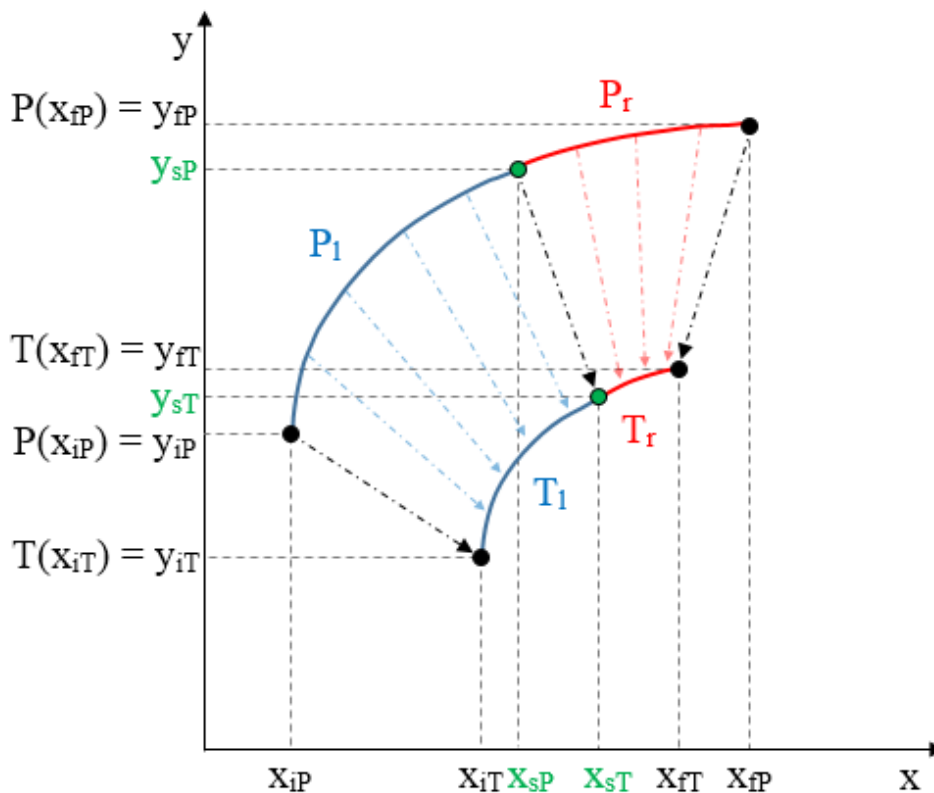


Figura 5-2. Puntos intermedios y tramos en curvas patrón y objetivo.

A partir de las cuatro ecuaciones, (5.3), (5.6), (5.7) y (5.8), y de la determinación del punto intermedio en la curva patrón (x_{sP}, y_{sP}) , se pueden definir todas las trayectorias ascendentes o descendentes de los ciclos de histéresis mostrados por las salidas de los sensores táctiles.

En este capítulo se estudian tres alternativas del método general ELAM que se denominan ELAM_1, ELAM_2 y ELAM_3. La diferencia entre las tres estrategias propuestas, radica en la determinación de los puntos intermedios y en las formas de las proyecciones, de las curvas patrón a las curvas objetivo, a realizar a ambos lados de estos puntos. En concreto, el método ELAM_1 determina el punto intermedio como una relación lineal con respecto

a la amplitud del intervalo de la trayectoria objetivo. Mediante una proyección de este punto a lo largo del eje de ordenadas, se obtiene el correspondiente punto intermedio en la curva patrón. Este proceso es el mismo tanto para las curvas descendentes como para las ascendentes. El mapeo lineal realizado a ambos lados de los puntos, consiste en un escalado en ambos ejes de la curva patrón a la objetivo, o una proyección de la curva patrón a la objetivo a lo largo del eje de ordenadas. Los métodos ELAM_2 y ELAM_3, utilizan la misma estrategia que el ELAM_1 para las curvas descendentes, pero difieren a la hora de construir las curvas ascendentes. El método ELAM_2 selecciona los puntos intermedios de las curvas patrón y objetivo para las trayectorias ascendentes, como los puntos del extremo inferior de las trayectorias, por lo que a efectos prácticos es como si no existieran estos puntos intermedios. El mapeo lineal consiste en una proyección a lo largo del eje de abscisas de la curva patrón sobre la objetivo. Finalmente, el método ELAM_3, selecciona un punto intermedio en la curva objetivo ascendente como una relación cuadrática, para la coordenada x , y como una relación lineal para la coordenada y , con respecto a la amplitud del intervalo de su trayectoria. Mediante una proyección de este punto a lo largo del eje de abscisas, se obtiene el correspondiente punto intermedio en la curva patrón. El mapeo en este método, se realiza al igual que en ELAM_2, mediante una proyección a lo largo del eje de abscisas de la curva patrón sobre la objetivo a ambos lados de los puntos intermedios.

A continuación se detallan las tres versiones diferentes del método ELAM, describiendo por separado la construcción de las trayectorias ascendentes y las descendentes. Los puntos intermedios en T son calculados en tiempo real para cada trayectoria objetivo ya que dependen de los puntos iniciales y finales de la misma, mientras que los parámetros α y β son únicos pero diferentes para las trayectorias ascendentes y para las descendentes. Así mismo, se detallan también por separado las estrategias de mapeo seguidas a ambos lados de los puntos intermedios, incluyendo la determinación del punto intermedio en la curva patrón. En cada versión del método, primero se detallan los modelos directos y posteriormente se mostrarán los modelos inversos que permitan la compensación de los bucles de histéresis.

5.3. Método ELAM_1

5.3.1. Introducción

En este primer método, se describirá con más detalle la notación seguida para la explicación de las distintas estrategias y que será compartida por las tres versiones del método ELAM expuestas en esta tesis.

Esta primera propuesta del método ELAM, utiliza un punto intermedio para las trayectorias descendentes (x_{sdT}, y_{sdT}) y otro para las ascendentes (x_{saT}, y_{saT}) en las curvas objetivo. Se emplean dos estrategias de mapeo diferentes, basadas en las fórmulas generales, una al lado derecho del punto intermedio y otra al lado izquierdo, pero idénticas para los dos tipos de trayectorias. Estas dos estrategias las podemos denominar como: escalado en ambos ejes del sistema de coordenadas, y proyección en el eje de ordenadas.

En esta Sección 5.3, se describe la construcción de las curvas descendentes y ascendentes de los bucles de histéresis del sensor táctil con el método ELAM_1. Los bucles de histéresis se componen de un ciclo externo formado por dos curvas, una ascendente P_a , y otra descendente P_d . Estas curvas servirán como curvas patrón para generar cualquier trayectoria objetivo ascendente T_a o descendente T_d , respectivamente. Las curvas ascendentes se obtienen para valores de entrada que incrementan su valor durante el tiempo, mientras que las descendentes corresponden a valores de entrada que disminuyen su valor en el tiempo. Cuando exista un punto intermedio en estas trayectorias, se dividirán en dos tramos T_{a_l} a la izquierda y T_{a_r} a la derecha del punto para las curvas ascendentes, y T_{d_l} a la izquierda y T_{d_r} a la derecha para las curvas descendentes. Todas las curvas descendentes del modelo convergen en el mismo punto (x_0, y_0) y todas las curvas ascendentes convergen en el mismo punto (x_u, y_u) . Esto se puede observar en las curvas de caracterización del sensor táctil vistas en la sección 2.4.1.1. Las figuras con los esquemas del mapeo en esta sección, muestran estos puntos.

En el caso de la construcción de curvas anidadas, para cada sub-ciclo, será necesario almacenar sus valores extremos, y convertirlos en los puntos (x_0, y_0) y (x_u, y_u) de los métodos explicados en este trabajo. El número de sub-ciclos anidados capaces de

implementar el método ELAM, dependerá del número de coordenadas de los extremos almacenadas en memoria.

5.3.2. Modelo Directo Curvas Descendentes ELAM_1

En primer lugar, se describe la construcción de las curvas descendentes del bucle de histéresis (ver Figura 5-3 y Figura 5-4). La curva patrón es P_d y la trayectoria descendente objetivo T_d tiene su punto de comienzo en (x_M, y_M) . Este es el punto de retorno en el que se invierte la tendencia ascendente del bucle de histéresis por una nueva tendencia descendente que hay que calcular con el modelo. Como se ha descrito anteriormente, la trayectoria descendente T_d se divide en dos tramos separados por el punto intermedio (x_{sdT}, y_{sdT}) , tal que

$$T_d(x) = \begin{cases} T_{d_r}(x) & x_{sdT} \leq x < x_M \\ T_{d_l}(x) & x_0 \leq x < x_{sdT} \end{cases} \quad (5.9)$$

Las coordenadas del punto intermedio (x_{sdT}, y_{sdT}) pueden ser deducidas de las expresiones (5.7) y (5.8), en las que el punto $(x_0, y_0) = (0, 0)$ es el punto inicial (x_{iT}, y_{iT}) de la trayectoria objetivo, y el punto (x_M, y_M) es el punto final (x_{fT}, y_{fT}) . Las expresiones resultantes son

$$x_{sdT} = \alpha_d \cdot x_M \quad (5.10)$$

$$y_{sdT} = \beta_d \cdot y_M \quad (5.11)$$

con $x_{sdT} \in [x_0, x_M]$ e $y_{sdT} \in [y_0, y_M]$.

Para obtener las trayectorias $T_{d_r}(x)$ y $T_{d_l}(x)$ en (5.9), se lleva a cabo el mapeado lineal descrito en la Sección 5.2 reemplazando los puntos inicial y final de la curva patrón P y de la trayectoria objetivo T de las expresiones (5.3) y (5.6), por los puntos inicial y final correspondientes a las curvas patrón y objetivo utilizadas en la construcción de cada segmento. Para realizar esto, es necesario establecer otro punto intermedio en la curva patrón P_d , quedando dividida en dos tramos P_{d_r} y P_{d_l} . A partir de la observación de los datos experimentales obtenidos en la caracterización del sensor táctil, para las curvas descendentes este punto se configura como $(x_{sdT}, P_d(x_{sdT}))$, es decir, que los puntos

intermedios de la curva patrón y de la curva objetivo comparten la coordenada x . Como vemos, se realiza una proyección del punto intermedio (x_{sdT}, y_{sdT}) en $(x_{sdT}, P_d(x_{sdT}))$ a lo largo del eje de ordenadas. Por tanto, el punto intermedio en la curva patrón se configura como

$$x_{sdP} = x_{sdT} \quad (5.12)$$

$$y_{sdP} = P_d(x_{sdT}) \quad (5.13)$$

Todos estos elementos del modelo, pueden ser observados en la Figura 5-3 para la construcción de las trayectorias descendentes a la derecha del punto intermedio, y en la Figura 5-4 para las trayectorias descendentes a la izquierda.

5.3.2.1. Estrategia a la derecha del punto intermedio

Para generar cualquier trayectoria objetivo descendente que comience en el punto de retorno (x_M, y_M) y que converja al punto (x_0, y_0) (ver Figura 5-3), para valores de entrada situados a la derecha del punto intermedio, $x_{sdT} \leq x_{Tr} < x_M$, se realiza un mapeo de la curva P_{d_r} a la trayectoria T_{d_r} mediante las expresiones (5.3) y (5.6).

Las ecuaciones resultantes para este tramo son

$$x_{Pr} = X_P(x_{Tr}, x_{sdT}, x_M, x_{sdT}, x_u) = x_{sd} + \frac{(x_u - x_{sdT}) \cdot (x_{Tr} - x_{sdT})}{(x_M - x_{sdT})} \quad (5.14)$$

$$y_{Tr} = T_{d_r}(x_{Tr}) = Y_T(y_{Pr}, y_{sdT}, y_M, y_{sdP}, y_u) = y_{sdT} + \frac{(y_M - y_{sdT}) \cdot (y_{Pr} - y_{sdP})}{(y_u - y_{sdP})} \quad (5.15)$$

donde $y_{Pr} = P_d(x_{Pr})$ y P_d es la curva patrón descendente obtenida por interpolación lineal de los puntos medidos experimentalmente en el sensor.

El mapeo para este tramo, como se puede observar, consiste en un escalado de la curva patrón P_{d_r} a la trayectoria T_{d_r} en ambos ejes de coordenadas.

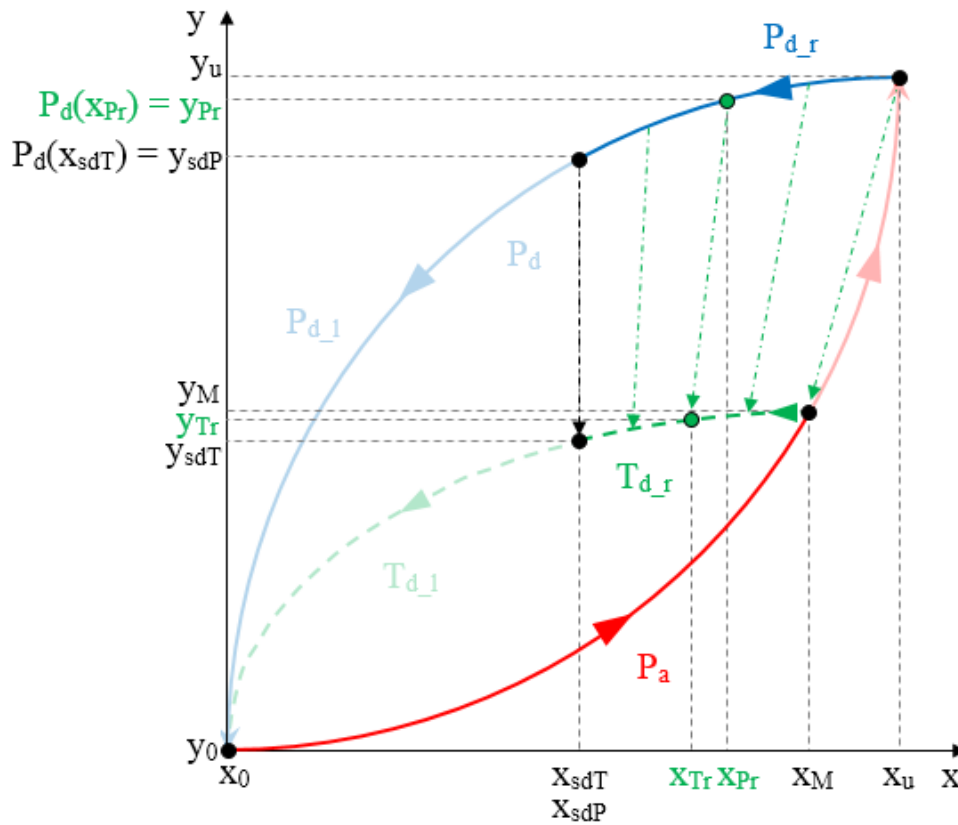


Figura 5-3. Construcción del tramo derecho de las curvas descendentes con ELAM_1.

5.3.2.2. Estrategia a la izquierda del punto intermedio

Cuando los valores de entrada están situados a la izquierda del punto intermedio, $x_0 \leq x_{TI} < x_{sdT}$ (ver Figura 5-4), la curva P_{d_l} es mapeada a la trayectoria T_{d_l} a partir de las expresiones (5.3) y (5.6).

Las expresiones deducidas para este tramo son

$$x_{Pl} = X_P(x_{TI}, x_0, x_{sdT}, x_0, x_{sdT}) = x_{TI} \tag{5.16}$$

$$y_{TI} = T_{d_l}(x_{TI}) = Y_T(y_{Pl}, y_0, y_{sdT}, y_0, y_{sdP}) = y_0 + \frac{(y_{Pl} - y_0) \cdot (y_{sdT} - y_0)}{(y_{sdP} - y_0)} \tag{5.17}$$

donde $y_{Pl} = P_d(x_{Pl})$ y P_d es la curva patrón descendente obtenida por interpolación lineal de los puntos medidos experimentalmente en el sensor.

Como se puede comprobar en la Figura 5-4, en este tramo se realiza una proyección a lo largo del eje de ordenadas de los puntos de la curva patrón hacia la curva objetivo.

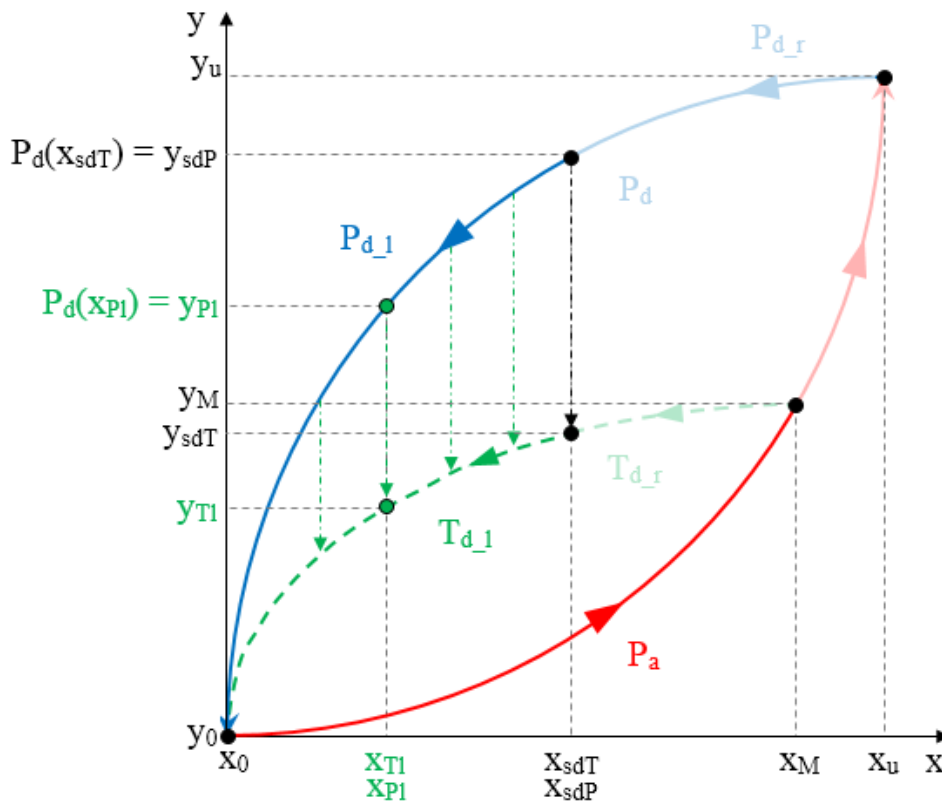


Figura 5-4. Construcción del tramo izquierdo de las curvas descendentes con ELAM_1.

Los valores de salida en las expresiones (5.15) y (5.17) dependen de las coordenadas del punto intermedio (x_{sdT}, y_{sdT}) , el cual a su vez, depende de los parámetros α_d y β_d en las ecuaciones (5.10) y (5.11). Un algoritmo de minimización de errores puede ajustar los datos experimentales de los ciclos internos a los valores proporcionados por (5.15) y (5.17) utilizando α_d y β_d como parámetros a estimar. Este proceso es descrito en la sección 1.4. Una vez estimados estos valores, el punto intermedio se obtiene fácilmente de las expresiones (5.10) y (5.11) para cualquier otra posible curva descendente en un ciclo interno y la trayectoria descendente es dada por (5.15) y (5.17).

5.3.3. Modelo Directo Curvas Ascendentes ELAM_1

Las curvas ascendentes del bucle de histéresis con el método ELAM_1 son construidas con la misma estrategia seguida para las curvas descendentes. La curva patrón en este caso es P_a y el punto de retorno (x_m, y_m) , inicia la nueva trayectoria interna ascendente T_a . Dicho punto es aquel en el que se invierte la tendencia descendente del bucle de

histéresis por una nueva tendencia ascendente. Para esta situación, esta trayectoria se divide en dos tramos estableciendo un punto intermedio (x_{saT}, y_{saT}) , tal que

$$T_a(x) = \begin{cases} T_{a_r}(x) & x_{saT} < x \leq x_u \\ T_{a_l}(x) & x_m < x \leq x_{saT} \end{cases} \quad (5.18)$$

Al igual que con las curvas descendentes, las coordenadas del punto intermedio (x_{saT}, y_{saT}) pueden ser obtenidas a partir de las expresiones (5.7) y (5.8), sustituyendo el punto inicial (x_{iT}, y_{iT}) de la trayectoria objetivo por el punto (x_m, y_m) y el punto final (x_{fT}, y_{fT}) por el punto (x_u, y_u) . Las expresiones resultantes son

$$x_{sa} = \alpha_a \cdot \Delta x + x_m \quad (5.19)$$

$$y_{sa} = \beta_a \cdot \Delta y + y_m \quad (5.20)$$

con $x_{sa} \in [x_m, x_u]$ y donde $\Delta x = (x_u - x_m)$ e $\Delta y = (y_u - y_m)$ definen el área de comportamiento de la curva objetivo.

Para obtener las trayectorias $T_{a_r}(x)$ y $T_{a_l}(x)$ en (5.18), es necesario establecer el correspondiente punto intermedio en la curva patrón P_a , quedando dividida en dos tramos P_{a_r} y P_{a_l} . De esta forma se realiza el mapeado lineal descrito en la sección 5.2 reemplazando los puntos inicial y final de la curva patrón P y de la trayectoria objetivo T en las expresiones (5.3) y (5.6), por los puntos inicial y final correspondientes a las curvas patrón y objetivo utilizadas en la construcción de cada segmento. Nuevamente, para llevar a cabo esta operación, a partir de la observación de los datos experimentales obtenidos en la caracterización del sensor táctil, para las curvas ascendentes este punto se configura como (x_{saT}, y_{saP}) , con $y_{saP} = P_a(x_{saT})$. Como se puede observar, los puntos intermedios de la curva patrón y de la curva objetivo comparten la coordenada x .

$$x_{saP} = x_{saT} \quad (5.21)$$

$$y_{saP} = P_a(x_{saT}) \quad (5.22)$$

La Figura 5-5 muestra un esquema de la construcción de las curvas ascendentes a la derecha del punto intermedio, mientras que la Figura 5-6 hace lo propio con las curvas ascendentes a la izquierda del punto de separación.

5.3.3.1. Estrategia a la derecha del punto intermedio

En este tramo, se realiza una proyección a lo largo del eje de ordenadas de los puntos de la curva patrón hacia la curva objetivo.

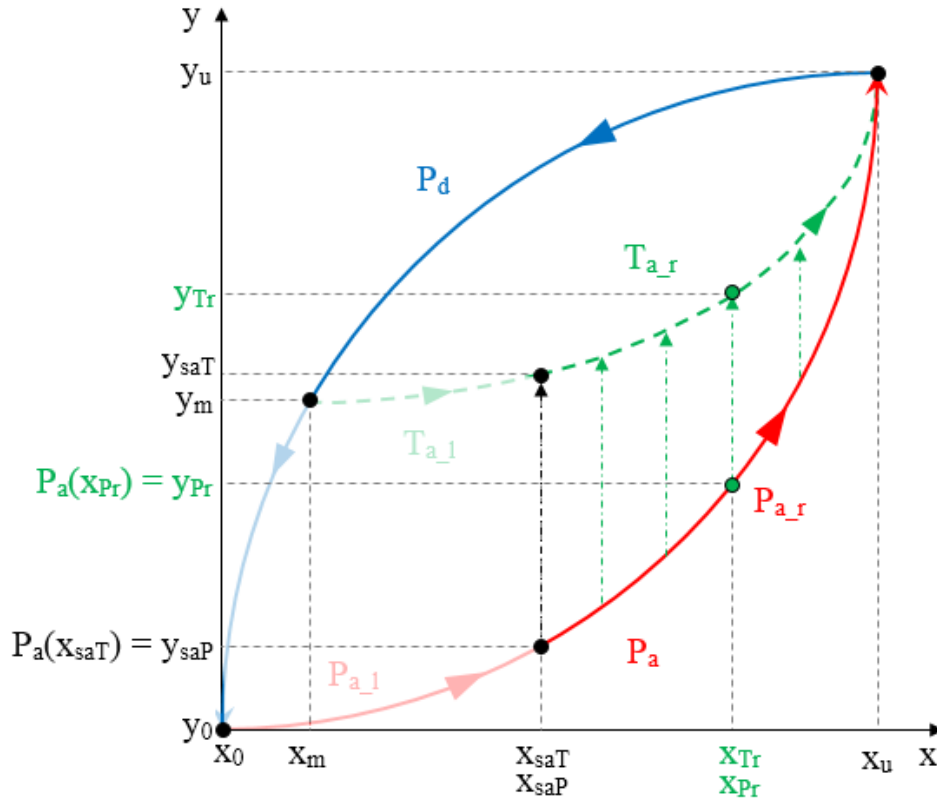


Figura 5-5. Construcción del tramo derecho de las curvas ascendentes con ELAM_1.

Cuando los valores de entrada están situados a la derecha del punto intermedio, es decir, $x_{saT} < x_{Tr} \leq x_u$ (ver Figura 5-5), la curva P_{a_r} es mapeada a la trayectoria T_{a_r} a partir de las expresiones (5.3) y (5.6), resultando las expresiones siguientes

$$x_{Pr} = X_P(x_{Tr}, x_{saT}, x_u, x_{saT}, x_u) = x_{Tr} \quad (5.23)$$

$$y_{Tr} = T_{a_r}(x_{Tr}) = Y_T(y_{Pr}, y_{saT}, y_u, y_{saP}, y_u) = y_{saT} + \frac{(y_{Pr} - y_{saP}) \cdot (y_u - y_{saT})}{(y_u - y_{saP})} \quad (5.24)$$

con $y_{Pr} = P_a(x_{Pr})$ y P_a es la curva patrón ascendente obtenida por interpolación lineal de los puntos medidos experimentalmente en el sensor.

5.3.3.2. Estrategia a la izquierda del punto intermedio

Para generar cualquier trayectoria objetivo ascendente que comience en el punto de retorno (x_m, y_m) y que converja al punto (x_u, y_u) (ver Figura 5-6), para valores de entrada situados a la izquierda del punto intermedio, $x_m < x_{TI} \leq x_{saT}$, se realiza un mapeo de la curva P_{a_l} a la trayectoria T_{a_l} mediante las expresiones (5.3) y (5.6).

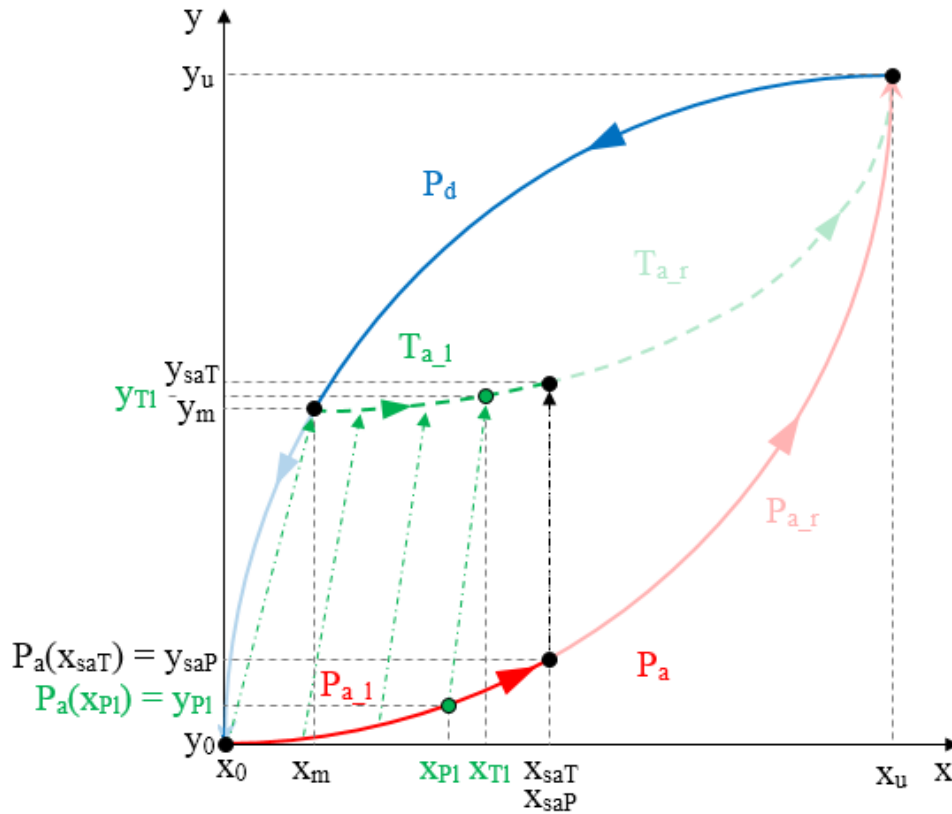


Figura 5-6. Construcción del tramo izquierdo de las curvas ascendentes con ELAM_1.

Este mapeo consiste en un escalado, en ambos ejes de coordenadas, de la curva patrón P_{a_l} a la trayectoria T_{a_l} .

Las ecuaciones resultantes para este tramo son

$$x_{Pl} = X_P(x_{TI}, x_m, x_{saT}, x_0, x_{saT}) = \frac{x_{saT} \cdot (x_{TI} - x_m)}{(x_{saT} - x_m)} \quad (5.25)$$

$$y_{TI} = T_{a_l}(x_{TI}) = Y_T(y_{Pl}, y_m, y_{saT}, y_0, y_{saP}) = y_m + \frac{y_{Pl} \cdot (y_{saT} - y_m)}{y_{saP}} \quad (5.26)$$

donde $y_{pi} = P_a(x_{pi})$ y P_a es la curva patrón ascendente obtenida por interpolación lineal de los puntos medidos experimentalmente en el sensor.

Los valores de salida en las expresiones (5.24) y (5.26) dependen de las coordenadas del punto intermedio (x_{saT}, y_{saT}) , el cual depende a su vez de los parámetros α_a y β_a en las ecuaciones (5.19) y (5.20). Nuevamente, un algoritmo de minimización de errores puede ajustar los datos experimentales de los ciclos internos a los valores proporcionados por (5.24) y (5.26) utilizando α_a y β_a como parámetros a estimar. Una vez estimados estos valores, el punto intermedio se obtiene fácilmente de las expresiones (5.19) y (5.20) para cualquier otra posible curva ascendente en un ciclo interno y la trayectoria ascendente es dada por (5.24) y (5.26).

En resumen, una vez obtenidos el conjunto de parámetros $X = \{\alpha_d, \beta_d, \alpha_a, \beta_a\}$, la salida completa del modelo ELAM_1 está dada por

$$y_{ELAM_1}(x(t)) = T(x) = \begin{cases} T_d(x) = \begin{cases} T_{d_r}(x) & x_{sdT} \leq x < x_M \\ T_{d_l}(x) & x_0 \leq x < x_{sdT} \end{cases} & x(t_i) < x(t_{i-1}) \\ T_a(x) = \begin{cases} T_{a_r}(x) & x_{saT} < x \leq x_u \\ T_{a_l}(x) & x_m < x \leq x_{saT} \end{cases} & x(t_i) \geq x(t_{i-1}) \end{cases} \quad (5.27)$$

donde $T_{d_r}(x)$, $T_{d_l}(x)$, $T_{a_r}(x)$ y $T_{a_l}(x)$ son obtenidas de las ecuaciones (5.15), (5.17), (5.24) y (5.26), respectivamente.

5.4. Método ELAM_2

5.4.1. Introducción

Esta segunda versión del método ELAM, utiliza la misma estrategia seguida por el método ELAM_1 para las curvas descendentes, por lo que las expresiones (5.15) y (5.17) definen la salida del modelo para esa situación. Sin embargo, para las curvas ascendentes se ha seguido una nueva estrategia con el fin de conseguir un mejor ajuste del modelo a los datos medidos experimentalmente. En este caso, los puntos intermedios se sitúan en el extremo inferior o punto de retorno de las curvas objetivo y patrón. El efecto de esta decisión es que los puntos intermedios no afectan al mapeo y por tanto es como si no se

utilizaran. Además, se realiza una proyección de la curva patrón a la trayectoria objetivo a lo largo del eje de abscisas.

En el siguiente apartado, se describe la construcción de las curvas ascendentes del bucle de histéresis siguiendo este criterio.

5.4.2. Modelo Directo Curvas Ascendentes

La Figura 5-7 muestra un esquema de la construcción de las curvas ascendentes con el método ELAM_2. La curva objetivo T_a es generada a partir de la curva patrón P_a e inicia su trayecto en el punto de retorno (x_m, y_m) . El mapeo de la trayectoria T_a se realiza desde el tramo de la curva patrón P_a delimitado por la proyección del punto (x_m, y_m) a lo largo del eje de abscisas, denominado (x_{mP}, y_m) , y el punto de convergencia (x_u, y_u) . Dado que la función P_a es invertible, la coordenada x_{mP} se obtiene como $x_{mP} = P_a^{-1}(y_m)$. A partir de esta consideración, y utilizando las expresiones generales (5.3) y (5.6), el modelo queda definido con las ecuaciones siguientes

$$x_P = X_P(x_T, x_m, x_u, x_{mP}, x_u) = x_{mP} + \frac{(x_u - x_{mP}) \cdot (x_T - x_m)}{(x_u - x_m)} \quad (5.28)$$

$$y_T = T(x_T) = Y_T(y_P, y_m, y_u, y_m, y_u) = y_P \quad (5.29)$$

con $y_P = P_a(x_P)$.

De acuerdo con lo expuesto anteriormente, las expresiones para los puntos intermedios en las curvas ascendentes del método ELAM_2, quedan como

$$x_{saT} = x_m \quad (5.30)$$

$$y_{saT} = y_m \quad (5.31)$$

$$x_{saP} = x_{mP} \quad (5.32)$$

$$y_{saP} = y_m \quad (5.33)$$

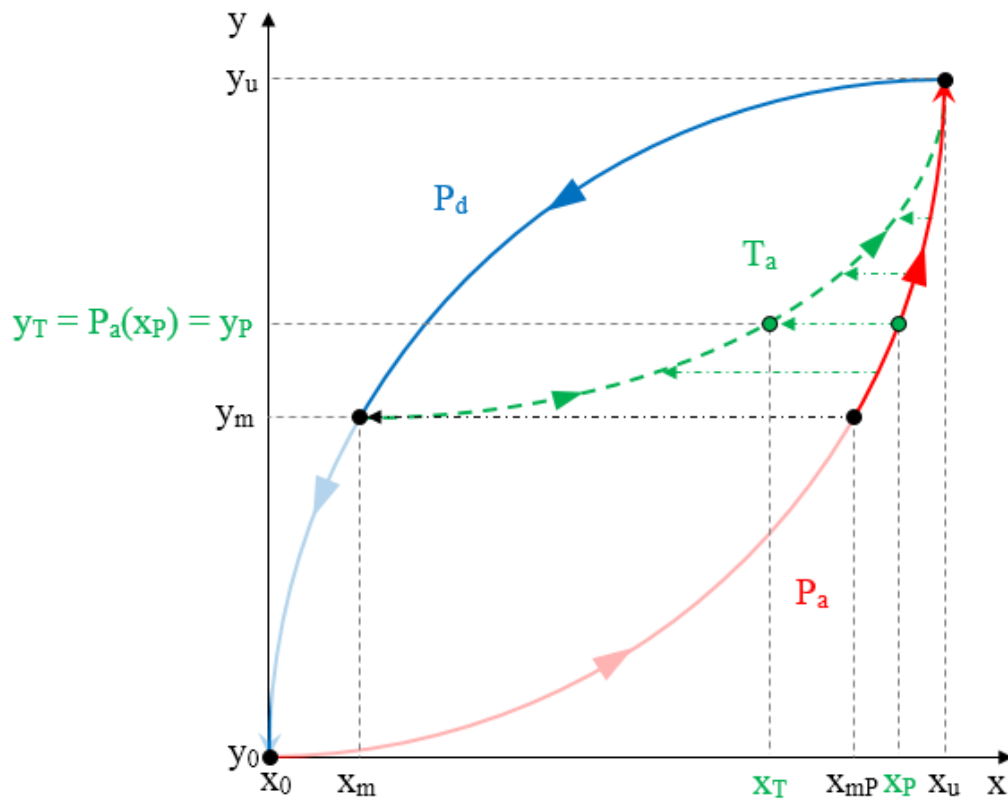


Figura 5-7. Construcción de las curvas ascendentes con ELAM_2.

5.5. Método ELAM_3

5.5.1. Introducción

Esta nueva versión del método ELAM, mantiene la misma estrategia que el método ELAM_1 para la construcción de las curvas descendentes, así que siguen siendo válidas las expresiones (5.15) y (5.17) para definir la salida del modelo en esa situación. Para construir las curvas ascendentes, esta versión se basa en la misma estrategia seguida por el método ELAM_2 pero, introduciendo un punto intermedio (x_{saT}, y_{saT}) para separar las trayectorias objetivo en dos tramos como se hacía en el método ELAM_1. El mapeo realizado a ambos lados de este punto intermedio es el mismo que el empleado en las curvas de subida del método ELAM_2, pero gracias a ese punto, se consigue una mejor adaptación del modelo a los datos experimentales. El punto intermedio correspondiente en la curva patrón (x_{saP}, y_{saP}) se obtiene por la proyección de (x_{saT}, y_{saT}) sobre la curva

P_a a lo largo del eje de abscisas, al contrario que en el método ELAM_1, que se realizaba a lo largo del eje de ordenadas.

5.5.2. Modelo Directo Curvas Ascendentes ELAM_3

La curva patrón para la construcción de las curvas ascendentes es P_a y cada nueva trayectoria objetivo T_a , comienza en el punto de retorno (x_m, y_m) . Esta trayectoria se divide en dos tramos debido a la presencia del punto de control (x_{saT}, y_{saT}) tal que

$$T_a(x) = \begin{cases} T_{a-r}(x) & x_{saT} < x \leq x_u \\ T_{a-l}(x) & x_m < x \leq x_{saT} \end{cases} \quad (5.34)$$

El punto intermedio (x_{saT}, y_{saT}) se obtiene de las expresiones (5.7) y (5.8). Sin embargo, en esta ocasión, el parámetro α es propuesto de la siguiente forma

$$\alpha = \alpha_{a1} \cdot \Delta x + \alpha_{a0} \quad (5.35)$$

siendo $\Delta x = (x_u - x_m)$ la anchura del tramo de histéresis a construir.

Por lo que las expresiones que definen el punto intermedio para el método ELAM_3 quedan como

$$x_{sa} = \alpha_{a1} \cdot (\Delta x)^2 + \alpha_{a0} \cdot \Delta x + x_m \quad (5.36)$$

$$y_{sa} = \beta_a \cdot \Delta y + y_m \quad (5.37)$$

con $x_{sa} \in [x_m, x_u]$, $y_{sa} \in [y_m, y_u]$ y $\Delta y = (y_u - y_m)$ como la altura del tramo de histéresis a construir.

Hay que hacer notar que el parámetro α_{a1} introduce una dependencia cuadrática de la localización del punto intermedio en la longitud del intervalo $[x_m, x_u]$ que mejora el ajuste de las curvas ascendentes objetivo. La propuesta inicial presentada en la ecuación (5.7) de una dependencia lineal, no es suficiente en el caso de las curvas ascendentes para obtener un buen ajuste, por lo que el siguiente nivel de complejidad se considera que es la dependencia cuadrática con la longitud del intervalo de la curva objetivo. Para conseguir el mapeo de la curva patrón P_a a la curva objetivo T_a de forma correcta, es

necesario obtener el correspondiente punto intermedio (x_{saP}, y_{saP}) en la curva patrón. Eso se consigue con la proyección del punto intermedio (x_{saT}, y_{saT}) sobre la curva patrón P_a a lo largo del eje de abscisas, por lo que ambos puntos intermedios, comparten la misma coordenada y . Dado que la función P_a es invertible, la coordenada x_{saP} se obtiene como $x_{saP} = P_a^{-1}(y_{saT})$. Este aspecto, diferencia al método ELAM_3 del ELAM_1, que realizaba la proyección del punto intermedio a lo largo del eje de ordenadas. El punto intermedio (x_{saP}, y_{saP}) divide la curva patrón en los tramos P_{a_r} y P_{a_l} , y se obtiene como

$$x_{saP} = P_a^{-1}(y_{saT}) \quad (5.38)$$

$$y_{saP} = y_{saT} \quad (5.39)$$

Cualquier otra dependencia para obtener los puntos intermedios podría ser usada para curvas con otras formas, lo que demuestra la flexibilidad del método propuesto.

5.5.2.1. Estrategia a la derecha del punto intermedio

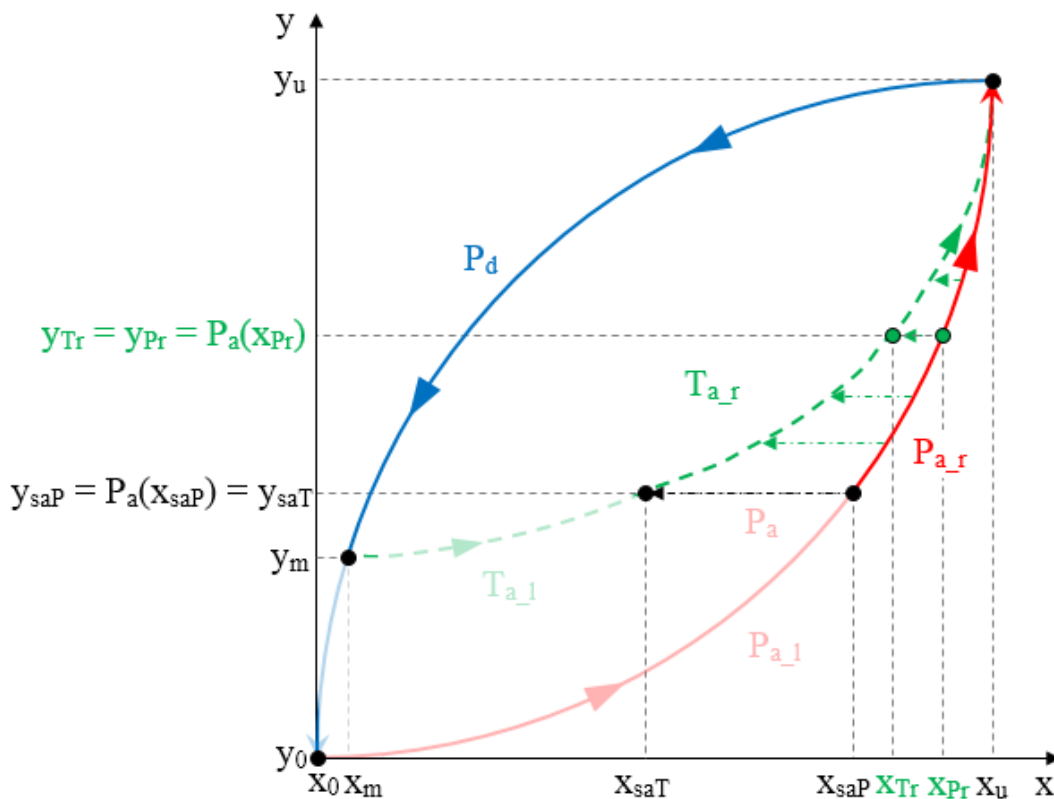


Figura 5-8. Construcción del tramo derecho de las curvas ascendentes con ELAM_3.

Para valores de entrada $x_{saT} < x_{Tr} \leq x_u$, la curva patrón P_{a_r} es mapeada a la trayectoria objetivo T_{a_r} mediante una proyección a lo largo del eje de abscisas. De las expresiones generales (5.3) y (5.6), se obtienen respectivamente

$$x_{Pr} = X_P(x_{Tr}, x_{saT}, x_u, x_{saP}, x_u) = x_{saP} + \frac{(x_u - x_{saP}) \cdot (x_{Tr} - x_{saT})}{(x_u - x_{saT})} \quad (5.40)$$

$$y_{Tr} = T_{a_r}(x_{Tr}) = Y_T(y_{Pr}, y_{saT}, y_u, y_{saP}, y_u) = y_{Pr} \quad (5.41)$$

con $y_{Pr} = P_a(x_{Pr})$.

Un esquema de la construcción de este tramo se observa en la Figura 5-8.

5.5.2.2. Estrategia a la izquierda del punto intermedio

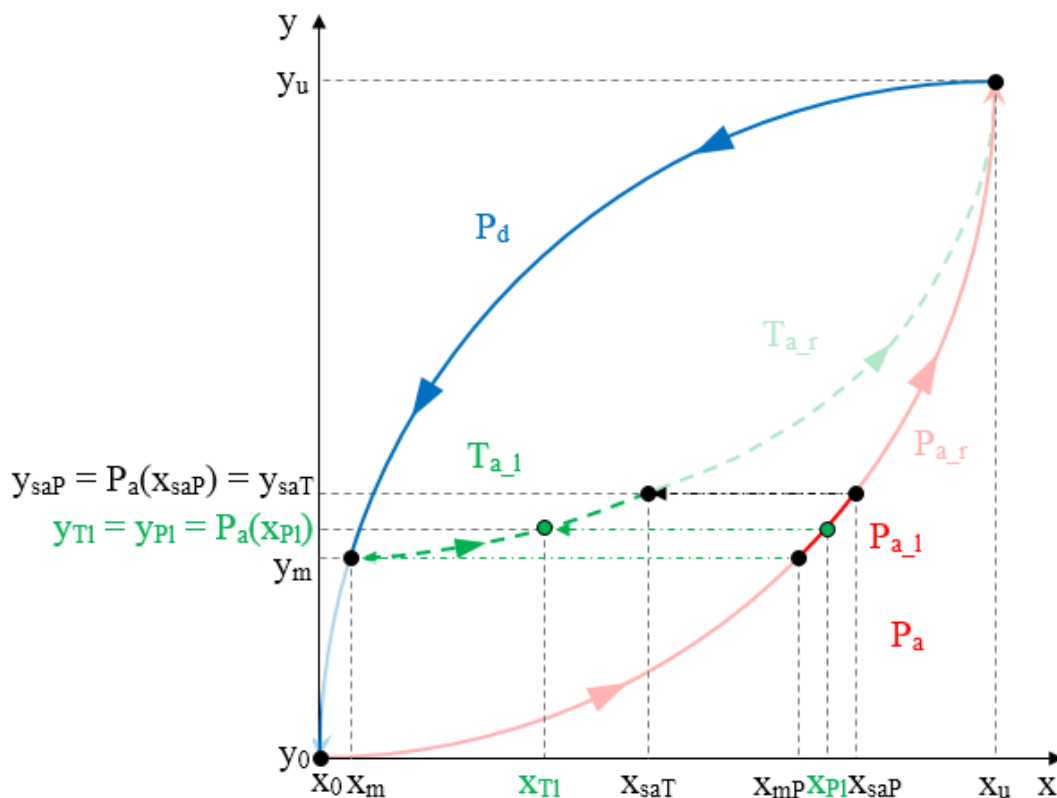


Figura 5-9. Construcción del tramo izquierdo de las curvas ascendentes con ELAM_3.

Cuando los valores de entrada están situados a la izquierda del punto intermedio en la curva objetivo, $x_m < x_{TI} \leq x_{saT}$, se realiza la misma proyección de puntos que en el tramo

derecho cambiando los puntos inicial y final de las curvas patrón y objetivo por los correspondientes al tramo en el que estamos (ver Figura 5-9). De esta forma, de las ecuaciones generales (5.3) y (5.6) se deducen las siguientes expresiones

$$x_{Pl} = X_P(x_{Tl}, x_m, x_{saT}, x_{mP}, x_{saP}) = x_{mP} + \frac{(x_{saP} - x_{mP}) \cdot (x_{Tl} - x_m)}{(x_{saT} - x_m)} \quad (5.42)$$

$$y_{Tl} = T_{a-1}(x_{Tl}) = Y_T(y_{Pl}, y_m, y_{saT}, y_{mP}, y_{saP}) = y_{Pl} \quad (5.43)$$

con $y_{Pl} = P_a(x_{Pl})$. El punto de retorno en la curva objetivo (x_m, y_m) tiene su punto correspondiente (x_{mP}, y_{mP}) en la curva patrón mediante la proyección sobre la curva patrón P_a a lo largo del eje de abscisas, por lo que ambos puntos de retorno, comparten la misma coordenada y . Dado que la función P_a es invertible, la coordenada x_{mP} se obtiene como $x_{mP} = P_a^{-1}(y_m)$.

5.6. Modelo General Inverso

El propósito de construir un modelo de la histéresis del sensor táctil, es que la inversa del modelo pueda ser aplicada en cascada con la salida del sensor para compensar su comportamiento de histéresis y obtener una respuesta a la entrada aplicada al sensor lo más precisa posible. Por lo tanto, es necesario invertir el modelo ELAM de tal forma que para cualquier valor de salida del sensor táctil $y_{out} = T(x_T)$ se pueda calcular el valor de entrada x_T que lo genera. La construcción del modelo inverso se realiza de forma similar a la del modelo directo descrito en la Sección 5.2. En esta ocasión, se utilizan las curvas externas inversas P_a^{-1} y P_d^{-1} obtenidas a partir de los datos experimentales para actuar como curvas patrón en la generación el modelo inverso. Mediante un mapeo lineal, se obtiene cualquier trayectoria inversa objetivo T^{-1} .

De la expresión (5.6), se deduce el valor de salida de la curva patrón P que se corresponde con el valor de la salida del sensor $y_{out} = y_T = T(x_T)$ como

$$y_P = y_{iP} + \frac{(y_T - y_{iT}) \cdot (y_{fP} - y_{iP})}{(y_{fT} - y_{iT})} = Y_T^{-1}(y_T, y_{iT}, y_{fT}, y_{iP}, y_{fP}) \quad (5.44)$$

Mediante interpolación lineal inversa, es posible obtener el valor x_p como $x_p = P^{-1}(P(x_p))$, por lo que a partir de la expresión (5.3) se puede obtener el siguiente valor de x_T

$$x_T = x_{iT} + \frac{(x_p - x_{iP}) \cdot (x_{fT} - x_{iT})}{(x_{fP} - x_{iP})} = X_P^{-1}(x_p, x_{iT}, x_{fT}, x_{iP}, x_{fP}) \quad (5.45)$$

Las expresiones (5.44) y (5.45) junto con los puntos intermedios definen completamente el mapeo lineal para el modelo inverso ELAM, y de ellas, se pueden deducir las ecuaciones para construir cada tramo ascendente o descendente del modelo inverso de forma similar a como se realizó para construir el modelo directo. Las funciones inversas Y_T^{-1} y X_P^{-1} serán utilizadas para tal fin. La existencia de las funciones inversas queda garantizada con las desigualdades $x_{fP} \neq x_{iP}$ y $y_{fP} \neq y_{iP}$, lo cual no supone ninguna restricción práctica.

La determinación del punto intermedio (x_{sT}, y_{sT}) en la curva objetivo para el modelo inverso se obtiene de la misma forma que en el modelo directo, por lo que las ecuaciones (5.7) y (5.8) son válidas. Los puntos intermedios (x_{sP}, y_{sP}) en la curva patrón son seleccionados en cada una de las tres estrategias propuestas del método ELAM, tal y como se realizan en sus correspondientes modelos directos.

5.7. Modelo Inverso ELAM_1

A continuación, se describe la construcción del modelo inverso para las curvas ascendentes y descendentes mediante el método ELAM_1.

5.7.1. Modelo Inverso Curvas Descendentes ELAM_1

El método ELAM_1 introduce un punto intermedio (x_{sdT}, y_{sdT}) , por lo que la curva externa descendente P_d^{-1} , se divide en dos tramos: $P_{d_r}^{-1}$ a la derecha del punto intermedio y $P_{d_l}^{-1}$ a la izquierda.

5.7.1.1. Estrategia a la derecha del punto intermedio

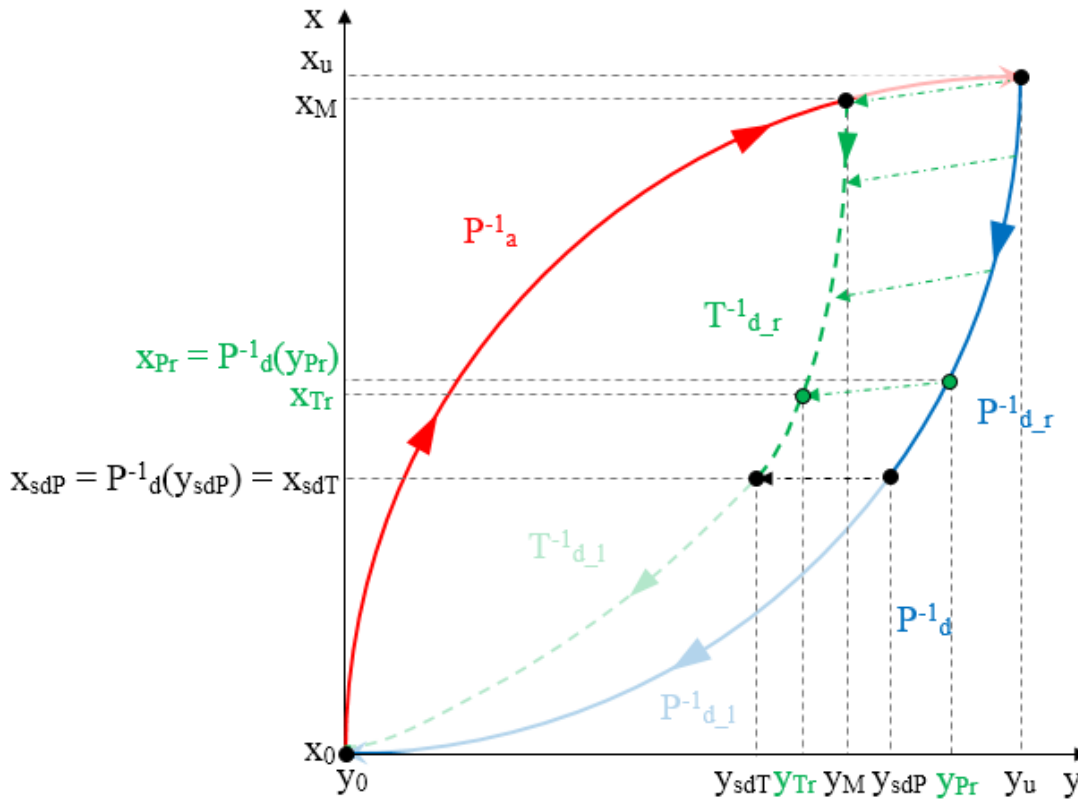


Figura 5-10. Construcción del tramo derecho del modelo inverso ELAM_1 para las curvas descendentes.

La Figura 5-10 muestra un esquema de la construcción del modelo inverso para las curvas descendentes. Estas curvas, al igual que en el modelo directo, quedan determinadas por el punto de retorno (x_M, y_M) y el punto intermedio (x_{sdT}, y_{sdT}) .

Para valores de entrada $y_{sdT} \leq y_{Tr} < y_M$, se realiza un mapeo de la curva patrón $P_{d_r}^{-1}$ a la trayectoria objetivo $T_{d_r}^{-1}$. Para este proceso, es necesario conocer el punto intermedio en la curva patrón y_{sdP} tal que $P_d^{-1}(y_{sdP}) = x_{sdT}$. Destacar que como el punto intermedio es el mismo que en el modelo directo, y_{sdP} se puede obtener como $y_{sdP} = P_d(x_{sdT})$. A cada valor de y_{Tr} en $T_{d_r}^{-1}$, le corresponde un valor $y_{Pr} = P(x_{Pr})$ en P_d^{-1} que puede ser deducido de la ecuación (5.44) como

$$y_{Pr} = Y_T^{-1}(y_{Tr}, y_{sdT}, y_M, y_{sdP}, y_u) = y_{sdP} + \frac{(y_{Tr} - y_{sdT}) \cdot (y_u - y_{sdP})}{(y_M - y_{sdT})} \quad (5.46)$$

con $y_M \neq y_{sdT}$ para garantizar la existencia de la función inversa.

El valor de $T_{d_r}^{-1}$ es deducido de la expresión (5.45) y su valor es

$$x_{Tr} = T_{d_r}^{-1}(y_{Tr}) = X_P^{-1}(x_{Pr}, x_{sdT}, x_M, x_{sdT}, x_u) = x_{sdT} + \frac{(x_{Pr} - x_{sdT}) \cdot (x_M - x_{sdT})}{(x_u - x_{sdT})} \quad (5.47)$$

siendo $x_{Pr} = P_d^{-1}(y_{Pr})$ y $x_u \neq x_{sdT}$.

5.7.1.2. Estrategia a la izquierda del punto intermedio

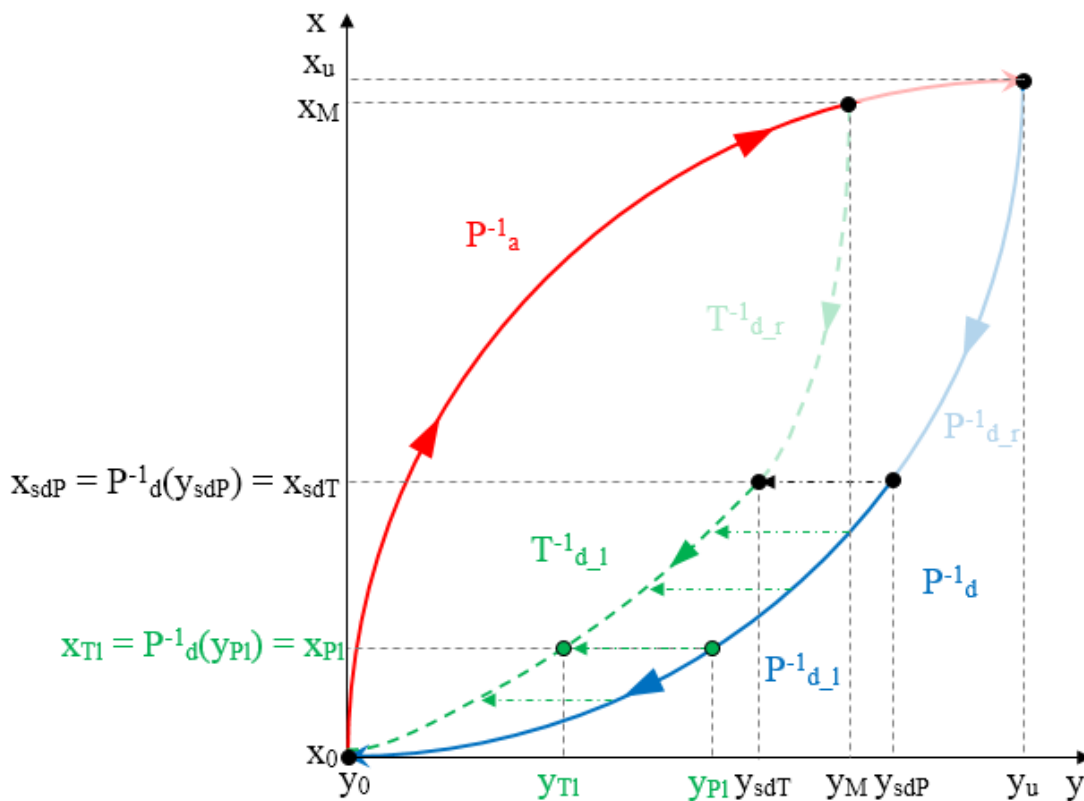


Figura 5-11. Construcción del tramo izquierdo del modelo inverso ELAM_1 para las curvas descendentes.

Para valores de entrada $y_0 \leq y_{TI} < y_{sdT}$, se realiza un mapeo de la curva $P_{d_l}^{-1}$ a la trayectoria de $T_{d_l}^{-1}$, para lo que será necesario determinar el valor y_{PI} en P_d^{-1} que corresponda a cada valor en la curva objetivo y_{TI} . A partir de las ecuaciones (5.44) y (5.45) se obtienen

$$y_{Pl} = Y_T^{-1}(y_{Tl}, y_0, y_{sdT}, y_0, y_{sdP}) = \frac{y_{Tl} \cdot y_{sdP}}{y_{sdT}} \quad (5.48)$$

$$x_{Tl} = T_{d_l}^{-1}(y_{Tl}) = X_P^{-1}(x_{Pl}, x_0, x_{sdT}, x_0, x_{sdT}) = x_{Pl} \quad (5.49)$$

con $x_{Pl} = P_d^{-1}(y_{Pl})$.

5.7.2. Modelo Inverso Curvas Ascendentes ELAM_1

5.7.2.1. Estrategia a la derecha del punto intermedio

La Figura 5-12, muestra la construcción del modelo inverso para las trayectorias ascendentes que comienzan en el punto de retorno (y_m, x_m) , y que converjan al punto (y_u, x_u) .

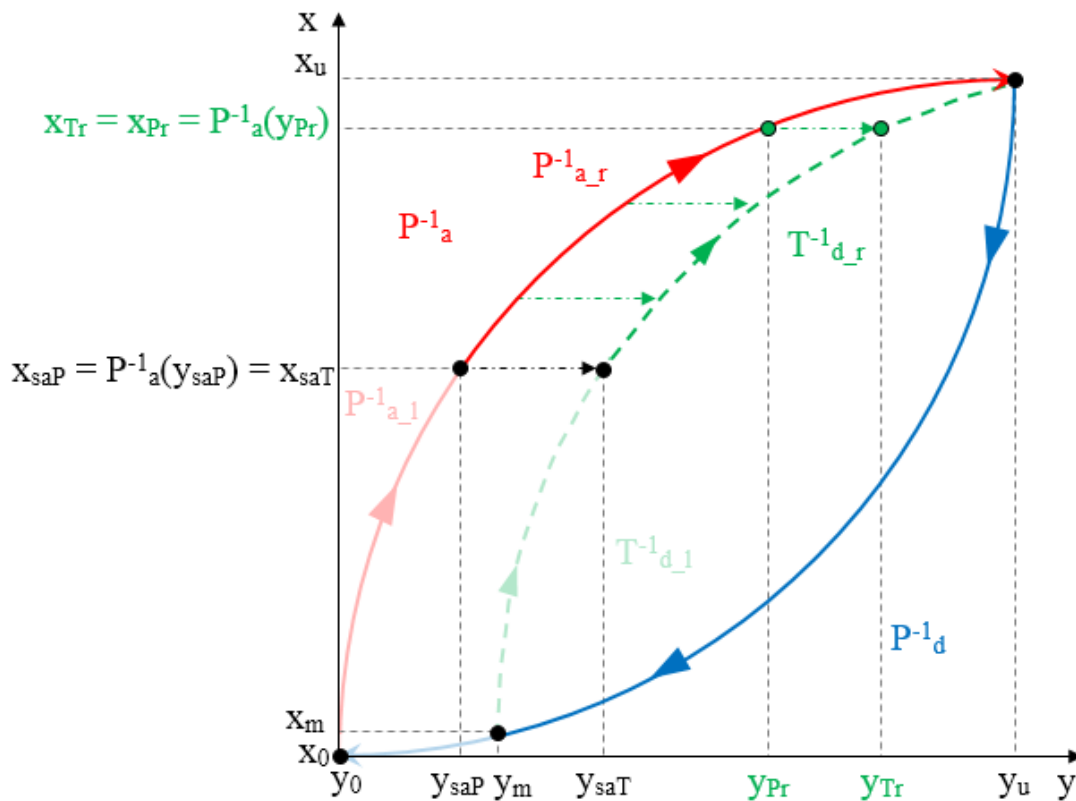


Figura 5-12. Construcción del tramo derecho del modelo inverso ELAM_1 para las curvas ascendentes.

Para valores de entrada $y_{saT} < y_{Tr} \leq y_u$, se realiza una proyección, a lo largo del eje de ordenadas, de la curva externa $P_{a_r}^{-1}$ a la trayectoria interna $T_{a_r}^{-1}$. Para este proceso, es necesario conocer el punto intermedio en la curva patrón y_{saP} tal que $P_a^{-1}(y_{saP}) = x_{saT}$. Destacar que como el punto intermedio es el mismo que en el modelo directo, y_{saP} se puede obtener como $y_{saP} = P_a(x_{saT})$. De las ecuaciones generales (5.44) y (5.45), se deducen las siguientes expresiones

$$y_{Pr} = Y_T^{-1}(y_{Tr}, y_{saT}, y_u, y_{saP}, y_u) = y_{saP} - \frac{(y_{Tr} - y_{saT}) \cdot (y_u - y_{saP})}{(y_{saT} - y_u)} \quad (5.50)$$

$$x_{Tr} = T_{d_r}^{-1}(y_{Tr}) = X_P^{-1}(x_{Pr}, x_{saT}, x_u, x_{saP}, x_u) = x_{Pr} \quad (5.51)$$

donde $x_{Pr} = P_a^{-1}(y_{Pr})$ y $y_{saT} \neq y_u$.

5.7.2.2. Estrategia a la izquierda del punto intermedio

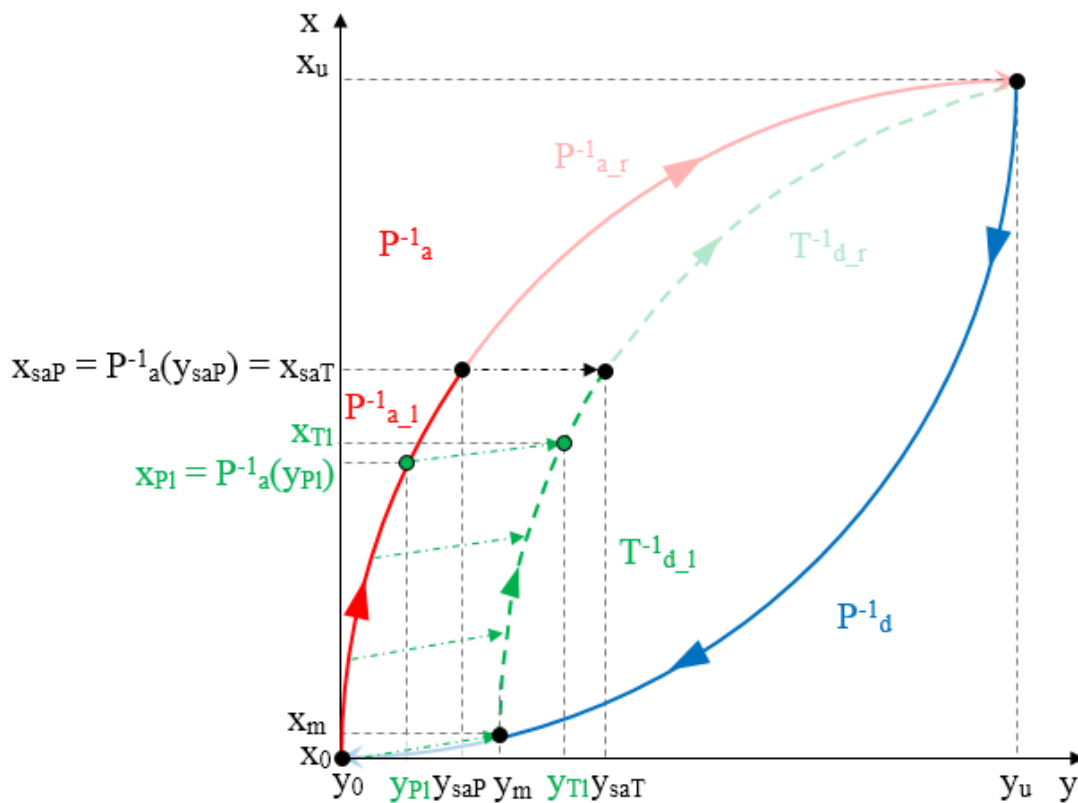


Figura 5-13. Construcción del tramo izquierdo del modelo inverso ELAM_1 para las curvas ascendentes.

Para valores de entrada $y_m < y_{Tl} \leq y_{saT}$, se realiza un mapeo de la curva patrón $P_{a_l}^{-1}$ a la trayectoria objetivo $T_{a_l}^{-1}$. Para este proceso, es necesario conocer el punto intermedio en la curva patrón y_{saP} tal que $P_a^{-1}(y_{saP}) = x_{saT}$. Destacar que como el punto intermedio es el mismo que en el modelo directo, y_{saP} se puede obtener como $y_{saP} = P_a(x_{saT})$ (ver Figura 5-13). A cada valor de y_{Tl} en $T_{d_l}^{-1}$, le corresponde un valor $y_{Pl} = P(x_{Pl})$ en P_a^{-1} que puede ser deducido de la ecuación (5.44) como

$$y_{Pl} = Y_T^{-1}(y_{Tl}, y_m, y_{saT}, y_0, y_{saP}) = \frac{(y_{Tl} - y_m) \cdot y_{saP}}{(y_{saT} - y_m)} \quad (5.52)$$

con $y_{saT} \neq y_m$ para garantizar la existencia de la función inversa.

El valor de $T_{d_l}^{-1}$ es deducido de la expresión (5.45) sabiendo que $x_{Pl} = P^{-1}(P(x_{Pl}))$ y su valor es

$$x_{Tl} = T_{d_l}^{-1}(y_{Tl}) = X_P^{-1}(x_{Pl}, x_m, x_{saT}, x_0, x_{saT}) = x_m + \frac{x_{Pl} \cdot (x_{saT} - x_m)}{x_{saT}} \quad (5.53)$$

Resumiendo, el modelo inverso ELAM_1 puede ser expresado como

$$T^{-1}(y) = \begin{cases} T_d^{-1}(y) = \begin{cases} T_{d_r}^{-1}(y) & y_{sdT} \leq y < y_M \\ T_{d_l}^{-1}(y) & y_0 \leq y < y_{sdT} \end{cases} & y(t_i) < y(t_{i-1}) \\ T_a^{-1}(y) = \begin{cases} T_{a_r}^{-1}(y) & y_{saT} < y \leq y_u \\ T_{a_l}^{-1}(y) & y_m < y \leq y_{saT} \end{cases} & y(t_i) \geq y(t_{i-1}) \end{cases} \quad (5.54)$$

donde las funciones de salida $T_{d_r}^{-1}$, $T_{d_l}^{-1}$, $T_{a_r}^{-1}$ y $T_{a_l}^{-1}$ son obtenidas de las expresiones (5.47), (5.49), (5.51) y (5.53), respectivamente.

5.8. Modelo Inverso ELAM_2

5.8.1. Modelo Inverso Curvas Ascendentes ELAM_2

Para cualquier valor de entrada y_T , se realiza una proyección a lo largo del eje de ordenadas de la curva patrón externa P_a^{-1} a la trayectoria interna T_a^{-1} . De las ecuaciones generales (5.44) y (5.45), se deducen las siguientes expresiones

$$y_P = Y_T^{-1}(y_T, y_m, y_u, y_m, y_u) = y_T \tag{5.55}$$

$$x_T = T_a^{-1}(y_T) = X_P^{-1}(x_P, x_m, x_u, x_{mP}, x_u) = x_m + \frac{(x_P - x_{mP}) \cdot (x_u - x_m)}{(x_u - x_{mP})} \tag{5.56}$$

donde $x_P = P_a^{-1}(y_P)$, $x_{mP} = P_a^{-1}(y_m)$ y $x_u \neq x_{mP}$.

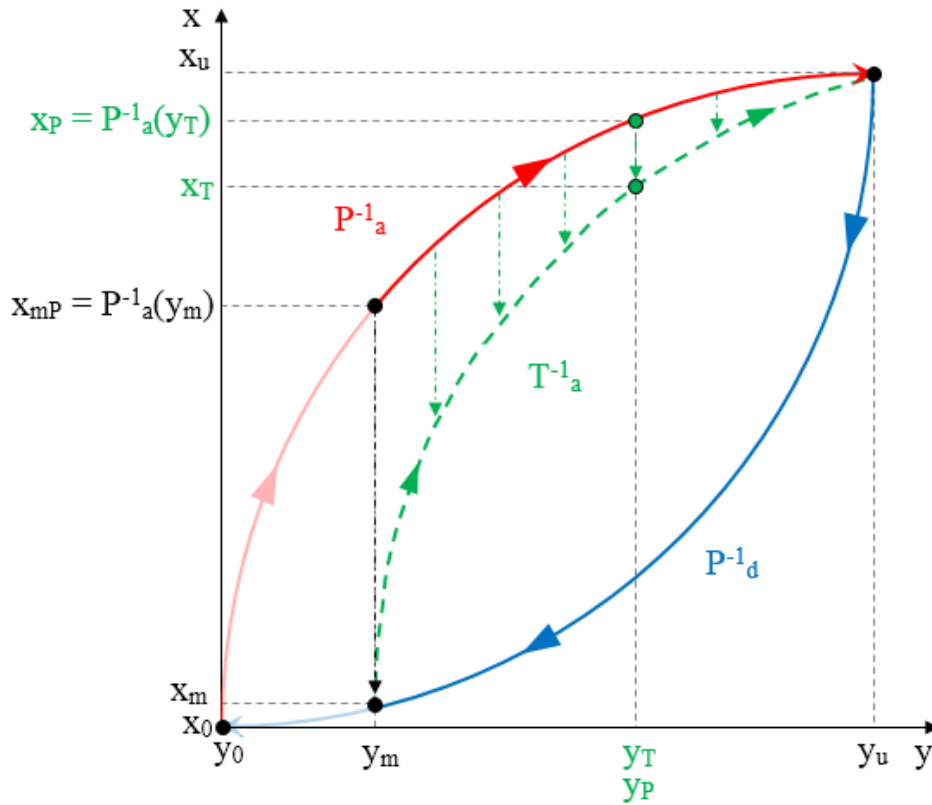


Figura 5-14. Construcción de las curvas ascendentes del modelo inverso con ELAM_2.

La Figura 5-14 muestra gráficamente el proceso seguido.

Resumiendo, el modelo inverso ELAM_2 puede ser expresado como

$$T^{-1}(y) = \begin{cases} T_d^{-1}(y) = \begin{cases} T_{d-r}^{-1}(y) & y_{sdT} \leq y < y_M \\ T_{d-l}^{-1}(y) & y_0 \leq y < y_{sdT} \end{cases} & y(t_i) < y(t_{i-1}) \\ T_a^{-1}(y) & y(t_i) \geq y(t_{i-1}) \end{cases} \tag{5.57}$$

donde las funciones de salida T_{d-r}^{-1} , T_{d-l}^{-1} y T_a^{-1} son obtenidas de las expresiones (5.47), (5.49) y (5.56), respectivamente.

5.9. Modelo Inverso ELAM_3

5.9.1. Modelo Inverso Curvas Ascendentes ELAM_3

5.9.1.1. Estrategia a la derecha del punto intermedio

La Figura 5-15 muestra un esquema de la construcción del modelo inverso para el tramo derecho de las trayectorias ascendentes que comienzan en el punto de retorno (y_m, x_m) y que convergen al punto (y_u, x_u) .

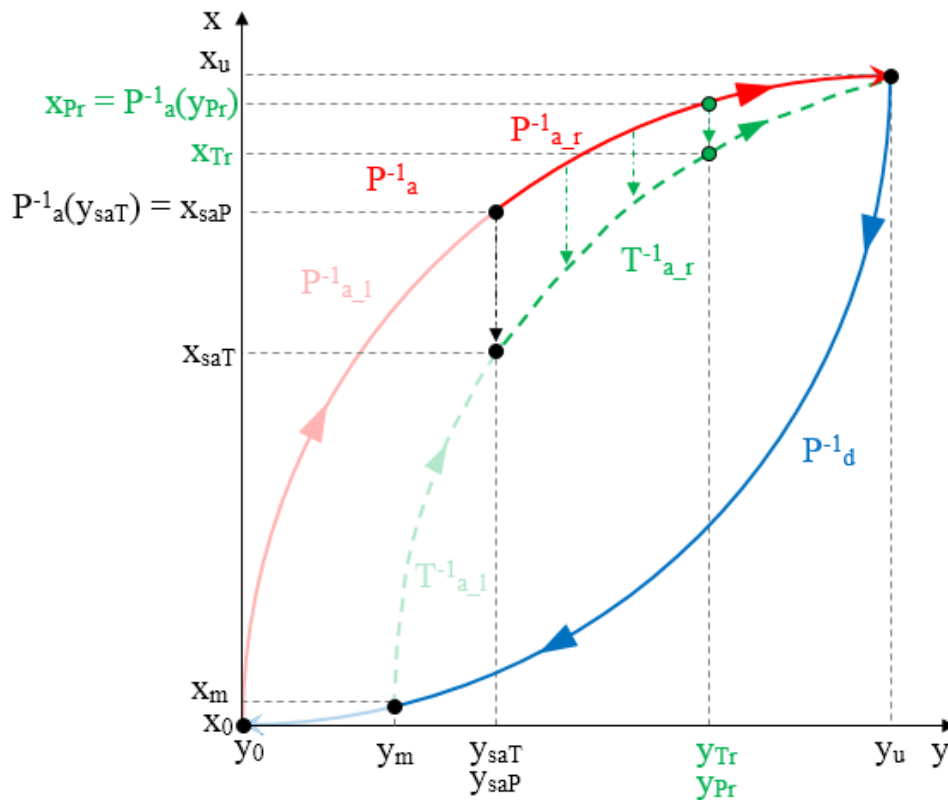


Figura 5-15. Construcción del tramo derecho del modelo inverso ELAM_3 para las curvas ascendentes.

Para valores de entrada $y_{saT} < y_{Tr} \leq y_u$, el mapeo lineal se realiza mediante una proyección a lo largo del eje de ordenadas de la curva externa $P_{a_r}^{-1}$ a la trayectoria interna $T_{a_r}^{-1}$. A partir de las ecuaciones generales inversas (5.44) y (5.45), se deducen las expresiones

$$y_{Pr} = Y_T^{-1}(y_{Tr}, y_{saT}, y_u, y_{saP}, y_u) = y_{Tr} \tag{5.58}$$

$$x_{Tr} = T_{a_r}^{-1}(y_{Tr}) = X_P^{-1}(x_{Pr}, x_{saT}, x_u, x_{saP}, x_u) = x_{saT} + \frac{(x_{Pr} - x_{saP}) \cdot (x_u - x_{saT})}{(x_u - x_{saP})} \tag{5.59}$$

con $x_{Pr} = P_a^{-1}(y_{Pr})$ y $x_{saP} = P_a^{-1}(y_{saT})$ siendo las proyecciones a lo largo del eje de ordenadas de las coordenadas y_{Tr} e y_{saT} en la curva patrón P_a^{-1} . Además, $x_u \neq x_{saP}$ para asegurar la existencia de la función inversa.

5.9.1.2. Estrategia a la izquierda del punto intermedio

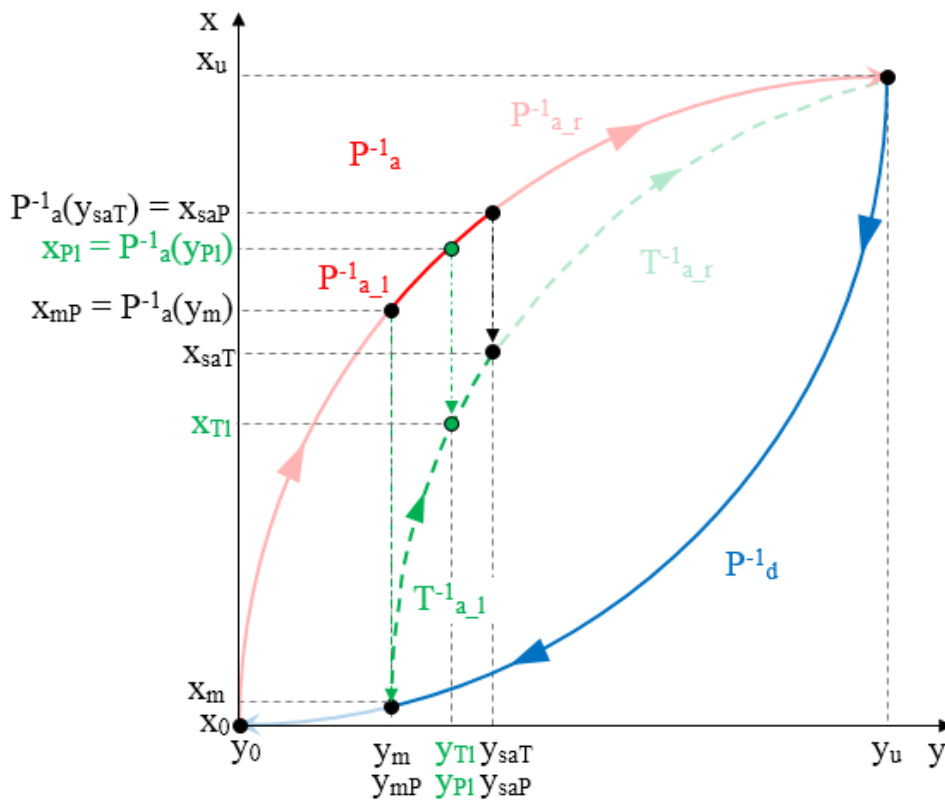


Figura 5-16. Construcción del tramo izquierdo del modelo inverso ELAM_3 para las curvas ascendentes.

Cuando los valores de entrada son $y_m < y_{TI} \leq y_{saT}$, se realiza el mismo mapeado que a la derecha del punto intermedio (ver Figura 5-16). Ahora la curva patrón es $P_{a_l}^{-1}$ y la trayectoria objetivo a calcular es $T_{a_l}^{-1}$. Nuevamente, de las fórmulas generales (5.44) y (5.45), se obtienen las expresiones

$$y_{Pl} = Y_T^{-1}(y_{Tl}, y_m, y_{sa}, y_{mP}, y_{saP}) = y_{Tl} \quad (5.60)$$

$$x_{Tl} = T_{a-l}^{-1}(y_{Tl}) = X_P^{-1}(x_{Pl}, x_m, x_{saT}, x_{mP}, x_{saP}) = x_m + \frac{(x_{Pl} - x_{mP}) \cdot (x_{saT} - x_m)}{(x_{saP} - x_{mP})} \quad (5.61)$$

con $x_{Pl} = P_a^{-1}(y_{Pl})$, $x_{mP} = P_a^{-1}(y_m)$ y $x_{saP} = P_a^{-1}(y_{saT})$ siendo las proyecciones a lo largo del eje de ordenadas de las coordenadas y_{Tl} , y_m e y_{saT} en la curva patrón P_a^{-1} . Además, $x_{saP} \neq x_{mP}$.

Resumiendo, el modelo inverso ELAM_3 puede ser expresado como

$$T^{-1}(y) = \begin{cases} T_d^{-1}(y) = \begin{cases} T_{d-r}^{-1}(y) & y_{sdT} \leq y < y_M \\ T_{d-l}^{-1}(y) & y_0 \leq y < y_{sdT} \end{cases} & y(t_i) < y(t_{i-1}) \\ T_a^{-1}(y) = \begin{cases} T_{a-r}^{-1}(y) & y_{saT} < y \leq y_u \\ T_{a-l}^{-1}(y) & y_m < y \leq y_{saT} \end{cases} & y(t_i) \geq y(t_{i-1}) \end{cases} \quad (5.62)$$

Donde las funciones de salida T_{d-r}^{-1} , T_{d-l}^{-1} , T_{a-r}^{-1} y T_{a-l}^{-1} son obtenidas de las expresiones (5.47), (5.49), (5.59) y (5.61), respectivamente.

5.10. Identificación de parámetros del Modelo ELAM

El proceso de identificación para el modelo ELAM, consiste en determinar los parámetros α_d , β_d , que permiten la obtención de los puntos intermedios para las curvas descendentes, en los tres modelos ELAM, a partir de las expresiones (5.10) y (5.11), respectivamente. Igualmente, se determinan los parámetros α_a y β_a para las curvas ascendentes del modelo ELAM_1 en las expresiones (5.19) y (5.20). Para el modelo ELAM_3, los parámetros son α_{a1} , α_{a0} y β_{a0} en las expresiones (5.36) y (5.37), respectivamente.

En todos los casos, se utiliza un método de minimización de errores como el explicado en la sección 1.4. En concreto, para el método ELAM, también se emplean algoritmos genéticos como se expone en la sección 1.4.2.

5.11. Análisis de Resultados y Conclusiones

5.11.1. Introducción

En este apartado, se analizan y comparan los modelos de las curvas de histéresis del sensor basado en una PCB obtenidos con los métodos GPI, MPI, POLY y ELAM, descritos en los capítulos 4 y 5. Para realizar la comparativa, se han tomado como ciclos de histéresis a modelar, los obtenidos como la media aritmética de la respuesta de todos los tácteles del sensor ante la aplicación de unas secuencias de presiones como las explicadas en la Tabla 2-1 de la sección 2.4.1.1. Se obtienen dos ciclos distintos de histéresis, uno que modela el comportamiento de las trayectorias descendentes, Figura 2-19, y otro que modela el comportamiento de las trayectorias ascendentes, Figura 2-20. Conviene destacar, que el modelado de estos ciclos de histéresis, suponen un verdadero reto ya que se tratan de curvas con una destacada asimetría en su forma, alta no linealidad y con unas curvas externas ascendentes y descendentes bastante diferentes. Además, se puede observar que las curvas ascendentes interiores al bucle de histéresis no mantienen la misma forma que la curva ascendente exterior del ciclo de histéresis (ver Figura 2-20).

Para cada uno de los métodos, se realiza un proceso de identificación de parámetros mediante algoritmos genéticos, que permite obtener la mejor configuración de los métodos para obtener los modelos que mejor se ajustan a los datos experimentales. Se realiza una discusión sobre las ventajas e inconvenientes de los distintos métodos a tenor de los resultados obtenidos.

5.11.2. Comparativa de Modelos de Compensación de Histéresis

Una vez realizado el proceso de identificación de parámetros de acuerdo con lo expuesto en las secciones 4.2.1, 4.3.1, 4.4.1 y 5.10 para los métodos GPI, MPI, POLY y ELAM, respectivamente, en la Tabla 5-1 y en la Tabla 5-2, se muestran los parámetros identificados para cada método que permiten la mejor adaptación de los modelos a los datos de histéresis obtenidos experimentalmente para las curvas descendentes y las ascendentes, respectivamente.

Tabla 5-1. Parámetros de los modelos para las curvas de histéresis de bajadas del sensor táctil.

GPI		MPI		POLY		ELAM_1		ELAM_2		ELAM_3	
n	4	n	10	a_0	$1.36e^{-9}$	α_a	0.1046	α_d	0.7502	α_{a1}	-0.0072
a_0	0.5754	ρ	1.6492	a_1	$-2.74e^{-7}$	β_a	0.1706	β_d	0.9875	α_{a0}	0.6031
a_1	0.0524	τ	0.1942	a_2	$2.13e^{-5}$	α_d	0.7745			β_{a0}	0.3382
a_2	1.1216	a_1	$3.96e^{-5}$	a_3	$-7.69e^{-4}$	β_d	0.9955			α_d	0.7957
a_3	1.6350	a_2	0.1410	a_4	0.0109					β_d	0.9991
b_0	13.0421	a_3	-0.0049	a_5	0.0704						
b_1	0.0825			a_6	-0.0244						
b_2	-1.9648			b_0	$9.04e^{-10}$						
b_3	0.2972			b_1	$-1.44e^{-7}$						
α	1.7531			b_2	$6.93e^{-6}$						
ρ	4.4935			b_3	$5.29e^{-6}$						
τ	1.5428			b_4	-0.0100						
				b_5	0.3132						
				b_6	-0.1864						

Tabla 5-2. Parámetros de los modelos para las curvas de histéresis de subidas del sensor táctil.

GPI		MPI		POLY		ELAM_1		ELAM_2		ELAM_3	
n	4	n	10	a_0	$1.65e^{-9}$	α_a	0.0598	α_d	0.7502	α_{a1}	-0.0072
a_0	1.9620	ρ	3.0226	a_1	$-3.37e^{-7}$	β_a	0.0680	β_d	0.9875	α_{a0}	0.6031
a_1	0.0477	τ	0.2255	a_2	$2.66e^{-5}$	α_d	0.7745			β_{a0}	0.3382
a_2	-0.1324	a_1	$3.68e^{-5}$	a_3	$-9.93e^{-4}$	β_d	0.9955			α_{d0}	0.7957
a_3	3.7234	a_2	0.1502	a_4	0.0157					β_{d0}	0.9991
b_0	1.6743	a_3	-0.0047	a_5	0.0281						
b_1	0.1168			a_6	-0.0108						
b_2	-0.1206			b_0	$1.20e^{-9}$						
b_3	-3.2440			b_1	$-2.08e^{-7}$						
α	3.4384			b_2	$1.21e^{-5}$						
ρ	0.8893			b_3	$-2.05e^{-4}$						
τ	-0.1617			b_4	-0.0057						
				b_5	0.2762						
				b_6	-0.1651						

Como se puede observar, el número de parámetros a identificar en los métodos ELAM es mucho menor que en los otros modelos, por lo que dicho proceso de identificación presenta un menor coste computacional y de consumo de tiempo. Cabe destacar como aspecto importante, que los modelos GPI, MPI y POLY, requieren de un proceso previo de selección de las funciones envolventes o de los polinomios a utilizar en la construcción de los ciclos de histéresis. Además, en el caso de los modelos basados en el método de Prandtl-Ishlinskii, es necesario seleccionar el número de operadores play y la estructura de la función de densidad. Todo este trabajo es realizado por el diseñador del método basándose en los resultados obtenidos en un proceso de selección cuyo fin sea encontrar el mejor ajuste a los datos experimentales. Dependiendo de la complejidad de la curva de histéresis que presente el sensor, este proceso podrá ser más o menos costoso. El método ELAM propuesto en esta tesis, no requiere de este paso previo de selección de estructuras matemáticas, ya que las curvas patrones están obtenidas por interpolación lineal a partir de los datos experimentales. Además, el modelo proporciona la salida a partir de un mapeo lineal a tramos de las curvas patrones. Por tanto, si el número de tramos para realizar el mapeo lineal o la interpolación aumenta al introducir mayor número de puntos intermedios, el error siempre disminuye y el modelo se comporta de una manera robusta en cuanto a las posibilidades de sobreajuste (*overfitting*) del proceso de identificación de parámetros [Lawrence et al. 1997].

Las gráficas de la Figura 5-17(a), de la Figura 5-18(a) y de la Figura 5-19(a), muestran los modelos de los bucles de histéresis obtenidos con los métodos ELAM_1, ELAM_2 y ELAM_3 propuestos en esta tesis para las curvas de histéresis descendentes, mientras que las gráficas de la Figura 5-17(b), de la Figura 5-18(b) y de la Figura 5-19(b), muestran los modelos de cada método para las curvas ascendentes, respectivamente, medidas en el sensor táctil. La Tabla 5-3 y la Tabla 5-4, muestran los valores del error medio y del error máximo para cada uno de los modelos ELAM junto con los de los métodos estudiados en el Capítulo 4, con respecto a los datos experimentales, tanto en valor absoluto, como en porcentaje con respecto al fondo de escala. El error es evaluado según la siguiente expresión

$$error = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N |(y_{m_i} - y_i)| \quad (5.63)$$

donde y_m son las muestras del modelo, y_i son las muestras experimentales y N el número de muestras. La columna denominada “*Mejor*”, se refiere al valor mínimo del error obtenido al minimizar $J(X)$ en la expresión (1.1) durante el proceso de identificación de parámetros de cada modelo.

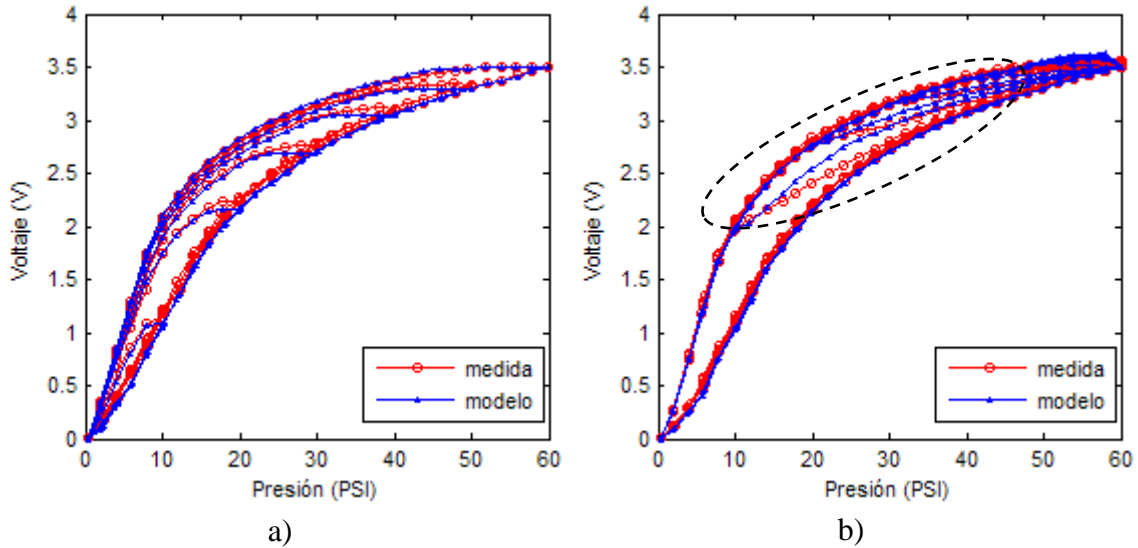


Figura 5-17. Modelos obtenidos con el método ELAM_1. (a) Modelo para las curvas descendentes. (b) Modelo para las curvas ascendentes.

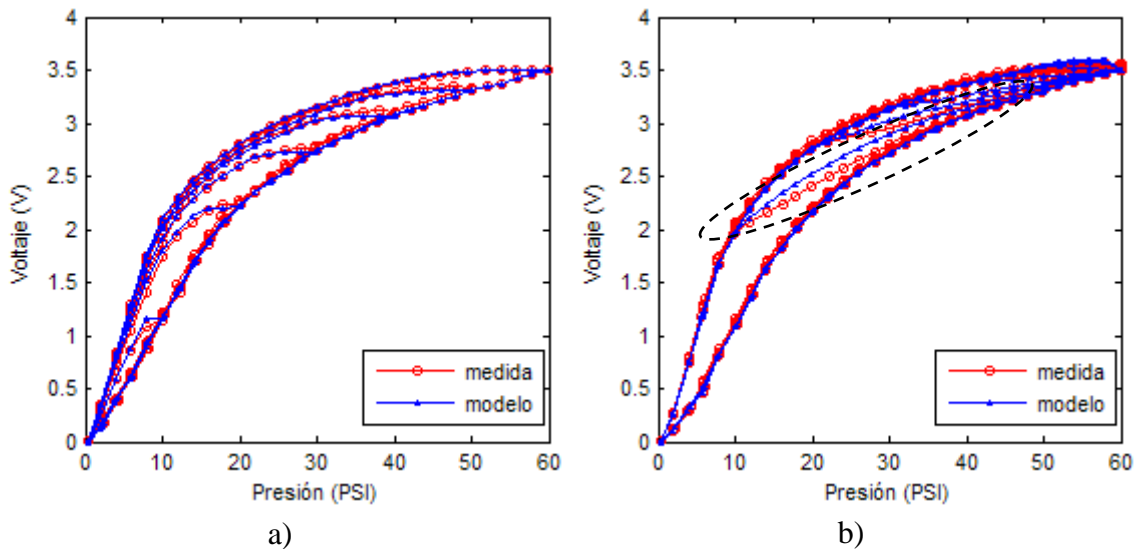


Figura 5-18. Modelos obtenidos con el método ELAM_2. (a) Modelo para las curvas descendentes. (b) Modelo para las curvas ascendentes.

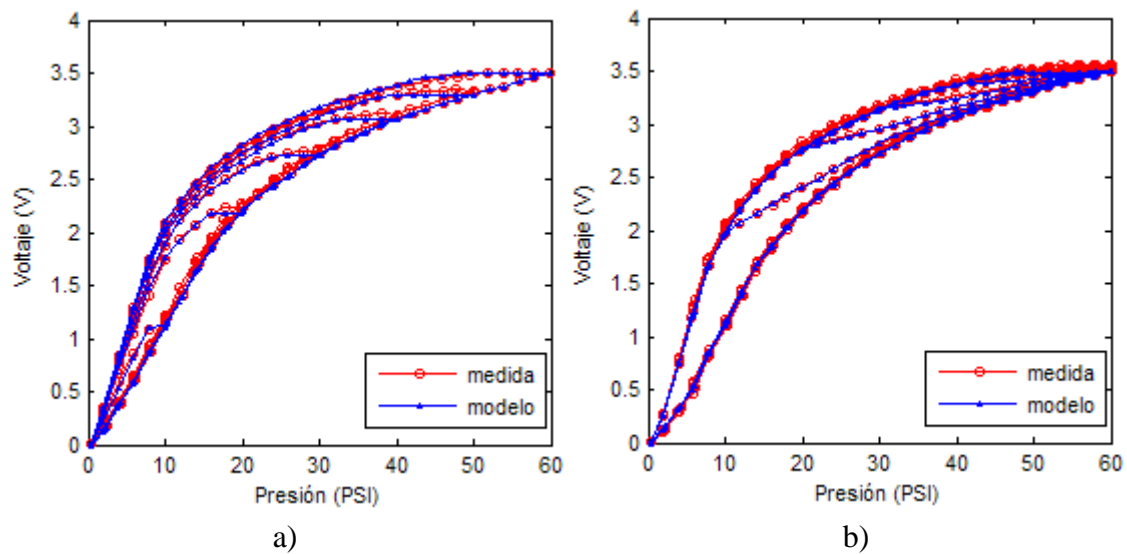


Figura 5-19. Modelos obtenidos con el método ELAM_3. (a) Modelo para las curvas descendentes. (b) Modelo para las curvas ascendentes.

En base a estas figuras y datos, realizamos una discusión sobre la precisión de los modelos con respecto a los datos experimentales y la complejidad de implementación de los modelos para conseguir los resultados obtenidos. El objetivo consiste en determinar el método más adecuado para compensar las no linealidades de histéresis del sensor táctil e implementarlo en una FPGA para trabajar en aplicaciones en tiempo real.

Tabla 5-3. Error medio y error máximo de los modelos de histéresis para las curvas descendentes.

Modelo	Mejor	Error Medio (V)	Error Medio % FS	Error Máximo (V)	Error Máximo % FS
GPI	0.53	0.04	1.15	0.15	4.34
MPI	2.82	0.09	2.63	0.35	10.05
POLY	4.14	0.07	1.99	0.70	19.98
ELAM_1	0.80	0.05	1.39	0.16	4.64
ELAM_2	0.18	0.021	0.62	0.12	3.33
ELAM_3	0.33	0.031	0.89	0.12	3.57

Tabla 5-4. Error medio y error máximo de los modelos de histéresis para las curvas ascendentes.

Modelo	Mejor	Error Medio (V)	Error Medio % FS	Error Máximo (V)	Error Máximo % FS
GPI	1.21	0.04	1.12	0.30	8.47
MPI	7.45	0.10	2.94	0.35	9.77
POLY	2.27	0.06	1.64	0.22	6.15
ELAM_1	1.03	0.03	0.97	0.17	4.67
ELAM_2	0.63	0.027	0.75	0.12	3.40
ELAM_3	0.37	0.02	0.58	0.11	3.16

Como se discutió en el apartado 4.5, los modelos obtenidos con los métodos GPI, MPI y POLY, presentan algunas desviaciones con respecto a los datos experimentales que son destacadas en las gráficas de la Figura 4-17, de la Figura 4-18 y de la Figura 4-19. Estas desviaciones, hacen patente que estos métodos presentan dificultades para modelar las curvas de histéresis mostradas por el sensor táctil basado en una PCB. En el caso de las curvas descendentes, únicamente el modelo GPI presenta un resultado aceptable y que permitiría la compensación del comportamiento de histéresis del sensor con cierta precisión. Sin embargo, para las curvas ascendentes, ninguno de los tres métodos consigue un modelado suficientemente preciso. Por este motivo, evaluaremos ahora los modelos obtenidos con los métodos ELAM.

Los resultados obtenidos con el modelo ELAM_1, se muestran en la Figura 5-17(a) para las curvas descendentes, y en la Figura 5-17(b) para las curvas ascendentes. Como se puede comprobar, se produce una mejora considerable en el modelo de las curvas descendentes, y el ajuste es bastante preciso en todas las zonas de la curva. La utilización de las curvas externas como patrones de las trayectorias internas, hace que salvo pequeños desajustes en el retorno de las curvas descendentes, el modelo sea muy bueno. Los valores de los errores cometidos mostrados en la Tabla 5-3, sitúan a este modelo muy cerca del modelo GPI con la ventaja de utilizar unas operaciones matemáticas mucho más sencillas. En cuanto a las curvas ascendentes, se produce una mejora en el ajuste con respecto a los otros modelos, pero todavía deber ser mejorado como se observa en la Figura 5-17(b).

El modelo ELAM_2, mejora bastante el comportamiento para las curvas ascendentes, como se observa en la Figura 5-18(b) y en los valores de la Tabla 5-4. La estrategia

seguida por esta versión para las trayectorias ascendentes de realizar una proyección de la curva externa a las internas a lo largo del eje x, se postula como adecuada y es el punto de partida para desarrollar el modelo definitivo ELAM_3.

En la Figura 5-19(a) y en la Figura 5-19(b), se muestran los modelos ELAM_3 para las curvas ascendentes y descendentes, respectivamente. Como se puede observar, el ajuste con el método ELAM de las curvas descendentes es mejor que con los otros métodos evaluados salvo con el ELAM_2, aunque la diferencia observada en los valores de los errores en la Tabla 5-3, es mínima. Las curvas no se saturan como con el modelo GPI (ver Figura 4-17(a)). El punto intermedio introducido en los métodos ELAM, proporciona una mayor flexibilidad que la que proporciona el modelo POLY para aproximar curvas con una alta no linealidad. Con respecto a las curvas ascendentes, el modelo ELAM_3 es el que se ajusta con mayor precisión, incluso en la construcción de las ramas de subida internas, que es donde los otros modelos presentan mayores errores. Como se puede observar con respecto al modelo ELAM_2, la mejora es considerable y se basa en la introducción de un punto intermedio en las trayectorias ascendentes tal y como se realizaba en el método ELAM_1. Los resultados obtenidos en conjunto para los dos tipos de trayectorias, son los mejores.

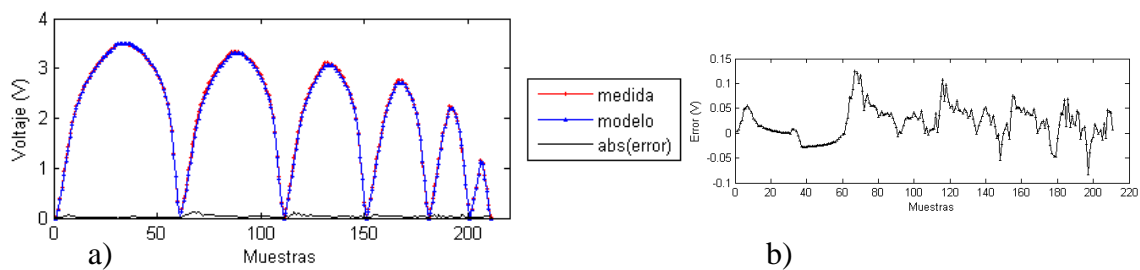


Figura 5-20. (a) Datos medidos en curvas descendentes, modelo ELAM_3 y valor absoluto del error. (b) Imagen ampliada del error.

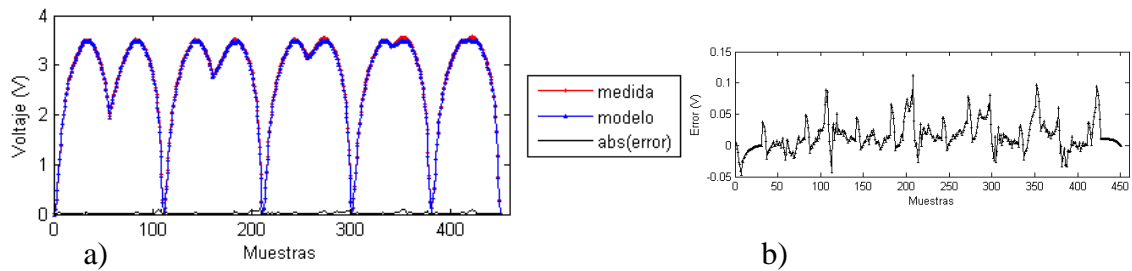


Figura 5-21. (a) Datos medidos en curvas ascendentes, modelo ELAM_3 y valor absoluto del error. (b) Imagen ampliada del error.

La Figura 5-20(a) muestra el voltaje de salida de las muestras medidas experimentalmente en el sensor (en azul), y los voltajes obtenidos con el método ELAM_3 (en rojo) para las diferentes trayectorias descendentes (ver Figura 2-19), así como el valor absoluto del error cometido por el modelo, cuya ampliación es mostrada en la Figura 5-20(b). La Figura 5-21 muestra los mismos resultados pero cuando se evalúa el comportamiento del sensor ante distintas curvas ascendentes (ver Figura 2-20). En ambas figuras se observa que los valores del error no superan el 0.1% del fondo de escala de la salida del sensor. Por tanto, el método ELAM_3 proporciona el modelo que alcanza el mejor ajuste a los datos experimentales. Las muestras son los valores de los voltajes de salida obtenidos cada dos segundos. El número de muestras medidas es de 211 para las curvas descendentes, y de 451 para las curvas ascendentes.

Además, de acuerdo a una de las motivaciones de esta tesis sobre el interés en implementar los algoritmos de compensación en la electrónica local del sensor basada en una FPGA, el modelo ELAM_3 es el más adecuado ya que su complejidad es similar a la del modelo POLY pero menor que la de los otros dos modelos basados en operadores de Prandtl-Ishlinskii. Concretamente, el modelo GPI muestra un ajuste a las curvas experimentales cercano al alcanzado por el modelo ELAM, pero los operadores matemáticos involucrados son mucho más complejos. El método ELAM se basa en operaciones matemáticas simples como sumas y multiplicaciones, mientras que los modelos GPI y MPI utilizan funciones exponenciales para la función de densidad y para las funciones envolventes. Estas operaciones son más difíciles de implementar y requieren del uso de más recursos lógicos en dispositivos como las FPGAs. El proceso de identificación de parámetros también es más simple en el método ELAM, como se desprende de lo descrito en los apartados 4.2.1, 4.3.1, 4.4.1 y 5.10. Finalmente, los métodos GPI, MPI y POLY requieren de un proceso previo de selección de las funciones a emplear en la construcción de los modelos, mientras que el método ELAM no lo necesita al utilizar directamente los datos experimentales para la construcción de los bucles de histéresis. Únicamente, es necesario determinar la forma de obtener el punto intermedio en cada trayectoria, pero como se ha propuesto en las distintas versiones del método expuestas en esta tesis, expresiones tan sencillas como una relación lineal, o como mucho cuadrática, proporciona muy buenos resultados.

Por tanto, el modelo ELAM_3 es invertido según las ecuaciones expuestas en la sección 5.9 y es utilizado para la compensación de las no linealidades de histéresis presentadas por las curvas experimentales de la Figura 2-19 y de la Figura 2-20.

En la Figura 5-22, se muestra la salida del sensor cuando se compensa su respuesta con el método ELAM_3 ante un conjunto de ciclos de carga y descarga para determinar las curvas descendentes. La Figura 5-22(a) muestra la representación del modelo directo ELAM_3 junto con las curvas de histéresis medidas experimentalmente. La Figura 5-22(b) muestra el modelo inverso ELAM_3, en el que se representa la presión calculada por el modelo ante el voltaje de salida del sensor generado ante los ciclos de carga y descarga de presiones ejercidas sobre el sensor. La Figura 5-22(c) muestra la representación gráfica de la presión calculada por el modelo ELAM_3 frente a la presión real, es decir, muestra la compensación de los ciclos descendentes de histéresis que presenta el sensor. En la Figura 5-23, se muestran los mismos resultados pero para el modelo ELAM_3 calculado para las curvas ascendentes.

Hay que destacar, que el comportamiento del modelo ELAM_3 ha sido evaluado a partir de unos datos medidos experimentalmente en lugar de utilizar una entrada simulada que podría devolver artificialmente una salida con mejores resultados. A este respecto, los errores que se observan en la gráfica de compensación en la Figura 5-22(c) y en la Figura 5-23(c), son debidos a dos causas fundamentales. Por un lado, se puede observar que las curvas descendentes están saturadas para valores altos de la presión de entrada. Esto produce una zona plana, que al ser invertido, produce que ante un valor de voltaje de entrada al modelo inverso, no sea posible determinar exactamente el valor de presión que lo ha producido. Esta indeterminación es inevitable dada la forma medida de la curva de histéresis del sensor táctil. Por otro lado, cabe destacar que las curvas descendentes medidas durante la caracterización del sensor, no son monótonas decrecientes. Esto produce que cuando comienzan las curvas descendentes a formarse a partir del punto de retorno, se registren unas pocas muestras con mayor valor de voltaje que las correspondientes a la mayor presión ejercida. Por tanto, al aplicar el modelo inverso, se toman esas muestras como si continuaran con la tendencia ascendente antes del punto de retorno. En cualquiera de los casos, estas desviaciones observadas en la respuesta del modelo, no son producidas por el método de compensación, sino por los datos medidos

experimentalmente. Estos errores limitan el rango útil del sensor para una resolución de las medidas determinada.

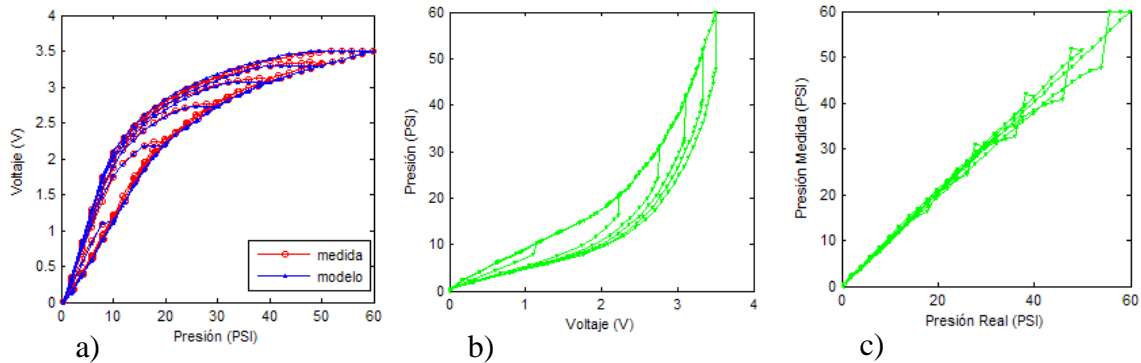


Figura 5-22. Compensación para las curvas descendentes con el método ELAM_3. (a) Modelo directo ELAM_3. (b) Modelo inverso ELAM_3. (c) Presión de salida del sensor frente a la presión real después de la compensación con el método ELAM_3.

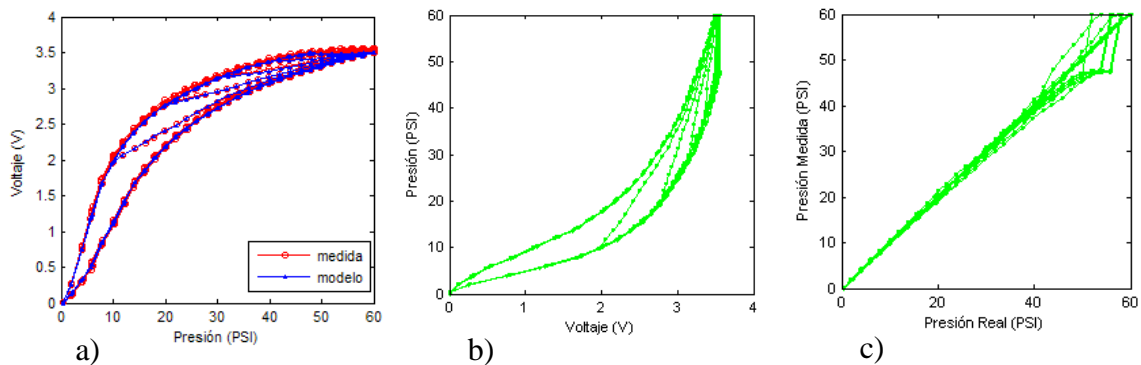


Figura 5-23. Compensación para las curvas ascendentes con el método ELAM_3. (a) Modelo directo ELAM_3. (b) Modelo inverso ELAM_3. (c) Presión de salida del sensor frente a la presión real después de la compensación con el método ELAM_3.

5.11.3. Compensación de la Matriz Completa y con Objetos

Esta sección muestra la aplicación del método ELAM_3 para compensar la histéresis de un sensor táctil compuesto por 256 tácteles distribuidos en 16 filas y 16 columnas. Cada táctel es una unidad independiente de sensado que debe ser modelado individualmente, y su no linealidad de histéresis debe ser compensada con su modelo ELAM. La Tabla 5-5, muestra las imágenes obtenidas para distintas presiones uniformes ejercidas sobre la matriz de tácteles del sensor. Se observa una gran dispersión en la respuesta de los tácteles en una misma imagen. En una misma columna de la tabla, se comparan dos imágenes medidas para la misma presión de entrada, una para la secuencia ascendente de presiones

(arriba), y la otra para la secuencia descendente de presiones (abajo). La Tabla 5-6, muestra las mismas imágenes de la matriz del sensor una vez realizada la compensación con el método ELAM. Se observa cómo no sólo se compensan las no linealidades de histéresis, sino que también se corrige la dispersión entre los diferentes tácteles. Para cada una de las imágenes, se indica el valor de la desviación estándar relativa con respecto al fondo de escala de la salida para cuantificar la mejora con respecto al error de dispersión después de realizar el proceso de compensación. Además, se muestra una tercera fila en las tablas, con las imágenes resultantes de realizar la diferencia entre las imágenes de cada columna, es decir, entre las imágenes de las trayectorias ascendentes y las descendentes. También se indica el valor de la media de cada una de las imágenes de diferencia con respecto al fondo de escala de la salida para ilustrar la mejora con respecto al error de histéresis.

Finalmente, la Tabla 5-7 y la Tabla 5-8, muestran la salida del sensor cuando se aplica una fuerza sobre un objeto con forma de anillo, colocado encima de la matriz de sensores táctiles. La Tabla 5-7 muestra las imágenes correspondientes a las salidas medidas en el sensor, mientras que la Tabla 5-8, muestra las imágenes compensadas con el método ELAM_3.

Tabla 5-5. Imágenes del bucle de histéresis medido antes de la compensación.

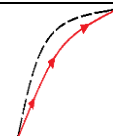
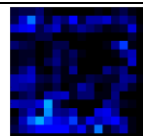
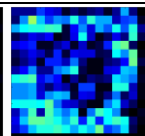
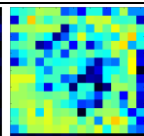
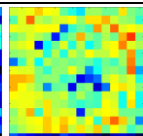
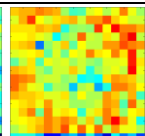
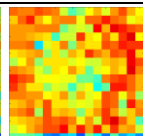

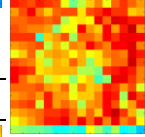

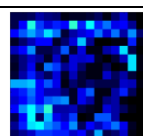
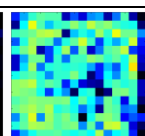
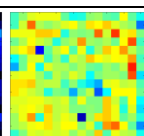
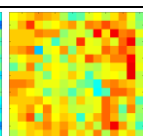
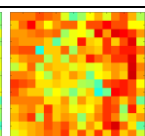
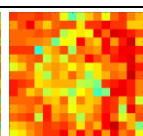
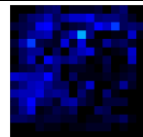
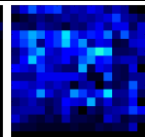
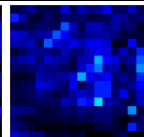
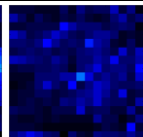
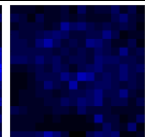
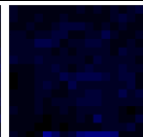
Subida →	4.01 PSI	10.25 PSI	20.20 PSI	30.06 PSI	40.21 PSI	49.93 PSI	59.93 PSI
							
$std(x) / FS$	0.09	0.16	0.18	0.15	0.13	0.12	
:							
Bajada →	4.01 PSI	10.05 PSI	19.86 PSI	30.01 PSI	40.02 PSI	49.59 PSI	
							
$std(x) / FS$	0.13	0.18	0.16	0.13	0.12	0.11	0.11
:							
Distancia Absoluta							
\bar{x} / FS :	0.08	0.17	0.14	0.11	0.07	0.04	

Tabla 5-6. Imágenes del bucle de histéresis después de la compensación con el método ELAM_3.

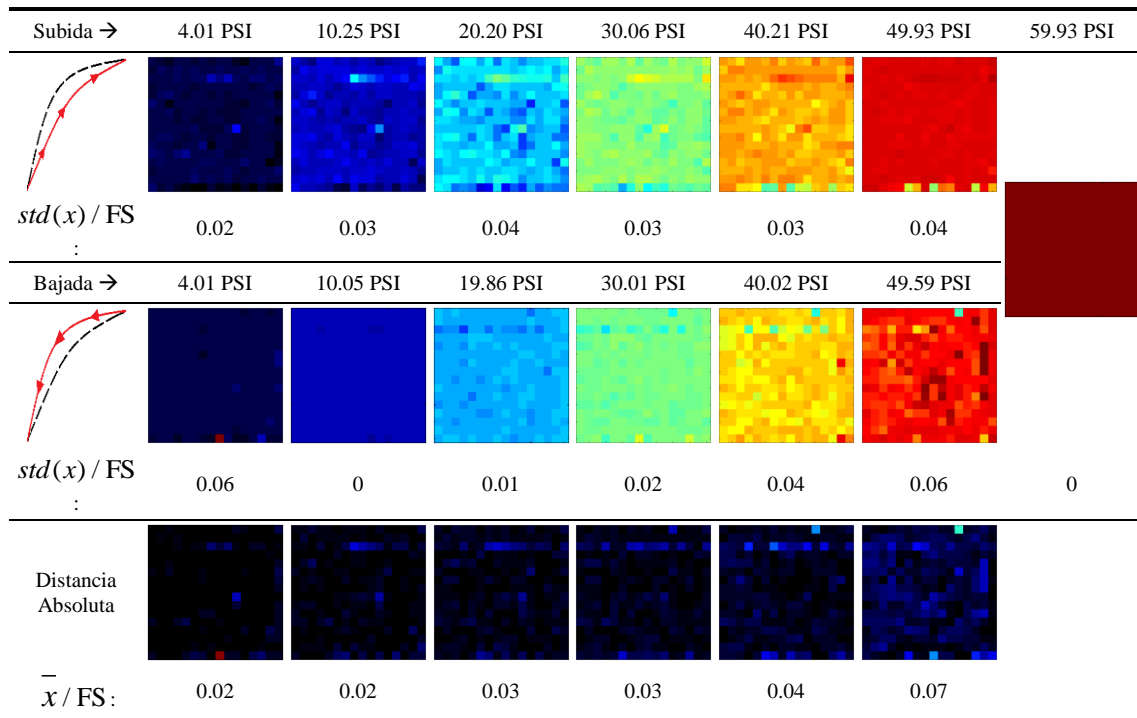


Tabla 5-7. Imágenes del bucle de histéresis medido antes de la compensación con el objeto Anillo.

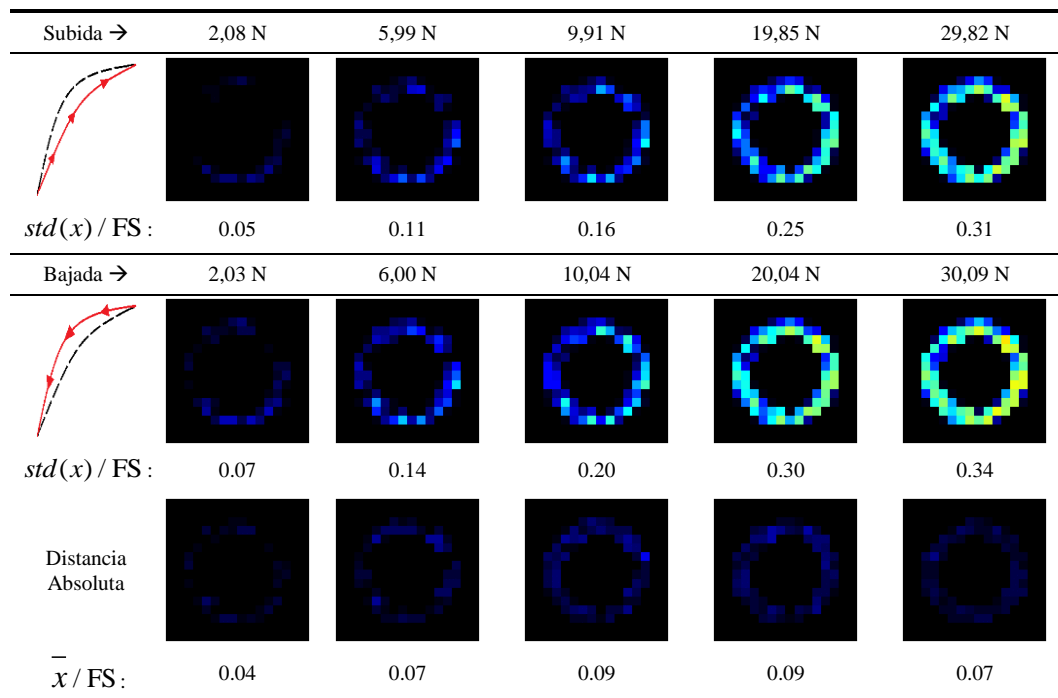

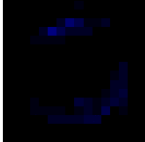
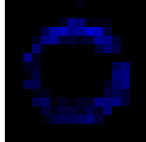
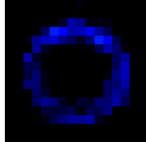
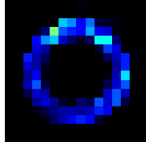
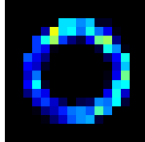


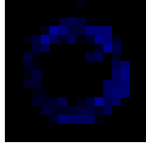
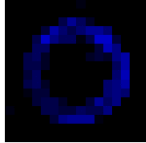
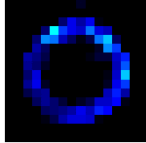
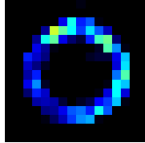
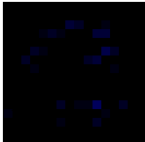
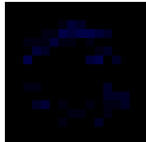
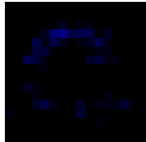
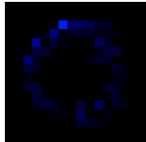
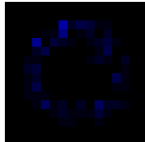


Tabla 5-8. Imágenes del bucle de histéresis con el objeto Anillo después de la compensación con el método ELAM_3.

Subida →	2,08 N	5,99 N	9,91 N	19,85 N	29,82 N
					
$std(x) / FS :$	0.03	0.06	0.09	0.16	0.22
Bajada →	2,03 N	6,00 N	10,04 N	20,04 N	30,09 N
					
$std(x) / FS :$	0.03	0.05	0.07	0.14	0.21
Distancia Absoluta					
$\bar{x} / FS :$	0.06	0.05	0.05	0.07	0.05

Como conclusión final del análisis de estos resultados, se puede indicar que el método propuesto en esta tesis, denominado ELAM, para compensar las no linealidades de histéresis observadas en el comportamiento de un sensor táctil basado en principios piezo-resistivos y construido sobre una placa flexible de circuito impreso, ofrece el mejor ajuste a los datos experimentales medidos en el sensor. Se evalúan tres versiones diferentes del método ELAM, y se comparan con los modelos obtenidos con otras tres propuestas sugeridas por otros autores, el modelo generalizado de Prandtl-Ishlinskii (GPI), el modificado de Prandtl-Ishlinskii (MPI) y el modelo basado en curvas externas construidas con polinomios (POLY). El modelo ELAM realiza un mapeo lineal a tramos de las curvas externas del bucle de histéresis medido en el sensor, para construir todos los posibles ciclos internos al bucle de histéresis del sensor. La principal característica del método ELAM, es la presencia de unos puntos intermedios que permiten realizar un mapeo diferente a ambos lados de dichos puntos y conseguir así un ajuste más preciso. Los resultados obtenidos, demuestran que los modelos ELAM se ajustan con mayor precisión a los datos medidos que los otros tres métodos, en especial a las curvas ascendentes que es donde los otros métodos presentan mayores dificultades. Otra ventaja muy destacable

del método ELAM frente a los otros tres métodos, es que las operaciones matemáticas involucradas, son mucho más simples, por lo que puede ser más fácilmente implementado en dispositivos FPGAs con el fin de conseguir aplicaciones en tiempo real. El método ELAM no utiliza ni operadores play ni funciones exponenciales que pueden requerir el uso de mayores recursos. El número de parámetros a identificar por el algoritmo de minimización de errores en los otros métodos es mayor, y además requieren de un proceso previo de selección del tipo de funciones a emplear en la construcción del modelo. El método propuesto ELAM, se muestra muy efectivo en la compensación de las no linealidades de histéresis que presenta un sensor táctil como sensor matricial. Se realizan experimentos con toda la matriz de tácteles para demostrar el proceso de compensación cuando se ejerce una presión uniforme sobre toda la matriz, y cuando se aplican presiones sobre objetos de diferentes formas situados encima del sensor. Cada elemento individual de sensado o táctel, es compensado con su propio modelo ELAM de histéresis, y se consigue una reducción significativa de los errores de histéresis, no linealidad y dispersión.

El método ELAM se ajusta muy bien a curvas de histéresis asimétricas y complejas que no pueden ser caracterizadas por funciones matemáticas de una forma directa. Esto permite aplicar la estrategia seguida por este método a otros tipos de sensores o actuadores. Además, es un método flexible, ya que siguiendo el mismo procedimiento expuesto en este trabajo, se podrían añadir más puntos intermedios para dividir las ramas de histéresis en un mayor número de tramos. De esta forma se podría adaptar cada tramo de forma diferente y mejorar el ajuste en bucles de histéresis complejos.

Conclusiones y Líneas Futuras de Trabajo

Conclusiones

Esta tesis doctoral ha sido desarrollada en torno a los errores que presentan los sensores táctiles en su funcionamiento y que afectan a sus respuestas ante presiones o fuerzas aplicadas sobre su superficie. Las principales aportaciones son:

- Se ha analizado la influencia que ejercen los errores sobre los parámetros de control extraídos de las imágenes táctiles del sensor, desde el punto de vista de la matriz completa. Para ello se han realizado numerosos experimentos con varias plataformas de medida, situando distintos objetos sobre la superficie de los sensores, para comprobar la influencia que ejercen los distintos errores y limitaciones sobre los parámetros de control que se calculan a partir de la imagen táctil obtenida con el sensor y que configuran la elipse que mejor se adapta a la imagen táctil del objeto. Las experiencias se han realizado con un sensor comercial y con otro hecho en el laboratorio basado en polímeros conductores sobre PCB flexible.
- Se han seleccionado, analizado e implementado en Matlab tres métodos de compensación de la histéresis desarrollados para otros sensores o actuadores (GPI, MPI y POLY), y se han aplicado al sensor táctil basado en PCB para establecer un modelo lo más preciso posible de sus curvas de histéresis y no linealidad. Dos de estos métodos se basan en operadores de Prandtl-Ishlinskii y el tercero en las curvas externas del bucle de histéresis, dos de las estrategias más utilizadas en la bibliografía de histéresis.

- Se han realizado estudios para seleccionar las funciones envolventes más adecuadas para configurar el método GPI y así obtener un modelo de las curvas de histéresis del sensor lo más preciso posible.
- Se ha desarrollado un nuevo método de compensación de histéresis denominado ELAM basado en un mapeo lineal de las curvas externas del bucle de histéresis, medido experimentalmente en el sensor basado en una PCB, para construir un modelo del comportamiento de histéresis del sensor. El método ELAM es un método mucho más sencillo de implementar en una FPGA que el resto de modelos para desarrollar aplicaciones que funcionen en tiempo real, ya que emplea operaciones matemáticas mucho más sencillas. Otra ventaja de este método, es que el número de parámetros a identificar por un algoritmo de minimización de errores, es menor que en los otros métodos. Además, los métodos GPI y MPI requieren de un procedimiento previo de selección de estructuras matemáticas del modelo, que no es requerido en el método ELAM. La estrategia seguida por el método ELAM, puede ser utilizada para compensar las curvas de histéresis de otros sensores, especialmente si presentan formas complejas. Además, su flexibilidad, permite incluir los puntos intermedios necesarios, y las estrategias de mapeo entre puntos más adecuadas para ajustar el modelo con mayor precisión.

Las principales conclusiones que se pueden derivar de este trabajo son:

- El sensor táctil de bajo coste basado en una PCB desarrollado en colaboración con el Centro Tecnológico CIDETEC, presenta unos errores de histéresis, no linealidad y deriva muy altos y mayores que los obtenidos con el sensor comercial de Tekscan. La dispersión registrada en la respuesta de ambos sensores es similar pero alta.
- Los errores de histéresis y deriva del sensor de bajo coste, muestran una influencia más destacable sobre los parámetros relacionados con la fuerza y la forma del contacto. Sin embargo, esta influencia es similar a la ejercida por la dispersión del sensor comercial sobre la forma del contacto. Por otro lado, se observa que el error que afecta a la orientación del objeto, es menor en los objetos con simetría axial que con los que presentan simetría radial. Además, también es significativo el impacto de la resolución espacial limitada sobre los parámetros de localización del contacto y tamaño o área del mismo.

- Es posible concluir, que la influencia de los errores de histéresis y de deriva sobre los parámetros de control extraídos de una imagen táctil, es similar a la registrada por otras fuentes de error difíciles de corregir como la dispersión, y habitualmente admitidas en el mundo de la robótica como la resolución espacial limitada.
- La información que se puede extraer del contacto de un objeto con un sensor de bajo coste formado por una matriz de tácteles, es suficientemente buena en términos de distribución espacial y orientación como para ser utilizada en aplicaciones robóticas, pero no lo es sobre la fuerza de contacto, por lo que en aplicaciones que necesiten una alta precisión en la medida de la presión ejercida, será necesario compensar los errores del sensor.
- Los métodos de compensación de Prandtl-Ishlinskii de la histéresis basados en operadores play, GPI y MPI, no son eficientes para compensar las curvas de histéresis medidas en el sensor basado en una PCB. La forma de estos ciclos de histéresis, hace muy complicado encontrar funciones que se adapten perfectamente a ella.
- El método desarrollado en esta tesis, denominado ELAM, es el que mejor resultados obtiene a la hora de compensar la histéresis del sensor. Si bien el principio del método, es similar al método POLY, la inclusión de puntos intermedios en la adaptación de las curvas externas, y la flexibilidad del método para realizar diferentes adaptaciones a ambos lados de esos puntos, permite conseguir un ajuste mucho más fino del modelo a los datos experimentales. Especialmente, es destacable su comportamiento para las curvas ascendentes del ciclo de histéresis del sensor. Este método permite modelar con gran precisión las curvas de histéresis del sensor, y por tanto compensarlas adecuadamente.
- Los métodos de compensación de la histéresis utilizados, también compensan la no linealidad mostrada por la respuesta del sensor y corrige la dispersión observada entre los tácteles de la matriz, ya que automáticamente realiza un equilibrado de sus salidas. El método ELAM al ser más preciso que los otros, también corrige con mayor eficiencia estos errores.

Como producto adicional de este trabajo de Tesis:

- Se ha desarrollado una aplicación en Matlab para el cálculo, registro y estudio de los parámetros de control de las imágenes táctiles.

- Se han desarrollado dos aplicaciones en Matlab para la aplicación de los métodos de modelado de la histéresis sobre el sensor basado en una PCB. Estas aplicaciones permiten trabajar individualmente sobre la curva de histéresis de un solo táctel, o sobre toda la matriz del sensor a la vez.

Líneas Futuras de Trabajo

Los trabajos realizados en esta tesis y las conclusiones alcanzadas, suponen una aportación al tema de los errores que presentan los sensores táctiles y permiten establecer unas líneas de continuidad para profundizar en los aspectos que causan dichos errores y en los algoritmos para su compensación.

A continuación, se detallan las líneas futuras de investigación que sugieren los resultados obtenidos en esta tesis:

- Aplicación del algoritmo ELAM a otros sensores táctiles y en general a otros sensores y actuadores.
- Las curvas de deriva registradas en las pruebas realizadas en esta tesis, demuestran que el patrón de comportamiento depende de la presión a la que son medidas. Por tanto, una línea futura de trabajos, debería estar encaminada a la caracterización precisa de la deriva y el desarrollo de algoritmos de compensación que tengan en cuenta este comportamiento dependiente del rango de la presión aplicada al sensor. El poder aislar el error de deriva del de histéresis, permitiría mejorar también la compensación de la histéresis.
- La línea de trabajo futuro más clara a seguir por esta tesis, sería la implementación del algoritmo ELAM en una FPGA para conseguir desarrollar un sensor táctil inteligente que proporcione una medida de la presión del contacto en aplicaciones en tiempo real.

Publicaciones en Revistas y Congresos

Publicaciones que Avalan la Tesis

Las publicaciones que avalan esta Tesis Doctoral y sus índices de calidad son:

1. Publicación en Revista:

Título: A New Model Based on Adaptation of the External Loop to Compensate the Hysteresis of Tactile Sensors [*Sánchez-Durán, Vidal-Verdú, et al. 2015*].

Autores: José A. Sánchez-Durán, Fernando Vidal-Verdú, Óscar Oballe-Peinado, Julián Castellanos-Ramos, José A. Hidalgo-López.

Revista: Sensors, volumen 15, número 10, páginas 26170-26197.

Fecha: 15 de octubre de 2015.

Indicios de calidad:

Categoría: Q1 en “Instruments & Instrumentation”. Índice de impacto (1 año): 2.245.

2. Publicación en Revista:

Título: Influence of Errors in Tactile Sensors on Some High Level Parameters Used for Manipulation with Robotic Hands [*Sánchez-Durán, Hidalgo-López, et al. 2015*].

Autores: José A. Sánchez-Durán, José A. Hidalgo-López, Julián Castellanos-Ramos, Óscar Oballe-Peinado, Fernando Vidal-Verdú.

Revista: Sensors, volumen 15, número 8, páginas 20409-20435.

Fecha: 19 de agosto de 2015.

Indicios de calidad:

Categoría: Q1 en “Instruments & Instrumentation”. Índice de impacto (1 año): 2.245.

3. Publicación en Revista:

Título: Hysteresis Correction of Tactile Sensor Response with a Generalized Prandtl–Ishlinskii Model [*Sánchez-Durán et al. 2012*].

Autores: José A. Sánchez-Durán, Óscar Oballe-Peinado, Julián Castellanos-Ramos, Fernando Vidal-Verdú.

Revista: *Microsystem Technologies*, volumen 18, número 7-8, páginas 1127-1138.

Fecha: 16 de marzo de 2012.

Indicios de calidad:

Categoría: Q3 en “Instruments & Instrumentation”. Índice de impacto (1 año): 0.88.

4. Artículo en Conferencia:

Título: Hysteresis Correction of Tactile Sensor Response with a Generalized Prandtl–Ishlinskii Model [*Sánchez-Durán et al. 2011*].

Autores: José A. Sánchez-Durán, Óscar Oballe-Peinado, Julián Castellanos-Ramos, Fernando Vidal-Verdú.

Conferencia: SPIE Proceedings on Smart Sensors, Actuators, and MEMS V.

Lugar: Praga, República Checa.

Fecha: 18-20 de abril de 2011.

5. Artículo en Conferencia:

Título: Experimental evaluation of the incidence of tactile sensor limitations on application parameters [*Sanchez-Duran et al. 2010*].

Autores: José A. Sánchez-Durán, José A. Hidalgo-López, Fernando Vidal-Verdú, Estíbalitz Ochoteco.

Conferencia: 2010 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS).

Lugar: Limerick, Irlanda.

Fecha: 23-25 de febrero de 2010.

Otras Publicaciones Relacionadas

1. Publicación en Revista:

Título: Smart Capture Modules for Direct Sensor-to-FPGA Interfaces [*Oballe-Peinado et al. 2015*].

Autores: Óscar Oballe-Peinado, Fernando Vidal-Verdú, José A. Sánchez-Durán, Julián Castellanos-Ramos, José A. Hidalgo-López.

Revista: Sensors, volumen 15, número 12, páginas 31762-31780.

Fecha: 16 de diciembre de 2015.

Indicios de calidad:

Categoría: Q1 en “Instruments & Instrumentation”. Índice de impacto (1 año): 2.245.

2. Patente de Invención con Examen Previo:

Título: Dispositivo de Conducción Asistida.

Inventores: Fernando Vidal-Verdú, Andrés Trujillo León, Rafael Navas González, José Antonio Hidalgo López, Julián Castellanos-Ramos, Óscar Oballe-Peinado, José A. Sánchez-Durán.

Nº Publicación: ES2394994.

Fecha de presentación: 17 de junio de 2011. Fecha de concesión: 9 de enero de 2014.

3. Publicación en Revista:

Título: A Large Area Tactile Sensor Patch Based on Commercial Force [*Vidal-Verdú, Barquero, et al. 2011*].

Autores: Fernando Vidal-Verdú, María José Barquero, Julián Castellanos-Ramos, Rafael Navas-González, José A. Sánchez-Durán, Javier Serón, Alfonso García-Cerezo.

Revista: Sensors, volumen 11, número 5, páginas 5489-5507.

Fecha: 19 de mayo de 2011.

Indicios de calidad:

Categoría: Q1 en “Instruments & Instrumentation”. Índice de impacto (1 año): 2.245.

4. Publicación en Revista:

Título: Three Realizations and Comparison of Hardware for Piezoresistive Tactile [Vidal-Verdú, Oballe-Peinado, et al. 2011].

Autores: Fernando Vidal-Verdú, Óscar Oballe-Peinado, José A. Sánchez-Durán, Julián Castellanos-Ramos, Rafael Navas-González.

Revista: Sensors, volumen 11, número 3, páginas 3249-3266.

Fecha: 17 de marzo de 2011.

Indicios de calidad:

Categoría: Q1 en "Instruments & Instrumentation". Índice de impacto (1 año): 2.245.

5. Artículo en Conferencia:

Título: Architecture of a tactile sensor suite for artificial hands based on FPGAs [Oballe-Peinado et al. 2012].

Autores: Óscar Oballe-Peinado, José A. Hidalgo-López, José A. Sánchez-Durán, Julián Castellanos-Ramos, Fernando Vidal-Verdú.

Conferencia: The Fourth IEEE RAS/EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob).

Lugar: Roma, Italia.

Fecha: 24-27 de junio de 2012.

6. Artículo en Conferencia:

Título: Hardware for Piezoresistive Tactile Sensors [Vidal-Verdú et al. 2009].

Autores: Fernando Vidal-Verdú, Óscar Oballe, María José Barquero, David Bravo, José Antonio Sánchez Durán.

Conferencia: Humanoids 09 - The 9th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, Workshop on Tactile Sensing in Humanoids.

Lugar: París, Francia.

Fecha: 7 de diciembre de 2009.

Anexo I. Aplicaciones de Matlab

En este anexo, se exponen y explican las aplicaciones desarrolladas en Matlab que han permitido realizar los trabajos de esta tesis. Por un lado, estas aplicaciones permiten el cálculo de los parámetros que configuran la elipse que mejor se ajusta a la imagen táctil generada por el sensor y el estudio de la influencia de los diferentes errores sobre ellos. Por otro lado, permiten implementar los distintos métodos de compensación de la histéresis, y aplicarlos a los datos medidos experimentalmente. Es posible trabajar con una única curva de histéresis correspondiente a un táctel, o correspondiente a la media de todo el sensor. Además, se ha diseñado una tercera aplicación para trabajar con los métodos de compensación con toda la matriz de tácteles, mostrando los modelos y las compensaciones obtenidas para cada uno de ellos. Se puede trabajar por cuadrantes permitiendo incluso compensar los tácteles de un cuadrante con las curvas medias de los tácteles de ese cuadrante o de todo el sensor, o individualmente. Todas las aplicaciones están preparadas para trabajar con los archivos grabados en las plataformas de medida. Estas plataformas generan uno ficheros de datos a partir de aplicaciones desarrolladas en Labview, u obtenidas con la aplicación de Tekscan, I-Scan.

A continuación, se muestran algunas ventanas significativas de estos procesos y una explicación de todas las tareas posibles a realizar.

I.1. Aplicación de Análisis de una Imagen Táctil

Esta aplicación permite realizar las siguientes operaciones:

- Representación gráfica de todas las imágenes de los archivos de datos obtenidos con las plataformas de medida al realizar pruebas sobre el error de histéresis y sobre el error de deriva. Se puede emplear una visualización en 2 o en 3 dimensiones. Es posible obtener datos estadísticos sobre cada marco como el valor medio o la desviación estándar de los valores de todos los tácteles.
- Permite trabajar tanto con los datos del sensor de Cidetec, es decir, el sensor basado en una PCB flexible, como con los datos del sensor de Tekscan.
- Permite obtener la elipse que mejor se ajusta a la imagen táctil. Es posible obtener tanto la elipse binaria, como la elipse que depende del valor del voltaje obtenido en cada táctel. Se calculan los parámetros correspondientes a las coordenadas del centroide, la fuerza media, el área, la longitud de los ejes mayor y menor de la elipse, los ángulos y los valores de todos los momentos geométricos involucrados.
- Es posible cambiar la resolución de la imagen representada reduciéndola al 50% o al 25% del tamaño original.
- Para las pruebas sobre la deriva, esta aplicación permite obtener la imagen con la distancia absoluta entre el primer marco y el último de la prueba. También permite analizar las características de la curva de deriva generada.
- Permite grabar datos estadísticos sobre los parámetros que configuran la elipse en las pruebas de histéresis, deriva o cambio de resolución. Los datos se guardan en archivos de Microsoft Excel para su posterior estudio.

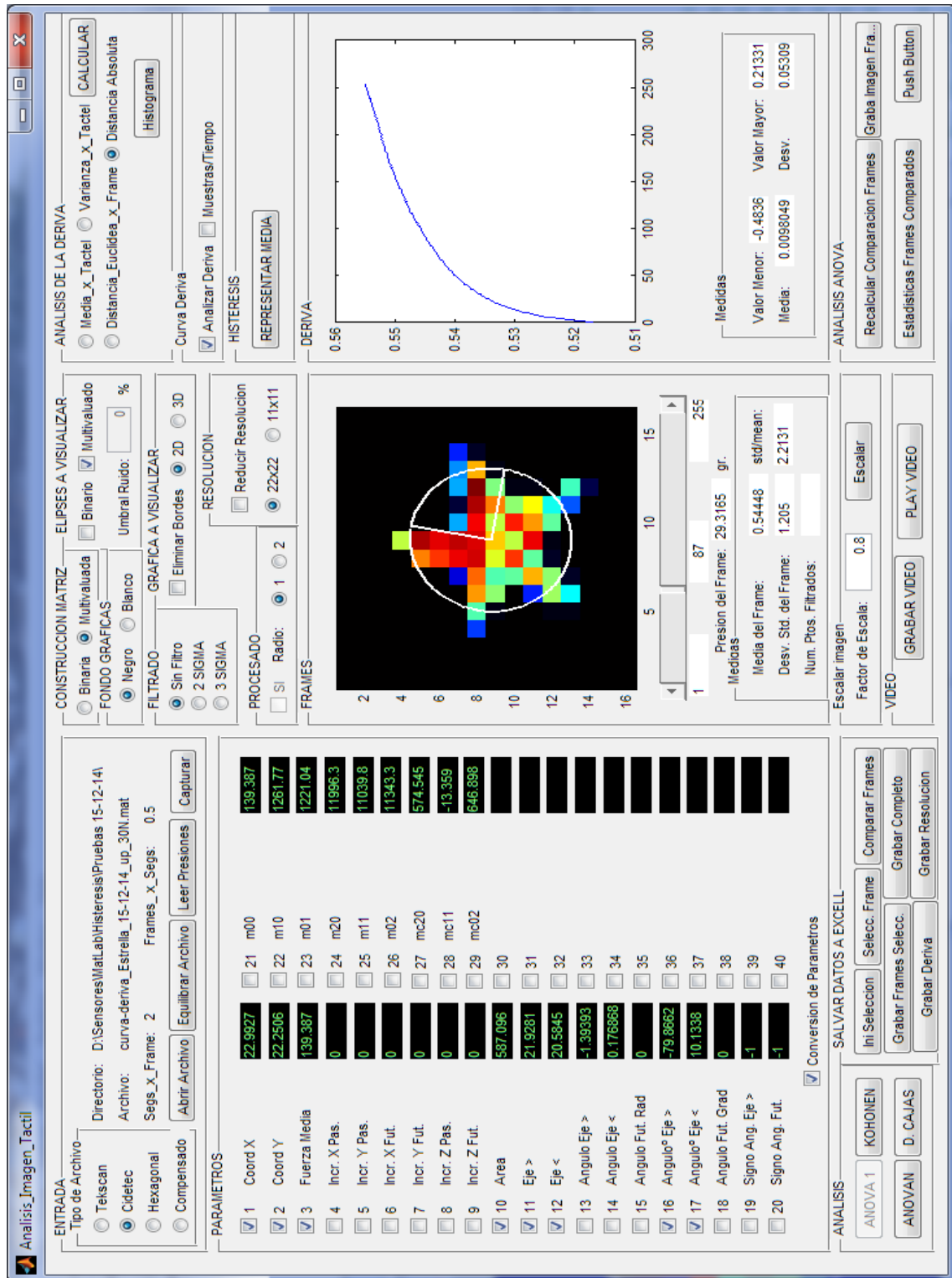


Figura I-1. Cálculo de la elipse y sus parámetros. Cálculo de la Curva de Deriva.

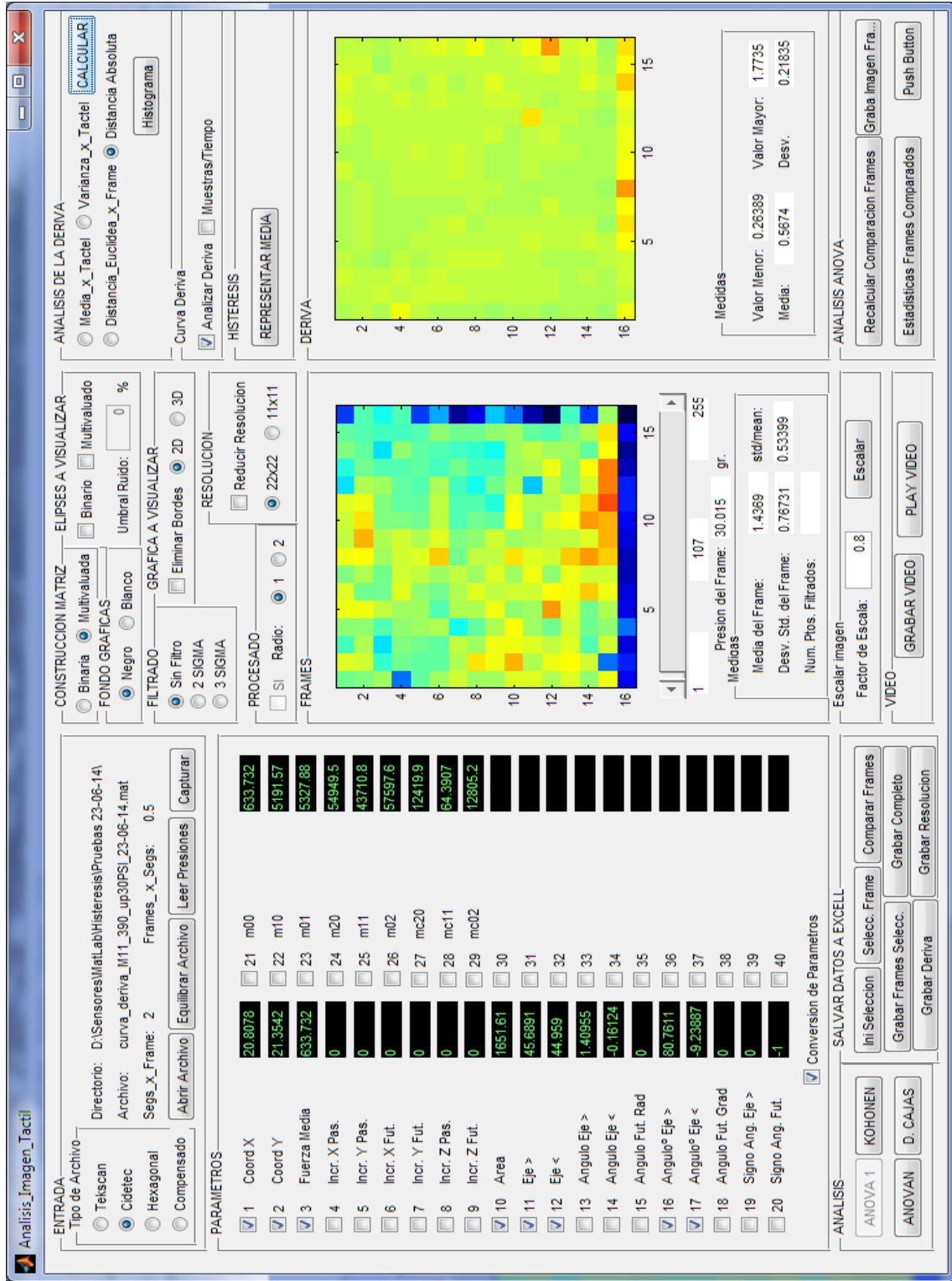


Figura I-2. Representación de una imagen con presión uniforme y distancia absoluta producto de la deriva.

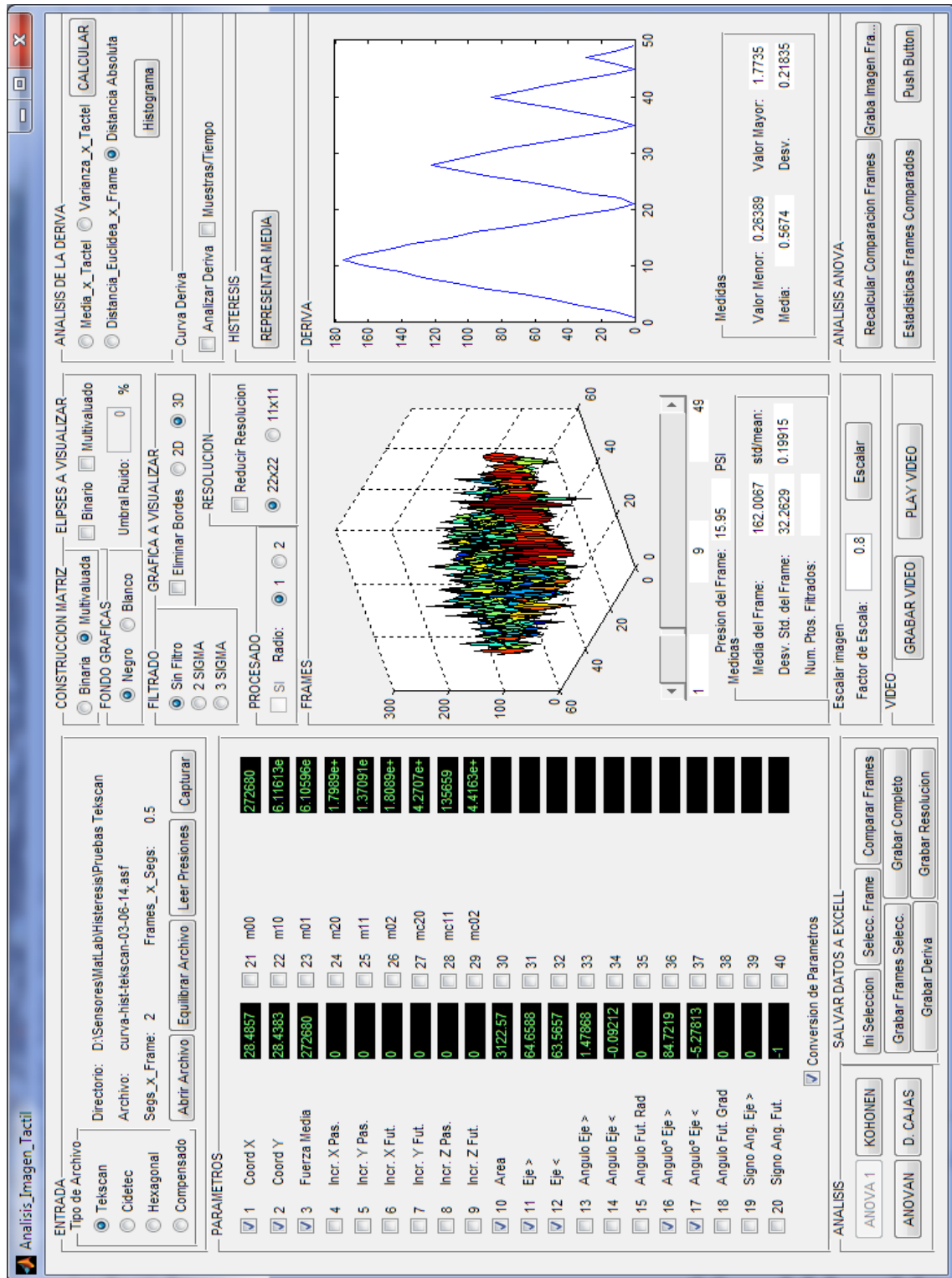


Figura I-3. Representación de una imagen plana del sensor de Tekscan en 3D.

I.2. Aplicación de Gestión de los Modelos de Compensación de Histéresis

Esta aplicación permite realizar las siguientes operaciones:

- Representación gráfica del ciclo de histéresis medido experimentalmente con las plataformas de medida en el sensor táctil basado en una PCB flexible.
- Permite el cálculo del modelo de histéresis por cualquiera de los métodos tratados en esta tesis: PI, GPI, MPI, POLY y ELAM. En el caso de los modelos de Prandtl-Ishlinskii, permite seleccionar el número de operadores y el tipo de operador play a utilizar, o el clásico o el operador OSP.
- Seleccionar el tipo de algoritmo de minimización de errores para obtener los parámetros que proporcionen el mejor ajuste a los datos experimentales. Las opciones son el algoritmo de mínimos cuadrados, o el algoritmo genético.
- Visualiza el valor de cada uno de los parámetros que componen el modelo, una vez que el algoritmo de minimización de errores ha calculado el modelo que mejor se ajusta a los datos medidos experimentalmente.
- Representa la inversa del modelo y la gráfica de la compensación final conseguida, mostrando la presión calculada por el modelo frente a la presión aplicada.
- En el caso de los modelos basados en operadores play, también muestra gráficamente los operadores con sus umbrales calculados, las funciones envolventes y la función de densidad.
- Proporciona estadísticas sobre los errores cometidos en la compensación y en los modelos calculados. Muestra gráficamente el error cometido.
- Permite guardar los modelos calculados en un archivo para posteriormente, poder aplicarlos a otras curvas de entrada del mismo sensor y comprobar así la efectividad de la compensación.

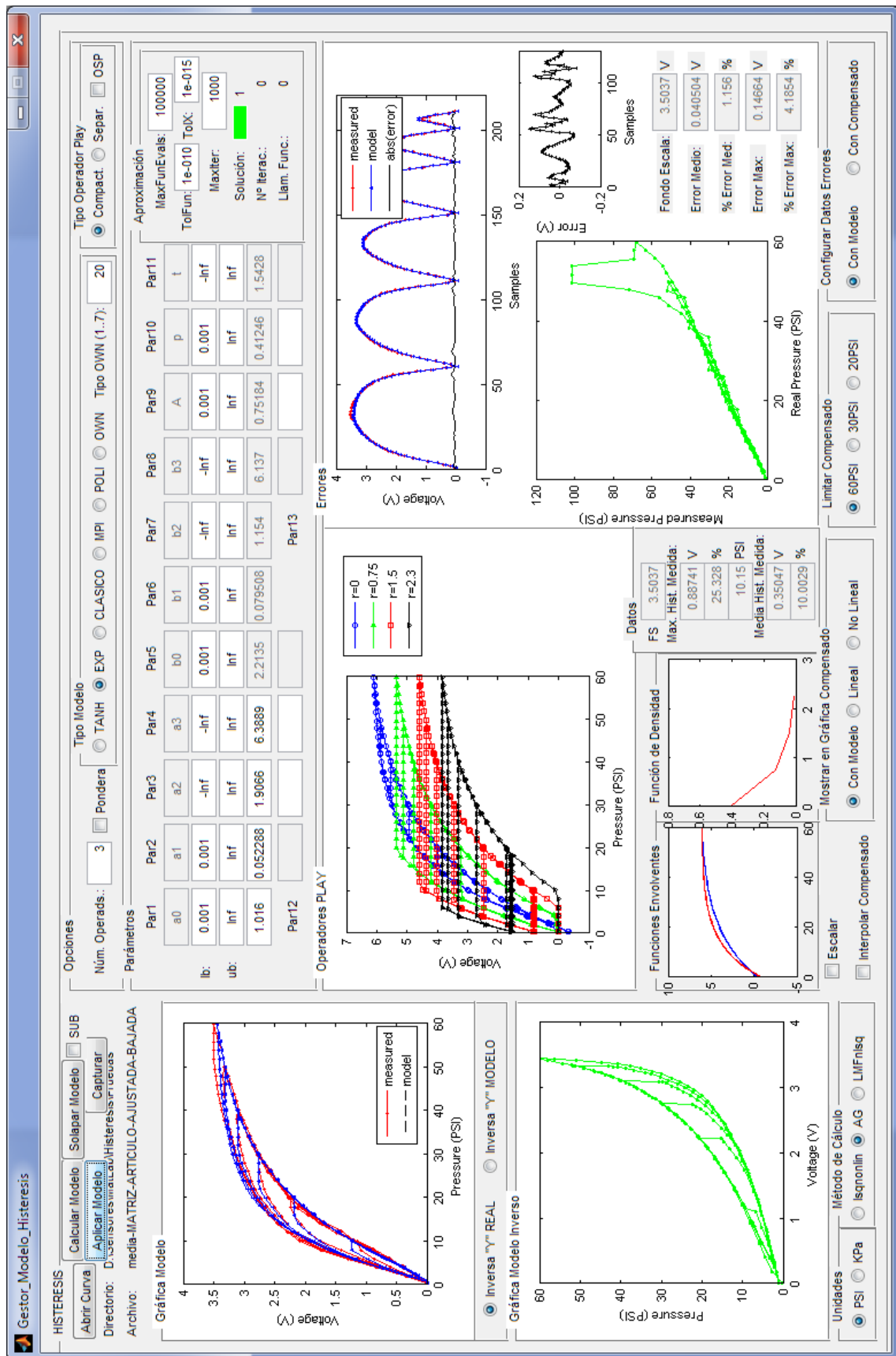


Figura I-4. Gestión del modelo GPI.

I.3. Aplicación de Gestión de Cuadrantes

Esta aplicación permite realizar las siguientes operaciones:

- Representación gráfica de las curvas de histéresis de todos los tácteles del sensor basado en una PCB. Los tácteles se muestran por cuadrantes en grupos de 32 tácteles.
- Permite representar los marcos correspondientes a cada una de las muestras medidas en los ciclos de histéresis.
- Muestra la curva de histéresis del sensor formada por la media de las curvas de todos los tácteles.
- Permite calcular los modelos para cada uno de los tácteles del sensor. También calcula el modelo correspondiente a la media.
- Permite el tratamiento de los modelos por cuadrantes, es decir, se puede aplicar el modelo medio de cada cuadrante, para compensar la histéresis de cada uno de los tácteles que componen ese cuadrante. También se puede aplicar el modelo calculado para la media de todo el sensor a todos los tácteles.
- La aplicación es capaz de representar el modelo inverso de cada táctel.
- Es posible representar la compensación obtenida en cada táctel por su modelo.
- Permite calcular datos estadísticos sobre los marcos, y la compensación de toda la matriz de tácteles.
- Permite guardar los modelos calculados para posteriormente, aplicarlos a unos datos de entrada diferentes.

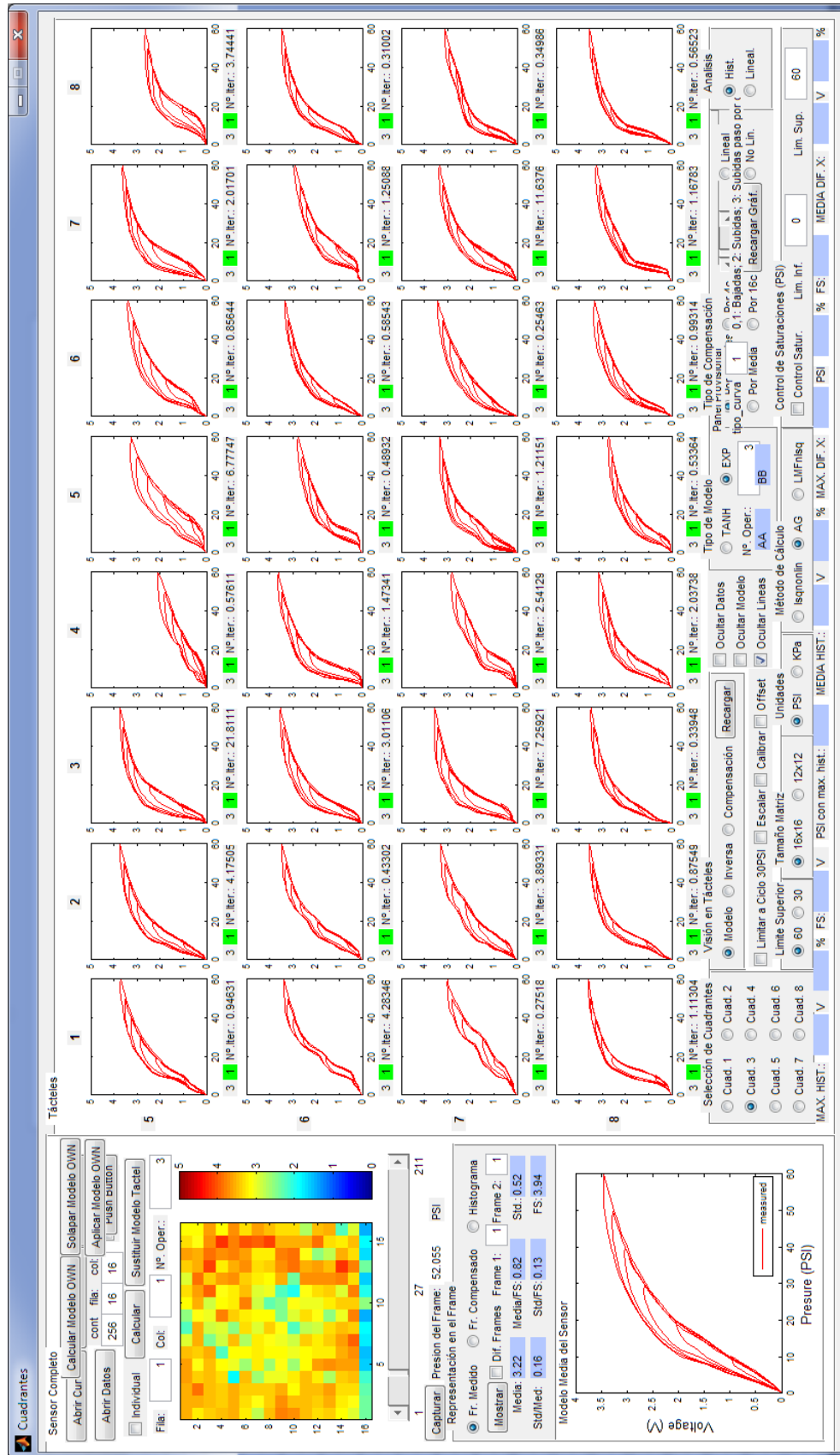


Figura I-6. Aplicación que examina todos los tácteles del sensor por cuadrantes.

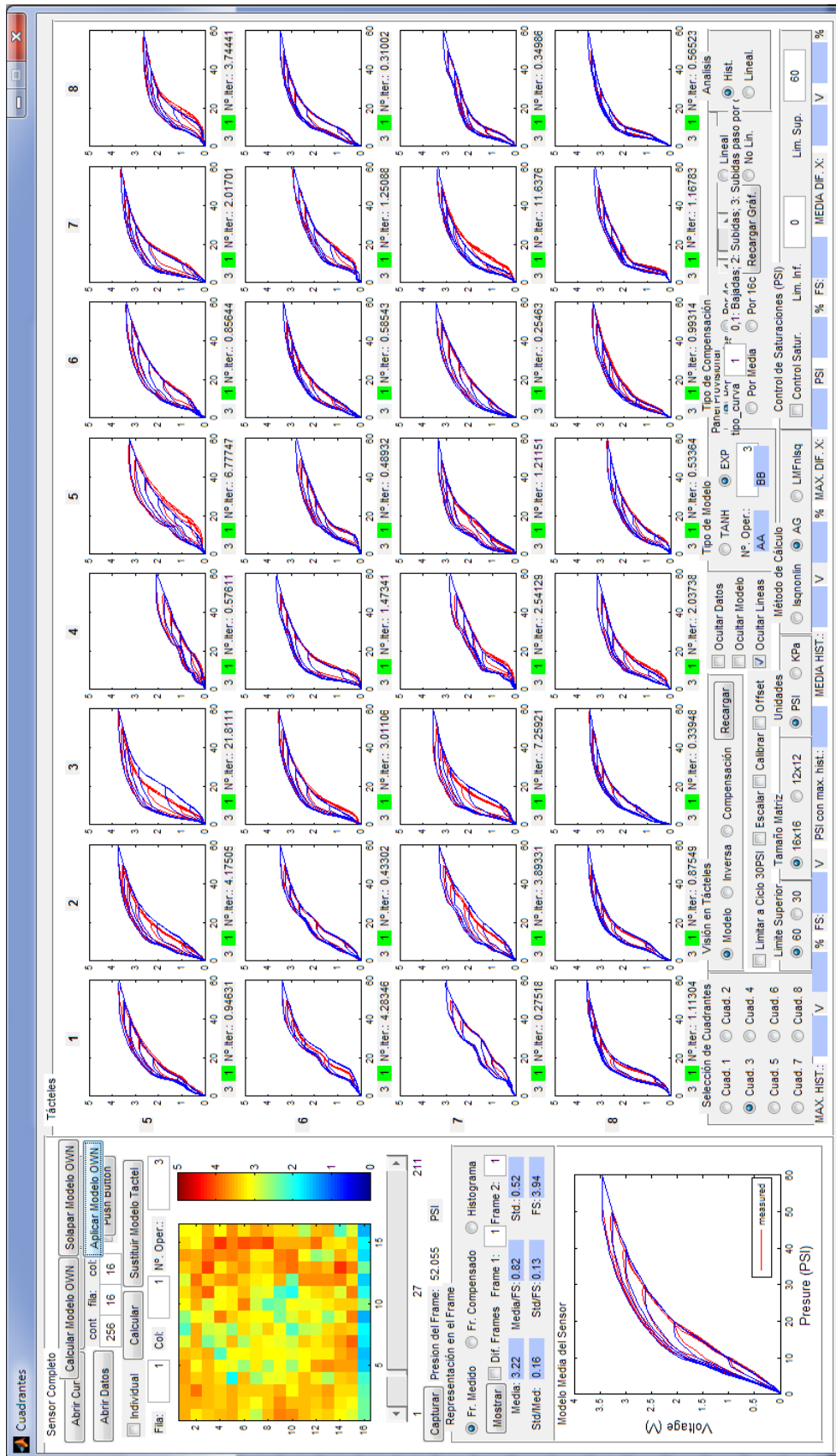


Figura I-7. Matriz compensada con el modelo ELAM_3 con un modelo por táctel.

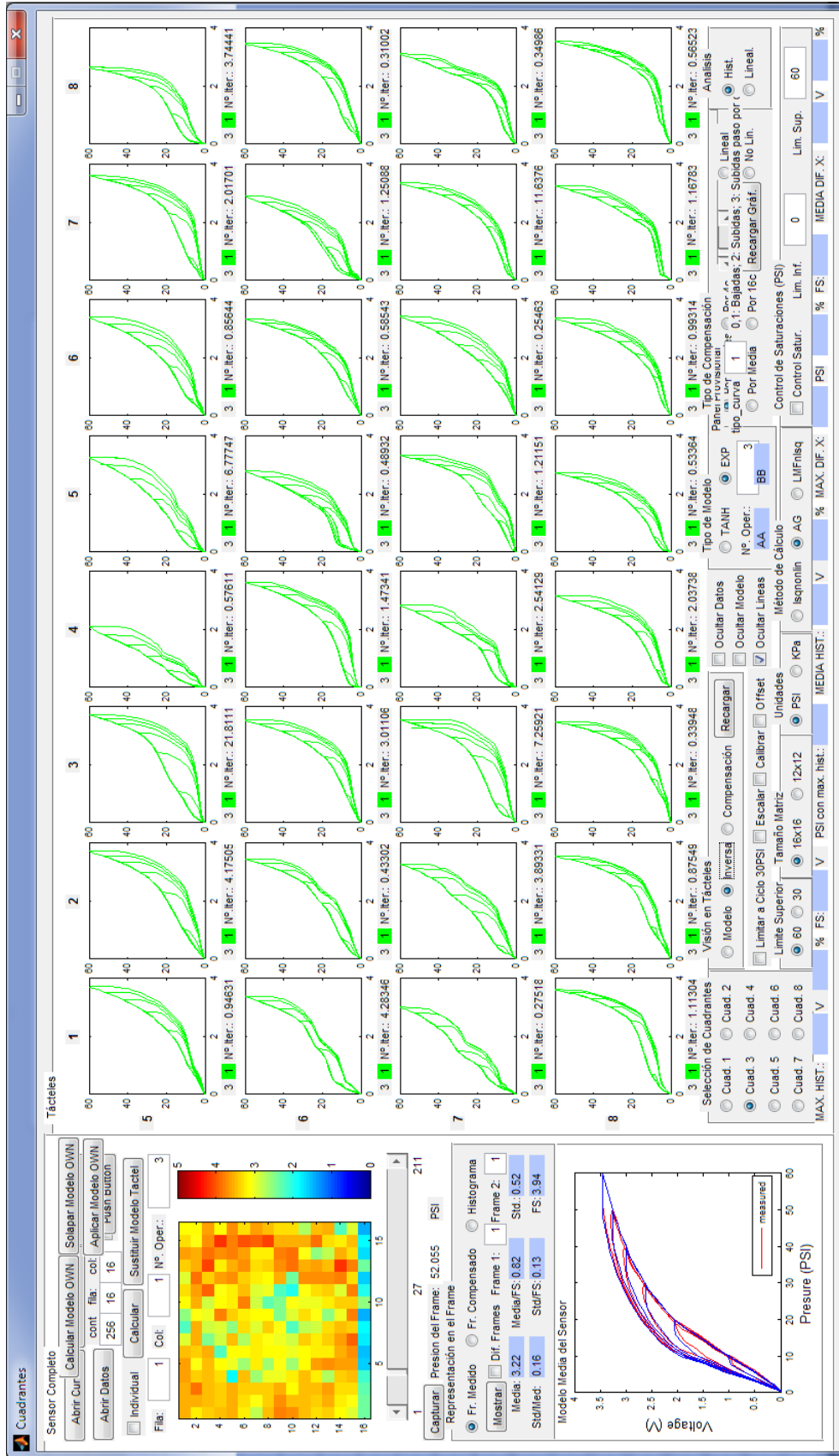


Figura I-8. Representación de los modelos inversos en cada táctel.

Anexo II. Implementación del Algoritmo ELAM_3

En este anexo, se muestran algunos diagramas de flujo relacionados con la implementación del algoritmo ELAM_3. En la Figura II-1 se muestra la rutina para calcular los parámetros del método ELAM_3 para que se ajuste a los datos de histéresis medidos experimentalmente (v_x , v_y). Este par de vectores, representa los pares de presión y voltaje obtenidos en las medidas de los ciclos de histéresis descritos en el Capítulo 3. La Figura II-2 muestra el diagrama de flujo correspondiente al procedimiento seguido por el algoritmo genético para encontrar los parámetros que minimicen la función de error. Este algoritmo, hace referencia a la rutina que construye el modelo descrito por la versión 3 del método ELAM (ver Figura II-3). Esta rutina establece los puntos intermedios en cada trayectoria a partir de los puntos de retorno, y calcula el valor del modelo según las funciones X_p e Y_T descritas en el Capítulo 5. En la Figura II-4, se muestra el procedimiento para aplicar el método ELAM_3 a un voltaje de salida del sensor, y obtener la presión ejercida sobre él, mediante el empleo del modelo inverso ELAM_3, calculado a partir de los parámetros obtenidos en la construcción del modelo directo. La Figura II-5, muestra la rutina que implementa la construcción del modelo inverso. Como se puede comprobar, sigue el mismo esquema del modelo directo, pero emplea las funciones inversas X_p^{-1} e Y_T^{-1} descritas en el Capítulo 5.

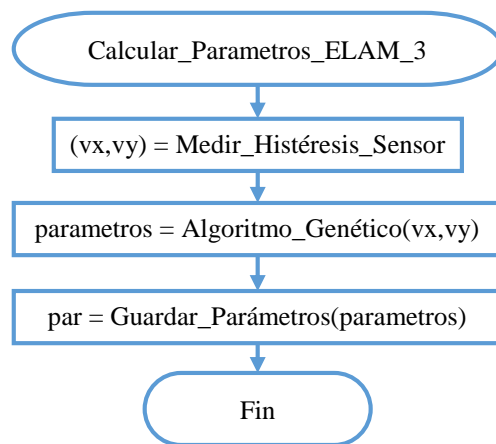


Figura II-1. Rutina para calcular los parámetros del método ELAM_3 para un sensor.

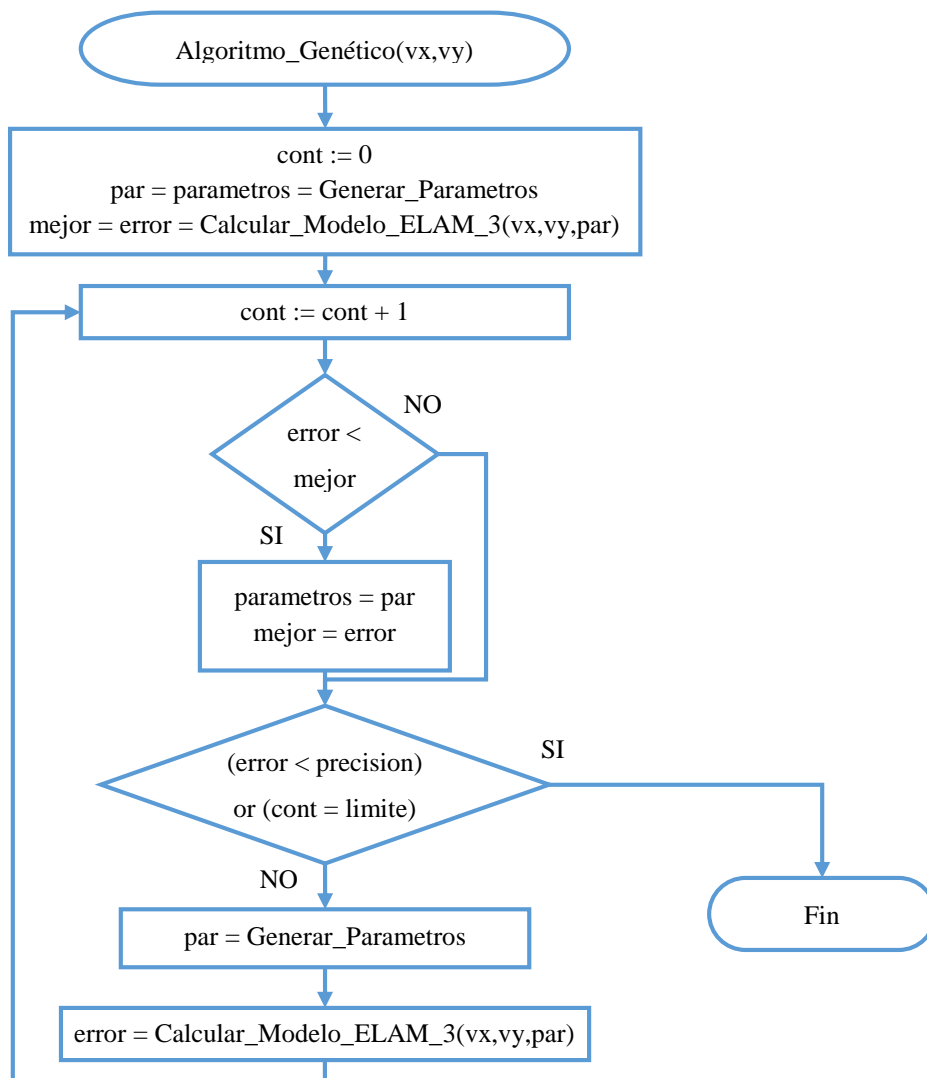


Figura II-2. Cálculo de los parámetros del modelo con un Algoritmo Genético.

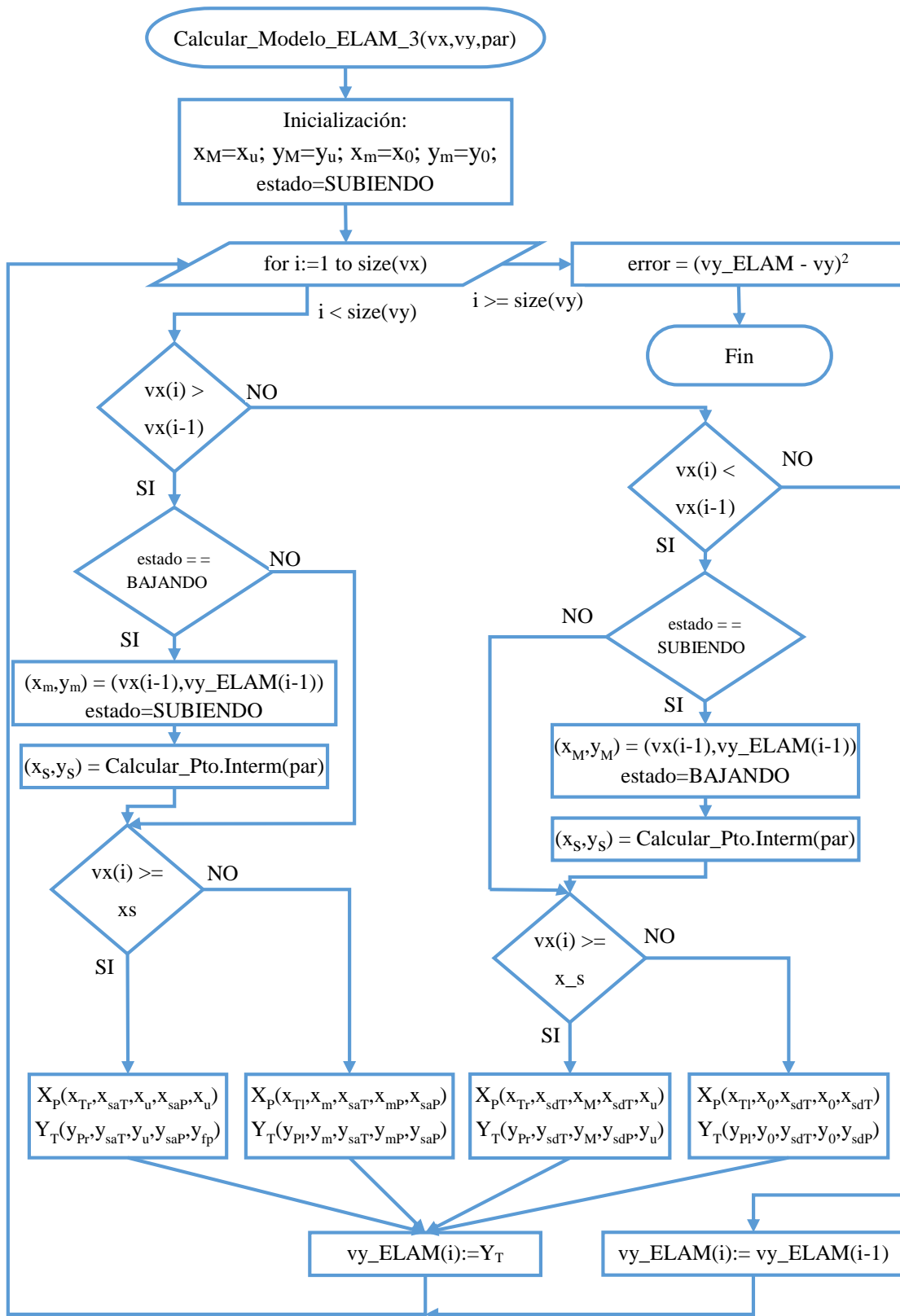


Figura II-3. Diagrama de Flujo de la función Calcular_Modelo para la versión ELAM_3.

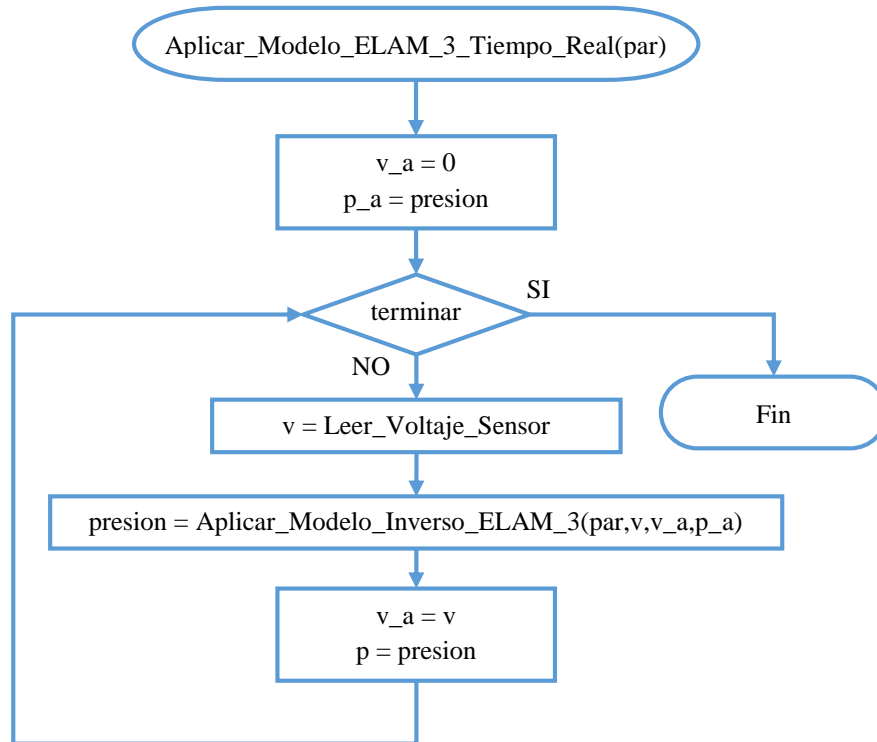


Figura II-4. Aplicar la compensación de la histéresis con el método ELAM_3 a una salida del sensor en tiempo real.

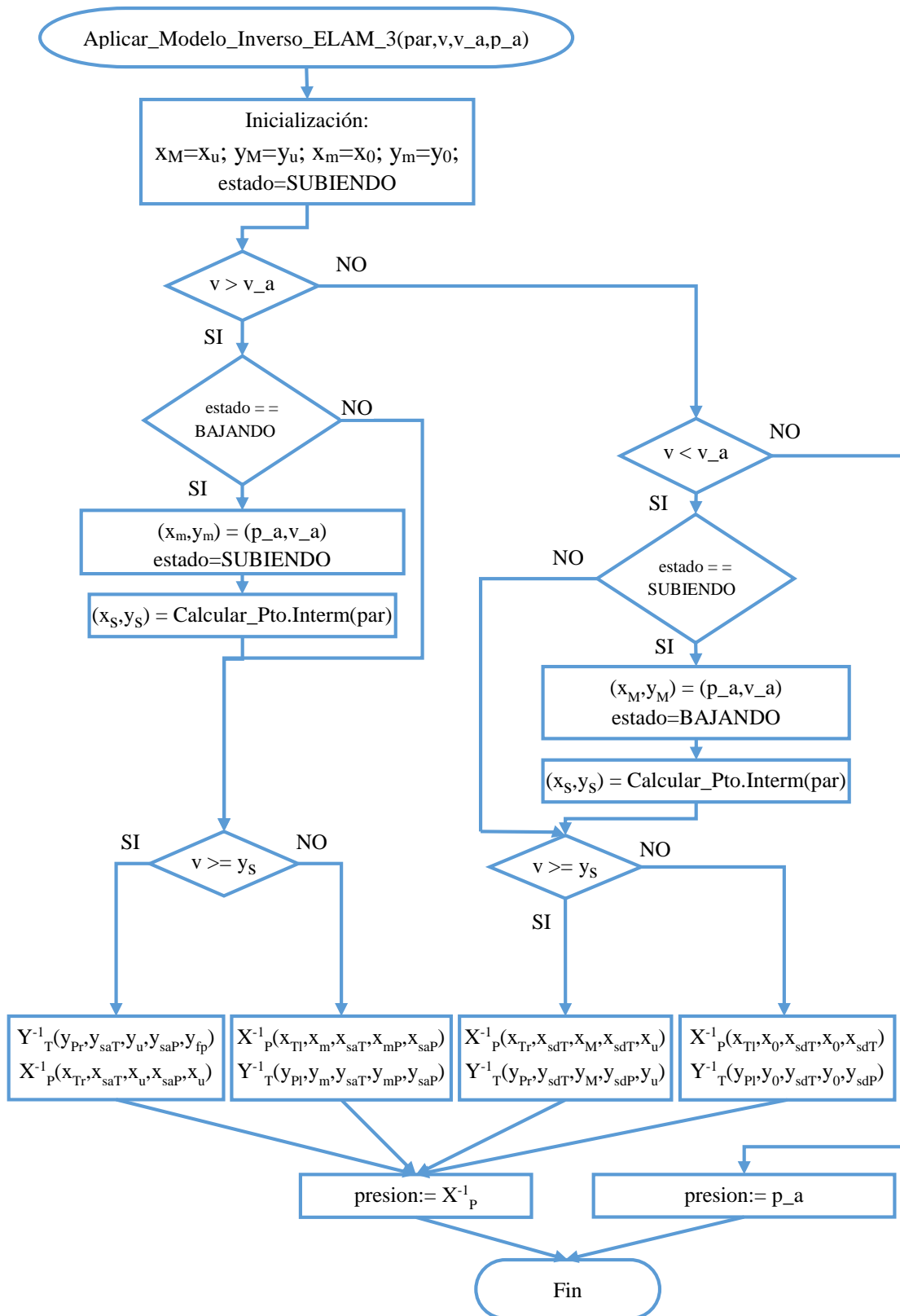


Figura II-5. Rutina para aplicar el modelo inverso ELAM_3 a los voltajes de salida del sensor para obtener la presión aplicada al mismo.

Anexo III. Resultados de Pruebas con Objetos

En este anexo, se muestran algunos de los resultados obtenidos en las pruebas realizadas con el sensor basado en una PCB. Se han utilizado los objetos descritos en la sección 3.2.1, para estudiar la influencia de los distintos errores estudiados en esta tesis, sobre los parámetros que definen la elipse que mejor se ajusta a la huella de objeto en la imagen táctil generada por el sensor. En las siguientes tablas (Tabla III-1, Tabla III-2, Tabla III-3, Tabla III-4 y Tabla III-5), se muestran los resultados obtenidos para los errores de histéresis con los objetos medidos con la plataforma motorizada descrita en la sección 2.3.2. Se muestran imágenes de los objetos con la elipse calculada, y se indican los valores de los distintos parámetros tanto en la trayectoria ascendente de los ciclos de histéresis, como en la descendente. Se calcula la diferencia de los valores de los parámetros para una misma presión en ambas trayectorias, y se evalúa el porcentaje de variación con respecto al fondo de escala. En las siguientes tablas (Tabla III-6, Tabla III-7 y Tabla III-8), se muestra la misma información, pero para los objetos estudiados con la plataforma manual descrita en la sección 2.3.3. A continuación, en la Tabla III-9 se muestran los resultados obtenidos en las pruebas de deriva. Finalmente, en las últimas tablas (Tabla III-10, Tabla III-11 y Tabla III-12), se muestran los resultados obtenidos al aplicar un cambio de resolución a las imágenes táctiles y los valores de los parámetros.

Tabla III-1. Prueba de Histéresis con Objeto Aro y Valores de Parámetros con Plataforma Motorizada.

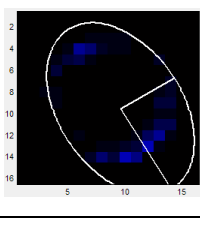
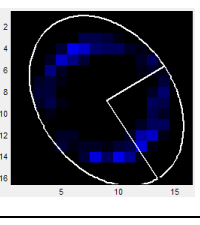
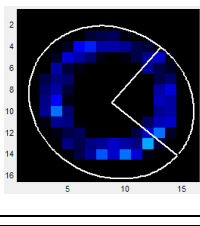
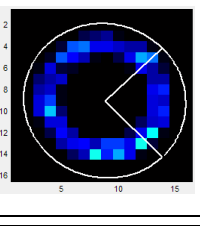
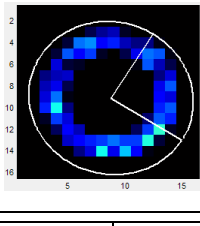
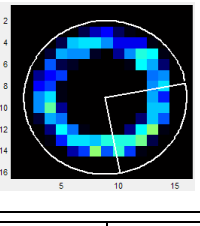
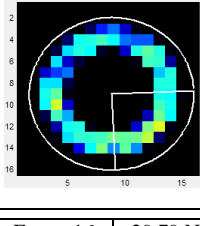
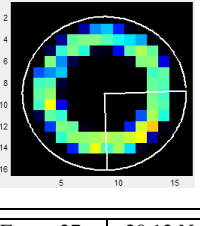
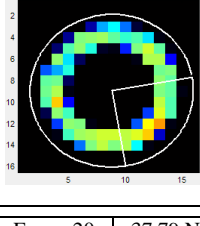
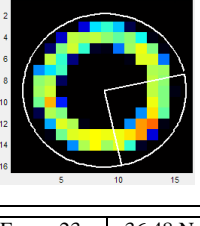
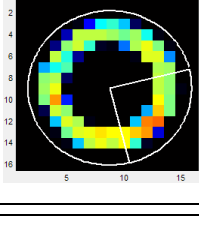
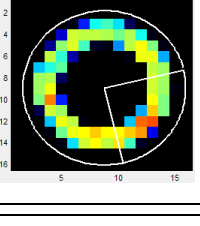
Frame	Fuerza (N)	Frame	Fuerza (N)	Fuerza Frame	Coord. X(mm)	Coord. Y(mm)	Presión (V)	Área (mm ²)	Eje > (mm)	Eje < (mm)	Ángulo Eje >	Ángulo Eje <	
Frame 2	1.98 N	Frame 41	2.06 N										
				Sub.	1,98	24,44	24,17	0,14	574,19	43,87	27,88	58,78	-31,22
				Baj.	2,06	22,79	22,35	0,23	664,51	43,02	30,57	57,78	-32,22
				Dif.	0,07	-1,65	-1,82	0,09	90,32	-0,85	2,69	1,00	1,00
				Var. %	0,07	-4,06	-4,47	1,78	5,47	-2,10	6,62	0,56	0,56
Frame 4	5.95 N	Frame 39	6.02 N										
				Sub.	5,95	22,40	23,33	0,43	709,68	38,56	34,17	40,30	-49,70
				Baj.	6,02	22,38	22,93	0,59	722,58	36,99	35,79	45,72	-44,28
				Dif.	0,07	-0,02	-0,40	0,16	12,90	-1,56	1,62	5,42	5,42
				Var. %	0,07	-0,05	-0,98	3,29	0,78	-3,85	3,99	3,01	3,01
Frame 6	9.90 N	Frame 37	10.06 N										
				Sub.	9,90	22,33	23,13	0,63	748,39	37,22	35,41	31,91	-58,09
				Baj.	10,06	22,51	23,00	0,83	761,29	36,53	35,99	-10,61	79,39
				Dif.	0,17	0,18	-0,13	0,20	12,90	-0,69	0,58	42,52	42,52
				Var. %	0,17	0,43	-0,32	3,96	0,78	-1,70	1,43	23,62	23,62
Frame 11	19.82 N	Frame 32	20.10 N										
				Sub.	19,82	22,45	22,86	1,02	774,19	36,74	35,82	-2,41	87,59
				Baj.	20,10	22,29	22,78	1,19	793,55	36,68	36,00	-2,22	87,78
				Dif.	0,28	-0,16	-0,09	0,17	19,35	-0,07	0,18	0,20	0,20
				Var. %	0,28	-0,39	-0,22	3,42	1,17	-0,16	0,43	0,11	0,11
Frame 16	29.79 N	Frame 27	30.12 N										
				Sub.	29,79	22,37	22,70	1,27	793,55	36,67	36,02	-10,15	79,85
				Baj.	30,12	22,31	22,65	1,39	793,55	36,63	36,12	-12,42	77,58
				Dif.	0,33	-0,05	-0,05	0,12	0,00	-0,04	0,10	2,27	2,27
				Var. %	0,33	-0,13	-0,12	2,41	0,00	-0,11	0,24	1,26	1,26
Frame 20	37.79 N	Frame 23	36.48 N										
				Sub.	37,79	22,28	22,63	1,41	800,00	36,59	36,17	-13,88	76,12
				Baj.	36,48	22,28	22,62	1,43	800,00	36,57	36,19	-13,45	76,55
				Dif.	-1,31	0,00	0,00	0,02	0,00	-0,02	0,02	0,43	0,43
				Var. %	-1,31	0,00	-0,01	0,50	0,00	-0,04	0,04	0,24	0,24

Tabla III-2. Prueba de Histéresis con Objeto Estrella y Valores de Parámetros con Plataforma Motorizada.

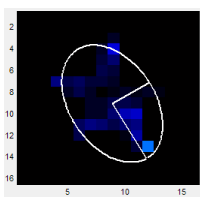
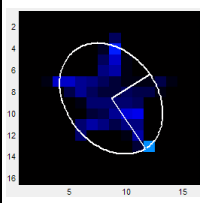
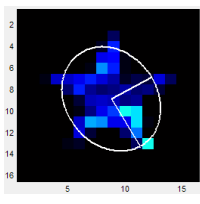
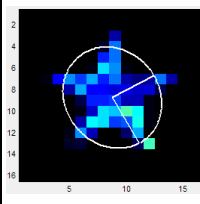
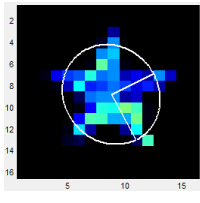
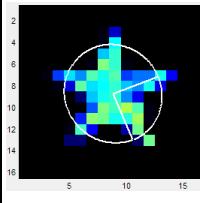
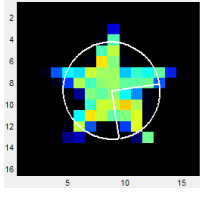
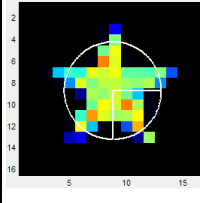
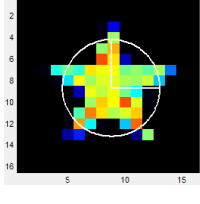
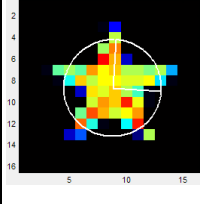
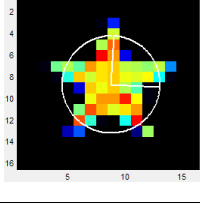
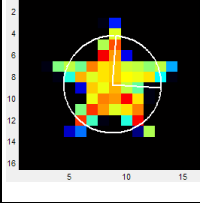
Frame	Fuerza (N)	Frame	Fuerza (N)	Fuerza Frame	Coord. X(mm)	Coord. Y(mm)	Presión (V)	Área (mm ²)	Eje > (mm)	Eje < (mm)	Ángulo Eje >	Ángulo Eje <	
Frame 2	2.01 N	Frame 41	2.09 N										
				Sub.	2,01	22,62	23,05	0,22	503,22	29,85	19,27	59,37	-30,63
				Baj.	2,09	22,04	21,85	0,34	503,22	27,98	20,70	56,94	-33,06
				Dif.	0,08	-0,57	-1,20	0,11	0,00	-1,87	1,44	2,43	2,43
				Var. %	0,08	-1,41	-2,96	2,27	0,00	-4,61	3,53	1,35	1,35
Frame 4	5.95 N	Frame 41	6.06 N										
				Sub.	5,95	22,39	22,52	0,57	522,58	25,71	20,68	60,27	-29,73
				Baj.	6,06	22,30	22,20	0,76	522,58	24,62	21,34	60,79	-29,21
				Dif.	0,10	-0,10	-0,32	0,19	0,00	-1,09	0,66	0,53	0,53
				Var. %	0,10	-0,24	-0,78	3,78	0,00	-2,69	1,62	0,29	0,29
Frame 6	9.87 N	Frame 41	10.06 N										
				Sub.	9,87	22,38	22,29	0,88	516,13	23,94	21,23	62,65	-27,35
				Baj.	10,06	22,49	22,12	1,08	529,03	23,31	21,71	68,01	-21,99
				Dif.	0,19	0,11	-0,17	0,20	12,90	-0,63	0,49	5,36	5,36
				Var. %	0,19	0,27	-0,41	3,90	0,78	-1,55	1,19	2,98	2,98
Frame 11	19.78 N	Frame 41	20.09 N										
				Sub.	19,78	22,45	22,11	1,35	529,03	22,83	21,57	81,22	-8,78
				Baj.	20,09	22,41	22,11	1,46	541,93	22,88	21,76	89,77	-0,23
				Dif.	0,31	-0,04	0,00	0,12	12,90	0,05	0,20	8,55	8,55
				Var. %	0,31	-0,09	0,00	2,36	0,78	0,13	0,48	4,75	4,75
Frame 16	29.76 N	Frame 41	30.13 N										
				Sub.	29,76	22,37	22,06	1,57	541,93	22,83	21,74	-89,26	0,74
				Baj.	30,13	22,35	22,05	1,60	567,74	22,82	21,91	-86,16	3,84
				Dif.	0,36	-0,02	-0,01	0,03	25,81	-0,01	0,17	3,09	3,09
				Var. %	0,36	-0,04	-0,01	0,60	1,56	-0,02	0,41	1,72	1,72
Frame 20	37.78 N	Frame 41	36.64 N										
				Sub.	37,78	22,33	22,05	1,65	561,29	22,76	21,84	-86,64	3,36
				Baj.	36,64	22,33	22,04	1,73	541,93	22,77	21,89	-85,93	4,07
				Dif.	-1,14	0,00	0,00	0,08	-19,35	0,00	0,04	0,71	0,71
				Var. %	-1,14	0,00	-0,01	1,68	-1,17	0,01	0,11	0,39	0,39

Tabla III-3. Prueba de Histéresis con Objeto Abridor y Valores de Parámetros con Plataforma Motorizada.

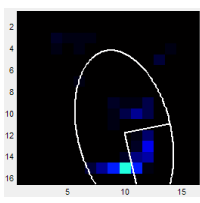
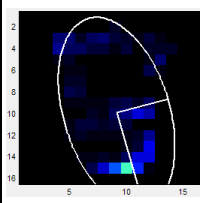
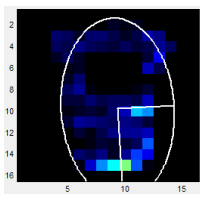
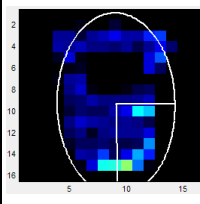
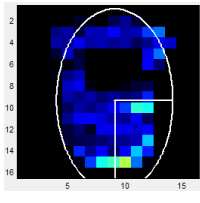
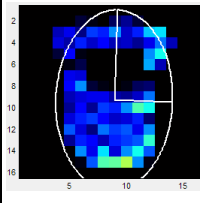
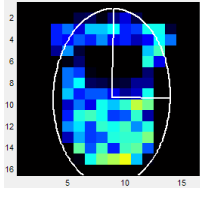
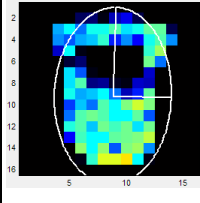
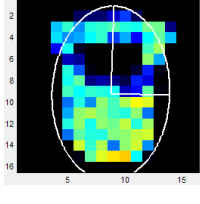
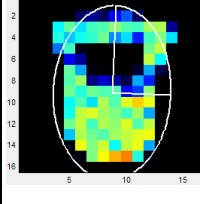
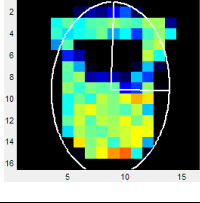
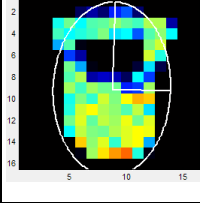
Frame	Force (N)	Frame	Force (N)		Fuerza Frame	Coord. X(mm)	Coord. Y(mm)	Presión (V)	Área (mm ²)	Eje > (mm)	Eje < (mm)	Ángulo Eje >	Ángulo Eje <
Frame 2	2.01 N	Frame 41	2.13 N										
				Sub.	2,01	25,28	29,92	0,15	606,45	39,47	20,85	77,67	-12,33
				Baj.	2,13	23,25	25,15	0,25	729,03	45,98	23,88	74,19	-15,81
				Dif.	0,12	-2,03	-4,77	0,10	122,58	6,51	3,03	3,49	3,49
				Var. %	0,12	-4,99	-11,74	1,98	7,42	16,03	7,46	1,94	1,94
Frame 4	5.94 N	Frame 39	6.05 N										
				Sub.	5,94	23,81	24,84	0,38	819,35	42,79	25,25	86,50	-3,50
				Baj.	6,06	23,14	23,72	0,52	838,71	42,96	26,46	88,97	-1,03
				Dif.	0,11	-0,67	-1,12	0,14	19,35	0,18	1,21	2,46	2,46
				Var. %	0,11	-1,65	-2,75	2,88	1,17	0,44	2,97	1,37	1,37
Frame 6	9.89 N	Frame 37	10.05 N										
				Sub.	9,89	23,15	23,63	0,61	851,61	42,82	25,95	89,85	-0,15
				Baj.	10,05	22,71	23,59	0,79	864,51	42,25	26,20	-88,02	1,98
				Dif.	0,16	-0,44	-0,04	0,19	12,90	-0,57	0,25	2,13	2,13
				Var. %	0,16	-1,08	-0,10	3,76	0,78	-1,40	0,61	1,18	1,18
Frame 11	19.84 N	Frame 32	20.10 N										
				Sub.	19,84	22,48	23,59	1,03	890,32	41,47	26,09	-88,66	1,34
				Baj.	20,10	22,41	23,28	1,25	890,32	41,44	26,26	-87,95	2,05
				Dif.	0,26	-0,07	-0,31	0,21	0,00	-0,03	0,17	0,71	0,71
				Var. %	0,26	-0,18	-0,75	4,26	0,00	-0,07	0,41	0,39	0,39
Frame 16	29.79 N	Frame 27	30.18 N										
				Sub.	29,79	22,30	23,28	1,35	903,22	41,05	26,25	-88,14	1,86
				Baj.	30,18	22,23	23,13	1,50	903,22	40,95	26,35	-87,72	2,28
				Dif.	0,38	-0,06	-0,15	0,15	0,00	-0,10	0,11	0,42	0,42
				Var. %	0,38	-0,16	-0,36	2,99	0,00	-0,24	0,26	0,23	0,23
Frame 20	37.82 N	Frame 23	36.48 N										
				Sub.	37,82	22,21	23,15	1,54	903,22	40,83	26,32	-88,12	1,88
				Baj.	36,48	22,19	23,11	1,56	909,68	40,80	26,35	-88,03	1,97
				Dif.	-1,34	-0,02	-0,04	0,02	6,45	-0,03	0,03	0,09	0,09
				Var. %	-1,34	-0,05	-0,10	0,48	0,39	-0,07	0,08	0,05	0,05

Tabla III-4. Prueba de Histéresis con Objeto Abridor en Diagonal y Valores de Parámetros con Plataforma Motorizada.

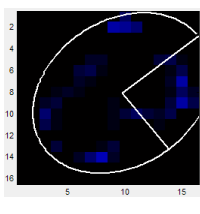
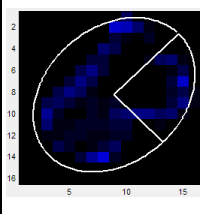
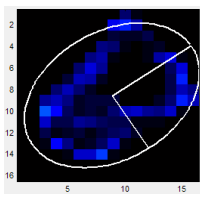
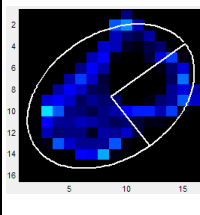
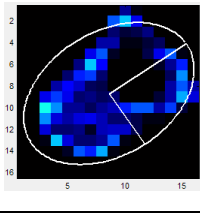
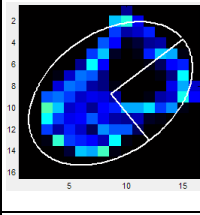
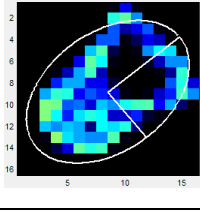
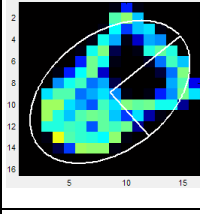
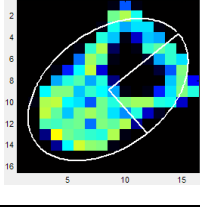
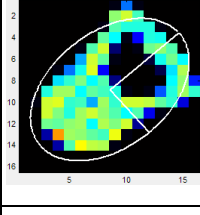
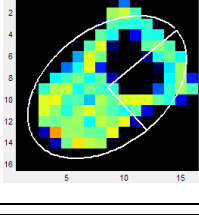
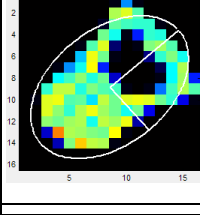
Frame	Fuerza (N)	Frame	Fuerza (N)	Fuerza Frame	Coord. X(mm)	Coord. Y(mm)	Presión (V)	Área (mm ²)	Eje > (mm)	Eje < (mm)	Ángulo Eje >	Ángulo Eje <	
Frame 2	2.02 N	Frame 41	1.98 N										
				Sub.	2,02	24,79	20,54	0,14	800,00	43,30	33,57	-38,44	51,56
				Baj.	1,98	22,68	20,97	0,21	845,16	40,73	31,10	-44,78	45,22
				Dif.	-0,04	-2,10	0,43	0,08	45,16	-2,57	-2,47	6,34	6,34
				Var. %	-0,04	-5,18	1,05	1,51	2,73	-6,33	-6,08	3,52	3,52
Frame 4	5.98 N	Frame 39	6.04 N										
				Sub.	5,98	22,52	21,70	0,36	877,42	42,40	29,79	-33,41	56,59
				Baj.	6,04	21,98	21,87	0,52	896,77	41,46	29,08	-36,78	53,22
				Dif.	0,06	-0,54	0,18	0,16	19,35	-0,94	-0,71	3,37	3,37
				Var. %	0,06	-1,33	0,43	3,17	1,17	-2,31	-1,74	1,87	1,87
Frame 6	9.86 N	Frame 37	10.08 N										
				Sub.	9,86	21,86	22,09	0,57	896,77	41,69	28,58	-34,31	55,69
				Baj.	10,08	21,91	22,05	0,78	896,77	41,18	27,98	-38,22	51,78
				Dif.	0,21	0,05	-0,04	0,21	0,00	-0,51	-0,60	3,91	3,91
				Var. %	0,21	0,12	-0,09	4,16	0,00	-1,26	-1,46	2,17	2,17
Frame 11	19.81 N	Frame 32	20.11 N										
				Sub.	19,81	21,60	22,39	1,02	896,77	41,07	27,41	-38,90	51,10
				Baj.	20,11	21,78	22,40	1,26	896,77	40,96	26,98	-40,01	49,99
				Dif.	0,30	0,18	0,01	0,24	0,00	-0,11	-0,42	1,12	1,12
				Var. %	0,30	0,45	0,03	4,78	0,00	-0,27	-1,04	0,62	0,62
Frame 16	29.81 N	Frame 27	30.16 N										
				Sub.	29,81	21,68	22,44	1,36	896,77	40,91	26,95	-40,29	49,71
				Baj.	30,16	21,73	22,42	1,48	909,68	40,89	26,77	-40,90	49,10
				Dif.	0,35	0,05	-0,02	0,13	12,90	-0,02	-0,17	0,61	0,61
				Var. %	0,35	0,12	-0,05	2,57	0,78	-0,05	-0,43	0,34	0,34
Frame 20	37.79 N	Frame 23	36.72 N										
				Sub.	37,79	21,69	22,43	1,50	916,13	40,78	26,73	-40,92	49,08
				Baj.	36,72	21,70	22,43	1,53	922,58	40,77	26,69	-41,03	48,97
				Dif.	-1,07	0,01	0,00	0,03	6,45	-0,01	-0,04	0,12	0,12
				Var. %	-1,07	0,02	-0,01	0,55	0,39	-0,03	-0,10	0,06	0,06

Tabla III-5. Prueba de Histéresis con Objeto Barra y Valores de Parámetros con Plataforma Motorizada.

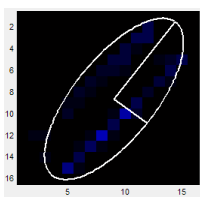
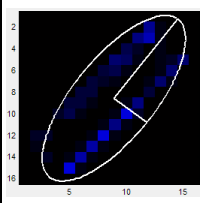
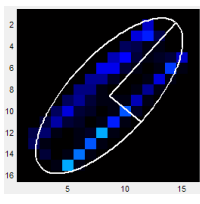
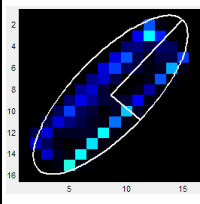
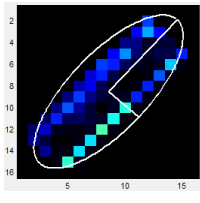
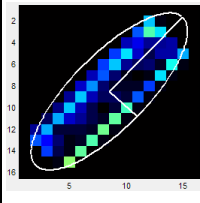
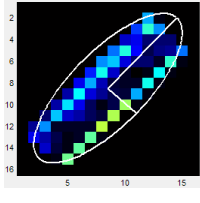
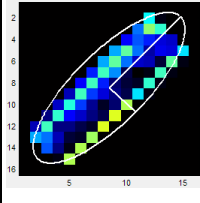
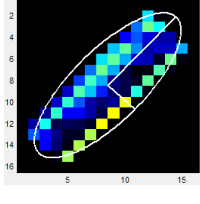
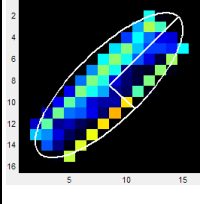
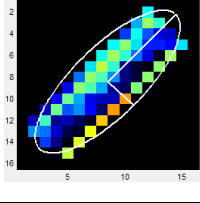
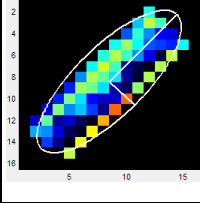
Frame	Fuerza (N)	Frame	Fuerza (N)	Fuerza Frame	Coord. X(mm)	Coord. Y(mm)	Presión (V)	Área (mm ²)	Eje > (mm)	Eje < (mm)	Ángulo Eje >	Ángulo Eje <	
Frame 2	2.05 N	Frame 31	1.97 N										
				Sub.	2,05	23,00	21,95	0,11	690,32	45,28	18,53	-53,00	37,00
				Baj.	1,97	22,65	21,79	0,18	690,32	46,92	18,51	-52,44	37,56
				Dif.	-0,07	-0,35	-0,15	0,06	0,00	1,65	-0,02	0,56	0,56
				Var. %	-0,07	-0,87	-0,38	1,27	0,00	4,05	-0,05	0,31	0,31
Frame 4	5.99 N	Frame 29	5.92 N										
				Sub.	5,99	21,92	21,80	0,33	696,77	45,55	18,62	-49,39	40,61
				Baj.	5,92	21,91	21,57	0,48	683,87	47,86	17,62	-47,96	42,04
				Dif.	-0,07	-0,01	-0,23	0,14	-12,90	2,31	-0,99	1,43	1,43
				Var. %	-0,07	-0,04	-0,58	2,84	-0,78	5,69	-2,45	0,79	0,79
Frame 6	9.93 N	Frame 27	9.98 N										
				Sub.	UP	9,94	21,78	21,64	0,51	677,42	45,56	17,97	-48,00
				Baj.	Down	9,98	21,63	21,60	0,69	677,42	47,90	17,04	-46,83
				Dif.	Dif.	0,05	-0,15	-0,04	0,17	0,00	2,34	-0,93	1,16
				Var. %	Var. %	0,05	-0,37	-0,10	3,50	0,00	5,76	-2,30	0,65
Frame 9	15.94 N	Frame 24	16.01 N										
				Sub.	15,95	21,67	21,53	0,74	670,97	45,08	17,17	-47,15	42,85
				Baj.	16,01	21,58	21,44	0,93	670,97	46,27	16,36	-46,42	43,58
				Dif.	0,06	-0,09	-0,08	0,19	0,00	1,19	-0,81	0,72	0,72
				Var. %	0,06	-0,22	-0,21	3,83	0,00	2,92	-1,99	0,40	0,40
Frame 12	21.87 N	Frame 21	22.02 N										
				Sub.	21,87	21,61	21,45	0,93	677,42	44,37	16,47	-46,64	43,36
				Baj.	22,03	21,56	21,42	1,10	677,42	44,76	15,98	-46,19	43,81
				Dif.	0,16	-0,05	-0,02	0,16	0,00	0,39	-0,49	0,46	0,46
				Var. %	0,16	-0,12	-0,06	3,28	0,00	0,96	-1,20	0,25	0,25
Frame 15	27.89 N	Frame 18	28.00 N										
				Sub.	27,89	21,58	21,39	1,12	677,42	43,74	15,96	-46,30	43,70
				Baj.	28,00	21,57	21,39	1,18	677,42	43,73	15,85	-46,20	43,80
				Dif.	0,12	-0,01	-0,01	0,06	0,00	-0,01	-0,12	0,10	0,10
				Var. %	0,12	-0,02	-0,02	1,22	0,00	-0,03	-0,29	0,06	0,06

Tabla III-6. Prueba de Histéresis con Objeto Silbato y Valores de Parámetros con Plataforma Manual.

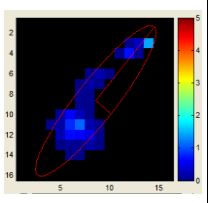
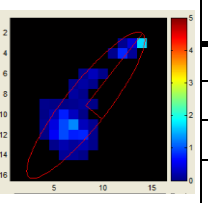
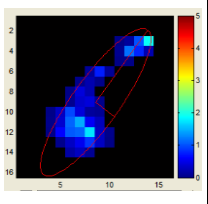
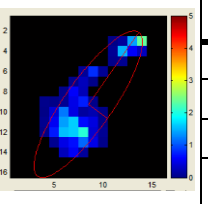
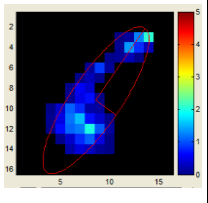
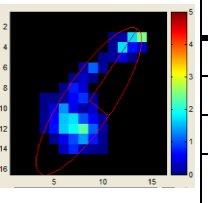
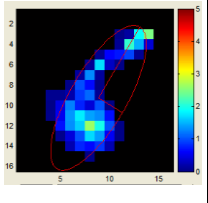
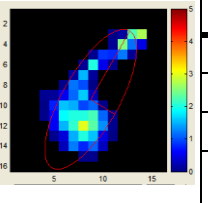
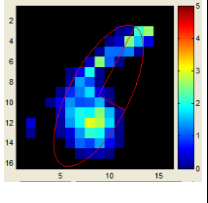
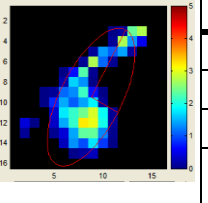
Frame 2	515.3 gr.	Frame 49	571.3 gr.		Fuerza Frame	Coord. X(mm)	Coord. Y(mm)	Presión (V)	Área (mm ²)	Eje > (mm)	Eje < (mm)	Ángulo Eje >	Ángulo Eje <
				Sub.	515,30	21,93	22,03	0,20	309,68	47,78	10,10	-50,81	39,19
				Baj.	571,30	20,96	23,13	0,25	341,93	46,43	10,84	-50,52	39,48
				Dif.	56,00	-0,97	1,10	0,05	32,26	-1,34	0,75	0,29	0,29
				Var. %		-2,40	2,71	0,96	1,95	-3,31	1,83	0,16	0,16
Frame 4	1517.6 gr.	Frame 47	1604.9 gr.		Fuerza Frame	Coord. X(mm)	Coord. Y(mm)	Presión (V)	Área (mm ²)	Eje > (mm)	Eje < (mm)	Ángulo Eje >	Ángulo Eje <
				Sub.	1517,60	21,87	23,01	0,35	406,45	45,21	12,08	-53,45	36,55
				Baj.	1604,90	21,59	23,49	0,43	419,35	44,67	12,32	-53,83	36,17
				Dif.	87,30	-0,27	0,48	0,09	12,90	-0,54	0,23	0,39	0,39
				Var. %		-0,67	1,19	1,75	0,78	-1,33	0,58	0,21	0,21
Frame 5	1962.6 gr.	Frame 46	2034.1 gr.		Fuerza Frame	Coord. X(mm)	Coord. Y(mm)	Presión (V)	Área (mm ²)	Eje > (mm)	Eje < (mm)	Ángulo Eje >	Ángulo Eje <
				Sub.	1962,60	21,92	23,37	0,41	432,26	44,02	12,78	-54,71	35,29
				Baj.	2034,10	21,78	23,60	0,51	425,81	44,01	12,73	-54,80	35,20
				Dif.	71,50	-0,15	0,23	0,10	-6,45	-0,01	-0,06	0,09	0,09
				Var. %		-0,36	0,57	2,06	-0,39	-0,02	-0,14	0,05	0,05
Frame 10	4465.6 gr.	Frame 41	4496.4 gr.		Fuerza Frame	Coord. X(mm)	Coord. Y(mm)	Presión (V)	Área (mm ²)	Eje > (mm)	Eje < (mm)	Ángulo Eje >	Ángulo Eje <
				Sub.	4465,60	22,56	23,51	0,63	483,87	41,36	14,51	-58,75	31,25
				Baj.	4496,40	22,25	23,88	0,77	503,22	39,65	14,50	-59,21	30,79
				Dif.	30,80	-0,31	0,37	0,13	19,35	-1,71	0,00	0,45	0,45
				Var. %		-0,76	0,90	2,68	1,17	-4,20	-0,01	0,25	0,25
Frame 16	7571.5 gr.	Frame 35	7352.4 gr.		Fuerza Frame	Coord. X(mm)	Coord. Y(mm)	Presión (V)	Área (mm ²)	Eje > (mm)	Eje < (mm)	Ángulo Eje >	Ángulo Eje <
				Sub.	7571,50	22,59	23,71	0,78	548,39	39,29	15,49	-61,45	28,55
				Baj.	7352,40	22,35	24,09	0,89	541,93	38,05	15,85	-61,74	28,26
				Dif.	-219,10	-0,24	0,38	0,12	-6,45	-1,23	0,36	0,29	0,29
				Var. %		-0,59	0,94	2,30	-0,39	-3,04	0,90	0,16	0,16

Tabla III-7. Prueba de Histéresis con Objeto Llave y Valores de Parámetros con Plataforma Manual.

Frame	Weight (gr.)	Frame	Weight (gr.)	Fuerza Frame	Coord. X(mm)	Coord. Y(mm)	Presión (V)	Área (mm ²)	Eje > (mm)	Eje < (mm)	Ángulo Eje >	Ángulo Eje <	
Frame 2	1063.5 gr.	Frame 55	875.0 gr.	Sub.	1063,50	19,35	27,93	0,09	406,45	61,99	12,50	-54,31	35,69
				Baj.	875,00	13,81	35,31	0,23	212,90	26,71	6,62	-44,18	45,82
				Dif.	-188,50	-5,55	7,39	0,14	-193,55	-35,28	-5,88	10,13	10,13
				Var. %		-13,65	18,18	2,82	-11,72	-86,81	-14,47	5,63	5,63
Frame 3	1501.5 gr.	Frame 54	1549.0 gr.	Sub.	1501,50	21,26	25,65	0,12	522,58	60,78	12,87	-53,41	36,59
				Baj.	1549,00	16,00	32,49	0,24	354,84	38,77	8,61	-48,72	41,28
				Dif.	47,50	-5,26	6,84	0,11	-167,74	-22,01	-4,26	4,69	4,69
				Var. %		-12,94	16,83	2,21	-10,16	-54,15	-10,47	2,61	2,61
Frame 5	2637.5 gr.	Frame 52	2597.9 gr.	Sub.	2637,50	25,82	21,24	0,24	593,55	61,47	15,61	-50,75	39,25
				Baj.	2597,90	18,34	30,00	0,24	529,03	45,82	10,66	-47,51	42,49
				Dif.	-39,60	-7,48	8,76	0,01	-64,52	-15,65	-4,95	3,24	3,24
				Var. %		-18,40	21,56	0,14	-3,91	-38,51	-12,18	1,80	1,80
Frame 17	8974.2 gr.	Frame 39	8830.2 gr.	Sub.	8974,20	27,36	20,89	0,43	741,93	55,85	16,72	-47,68	42,32
				Baj.	8830,20	24,33	23,81	0,44	787,10	54,83	15,28	-48,43	41,57
				Dif.	-144,00	-3,03	2,92	0,01	45,16	-1,02	-1,44	0,74	0,74
				Var. %		-7,46	7,20	0,11	2,73	-2,52	-3,55	0,41	0,41
Frame 18	9648.5 gr.	Frame 38	9223.2 gr.	Sub.	9648,50	27,17	21,99	0,39	780,64	53,09	19,41	-47,17	42,83
				Baj.	9223,20	24,31	23,67	0,40	883,87	50,45	21,85	-49,16	40,84
				Dif.	-425,30	-2,87	1,68	0,02	103,23	-2,64	2,44	2,00	2,00
				Var. %		-7,05	4,12	0,32	6,25	-6,49	6,00	1,11	1,11

Tabla III-8. Prueba de Histéresis con Objeto Fresa y Valores de Parámetros con Plataforma Manual.

Frame 2	474.2 gr.	Frame 50	569.2 gr.								
		Fuerza Frame	Coord. X(mm)	Coord. Y(mm)	Presión (V)	Área (mm ²)	Eje > (mm)	Eje < (mm)	Ángulo Eje >	Ángulo Eje <	
		Sub.	474,20	20,68	25,79	0,13	367,74	27,80	22,13	16,46	-73,54
		Baj.	569,20	17,94	24,00	0,16	309,68	28,20	18,36	16,58	-73,42
		Dif.	95,00	-2,74	-1,79	0,03	-58,06	0,40	-3,76	0,11	0,11
		Var. %		-6,75	-4,42	0,54	-3,52	0,99	-9,26	0,06	0,06
Frame 3	1012.7 gr.	Frame 49	1042.2 gr.								
		Fuerza Frame	Coord. X(mm)	Coord. Y(mm)	Presión (V)	Área (mm ²)	Eje > (mm)	Eje < (mm)	Ángulo Eje >	Ángulo Eje <	
		Sub.	1012,70	20,70	25,87	0,23	432,26	27,51	22,59	-0,85	89,15
		Baj.	1042,20	19,01	25,59	0,33	425,81	27,82	21,26	13,73	-76,27
		Dif.	29,50	-1,69	-0,27	0,09	-6,45	0,31	-1,33	14,58	14,58
		Var. %		-4,16	-0,67	1,89	-0,39	0,75	-3,28	8,10	8,10
Frame 5	1934.2 gr.	Frame 46	2207.3 gr.								
		Fuerza Frame	Coord. X(mm)	Coord. Y(mm)	Presión (V)	Área (mm ²)	Eje > (mm)	Eje < (mm)	Ángulo Eje >	Ángulo Eje <	
		Sub.	1934,20	21,30	25,53	0,39	496,77	27,67	23,08	-0,45	89,55
		Baj.	1890,60	19,63	25,12	0,45	490,32	27,70	22,89	16,92	-73,08
		Dif.	-43,60	-1,67	-0,41	0,06	-6,45	0,03	-0,19	17,37	17,37
		Var. %		-4,11	-1,02	1,26	-0,39	0,07	-0,47	9,65	9,65
Frame 9	4084.0 gr.	Frame 42	3937.3 gr.								
		Fuerza Frame	Coord. X(mm)	Coord. Y(mm)	Presión (V)	Área (mm ²)	Eje > (mm)	Eje < (mm)	Ángulo Eje >	Ángulo Eje <	
		Sub.	4084,00	22,20	25,22	0,58	541,93	27,28	23,24	-8,04	81,96
		Baj.	3937,30	21,19	24,39	0,71	587,10	27,61	24,93	3,62	-86,38
		Dif.	-146,70	-1,02	-0,83	0,13	45,16	0,33	1,69	11,67	11,67
		Var. %		-2,51	-2,03	2,54	2,73	0,82	4,16	6,48	6,48
Frame 12	5412.0 gr.	Frame 39	5507.4 gr.								
		Fuerza Frame	Coord. X(mm)	Coord. Y(mm)	Presión (V)	Área (mm ²)	Eje > (mm)	Eje < (mm)	Ángulo Eje >	Ángulo Eje <	
		Sub.	5412,00	22,26	24,73	0,64	593,55	27,37	24,47	-5,53	84,47
		Baj.	5507,40	21,91	23,97	0,81	612,90	26,93	26,07	1,73	-88,27
		Dif.	95,40	-0,35	-0,75	0,16	19,35	-0,44	1,60	7,26	7,26
		Var. %		-0,86	-1,85	3,24	1,17	-1,08	3,93	4,03	4,03

Tabla III-9. Pruebas de Deriva con Objetos y Plataforma Motorizada.

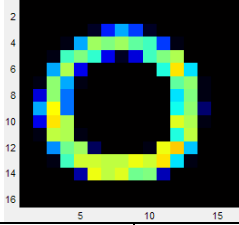
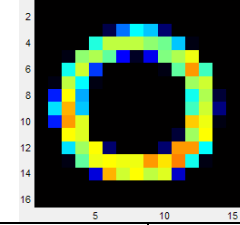
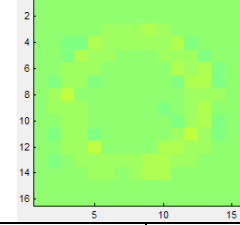
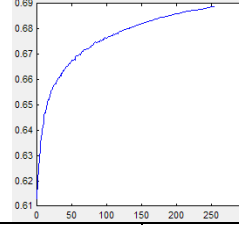
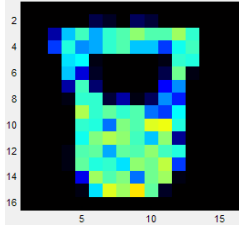
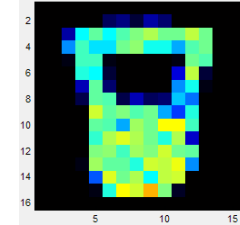
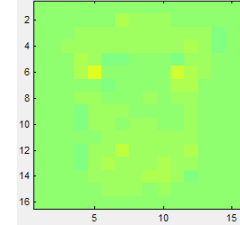
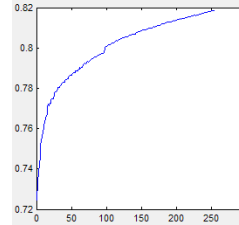
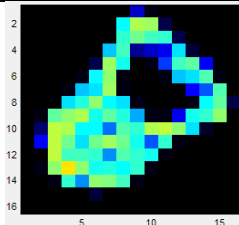
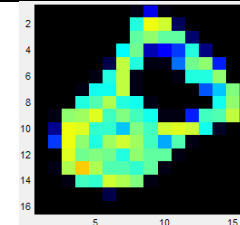
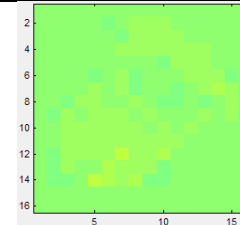
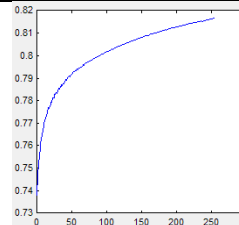
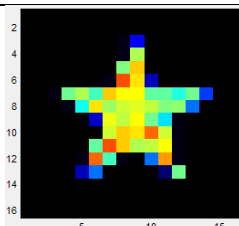
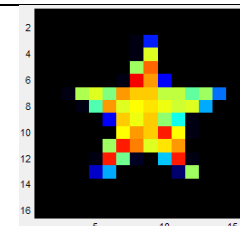
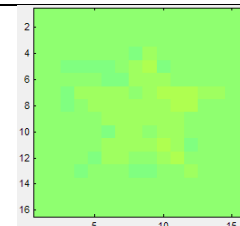
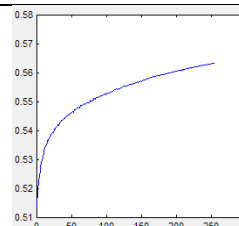
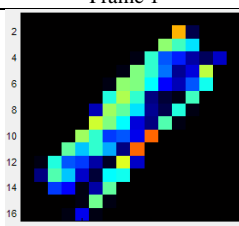
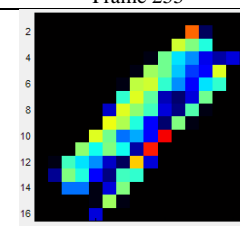
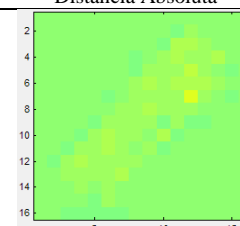
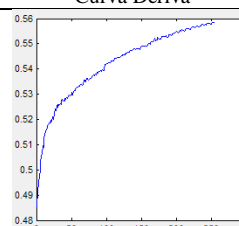
Presión:	30N	Duración:	25,5 min	Presión Frame1: 31.12N	Presión Frame255:29.8089N
Frame 1		Frame 255		Distancia Absoluta	Curva Deriva
					
Media:	0.61287	Media:	0.68879	Media:	0.075915
Desv. Std.:	1.0345	Desv. Std.:	1.1468	Desv. Std.:	0.12834
Presión:	30N	Duración:	25,5 min	Presión Frame1: 30.08N	Presión Frame255:29.13N
Frame 1		Frame 255		Distancia Absoluta	Curva Deriva
					
Media:	0.7244	Media:	0.8187	Media:	0.094304
Desv. Std.:	0.99523	Desv. Std.:	1.0991	Desv. Std.:	0.13786
Presión:	30N	Duración:	25,5 min	Presión Frame1: 31.36N	Presión Frame255:30.40N
Frame 1		Frame 255		Distancia Absoluta	Curva Deriva
					
Media:	0.73816	Media:	0.81679	Media:	0.078626
Desv. Std.:	1.0033	Desv. Std.:	1.1005	Desv. Std.:	0.11166
Presión:	30N	Duración:	25,5 min	Presión Frame1: 30.99N	Presión Frame255:30.12N
Frame 1		Frame 255		Distancia Absoluta	Curva Deriva
					
Media:	0.51391	Media:	0.56331	Media:	0.049396
Desv. Std.:	1.0614	Desv. Std.:	1.1565	Desv. Std.:	0.10317
Presión:	30N	Duración:	25,5 min	Presión Frame1: 30.62N	Presión Frame255:29.69N
Frame 1		Frame 255		Distancia Absoluta	Curva Deriva
					
Media:	0.48552	Media:	0.68879	Media:	0.072412
Desv. Std.:	0.85947	Desv. Std.:	1.1468	Desv. Std.:	0.13021

Tabla III-10. Prueba de Cambio de Resolución con Objeto Aro y Valores de Parámetros con Plataforma Motorizada.

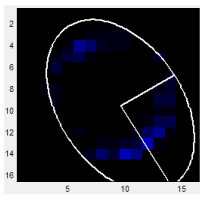
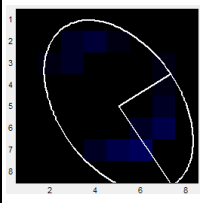
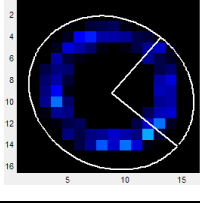
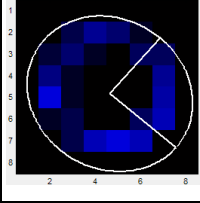
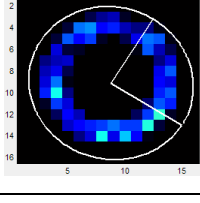
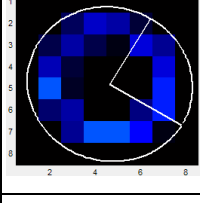
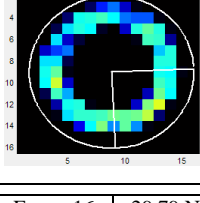
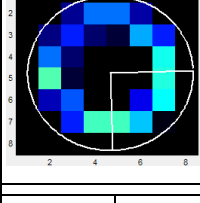
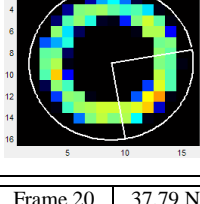
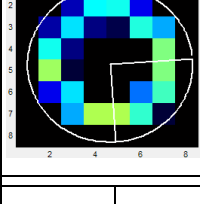
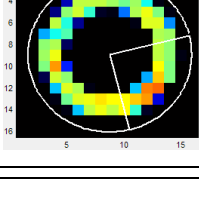
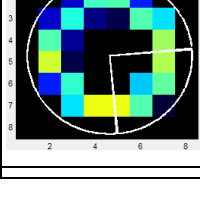
Frame	Fuerza Frame	Coord. X(mm)	Coord. Y(mm)	Presión (V)	Área (mm ²)	Eje > (mm)	Eje < (mm)	Ángulo Eje >	Ángulo Eje <		
Frame 2 1.98 N											
		Frame	Fuerza Frame	Coord. X(mm)	Coord. Y(mm)	Presión (V)	Área (mm ²)	Eje > (mm)	Eje < (mm)	Ángulo Eje >	Ángulo Eje <
		16x16	1,98	24,44	24,17	0,14	574,19	43,87	27,88	58,78	-31,22
		8x8	1,98	25,56	25,26	0,13	645,16	44,15	27,62	57,38	-32,62
		Dif.	0,00	1,11	1,10	-0,02	70,97	0,28	-0,26	1,40	1,40
		Var. %	0,00	2,74	2,69	-0,34	4,30	0,68	-0,64	0,78	0,78
Frame 4 5.95 N											
		Frame	Fuerza Frame	Coord. X(mm)	Coord. Y(mm)	Presión (V)	Área (mm ²)	Eje > (mm)	Eje < (mm)	Ángulo Eje >	Ángulo Eje <
		16x16	5,95	22,40	23,33	0,43	709,68	38,56	34,17	40,30	-49,70
		8x8	5,95	23,60	24,52	0,39	774,19	38,73	34,44	40,56	-49,44
		Dif.	0,00	1,19	1,19	-0,04	64,52	0,17	0,27	0,26	0,26
		Var. %	0,00	2,94	2,92	-0,73	3,91	0,42	0,67	0,15	0,15
Frame 6 9.90 N											
		Frame	Fuerza Frame	Coord. X(mm)	Coord. Y(mm)	Presión (V)	Área (mm ²)	Eje > (mm)	Eje < (mm)	Ángulo Eje >	Ángulo Eje <
		16x16	9,90	22,33	23,13	0,63	748,39	37,22	35,41	31,91	-58,09
		8x8	9,90	23,57	24,38	0,57	825,80	37,33	35,69	30,77	-59,23
		Dif.	0,00	1,24	1,25	-0,06	77,42	0,11	0,28	1,14	1,14
		Var. %	0,00	3,05	3,08	-1,19	4,69	0,27	0,69	0,64	0,64
Frame 11 19.82 N											
		Frame	Fuerza Frame	Coord. X(mm)	Coord. Y(mm)	Presión (V)	Área (mm ²)	Eje > (mm)	Eje < (mm)	Ángulo Eje >	Ángulo Eje <
		16x16	19,82	22,45	22,86	1,02	774,19	36,74	35,82	-2,41	87,59
		8x8	19,82	23,71	24,14	0,92	851,61	36,99	36,13	-1,85	88,15
		Dif.	0,00	1,26	1,28	-0,09	77,42	0,25	0,31	0,56	0,56
		Var. %	0,00	3,09	3,15	-1,86	4,69	0,61	0,76	0,31	0,31
Frame 16 29.79 N											
		Frame	Fuerza Frame	Coord. X(mm)	Coord. Y(mm)	Presión (V)	Área (mm ²)	Eje > (mm)	Eje < (mm)	Ángulo Eje >	Ángulo Eje <
		16x16	29,79	22,37	22,70	1,27	793,55	36,67	36,02	-10,15	79,85
		8x8	29,79	23,64	23,96	1,15	877,42	36,91	36,38	-4,16	85,84
		Dif.	0,00	1,27	1,26	-0,12	83,87	0,24	0,35	6,00	6,00
		Var. %	0,00	3,12	3,11	-2,43	5,08	0,58	0,87	3,33	3,33
Frame 20 37.79 N											
		Frame	Fuerza Frame	Coord. X(mm)	Coord. Y(mm)	Presión (V)	Área (mm ²)	Eje > (mm)	Eje < (mm)	Ángulo Eje >	Ángulo Eje <
		16x16	37,79	22,28	22,63	1,41	800,00	36,59	36,17	-13,88	76,12
		8x8	37,79	23,55	23,89	1,24	903,22	36,83	36,49	-4,51	85,49
		Dif.	0,00	1,27	1,26	-0,16	103,23	0,24	0,32	9,38	9,38
		Var. %	0,00	3,13	3,10	-3,22	6,25	0,59	0,79	5,21	5,21

Tabla III-11. Prueba de Cambio de Resolución con Objeto Estrella y Valores de Parámetros con Plataforma Motorizada.

Frame 2		2.01 N											
Frame	Fuerza Frame	Coord. X(mm)	Coord. Y(mm)	Presión (V)	Área (mm ²)	Eje > (mm)	Eje < (mm)	Ángulo Eje >	Ángulo Eje <				
16x16	2,01	22,62	23,05	0,22	503,22	29,85	19,27	59,37	-30,63				
8x8	2,01	23,88	24,48	0,20	541,93	30,31	21,13	62,51	-27,49				
Dif.	0,00	1,26	1,43	-0,02	38,71	0,46	1,86	3,14	3,14				
Var. %	0,00	3,10	3,51	-0,35	2,34	1,12	4,58	1,75	1,75				
Frame 4		5.95 N											
Frame	Fuerza Frame	Coord. X(mm)	Coord. Y(mm)	Presión (V)	Área (mm ²)	Eje > (mm)	Eje < (mm)	Ángulo Eje >	Ángulo Eje <				
16x16	5,95	22,39	22,52	0,57	522,58	25,71	20,68	60,27	-29,73				
8x8	5,95	23,71	23,93	0,55	541,93	26,14	22,06	60,34	-29,66				
Dif.	0,00	1,31	1,41	-0,02	19,35	0,44	1,38	0,07	0,07				
Var. %	0,00	3,23	3,46	-0,43	1,17	1,07	3,40	0,04	0,04				
Frame 6		9.87 N											
Frame	Fuerza Frame	Coord. X(mm)	Coord. Y(mm)	Presión (V)	Área (mm ²)	Eje > (mm)	Eje < (mm)	Ángulo Eje >	Ángulo Eje <				
16x16	9,87	22,38	22,29	0,88	516,13	23,94	21,23	62,65	-27,35				
8x8	9,87	23,71	23,68	0,80	567,74	24,33	22,33	59,84	-30,16				
Dif.	0,00	1,33	1,39	-0,08	51,61	0,39	1,11	2,81	2,81				
Var. %	0,00	3,26	3,43	-1,62	3,13	0,95	2,73	1,56	1,56				
Frame 11		19.78 N											
Frame	Fuerza Frame	Coord. X(mm)	Coord. Y(mm)	Presión (V)	Área (mm ²)	Eje > (mm)	Eje < (mm)	Ángulo Eje >	Ángulo Eje <				
16x16	19,78	22,45	22,11	1,35	529,03	22,83	21,57	81,22	-8,78				
8x8	19,78	23,79	23,49	1,20	593,55	23,15	22,55	-86,27	3,73				
Dif.	0,00	1,34	1,38	-0,15	64,52	0,32	0,98	12,51	12,51				
Var. %	0,00	3,29	3,40	-2,93	3,91	0,78	2,42	6,95	6,95				
Frame 16		29.76 N											
Frame	Fuerza Frame	Coord. X(mm)	Coord. Y(mm)	Presión (V)	Área (mm ²)	Eje > (mm)	Eje < (mm)	Ángulo Eje >	Ángulo Eje <				
16x16	29,76	22,37	22,06	1,57	541,93	22,83	21,74	-89,26	0,74				
8x8	29,76	23,69	23,44	1,43	593,55	23,26	22,56	-67,11	22,89				
Dif.	0,00	1,32	1,38	-0,14	51,61	0,43	0,82	22,15	22,15				
Var. %	0,00	3,26	3,40	-2,73	3,13	1,05	2,01	12,30	12,30				
Frame 20		37.78 N											
Frame	Fuerza Frame	Coord. X(mm)	Coord. Y(mm)	Presión (V)	Área (mm ²)	Eje > (mm)	Eje < (mm)	Ángulo Eje >	Ángulo Eje <				
16x16	37,78	22,33	22,05	1,65	561,29	22,76	21,84	-86,64	3,36				
8x8	37,78	23,66	23,42	1,55	593,55	23,24	22,57	-58,42	31,58				
Dif.	0,00	1,33	1,38	-0,09	32,26	0,48	0,73	28,21	28,21				
Var. %	0,00	3,26	3,39	-1,81	1,95	1,17	1,79	15,67	15,67				

Tabla III-12. Prueba de Cambio de Resolución con Objeto Abridor y Valores de Parámetros con Plataforma Motorizada.

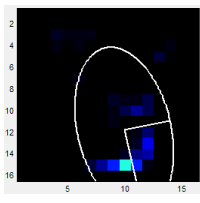
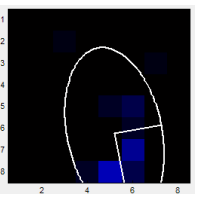
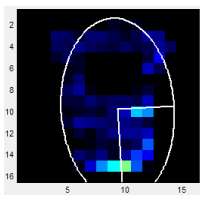
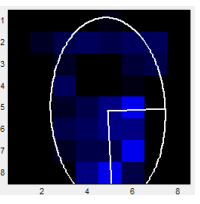
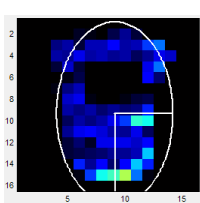
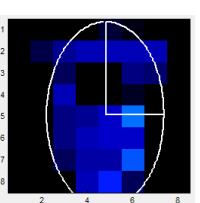
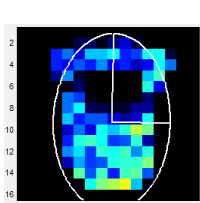
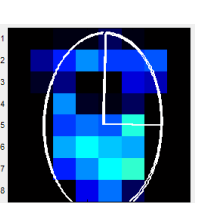
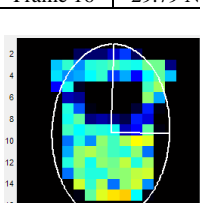
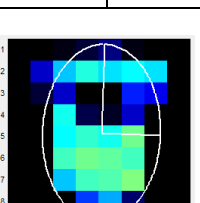
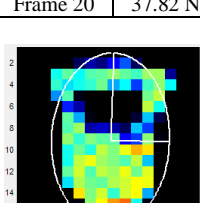
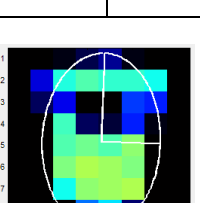
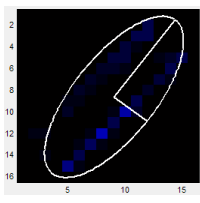
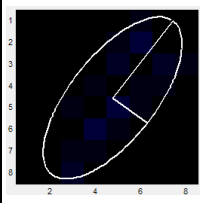
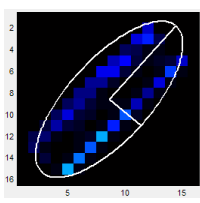
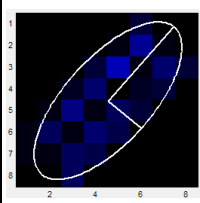
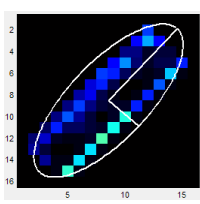
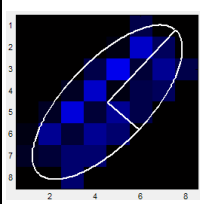
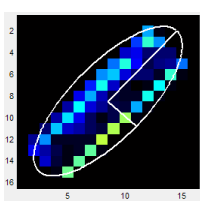
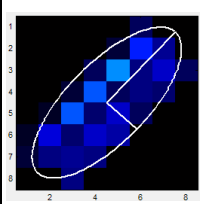
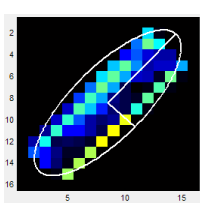
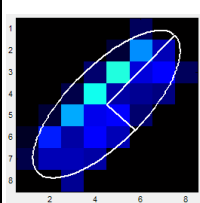
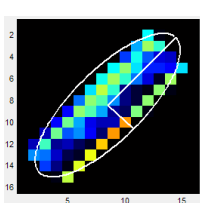
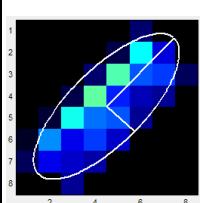
Frame	Fuerza Frame	Coord. X(mm)	Coord. Y(mm)	Presión (V)	Área (mm ²)	Eje > (mm)	Eje < (mm)	Ángulo Eje >	Ángulo Eje <		
Frame 2 2.01 N											
		Frame	Fuerza Frame	Coord. X(mm)	Coord. Y(mm)	Presión (V)	Área (mm ²)	Eje > (mm)	Eje < (mm)	Ángulo Eje >	Ángulo Eje <
		16x16	2,01	25,28	29,92	0,15	606,45	39,47	20,85	77,67	-12,33
		8x8	2,01	26,43	31,64	0,13	722,58	40,52	21,25	79,23	-10,77
		Dif.	0,00	1,15	1,72	-0,03	116,13	1,05	0,40	1,56	1,56
		Var. %	0,00	2,82	4,23	-0,51	7,03	2,57	0,97	0,87	0,87
Frame 4 5.94 N											
		Frame	Fuerza Frame	Coord. X(mm)	Coord. Y(mm)	Presión (V)	Área (mm ²)	Eje > (mm)	Eje < (mm)	Ángulo Eje >	Ángulo Eje <
		16x16	5,94	23,81	24,84	0,38	819,35	42,79	25,25	86,50	-3,50
		8x8	5,94	24,96	26,21	0,31	1006,45	43,63	25,63	87,63	-2,37
		Dif.	0,00	1,16	1,37	-0,07	187,10	0,84	0,38	1,13	1,13
		Var. %	0,00	2,85	3,37	-1,42	11,33	2,07	0,93	0,63	0,63
Frame 6 9.89 N											
		Frame	Fuerza Frame	Coord. X(mm)	Coord. Y(mm)	Presión (V)	Área (mm ²)	Eje > (mm)	Eje < (mm)	Ángulo Eje >	Ángulo Eje <
		16x16	9,89	23,15	23,63	0,61	851,61	42,82	25,95	89,85	-0,15
		8x8	9,89	24,34	24,96	0,50	1032,26	43,37	26,23	-89,61	0,39
		Dif.	0,00	1,19	1,34	-0,11	180,64	0,55	0,27	0,54	0,54
		Var. %	0,00	2,93	3,29	-2,13	10,94	1,36	0,67	0,30	0,30
Frame 11 19.84 N											
		Frame	Fuerza Frame	Coord. X(mm)	Coord. Y(mm)	Presión (V)	Área (mm ²)	Eje > (mm)	Eje < (mm)	Ángulo Eje >	Ángulo Eje <
		16x16	19,84	22,48	23,59	1,03	890,32	41,47	26,09	-88,66	1,34
		8x8	19,84	23,69	24,91	0,89	1032,26	41,88	26,26	-88,24	1,76
		Dif.	0,00	1,20	1,32	-0,14	141,94	0,41	0,17	0,42	0,42
		Var. %	0,00	2,96	3,26	-2,86	8,59	1,01	0,42	0,23	0,23
Frame 16 29.79 N											
		Frame	Fuerza Frame	Coord. X(mm)	Coord. Y(mm)	Presión (V)	Área (mm ²)	Eje > (mm)	Eje < (mm)	Ángulo Eje >	Ángulo Eje <
		16x16	29,79	22,30	23,28	1,35	903,22	41,05	26,25	-88,14	1,86
		8x8	29,79	23,51	24,60	1,15	1058,06	41,45	26,35	-87,89	2,11
		Dif.	0,00	1,22	1,32	-0,20	154,84	0,40	0,11	0,25	0,25
		Var. %	0,00	2,99	3,26	-3,96	9,38	0,99	0,26	0,14	0,14
Frame 20 37.82 N											
		Frame	Fuerza Frame	Coord. X(mm)	Coord. Y(mm)	Presión (V)	Área (mm ²)	Eje > (mm)	Eje < (mm)	Ángulo Eje >	Ángulo Eje <
		16x16	37,82	22,21	23,15	1,54	903,22	40,83	26,32	-88,12	1,88
		8x8	37,82	23,44	24,46	1,31	1058,06	41,24	26,41	-87,93	2,07
		Dif.	0,00	1,23	1,31	-0,23	154,84	0,41	0,09	0,19	0,19
		Var. %	0,00	3,03	3,23	-4,52	9,38	1,02	0,21	0,11	0,11

Tabla III-13. Prueba de Cambio de Resolución con Objeto Abridor en Diagonal y Valores de Parámetros con Plataforma Motorizada.

Frame	Fuerza Frame	Coord. X(mm)	Coord. Y(mm)	Presión (V)	Área (mm ²)	Eje > (mm)	Eje < (mm)	Ángulo Eje >	Ángulo Eje <
Frame 2 2.02 N									
Frame	Fuerza Frame	Coord. X(mm)	Coord. Y(mm)	Presión (V)	Área (mm ²)	Eje > (mm)	Eje < (mm)	Ángulo Eje >	Ángulo Eje <
16x16	2,02	24,79	20,54	0,14	800,00	43,30	33,57	-38,44	51,56
8x8	2,02	26,16	21,69	0,13	851,61	43,54	34,20	-37,75	52,25
Dif.	0,00	1,37	1,15	-0,01	51,61	0,24	0,63	0,69	0,69
Var. %	0,00	3,38	2,83	-0,18	3,13	0,60	1,55	0,38	0,38
Frame 4 5.98 N									
Frame	Fuerza Frame	Coord. X(mm)	Coord. Y(mm)	Presión (V)	Área (mm ²)	Eje > (mm)	Eje < (mm)	Ángulo Eje >	Ángulo Eje <
16x16	5,98	22,52	21,70	0,36	877,42	42,40	29,79	-33,41	56,59
8x8	5,98	23,84	22,88	0,35	903,22	42,62	30,12	-33,73	56,27
Dif.	0,00	1,32	1,19	-0,01	25,81	0,23	0,33	0,32	0,32
Var. %	0,00	3,26	2,92	-0,23	1,56	0,56	0,81	0,18	0,18
Frame 6 9.86 N									
Frame	Fuerza Frame	Coord. X(mm)	Coord. Y(mm)	Presión (V)	Área (mm ²)	Eje > (mm)	Eje < (mm)	Ángulo Eje >	Ángulo Eje <
16x16	9,86	21,86	22,09	0,57	896,77	41,69	28,58	-34,31	55,69
8x8	9,86	23,14	23,28	0,54	954,84	42,07	28,75	-34,69	55,31
Dif.	0,00	1,28	1,18	-0,04	58,06	0,39	0,17	0,38	0,38
Var. %	0,00	3,15	2,92	-0,70	3,52	0,95	0,43	0,21	0,21
Frame 11 19.81 N									
Frame	Fuerza Frame	Coord. X(mm)	Coord. Y(mm)	Presión (V)	Área (mm ²)	Eje > (mm)	Eje < (mm)	Ángulo Eje >	Ángulo Eje <
16x16	19,81	21,60	22,39	1,02	896,77	41,07	27,41	-38,90	51,10
8x8	19,81	22,86	23,59	0,95	954,84	41,36	27,58	-38,78	51,22
Dif.	0,00	1,26	1,20	-0,06	58,06	0,29	0,17	0,12	0,12
Var. %	0,00	3,10	2,96	-1,25	3,52	0,70	0,42	0,07	0,07
Frame 16 29.81 N									
Frame	Fuerza Frame	Coord. X(mm)	Coord. Y(mm)	Presión (V)	Área (mm ²)	Eje > (mm)	Eje < (mm)	Ángulo Eje >	Ángulo Eje <
16x16	29,81	21,68	22,44	1,36	896,77	40,91	26,95	-40,29	49,71
8x8	29,81	22,95	23,64	1,24	980,64	41,17	27,19	-40,19	49,81
Dif.	0,00	1,27	1,20	-0,12	83,87	0,26	0,24	0,10	0,10
Var. %	0,00	3,12	2,95	-2,32	5,08	0,64	0,59	0,06	0,06
Frame 20 37.79 N									
Frame	Fuerza Frame	Coord. X(mm)	Coord. Y(mm)	Presión (V)	Área (mm ²)	Eje > (mm)	Eje < (mm)	Ángulo Eje >	Ángulo Eje <
16x16	37,79	21,69	22,43	1,50	916,13	40,78	26,73	-40,92	49,08
8x8	37,79	22,97	23,63	1,40	980,64	41,03	26,99	-40,88	49,12
Dif.	0,00	1,28	1,20	-0,10	64,52	0,24	0,26	0,04	0,04
Var. %	0,00	3,14	2,95	-1,98	3,91	0,60	0,64	0,02	0,02

Tabla III-14. Prueba de Cambio de Resolución con Objeto Barra y Valores de Parámetros con Plataforma Motorizada.

Frame	Fuerza Frame	Coord. X(mm)	Coord. Y(mm)	Presión (V)	Área (mm ²)	Eje > (mm)	Eje < (mm)	Ángulo Eje >	Ángulo Eje <		
Frame 2 2.05 N											
		Frame	Fuerza Frame	Coord. X(mm)	Coord. Y(mm)	Presión (V)	Área (mm ²)	Eje > (mm)	Eje < (mm)	Ángulo Eje >	Ángulo Eje <
		16x16	2,05	23,00	21,95	0,11	690,32	45,28	18,53	-53,00	37,00
		8x8	2,05	24,21	23,18	0,10	800,00	44,91	19,39	-53,31	36,69
		Dif.	0,00	1,21	1,23	-0,02	109,68	-0,37	0,86	0,31	0,31
		Var. %	0,00	2,97	3,03	-0,32	6,64	-0,92	2,10	0,17	0,17
Frame 4 5.99 N											
		Frame	Fuerza Frame	Coord. X(mm)	Coord. Y(mm)	Presión (V)	Área (mm ²)	Eje > (mm)	Eje < (mm)	Ángulo Eje >	Ángulo Eje <
		16x16	5,99	21,92	21,80	0,33	696,77	45,55	18,62	-49,39	40,61
		8x8	5,99	23,16	23,13	0,29	800,00	45,38	19,64	-49,50	40,50
		Dif.	0,00	1,24	1,33	-0,04	103,23	-0,17	1,02	0,11	0,11
		Var. %	0,00	3,05	3,26	-0,87	6,25	-0,41	2,50	0,06	0,06
Frame 6 9.93 N											
		Frame	Fuerza Frame	Coord. X(mm)	Coord. Y(mm)	Presión (V)	Área (mm ²)	Eje > (mm)	Eje < (mm)	Ángulo Eje >	Ángulo Eje <
		16x16	9,94	21,78	21,64	0,51	677,42	45,56	17,97	-48,00	42,00
		8x8	9,94	23,03	23,01	0,43	800,00	45,39	18,99	-47,95	42,05
		Dif.	0,00	1,25	1,37	-0,08	122,58	-0,17	1,02	0,04	0,04
		Var. %	0,00	3,08	3,36	-1,58	7,42	-0,41	2,50	0,02	0,02
Frame 9 15.94 N											
		Frame	Fuerza Frame	Coord. X(mm)	Coord. Y(mm)	Presión (V)	Área (mm ²)	Eje > (mm)	Eje < (mm)	Ángulo Eje >	Ángulo Eje <
		16x16	15,95	21,67	21,53	0,74	670,97	45,08	17,17	-47,15	42,85
		8x8	15,95	22,92	22,88	0,62	800,00	45,01	18,18	-47,21	42,79
		Dif.	0,00	1,25	1,35	-0,12	129,03	-0,07	1,02	0,06	0,06
		Var. %	0,00	3,07	3,33	-2,38	7,81	-0,16	2,51	0,03	0,03
Frame 12 21.87 N											
		Frame	Fuerza Frame	Coord. X(mm)	Coord. Y(mm)	Presión (V)	Área (mm ²)	Eje > (mm)	Eje < (mm)	Ángulo Eje >	Ángulo Eje <
		16x16	21,87	21,61	21,45	0,93	677,42	44,37	16,47	-46,64	43,36
		8x8	21,87	22,86	22,78	0,79	800,00	44,35	17,50	-46,83	43,17
		Dif.	0,00	1,25	1,33	-0,14	122,58	-0,02	1,04	0,19	0,19
		Var. %	0,00	3,07	3,28	-2,87	7,42	-0,04	2,55	0,10	0,10
Frame 15 27.89 N											
		Frame	Fuerza Frame	Coord. X(mm)	Coord. Y(mm)	Presión (V)	Área (mm ²)	Eje > (mm)	Eje < (mm)	Ángulo Eje >	Ángulo Eje <
		16x16	27,89	21,58	21,39	1,12	677,42	43,74	15,96	-46,30	43,70
		8x8	27,89	22,84	22,72	0,95	800,00	43,79	17,02	-46,51	43,49
		Dif.	0,00	1,26	1,32	-0,17	122,58	0,04	1,06	0,22	0,22
		Var. %	0,00	3,10	3,25	-3,44	7,42	0,10	2,60	0,12	0,12

Bibliografía

Al Janaideh, M., Rakheja, S. y Su, C.-Y. 2009. A Generalized Prandtl–Ishlinskii Model for Characterizing the Hysteresis and Saturation Nonlinearities of Smart Actuators. *Smart Materials and Structures*, vol. 18, no. 4, pp. 045001. ISSN 0964-1726, 1361-665X. DOI 10.1088/0964-1726/18/4/045001.

Al Janaideh, M., Rakheja, S. y Su, C.-Y. 2011. An Analytical Generalized Prandtl–Ishlinskii Model Inversion for Hysteresis Compensation in Micropositioning Control. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 16, no. 4, pp. 734-744. ISSN 1083-4435. DOI 10.1109/TMECH.2010.2052366.

Ando, S. y Shinoda, H. 1995. Ultrasonic Emission Tactile Sensing. *IEEE Control Systems*, vol. 15, no. 1, pp. 61-69. ISSN 1066-033X. DOI 10.1109/37.341866.

ATI Industrial Automation 2015. ATI Force / Torque Sensor: Nano17. (En línea). [Consultado: 16 abril 2015]. Disponible en: http://www.atia.com/products/ft/ft_models.aspx?id=Nano17.

Banks, H.T. y Smith, R.C. 2000. Hysteresis Modeling in Smart Material Systems. *Journal of Applied Mechanics and Engineering*, vol. 5, no. 1, pp. 31-45. ISSN 1425-1655.

Barber, J.R. 2013. Incremental Stiffness and Electrical Contact Conductance in the Contact of Rough Finite Bodies. *Physical Review E*, vol. 87, no. 1. ISSN 1539-3755, 1550-2376. DOI 10.1103/PhysRevE.87.013203.

Barrett Technology, Inc. 2015. BarrettHand. (En línea). [Consultado: 15 abril 2015]. Disponible en: <http://www.barrett.com/robot/products-hand.htm>.

Bashash, S. y Jalili, N. 2008. A Polynomial-Based Linear Mapping Strategy for Feedforward Compensation of Hysteresis in Piezoelectric Actuators. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 130, no. 3, pp. 031008. ISSN 00220434. DOI 10.1115/1.2907372.

Beccai, L., Roccella, S., Ascari, L., Valdastrì, P., Sieber, A., Carrozza, M.C. y Dario, P. 2008. Development and Experimental Analysis of a Soft Compliant Tactile Microsensor for Anthropomorphic Artificial Hand. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 13, no. 2, pp. 158-168. ISSN 1083-4435. DOI 10.1109/TMECH.2008.918483.

Beebe, D.J., Hsieh, A.S., Denton, D.D. y Radwin, R.G. 1995. A Silicon Force Sensor for Robotics and Medicine. *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 50, no. 1–2, pp. 55-65. ISSN 0924-4247. DOI 10.1016/0924-4247(96)80085-9.

Bekhti, R., Duchaine, V. y Cardou, P. 2014. Miniature Capacitive Three-Axis Force Sensor. *2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2014)*. Chicago, IL, USA: s.n., pp. 3939-3946.

Berger, A.D. y Khosla, P.K. 1991. Using Tactile Data for Real-Time Feedback. *The International Journal of Robotics Research*, vol. 10, no. 2, pp. 88-102. ISSN 0278-3649, 1741-3176. DOI 10.1177/027836499101000202.

Bjorkman, M., Bekiroglu, Y., Hogman, V. y Kragic, D. 2013. Enhancing Visual Perception of Shape through Tactile Glances. *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2013 IEEE/RSJ International Conference on*. S.l.: IEEE, pp. 3180–3186.

Brokate, M. y Sprekels, J. 1996. *Hysteresis and Phase Transitions*. New York, NY: Springer New York. Applied Mathematical Sciences. ISBN 978-1-4612-8478-9.

Burden, R.L. 2011. *Analisis Numérico*. Edición: 9 Rev ed. México: Cengage Learning Editores S.a. De C.V. ISBN 978-607-481-663-1.

Cannata, G. y Maggiali, M. 2005. An Embedded Tactile and Force Sensor for Robotic Manipulation and Grasping. *2005 5th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*. Tsukuba, Japan: s.n., pp. 80-85.

Cannata, G. y Maggiali, M. 2006. Processing of Tactile/Force Measurements for a Fully Embedded Sensor. *2006 IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems*. S.l.: s.n., pp. 160-166.

Castellanos-Ramos, J., Navas-González, R., Fernández, I. y Vidal-Verdú, F. 2015. Insights into the Mechanical Behaviour of a Layered Flexible Tactile Sensor. *Sensors*, vol. 15, no. 10, pp. 25433-25462. DOI 10.3390/s151025433.

Castellanos-Ramos, J., Navas-González, R., Macicior, H., Sikora, T., Ochoteco, E. y Vidal-Verdú, F. 2010. Tactile Sensors based on Conductive Polymers. *Microsystem Technologies*, vol. 16, no. 5, pp. 765-776. ISSN 0946-7076, 1432-1858. DOI 10.1007/s00542-009-0958-3.

Chan, C.-H. y Liu, G. 2007. Hysteresis Identification and Compensation using a Genetic Algorithm with Adaptive Search Space. *Mechatronics*, vol. 17, no. 7, pp. 391-402. ISSN 0957-4158. DOI 10.1016/j.mechatronics.2007.04.006.

Chen, N., Zhang, H. y Rink, R. 1995. Edge Tracking using Tactile Servo. *1995 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems 95. «Human Robot Interaction and Cooperative Robots», Proceedings*. S.l.: s.n., pp. 84-89 vol.2.

Cheung, E. y Lumelsky, V. 1992. A Sensitive Skin System for Motion Control of Robot Arm Manipulators. *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 10, no. 1, pp. 9-32. ISSN 0921-8890. DOI 10.1016/0921-8890(92)90012-N.

Cheung, E. y Lumelsky, V.J. 1989. Proximity Sensing in Robot Manipulator Motion Planning: System and Implementation Issues. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 5, no. 6, pp. 740-751. ISSN 1042-296X. DOI 10.1109/70.88096.

Cidetec 2015. Cidetec. (En línea). [Consultado: 9 septiembre 2015]. Disponible en: <http://www.cidetec.es/cas/index.aspx>.

Cofer, R.C. y Harding, B.F. 2005. *Rapid System Prototyping with FPGAs: Accelerating the Design Process*. S.l.: Newnes. ISBN 0-7506-7866-6.

Croft, D., Shedd, G. y Devasia, S. 2000. Creep, Hysteresis, and Vibration Compensation for Piezoactuators: Atomic Force Microscopy Application. *American Control Conference, 2000. Proceedings of the 2000*. S.l.: s.n., pp. 2123-2128 vol.3.

Cutkosky, M.R., Howe, R.D. y Provancher, W.R. 2007. Force and Tactile Sensors. *Handbook of Robotics*. S.l.: s.n.,

Dahiya, R.S., Metta, G., Cannata, G. y Valle, M. 2011. Guest Editorial Special Issue on Robotic Sense of Touch. *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 27, no. 3, pp. 385-388. ISSN 1552-3098. DOI 10.1109/TRO.2011.2155830.

Dahiya, R.S., Metta, G., Valle, M. y Sandini, G. 2010. Tactile Sensing-From Humans to Humanoids. *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 26, no. 1, pp. 1-20. ISSN 1552-3098. DOI 10.1109/TRO.2009.2033627.

Dahiya, R.S., Mittendorfer, P., Valle, M., Cheng, G. y Lumelsky, V.J. 2013. Directions Toward Effective Utilization of Tactile Skin: A Review. *IEEE Sensors Journal*, vol. 13, no. 11, pp. 4121-4138. ISSN 1530-437X. DOI 10.1109/JSEN.2013.2279056.

Dahiya, R.S., Valle, M., Metta, G. y Lorenzelli, L. 2007. POSFET Based Tactile Sensor Arrays. *14th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems, 2007. ICECS 2007*. S.l.: s.n., pp. 1075-1078.

D'Alessio, T. 1999. Measurement Errors in the Scanning of Piezoresistive Sensors Arrays. *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 72, no. 1, pp. 71-76. ISSN 0924-4247. DOI 10.1016/S0924-4247(98)00204-0.

Dario, P. y De Rossi, D. 1985. Tactile Sensors and the Gripping Challenge: Increasing the Performance of Sensors over a Wide Range of Force is a First Step toward Robotry that can Hold and Manipulate Objects as Humans Do. *IEEE Spectrum*, vol. 22, no. 8, pp. 46-53. ISSN 0018-9235. DOI 10.1109/MSPEC.1985.6370785.

Darwin, C.R. 1859. *On the Origin of Species by Means of Natural Selection, or the Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life*. London: John Murray.

De Rossi, D., Carpi, F. y Scilingo, E.P. 2005. Polymer based Interfaces as Bioinspired 'Smart Skins'. *Advances in Colloid and Interface Science*, vol. 116, no. 1-3, pp. 165-178. ISSN 0001-8686. DOI 10.1016/j.cis.2005.05.002.

De Rossi, D. y Scilingo, E.P. 2006. *Encyclopedia of Sensors*. S.I.: American Scientific Publishers.

De Souza, R.J. y Wise, K.D. 1997. A Very High Density Bulk Micromachined Capacitive Tactile Imager. , *1997 International Conference on Solid State Sensors and Actuators, 1997. TRANSDUCERS '97 Chicago*. S.I.: s.n., pp. 1473-1476 vol.2.

Díaz, J., Ros, E., Mota, S. y Carrillo, R. 2008. Local Image Phase, Energy and Orientation Extraction using FPGAs. *International Journal of Electronics*, vol. 95, no. 7, pp. 743-760. ISSN 0020-7217, 1362-3060. DOI 10.1080/00207210801941200.

Drimus, A., Kootstra, G., Bilberg, A. y Kragic, D. 2011. Classification of Rigid and Deformable Objects using a Novel Tactile Sensor. *2011 15th International Conference on Advanced Robotics (ICAR)*. Tallinn, Estonia: s.n., pp. 427-434.

Drimus, A., Kootstra, G., Bilberg, A. y Kragic, D. 2014. Design of a Flexible Tactile Sensor for Classification of Rigid and Deformable Objects. *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 62, no. 1, pp. 3-15. ISSN 09218890. DOI 10.1016/j.robot.2012.07.021.

Drimus, A., Petersen, M.B. y Bilberg, A. 2012. Object Texture Recognition by Dynamic Tactile Sensing using Active Exploration. *2012 IEEE RO-MAN*. París, France: s.n., pp. 277-283.

Escalda Navarro, S., Gorges, N., Worn, H., Schill, J., Asfour, T. y Dillmann, R. 2012. Haptic Object Recognition for Multi-fingered Robot Hands. *2012 IEEE Haptics Symposium (HAPTICS)*. Vancouver, BC, Canada: s.n., pp. 497-502.

Flanagan, J.R., Bowman, M.C. y Johansson, R.S. 2006. Control Strategies in Object Manipulation Tasks. *Current Opinion in Neurobiology*, vol. 16, no. 6, pp. 650-659. ISSN 09594388. DOI 10.1016/j.conb.2006.10.005.

Göger, D., Gorges, N. y Worn, H. 2009. Tactile Sensing for an Anthropomorphic Robotic Hand: Hardware and Signal Processing. *IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2009. ICRA '09*. S.I.: s.n., pp. 895-901.

Göger, D., Weiss, K., Burghart, C. y Wörn, H. 2006. Sensitive Skin for a Humanoid Robot. *Proceedings of the 2006 International Conference on Human-Centered Robotic Systems*. Munich, Germany, 6 – 7 October 2006: s.n.,

Goldberg, D.E. 1989. *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. 1st. Boston, MA, USA: Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc. ISBN 0-201-15767-5.

Gorges, N., Navarro, S.E., Göger, D. y Worn, H. 2010. Haptic Object Recognition using Passive Joints and Haptic Key Features. *2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. S.I.: s.n., pp. 2349-2355.

Gorges, N., Navarro, S.E. y Worn, H. 2014. Analysis of Tactile Imprints for Multi-fingered Robot Hands. *2014 Second RSI/ISM International Conference on Robotics and Mechatronics (ICRoM)*. S.I.: s.n., pp. 779-784.

Grzyb, B.J., Chinellato, E., Morales, A. y Del Pobil, A.P. 2009. A 3D Grasping System based on Multimodal Visual and Tactile Processing. *Industrial Robot: An International Journal*, vol. 36, no. 4, pp. 365–369.

Gu, G.-Y., Zhu, L.-M. y Su, C.-Y. 2014. Modeling and Compensation of Asymmetric Hysteresis Nonlinearity for Piezoceramic Actuators With a Modified Prandtl-Ishlinskii Model. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, no. 3, pp. 1583-1595. ISSN 0278-0046. DOI 10.1109/TIE.2013.2257153.

Hartmann, J.M., Rudert, M.J., Pedersen, D.R., Baer, T.E., Goreham-Voss, C.M. y Brown, T.D. 2009. Compliance-dependent Load Allocation between Sensing Versus Non-sensing Portions of a Sheet-array Contact Stress Sensor. *The Iowa orthopaedic journal*, vol. 29, pp. 43.

Hellard, G. y Russell, R.A. 2006. A Tactile Sensor Array that also Grasps Objects. *Proceedings of the Australasian conference on robotics and automation*. S.l.: s.n., pp. 1-6.

Heo, J.-S., Chung, J.-H. y Lee, J.-J. 2006. Tactile Sensor Arrays using Fiber Bragg Grating Sensors. *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 126, no. 2, pp. 312-327. ISSN 0924-4247. DOI 10.1016/j.sna.2005.10.048.

Holland, J.H. 1975. *Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence*. S.l.: University of Michigan Press. ISBN 978-0-472-08460-9.

Horii, T., Nagai, Y., Natale, L., Giovannini, F., Metta, G. y Asada, M. 2014. Compensation for Tactile Hysteresis using Gaussian Process with Sensory Markov Property. *Humanoid Robots (Humanoids), 2014 14th IEEE-RAS International Conference on*. S.l.: IEEE, pp. 993–998.

Howe, R.D. 1994. Tactile Sensing and Control of Robotic Manipulation. *Journal of Advanced Robotics*, vol. 8, no. 3, pp. 245-261.

Howe, R.D. y Cutkosky, M.R. 1990. Integrating Tactile Sensing with Control for Dexterous Manipulation. *Proceedings of the IEEE International Workshop on Intelligent Motion Control, 1990*. S.l.: s.n.,

Howe, R.D. y Cutkosky, M.R. 1993. Dynamic Tactile Sensing: Perception of Fine Surface Features with Stress Rate Sensing. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 9, no. 2, pp. 140-151. ISSN 1042-296X. DOI 10.1109/70.238278.

Huang, Y.-M., Tsai, N.-C. y Lai, J.-Y. 2010. Fabrication and Performance Assessment of a Novel Stress Sensor Applied for Micro-robotics. *Microsystem Technologies*, vol. 16, no. 10, pp. 1719-1725. ISSN 0946-7076, 1432-1858. DOI 10.1007/s00542-010-1091-z.

Interlink Electronics 2015. Force Sensors. (En línea). [Consultado: 1 noviembre 2015]. Disponible en: <http://www.interlinkelectronics.com/standard-products.php>.

Ito, K., Saen, M. y Osada, K. 2012. Scalable Robotic-hand Control System based on a Hierarchical Multi-processor Architecture Adopting a Large Number of Tactile Sensors. *2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. S.l.: s.n., pp. 14-19.

Jacobsen, S.C., McGammon, I.D., Biggers, K.B. y Phillips, R.P. 1988. Design of Tactile Sensing Systems for Dextrous Manipulators. *Control Systems Magazine, IEEE*, vol. 8, no. 1, pp. 3–13.

Jayawant, B.V. 1989. Tactile Sensing in Robotics. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, vol. 22, no. 9, pp. 684. ISSN 0022-3735. DOI 10.1088/0022-3735/22/9/002.

Jiang, H., Ji, H., Qiu, J. y Chen, Y. 2010. A Modified Prandtl-Ishlinskii Model for Modeling Asymmetric Hysteresis of Piezoelectric Actuators. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 57, no. 5, pp. 1200-1210. ISSN 0885-3010. DOI 10.1109/TUFFC.2010.1533.

Jung, H., Shim, J.Y. y Gweon, D. 2000. New Open-loop Actuating Method of Piezoelectric Actuators for Removing Hysteresis and Creep. *Review of Scientific Instruments*, vol. 71, no. 9, pp. 3436. ISSN 00346748. DOI 10.1063/1.1287627.

Kane, B.J., Cutkosky, M.R. y Kovacs, G.T.A. 2000. A Traction Stress Sensor Array for use in High-resolution Robotic Tactile Imaging. *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 9, no. 4, pp. 425-434. ISSN 1057-7157. DOI 10.1109/84.896763.

Kappassov, Z., Corrales, J.-A. y Perdereau, V. 2015. Tactile Sensing in Dexterous Robot Hands — Review. *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 74, pp. 195-220. ISSN 09218890. DOI 10.1016/j.robot.2015.07.015.

Kaynov, D. 2010. *Open Motion Control Architecture for Humanoid Robots*. S.l.: LAP Lambert Academic Publishing: Saarbrücken, Germany,. ISBN 978-3-8383-2985-7.

Kim, K., Lee, K.R., Lee, D.S., Cho, N.-K., Kim, W.H., Park, K.-B., Park, H.-D., Kim, Y.K., Park, Y.-K. y Kim, J.-H. 2006. A Silicon-based Flexible Tactile Sensor for Ubiquitous Robot Companion Applications. *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 34, no. 1, pp. 399. ISSN 1742-6596. DOI 10.1088/1742-6596/34/1/065.

Krasnosel'skii, M.A. y Pokrovskii, A.V. 1989. *Systems with Hysteresis*. Softcover reprint of the original 1st ed. 1989 edition. Berlin, Heidelberg: Springer. ISBN 978-3-642-64782-6.

Kuhnen, K. 2003. Modeling, Identification and Compensation of Complex Hysteretic Nonlinearities: A Modified Prandtl-Ishlinskii Approach. *European journal of control*, vol. 9, no. 4, pp. 407–418.

Kuhnen, K. y Janocha, H. 2001. Inverse Feedforward Controller for Complex Hysteretic Nonlinearities in Smart-material Systems. *Control and intelligent systems*, vol. 29, no. 3, pp. 74-83. ISSN 1480-1752.

Lawrence, S., Giles, C.L. y Tsoi, A.C. 1997. Lessons in Neural Network Training: Overfitting may be Harder than Expected. *Proceedings of the Fourteenth National Conference on Artificial Intelligence AAAI/IAAI*. Menlo Park, California: s.n., pp. 540–545.

Leang, K.K., Zou, Q. y Devasia, S. 2009. Feedforward Control of Piezoactuators in Atomic Force Microscope Systems. *IEEE Control Systems*, vol. 29, no. 1, pp. 70-82. ISSN 1066-033X. DOI 10.1109/MCS.2008.930922.

Lee, H.-K., Chang, S.-I. y Yoon, E. 2006. A Capacitive Proximity Sensor in Dual Implementation with Tactile Imaging Capability on a Single Flexible Platform For Robot Assistant Applications. *19th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, 2006. MEMS 2006 Istanbul*. S.l.: s.n., pp. 606-609.

Lee, M.H. 2000. Tactile Sensing: New Directions, New Challenges. *The International Journal of Robotics Research*, vol. 19, no. 7, pp. 636-643. ISSN 0278-3649, 1741-3176. DOI 10.1177/027836490001900702.

Lee, M.H. y Nicholls, H.R. 1999. Review Article Tactile Sensing for Mechatronics—A State of the Art Survey. *Mechatronics*, vol. 9, no. 1, pp. 1–31.

Lining, S., Changhai, R., Weibin, R., Ligu, C. y Minxiu, K. 2004. Tracking Control of Piezoelectric Actuator based on a New Mathematical Model. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 14, no. 11, pp. 1439. ISSN 0960-1317. DOI 10.1088/0960-1317/14/11/001.

Li, Q., Chen, W., Wang, Y., Liu, S. y Jia, J. 2011. Parameter Identification for PEM Fuel-Cell Mechanism Model Based on Effective Informed Adaptive Particle Swarm Optimization. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 6, pp. 2410-2419. ISSN 0278-0046. DOI 10.1109/TIE.2010.2060456.

Liu, H., Greco, J., Song, X., Bimbo, J., Seneviratne, L. y Althoefer, K. 2012. Tactile Image based Contact Shape Recognition using Neural Network. *2012 IEEE Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI)*. S.l.: s.n., pp. 138-143.

Liu, H., Meusel, P. y Hirzinger, G. 1995. A Tactile Sensing System for the DLR Three-finger Robot Hand. *Conference: ISMCR'95, 4. Int. Symposium on Measurement and Control in Robotics*. Smolenice Castle, Slovakia: s.n., pp. 91-96.

Liu, H., Zhang, Y.-F., Liu, Y.-W. y Jin, M.-H. 2010. Measurement Errors in the Scanning of Resistive Sensor Arrays. *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 163, no. 1, pp. 198-204. ISSN 0924-4247. DOI 10.1016/j.sna.2010.08.004.

Liu, L., Tan, K.K., Teo, C.S., Chen, S.-L. y Lee, T.H. 2013. Development of an Approach Toward Comprehensive Identification of Hysteretic Dynamics in Piezoelectric Actuators. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 21, no. 5, pp. 1834-1845. ISSN 1063-6536. DOI 10.1109/TCST.2012.2200896.

- Li, Z., Hsu, P. y Sastry, S. 1989. Grasping and Coordinated Manipulation by a Multifingered Robot Hand. *The International Journal of Robotics Research*, vol. 8, no. 4, pp. 33-50. ISSN 0278-3649, 1741-3176. DOI 10.1177/027836498900800402.
- Li, Z. y Yang, C. 2012. Neural-Adaptive Output Feedback Control of a Class of Transportation Vehicles Based on Wheeled Inverted Pendulum Models. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 20, no. 6, pp. 1583-1591. ISSN 1063-6536. DOI 10.1109/TCST.2011.2168224.
- Lumelsky, V.J. 2005. *Sensing, Intelligence, Motion : How Robots and Humans Move in an Unstructured World*. 1 edition. Hoboken, NJ: Wiley-Interscience. ISBN 978-0-471-70740-0.
- Madelung, E. 1905. Über Magnetisierung durch Schnell Verlaufende Ströme und die Wirkungsweise des Rutherford-Marconischen Magnetdetektors. *Annalen der Physik*, vol. 17, pp. 861-890.
- Maheshwari, V. y Saraf, R. 2008. Tactile Devices To Sense Touch on a Par with a Human Finger. *Angewandte Chemie International Edition*, vol. 47, no. 41, pp. 7808-7826. ISSN 1521-3773. DOI 10.1002/anie.200703693.
- Maldonado-Lopez, R., Vidal-Verdu, F., Linan, G. y Rodriguez-Vazquez, A. 2009. Integrated Circuitry to Detect Slippage Inspired by Human Skin and Artificial Retinas. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 56, no. 8, pp. 1554-1565. ISSN 1549-8328. DOI 10.1109/TCSI.2008.2008290.
- Marian, R.M., Luong, L.H.S. y Abhary, K. 2006. A Genetic Algorithm for the Optimisation of Assembly Sequences. *Computers & Industrial Engineering*, vol. 50, no. 4, pp. 503-527. ISSN 03608352. DOI 10.1016/j.cie.2005.07.007.
- Mayergoyz, I.D. 1991. *Mathematical Models of Hysteresis*. New York, NY: Springer New York. ISBN 978-1-4612-7767-5.
- Misiewicz, P.A., Blackburn, K., Richards, T.E., Brighton, J.L. y Godwin, R.J. 2015. The Evaluation and Calibration of Pressure Mapping System for the Measurement of the Pressure Distribution of Agricultural Tyres. *Biosystems Engineering*, vol. 130, pp. 81-91. ISSN 15375110. DOI 10.1016/j.biosystemseng.2014.12.006.
- Mokaberi, B. y Requicha, A.A.G. 2008. Compensation of Scanner Creep and Hysteresis for AFM Nanomanipulation. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 5, no. 2, pp. 197-206. ISSN 1545-5955. DOI 10.1109/TASE.2007.895008.
- Montagu, A. 2004. *El Tacto: La Importancia de la Piel en las Relaciones Humanas*. S.l.: Paidós Iberica. ISBN 978-84-493-1647-0.
- Mukai, T., Onishi, M., Odashima, T., Hirano, S. y Luo, Z. 2008. Development of the Tactile Sensor System of a Human-Interactive Robot. *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 24, no. 2, pp. 505-512. ISSN 1552-3098. DOI 10.1109/TRO.2008.917006.

Mukundan, R. y Ramakrishnan, K.R. 1998. *Moment Functions in Image Analysis: Theory and Applications*. Singapore; River Edge, NJ: World Scientific Pub Co Inc. ISBN 978-981-02-3524-6.

Namiki, A. y Ishikawa, M. 1996. Optimal Grasping using Visual and Tactile Feedback. *Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems, 1996. IEEE/SICE/RSJ International Conference on*. S.l.: IEEE, pp. 589–596.

National Instruments 2015. NI USB-6259 BNC. (En línea). [Consultado: 11 septiembre 2015]. Disponible en: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/209150>.

Nicholls, H.R. y Lee, M.H. 1989. A Survey of Robot Tactile Sensing Technology. *The International Journal of Robotics Research*, vol. 8, no. 3, pp. 3-30. ISSN 0278-3649, 1741-3176. DOI 10.1177/027836498900800301.

Oballe-Peinado, Ó., Castellanos-Ramos, J., Hidalgo-López, J.A. y Vidal-Verdú, F. 2009. Direct Interfaces for Smart Skins based on FPGAs. En: Á.B. Rodríguez-Vázquez (ed.), *SPIE Proceedings*. S.l.: s.n., pp. 73650C-73650C-10.

Oballe-Peinado, O., Hidalgo-Lopez, J.A., Sanchez-Duran, J.A., Castellanos-Ramos, J. y Vidal-Verdu, F. 2012. Architecture of a Tactile Sensor Suite for Artificial Hands based on FPGAs. *2012 4th IEEE RAS EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob)*. S.l.: s.n., pp. 112-117.

Oballe-Peinado, Ó., Vidal-Verdú, F., Sánchez-Durán, J.A., Castellanos-Ramos, J. y Hidalgo-López, J.A. 2015. Smart Capture Modules for Direct Sensor-to-FPGA Interfaces. *Sensors*, vol. 15, no. 12, pp. 31762-31780. DOI 10.3390/s151229878.

Ochoteco, E., Pomposo, J.A., Sikora, T., Vidal, F., Martinez, F., Obieta, G. y Grande, H. 2008. All-plastic Distributed Pressure Sensors: Taylor-made Performance by Electroactive Materials Design. *Microsystem Technologies*, vol. 14, no. 8, pp. 1089-1097. ISSN 0946-7076, 1432-1858. DOI 10.1007/s00542-007-0453-7.

Pallás Areny, R. 2004. *Sensores y Acondicionadores de Señal*. S.l.: Marcombo. ISBN 978-84-267-1344-5.

Papaioannou, G., Protopappas, V.C., Panagiotis, T., Mitrogiannis, C., Nianios, G., Tashman, S. y Papaioannou, G. 2008. A New Method for Pressure Sensor Equilibration and Conditioning. *Brazilian Journal of Biomotricity*, vol. 2, no. 3, pp. 176–195.

Paschen, U., Leineweber, M., Amelung, J., Schmidt, M. y Zimmer, G. 1998. A Novel Tactile Sensor System for Heavy-load Applications based on an Integrated Capacitive Pressure Sensor. *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 68, no. 1–3, pp. 294-298. ISSN 0924-4247. DOI 10.1016/S0924-4247(98)00021-1.

Platt, R., Fagg, A.H. y Grupen, R.A. 2010. Null-Space Grasp Control: Theory and Experiments. *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 26, no. 2, pp. 282-295. ISSN 1552-3098. DOI 10.1109/TRO.2010.2042754.

Pneumax 2015. Regulador de Presión Proporcional - Serie 1700. .

PPS 2015. Capturing the Sense of Touch. *Pressure Profile Systems* (En línea). [Consultado: 7 mayo 2015]. Disponible en: <http://www.pressureprofile.com/>.

Rakotondrabe, M., Clevy, C. y Lutz, P. 2010. Complete Open Loop Control of Hysteretic, Creeped, and Oscillating Piezoelectric Cantilevers. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 7, no. 3, pp. 440-450. ISSN 1545-5955. DOI 10.1109/TASE.2009.2028617.

Reddy, B.B.K., Homaifar, A. y Esterline, A.C. 2005. Genetic Algorithms for Minimal Fuel Consumption of Electric Propulsion Space Vehicles. *null*. S.l.: IEEE, pp. 25–30.

Rocha, L., Velho, L. y Carvalho, P.C.P. 2004. Motion Reconstruction using Moments Analysis. *Computer Graphics and Image Processing, 2004. Proceedings. 17th Brazilian Symposium on*. S.l.: IEEE, pp. 354–361.

Ru, C. y Sun, L. 2005. Improving Positioning Accuracy of Piezoelectric Actuators by Feedforward Hysteresis Compensation based on a New Mathematical Model. *Review of Scientific Instruments*, vol. 76, no. 9, pp. 095111. ISSN 0034-6748, 1089-7623. DOI 10.1063/1.2052047.

Sánchez-Durán, J.A., Hidalgo-López, J.A., Castellanos-Ramos, J., Oballe-Peinado, Ó. y Vidal-Verdú, F. 2015. Influence of Errors in Tactile Sensors on Some High Level Parameters Used for Manipulation with Robotic Hands. *Sensors*, vol. 15, no. 8, pp. 20409-20435. DOI 10.3390/s150820409.

Sanchez-Duran, J.A., Lopez, J.A.H., Vidal-Verdu, F. y Ochoteco, E. 2010. Experimental Evaluation of the Incidence of Tactile Sensor Limitations on Application Parameters. *2010 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS)*. Limerick, Ireland: s.n., pp. 175-178.

Sánchez-Durán, J.A., Oballe-Peinado, Ó., Castellanos-Ramos, J. y Vidal-Verdú, F. 2011. Hysteresis Correction of Tactile Sensor Response with a Generalized Prandtl-Ishlinskii Model. *SPIE Proceedings*. Prague, Czech Republic: s.n., pp. 80662L-80662L-10.

Sánchez-Durán, J.A., Oballe-Peinado, Ó., Castellanos-Ramos, J. y Vidal-Verdú, F. 2012. Hysteresis Correction of Tactile Sensor Response with a Generalized Prandtl-Ishlinskii Model. *Microsystem Technologies*, vol. 18, no. 7-8, pp. 1127-1138. ISSN 0946-7076, 1432-1858. DOI 10.1007/s00542-012-1455-7.

Sánchez-Durán, J.A., Vidal-Verdú, F., Oballe-Peinado, Ó., Castellanos-Ramos, J. y Hidalgo-López, J.A. 2015. A New Model Based on Adaptation of the External Loop to Compensate the Hysteresis of Tactile Sensors. *Sensors*, vol. 15, no. 10, pp. 26170-26197. DOI 10.3390/s151026170.

Schiffman, H.R. 2000. *La Percepcion Sensorial / Sensory Perception*. México: s.n. ISBN 978-968-18-5307-5.

Schill, J., Laaksonen, J., Przybylski, M., Kyrki, V., Asfour, T. y Dillmann, R. 2012. Learning Continuous Grasp Stability for a Humanoid Robot Hand based on Tactile Sensing. *2012 4th IEEE RAS EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob)*. S.l.: s.n., pp. 1901-1906.

Schmid, A.J., Gorges, N., Goger, D. y Wörn, H. 2008. Opening a Door with a Humanoid Robot using Multi-sensory Tactile Feedback. *IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2008. ICRA 2008*. S.l.: s.n., pp. 285-291.

Schmidt, P.A., Maël, E. y Würtz, R.P. 2006. A Sensor for Dynamic Tactile Information with Applications in Human-robot Interaction and Object Exploration. *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 54, no. 12, pp. 1005-1014. ISSN 0921-8890. DOI 10.1016/j.robot.2006.05.013.

Schmitz, A., Maggiali, M., Natale, L. y Metta, G. 2010. Touch Sensors for Humanoid Hands. *RO-MAN, 2010 IEEE*. S.l.: IEEE, pp. 691-697.

Schmitz, A., Maiolino, P., Maggiali, M., Natale, L., Cannata, G. y Metta, G. 2011. Methods and Technologies for the Implementation of Large-Scale Robot Tactile Sensors. *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 27, no. 3, pp. 389-400. ISSN 1552-3098, 1941-0468. DOI 10.1109/TRO.2011.2132930.

SCHUNK 2015. SDH servo-electric 3-Finger Gripping Hand. (En línea). [Consultado: 15 abril 2015]. Disponible en: <http://mobile.schunk-microsite.com/en/produkte/produkte/sdh-servo-electric-3-finger-gripping-hand.html>.

Schürmann, C., Schöpfer, M., Haschke, R. y Ritter, H. 2012. A High-Speed Tactile Sensor for Slip Detection. En: E. Prassler, M. Zöllner, R. Bischoff, W. Burgard, R. Haschke, M. Hägele, G. Lawitzky, B. Nebel, P. Plöger y U. Reiser (eds.), *Towards Service Robots for Everyday Environments*. S.l.: Springer Berlin Heidelberg, Springer Tracts in Advanced Robotics, 76, pp. 403-415. ISBN 978-3-642-25115-3.

Seminara, L., Capurro, M. y Valle, M. 2015. Tactile Data Processing Method for the Reconstruction of Contact Force Distributions. *Mechatronics*, vol. 27, pp. 28-37. ISSN 09574158. DOI 10.1016/j.mechatronics.2015.02.001.

Shikida, M., Shimizu, T., Sato, K. y Itoigawa, K. 2003. Active Tactile Sensor for Detecting Contact Force and Hardness of an Object. *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 103, no. 1-2, pp. 213-218. ISSN 0924-4247. DOI 10.1016/S0924-4247(02)00336-9.

Shimojo, M., Namiki, A., Ishikawa, M., Makino, R. y Mabuchi, K. 2004. A Tactile Sensor Sheet using Pressure Conductive Rubber with Electrical-wires Stitched Method. *IEEE Sensors Journal*, vol. 4, no. 5, pp. 589-596. ISSN 1530-437X. DOI 10.1109/JSEN.2004.833152.

Silvera-Tawil, D., Rye, D. y Velonaki, M. 2015. Artificial Skin and Tactile Sensing for Socially Interactive Robots: A Review. *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 63, pp. 230-243. ISSN 09218890. DOI 10.1016/j.robot.2014.09.008.

Smith, R. 2005. *Smart Material Systems*. S.l.: Society for Industrial and Applied Mathematics. Frontiers in Applied Mathematics. ISBN 978-0-89871-583-5.

Taddei, M. 2006. *I Robot di Leonardo. La Meccanica e i Nuovi Automi nei Codici Svelati-Da Vinci's Robots. New Mechanics and New Automata Found in Codices. Con Gadget*. Milano: Leonardo3. ISBN 978-88-6048-009-5.

Tao, G. y Kokotovic, P.V. 1995. Adaptive Control of Plants with Unknown Hystereses. *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 40, no. 2, pp. 200-212. ISSN 0018-9286. DOI 10.1109/9.341778.

Tegin, J. y Wikander, J. 2005. Tactile Sensing in Intelligent Robotic Manipulation – A Review. *Industrial Robot: An International Journal*, vol. 32, no. 1, pp. 64-70. ISSN 0143-991X. DOI 10.1108/01439910510573318.

Tekscan, 2006. *I-Scan User Manual v.5.8x*. 2006. S.l.: Tekscan Inc.

Tekscan 2015a. Evolution Handle. *Tekscan* (En línea). [Consultado: 11 septiembre 2015]. Disponible en: <https://www.tekscan.com/products-solutions/electronics/evolution-handle>.

Tekscan 2015b. I-Scan System. *Tekscan* (En línea). [Consultado: 11 septiembre 2015]. Disponible en: <https://www.tekscan.com/products-solutions/systems/i-scan-system>.

Tekscan 2015c. PB100E Equilibration Device. *Tekscan* (En línea). [Consultado: 11 septiembre 2015]. Disponible en: <https://www.tekscan.com/products-solutions/equilibrators/pb100e-equilibration-device>.

Tekscan 2015d. Pressure Mapping Sensor 5051. *Tekscan* (En línea). [Consultado: 11 septiembre 2015]. Disponible en: <https://www.tekscan.com/products-solutions/pressure-mapping-sensors/5051>.

Tekscan 2015e. Software I-Scan System. *Tekscan* (En línea). [Consultado: 14 octubre 2015]. Disponible en: <https://www.tekscan.com/products-solutions/systems/i-scan-system>.

Tiwana, M.I., Redmond, S.J. y Lovell, N.H. 2012. A Review of Tactile Sensing Technologies with Applications in Biomedical Engineering. *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 179, pp. 17-31. ISSN 09244247. DOI 10.1016/j.sna.2012.02.051.

Truesdell, C. y Noll, W. 2004. *The Non-Linear Field Theories of Mechanics*. 3rd edition. Berlin ; New York: Springer. ISBN 978-3-540-02779-9.

Um, D., Stankovic, B., Giles, K., Hammond, T. y Lumelsky, V. 1998. A Modularized Sensitive Skin for Motion Planning in Uncertain Environments. *1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1998. Proceedings*. S.l.: s.n., pp. 7-12 vol.1.

Vidal-Verdú, F., Barquero, M.J., Castellanos-Ramos, J., Navas-González, R., Sánchez, J.A., Serón, J. y García-Cerezo, A. 2011. A Large Area Tactile Sensor Patch Based on Commercial Force. *Sensors*, vol. 11, no. 5, pp. 5489-5507. DOI 10.3390/s110505489.

Vidal-Verdú, F., Oballe, Ó., Barquero, M.J., Bravo, D. y Sánchez-Durán, J.A. 2009. Hardware for Piezoresistive Tactile Sensors. *Workshop on Tactile Sensing in Humanoids - Tactile Sensors 6 beyond*. París: s.n., pp. 72-73.

Vidal-Verdú, F., Oballe-Peinado, Ó., Sánchez-Durán, J.A., Castellanos-Ramos, J. y Navas-González, R. 2011. Three Realizations and Comparison of Hardware for Piezoresistive Tactile. *Sensors*, vol. 11, no. 3, pp. 3249-3266. DOI 10.3390/s110303249.

Visintin, A. 1994. *Differential Models of Hysteresis*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. Applied Mathematical Sciences. ISBN 978-3-642-08132-3.

Visone, C. 2008. Hysteresis Modelling and Compensation for Smart Sensors and Actuators. *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 138, no. 1, pp. 012028. ISSN 1742-6596. DOI 10.1088/1742-6596/138/1/012028.

Wang, J. y Li, Y. 2011. Manipulation of a Mobile Modular Manipulator Interacting with the Environment with the Assistance of Tactile Sensing Feedback. *International Journal of Humanoid Robotics*, vol. 08, no. 04, pp. 777-793. ISSN 0219-8436, 1793-6942. DOI 10.1142/S0219843611002666.

Weiss, K. y Woern, H. 2004. Tactile Sensor System for an Anthropomorphic Robotic Hand. *Proceedings of IEEE International Conference on Manipulation and Grasping (IMG 2004), Kobe, Japan*. S.l.: s.n., pp. 12–17.

Weiss Robotics 2015. Weiss Robotics Tactile Sensors. (En línea). [Consultado: 15 abril 2015]. Disponible en: <http://www.weiss-robotics.de/en/tactile-sensors.html>.

Wikipedia 2015a. Isaac Asimov. En: Page Version ID: 84008433, *Wikipedia, la enciclopedia libre* (En línea). [Consultado: 21 agosto 2015]. Disponible en: https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Isaac_Asimov&oldid=84008433.

Wikipedia 2015b. Karel Čapek. En: Page Version ID: 82106491, *Wikipedia, la enciclopedia libre* (En línea). [Consultado: 21 agosto 2015]. Disponible en: https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Karel_%C4%8Capek&oldid=82106491.

Wikipedia 2015c. Mínimos cuadrados. En: Page Version ID: 85298482, *Wikipedia, la enciclopedia libre* (En línea). [Consultado: 30 octubre 2015]. Disponible en: https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=M%C3%ADnimos_cuadrados&oldid=85298482.

Wolffenbuttel, M.R. y Regtien, P.P.L. 1991. Polysilicon Bridges for the Realization of Tactile Sensors. *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 26, no. 1–3, pp. 257-264. ISSN 0924-4247. DOI 10.1016/0924-4247(91)87002-K.

Yang, M.-J., Gu, G.-Y. y Zhu, L.-M. 2013. Parameter Identification of the Generalized Prandtl–Ishlinskii Model for Piezoelectric Actuators using Modified Particle Swarm Optimization. *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 189, pp. 254-265. ISSN 0924-4247. DOI 10.1016/j.sna.2012.10.029.

Yan, H., Ang, M.H. y Poo, A.N. 2014. A Survey on Perception Methods for Human–Robot Interaction in Social Robots. *International Journal of Social Robotics*, vol. 6, no. 1, pp. 85-119. ISSN 1875-4791, 1875-4805. DOI 10.1007/s12369-013-0199-6.

Yogeswaran, N., Dang, W., Navaraj, W.T., Shakthivel, D., Khan, S., Polat, E.O., Gupta, S., Heidari, H., Kaboli, M., Lorenzelli, L., Cheng, G. y Dahiya, R. 2015. New Materials and Advances in Making Electronic Skin for Interactive Robots. *Advanced Robotics*, vol. 29, no. 21, pp. 1359-1373. ISSN 0169-1864, 1568-5535. DOI 10.1080/01691864.2015.1095653.

Yousef, H., Boukallel, M. y Althoefer, K. 2011. Tactile Sensing for Dexterous in-Hand Manipulation in Robotics—A Review. *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 167, no. 2, pp. 171-187. ISSN 09244247. DOI 10.1016/j.sna.2011.02.038.

Zaber T-LA60A 2015. Miniature Linear Actuator, 60 mm travel, RS-232 plus manual control. (En línea). [Consultado: 13 septiembre 2015]. Disponible en: http://www.zaber.com/products/product_detail.php?detail=T-LA60A.

Zaber T-NA08A50 2015. Linear Actuator, 50 mm travel, RS232 plus manual control. (En línea). [Consultado: 13 septiembre 2015]. Disponible en: http://www.zaber.com/products/product_detail.php?detail=T-NA08A50.

Zareinejad, M., Rezaei, S.M., Ghidary, S.S., Abdullah, A. y Motamedi, M. 2009. Robust Impedance Control of a Piezoelectric Stage under Thermal and External Load Disturbances. *Control and Cybernetics*, vol. 38, no. 3, pp. 635-648. ISSN 0324-8569.

Zhang, G., Zhang, C. y Gu, J. 2012. A Memory-Based Hysteresis Model in Piezoelectric Actuators. *Journal of Control Science and Engineering*, vol. 2012, pp. e498590. ISSN 1687-5249. DOI 10.1155/2012/498590.

Zhang, H. y Chen, N.N. 2000. Control of Contact via Tactile Sensing. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 16, no. 5, pp. 482-495. ISSN 1042-296X. DOI 10.1109/70.880799.