



Departamento de Electrónica
Universidad de Málaga

Tesis Doctoral

Caracterización, Modelado y Diseño de Sensores Táctiles Piezorresistivos

Julián Castellanos Ramos

Málaga, noviembre 2015



Publicaciones y
Divulgación Científica

AUTOR: Julián Castellanos Ramos

 <http://orcid.org/0000-0002-7167-2651>

EDITA: Publicaciones y Divulgación Científica. Universidad de Málaga



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

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.

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

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

Caracterización, Modelado y Diseño de Sensores Táctiles Piezorresistivos

Presentada por: Julián Castellanos Ramos

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

Dr. Rafael de Jesús Navas González
Profesor Titular de Universidad del
Departamento de Electrónica

Málaga, noviembre 2015



Dr. Fernando Vidal Verdú y Dr. Rafael de Jesús Navas González,
Profesores Titulares de Universidad del Departamento de Electrónica
de la Universidad de Málaga

CERTIFICAN: que D. Julián Castellanos Ramos, Ingeniero Industrial por la
Universidad de Málaga, ha realizado bajo nuestra dirección la Tesis
Doctoral que tiene por título "Caracterización, Modelado y Diseño de
Sensores Táctiles Piezorresistivos". Y que ha alcanzado los objetivos
de investigación propuestos, estando debidamente cualificada para
su defensa.

Málaga, a 10 de noviembre de 2015

Fdo.: Fernando Vidal Verdú

Fdo.: Rafael de Jesús Navas González

A mis padres, que en la medida de lo posible pusieron sus recursos para que pudiésemos llegar a donde deseáramos.

Agradecimientos

En primer lugar quisiera agradecer a Fernando y Rafa, mis directores de Tesis, su labor, su esfuerzo y dedicación, su implicación y sus ánimos en los momentos más difíciles. Gracias por ser más “tozudos” que yo en algunos momentos.

Por otro lado también tengo que dar las gracias a mis compañeros y amigos Óscar y José. Hemos trabajado juntos, hemos recorrido juntos este trayecto de la realización de una Tesis, y juntos hemos sufrido y gritado, nos hemos ayudado y nos hemos reído. A pesar de nuestros diferentes caracteres, y quizá por eso, hemos formado un buen equipo, siempre apoyándonos.

También tengo que agradecer a Andrés su apoyo en la realización de parte del trabajo “sucio” y pesado que toda Tesis entraña. Y a los compañeros del departamento por su comprensión en estos últimos meses.

Agradecer también la colaboración del Centro Tecnológico CIDETEC, en concreto a Estíbalitz, Jaime e Iván.

Gracias a Soledad, mi pareja, por eximirme de parte de mis responsabilidades durante este último año. Y a mi hija Lucía que, ajena a todo, siempre me recibe con los brazos abiertos.

Por último, mencionar que el trabajo aquí presentado ha sido financiado por el programa del Plan Nacional y los fondos FEDER bajo los contratos TEC2009-14446 y TEC2012-38653.

Índice

Introducción.....	1
Objetivos.....	4
Estructura de la memoria	6
Capítulo 1. Antecedentes	9
1.1. Introducción.....	9
1.2. Sensores táctiles: antecedentes	10
1.2.1. Requerimientos de un sensor táctil	12
1.2.2. Tipos de sensores según su principio de funcionamiento	17
Sensores piezorresistivos	17
Sensores capacitivos	21
Sensores ópticos.....	22
Sensores piezo-eléctricos.....	23
1.3. Tecnología de CIDETEC	23
1.3.1. Polímero piezorresistivo.....	25
1.3.2. Funcionamiento del táctel	26
1.3.3. Parámetros de rendimiento	28
Linealidad y sensibilidad.....	28
Histéresis	29
Dispersión entre tácteles	29
Respuesta a un pulso.....	30
Deriva	30
Capítulo 2. Sensores fabricados con tecnología PCB	31
2.1. Introducción.....	31
2.2. Diseño y fabricación de las matrices.....	31
2.3. Entorno de caracterización.....	34
2.4. Pruebas y discusión de los resultados	37
2.4.1. Pruebas estáticas.....	37
Área de los electrodos.....	40

Geometría de los electrodos	41
Conductividad de la lámina PEDOT	42
Dispersión.....	42
2.4.2. Pruebas dinámicas	43
2.4.3. Dispersión entre tácteles	46
Experimento 1	47
Experimento 2	49
Experimento 3	50
2.5. Conclusiones	52
Capítulo 3. Sensores fabricados con tecnología <i>screen-printing</i>	55
3.1. Introducción.....	55
3.2. Descripción de la tecnología	56
3.3. Táctel con geometría multicapa simple.....	59
3.3.1. Diseño y fabricación	59
3.3.2. Plataforma de caracterización	61
3.3.3. Resultados experimentales y discusión	61
Respuesta estática y umbral de presión	61
Respuesta dinámica	65
Conclusiones.....	67
3.4. Táctel multicapa mejorado	67
3.4.1. Diseño y fabricación	68
3.4.2. Plataforma de caracterización	71
3.4.3. Análisis y modelado de la respuesta estática del sensor	72
Modelo eléctrico básico	72
Modelo mecánico básico.....	75
Análisis por elementos finitos (FEA).....	77
Limitaciones del modelo simple.....	82
Modelo extendido	86
3.4.4. Resultados experimentales y discusión	89
Primer conjunto de pruebas	90
Segundo conjunto de pruebas	94
Análisis y modelado de sensores con aislante blando	97

Análisis y modelado de sensores con aislante rígido	99
Notas sobre histéresis y linealidad	103
3.5. Conclusiones	104
Capítulo 4. Diseño y fabricación de un táctel tri-axial.....	109
4.1. Introducción	109
4.2. Modelo	112
4.3. Primera estructura tri-axial.....	115
4.3.1. Propuesta y análisis.....	115
4.3.2. Experimentos y resultados.....	121
4.4. Segunda estructura tri-axial.....	127
4.4.1. Propuesta y análisis.....	127
4.4.2. Experimentos y resultados.....	131
4.5. Conclusiones	143
Capítulo 5. Sensores basados en componentes discretos comerciales. 145	
5.1. Introducción.....	145
5.2. Diseño del sensor	146
5.3. Plataforma de caracterización	148
5.4. Experimentos y discusión de los resultados	149
5.5. Conclusiones	156
Conclusiones	159
Anexo A. Publicaciones en revistas y congresos	163
A.1. Publicaciones en revistas internacionales indexadas en el JCR	163
A.2. Publicaciones en actas de congresos internacionales.....	164
Anexo B. Electrónica de acondicionamiento	165
Anexo C. Plataforma de caracterización de fuerzas normales	169
C.1. Descripción de los componentes de la plataforma	170
C.1.1. Sensor de fuerza.....	171
C.1.2. Motor paso a paso	173
C.1.3. Placa de acondicionamiento	174
C.1.4. Tarjeta de adquisición de señales	176

C.2. Aplicación para el control de la plataforma	177
Anexo D. Plataforma de caracterización neumática	181
D.1. Descripción de los componentes de la plataforma	183
D.1.1. Compresor	183
D.1.2. Regulador de presión.....	184
D.1.3. Sistema de equilibrado PB100E	184
D.1.4. Placa de acondicionamiento.....	185
D.1.5. Tarjeta de adquisición de señales.....	188
D.2. Aplicación para el control de la plataforma	189
D.2.1. Programación de pruebas.....	190
D.2.2. Formato de los ficheros	193
Anexo E. Plataforma de caracterización dinámica	195
E.1. Descripción de los componentes de la plataforma	196
E.1.1. Compresor.....	198
E.1.2. Regulador de presión	199
E.1.3. Electroválvula.	199
E.1.4. Transmisión de presión.	199
Anexo F. Plataforma de caracterización de fuerzas tri-axial	201
F.1. Descripción de los componentes de la plataforma	202
F.1.1. Sensor de fuerza en tres ejes	203
F.1.2. Motores	204
F.1.3. Placa de acondicionamiento	206
F.1.4. Tarjeta de adquisición de señales	209
F.2. Aplicación para el control de la plataforma.....	209
F.2.1. Programación de pruebas	212
F.2.2. Formato de los ficheros.....	214
Ficheros de entrada.....	214
Ficheros de salida	215
Referencias	219

Índice de figuras

Figura 1. Sensores táctiles fabricados y evaluados.	4
Figura 2. Diagrama funcional de un sistema táctil.	5
Figura 1-1. Sección de un trozo de piel humana.	14
Figura 1-2. Distribución de la resolución de mecanorreceptores en la mano.....	14
Figura 1-3. Ilustración de las rugosidades de un trozo de lámina PEDOT en (a) 2 dimensiones y (b) 3 dimensiones [<i>Ochoteco et al. 2007</i>].	26
Figura 1-4. Establecimiento del contacto entre la lámina PEDOT y los electrodos.....	27
Figura 1-5. Esquema eléctrico de un táctel.	27
Figura 1-6. Ejemplo de salida de un sensor con histéresis.	28
Figura 2-1. Esquema de un táctel fabricado con tecnología de PCB flexible (m101v2).	32
Figura 2-2. Fotografías de las matrices m101, m102v2, m201v3 y m10075v2.	33
Figura 2-3. Sistema de caracterización de fuerzas normales.	35
Figura 2-4. Sistema de caracterización neumático.....	36
Figura 2-5. Sistema de caracterización dinámico.	37
Figura 2-6. Salida del sensor m101 con lámina PEDOT M1: (a) media de los tácteles de la matriz y su dispersión y (b) media de los ciclos y su dispersión.....	38
Figura 2-7. Salida del sensor m101v2 con lámina PEDOT M1: (a) media de los tácteles de la matriz y su dispersión y (b) media de los ciclos y su dispersión.....	38
Figura 2-8. Salida del sensor m201v3 con lámina PEDOT M1: (a) media de los tácteles de la matriz y su dispersión y (b) media de los ciclos y su dispersión.....	39
Figura 2-9. Salida del sensor m10075v2 con lámina PEDOT M1: (a) media de los tácteles de la matriz y su dispersión y (b) media de los ciclos y su dispersión.....	39
Figura 2-10. Respuesta del sensor con electrodos m10075v2 y láminas PEDOT de distinta conductividad.	42
Figura 2-11. Salida del sensor m201v3 (a) sin equilibrar y (b) equilibrado.	43
Figura 2-12. Salida del sensor m101v2 con lámina M1 ante un escalón de presión como entrada.	44
Figura 2-13. Salida del sensor m101v2 con lámina M1 con el tiempo para diferentes cargas aplicadas...45	45
Figura 2-14. Salida característica del sensor m101v2 con lámina M1.....	46
Figura 2-15. Material marcado para posarlo sobre diferentes tácteles del sensor.....	47
Figura 2-16. Resultados del experimento 1.....	48
Figura 2-17. Media y dispersión de los tácteles del experimento 1.....	48
Figura 2-18. Material marcado para posarlo sobre un mismo táctel.....	49
Figura 2-19. Resultados del experimento 2.....	50

Figura 2-20. Media y dispersión de los datos del experimento 2.....	50
Figura 2-21. Resultados del experimento 3.....	51
Figura 2-22. Media y dispersión de los datos del experimento 3.....	51
Figura 2-23. (a) Goma con agujero en la parte inferior presionada contra el sensor m101, (b) vista en 3D de la salida del sensor y (c) vista en 2D. (d) Flecha de goma presionada contra el sensor, (e) vista en 3D de la salida del sensor y (f) vista en 2D.	53
Figura 3-1. Máquina semiautomática para serigrafía.....	58
Figura 3-2. Pasos del proceso de fabricación de la primera propuesta del sensor con tecnología de <i>screen-printing</i>	58
Figura 3-3. Muestra de una máscara con las marcas de referencia para la alineación de las capas.....	59
Figura 3-4. Esquema de la primera versión de un táctel fabricado con la tecnología de <i>screen-printing</i>	60
Figura 3-5. Fotografía de la primera versión del sensor multicapa simple.	61
Figura 3-6. Resultados de las pruebas estáticas de la primera versión del sensor fabricado con la tecnología de <i>screen-printing</i> . (a) Salida de cinco ciclos de carga y descarga del sensor, (b) media y desviación típica de los ciclos anteriores.....	62
Figura 3-7. (a) Salida de la simulación para una fuerza uniforme aplicada, (b) distribución de presiones en la parte izquierda el electrodo externo en función de la fuerza aplicada y (c) salida experimental del primer prototipo del sensor.	64
Figura 3-8. Variación de la presión umbral con el grosor y el módulo de Young de la lámina PEDOT.....	65
Figura 3-9. Salida del sensor para diferentes grosores de la lámina PEDOT.	65
Figura 3-10. Respuesta dinámica ante un impulso de presión superando el umbral.	66
Figura 3-11. Medida de la deriva para diferentes presiones aplicadas.	67
Figura 3-12. (a) Esquema en tres dimensiones del sensor y sus conexiones dentro de la matriz. (b) Diseño propuesto del táctel multicapa mejorado y sus dimensiones.	69
Figura 3-13. Pasos del proceso de fabricación para el sensor multicapa mejorado.	70
Figura 3-14. Deposición de (a) electrodo base, (b) electrodo externo y (c) electrodo interno en un táctel del sensor. (d) Sensor completo.	71
Figura 3-15. Sistema de caracterización.....	72
Figura 3-16. (a) Modelo eléctrico básico del táctel multicapa. (b) Circuito de lectura.	73
Figura 3-17. Modelo mecánico básico del táctel multicapa.....	76
Figura 3-18. Parámetro a en función del módulo de Young de la capa de aislante y la capa de cobertor calculado mediante el modelo mecánico básico.	77
Figura 3-19. Simulación del punto P1 en la superficie a de la Figura 3-26. (a) Desplazamiento para una fuerza aplicada de 40N. (b) Presión de contacto para varias fuerzas aplicadas.	79
Figura 3-20. Simulación del punto P2 en la superficie a de la Figura 3-26. (a) Desplazamiento para una fuerza aplicada de 40N. (b) Presión de contacto para varias fuerzas aplicadas.	79

Figura 3-21. Simulación del punto P3 en la superficie α de la Figura 3-26. (a) Desplazamiento para una fuerza aplicada de 40N. (b) Presión de contacto para varias fuerzas aplicadas.	80
Figura 3-22. Simulación del punto P4 en la superficie α de la Figura 3-26. (a) Desplazamiento para una fuerza aplicada de 40N. (b) Presión de contacto para varias fuerzas aplicadas.	80
Figura 3-23. Simulación del punto P5 en la superficie α de la Figura 3-26. (a) Desplazamiento para una fuerza aplicada de 40N. (b) Presión de contacto para varias fuerzas aplicadas.	80
Figura 3-24. Simulación del punto P6 en la superficie α de la Figura 3-26. (a) Desplazamiento para una fuerza aplicada de 40N. (b) Presión de contacto para varias fuerzas aplicadas.	81
Figura 3-25. Simulación del punto P7 en la superficie α de la Figura 3-26. (a) Desplazamiento para una fuerza aplicada de 40N. (b) Presión de contacto para varias fuerzas aplicadas.	81
Figura 3-26. Parámetro α en función de los módulos de Young de la capa de aislante y cobertor obtenido mediante las simulaciones FEA.	81
Figura 3-27. Diferencia del parámetro α calculado con el modelo mecánico básico y el obtenido de las simulaciones FEA.	82
Figura 3-28. Perfil de la cara sensible de la lámina PEDOT.	83
Figura 3-29. (a) Microfotografía del sensor con el aislante RojoEL. (b) Curvas de salida del test de penetración para la estimación del módulo de Young.	84
Figura 3-30. Geometría simulada de (a) un contacto plano y (b) un contacto rugoso. Salida de la simulación FEA para (c) el contacto plano y (d) el contacto rugoso.	85
Figura 3-31. Modelo de <i>Winkler</i> de un táctel multicapa.	87
Figura 3-32. Sensores evaluados con distintos materiales para la capa aislante en el primer conjunto de pruebas.	90
Figura 3-33. (a) Salida de los tácteles centrales del sensor con aislante BlancoUV. (b) Media y dispersión de los tácteles centrales. (c) Perfil de una fila del sensor.	91
Figura 3-34. (a) Salida de los tácteles centrales del sensor con aislante RojoEL. (b) Media y dispersión de los tácteles centrales. (c) Perfil de una fila del sensor.	91
Figura 3-35. (a) Salida de los tácteles centrales del sensor con aislante VerdeAzul. (b) Media y dispersión de los tácteles centrales. (c) Perfil de una fila del sensor.	92
Figura 3-36. (a) Salida de los tácteles centrales del sensor con aislante Verde. (b) Media y dispersión de los tácteles centrales. (c) Perfil de una fila del sensor.	92
Figura 3-37. (a) Salida de los tácteles centrales del sensor con aislante Azul. (b) Media y dispersión de los tácteles centrales. (c) Perfil de una fila del sensor.	93
Figura 3-38. Media de las salidas de varios sensores con diferentes materiales para la capa aislante.	93
Figura 3-39. Sensores evaluados con distintos materiales para la capa aislante en el segundo conjunto de pruebas.	95
Figura 3-40. Capas de cobertor usadas en los experimentos.	95

Figura 3-41. Salida de los tácteles para los sensores con el aislante RojoEL y las diferentes capas de cobertor.	96
Figura 3-42. Salida de los tácteles para los sensores con el aislante TranspUV y las diferentes capas de cobertor.	96
Figura 3-43. Detalle del perfil de un táctel con el aislante RojoEL.	97
Figura 3-44. Salida de los sensores con el aislante RojoEL: (a) media de todos los tácteles y (b) media de los cuatro tácteles centrales. (c) Salida del modelo simple y (d) salida del modelo extendido.	98
Figura 3-45. Conjunto de dieciséis salidas obtenidas con el modelo extendido para un sensor con el aislante RojoEL y (a) cobertor Transp y (b) cobertor PC.	99
Figura 3-46. Detalle del perfil de un táctel con el aislante TranspUV.	100
Figura 3-47. Salida de los sensores con el aislante TranspUV: (a) media de todos los tácteles y (b) media de los cuatro tácteles centrales. (c) Salida del modelo simple y (d) salida del modelo extendido.	101
Figura 3-48. Conjunto de dieciséis salidas obtenidas con el modelo extendido para un sensor con el aislante TranspUV y (a) cobertor Transp y (b) cobertor PC.	102
Figura 3-49. Salida del modelo extendido para los sensores con aislante TranspUV con diferentes porcentajes de barras eliminadas: (a) 50%, (b) 60%, (c) 70% y (d) 80%.	102
Figura 3-50. Media de los ciclos de carga y descarga (curvas azules y rojas respectivamente) de los sensores con los diferentes aislantes y cobertores. Los asteriscos representan la dispersión del sensor.	104
Figura 4-1. Esquema general de un táctel triaxial.	110
Figura 4-2. (a) Matriz de un sensor piezorresistivo genérico y agrupación en grupos de 2x2 tácteles. (b) Esquema de agrupación de cuatro tácteles para formar un táctel tri-axial.	113
Figura 4-3. Diagrama de fuerzas para el modelo funcional del táctel tri-axial: (a) diagrama de fuerzas cuando se aplica una fuerza normal y (b) diagrama de fuerzas cuando la fuerza aplicada tiene componente normal y tangencial. (c) Proyección de las fuerzas en el plano x-z y (d) proyección de las fuerzas en el plano y-z en el caso de fuerza aplicada con componente normal y tangencial.	114
Figura 4-4. (a) Estructura tri-axial. (b) Estructura con el anclaje usado en el banco de pruebas. (c) Parámetros geométricos.	116
Figura 4-5. Geometría de la simulación y desplazamiento en la dirección del eje y.	117
Figura 4-6. (a) Presión de contacto en las unidades sensoriales para una fuerza normal aplicada. (b) Presión de contacto en las unidades sensoriales para una fuerza con componente normal y tangencial aplicada.	118
Figura 4-7. Resultado de variar la posición de contacto de los brazos con las bases para fuerzas normales: (a) posición de contacto a 1 mm del centro, (b) a 2 mm del centro y (c) a 4 mm del centro. Resultado para fuerzas con componente tangencial: (d) posición de contacto a 1 mm del centro, (e) a 2 mm del centro y (f) a 4 mm del centro.	120

Figura 4-8. (a) Presión de contacto para fuerzas normales y (b) para fuerzas tangenciales de la estructura fabricada.	121
Figura 4-9. (a) Plataforma de caracterización. (b) Prototipo de táctel tri-axial.	122
Figura 4-10. (a) Imagen táctil completa obtenida por el sensor 5800N para una fuerza normal aplicada, (b) para una fuerza normal y tangencial en el eje x, y (c) para una fuerza normal y tangencial en el eje y. (d) Valores de las cuatro unidades sensoriales para una fuerza normal, (e) para una fuerza normal y tangencial en el eje x, y (f) para una fuerza normal y tangencial en el eje y.	123
Figura 4-11. Fuerza estimada frente a la fuerza de referencia para cada eje.	126
Figura 4-12. Fuerzas estimadas y de referencia para cada muestra.	126
Figura 4-13. (a) Estructura propuesta en forma de tronco de pirámide. (b) Matriz de estructuras sobre un sensor piezorresistivo. (c) Parámetros geométricos.	128
Figura 4-14. Geometría de la simulación y desplazamiento en la dirección del eje y.	131
Figura 4-15. (a) Presión de contacto para fuerzas normales y (b) para fuerzas tangenciales de la estructura fabricada.	131
Figura 4-16. Matriz de estructuras tri-axiales sobre el sensor 5800N.	132
Figura 4-17. Fuerza estimada frente a la fuerza de referencia para cada eje para el caso del sensor 5800N siguiendo el procedimiento en círculo.	133
Figura 4-18. Fuerzas estimadas y de referencia para cada muestra para el caso del sensor 5800N siguiendo el procedimiento en círculo.	134
Figura 4-19. Fuerza estimada frente a la fuerza de referencia para cada eje para el caso del sensor 5800N siguiendo el procedimiento en cruz.	134
Figura 4-20. Fuerzas estimadas y de referencia para cada muestra para el caso del sensor 5800N siguiendo el procedimiento en cruz.	135
Figura 4-21. Posicionamiento de la estructura tri-axial sobre la matriz m101v2.	136
Figura 4-22. Fuerza estimada frente a la fuerza de referencia para cada eje para el caso del sensor m101v2 siguiendo el procedimiento en cruz.	137
Figura 4-23. Fuerzas estimadas y de referencia para cada muestra para el caso del sensor m101v2 siguiendo el procedimiento en cruz.	138
Figura 4-24. Fuerza estimada frente a la fuerza de referencia para cada eje para el caso del sensor m101v2 siguiendo el procedimiento en círculo.	138
Figura 4-25. Fuerzas estimadas y de referencia para cada muestra para el caso del sensor m101v2 siguiendo el procedimiento en círculo.	139
Figura 4-26. Posicionamiento de la estructura tri-axial sobre la matriz m201v3.	140
Figura 4-27. Fuerza estimada frente a la fuerza de referencia para cada eje para el caso del sensor m201v3 siguiendo el procedimiento en cruz.	140
Figura 4-28. Fuerzas estimadas y de referencia para cada muestra para el caso del sensor m201v3 siguiendo el procedimiento en cruz.	141

Figura 4-29. Fuerza estimada frente a la fuerza de referencia para cada eje para el caso del sensor m201v3 siguiendo el procedimiento en círculo.....	141
Figura 4-30. Fuerzas estimadas y de referencia para cada muestra para el caso del sensor m201v3 siguiendo el procedimiento en círculo.	142
Figura 5-1. (a) Detalle de la disposición de los FRS. (b) Capas del sensor FSR de Interlink. (c) Esquema del FSR con el cono de poliuretano y (d) fotografía del sensor FSR modificado.	148
Figura 5-2. Sistema de caracterización usado en las pruebas.	149
Figura 5-3. (a) Curva normal de calibración del sensor de referencia. (b) Curva de calibración con el cono de poliuretano entre el sensor de referencia y la balanza de calibración.	150
Figura 5-4. (a) Respuesta estática del sensor para diez ciclos de carga y descarga y (b) media de los ciclos con su dispersión para el caso de una unidad FSR con el cono de poliuretano. (c) Respuesta estática del sensor para diez ciclos de carga y descarga y (d) media de los ciclos con su dispersión para el caso de unidad FSR presionada mediante una pieza de metal.	151
Figura 5-5. Respuesta del táctel FSR modificado frente a un pulso. El canal 1 representa la señal del sensor de referencia, mientras que el canal 2 representa la salida del táctel FSR.....	152
Figura 5-6. Medida de la deriva del sensor FSR modificado.....	152
Figura 5-7. (a) Detalle del posicionamiento de las unidades FSR y (b) fotografía de la matriz completa.	153
Figura 5-8. Imagen táctil de un objeto circular sobre el sensor (a) con los puntos de soldadura aislados y (b) sin los puntos de soldadura aislados.	154
Figura 5-9. (a) Salida del táctel sin la base rígida y (b) con la base rígida. (c) Fotografía del táctel FSR modificado con el cono de poliuretano y la base plástica rígida.	155
Figura 5-10. Sensor montado en el brazo del robot ALACRANE [Vidal-Verdú, Barquero, et al. 2011].....	156
Figura B-1. Esquema eléctrico del sensor y circuito de lectura.	166
Figura C-1. Diagrama de bloques de la plataforma de caracterización de fuerzas normales.	170
Figura C-2. Plataforma de caracterización de fuerzas normales.	171
Figura C-3. (a) Esquema eléctrico y (b) fotografía del sensor de referencia FSG15N1A.	172
Figura C-4. Esquema del circuito de amplificación.	172
Figura C-5. Esquemático y huella de la placa de circuito impreso de la etapa de amplificación para el sensor de referencia FSG15N1A.	172
Figura C-6. Curva de calibración para el sensor de referencia FSG15N1A.	173
Figura C-7. Diagrama de bloques de la placa de acondicionamiento.....	174
Figura C-8. Fotografía de la placa de acondicionamiento “acondicionamientov1”.	175
Figura C-9. Esquema eléctrico del circuito de acondicionamiento de la señal de salida.	176
Figura C-10. Ventana del programa de control del sistema.	178
Figura D-1. Diagrama de bloques de la plataforma de caracterización neumática.....	181
Figura D-2. Esquema neumático del sistema.	182
Figura D-3. Plataforma de caracterización neumática.	182

Figura D-4. Compresor de aire.	183
Figura D-5. Esquema del equilibrador PB100E.	185
Figura D-6. Diagrama de bloques funcional de la placa "acondicionamientov2".	186
Figura D-7. Fotografía de la placa de acondicionamiento "acondicionamientov2".	186
Figura D-8. Esquema eléctrico del circuito de acondicionamiento de la señal de salida.	188
Figura D-9. Ventana de la aplicación "CalibraRegProp.vi"	191
Figura E-1. Estímulo escalón aplicado a un tactel del sensor.	195
Figura E-2. Foto de los principales componentes del sistema neumático.	197
Figura E-3.- Esquema del sistema neumático completo.	197
Figura E-4. Compresor de aire.	198
Figura E-5. Esquema del circuito de activación de la electroválvula.	199
Figura E-6. Acondicionamiento del transmisor de presión.	200
Figura F-1. Diagrama de bloques de la plataforma de caracterización tri-axial.	202
Figura F-2. Plataforma de caracterización tri-axial.	203
Figura F-3. Sensor de referencia nano17.	204
Figura F-4. Diagrama de bloques funcional de la placa "acondicionamientov2".	206
Figura F-5. Fotografía de la placa de acondicionamiento "acondicionamientov2".	207
Figura F-6. Esquema eléctrico del circuito de acondicionamiento de la señal de salida.	208
Figura F-7. Ventana de la aplicación "Calibra_v33.vi".	211

Índice de tablas

Tabla 1-1. Clasificación de los mecanorreceptores.	13
Tabla 1-2. Láminas de material PEDOT fabricadas.	25
Tabla 2-1. Forma y tamaño de los distintos electrodos fabricados con tecnología PCB.	33
Tabla 2-2. Histéresis y dispersión de los sensores evaluados.	40
Tabla 3-1. Valores de los módulos de Young de las distintas capas.	70
Tabla 3-2. Constantes elásticas obtenidas del módulo de Young de los materiales usados (Tabla 3-1) y la geometría del táctel (ver Figura 3-12 y ecuación (3.11)).	77
Tabla 3-3. Parámetros de las curvas del segundo experimento.	103
Tabla 4-1. Resultado de las simulaciones de la primera estructura propuesta.	119
Tabla 4-2. Resultados del análisis de regresión lineal múltiple.	125
Tabla 4-3. Resultado de las simulaciones de la segunda estructura propuesta.	130
Tabla 4-4. Resultados del método de regresión para el sensor 5800N y el procedimiento en círculo.	135
Tabla 4-5. Resultados del método de regresión para el sensor 5800N y el procedimiento en cruz.	135
Tabla 4-6. Resultados del método de regresión para el sensor m101v2 y el procedimiento en cruz.	137
Tabla 4-7. Resultados del método de regresión para el sensor m101v2 y el procedimiento en círculo.	139
Tabla 4-8. Resultados del método de regresión para el sensor m201v3 y el procedimiento en cruz.	142
Tabla 4-9. Resultados del método de regresión para el sensor m201v3 y el procedimiento en círculo.	142
Tabla 5-1. Principales características del sensor FSR 402 de Interlink Electronics.	147
Tabla 5-2. Dispersión del sensor de gran area.	155
Tabla C-1. Principales características del sensor de referencia FSG15N1A.	171
Tabla C-2. Características del motor paso a paso Sanyo Denki 103-770-61.	173
Tabla C-3. Características de la tarjeta de adquisición Keithley 3100.	177
Tabla D-1. Características del regulador de presión proporcional.	184
Tabla D-2. Características del equilibrador PB100C.	185
Tabla D-3. Principales características de la tarjeta de adquisición de datos USB-6259 BNC.	189
Tabla D-4. Descripción de los parámetros usados en las pruebas automáticas.	192
Tabla F-1. Especificaciones del sensor nano 17.	204
Tabla F-2. Características del motor modelo T-NA08A50.	205
Tabla F-3. Características del motor modelo T-LA60A.	205
Tabla F-4. Principales características de la tarjeta de adquisición de datos USB-6259 BNC.	209
Tabla F-5. Descripción de los parámetros usados en las pruebas automáticas.	213

Lista de acrónimos

FSR	Sensor de fuerza resistivo
SA	Mecanorreceptor de adaptación lenta
FA	Mecanorreceptor de adaptación rápida
MEM	Sistema micro electro-mecánico
PCB	Placa de circuito impreso
FEA	Análisis de elementos finitos
PZT	Titanato circonato de plomo
PVDF	Fluoruro de polivinilideno
FBG	Fibra óptica de Bragg
PEDOT	Material conductor piezo-resitivo (Poly 3,4-etilenodioxitiofeno)
PC	Ordenador personal
PET	Tereftalato de polietileno
FSR	Sensor de fuerza resistivo
FS	Fondo de escala
FPCB	Placa de circuito impreso flexible
PDMS	Polímero polidimetilsiloxano

Introducción

Los sensores táctiles son básicamente matrices de unidades sensoriales de fuerza denominadas tácteles. La salida del sensor es una imagen táctil o mapa de fuerzas que nos dice dónde hay contacto y la fuerza que se ejerce en él. Estos sensores son usados como mecanismo de adquisición de información del entorno mediante el contacto con los objetos, para tener conocimiento de la forma, la textura o la posición. Cuanta menos información a priori se tenga del ambiente más necesaria se hace la utilización de sensores para adquirir esa información [Lee et al. 1999]. El campo de aplicación de los sensores táctiles es amplio [Dahiya et al. 2013; Lee 2000]. En medicina se usan sensores en la cirugía no invasiva, en rehabilitación pueden usarse para determinar la distribución de presión sobre ciertas partes de cuerpo, y también en prótesis y sistemas de asistencia a personas mayores o con alguna discapacidad. En la industria alimentaria y agraria se puede reducir la probabilidad de contaminación de productos usando manipuladores dotados de sensores táctiles, evitando así el riesgo para las personas en entornos hostiles por bajas temperaturas, por ejemplo. En robots dotados de pinzas antropomórficas para tareas de manipulación es muy importante la detección del deslizamiento, pero a su vez hay que controlar la fuerza de agarre del objeto para no dañarlo si es frágil, y esto se aborda a menudo con la ayuda de sensores táctiles. En el campo de la realidad virtual y la telepresencia se usan para la obtención de información de ambientes inaccesibles o peligrosos.

El ideal a seguir para el diseño de los sensores táctiles y su respuesta es la piel humana. El sentido del tacto humano es muy complejo, y estamos lejos de reproducirlo de forma exacta, pero los sensores táctiles son una versión simplificada que es útil en las aplicaciones mencionadas. El interés por los sensores táctiles se observa en la gran cantidad de publicaciones científicas relacionadas, y en concreto en 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, o [Dahiya et al. 2013], donde se analizan los aspectos necesarios para una aplicación efectiva de los sensores táctiles. Otras revisiones recientes se pueden encontrar en [Dahiya et al. 2010] o [Yousef et al. 2011], en este último caso orientada a la aplicación en manipulación con manos robóticas. En [Yan et al. 2014] se pone de manifiesto la importancia de los sensores táctiles en la interacción hombre-robot, necesaria por ejemplo en un robot de asistencia.

Con respecto a la tecnología para hacer los sensores táctiles, se han explotado numerosos principios [Dahiya et al. 2010]. La mayor restricción viene de la necesidad de que los sensores sean flexibles y capaces de cubrir grandes áreas. Una realización directa consiste en soldar un conjunto de sensores de fuerza en placas de circuito impreso [Mukai et al. 2008]. Sin embargo, el coste de esta aproximación es alto. Además, normalmente se usa una última capa sobre el sensor para protegerlo y mejorar las características de la interfaz de contacto. Dado que esta capa sufre deterioro con el uso y puede almacenar energía, la respuesta del sensor se ve afectada y aparecen no idealidades como histéresis o deriva, que acercan su rendimiento al de otras realizaciones con tecnologías más baratas. Las tecnologías basadas en MEMS sobre polímeros [Engel et al. 2005] son prometedoras porque se consiguen sensores flexibles y menos frágiles que los de silicio, aunque todavía no han dado lugar a sensores comerciales y de gran área.

Otras tecnologías basadas en fibras, materiales plásticos y electrodos flexibles se han explotado con éxito para construir sensores flexibles que cubren grandes áreas. Por ejemplo, se comercializan sensores capacitivos para distintas aplicaciones [Pressure Profile Systems, Inc. 2015], y en concreto se han desarrollado para robótica [Schmitz et al. 2011]. Otro gran conjunto de estos sensores táctiles se basa en principios piezorresistivos, es decir la conductividad entre dos electrodos depende de la presión sobre el táctel. Consisten básicamente en una capa de material activo sobre una matriz de electrodos. Muchas realizaciones comparten este esquema básico, aunque el principio de funcionamiento no es el mismo. Algunas propuestas se basan en gomas conductoras. La concentración de partículas conductoras aumenta con la presión, creando caminos de baja resistencia eléctrica y aumentando la conductividad [Tee et al. 2015; Drimus, Jankovics, et al. 2014; Kobayashi et al. 2009]. El aumento de la conductividad se explica por la teoría de percolación o por efecto túnel cuántico [Shadow 2012], e implica un cambio de volumen del material activo.

Otras realizaciones se basan en el cambio de área de contacto a escala micro o nanométrica con la presión sobre el táctel por la rugosidad en la interfaz de contacto, lo que da lugar a sensores más delgados. Hay muchos sensores comerciales que explotan este principio y que han sido aplicados en robótica [Schmidt *et al.* 2006; Kalamdani *et al.* 2006]. La sensibilidad del sensor viene determinada en estos casos por la conductividad del material activo. Con esta estrategia se consiguen sensores de alta resolución espacial [Strohmayr *et al.* 2013; Papakostas *et al.* 2002], aunque su salida depende de las propiedades mecánicas del objeto con el que se hace contacto, en particular con su elasticidad, y esto debe tenerse en cuenta cuando se calibra el sensor para una determinada interfaz de contacto [Hartmann *et al.* 2009], lo que complica su uso en robótica, donde se afronta un entorno no estructurado con múltiples objetos diferentes. La razón de esta dependencia es que el resultado de su construcción es una matriz de puntos sensibles rodeada de un área no sensible. Si un objeto es rígido, la fuerza se concentra en los puntos sensibles y la salida es grande. Por el contrario, si un objeto es blando, la salida es pequeña. Otros sensores no sufren esta limitación, al menos no en el mismo grado, porque el área sensible es el área de contacto entre el material activo y los electrodos, y ésta coincide aproximadamente con la del táctel. Éste es el caso de los sensores comerciales de Weiss Robotics [Weiss Robotics 2015], donde la matriz de electrodos se hace con una placa de circuito impreso flexible [Göger *et al.* 2009]. La sensibilidad y el rango del sensor vienen determinados por las propiedades del material activo.

En esta tesis se sigue esta última aproximación. En concreto se aprovecha la relación con el centro tecnológico CIDETEC [Cidetec 2015] en el marco de proyectos de investigación coordinados para proponer sensores, evaluar su rendimiento y extraer conclusiones. CIDETEC patentó una tecnología basada en polímeros conductores depositados en láminas de plástico flexible [Pomposo *et al.* 2006]. Con estas láminas como material activo, se han hecho estudios para averiguar la influencia de la forma y el tamaño de los electrodos en el rendimiento del sensor. Asimismo, se han propuesto sensores hechos con una tecnología de *screen-printing* disponible en CIDETEC y se ha estudiado la influencia de las propiedades de los materiales (en concreto el aislante entre capas conductoras y la capa de cubierta) en la sensibilidad y el rango del sensor. También se han propuesto y estudiado estrategias para introducir la capacidad de detectar no solo fuerzas normales sino también tangenciales usando como base los sensores propuestos y fabricados con tecnologías de PCB y de *screen-printing*. Finalmente, se han hecho aportaciones en mejora del rendimiento y caracterización de un sensor táctil de gran

área para un robot de rescate que emplea como tácteles sensores de fuerza comerciales. La Figura 1 muestra algunos de los sensores fabricados.

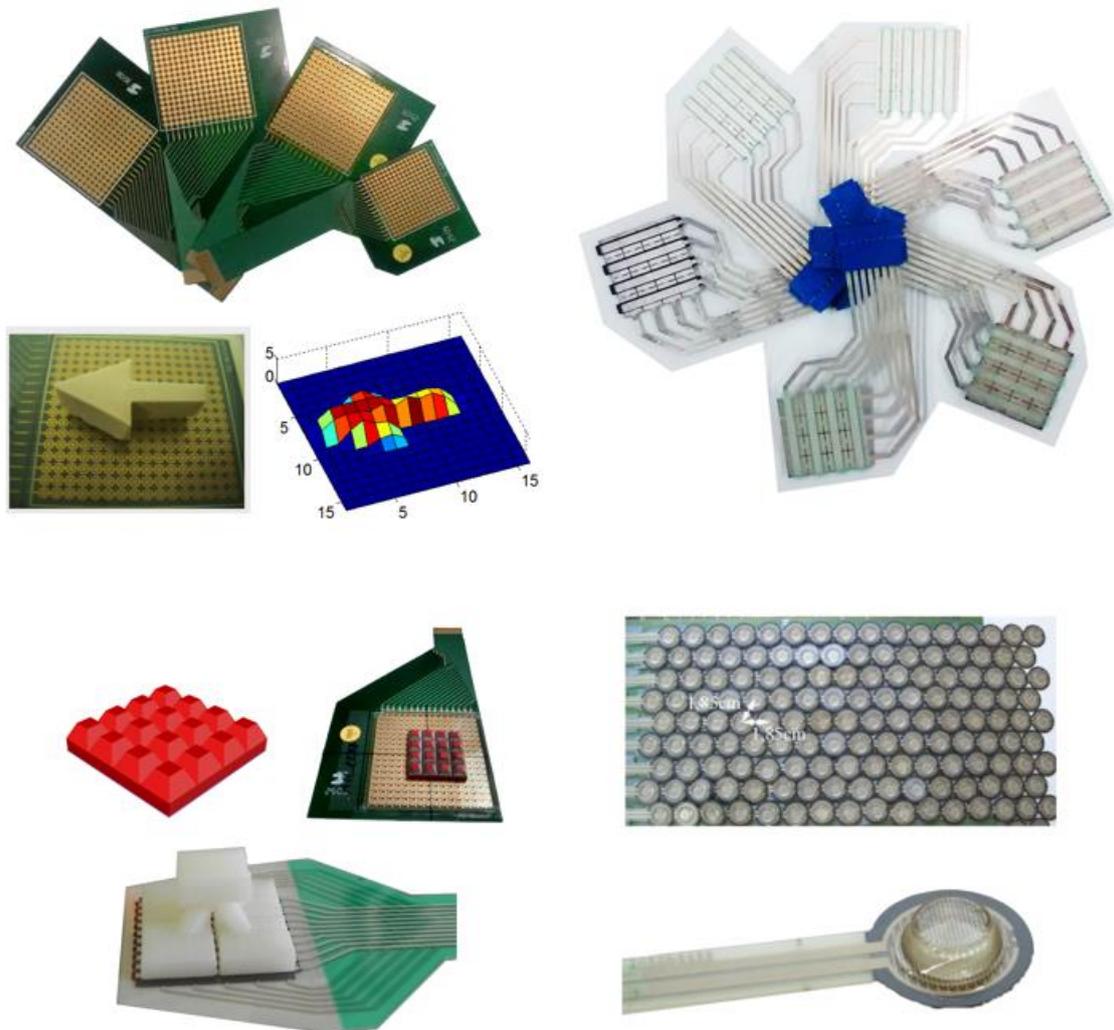


Figura 1. Sensores táctiles fabricados y evaluados.

En lo que sigue se enumeran los objetivos concretos y se describe la estructura de la memoria.

Objetivos

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 primera capa, es decir, en el mecanismo de transducción.

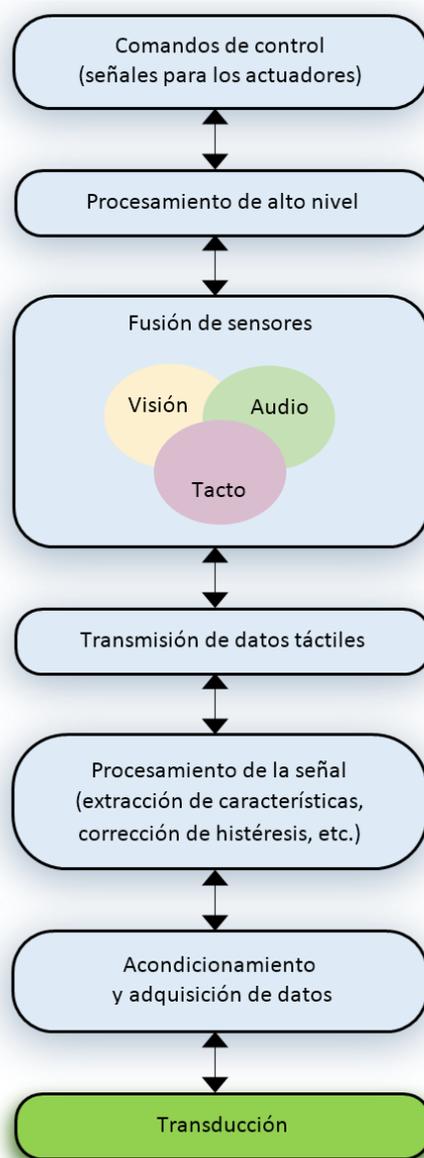


Figura 2. Diagrama funcional de un sistema táctil.

En concreto los objetivos son:

- Proponer y evaluar sensores táctiles hechos con polímeros conductores como material activo y tecnologías de circuito impreso y de *screen-printing* de bajo coste en aplicaciones de media-alta resolución espacial.
- Conocer la influencia de aspectos como el tamaño y forma de los electrodos en la respuesta del sensor, en concreto en la sensibilidad, histéresis y linealidad.

- Proponer una estrategia de ajuste del rango y sensibilidad de sensores hechos con tecnología de *screen-printing* mediante la elección apropiada de los materiales aislantes y de cubierta del sensor.
- Modelar y analizar los datos experimentales para extraer conclusiones que permitan conocer el funcionamiento y las limitaciones de los sensores y mejorar el diseño. El conocimiento obtenido debe ser trasladable a otros sensores hechos con la misma aproximación aunque distinta tecnología.
- Proponer, implementar y evaluar mecanismos para poder medir fuerzas tangenciales a partir de los sensores fabricados.
- Proponer, implementar y evaluar estrategias para mejorar la sensibilidad y linealidad de sensores táctiles hechos con FSR (*force sensing resistors*) comerciales.

Estructura de la memoria

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

- Capítulo 1: se describen las distintas tecnologías propuestas para hacer sensores táctiles, y en especial la consistente en poner un material activo sobre una matriz de electrodos y explotar la rugosidad en la interfaz de contacto. También se describen los parámetros para evaluar el rendimiento de los sensores táctiles y los requerimientos de los mismos.
- Capítulo 2: se describen realizaciones de sensores con una tecnología de placas de circuito impreso. Para caracterizar los sensores se diseñan e implementan o se adaptan entornos experimentales, y cabe destacar que la caracterización se hace de la matriz completa, no únicamente de algunos táctiles. Se muestran los resultados y se analiza la influencia del tamaño y forma de los electrodos y de la conductividad del polímero. Se hace asimismo un estudio de la dispersión o desapareamiento de la respuesta entre distintos táctiles.
- Capítulo 3: se centra en los sensores construidos por capas (tecnología de *screen-printing*). Se proponen dos realizaciones y se caracterizan sensores con capas de distintas propiedades mecánicas. Se analizan los resultados y a partir de modelos propuestos y simulaciones de elementos finitos (FEA) se obtienen una serie de puntos clave que definen el comportamiento del sensor y nos sirven como guías de diseño.

- Capítulo 4: se proponen diseños de un sensor capaz de medir fuerzas tanto normales como tangenciales.
- Capítulo 5: se proponen y evalúan estrategias para mejorar la respuesta de un sensor basado en sensores comerciales de fuerza.
- Conclusiones: se resumen las principales aportaciones y conclusiones de este trabajo.

El texto incluye además una serie de anexos con información complementaria. En el primero de ellos se enumeran las publicaciones, tanto en actas de congresos como en revistas, fruto del trabajo de esta Tesis. En los siguientes, se describen la electrónica de acondicionamiento usada para la lectura de las imágenes táctiles, así como todas las plataformas de caracterización fabricadas para realizar los estudios aquí expuestos.

Capítulo 1. Antecedentes

1.1. Introducción

En este capítulo se va a describir lo que entendemos por un sensor táctil. Se describirá la evolución que han tenido a lo largo del tiempo y las posibles aplicaciones para su uso. Así mismo se hace una discusión acerca de los requisitos que deben cumplir los sensores y se presenta una clasificación de los mismos en función de su principio de funcionamiento, poniendo en relieve sus ventajas e inconvenientes.

Dado el interés creciente en investigación y aplicación de estos sensores, 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 [Kappasov et al. 2015; Yousef et al. 2011; Dahiya et al. 2010], en estos 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. En la Figura 2 de la Introducción, se mostró un diagrama de bloques de un sistema táctil [Dahiya et al.

2013]. El trabajo de investigación aquí mostrado se centra en la primera capa, es decir en el mecanismo de transducción que establece una relación entre la fuerza y la resistencia, dado que el trabajo se centra en sensores piezorresistivos. Por tanto la descripción que sigue se refiere a esta primera capa. Por último, en los capítulos 4 y 5 se amplía la información de los antecedentes relacionados con los aspectos específicos tratados, es decir la detección de fuerzas tangenciales y los sensores de gran área.

1.2. Sensores táctiles: antecedentes

Las investigaciones acerca de sensores táctiles han seguido una serie de etapas [Lee 2000]: en primer lugar surgen las ideas y se desarrollan experimentos con nuevos métodos de transducción, lo que llevó a nuevos diseños de dispositivos. Después se desarrollan prototipos y se evalúan. Más tarde se desarrollan aplicaciones de prueba y se comparan los resultados. Y finalmente aparecen productos comerciales. En estos momentos se ha llegado a esta última fase, pero los productos tienen un precio muy elevado y la variedad ofertada es pequeña.

La década de los 80 fue un período en el que se investigaron y evaluaron distintos métodos de transducción. Los principales eran métodos basados en la resistencia o la conductancia de los materiales, la capacidad, basados en materiales piezoeléctricos, en efectos ópticos, de ultrasonido y galgas extensiométricas [Dario 1991; Nicholls et al. 1989]. Las investigaciones en este periodo estaban centradas en el diseño de nuevos dispositivos. Pocos autores prestaron atención a la importancia de la tarea a la hora de diseñar las especificaciones de los sensores.

En la década de los 90 aunque el área más activa siguió siendo el diseño y la construcción de nuevos sensores, hubo ciertos avances que enumeramos a continuación [Lee et al. 1999]:

- Mejora en los procesos de encapsulado, en nuevos materiales y en la comprensión del funcionamiento y el rendimiento de los sensores. La mayoría de los sensores se fabrican con silicio (MEMS), son más robustos y duraderos.
- Hay una mayor comprensión del comportamiento de los sensores.
- Mejora en sensores para manos robóticas. Surge la necesidad de cubrir superficies con una alta resolución, de detectar no sólo fuerzas estáticas, sino también su variación

para tareas de reconocimiento del deslizamiento, con un rango dinámico adecuado que haga posible realizar un control en tiempo real.

- Aparición de aplicaciones médicas para los sensores táctiles. Se desarrollan aplicaciones en el campo de la cirugía mínimamente invasiva. Se abre aquí un nuevo campo de aplicación.

Aunque parecía que el entorno de las aplicaciones industriales era el ideal para los sensores táctiles finalmente no ha prosperado en este ámbito como se esperaba. La principal razón es que lo simple es preferido a lo complejo. Se obtienen prototipos en laboratorio que son difíciles de reproducir. En tareas de manipulación se venían usando sistemas de visión, que podían ser apoyados por los sistemas táctiles en situación muy concretas en las que el ángulo de visión era malo por estar el objeto muy cerca o necesitarse el contacto. Si el ambiente es conocido o se puede estructurar probablemente haya alguna solución más simple que los sistemas táctiles.

El ámbito de aplicación de estos sistemas táctiles está en los ambientes no estructurados o peligrosos en los que se hace necesario el contacto con los objetos [Johan Tegin et al. 2005]. Actualmente se ha ido incrementando el campo de aplicación, apareciendo trabajos de sensores multimodales orientados a aplicaciones biomédicas [Lin et al. 2014]. En tareas de manipulación en robótica se pueden distinguir dos tipos de dificultades que hacen necesario el uso de sensores táctiles: que el objeto presente irregularidades o que el ambiente de trabajo esté desordenado; por ejemplo la manipulación de alimentos en una fábrica, tareas de reparación, o asistencia en lugares peligrosos [Vidal-Verdú, Barquero, et al. 2011]. Hay muchos trabajos dirigidos hacia el desarrollo de manos robóticas dotadas del sentido del tacto y en el campo de la rehabilitación o la asistencia a personas mayores o con discapacidad [Trujillo-León et al. 2014; Liu et al. 2009]. Se pretende que los sensores evaluados en este trabajo puedan ubicarse dentro de este contexto.

A continuación se realiza una revisión de las características que un sensor táctil debe tener, siguiendo como modelo ideal el sentido del tacto humano pero siendo conscientes de las limitaciones que aparecen según la tecnología aplicada y las necesidades de cada aplicación. Así mismo se hace una clasificación de los distintos tipos de sensores atendiendo a su principio de funcionamiento.

1.2.1. Requerimientos de un sensor táctil

Como ya se ha mencionado anteriormente el modelo a seguir, a la hora de diseñar las especificaciones de un sensor, es el mecanismo del sentido del tacto humano, mediante el cual somos capaces de detectar la presión de contacto, vibraciones, detectar el deslizamiento [Shirafuji *et al.* 2014], identificar formas y clasificar objetos [Drimus, Kootstra, *et al.* 2014], identificar texturas [Sohgawa *et al.* 2014; Engel *et al.* 2006], sentir dolor y distinguir distintas temperaturas [Yang *et al.* 2009]. En la zona de los dedos, con los que realizamos el agarre de los objetos, tenemos alrededor de 17000 mecanorreceptores [Lederman *et al.* 1988]. Estos son transductores biológicos que detectan deformaciones mecánicas. Pueden ser de varios tipos, los más importantes son: los corpúsculos de Meissner, los discos de Merkel, los corpúsculos de Pacini y los corpúsculos de Ruffini. Cada uno de ellos se puede encontrar a distintas profundidades de la piel como se observa en la Figura 1-1. La inervación de la piel con pelo y la que no lo tiene es diferente, cada una tiene su función. La piel sin pelo como la de los dedos o la palma de la mano y los pies actúa como un órgano que recoge activamente información del entorno. La piel peluda en cambio actúa como un receptor pasivo de estímulos.

Es difícil distinguir qué mecanorreceptor es el responsable de cada una de las sensaciones, aunque sí se tiene una idea de cuáles son los más receptivos a determinados estímulos. Los corpúsculos de Meissner están localizados entre la dermis y la epidermis y son detectores de velocidad; son los encargados de detectar el movimiento sobre la piel. Los discos de Merkel, localizados en la epidermis, son detectores de intensidad; actúan por lo tanto como receptores de presión. Los corpúsculos de Pacini están en la parte más profunda de la dermis y son detectores de aceleración y proveen la sensación de las vibraciones. Por último los corpúsculos de Ruffini, localizados también en la dermis, son detectores de intensidad; son también receptores de presión pero con la capacidad de detectar tensiones cortantes en la piel.

La resolución espacial de estos mecanorreceptores es distinta dependiendo de la parte del cuerpo (ver Figura 1-2). Así por ejemplo dentro de una misma mano tenemos distintas distribuciones, en la yema de los dedos la resolución es mayor, ya que es la parte del cuerpo dedicada al agarre de objetos para su sujeción e identificación. A medida que nos alejamos de la yema de los dedos la resolución va disminuyendo. Además, el sistema nervioso central presta más atención a aquellas áreas más importantes para el sentido del tacto. Por ejemplo si presionamos la punta de nuestro dedo con un objeto que penetra unas micras se activaran

algunos mecanorreceptores; sin embargo si esto mismo lo hacemos sobre la palma de la mano, puede que pase desapercibido y ninguno se active.

Atendiendo al tipo de adaptación, los mecanorreceptores se dividen en dos tipos: los de adaptación lenta (SA) y los de adaptación rápida (FA). Los primeros detectan estímulos estáticos, responden ante el contacto inicial y continúan teniendo actividad mientras el estímulo permanezca activo. En cambio los del segundo grupo responden en los momentos de cambios de estado, en el momento de aplicar o eliminar el estímulo, si éste se mantiene constante la actividad de estos mecanorreceptores va disminuyendo. Los corpúsculos de Ruffini y los discos de Merkel son mecanorreceptores de adaptación lenta, mientras que los corpúsculos de Meissner y los de Pacini son de adaptación rápida.

Atendiendo a las propiedades del campo receptivo y a su ubicación los mecanorreceptores se dividen en dos tipos: los del tipo I que están ubicados en la zona más superficial de la piel y tienen un campo receptivo pequeño y bien definido y los del tipo II que están localizados en las zonas más profundas de la piel y su campo receptivo es más amplio y no está claramente definido. Los corpúsculos de Meissner y los discos de Merkel pertenecen al tipo I, mientras que los corpúsculos de Ruffini y Pacini pertenecen al tipo II.

En la Tabla 1-1 podemos ver cómo se encuadran los cuatro tipos de mecanorreceptores según las clasificaciones anteriores. Los mecanorreceptores SAI son sensibles a los pequeños detalles espaciales dando información de las formas y contornos, los SAII detectan el estiramiento de la piel dando información de la dirección del movimiento y la fuerza, los FAI responden a pequeñas vibraciones y son útiles para detectar el deslizamiento en el momento del contacto y finalmente los FAII responden a eventos mecánicos transitorios de más alta frecuencia.

Tabla 1-1. Clasificación de los mecanorreceptores.

Mecanorreceptor	Tipo
Disco de Merkel	SAI
Corpúsculo de Ruffini	SAII
Corpúsculo de Meissner	FAI
Corpúsculo de Pacini	FAII

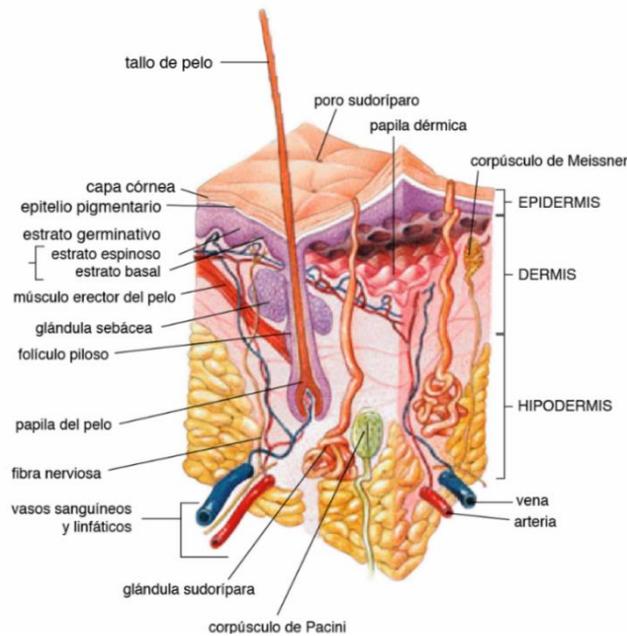


Figura 1-1. Sección de un trozo de piel humana.

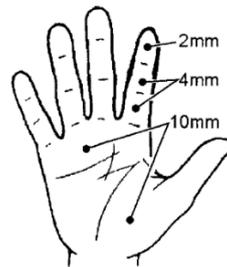


Figura 1-2. Distribución de la resolución de mecanorreceptores en la mano.

Debido a la complejidad del sentido del tacto, a la tecnología actual y al factor económico, intentar abordar el problema de reproducir exactamente el comportamiento de todos los mecanorreceptores es algo impensable. Lo más razonable es detectar las tareas más importantes según la aplicación y a partir de ahí definir las especificaciones de los sensores [Dahiya *et al.* 2010]. En tareas de manipulación es donde más importancia tiene este sentido del tacto, presionando y frotando los dedos sobre un objeto desconocido se obtienen imágenes táctiles que son posteriormente comparadas con patrones para identificar las características del objeto. Para estas tareas de manipulación los requisitos que se exigen a los sensores serían los siguientes [Lee 2000; Liu, H. *et al.* 1995]:

- Capacidad de medir la magnitud, la dirección y localizar el punto de contacto de una fuerza externa aplicada sobre el sensor.
- Alta sensibilidad y robustez para soportar tanto fuerzas normales como tangenciales.
- Un buen rango dinámico y una resolución espacial aceptable (1-2 mm) con una respuesta de al menos 100Hz para ser capaz de detectar el deslizamiento de objetos.
- Baja histéresis y deriva.
- Que sea lineal, aunque se tolera cierta no linealidad.
- Que sea inteligente.
- Flexible, para que pueda adaptarse a cualquier superficie.
- Que consuma poco.
- Fácil de fabricar.
- Duradero y barato.

Los requerimientos, sobre todo en cuanto al rango de fuerzas de operación, dependen mucho de la aplicación para la que van a ser diseñados [Li et al. 2008; Wen et al. 2008; Obinata et al. 2007]. Cada autor evalúa los sensores en distintos rangos de fuerzas o presiones, no debe tener el mismo rango un sensor previsto para ser montado en un manipulador o en una mano de robot [Cannata et al. 2006; Kane et al. 2000] diseñado para agarrar pequeños objetos, que uno para cubrir un brazo robótico [Vidal-Verdú, Barquero, et al. 2011; Cannata et al. 2008] o diseñado para soportar grandes cargas [Paschen et al. 1998]. Para tareas de manipulación de objetos pequeños se requiere un rango del orden de decenas de Newtons, y para piezas muy pesadas puede requerirse fuerzas de agarre del orden de miles de Newtons; este problema se aborda con sensores táctiles basados en sensores de fuerza grandes distribuidos [Mittendorfer et al. 2011]. En aplicaciones industriales es donde se encuentran estas necesidades. Por otro lado las aplicaciones en la cirugía mínimamente invasiva requieren un rango del orden de los milinewtons.

Actualmente está creciendo el interés por la detección de fuerzas tangenciales al contacto, muy útiles para la detección del deslizamiento [Kwon et al. 2010; Beccai et al. 2008; Jian Him Shan et al. 2005]. Para este mismo fin, es necesario que tenga un buen rango dinámico, de forma que permita hacer ciclos de control en tiempo real. Esto tiene que ver con el ancho de banda del sensor, que debe llegar hasta los 100 Hz. La tarea más crítica en este sentido es la detección del deslizamiento, para lo cual algunas fuentes ven necesario un ancho de banda de hasta 200 Hz.

En robótica suele usarse una resolución espacial de entre 1 y 2 mm. La resolución espacial hace referencia a la distancia entre dos tácteles contiguos de una matriz. Algunos sensores dedicados tienen una resolución mayor, en aplicaciones como la cirugía mínimamente invasiva o los lectores de huellas digitales. Todo depende del tamaño de los objetos a manipular o detectar y la necesidad de detección de bordes. Hay sin embargo otros trabajos, como el manejo de objetos pesados, en los que la resolución puede disminuirse [Vidal-Verdú, Barquero, et al. 2011]; o sin tener que soportar grandes cargas, sensores pensados para cubrir grandes superficies sin tener una gran exigencia espacial [Chen et al. 2012; Kita et al. 2010]

Los sensores basados en elastómeros presentan una serie de limitaciones que hay que minimizar: la no linealidad, la deriva, la histéresis y la diafonía. La linealidad es una propiedad deseable, ya que trabajar y controlar sistemas lineales es más sencillo y menos costoso computacionalmente hablando. Además, la linealidad puede tener efectos significativos en la resolución de la medida, dado que habrá regiones de la curva entrada-salida con distinta pendiente (distinta sensibilidad del sensor), y un mismo cambio de la entrada puede ser detectado en una región y no en otra, por originar un menor cambio en la salida. La deriva es el efecto que se observa cuando ante un estímulo constante la salida del sensor varía con el tiempo, en vez de mantenerse constante. Debido a la histéresis la salida en un momento determinado depende de la tendencia del sensor en estados anteriores, las curvas siguen distinto camino en función de si la fuerza está incrementándose o disminuyéndose. La interferencia o diafonía en una matriz es el efecto que un táctel pueda tener sobre otros adyacentes, ya sea de forma mecánica o eléctrica, por la aparición de elementos parásitos. Estos problemas son solucionados o minimizados con un post procesado adecuado de la señal de salida [Sánchez-Durán, Vidal-Verdú, et al. 2015; Sánchez-Durán et al. 2012], y en el caso de la diafonía con una adecuada interfaz de acondicionamiento para la lectura de los sensores [Liu et al. 2010; D'Alessio 1999].

Otra característica deseable es la inteligencia, entendiéndose por tal que parte del pre-procesado de los datos y de la electrónica de acondicionamiento para la lectura esté cerca de la matriz de sensores o integrada en ella [Oballe-Peinado et al. 2012]. De esta forma puede reducirse considerablemente el cableado y por lo tanto el ruido de las señales. Si no fuese así, el sensor podría ver limitado su número de tácteles y su tamaño. Asimismo esta inteligencia permite hacer un pre-procesado local y abordar tareas más complejas.

Ya por último, es importante la flexibilidad para poderse adaptar a la superficie sobre la que se van a colocar los sensores, deben ser duros y fiables para que tengan un ciclo de vida considerable, modulares para facilitar la integración en robots; y finalmente, desde un punto de vista comercial, tener poco consumo para aumentar su autonomía, ser simples y fáciles de fabricar, y baratos.

En resumen, un sensor táctil de propósito general debe ser capaz de detectar la orientación de objetos, su localización, la fuerza de agarre y la fuerza de deslizamiento. Antes, esto se conseguía incorporando varios sensores cada uno para realizar una lectura determinada. Un sensor táctil, como matriz de sensores, debe ser capaz de realizar él solo todas estas medidas.

1.2.2. Tipos de sensores según su principio de funcionamiento

En esta sección se presenta una visión general de los sensores táctiles usados por la comunidad para distintas aplicaciones. Se hace una breve descripción de los principios de funcionamiento y sus características, sus ventajas y los problemas que pueden presentar. Los sensores pueden dividirse en varias categorías, dependiendo de su principio de funcionamiento: piezorresistivos, piezoeléctricos, capacitivos, ópticos, magnéticos, acústicos, etc. Las implementaciones más corrientes son las que usan el principio piezorresistivo, el capacitivo, el piezoeléctrico y el óptico.

Sensores piezorresistivos

Un material piezorresistivo es aquel cuya conductividad eléctrica cambia en función de la deformación mecánica que sufra. Los sensores con esta clase de material pueden ser principalmente de dos tipos:

- Sensores fabricados con elastómeros o polímeros piezorresistivos.
- Sensores fabricados con sistemas electromecánicos (MEMS).

Una implementación sencilla del primer tipo consiste en una matriz de electrodos, que puede fabricarse en una placa de circuito impreso (PCB), sobre la que se posa un material elastómero conductor (piezorresistivo). La conductividad depende de la presión ejercida sobre el material [Hussain *et al.* 2001]. En otros casos el polímero piezorresistivo está colocado entre dos láminas de electrodos, solución comercial adoptada por Tekscan [Papakostas *et al.* 2002]; pero es una solución que utiliza para su polímero conductor materiales caros como la plata, que

incrementa considerablemente el precio del sensor si se quiere cubrir grandes áreas. Algunas implementaciones se basan en gomas conductoras [Mei et al. 2015] y nanotubos de carbono [Ho et al. 2010] en las que la conductividad aumenta al aumentar la concentración de partículas conductoras con el incremento de la presión, según la teoría de la percolación [Drimus, Jankovics, et al. 2014; Kobayashi et al. 2009; Cannata et al. 2005; Hussain et al. 2001]. Las propuestas en [Shimojo et al. 2004] o en [Strohmayr et al. 2010] utilizan electrodos hechos con hilos conductores que se entretajan con la goma conductora y forman un tejido que se adapta a distintas superficies. Otros están basados en el efecto de túnel cuántico [Amarasinghe et al. 2013; Shadow 2012; Hou et al. 2012]. En estos casos la resistencia del material disminuye cuando la fuerza aplicada aumenta. Hay sin embargo alguna implementación en la que el efecto es el contrario, en [Lee et al. 2013; Wang et al. 2009] se usa una goma con nanocompuestos en la que la resistencia aumenta con el incremento de la fuerza debido a la destrucción de los caminos eléctricos. Todas estas propuestas están basadas en el cambio volumétrico de algún tipo de material sensible.

Otras implementaciones, en las que se enmarcan las propuestas analizadas en el presente trabajo, se aprovechan del cambio de área de contacto a escala microscópica debido a las rugosidades de la interfaz de contacto entre el material sensible y los electrodos [Strohmayr et al. 2013; Papakostas et al. 2002; Franklin N. Eventoff 1982]. Muchos sensores siguiendo esta implementación son comercializados [Tekscan 2015b; Interlink Electronics 2015; Sensitronics 2015] y son usados en el área de la robótica [Kalamdani et al. 2006; Jockusch et al. 1997; Schmidt et al. 2006]. El cambio de la conductividad de los materiales sensibles se usa para variar la sensibilidad del sensor. Hay sensores en los que se alcanza una gran resolución espacial [Tekscan 2015b; Sensitronics 2015; Strohmayr et al. 2013], aunque su salida realmente depende de lo moldeable que sea el objeto en contacto con el sensor, cuestión que debe ser tenida en cuenta a la hora de realizar la calibración de los mismos. En estos casos el sensor está compuesto por una matriz de elementos sensibles rodeados por un área no sensible; de manera que si el objeto que entra en contacto con el sensor es poco deformable, la fuerza se concentra en los elementos sensibles y la salida del sensor es mayor que en el caso de un objeto muy deformable [Hartmann et al. 2009]. Los sensores en los que el área activa se corresponde con todo el área de contacto entre el material sensible y los electrodos no sufren el problema anterior, o al menos no en la misma magnitud. Es el caso de los sensores comerciales de Weiss Robotics [Weiss Robotics 2015], en los que los sensores están

compuestos de un material sensible sobre una matriz de electrodos fabricados sobre una placa de circuito impreso flexible [Göger *et al.* 2009].

En todos estos casos si las láminas son flexibles tenemos un sensor capaz de adaptarse a la forma de la superficie a cubrir. Estas son implementaciones sencillas cuyo principal inconveniente es la falta de estabilidad con el tiempo y la temperatura, la histéresis y la falta de linealidad. Un problema que se encuentra a la hora de la realización del acondicionamiento de estos sensores es el de evitar la interferencia o diafonía entre tácteles adyacentes, ya que todos comparten una misma capa piezorresistiva y las mismas pistas de conexión si se organizan en filas y columnas; esto provoca la aparición de elementos parásitos, aunque hay técnicas de circuito para reducir este fenómeno [Liu *et al.* 2010; D'Alessio 1999]. Algunos sensores, los usados en pantallas táctiles resistivas, construyen los tácteles de forma que reducen los cables a 4; se miden dos resistencias en dos ejes x e y , y se obtiene a partir de estas medidas las coordenadas del punto de contacto y la fuerza promedia del mismo [Aguilar *et al.* 2002; Liu, H. *et al.* 1995]. Al no dar una distribución de presiones no se pueden usar para procesamientos más complejos, aunque al tener una reducción en el cableado y tener una electrónica simple con una mayor velocidad de respuesta hace posible la detección del deslizamiento de traslación aunque no el de rotación; cosa que sí pueden hacer los sensores matriciales que detectan distribución de presiones [Melchiorri 2000]. Si la necesidad es la de cubrir grandes áreas puede utilizarse sensores simples de fuerza soldados sobre una PCB flexible, creando una matriz flexible a partir de sensores discretos [Vidal-Verdú, Barquero, *et al.* 2011]; aunque es más barato intentar que en el proceso de fabricación se produzca la matriz lo más completa como sea posible y así tener que ensamblar las mínimas piezas o dispositivos posibles. Hay otras propuestas de sensores para cubrir grandes áreas en los que se usa polidimetilsiloxano (PDMS) que contiene partículas de grafito conductoras; pero el proceso de fabricación se complica, así como el coste final del dispositivo debido a la deposición de capas de oro (por evaporación al vacío) y capas de poliamida (curada a 180 °C) [Someya *et al.* 2004].

Otro tipo de sensores piezo-resistivos son los basados en MEMS; estos permiten una mayor precisión y resolución en la fabricación que los anteriores. Las matrices de los sensores consisten en pequeñas plataformas en cuyos puentes con el entorno se integran resistencias con propiedades piezorresistivas [Wisitsoraat *et al.* 2007; Kim *et al.* 2006]. Son menos sensibles que la opción capacitiva, por lo que puede requerir un táctel mayor, o lo que es lo

mismo, una resolución menor. Presentan una sensibilidad mayor con la temperatura, pero la linealidad es mayor y el diseño admite variaciones sencillas, lo que permite fabricar sensores táctiles capaces de medir no sólo fuerzas normales, sino también fuerzas tangenciales a la superficie del sensor [Engel et al. 2003; Liu et al. 1998]. En sensores que no miden fuerzas tangenciales todas las resistencias en los puentes se emplean para la medida de la fuerza normal, y pueden colocarse en una configuración de puente de *Wheatstone* completo [Lomas et al. 2003]. Algunos utilizan una sola resistencia sensible e inyectan una intensidad constante para leer la tensión que cae sobre la misma. Actualmente la mayoría de los sensores basados en tecnología MEMS miden también las fuerzas tangenciales [Huang et al. 2010; Beccai et al. 2008; Wen et al. 2008; Hwang et al. 2006; Jian Him Shan et al. 2005; Kane et al. 2000; Mei et al. 2000]. El inconveniente del uso de MEMS con silicio es la falta de flexibilidad y la fragilidad que presentan; para solucionar este problema se desarrollan implementaciones de MEMS sobre circuitos impresos flexibles o integrados en polímeros [Kilaru et al. 2013; Makihata et al. 2012; Hu et al. 2010; Engel et al. 2005]. Por otro lado, la ventaja en términos de precisión y la gran resolución que puede obtenerse con este tipo de sensores, se ve afectada por la necesidad de usar una capa externa para protegerlo y mejorar las características de impedancia en la interfaz de contacto. Es habitual el uso de gomas o elastómeros para estas capas externas cuyas propiedades físicas es una fuente de errores para la salida del sensor, introduciendo efectos no deseados como la histéresis y la deriva. Teniendo en cuenta estos efectos, el uso de tecnologías más baratas y más sensibles a errores, no tienen necesariamente por qué dar un resultado mucho peor en términos de rendimiento.

Por lo general los sensores táctiles basados en principios piezorresistivos tienen una electrónica de acondicionamiento para la lectura de la salida más sencilla que los sensores basados en principios capacitivos. Es por eso que los primeros son más frecuentes. Hay varias implementaciones de sensores compactos en los que la electrónica de acondicionamiento está muy cerca de la matriz de sensores, que es requisito para darle carácter de inteligencia al mismo [Cannata et al. 2006; Weiss, K. et al. 2004]. Hay también implementaciones para la conexión directa de los sensores táctiles a dispositivos programables, lo que da mucha flexibilidad a la hora de realizar un pre-procesado previo de los datos adquiridos [Vidal-Verdú, Oballe-Peinado, et al. 2011; Oballe-Peinado et al. 2009].

La gran ventaja de los polímeros conductivos es su bajo coste en términos de producción y la flexibilidad y capacidad del material de adaptarse a las formas.

Sensores capacitivos

Los sensores basados en principios capacitivos explotan la dependencia de la capacidad con la presión. Para un condensador plano la capacidad viene dada por la siguiente ecuación:

$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{A}{d} \quad (1.1)$$

donde ε_0 es la permitividad del vacío, ε_r es la constante dieléctrica o permitividad relativa del material dieléctrico entre las placas del condensador, A es el área efectiva de las placas y d es la distancia entre las placas o el espesor del dieléctrico. Por lo tanto la variación de la capacidad depende del área del condensador, de su distancia entre placas y del material usado como dieléctrico. Haciendo que alguno de estos parámetros varíe con la presión aplicada tendremos una variación de la capacidad con la presión.

La implementación más sencilla e intuitiva es que la distancia entre las placas varíe con la presión en cada táctel [Salo et al. 2003; Gray et al. 1996]; tendremos así un sensor táctil capacitivo. Hay sin embargo algunos sensores que utilizan la dependencia del área [Rocha et al. 2008b; Ko et al. 1997]. La dependencia de la permitividad puede explotarse en aplicaciones médicas para detectar cambios en los tejidos humanos. [Liu et al. 2011] propone un sensor capacitivo en el que el rango y la sensibilidad se modifica variando las propiedades mecánicas del dieléctrico usado, y [Suzuki et al. 2012] propone el uso de poliuretano como material dieléctrico.

Con respecto a la opción piezorresistiva su salida es menos lineal, aunque la linealidad de la salida depende mucho del acondicionamiento usado, y se ve afectada por la aparición de condensadores parásitos. Son más sensibles, por lo que son capaces de detectar pequeños cambios en la fuerza aplicada, esto permite reducir su tamaño, y son menos vulnerables a cambios de temperatura.

La conversión a sensores capaces de medir fuerzas tangenciales no es tan directa, aunque hay algunos trabajos en esta línea. Existen algunas implementaciones en las que se coloca una plataforma sobre cuatro condensadores, y midiendo el cambio relativo de capacidades puede extraerse información de las fuerzas tangenciales aplicadas [Bekhti et al. 2014; Lee et al. 2008; Chu et al. 1995]; un cambio uniforme en los cuatro condensadores indica una fuerza normal. Una limitación a esta implementación es el pequeño rango de operación, aunque éste puede modularse con el grosor de la membrana que presiona a los condensadores.

Las implementaciones en silicio permiten una resolución espacial muy elevada, del orden de centenares de micras, y la implementación de circuitería de acondicionamiento en el mismo sustrato [Wolffenbuttel 1994]. Hay sensores en los que cada táctel está compuesto por dos condensadores sensibles y otros dos de referencia pasivos utilizados para compensar interferencias [Leineweber et al. 2000], capacidades parásitas, la dependencia con la temperatura, etc. Para aumentar la sensibilidad del sensor pueden colocarse varios condensadores en paralelo [Paschen et al. 1998].

Al igual que con los sensores piezorresistivos, se exploran las implementaciones en las que los elementos capacitivos se integran en electrodos flexibles, telas y elastómeros, y están presentes en el mercado para diversas aplicaciones [Pressure Profile Systems, Inc. 2015], y algunos específicamente creados para robótica [Schmitz et al. 2010; Cannata et al. 2008; Lee et al. 2006].

Sensores ópticos

Los primeros diseños de sensores ópticos realizaban una medida de la intensidad luminosa que alcanzaba a un foto-receptor [Hellard et al. 2006] o usando una cámara de estado sólido. La tendencia actual va en la dirección del uso de fibra óptica de Bragg (FBG). La característica de este tipo de fibra óptica es que es capaz de reflejar la luz que poseen unas determinadas longitudes de onda y transmitir el resto de longitudes de onda. El modo en el que funcionan los sensores basados en este principio es el siguiente: se emite un haz de luz con un gran espectro de frecuencias, al atravesar la fibra óptica los haces pertenecientes a ciertas longitudes de onda (longitudes de onda de Bragg) son reflejadas dependiendo del período de la rejilla de Bragg y del índice de refracción de la fibra. Estos parámetros varían cuando se aplica algún tipo de perturbación externa (por la aplicación de una fuerza, por ejemplo) [Cowie et al. 2007].

Hasta el momento sólo se detectaban fuerzas normales al contacto, pero comienzan a aparecer trabajos para detectar la dirección de la fuerza aplicada [De Maria et al. 2012; Yoshikai et al. 2009].

En general los sensores basados en principios ópticos tienen la ventaja de permitir una gran resolución espacial [Buyuksahin et al. 2014] sin que haya interferencia en las señales de salida, el conexionado se reduce, es inmune al ruido electromagnético y son sensores que se integran

con facilidad. Como contrapartida tenemos que son muy sensibles a las vibraciones, complejos y costosos.

Sensores piezo-eléctricos

Por la naturaleza de su funcionamiento, los sensores basados en este principio piezoeléctrico son más aptos para la detección de características dinámicas como las vibraciones, aunque también son aptos para la detección de la fuerza aplicada y la deformación. Recordando la clasificación de los mecanorreceptores este tipo de transducción se asocia a los de adaptación rápida (FA). Los materiales más usados en estos tipos de sensores son cerámicos como el titanato circonato de plomo (PZT) o polímeros como el fluoruro de polivinilideno (PVDF) [Seminara et al. 2014]. [Maita et al. 2014] propone el uso de un nuevo material de silicio policristalino con nitruro de aluminio a baja temperatura como elemento piezo-eléctrico. Estos materiales pueden usarse en el modo directo de transducción o en el inverso. En el modo directo, al aplicar una fuerza mecánica al material originando su deformación, el potencial eléctrico varía. En modo inverso, se aplica un potencial al material que origina su deformación. En aplicaciones de sensores el modelo eléctrico equivalente de estos elementos piezoeléctricos es una fuente de tensión en serie con un condensador o una fuente de intensidad en paralelo con un condensador. Por lo tanto el efecto observado es que la tensión o intensidad de salida es proporcional a la fuerza mecánica aplicada al sensor. Estos sensores responden sólo ante los cambios de la entrada, no registran ningún estímulo estático.

Estos materiales piezo-eléctricos son en general muy sensibles a cambios dinámicos y vibraciones, por lo que son usados en la detección del deslizamiento y en el reconocimiento de texturas [Jamali et al. 2010; Tada et al. 2003]. La realización más directa consiste en colocar una lámina de material con propiedades piezoeléctricas sobre una matriz de electrodos, pero hay otras propuestas más complejas, como colocar el material sobre la puerta de un transistor MOSFET para que la fuerza sobre ella module la corriente de drenador [Dahiya et al. 2007].

1.3. Tecnología de CIDETEC

Los sensores propuestos en este trabajo y que serán analizados en los siguientes capítulos, se enmarcan dentro de los sensores piezorresistivos. En concreto las implementaciones llevadas a cabo mediante una matriz de electrodos sobre la que se posa algún tipo de lámina

piezorresistiva. El Centro tecnológico CIDETEC [Cidetec 2015] desarrolla una tecnología basada en polímetros conductores piezorresistivos depositados sobre láminas flexibles. Esto permite la construcción de sensores flexibles aptos para adaptarse a superficies que no sean planas, siempre y cuando el sustrato de los electrodos sea también flexible. Cuentan con un proceso de fabricación propio y barato que permite la construcción de sensores de gran área sin un incremento económico desorbitado.

Los sensores desarrollados por CIDETEC están diseñados para cubrir grandes superficies con una baja resolución, del orden de los centímetros o mayor [Ochoteco et al. 2007]. En este trabajo, partiendo de la misma tecnología, se diseñan matrices de electrodos con una resolución mayor, del orden de los milímetros, para analizar la viabilidad de fabricar sensores de mayor resolución con la misma tecnología.

Los sensores están formados por una lámina de electrodos en forma de matriz sobre la que se posa una lámina flexible de material piezorresistivo. Al aplicar una presión al sensor la resistencia entre los electrodos disminuye. Éste es un diseño que otros autores han seguido para el desarrollo de sensores para manos de robots [Cannata et al. 2006; Weiss, K. et al. 2004]. Las matrices de electrodos se fabrican con dos tecnologías distintas: mediante una placa de circuito impreso (PCB) y mediante *screen-printing*. El primer método consiste en diseñar unos electrodos dispuestos en forma de matriz sobre una placa de circuito impreso flexible, permitiendo así adaptarse a superficies curvas, aunque con un radio de curvatura no demasiado pequeño. El diseño en PCB permite una resolución espacial mayor. El segundo método consiste en fabricar la matriz de electrodos sobre un sustrato plástico mediante serigrafía. Se obtiene una flexibilidad mayor, pero la precisión a la hora de la fabricación es menor que el primer método, por lo que permite una menor resolución. Más adelante se explican con más detalle ambos métodos de fabricación para las matrices de electrodos.

Los sensores así fabricados presentan unas características pobres en términos de errores y deriva, pero pueden ser utilizados [Sánchez-Durán, Hidalgo-López, et al. 2015]. Además, con un procesamiento posterior de los datos, corrección de la histéresis y la deriva y/o el calibrado de la matriz, se pueden mejorar las características de los sensores [Sánchez-Durán, Vidal-Verdú, et al. 2015].

1.3.1. Polímero piezorresistivo

El material piezorresistivo al que denominamos lámina PEDOT se fabrica depositando sobre un sustrato plástico flexible una tinta conductora piezorresistiva basada en polímeros conductores. Estos materiales electroactivos están siendo usados en muchas aplicaciones industriales [Kirchmeyer *et al.* 2005]. Para la elaboración de dicha tinta se emplea una solución acuosa de Poly(3,4-etilenodioxitiofeno). Esta solución se prepara usando un procesador de ultrasonido (modelo UP400S) durante la síntesis. Se disuelve en 100ml de agua destilada etilenodioxitiofeno (1 ml, 9.4 mmol) y 3.5 g de estireno polisulfonato (PSS). A esta mezcla se le añade gota a gota durante 4 minutos peroxidisulfato de amonio (6,58 g, 28,8 mmol). Tras una hora reaccionando bajo la radiación ultrasónica del procesador de ultrasonido se obtiene la disolución PEDOT de un color azul oscuro.

Sobre una lámina de material plástico (tereftalato de polietileno) de 5x5 cm² y 70 μm de espesor se deposita 50 μl de la disolución PEDOT. Se hace girar la lámina en una centrifugadora a 1500 rpm durante 1 minuto para que la disolución se distribuya de la forma más uniforme posible. Trascurrido ese tiempo se deja secar a temperatura ambiente. De esta forma se obtiene una lámina flexible piezorresistiva.

Un aspecto clave de la lámina obtenida es la presencia de rugosidades en la capa del material conductor PEDOT depositado a escala microscópica con un tamaño medio de grano de 50 nm [Pomposo *et al.* 2006]. El principio básico de funcionamiento es el aumento del área efectiva de contacto entre el polímero y los electrodos con el aumento de la presión ejercida, y por lo tanto el aumento de la conductividad medida entre los electrodos; o lo que es lo mismo la disminución de la resistencia. En la Figura 1-3 se pueden observar las rugosidades de la superficie de la lámina PEDOT. Las láminas de PEDOT fabricadas con sus características para la realización de los experimentos se muestran en la Tabla 1-2.

Tabla 1-2. Láminas de material PEDOT fabricadas.

Nombre	Características
M1	Espesor de 70 μm y conductividad de 0.082 S/cm
M4	Espesor de 70 μm y conductividad de 0.169 S/cm

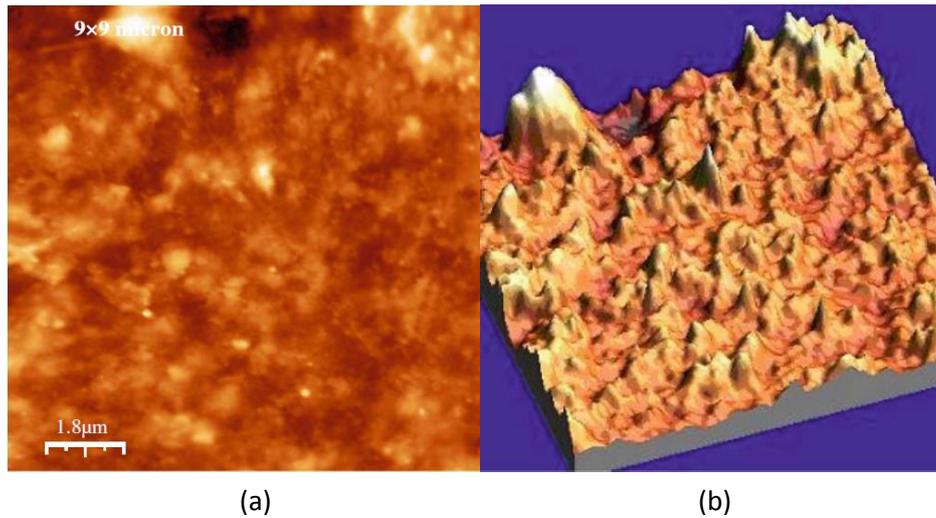


Figura 1-3. Ilustración de las rugosidades de un trozo de lámina PEDOT en (a) 2 dimensiones y (b) 3 dimensiones [Ochoteco et al. 2007].

1.3.2. Funcionamiento del táctel

Un táctel está formado básicamente por dos electrodos y la lámina PEDOT sobre ellos. Los electrodos pueden fabricarse con diferentes tecnologías, formas y tamaños; de la misma forma la lámina PEDOT puede tener diferente conductividad y grosor. Sobre esta última lámina se coloca un elastómero para distribuir la fuerza aplicada y proteger al sensor. Todos estos elementos influyen en mayor o menor medida en la salida del sensor, pero los elementos esenciales son los electrodos y la lámina PEDOT.

Cuando sobre un táctel no se ejerce ninguna presión los dos electrodos que lo componen están en circuito abierto o la resistencia medida entre ellos es muy grande, del orden de las centenas de mega ohmios. A medida que la presión sobre el tactel aumenta, el valor de la resistencia medida entre ellos disminuye. A nivel microscópico, se observan rugosidades tanto en la lámina PEDOT como en la superficie de los electrodos. El efecto al aumentar la presión sobre el táctel es el aplastamiento de estas rugosidades unas contra otras, aumentando de esta forma el área efectiva de contacto entre el PEDOT y cada uno de los electrodos, como puede verse en la Figura 1-4 [Weiss et al. 2005]. De esta forma, al aumentar la presión aumenta el área efectiva de contacto, lo que hace disminuir la resistencia del contacto.

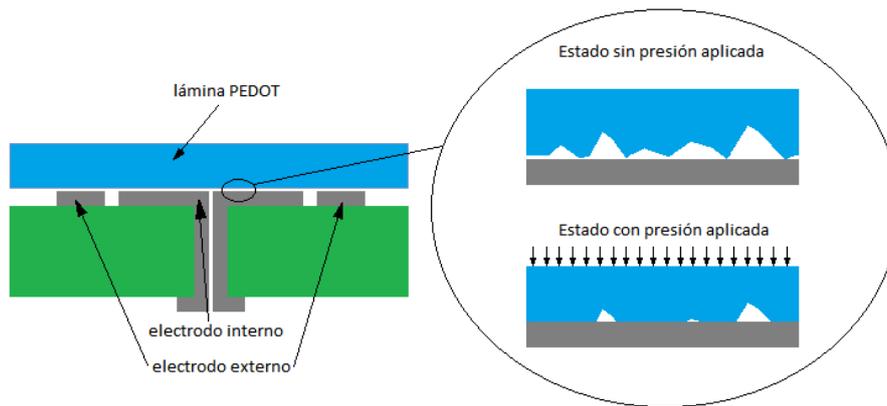


Figura 1-4. Establecimiento del contacto entre la lámina PEDOT y los electrodos.

El modelo eléctrico del táctel es por lo tanto el de tres resistencias en serie, como se muestra en la Figura 1-5 [Castellanos-Ramos *et al.* 2010].

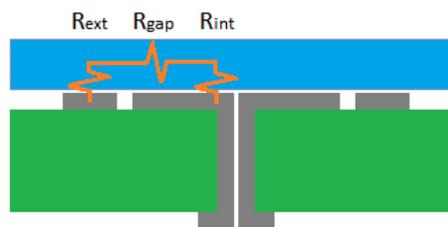


Figura 1-5. Esquema eléctrico de un táctel.

R_{ext} y R_{int} representan a las resistencias de contacto que se establecen entre el PEDOT y el electrodo externo e interno respectivamente. R_{gap} es la resistencia volumétrica del PEDOT que es constante y se define en el proceso de fabricación. La resistencia de cada electrodo se puede expresar como una función monótona decreciente de la presión aplicada $f(P)$ e inversamente proporcional al área de contacto.

$$R = \frac{f(P)}{A} \tag{1.2}$$

Por lo tanto, cuanto mayor sea la presión aplicada, menor será el valor de la resistencia; y cuanto mayor sea el área del electrodo, menor será también la resistencia del contacto de dicho electrodo.

1.3.3. Parámetros de rendimiento

Las pruebas realizadas a los sensores consisten en la aplicación de una fuerza determinada y la medición de la salida de cada táctel del mismo. La aplicación de la fuerza se realiza de forma paulatina en los experimentos estáticos y de forma brusca, mediante la aplicación de un pulso de presión, en las pruebas dinámicas. Con los resultados obtenidos se extraen una serie de características o parámetros que definen el rendimiento del sensor.

Linealidad y sensibilidad

Las pruebas estáticas que se realizan a los sensores consisten en aplicar una carga determinada al sensor completo, o táctel a táctel, e ir registrando el valor de la salida del sensor ante cada carga aplicada. En la Figura 1-6 se puede observar una de estas curvas en las que en color azul se muestra la curva de carga del sensor y en rojo la curva de descarga.

La sensibilidad del sensor se define como la primera derivada de la salida del sensor. En el caso en el que la salida fuese lineal, la sensibilidad sería un valor constante en todo el rango de funcionamiento del sensor. Pero no es el caso de los sensores descritos, cuyas curvas de salida no son lineales y por lo tanto la sensibilidad depende de la fuerza aplicada. Se hablará por lo tanto de mayor o menor sensibilidad de los sensores haciendo referencia a un rango concreto en el que la curva se pueda considerar lineal.

Para tener un parámetro objetivo de esta linealidad, se usa el área bajo la curva de la segunda derivada de la salida del sensor. Cuanto más se acerque a cero significará que la curva presenta menos cambios de pendientes.

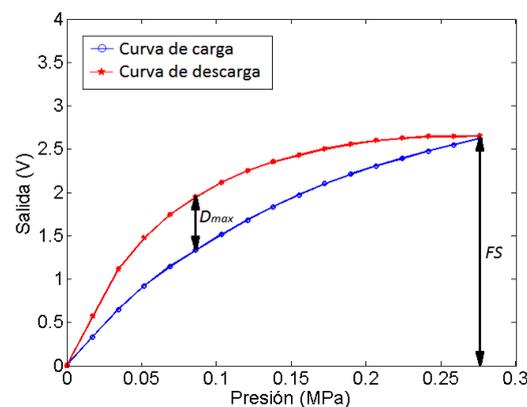


Figura 1-6. Ejemplo de salida de un sensor con histéresis.

Histéresis

La histéresis consiste en el fenómeno por el cual la salida de un táctel ante una determinada presión aplicada puede tener distinto valor en función de si la presión anterior era mayor o menor que la presión actual. En los sensores propuestos la curva que representa la salida en voltios frente a la presión aplicada cuando se parte de la máxima presión y se disminuye hasta la mínima presión tiene un valor mayor que la curva obtenida cuando se parte de la mínima presión y ésta se incrementa hasta la máxima presión. La histéresis (*His*) se cuantifica en este documento como el cociente entre la máxima distancia vertical (D_{max}) y el fondo de escala del sensor (*FS*), ver Figura 1-6.

$$His = \frac{D_{max}}{FS} \cdot 100 \quad (1.3)$$

Dispersión entre tácteles

Como el sensor está formado por un conjunto de tácteles, se define un parámetro al que denominamos dispersión entre tácteles (*Dis*) que mide la disparidad en la salida de los distintos tácteles del sensor cuando se les aplica la misma presión a todos ellos. La dispersión entre tácteles es igual a la desviación estándar de la salida de todos los tácteles. Para que los valores atípicos de una matriz no influyan en el cálculo de la dispersión, se realiza dos cálculos iterativos de la media de la matriz para obtener luego el valor de la dispersión de la siguiente forma:

$$\bar{M}_1 = \frac{\sum_i \sum_j m_{ij}}{N \cdot M} \quad (1.4)$$

$$\sigma_1 = \sqrt{\frac{\sum_i \sum_j (m_{ij} - \bar{M}_1)^2}{N \cdot M}} \quad (1.5)$$

$$\bar{M}_2 = \sum_i \sum_j m_{ij}, \forall i, j \text{ tal que } m_{ij} \in [\bar{M}_1 - 2 \cdot \sigma_1, \bar{M}_1 + 2 \cdot \sigma_1] \quad (1.6)$$

$$Dis = \sqrt{\frac{\sum_i \sum_j (m_{ij} - \bar{M}_2)^2}{N \cdot M}}, \forall i, j \text{ tal que } m_{ij} \in [\bar{M}_1 - 2 \cdot \sigma_1, \bar{M}_1 + 2 \cdot \sigma_1] \quad (1.7)$$

donde i y j indican el índice de la fila y columna respectivamente, y N y M son el número total de filas y columnas del sensor respectivamente. El valor de la salida de un táctel en una fila y columna determinada es m_{ij} , \bar{M}_1 es la media de los valores de salida de todos los tácteles de la matriz y σ_1 su desviación típica. \bar{M}_2 es la media de la matriz habiendo eliminado del cálculo los tácteles anómalos.

Respuesta a un pulso

Una de las pruebas dinámicas realizadas sobre los sensores es su respuesta ante un pulso de presión. En este caso se miden dos parámetros, uno de ellos es el tiempo de subida de la respuesta del sensor, medido como el tiempo transcurrido hasta que la señal de salida alcanza el 90% de su valor final desde el 10% del mismo. Y el otro parámetro es el retraso con respecto a la señal de excitación.

Deriva

El fenómeno de deriva es aquel por el que la señal de salida aumenta con el tiempo ante un estímulo constante. Se medirá en forma porcentual como la máxima variación que sufra la señal tras un determinado intervalo de tiempo.

$$Der = \frac{V_t - V_0}{V_t} \cdot 100 \quad (1.8)$$

donde V_t es el valor de la salida en el instante t y V_0 el valor de la salida en el instante inicial.

Capítulo 2. Sensores fabricados con tecnología PCB

2.1. Introducción

Los sensores fabricados con esta tecnología ya se han enmarcado en el capítulo anterior dentro de los sensores piezorresistivos implementados con un sustrato de electrodos dispuestos en forma matricial al que se superpone el material con el polímero piezorresistivo (lámina PEDOT). El sustrato para la fabricación de la PCB es flexible, dando lugar a sensores flexibles capaces de adaptarse a superficies curvas.

En este capítulo vamos a presentar primero los sensores propuestos y a caracterizarlos desde el punto de vista de su salida tanto estática como dinámica. Se muestran ciertas características que este tipo de sensores poseen como la histéresis, la deriva y la dispersión; y se realiza una discusión acerca de cómo ciertos parámetros, como el tipo de geometría de los electrodos, el balanceo de sus áreas o la conductividad de las láminas PEDOT, afectan a estos parámetros y a la sensibilidad de los sensores.

A lo largo de este capítulo, la salida del sensor se refiere a la media de la salida de todos sus tácteles calculada según las ecuaciones (1.4)-(1.6). Con estos datos se calcula, mediante la ecuación (1.7), la dispersión entre los tácteles del sensor. En las últimas secciones del capítulo se realizan una serie de experimentos destinados a identificar el origen de esta dispersión.

2.2. Diseño y fabricación de las matrices

Las matrices de electrodos construidas con la tecnología PCB se fabrican sobre un sustrato FR4 semiflexible de 0.2 mm de espesor. Son circuitos realizados en dos capas de cobre de 18 μm recubiertas de un baño de oro químico hasta un espesor total de 35 μm . Los electrodos están dispuestos en la misma capa de la placa de forma que al posicionar encima la lámina PEDOT y

ejercer presión se establece un camino eléctrico entre ellos. En la Figura 2-1 se observa un esquema de uno de los tácteles.

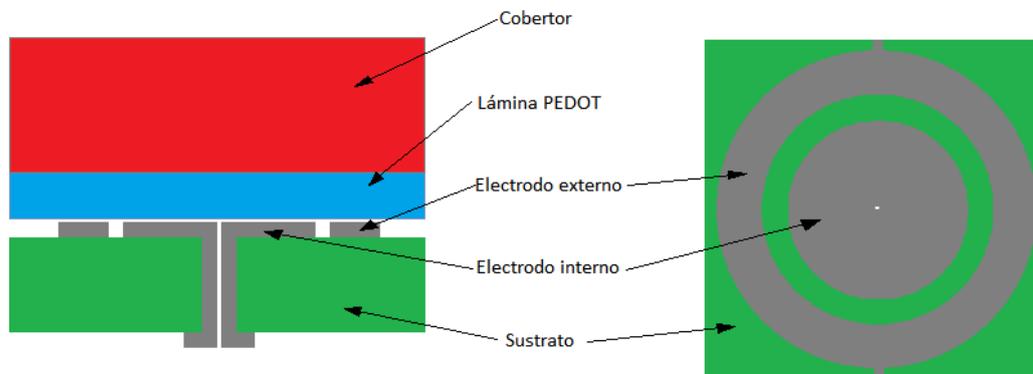
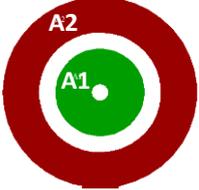
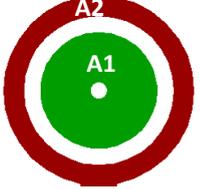
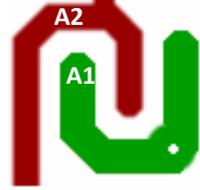


Figura 2-1. Esquema de un táctel fabricado con tecnología de PCB flexible (m101v2).

Las matrices constan de 16 filas y 16 columnas, teniendo un total de 256 tácteles en un área cuadrada de 40.64 mm de lado (16.52 cm² de área). Para minimizar el número de cables necesarios se agrupan las filas y las columnas de forma que todos los tácteles de una misma fila están conectados entre sí, mediante sus electrodos internos; al igual que todos los tácteles de una misma columna, mediante sus electrodos externos. Una matriz de 256 tácteles tiene por lo tanto un conector de 32 vías, 16 que se corresponden con las filas y las otras 16 con las columnas.

Se fabrican varios tipos de matrices con diferentes formas y tamaños. Con ellas se compara el comportamiento a la salida de sensores con diferentes formas de tácteles, diferentes tamaños y diferente nivel de balanceo de áreas entre los electrodos del táctel. Según el tamaño tenemos matrices con una resolución espacial (distancia entre dos centros de tácteles contiguos) de 2.54 mm y 1.905 mm. Atendiendo a la forma tenemos matrices con forma de peine y con círculos concéntricos; estas dos formas son usadas por otros autores [Liu *et al.* 2009; Melchiorri 2000; Cannata *et al.* 2006]. La Tabla 2-1 resume los tipos de matrices fabricadas. Las matrices m101, m101v2 y m201v3 tienen una resolución espacial de 2.54 mm, mientras que la matriz m10075v2 tiene una resolución de 1.905 mm. Las áreas de los electrodos interno y externo de las matrices son iguales (están balanceados) en el caso de las matrices m101v2, m203v3 y m10075v2, mientras que no lo están en la matriz m101. En la Figura 2-2 se puede observar cada una de las matrices completas fabricadas.

Tabla 2-1. Forma y tamaño de los distintos electrodos fabricados con tecnología PCB.

m101	m101v2	m201v3	m10075v2
			
A1 = 0.86 mm ²	A1 = 1.5 mm ²	A1 = 1.53 mm ²	A1 = 0.7 mm ²
A2 = 2.58 mm ²	A2 = 1.55 mm ²	A2 = 1.53 mm ²	A2 = 0.73 mm ²
AT = A1+A2	AT = A1+A2	AT = A1+A2	AT = A1+A2
AT = 3.44 mm ²	AT = 3.05 mm ²	AT = 3.06 mm ²	AT = 1.43 mm ²
A2/A1 = 3	A2/A1 = 1.03	A2/A1 = 1	A2/A1 = 1.04
Resolution: 2.54 mm	Resolution: 2.54 mm	Resolution: 2.54 mm	Resolution: 1.905 mm
Tamaño matriz: 16x16	Tamaño matriz: 16x16	Tamaño matriz: 16x16	Tamaño matriz: 16x16

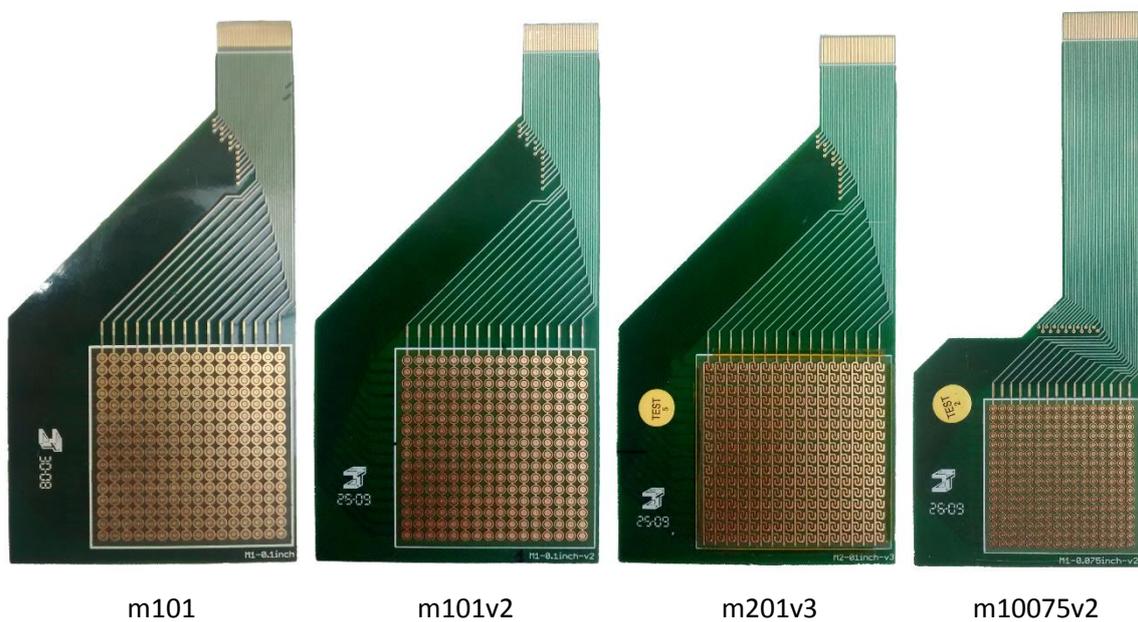


Figura 2-2. Fotografías de las matrices m101, m102v2, m201v3 y m10075v2.

2.3. Entorno de caracterización.

Para realizar las pruebas de caracterización de los sensores se usan una serie de plataformas consistentes en dispositivos que ejercen una fuerza o presión conocida sobre la superficie de los sensores y una electrónica de acondicionamiento adecuada para leer la información de ellos. De esta forma podemos comparar la salida de los sensores ante un mismo estímulo.

Por la forma en la que se realizan las conexiones de la matriz de electrodos, que reduce el número de conexiones del sensor, se hace necesaria una etapa de acondicionamiento para que al direccionar un táctel se cancelen las resistencias parásitas que pudieran interferir en la medida [Liu *et al.* 2010; D'Alessio 1999]. Se evita así el efecto denominado diafonía. En el Anexo B se amplía la información del diseño de la placa de acondicionamiento para la lectura de los sensores.

Para realizar las pruebas preliminares se usó una plataforma consistente en una base móvil para posicionar el sensor y un motor paso a paso que acciona un émbolo con un muelle en su interior para ejercer la fuerza sobre el sensor (ver Figura 2-3). Al final del émbolo se sitúa un sensor de fuerzas con el que se obtiene la información de la fuerza aplicada [Castellanos *et al.* 2008]. En el Anexo C se amplía la descripción de esta plataforma de caracterización denominada plataforma de caracterización de fuerzas normales. Este tipo de sistema es usado por otros autores para la realización de los experimentos [Weiss *et al.* 2005] y está diseñado para ejercer una fuerza sobre un solo táctel de la matriz o sobre un área localizada de la misma.

Como se ha mencionado anteriormente, una de las características de los sensores tratados es la dispersión entre tácteles, por lo que es importante evaluar la matriz en su conjunto. Dicha evaluación se realiza aplicando una fuerza uniforme sobre toda la superficie del sensor. Cada táctel tendrá un valor de salida, y la media aritmética de todas ellas será la salida del sensor como conjunto. Aunque esta dispersión se puede corregir posteriormente con un proceso de equilibrado del sensor, es aconsejable minimizar su valor. En esta sección se usará para comparar los distintos sensores este valor medio del valor de todos los tácteles de la matriz calculados según las ecuaciones (1.4)-(1.6). Por errores de fabricación tanto en los electrodos como en las láminas PEDOT, puede que algunos tácteles presenten comportamientos anómalos. Para que estos tácteles no afecten a la salida del sensor deben ser eliminados del cálculo de la media. El proceso seguido es el siguiente: se calcula la media y la desviación

estándar (σ) con todos los tácteles del sensor, los puntos que quedan fuera del intervalo $[media - 2 \cdot \sigma, media + 2 \cdot \sigma]$ se eliminan para volver a calcular la media definitiva de la salida del sensor (ver sección 1.3.3).

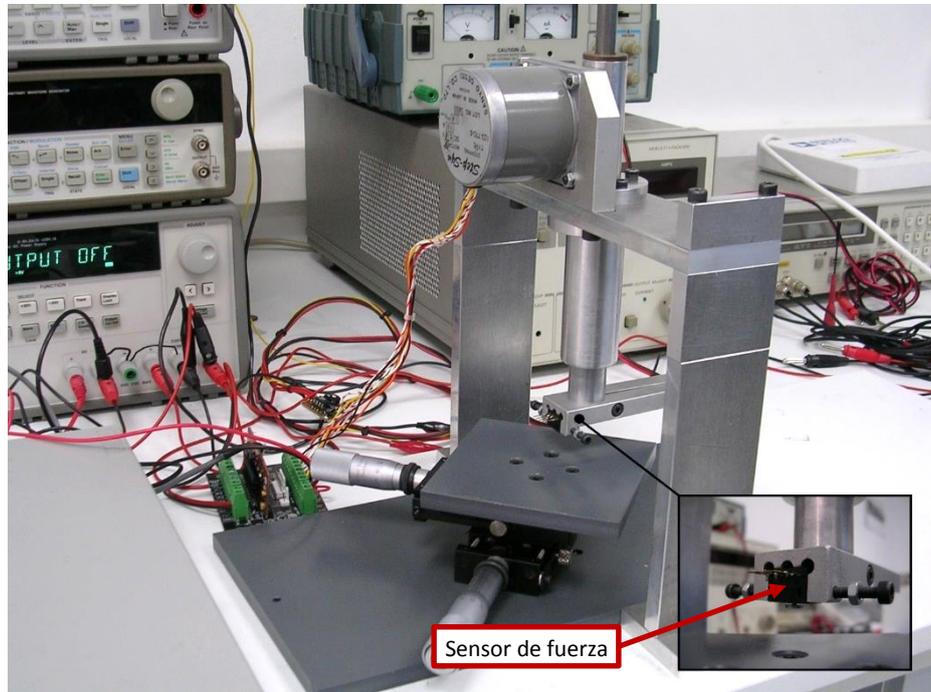


Figura 2-3. Sistema de caracterización de fuerzas normales.

Para ejercer una presión uniforme en toda la superficie del sensor se utiliza el calibrador PB100E comercializado por la empresa Tekscan. Se trata de un sistema neumático que garantiza la aplicación de una presión uniforme para los sensores tratados. Es un sistema manual para la aplicación de la presión que se modifica para que pueda ser controlado por un PC y poder así realizar pruebas de forma automatizada (ver Figura 2-4). Este sistema al que denominamos sistema de caracterización neumático se describe con mayor detalle en el Anexo D.

Los sistemas anteriormente descritos realizan una caracterización estática, con el sistema se aplica una carga al sensor y se mide la respuesta del mismo. Se obtienen curvas que relacionan la salida del sensor con la carga aplicada. Para reflejar la histéresis cada ciclo consta de un trayecto de carga, en el que el sensor es cargado desde una fuerza o presión nula hasta una fuerza o presión máxima, y un ciclo de descarga, en el que la fuerza o presión sigue el trayecto inverso al anteriormente descrito.

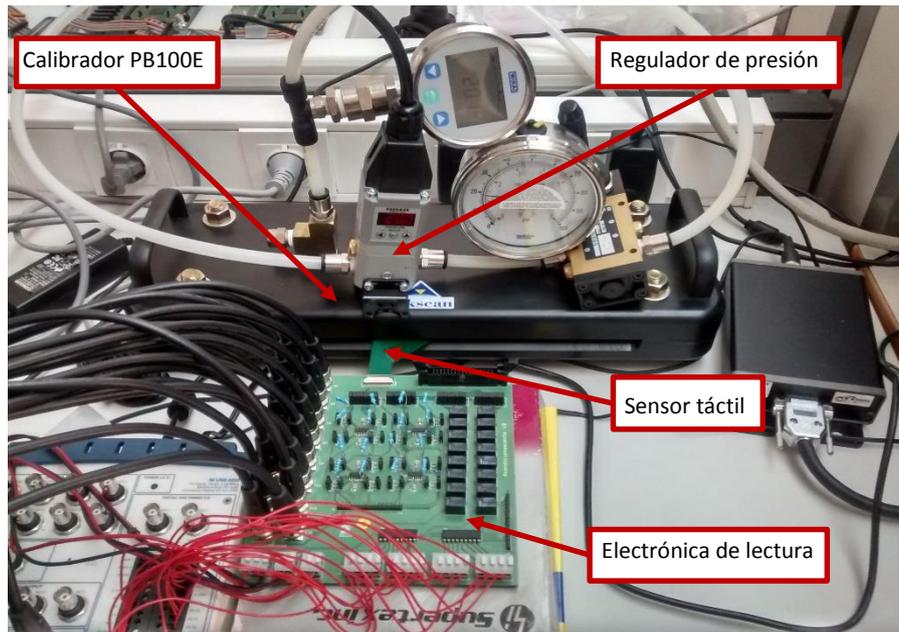


Figura 2-4. Sistema de caracterización neumático.

Además de la caracterización estática, se realiza una caracterización dinámica consistente en medir la respuesta del sensor (el tiempo de subida de la salida) cuando se le estimula con un escalón de fuerza. Los sistemas anteriores no poseen la capacidad de aplicar una fuerza o presión con una velocidad suficiente para generar el estímulo necesario, por lo que se diseña una nueva plataforma neumática para realizar este experimento (ver Figura 2-5). El sistema conecta, mediante una electroválvula, una cámara de aire comprimido con un tubo terminado en uno de sus extremos con una membrana flexible. Es esta membrana la que entra en contacto con el sensor para aplicar el estímulo. Junto a la membrana se localiza un transmisor de presión, que suministra una tensión proporcional a la presión ejercida en el tubo y la membrana. El modo de proceder para la realización de una prueba es ajustar manualmente el manómetro con el valor de presión del pulso que se desea generar, y a continuación generar la señal de activación de la electroválvula para activarla y generar el pulso de presión en la membrana que se lo transmitirá al sensor. La señal de entrada medida es el pulso eléctrico generado por el transmisor de presión (que representa la presión ejercida sobre un táctel), y la señal de salida medida es la señal eléctrica proporcionada por la electrónica de acondicionamiento del sensor. En el Anexo E se explica de forma más detallada este sistema denominado sistema de caracterización dinámico.

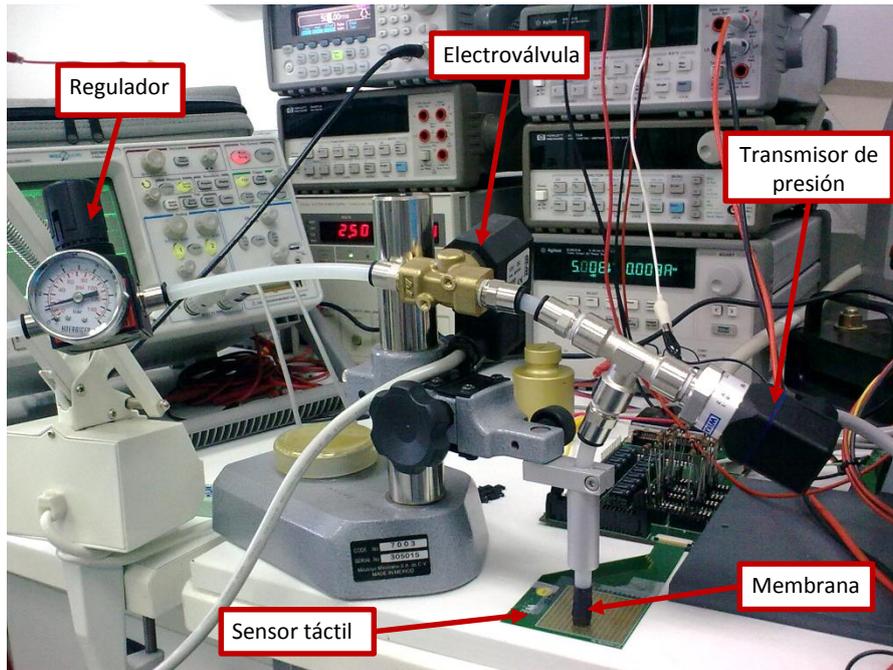


Figura 2-5. Sistema de caracterización dinámico.

2.4. Pruebas y discusión de los resultados

Con los sistemas descritos anteriormente y las matrices fabricadas se realizan una serie de pruebas que podemos dividir en pruebas estáticas y pruebas dinámicas. Con las primeras obtenemos curvas que relacionan el voltaje de salida del sensor con la presión aplicada. De ellas se extraen parámetros como la sensibilidad, la histéresis y la dispersión entre tácteles. Con las pruebas dinámicas se obtiene la información acerca de la velocidad de respuesta del sensor y la deriva.

2.4.1. Pruebas estáticas

Se realiza un conjunto de pruebas con el sistema de caracterización neumático consistente en la realización de 5 ciclos de carga y descarga sobre cada una de las matrices de la Tabla 2-1 usando la lámina PEDOT M1 (ver Tabla 1-2). En las figuras Figura 2-6 a Figura 2-9 se muestran los resultados obtenidos. Los puntos de presión en los que se efectúan las medidas del sensor táctil están marcados por un círculo, azul en el caso de la carga y rojo en el caso de la descarga. Se aplica una presión uniforme a toda la superficie del sensor y se define la salida del sensor como la media de las salidas de cada uno de sus tácteles. De esta forma tenemos una medida

de la dispersión entre los tácteles que viene representada por la desviación estándar de la media calculada anteriormente. Esta dispersión viene marcada con asteriscos, azules en el caso de la carga y rojos para la descarga.

En las figuras se representa también, para cada sensor, la media de la salida de los cinco ciclos. La dispersión de esta media representa, en este caso, la repetitividad de la medida; y es prácticamente nula, por lo que indica que los sensores tienen una buena repetitividad.

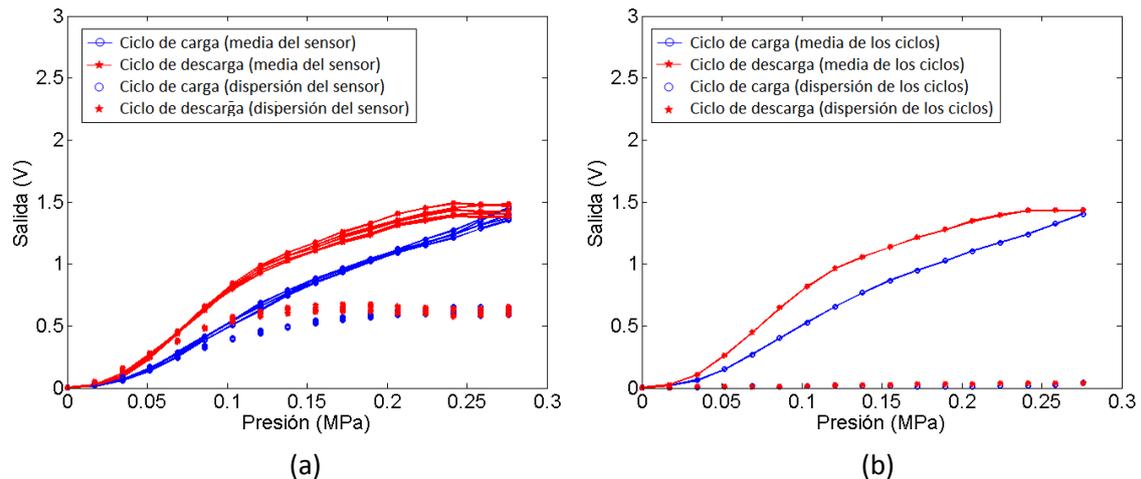


Figura 2-6. Salida del sensor m101 con lámina PEDOT M1: (a) media de los tácteles de la matriz y su dispersión y (b) media de los ciclos y su dispersión.

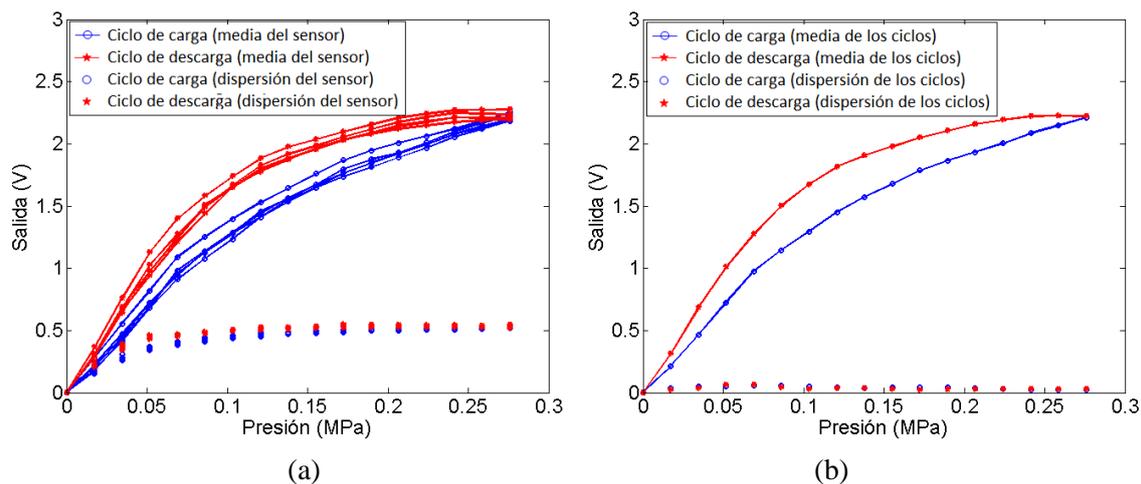


Figura 2-7. Salida del sensor m101v2 con lámina PEDOT M1: (a) media de los tácteles de la matriz y su dispersión y (b) media de los ciclos y su dispersión.

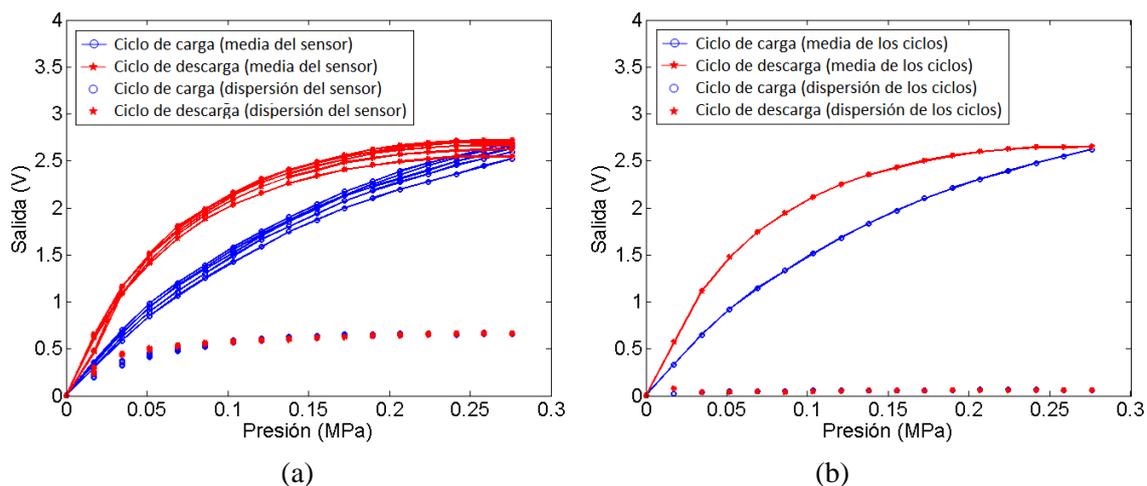


Figura 2-8. Salida del sensor m201v3 con lámina PEDOT M1: (a) media de los tácteles de la matriz y su dispersión y (b) media de los ciclos y su dispersión.

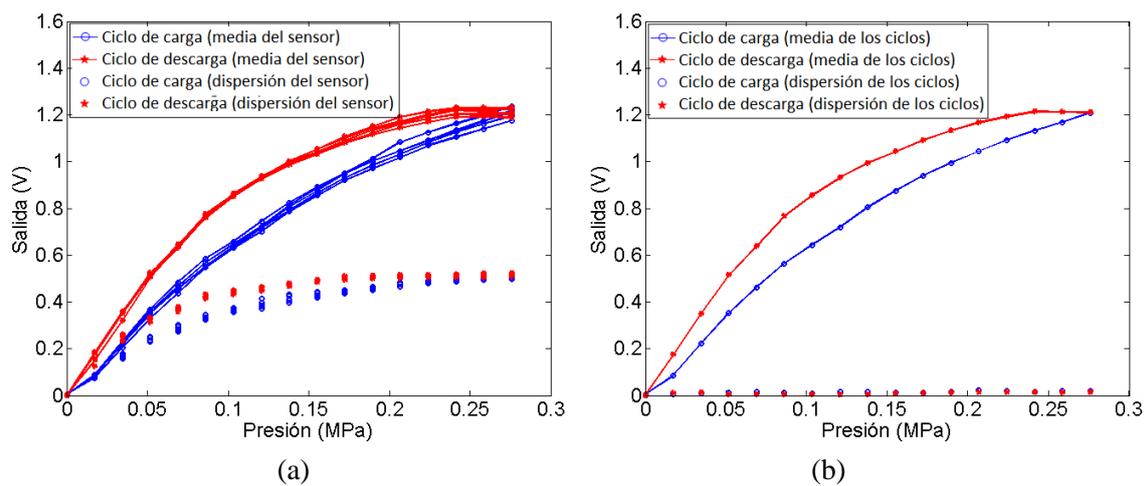


Figura 2-9. Salida del sensor m10075v2 con lámina PEDOT M1: (a) media de los tácteles de la matriz y su dispersión y (b) media de los ciclos y su dispersión.

Las figuras Figura 2-6 a Figura 2-9 proporcionan información sobre linealidad, histéresis y dispersión de los sensores, y la Tabla 2-2 resume los datos de estas dos últimas características. Teniendo en cuenta el ciclo completo, la respuesta es no lineal y tiene una histéresis significativa, además de gran dispersión entre tácteles. Desde el punto de vista del diseño y fabricación del sensor, se pueden extraer una serie puntos clave que se tratan a continuación.

Tabla 2-2. Histéresis y dispersión de los sensores evaluados.

Sensor	Histéresis (%)	Dispersión (%)
m101	21.55	45.4
m101v2	17.07	24.15
m201v3	23.21	24.66
m10075v2	17.6	42.4

Área de los electrodos

Con respecto al tamaño de los electrodos y su área, un punto importante es el balanceo de área de los mismos. Es uno de los parámetros que va a permitir que el sensor presente la máxima sensibilidad. Se entiende por balanceo de los electrodos que ambos tengan la misma área. Si no es así, la salida del sensor se ve limitada por el electrodo de menor área.

Un táctel se representa eléctricamente como la asociación en serie de las resistencias creadas en el electrodo interno (R_{int}), el externo (R_{ext}) y la resistencia volumétrica del PEDOT (R_{gap}) según la Figura 1-5. La resistencia equivalente del táctel es por lo tanto:

$$R_{eq} = R_{ext} + R_{int} + R_{gap} \quad (2.1)$$

La resistencia volumétrica es constante para un determinado PEDOT. En cambio R_{ext} y R_{int} son resistencias dependientes de la presión aplicada según se observa en la ecuación (1.2):

$$R_{int} = \frac{f(P)}{A_{int}} \quad (2.2)$$

$$R_{ext} = \frac{f(P)}{A_{ext}}$$

Las áreas de los electrodos interno y externo están representadas por A_{int} y A_{ext} respectivamente. El área total del táctel es constante y es la suma de las áreas de sus dos electrodos $A = A_{int} + A_{ext}$. Para una presión determinada sobre el táctel, puede deducirse de la ecuación (2.2) que:

$$\frac{1}{R_{int}} + \frac{1}{R_{ext}} = C \quad (2.3)$$

Donde C es una constante. El resultado óptimo en términos de mayor sensibilidad se obtiene cuando R_{eq} es mínima; y de las ecuaciones anteriores se deduce que R_{eq} presenta un mínimo cuando $R_{int} = R_{ext}$, lo que conlleva a que $A_{int} = A_{ext}$.

Observando las figuras Figura 2-6 a Figura 2-8 se puede comprobar este resultado. En la Figura 2-6 se muestra la salida del sensor con electrodo m101 (ver Tabla 2-1) cuyas áreas no están balanceadas, mientras que en la Figura 2-7 y la Figura 2-8 se muestra la salida de los sensores con electrodos m101v2 y m201v3 respectivamente, cuyas áreas sí están balanceadas. Comparando estas tres figuras se observa que aun teniendo el sensor con electrodos m101 un área total mayor que la de los otros dos sensores, presenta una respuesta con menor sensibilidad; esto es debido al hecho de que las áreas de sus electrodos no están balanceadas.

La Figura 2-9 muestra la salida del sensor con electrodos m10075v2; y comparándola con la Figura 2-7 se ilustra la influencia de la resolución en la salida del sensor. Por tener el sensor m10075v2 una resolución mayor, las áreas de cada electrodo son menores, y por lo tanto las resistencias R_{int} y R_{ext} son mayores que en el caso del sensor m101v2. Por esa razón la sensibilidad del sensor m10075v2 se reduce.

Se tiene por lo tanto que para una resolución determinada y teniendo como objetivo el alcanzar la máxima resolución y obtener la máxima sensibilidad, hace falta tener en cuenta dos condiciones:

- Aprovechar el máximo área que nos permita la resolución fijada para la construcción de los dos electrodos.
- Balancear los dos electrodos, construirlos de forma que ambos tengan la misma área.

Geometría de los electrodos

Otro factor sujeto a estudio es la forma de los electrodos. Tanto los círculos concéntricos en la Tabla 2-1 (m101, m101v2 y m10075v2) como el peine (m201v3) son formas referenciadas en otros trabajos. En la Figura 2-8 se representa la salida del sensor con los electrodos m201v3. Las áreas de los electrodos m201v3 son las mismas que la de los electrodos m101v2, y sólo se diferencian en la forma de los mismos. Comparando las figuras Figura 2-7 y Figura 2-8 se puede observar el efecto de la forma de los electrodos. Se observa un pequeño aumento de la

sensibilidad a bajas presiones, un aumento de la histéresis y un aumento de la dispersión en el caso de la matriz con forma de peine (ver Tabla 2-2).

Conductividad de la lámina PEDOT

La conductividad de la lámina PEDOT es también un factor que puede variarse para influir en la salida de los sensores. Pueden introducirse partículas dopantes de oro en la disolución PEDOT de forma que cambia su composición, aumentando la conductividad y el tamaño de las rugosidades. En el caso de la lámina M4 (ver Tabla 1-2) la conductividad aumenta el doble que la de la lámina M1 y el tamaño medio de grano aumenta de 50 nm a 75 nm. En la prueba de la Figura 2-9 se observaba cómo la sensibilidad disminuye como consecuencia del aumento de resolución. En este caso la sensibilidad puede incrementarse usando la lámina PEDOT M4 con mayor conductividad. En la Figura 2-10 se muestra la salida del sensor de electrodos m10075v2 de mayor resolución con las láminas PEDOT M1 y M4. Sólo se muestra un ciclo de carga. Se observa el aumento de sensibilidad con el uso de la lámina M4.

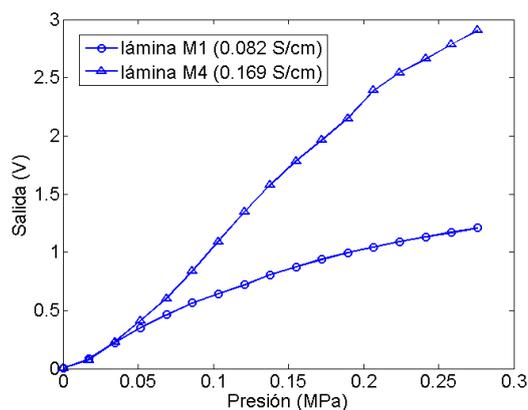


Figura 2-10. Respuesta del sensor con electrodos m10075v2 y láminas PEDOT de distinta conductividad.

Dispersión

La dispersión entre tácteles en un problema que puede ser paliado con un procesamiento posterior de los datos adquiridos del sensor. *Tekscan* [Tekscan 2015b] propone para sus sensores un método de equilibrado que consiste en añadir pesos al valor de cada táctel de forma que la salida de todos los tácteles, para una presión uniforme aplicada sobre el sensor, sea la misma. La ecuación para calcular la salida del táctel equilibrado $m_{ij(eq)}$ es la siguiente:

$$m_{ij(eq)} = m_{ij} \times \frac{\bar{m}_{ij_eq}}{m_{ij_eq}} \quad (2.4)$$

Donde m_{ij} es la medida de un táctel (posicionado en la fila i y la columna j dentro de la matriz del sensor), m_{ij_eq} es la salida del táctel para la presión de equilibrado y \bar{m}_{ij_eq} es la media de las salidas de cada táctel de la matriz calculada en el punto de equilibrado (calculada según el procedimiento ya descrito con anterioridad, eliminando los puntos dañados del sensor). Los valores $\bar{m}_{ij_eq} / m_{ij_eq}$ forman la matriz de equilibrado, cuyos valores se limitan al intervalo [0.5,2] para evitar también multiplicar por un factor extremo los puntos dañados del sensor. La Figura 2-11 muestra un ejemplo del resultado de esta operación. El rango de entrada se ha dividido en tres intervalos en los que se han usado tres puntos de equilibrado (15, 25 y 35 PSI). Se observa cómo la dispersión de la salida del sensor equilibrado disminuye de forma considerable.

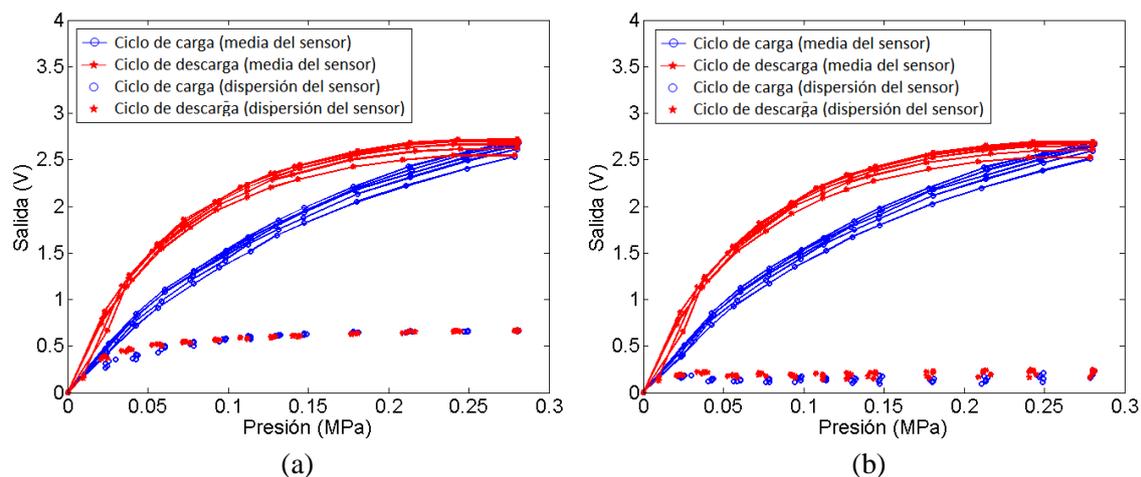


Figura 2-11. Salida del sensor m201v3 (a) sin equilibrar y (b) equilibrado.

2.4.2. Pruebas dinámicas

Para extraer información acerca de las características dinámicas del sensor se realizan dos experimentos. El primero de ellos se trata de medir la salida del sensor ante un estímulo escalón y determinar el tiempo de subida de esta señal de salida. Para ello se usa el sistema de caracterización dinámico (ver Figura 2-5). El experimento se realiza con el sensor m101v2 y la lámina M1. Se excita al sensor con un pulso de presión de 151684.39 Pa (22 PSI). El resultado de la medida se representa en la Figura 2-12, en la que se muestra una captura del osciloscopio con el que se registra la señal de salida del sensor. La señal inferior (canal 1)

representa la señal suministrada por el transmisor de presión (entrada con la que se excita al táctel del sensor); es una señal escalón con un tiempo de subida de 22.1 ms. La señal superior (canal 2) representa la salida de un táctel del sensor. Se observa cómo sigue fielmente a la señal de entrada (canal 1) con un tiempo de subida de 24.35 ms. Al medir el retraso de la señal de salida del sensor táctil se observa que la respuesta se anticipa al estímulo; esto es debido a que el transmisor de presión, con un tiempo de establecimiento de 4 ms es más lento que el sensor táctil. Este tiempo de establecimiento del transmisor determina el umbral máximo del retraso de la señal del sensor táctil. La respuesta dinámica del sensor es por lo tanto de pocos milisegundos.

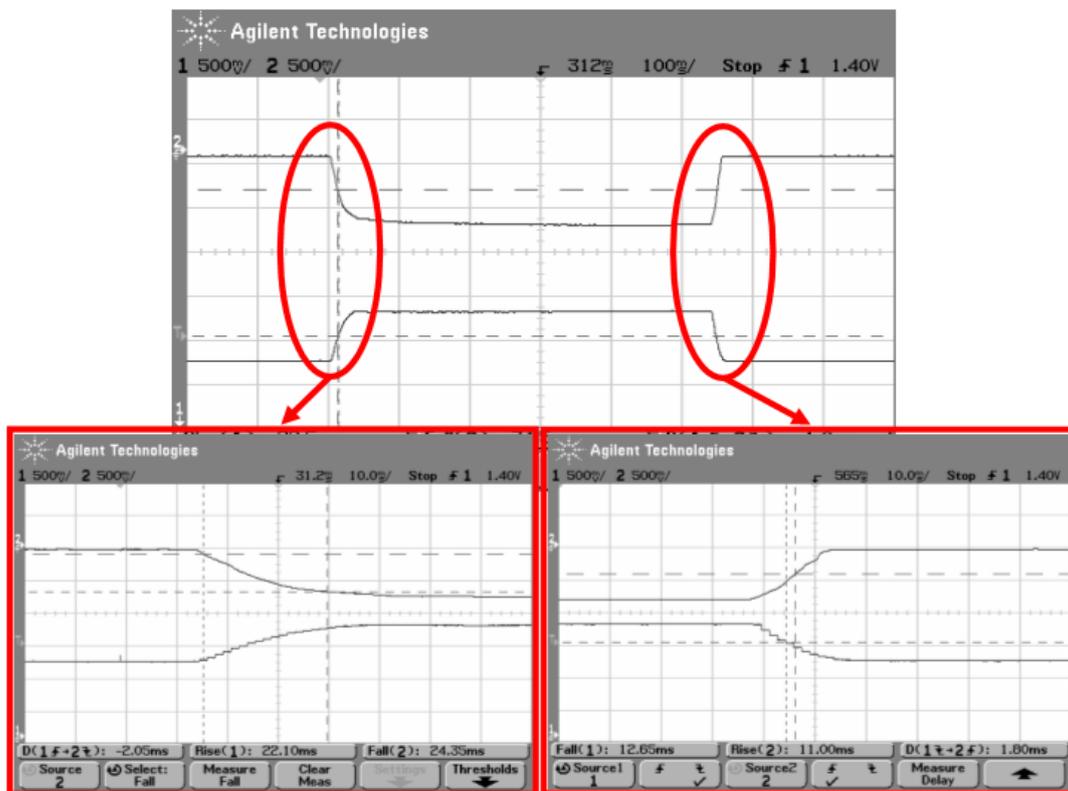


Figura 2-12. Salida del sensor m101v2 con lámina M1 ante un escalón de presión como entrada.

El segundo experimento para observar más características dinámicas del sensor es una prueba de deriva. Para realizar este experimento se hace uso del sistema de caracterización neumático. Se carga el sensor m101v2 con lámina M1 durante casi 25 minutos y se registran los valores de la salida del sensor cada 10 segundos aproximadamente. La salida del sensor es la media de las salidas de sus tácteles. No sólo se aplica una carga desde cero y se mide la

evolución de la salida del sensor, sino que se aplican una serie de cargas consecutivas en sentido ascendente y descendente; este procedimiento es seguido por otros autores [Hollinger et al. 2006]. La evolución en el tiempo de las cargas es la siguiente: se aplica 68947.45 Pa (10 PSI) desde cero durante 1400 s, acto seguido se aumenta la carga hasta 172368.62 Pa (25 PSI) durante otros 1400 s, transcurrido ese tiempo se aumenta la carga hasta 275789.79 Pa (40 PSI) durante otros 1400 s, y finalmente se disminuye la carga aplicada hasta 172368.62 Pa (25 PSI) durante otros 1400s. En la Figura 2-13 se muestran los resultados de este último experimento, de donde se pueden destacar varias observaciones:

- La deriva es apreciable en el caso en el que el sensor parte del reposo, fenómeno reportado por otros autores [Kerpa et al. 2003], y puede mejorarse precargando el sensor previamente [Hollinger et al. 2006].
- En el caso en el que se precarga el sensor, la deriva está por debajo del 15% en el peor de los casos. Este valor es similar al de algunos sensores comerciales reportados [Hollinger et al. 2006].
- Cuando el sensor ha estado cargado y se disminuye la carga, la deriva observada es prácticamente nula.

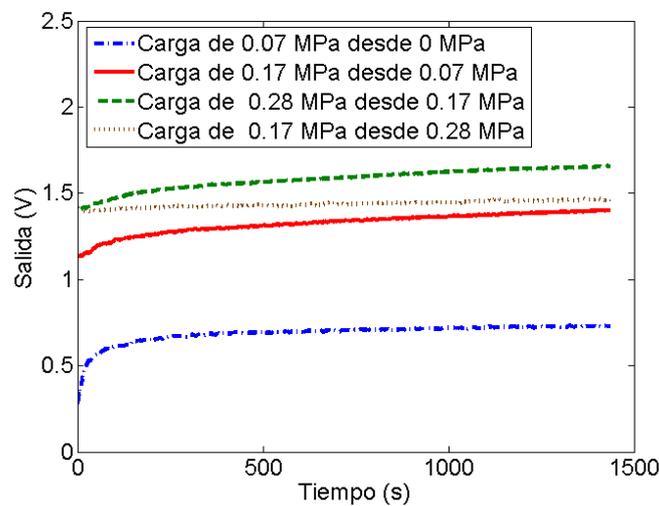


Figura 2-13. Salida del sensor m101v2 con lámina M1 con el tiempo para diferentes cargas aplicadas.

2.4.3. Dispersión entre tácteles

La dispersión entre tácteles es una característica propia de los sensores matriciales. Habitualmente su impacto se minimiza empleando un procedimiento de equilibrado y calibrado de los sensores previo a su utilización en el sistema. Dicho proceso se realiza en plataformas en las que el sensor está en unas condiciones ideales, y existe la posibilidad de que al ser montado en su lugar de trabajo cambie su comportamiento, por lo que los datos para el equilibrado extraídos ya no sirven; esto normalmente ocurre con sensores flexibles cuando son montados en superficies curvas. Por ello resulta conveniente profundizar en su origen con el fin de conocer los factores que influyen y cómo abordarlos durante el proceso de diseño y fabricación. En este apartado se presenta un estudio experimental con dicho fin.

Para la realización de los experimentos se utiliza el sensor m101v2 con el material M1 (ver Tabla 1-2 y Tabla 2-1). En la Figura 2-14 se muestra la salida característica del mismo en el que se observa una dispersión del 24.15% (ver Tabla 2-2).

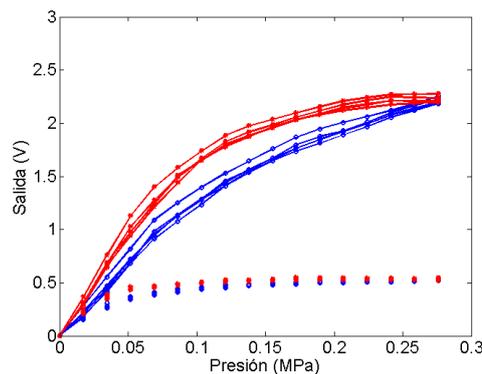


Figura 2-14. Salida característica del sensor m101v2 con lámina M1.

En principio, cabe atribuir la dispersión en la respuesta de los tácteles a los defectos y/o limitaciones de los procesos de fabricación involucrados. En este caso:

1. El proceso de fabricación de la matriz de electrodos, que se manifiesta en el desapareamiento de su geometría: diferencia en el área de los electrodos, o diferencia de altura de la capa de cobre a lo largo de la matriz.
2. El proceso de fabricación de la lámina de polímero conductor (lámina PEDOT), que puede dar lugar a una distribución no uniforme de las rugosidades y/o la

conductividad del material, debido también a defectos de no son uniformes en toda la superficie de la lámina.

Cabe esperar que el origen de la dispersión sea una mezcla de ambos efectos. Con estos experimentos se trata de dilucidar si hay alguno que predomine.

Los experimentos se realizan sobre la plataforma de caracterización neumática (descrita en el Anexo D) para asegurar que todos los tácteles de la matriz están sometidos a la misma presión. En las siguientes secciones se describen los tres experimentos realizados y sus resultados.

Experimento 1

En este primer experimento se supone que toda la dispersión es debida a la no uniformidad de material conductor a nivel global, pero que para una región de dimensiones comparables al tamaño del electrodo este efecto es despreciable. Se recorta un trozo de material conductor M1 en el que se marca con un cuadrado la posición de un táctel y se va posando en distintos tácteles de la matriz (ver Figura 2-15). Al usar siempre el mismo trozo de material y bajo la hipótesis de partida, el resultado esperado es que todas las salidas sean iguales. Puesto que se asume que no hay diferencia entre electrodos.

Los tácteles sobre los que se realizan las pruebas se seleccionan de forma que haya tres en la misma fila y tres en la misma columna, un total de nueve tácteles que son los siguientes: (4,4), (8,4), (12,4), (4,12), (8,12), (12,12), (4,8), (8,8) y (12,8). En la Figura 2-16 se muestra el resultado del experimento y en la Figura 2-17 la media y la dispersión de los tácteles del experimento.

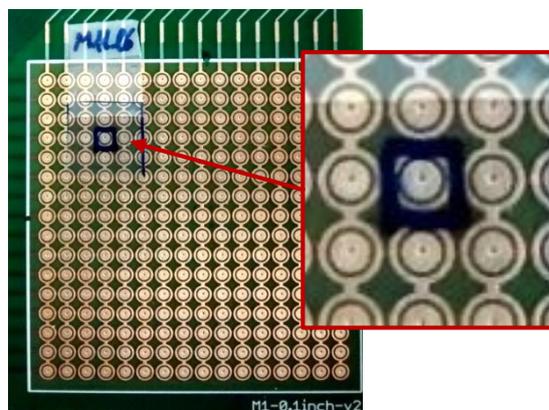


Figura 2-15. Material marcado para posarlo sobre diferentes tácteles del sensor.

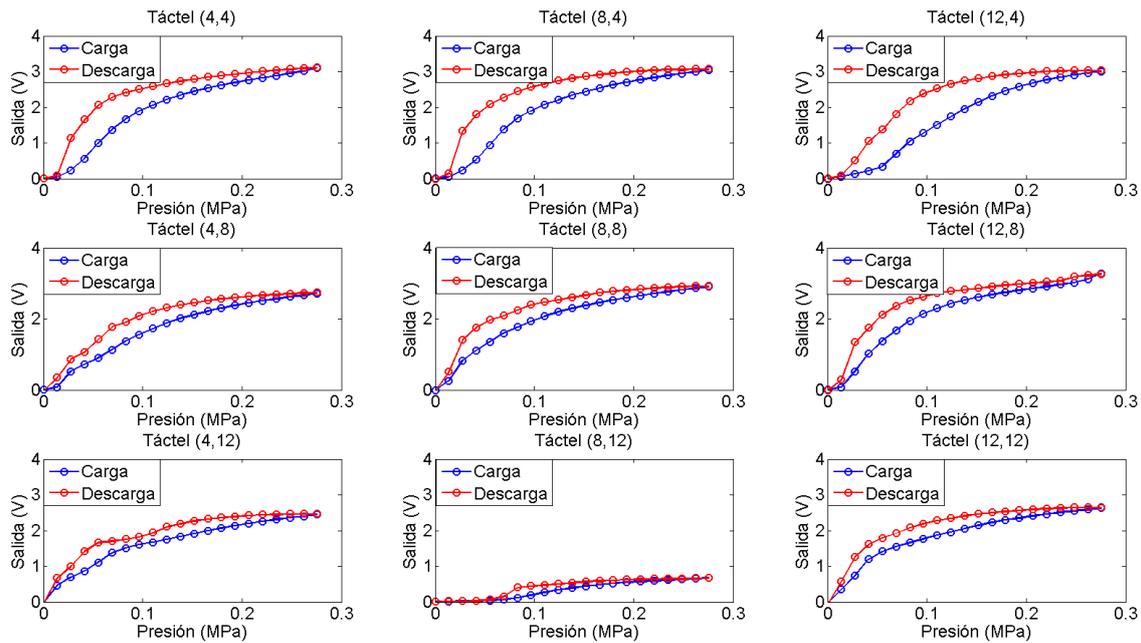


Figura 2-16. Resultados del experimento 1.

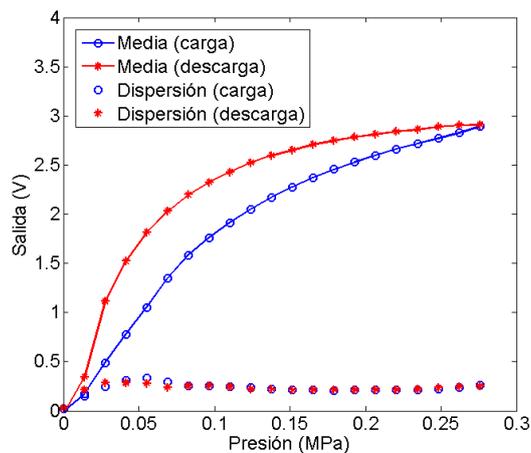


Figura 2-17. Media y dispersión de los tácteles del experimento 1.

Se observa una dispersión del 11.38% (excluyendo el táctel (8,12) que parece tener algún problema). Luego esto hace pensar que la hipótesis inicial no es válida, y que, o bien la no uniformidad del material se pone de manifiesto incluso en regiones pequeñas, o bien una parte de la dispersión observada debe tener su origen en el despareamiento entre electrodos de la matriz. Se realiza un segundo experimento.

Experimento 2

Esta vez sobre un mismo táctel, el (4,4), posamos y mismo trozo de material, pero desplazándolo un milímetro aproximadamente hacia las dos direcciones x e y . Para realizar esto se dibuja una rejilla con puntos sobre el material y se hace coincidir los distintos puntos con la vía que posee cada táctel en el centro (ver Figura 2-18).

En este caso hacemos también la suposición de que la dispersión es debida al material, y que incluso pequeñas variaciones de la posición del mismo provoca un cambio en la salida. Se realizan seis ciclos centrando seis de los puntos de la rejilla sobre el táctel (4,4). Los resultados se muestran en la Figura 2-19 y Figura 2-20.

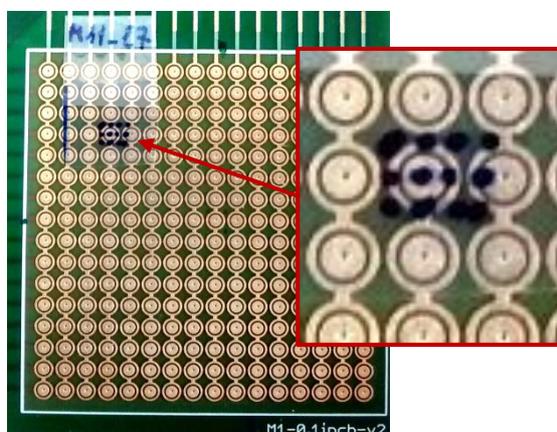


Figura 2-18. Material marcado para posarlo sobre un mismo táctel.

A la vista de los resultados, se observa también una dispersión del 11.97%, que prácticamente coincide con el resultado del experimento 1. Por tanto se puede concluir que parte de la dispersión del sensor es debida a la lámina de material conductor (PEDOT), y que ésta se manifiesta incluso en regiones de tamaño del orden de un electrodo. A pesar de seguir un proceso para que la distribución de la tinta sea uniforme en toda la superficie de la lámina, esto no se consigue. Por otra parte, y dado que la dispersión del sensor es el 24.15%, cabe esperar que una parte importante de la dispersión esté originada también por la matriz de electrodos.

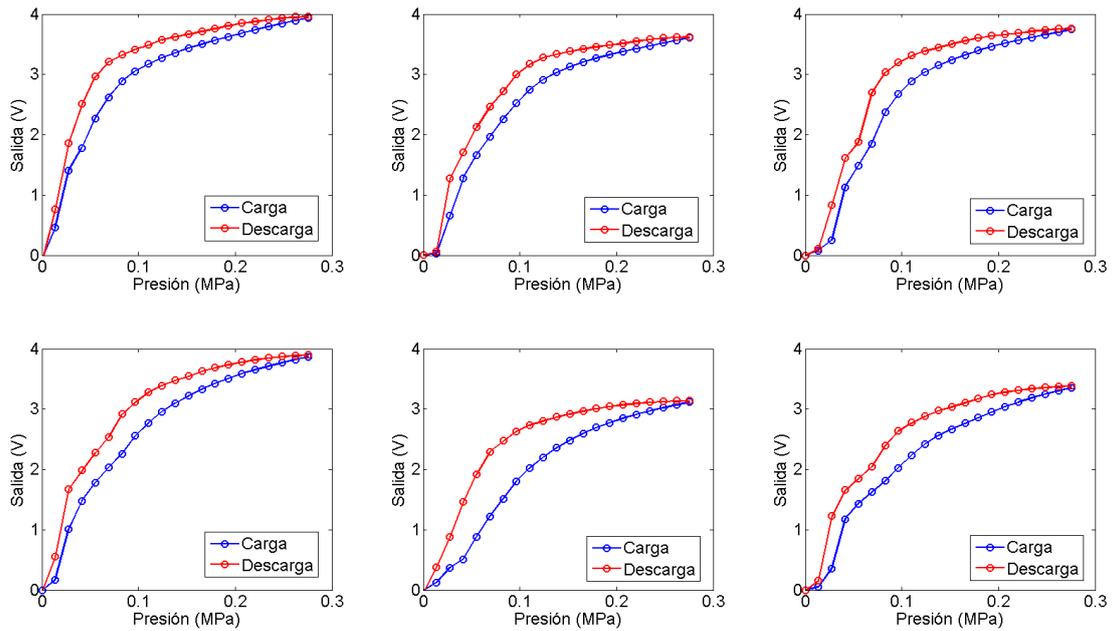


Figura 2-19. Resultados del experimento 2.

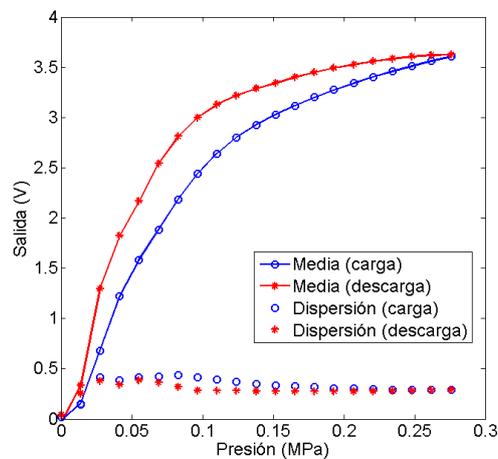


Figura 2-20. Media y dispersión de los datos del experimento 2.

Experimento 3

En este último experimento colocamos 6 láminas diferentes de material sobre el mismo táctel anterior (4,4). Los resultados del experimento se muestran en la Figura 2-21 y la Figura 2-22.

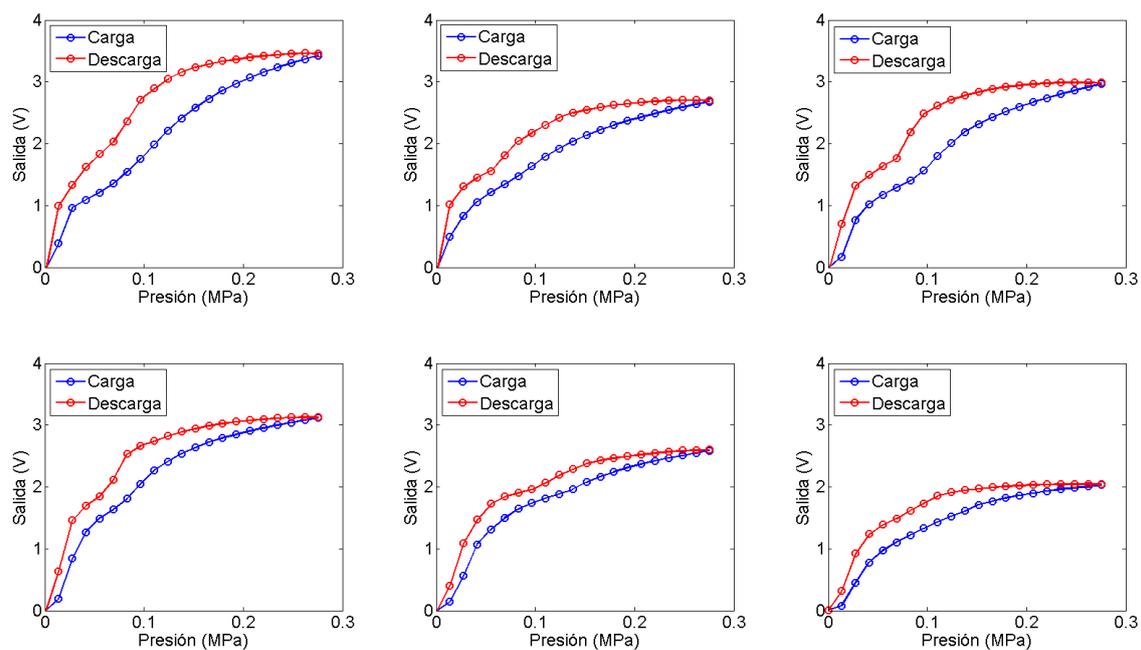


Figura 2-21. Resultados del experimento 3.

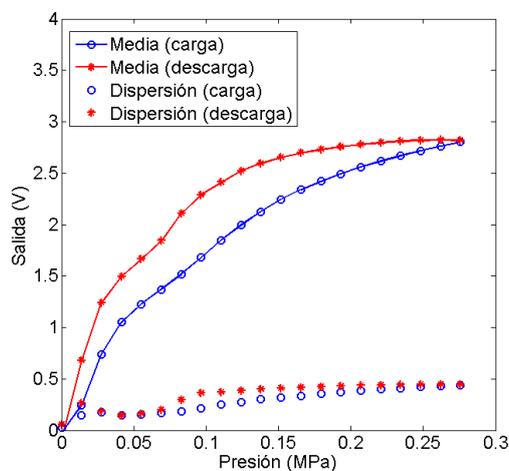


Figura 2-22. Media y dispersión de los datos del experimento 3.

Los resultados obtenidos son similares a los del experimento 2. Se observa una dispersión del 15.82%. La dispersión debida al proceso de fabricación de la lámina conductora tiene un peso importante en la dispersión total.

Con los tres experimentos realizados se llega a la conclusión de que la dispersión observada en los sensores es debida a los dos factores indicados al comienzo de la sección: por un lado al

proceso de fabricación de la matriz de electrodos, y por otro lado al proceso de fabricación de las láminas PEDOT; siendo este último factor el más determinante, sobre todo cuando se trata de comparar la respuesta de diferentes sensores.

2.5. Conclusiones

En este capítulo se ha presentado cómo se construyen los sensores basados en la tecnología de PCB flexible y se describen brevemente las plataformas de caracterización que se han construido y/o adaptado para la realización de los experimentos. Se han caracterizado algunos de estos sensores mostrando la forma de las curvas de respuesta estática en las que se relaciona la salida del sensor con la presión aplicada al mismo, y se han mostrado los valores de histéresis, dispersión y deriva que presentan, así como la respuesta dinámica a un estímulo escalón. Las matrices fabricadas tienen diferentes tamaños (resolución espacial) y formas, a fin de relacionar algunos de estos parámetros con características de las curvas de salida.

Los errores encontrados de no linealidad, histéresis, deriva y dispersión son típicos en sensores táctiles con la tecnología usada [Cannata et al. 2006; Weiss, K. et al. 2004; Shimojo et al. 2004]. Aun así son aptos para muchas aplicaciones, y un punto a tener muy en cuenta es su facilidad y bajo coste de fabricación. En la Figura 2-23 se muestra la capacidad de uno de los sensores propuestos (m101) para detectar objetos, su orientación e incluso el perfil de presiones creado por las distintas partes de los objetos.

Lo que sí se hace necesario es un procesamiento posterior a la adquisición de los datos para corregir sus errores. Para la corrección de la deriva y la histéresis hay autores que proponen algoritmos [Sánchez-Durán, Vidal-Verdú, et al. 2015; Sánchez-Durán et al. 2012] que pueden ser programados en dispositivos como FPGA's o microcontroladores. Ya se ha comentado anteriormente la tendencia hacia los sensores inteligentes, en los que en la misma electrónica de adquisición se implementa un pre-procesado de los datos adquiridos [Vidal-Verdú, Oballe-Peinado, et al. 2011; Oballe-Peinado et al. 2009]. Por otra parte, estos errores podrían ser tolerados en aplicaciones como las de manipulación con manos artificiales, al ser comparables a los ya asumidos por la limitación de la resolución espacial, por ejemplo [Sánchez-Durán, Hidalgo-López, et al. 2015]. Con respecto a la dispersión, se hace necesario un proceso de equilibrado para igualar la salida de todos los táctiles ante un mismo estímulo (similar al realizado en los sensores comerciales de Tekscan [Tekscan 2015b]) para reducir su efecto.

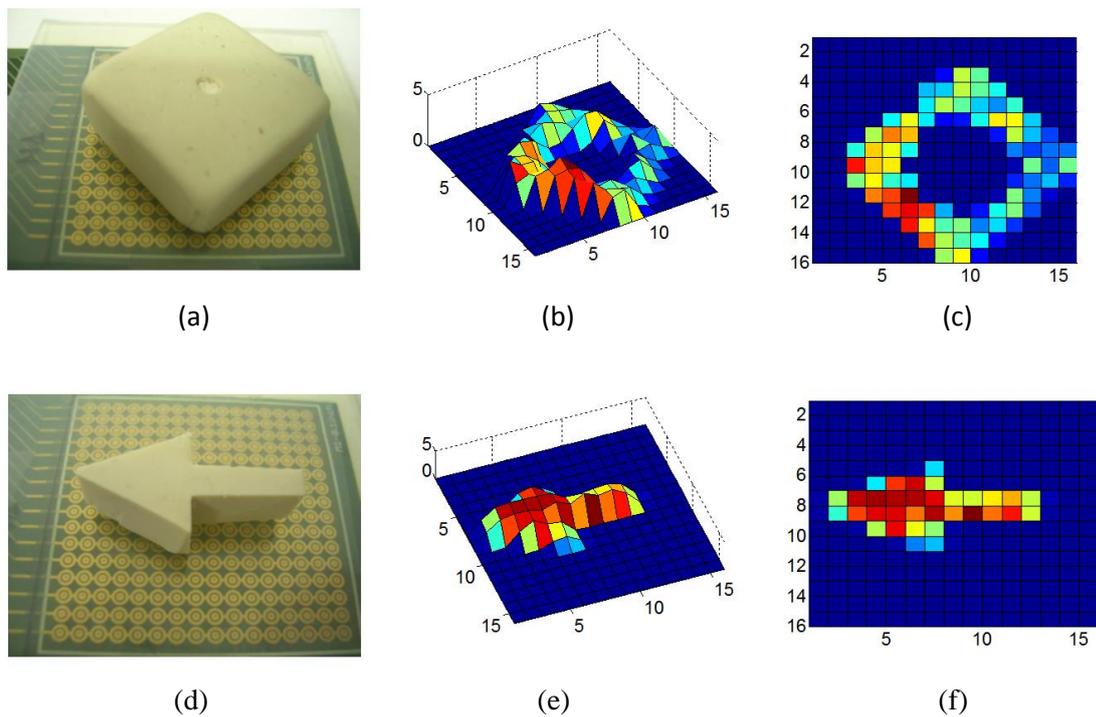


Figura 2-23. (a) Goma con agujero en la parte inferior presionada contra el sensor m101, (b) vista en 3D de la salida del sensor y (c) vista en 2D. (d) Flecha de goma presionada contra el sensor, (e) vista en 3D de la salida del sensor y (f) vista en 2D.

En lo que concierne al diseño del sensor, de las pruebas y observaciones de este capítulo se extraen las siguientes conclusiones:

- Balanceo del área de los electrodos: Para obtener la máxima sensibilidad una vez fijada la resolución del sensor hay que aprovechar el máximo área posible para construir los electrodos y ambos deben tener la misma área.
- Resolución espacial: Al aumentar la resolución del sensor (disminuir el área de los electrodos), disminuye la sensibilidad.
- Lámina PEDOT: La lámina de material conductor piezorresistivo (PEDOT) puede doparse de forma que aumente su conductividad. Es una solución a la pérdida de sensibilidad que ocurre al aumentar la resolución del sensor.
- Forma de los electrodos: El sensor con electrodos en forma de peine presenta una salida menos lineal que el sensor con los electrodos en forma de círculos concéntricos, de forma que a bajas presiones presenta un ligero aumento de la sensibilidad. Como efecto negativo la histéresis también aumenta.

- Deriva: los sensores presentan deriva con el tiempo, que es apreciable si el sensor parte de una carga nula, pero que puede reducirse precargando el sensor.
- Dispersión: El origen de la dispersión entre los tácteles es debido a un efecto conjunto de los errores en la fabricación de las matrices de electrodos y los errores en la fabricación de la lámina PEDOT.

Capítulo 3. Sensores fabricados con tecnología *screen-printing*

3.1. Introducción

Dentro del marco de los sensores piezorresistivos fabricados haciendo uso de una capa de electrodos y una capa de material electroactivo (piezorresistivo), se encuentran los sensores propuestos, fabricados y evaluados en este capítulo. Al hablar de la tecnología de *screen-printing* se hace referencia a la tecnología usada para la fabricación de la capa de electrodos. Hay trabajos que exploran esta tecnología [Khan, Dang, et al. 2015; Khan et al. 2014] y existen en el mercado algunos sensores que la usan [Tekscan 2015b; Interlink Electronics 2015]. Se trata de una técnica de serigrafía con tintas conductoras en la que los electrodos se dibujan en un sustrato plástico flexible. La técnica utilizada en este trabajo utiliza una sola cara del sustrato, por lo que hay que alternar capas de materiales conductores y no conductores para construir la matriz de electrodos con sus conexiones. Por esta razón nos referimos a estos sensores como sensores con geometría de multicapas.

En la siguiente sección del capítulo, se describe la tecnología de *screen-printing* utilizada para la construcción de las matrices de electrodos. A continuación, se describen y evalúan dos tipos de propuestas de sensores multicapas. En una primera propuesta, se fabrican los electrodos apilando simplemente capas unas encima de otras. Se caracteriza dicha propuesta comparando las respuestas estáticas y dinámicas con la de los sensores evaluados en el Capítulo 2. La segunda propuesta de sensor multicapa se diseña para eliminar la característica de umbral de presión que presenta la primera. Además, sobre esta segunda propuesta, se explora un método diferente al habitual, consistente en modificar la conductividad del material piezorresistivo, para ajustar la sensibilidad de los sensores. El método consiste en modificar las propiedades mecánicas de algunas de las capas que componen el sensor, en concreto su módulo de Young, usándose materiales con mayor y menor capacidad de

amoldarse a las superficies. Se fabrican por lo tanto sensores con diferentes materiales para la capa de aislante usado entre las capas conductoras de los electrodos; de igual manera, se usan diferentes materiales como capa final sobre la lámina de material PEDOT. Se proponen varios modelos con menor y mayor complejidad y se realizan simulaciones FEA que corroboran la capacidad del sensor de variar su sensibilidad y rango de operación eligiendo de forma adecuada el material para las capas de aislante y cobertor. Una cuestión muy importante en el estudio de esta última parte del capítulo es la rugosidad en la interfaz de contacto entre los electrodos y la lámina de PEDOT. La longitud de onda de la rugosidad con respecto al tamaño del táctel tiene una gran influencia en la conductividad del contacto. Estos efectos tienen una gran importancia y son estudiados en el área de la tribología [Greenwood 1966], habiendo estudios recientes [Barber 2013; Pastewka et al. 2013] que concluyen que estos factores tienen una gran influencia en la determinación de la conductividad en la interfaz de contacto en términos de sensibilidad y linealidad. Estos efectos tienen una clara influencia en los sensores propuestos basados en una lámina piezorresistiva (lámina PEDOT) sobre una matriz de electrodos. Se realizan una serie de pruebas experimentales con las matrices fabricadas para confirmar todas las discusiones acerca del comportamiento de los sensores, y se proporcionan un conjunto de conclusiones para evaluar el comportamiento de los sensores en función de los materiales usados como aislante y cobertor.

Aunque el estudio se ha centrado en una tecnología específica, muchas de las discusiones y conclusiones del capítulo son de aplicación a otro tipo de sensores construidos por capas.

3.2. Descripción de la tecnología

La tecnología de *screen-printing* es un proceso de impresión en capas de bajo coste muy usado en aplicaciones artísticas, y recientemente introducido en la producción de circuitos electrónicos y sensores. En los años 80 el proceso fue adaptado para la producción de diferentes tipos de sensores [Liu, C. C. 1987; Baumbach, P. L. 1981] haciendo más fácil su comercialización. Esto se debió a las múltiples ventajas que la tecnología ofrece como la reducción del coste de producción, la flexibilidad de los sensores, la automatización del proceso y un amplio rango de posibles materiales a usar. Se han construido un número apreciable de sensores haciendo uso de esta tecnología [Zhang 2004].

El proceso es rápido y sencillo, consiste en aplastar una pasta o tinta a través de una máscara con patrones o dibujos sobre un sustrato sujeto al reverso de dicha máscara. Se pueden depositar varias capas unas sobre otras por el mismo procedimiento y varios patrones pueden ser reproducidos sobre la misma máscara, de forma que el proceso se acelera. El sustrato debe ser un material inerte (PVC, policarbonato, poliéster o un material cerámico). Cada capa de la matriz de electrodos, el electrodo externo, el aislante y el electrodo interno, se deposita mediante la correspondiente máscara provista del patrón necesario. Las máscaras se fabrican mediante fotolitografía con geles fotosensibles y mallas de nilón, poliéster o acero inoxidable. [Khan, Lorenzelli, et al. 2015] presenta una revisión de la tecnología de *screen-printing* para la fabricación de sensores.

Con respecto a las pastas utilizadas, las hay de dos tipos: tintas conductoras y dieléctricas. Las primeras son usadas para fabricar las capas correspondientes a los electrodos. Están basadas en un aglutinado orgánico en donde sustancias como el oro, la plata, el platino o el grafito se dispersan a altas concentraciones actuando como partículas conductoras. Se han desarrollado también pastas basadas en agua para este tipo de tintas [Crouch et al. 2005]. Las pastas dieléctricas están basadas en polímeros o materiales cerámicos, y se usan para fabricar las capas de aislante entre los dos electrodos: el interno y el externo.

El proceso de fabricación se realiza con una máquina semiautomática (Thieme 1010E [THIEME GmbH & Co. KG 2015] , ver Figura 3-1) que permite la impresión sobre sustratos tanto rígidos como flexibles. En la Figura 3-2 se muestran los pasos de impresión de cada una de las máscaras para una de las propuestas de sensores:

1. Inicialmente, una capa conductora de plata (electrodo externo) se deposita sobre un sustrato plástico flexible (PET) de 175 μ m de espesor. Se deja curar a 130°C durante 4 minutos en un horno de convección natural (Carbolite PN 200).
2. Sobre la capa anterior se deposita otra de material aislante. El perfil de tiempo y temperatura de curado depende del material usado como aislante.
3. En el último paso de impresión, se deposita la capa del electrodo interno sobre el material aislante.
4. Finalmente, se coloca sobre la matriz de electrodos la lámina de material con el polímero conductor PEDOT, previamente fabricada como se ha descrito en el Capítulo 1.

Las impresiones de las capas de los pasos 1 al 3 se alinean de forma visual mediante marcas de referencia que pueden apreciarse en la Figura 3-3.

La parte más crítica en la fabricación de los electrodos es la deposición del electrodo interno sobre el material aislante. En este paso se encontraron numerosos problemas de adherencia entre las tintas. Una vez depurado el proceso de fabricación se establece el grosor de cada una de las capas en aproximadamente 12 μm .



Figura 3-1. Máquina semiautomática para serigrafía.

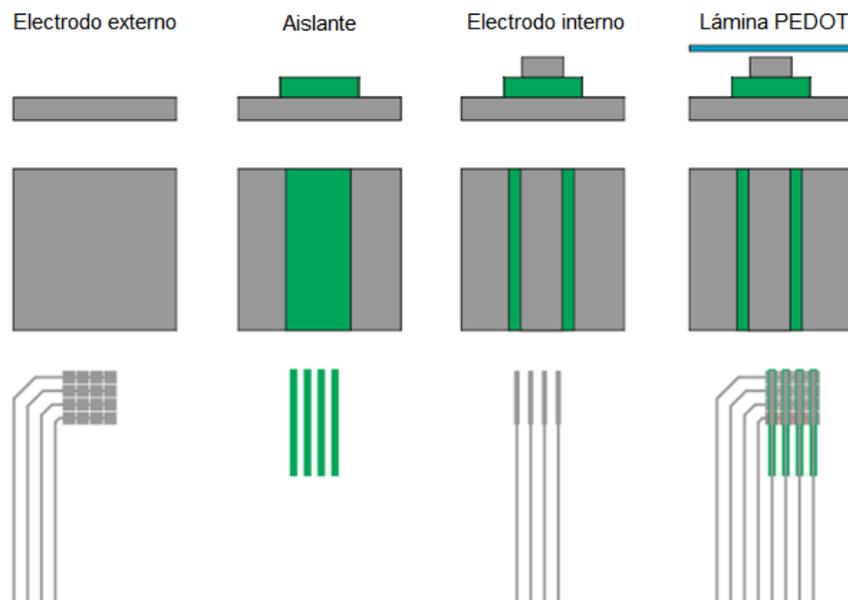


Figura 3-2. Pasos del proceso de fabricación de la primera propuesta del sensor con tecnología de *screen-printing*.

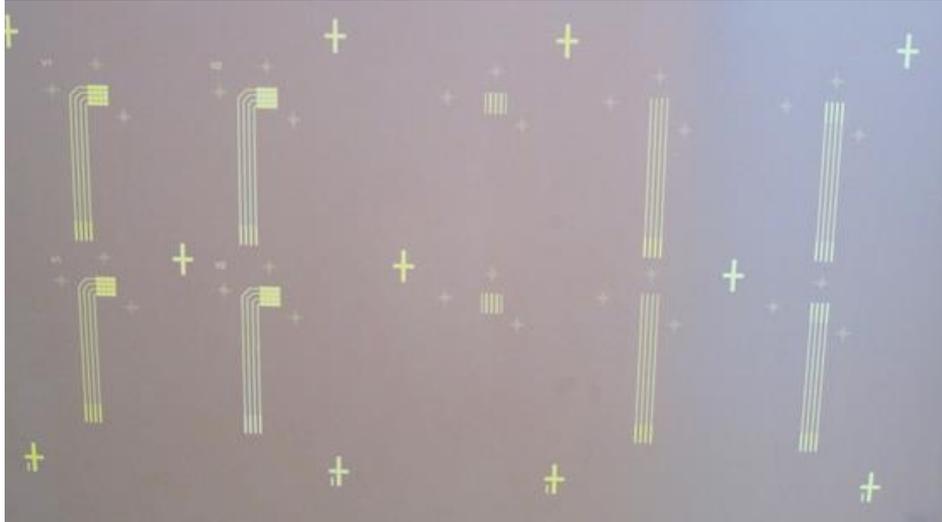


Figura 3-3. Muestra de una máscara con las marcas de referencia para la alineación de las capas.

3.3. Táctel con geometría multicapa simple

Es esta sección se explora una propuesta de sensor basado en la tecnología de *screen-printing* descrita anteriormente. La forma más simple de fabricar un táctel es la de apilar las capas unas encima de otras, teniendo la precaución de separar las capas conductoras con algún material aislante. A continuación se describe el diseño del táctel multicapa simple.

3.3.1. Diseño y fabricación

Sobre un sustrato plástico (tereftalato de polietileno, PET) de 175 μm se van imprimiendo capas de material conductor para construir los electrodos. En este caso, debido a que sólo se serigrafía por una cara, se hace necesario usar capas de un material no conductor que aisle las distintas capas de material conductor que deban cruzarse. Las capas de material, tanto conductoras como aislantes, se diseñan con un grosor de 12 μm debido a restricciones del proceso de fabricación, aunque el resultado final difiere con el curado de las capas dependiendo del tipo de material usado. Las conexiones se realizan de la misma forma que en el caso de los sensores fabricados con la tecnología PCB, distribuyendo los tácteles en una matriz de 16x16 con las mismas conexiones entre filas y columnas. Se diseña y fabrica una primera versión de la matriz con la resolución de 2.54 mm entre tácteles, igual que las

matrices m101v2 y m201v3 (ver Tabla 2-1). En la Figura 3-4 se ilustra el esquema de capas para la primera versión de este tipo de sensores. Están compuestos por seis capas que enumeradas de abajo hacia arriba son las siguientes: sustrato (PET), electrodo externo, capa de aislante, electrodo interno, lámina con el polímero conductor (PEDOT) y elastómero cobertor. El área de contacto de los electrodos internos y externos se diseña con el mismo tamaño para proporcionar la máxima sensibilidad al sensor, atendiendo al criterio descrito en el Capítulo 2. La vista en planta y perfil junto con las medidas del táctel se indican en la Figura 3-4(b). En la Figura 3-5 se muestra una fotografía del sensor multicapa simple sin la capa de cobertor.

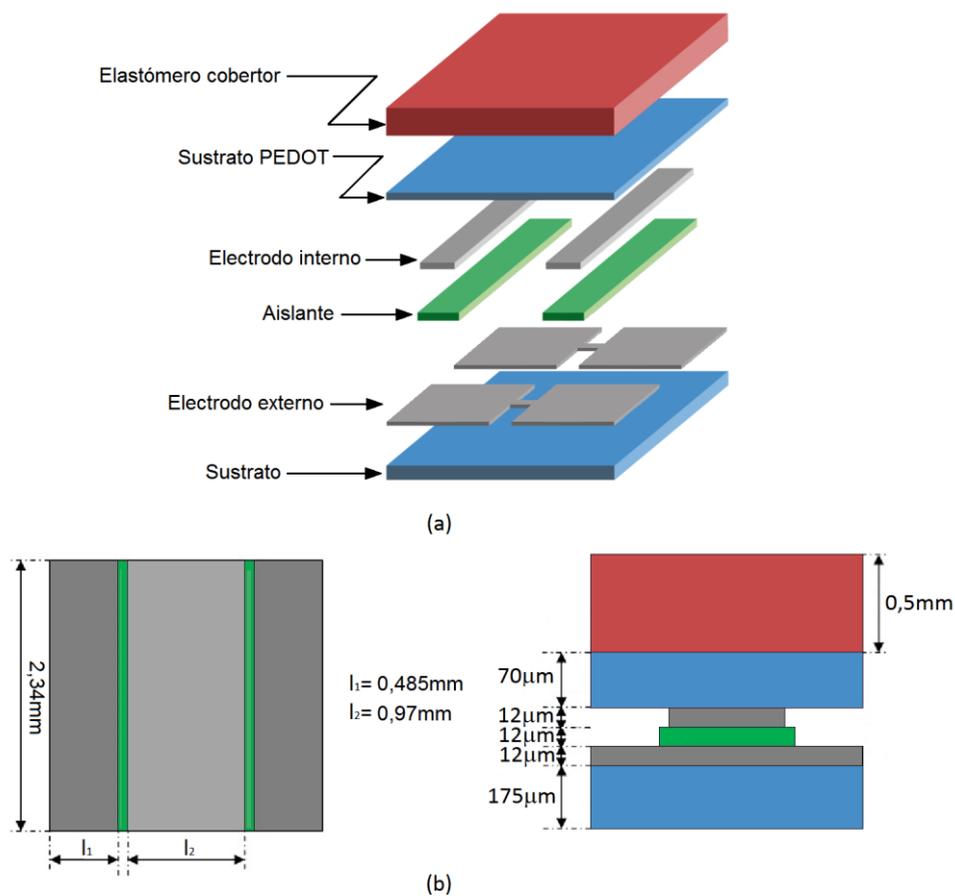


Figura 3-4. Esquema de la primera versión de un táctel fabricado con la tecnología de *screen-printing*.

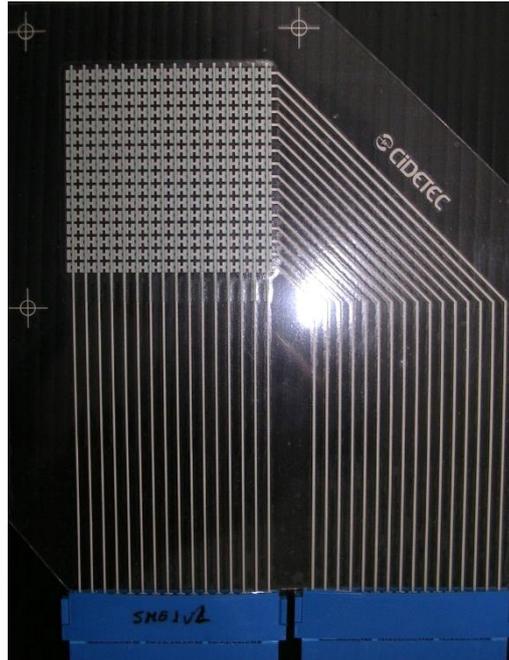


Figura 3-5. Fotografía de la primera versión del sensor multicapa simple.

3.3.2. Plataforma de caracterización

Las plataformas de caracterización y el procedimiento para la realización de las pruebas con el sensor multicapa simple son las mismas que las descritas en el Capítulo 2 para el caso de los sensores fabricados con PCB. La descripción más detallada de estos sistemas se puede consultar en el Anexo D para el caso del sistema de caracterización neumático y en el Anexo E para el caso del sistema de caracterización dinámico.

3.3.3. Resultados experimentales y discusión

En esta sección se van a mostrar los resultados de las pruebas realizadas sobre el sensor multicapa simple. En primer lugar se analiza su respuesta estática, y posteriormente su respuesta dinámica mediante una prueba de deriva y sometiéndole a un estímulo escalón.

Respuesta estática y umbral de presión

En la Figura 3-6 se resumen los resultados obtenidos de realizar las pruebas estáticas sobre esta primera versión del sensor multicapa simple. En la Figura 3-6(a) se muestra la salida de 5 ciclos de carga y descarga con la dispersión entre los tácteles y en la Figura 3-6(b) se

representa la media de todos los ciclos y su desviación estándar. Si comparamos este resultado con el obtenido con algunos de los sensores construidos sobre PCB (ver Figura 2-6 a Figura 2-8) observamos las siguientes similitudes y diferencias:

- La dispersión del sensor multicapa es del 23.52%, que es del mismo orden que la de los sensores sobre PCB con la misma resolución y las áreas balanceadas (ver Tabla 2-2).
- La histéresis del sensor multicapa es del 11.25%, apreciablemente menor que la de los sensores sobre PCB (ver Tabla 2-2).
- La gran diferencia en la salida del sensor multicapa con los otros es la aparición de un umbral de presión.

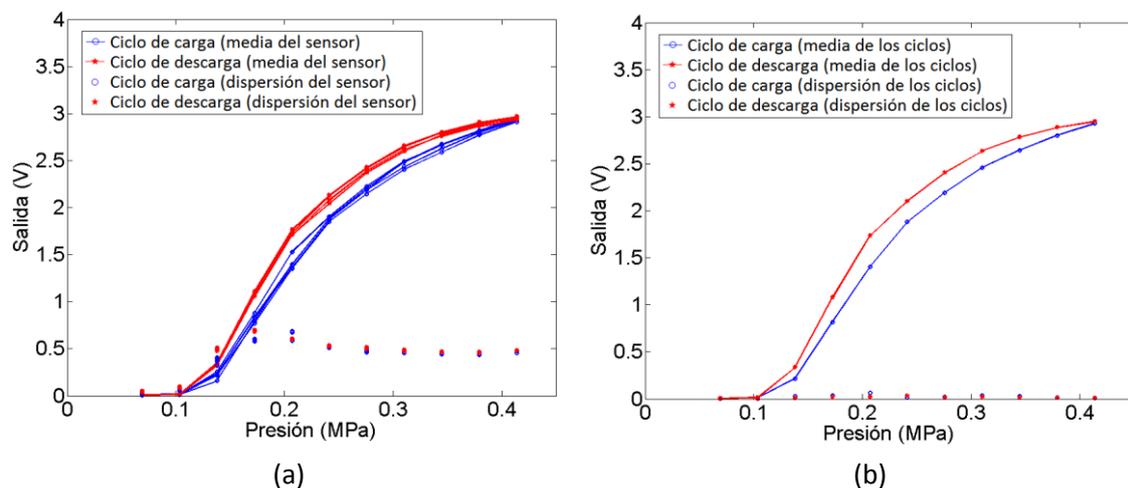


Figura 3-6. Resultados de las pruebas estáticas de la primera versión del sensor fabricado con la tecnología de *screen-printing*. (a) Salida de cinco ciclos de carga y descarga del sensor, (b) media y desviación típica de los ciclos anteriores.

Centrándonos en el umbral, éste aparece como consecuencia de la diferencia de altura existente entre los electrodos interno y externo (ver Figura 3-4). El umbral puede regularse o incluso eliminarse de las siguientes tres maneras:

- Cambiando el material aislante entre los electrodos interno y externo.
- Modificando el espesor del sustrato del PEDOT, al hacerlo más delgado, se adapta mejor a la superficie de ambos electrodos.

- Modificando la geometría del táctel, igualando las alturas de los electrodos interno y externo. Este cambio da lugar a la versión del sensor multicapa mejorado que será también evaluado con más detalle en las siguientes secciones.

Para ilustrar cómo la lámina PEDOT se dobla y se establece el contacto con el electrodo externo se realizan una serie de simulaciones con la aplicación de análisis de elementos finitos (FEA) *COMSOL Multiphysics*[®]. Los resultados de las simulaciones se muestran en la Figura 3-7. Para simplificar las simulaciones se crea un corte y se programa la estructura en dos dimensiones. Se crean 4 entidades correspondientes a las capas: electrodo externo, aislante, electrodo interno y lámina PEDOT. El resto de capas se suprimen por simplicidad. Se programa un par de contacto entre la superficie inferior de la lámina PEDOT y la superficie superior del electrodo externo, y se aplica una presión uniforme sobre la superficie superior de la lámina PEDOT.

La Figura 3-7(a) muestra la geometría simulada, la deformación y el desplazamiento en la dirección del eje y para una presión uniforme aplicada de 413.69 KPa (60 PSI). Hay que destacar que mientras el área completa del electrodo interno está en contacto con la lámina PEDOT, no es el caso del electrodo externo. La Figura 3-7(b) muestra la presión de contacto en el lado izquierdo del electrodo externo para una presión uniforme aplicada sobre la lámina PEDOT que varía entre 0 y 413.69 KPa (60 PSI). Se observa que a medida que la presión aplicada aumenta la lámina PEDOT se dobla y el contacto con el electrodo externo aumenta. Mientras no se establezca un contacto con el electrodo externo, el sensor no registrará ninguna salida, originándose el umbral de presión mostrado en la Figura 3-7(c), donde se muestra la salida experimental del sensor simulado. Se observa experimentalmente que el umbral se posiciona en los 103.42 KPa (15 PSI).

Si trasladamos el umbral de presión observado empíricamente al resultado de la simulación en la Figura 3-7(b) podemos hacer corresponder a dicho umbral un área mínima de contacto definido por el valor de x en el que la curva de 15 PSI corta a dicho eje. De esta forma se programan nuevas simulaciones utilizando distintos valores para el grosor y el módulo de Young de la lámina PEDOT. La Figura 3-8 muestra la presión externa necesaria para que se alcance esta área mínima en función del grosor de la lámina PEDOT para diferentes valores de su módulo del Young. Se observa que el umbral de presión aumenta al aumentar la rigidez de la lámina, al igual que si se aumenta su grosor.

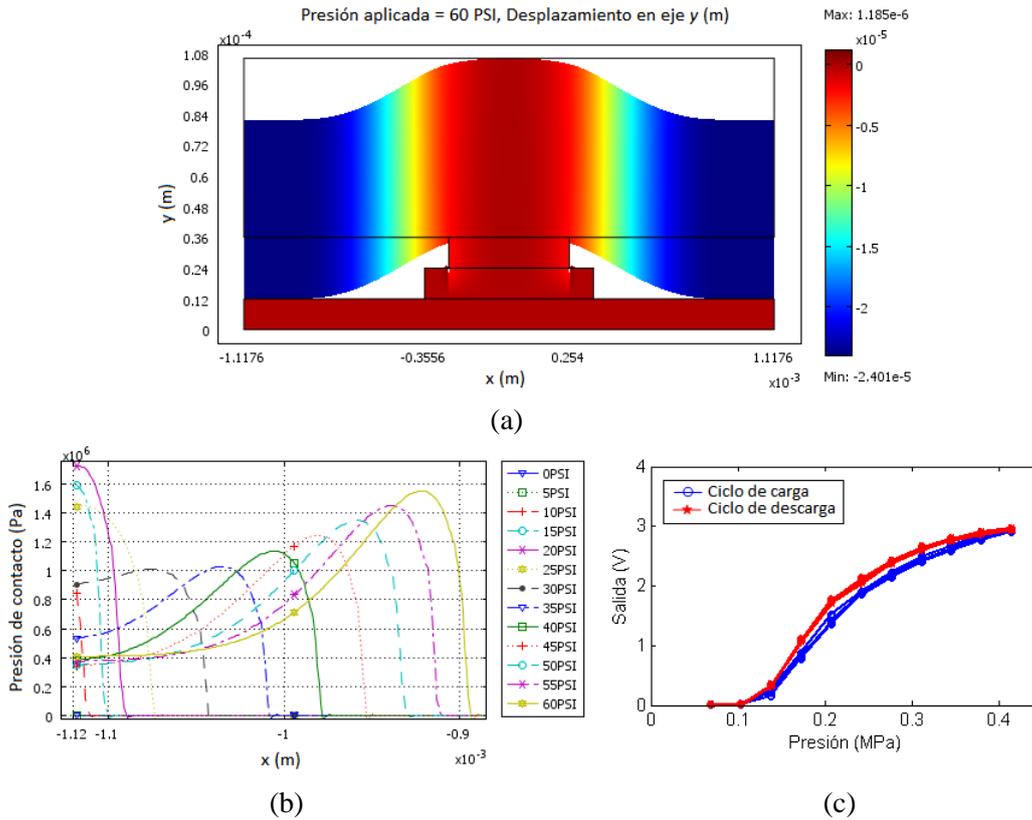


Figura 3-7. (a) Salida de la simulación para una fuerza uniforme aplicada, (b) distribución de presiones en la parte izquierda el electrodo externo en función de la fuerza aplicada y (c) salida experimental del primer prototipo del sensor.

El proceso de fabricación de la lámina de PEDOT mediante *spin-coating* no permitía el uso de un sustrato más delgado, por lo que se fabricaron láminas de diferente grosor depositando el PEDOT mediante *screen-printing*, con un proceso similar al usado para la fabricación de las matrices. Aunque la deposición no es tan uniforme como la obtenida mediante el método de *spin-coating*, las láminas sirven para ilustrar el efecto de la disminución del umbral de presión con la disminución del espesor de la lámina de PEDOT, ver la Figura 3-9. Las láminas con las que se realiza el experimento tienen un espesor de $40 \mu\text{m}$, $125 \mu\text{m}$ y $250 \mu\text{m}$. Se observa que con la primera de ellas el umbral puede considerarse inapreciable, en cambio con la segunda hasta los 0.15 MPa aproximadamente la curva no comienza a incrementar ligeramente su valor, y con la última lámina el sensor no obtiene salida al ser mayor el umbral.

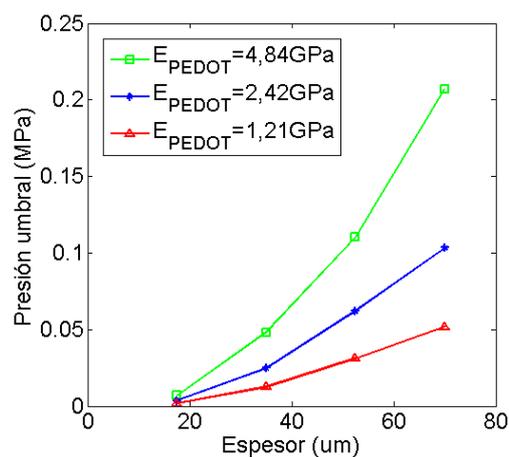


Figura 3-8. Variación de la presión umbral con el grosor y el módulo de Young de la lámina PEDOT.

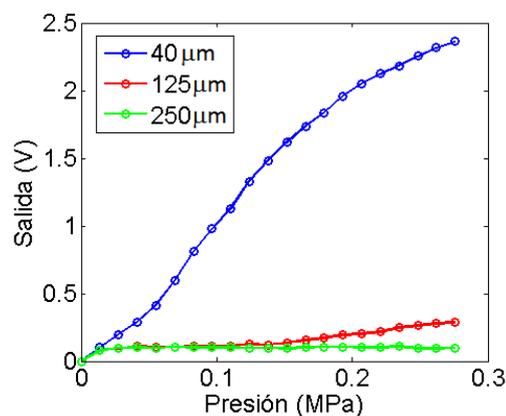


Figura 3-9. Salida del sensor para diferentes grosores de la lámina PEDOT.

Respuesta dinámica

Para evaluar la respuesta dinámica del sensor se realiza la prueba consistente en aplicar un estímulo escalón al sensor, midiéndose la respuesta de la señal de salida. El nivel del escalón generado debe ser superior al umbral de presión del sensor (15 PSI en este caso). En la Figura 3-10 se muestra la medida realizada, en la que se observa que el tiempo de subida de la salida del sensor es del orden de las decenas de milisegundos. El canal 1 (abajo) representa la señal proporcionada por el transmisor de presión, proporcional a la presión ejercida sobre el táctel del sensor. El canal 2 (arriba) representa la señal de salida del táctel. Nuevamente la señal de salida del sensor táctil se adelanta a la respuesta del transmisor de presión que suministra el valor de la presión del estímulo. Al igual que se explicó en el capítulo anterior, el tiempo de

establecimiento de 4 ms del transmisor es el límite superior del retraso de la salida del sensor táctil.

En la Figura 3-11 se muestran los resultados de la prueba de deriva. Se aplican diferentes cargas al sensor durante casi 1500 segundos y se representa la variación de la señal de salida durante ese intervalo de tiempo. Nuevamente se aprecia el mismo comportamiento que en los sensores fabricados sobre PCB; cuando la carga se aplica partiendo del sensor sin carga, la variación inicial de la señal de salida es mayor que en el caso de que el sensor estuviera previamente cargado. La máxima variación está por debajo del 16% en el caso de que el sensor se cargue a una presión sin haber tenido anteriormente ninguna carga. En el caso de incrementos negativos de presión, es decir, el sensor se cargue con una presión menor de la que tenía previamente, el efecto de la deriva es inapreciable.

El comportamiento dinámico del sensor multicapa es por lo tanto también similar al de los sensores fabricados sobre PCB.

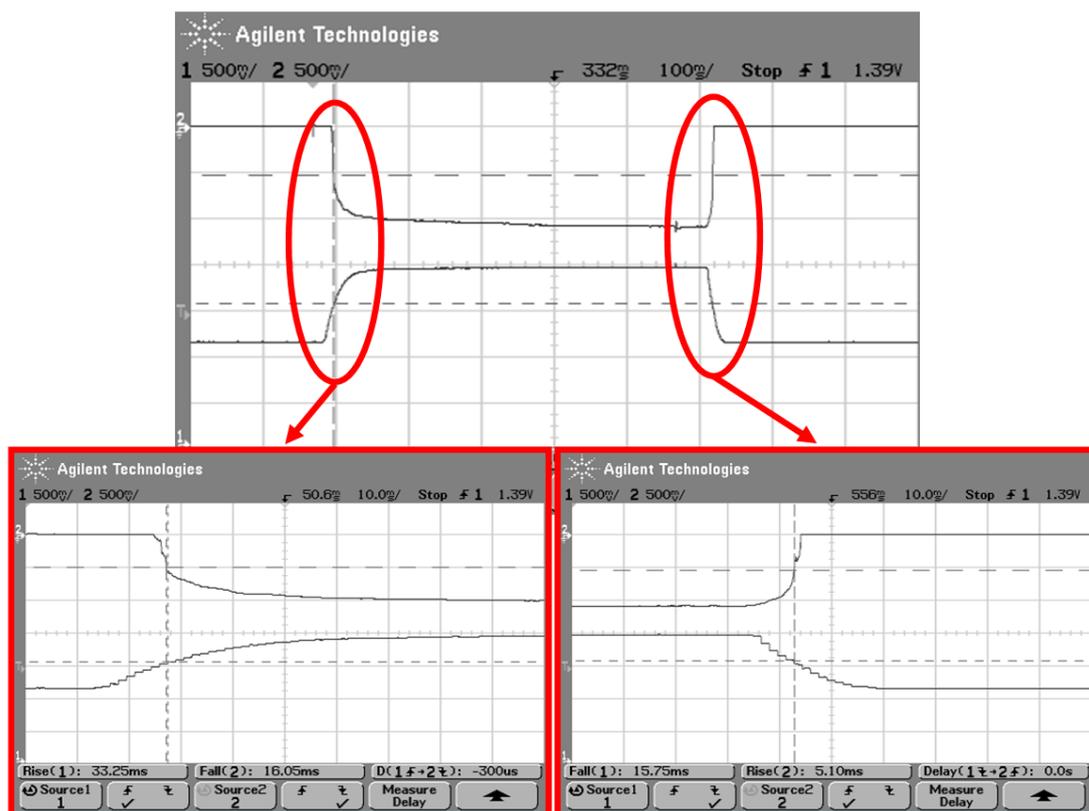


Figura 3-10. Respuesta dinámica ante un impulso de presión superando el umbral.

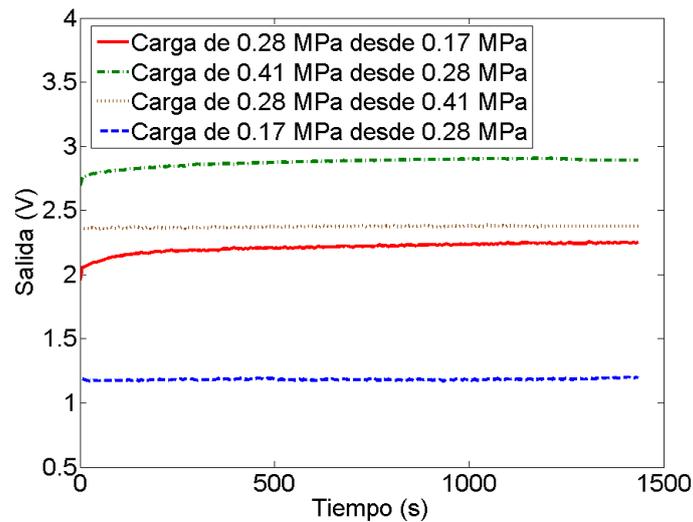


Figura 3-11. Medida de la deriva para diferentes presiones aplicadas.

Conclusiones

El rendimiento de este primer prototipo de sensor fabricado con la tecnología de *screen-printing* es muy similar al de los sensores fabricados con PCB evaluados con anterioridad, por lo que es también aquí de aplicación el conocimiento adquirido con ellos. Pero en este caso, el hecho de construir el sensor por capas unas encima de otras y la posibilidad de usar diferentes materiales, aumenta el número de parámetros o factores que pueden modificar la salida del sensor, tanto cualitativamente como cuantitativamente. Uno de los efectos en la salida del sensor es la aparición del umbral de presión, que además se ha mostrado cómo puede graduarse según convenga en cada aplicación. En las siguientes secciones se realiza un estudio más exhaustivo acerca del comportamiento estático de los sensores multicapas.

3.4. Táctel multicapa mejorado

La segunda propuesta de sensor multicapa se diseña por dos motivos, por un lado para corroborar la eliminación del umbral de presión al igualar las alturas de los dos electrodos (interno y externo), y por otro lado para realizar sobre él un estudio acerca del comportamiento de este tipo de sensor ante ciertos cambios en sus parámetros mecánicos (como son el cambio en los módulos de Young de algunas de sus capas).

Se va a explorar el diseño, fabricación y comportamiento estático de una propuesta de sensor multicapa mejorada basada en polímeros conductores y fabricados con la tecnología de bajo coste de *screen-printing*. Esta propuesta elimina el umbral de presión de la primera. Y aparte de la conductividad de la lámina de material PEDOT, cuyo efecto se observó en el capítulo anterior, se explora otro método para variar la sensibilidad y el rango del sensor, determinado principalmente por el comportamiento mecánico del táctel.

Se fabricaron algunas muestras de esta segunda propuesta de sensor con diferentes tipos de materiales aislantes, a la vez que diferentes piezas de cobertores también con diferentes materiales. Los parámetros estudiados para ver la evolución de la sensibilidad del sensor son la capa de aislante entre los electrodos interno y externo del táctel y la capa superior de cobertor del mismo. Mediante un modelo simple y simulaciones FEA de un modelo ideal se puede predecir la variación de sensibilidad y rango del sensor eligiendo de forma adecuada las características de estas dos capas. Sin embargo, en los experimentos realizados se observa que hay que tener en cuenta otros aspectos fundamentales relacionados con la longitud de onda de las rugosidades en el contacto con respecto al área de contacto entre los electrodos y la lámina de material conductor (PEDOT). La dependencia de la conductividad con estos factores es un tema complejo estudiado durante muchos años en el área de la tribología [Greenwood 1966]. En estudios recientes [Barber 2013; Pastewka et al. 2013] se concluye que estos factores determinan la conductividad en la interfaz en términos de sensibilidad y/o linealidad. Estos estudios son de aplicación a este caso en el que se estudia el contacto entre un material piezorresistivo y una matriz de electrodos; y los experimentos realizados sobre los sensores fabricados así lo demuestran. Para finalizar se realiza una discusión basada en las simulaciones y los modelos simples que explica el comportamiento del sensor y proporciona una serie de conclusiones que ayudan a evaluar el rendimiento del sensor en función de las características de las capas usadas como aislante y cobertor.

3.4.1. Diseño y fabricación

En la Figura 3-12 se ilustra el sensor propuesto y evaluado en esta sección. Está compuesto por seis capas de distintos materiales que, enumeradas de abajo hacia arriba, son las siguientes: sustrato (PET), electrodo externo, aislante, electrodo interno, lámina de material conductivo (PEDOT) sobre un sustrato plástico (PET), y cobertor. El sensor se diseña para que idealmente se den las mismas condiciones en ambas interfaces: entre la lámina PEDOT y los electrodos

interno y externos. Por un lado la altura de los electrodos en contacto con la lámina PEDOT es la misma, de forma que el contacto se establece con ambos a muy bajas presiones evitando así el umbral de presión. Por otro lado, el área de contacto entre los electrodos y la lámina de material conductor es clave para determinar la sensibilidad del sensor; cuanto mayor sea dicha área, mayor será la sensibilidad del sensor. Habitualmente se está interesado en obtener un sensor con la mayor resolución posible, lo que implica reducir al máximo el área activa de contacto. Además, para maximizar la sensibilidad, las áreas de contacto entre ambos electrodos y el material PEDOT deben ser iguales. En este caso, las dimensiones del táctel se eligen atendiendo a restricciones de la tecnología, para asegurar una determinada definición y repetitividad en la fabricación de los distintos sensores. Por este motivo se aumenta el tamaño del táctel en tres veces con respecto a la primera propuesta del sensor multicapa simple.

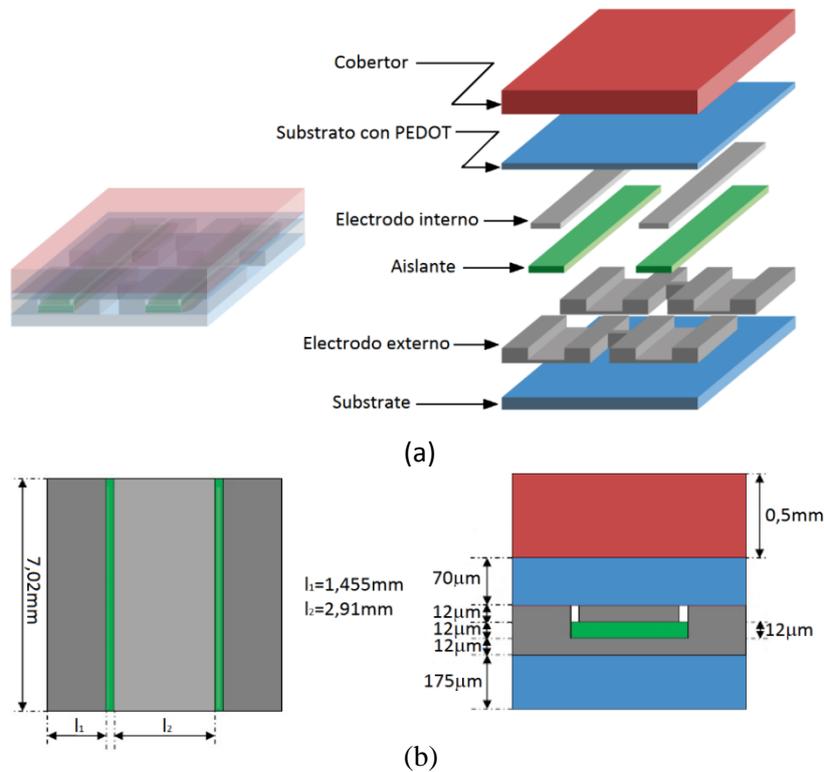


Figura 3-12. (a) Esquema en tres dimensiones del sensor y sus conexiones dentro de la matriz. (b) Diseño propuesto del táctel multicapa mejorado y sus dimensiones.

Los experimentos descritos en las siguientes secciones se realizaron con seis de los sensores fabricados. El diseño de la matriz y los tácteles es el mismo, sólo difieren en el material usado para depositar la capa de aislante. El proceso de fabricación es el mismo que el descrito en la

Sección 3.2. En la Figura 3-13 se muestra el orden en el que se van depositando cada una de las capas y en la Figura 3-14 pueden verse varias fotografías de un sensor en distintas etapas de su fabricación y una vez finalizado.

La característica tomada en cuenta para diferenciar a los diferentes materiales usados, tanto para la capa de aislante como para la capa de cobertor, es su módulo de Young. Para estimarlos se usó un dispositivo de medida de micro-durezas (FISCHERSCOPE HM2000) con una punta piramidal Vickers y una serie de pruebas de tracción con una máquina INSTRON. El primero de los métodos fue usado para estimar el valor de los módulos de las capas más finas como el material del aislante y los electrodos, mientras que el segundo se usó para la estimación de los módulos del resto de capas, como los substratos y los cobertores. En la Tabla 3-1 se muestran los valores de los módulos de Young de los materiales que forman las capas de los sensores fabricados.

Tabla 3-1. Valores de los módulos de Young de las distintas capas.

Capa	Módulo de Young (Pa)
Aislante BlancoUV	$2.3 \cdot 10^9$
Aislante Verde	$1.53 \cdot 10^9$
Aislante VerdeAzul	$1.5 \cdot 10^9$
Aislante RojoEL	$0.1 \cdot 10^9$
Aislante Azul	$1.7 \cdot 10^9$
Aislante TranspUV	$3.3 \cdot 10^9$
Cobertor Pt	$0.14 \cdot 10^6$
Cobertor Rojo	$0.68 \cdot 10^6$
Cobertor Transp	$323.52 \cdot 10^6$
Cobertor PC	$1299 \cdot 10^6$
Substrato (PET)	$2704.87 \cdot 10^6$
Electrodo	$2.96 \cdot 10^9$

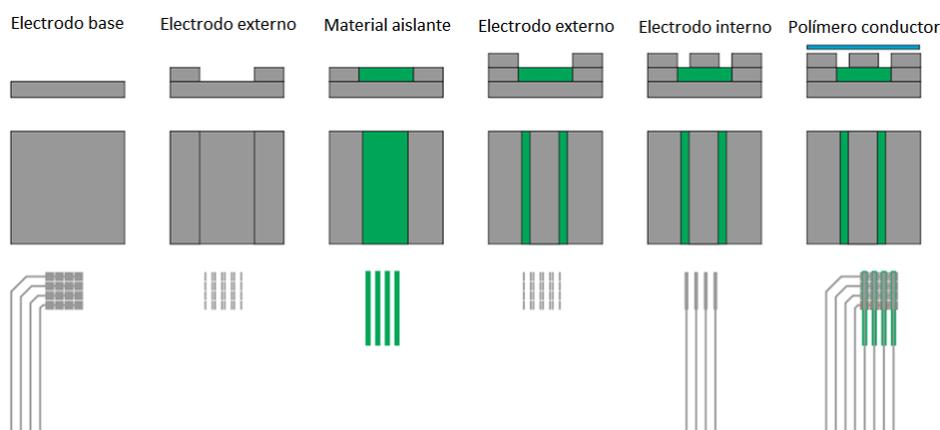


Figura 3-13. Pasos del proceso de fabricación para el sensor multicapa mejorado.

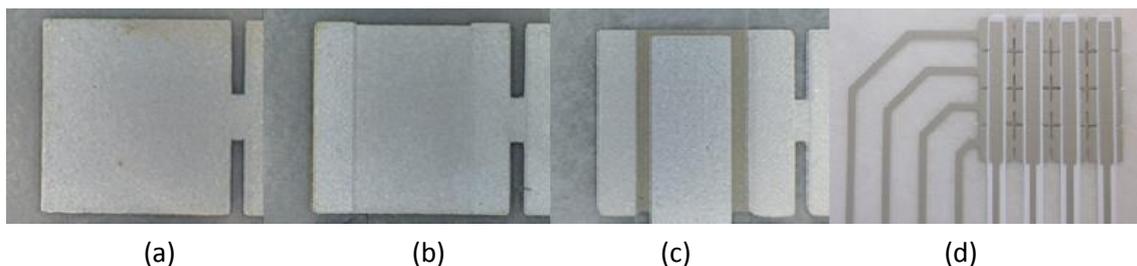


Figura 3-14. Deposición de (a) electrodo base, (b) electrodo externo y (c) electrodo interno en un táctel del sensor. (d) Sensor completo.

Durante el proceso de fabricación se obtuvieron medidas del perfil de los sensores sin las dos últimas capas, la de cobertor y la lámina PEDOT. Estos perfiles se midieron con un dispositivo Vaccaro de la serie Form Talysurf Intra [Taylor Hobson Ltd 2015]. Más adelante se mostrarán algunos de estos perfiles como apoyo a la discusión sobre el comportamiento de los sensores.

3.4.2. Plataforma de caracterización

El sistema de caracterización usado para los experimentos descritos en las siguientes secciones se muestra en la Figura 3-15. Es una evolución del sistema de caracterización de fuerzas normales descrito con anterioridad. Consiste en una plataforma de traslación con tres motores. Uno de ellos controla un émbolo con un muelle en su interior que ejerce una fuerza sobre el sensor a lo largo del eje z . Los otros dos motores controlan una base que se desplaza a lo largo de los ejes x e y . En el extremo inferior del émbolo se instala un sensor de fuerzas de precisión para registrar la fuerza aplicada a los sensores, dicho sensor de referencia es capaz de medir la fuerza aplicada en los tres ejes de coordenadas cartesianas x , y y z . Los motores poseen su propia electrónica de control, al igual que el sensor de referencia, y todo el sistema se conecta a un PC. Mediante una aplicación de control programada en Labview™ se controla el sistema completo. En este caso, la plataforma motorizada se utiliza para ir desplazando el sensor, previamente fijado en ella, de forma que la fuerza se ejerza sobre los diferentes tácteles del mismo. Para ver más detalles acerca de este sistema de caracterización se puede consultar el Anexo F.

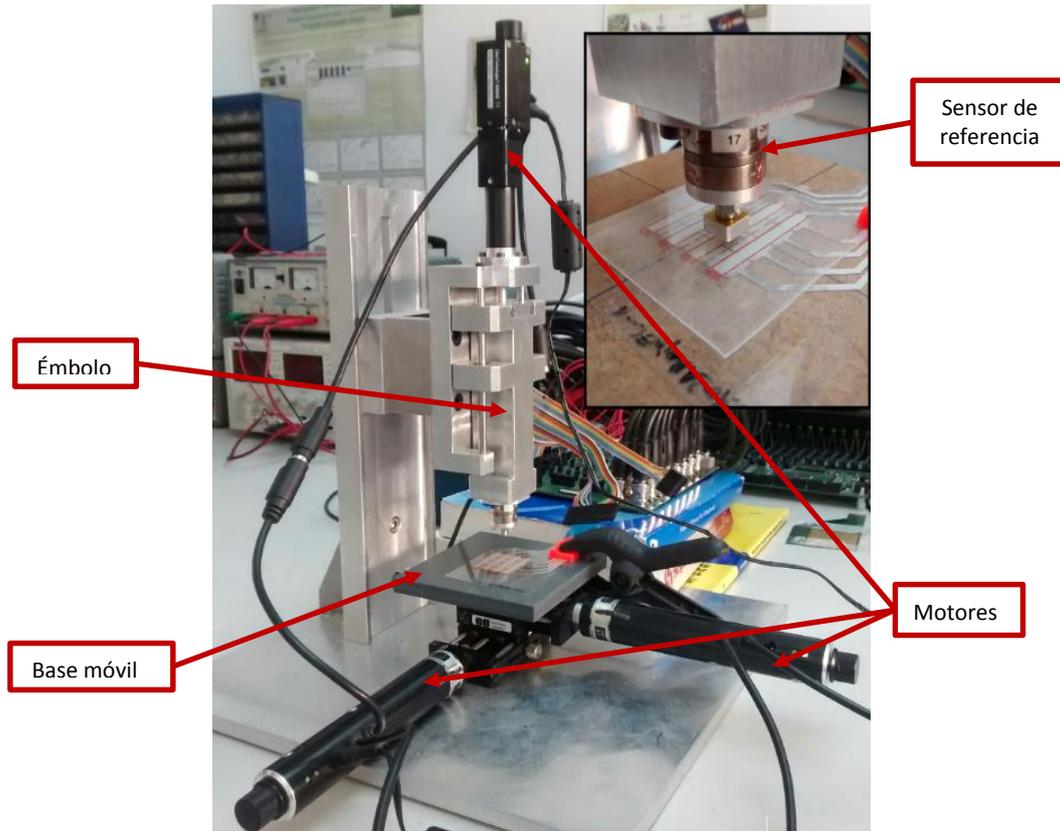


Figura 3-15. Sistema de caracterización.

3.4.3. Análisis y modelado de la respuesta estática del sensor

En esta sección, se va a presentar un modelo básico eléctrico del táctel y un modelo mecánico simple. Apoyándonos en simulaciones FEA se detectarán aquellas limitaciones del modelo mecánico simple que hará necesario el uso de un modelo más complejo. Dichos modelos servirán de apoyo para entender el comportamiento de los sensores mostrado tras la realización de los experimentos.

Modelo eléctrico básico

Ya se mostró cómo el modelo eléctrico básico de un táctel consiste en tres resistencias en serie de las cuales una puede despreciarse. En la Figura 3-16 se muestra dicho modelo para el táctel estudiado.

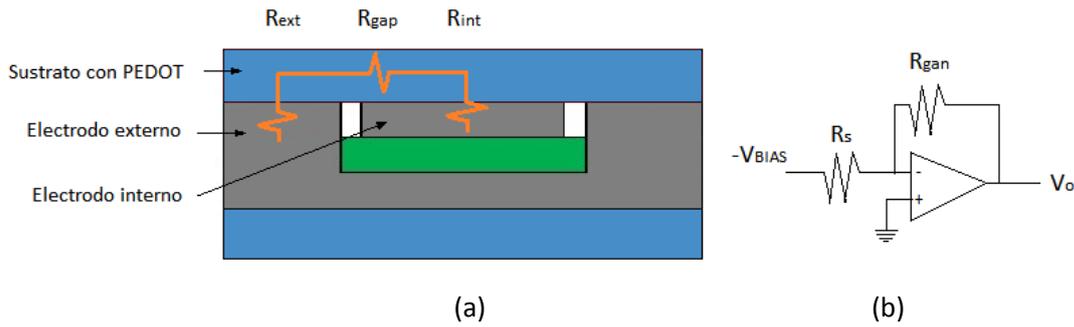


Figura 3-16. (a) Modelo eléctrico básico del táctel multicapa. (b) Circuito de lectura.

La tensión de salida proporcionada por el circuito de acondicionamiento para sensores piezorresistivos viene dada por la siguiente expresión:

$$V_o = \frac{R_{gan}}{R_s(P)} \cdot V_{BIAS} \tag{3.1}$$

donde $R_s(P)$ es la resistencia de un táctel que es una función de la presión ejercida sobre él de tal forma que:

$$R_s(P) = R_{int}(P) + R_{ext}(P) + R_{gap} \tag{3.2}$$

Para más detalles acerca de electrónica de acondicionamiento de estos sensores se puede consultar el Anexo B.

La dependencia de $R_s(P)$ con P está condicionada por las rugosidades a nivel microscópico de la lámina de material conductor por el lado que entra en contacto con los electrodos [Barber 2003].

Los resultados más clásicos en los estudios de tribología establecen una relación lineal entre la fuerza total aplicada y la conductancia que se establece entre dos electrodos que entran en contacto, asumiendo un comportamiento elástico [Greenwood et al. 1966] y un contacto no adhesivo. Algunos modelos más recientes confirman también esta relación lineal, aunque sólo en el caso de que la distribución estadística del tamaño de los contactos a nivel microscópico y las presiones locales permanezcan constantes con el incremento de la carga [Barber 2013; Pastewka et al. 2013; Lorenz et al. 2009]. Bajo este supuesto la conductancia puede expresarse de la siguiente manera:

$$C_x = k_x \cdot P_x \quad (3.3)$$

donde el subíndice x se refiere al electrodo interno o externo (*int* o *ext*) y k_x es una constante que depende de las propiedades eléctricas y mecánicas de los materiales en contacto [Barber 2003]. La conductancia resultante puede expresarse como:

$$C_s(P) = C_{int}(P_{int}) || C_{ext}(P_{ext}) || C_{gap} \quad (3.4)$$

donde se define el operador paralelo ($||$) como:

$$(a || b) = \frac{a \cdot b}{a + b} \quad (3.5)$$

C_{gap} es un valor grande (la conductividad del polímero es de 8.2 S/m) en comparación con el resto de conductividades y tiene una dependencia ínfima con la presión [Weiss et al. 2005]. Si despreciamos el efecto de C_{gap} y se asume que el contacto de ambos electrodos con la lámina de material conductor es idéntico, de las ecuaciones (3.1), (3.3) y (3.4) se puede expresar la tensión de salida del táctel de la siguiente manera:

$$V_o = \frac{\alpha_{int} \cdot F_{int} \cdot \alpha_{ext} \cdot F_{ext}}{\alpha_{int} \cdot F_{int} + \alpha_{ext} \cdot F_{ext}} \cdot R_{gan} \cdot V_{BIAS} = \alpha \cdot \frac{F_{int} \cdot F_{ext}}{F_{int} + F_{ext}} \cdot R_{gan} \cdot V_{BIAS} \quad (3.6)$$

donde $\alpha_x = k_x / A_x$ siendo A_x el área del electrodo x , y $\alpha = \alpha_{int} = \alpha_{ext}$ si el tamaño de los dos contactos son iguales. Si nombramos a las fuerzas que soportan el electrodo interno y externo como F_{int} y F_{ext} respectivamente y asumimos que la fuerza total aplicada al táctel se reparte entre ambos electrodos, se puede expresar:

$$F = F_{int} + F_{ext} \quad (3.7)$$

$$F_{int} = a \cdot F \quad (3.8)$$

Donde el parámetro $a \in [0,1]$ determina el balance de fuerzas entre ambos electrodos y F es la fuerza total aplicada sobre el táctel. De las ecuaciones (3.6), (3.7) y (3.8) se puede obtener:

$$V_o = k \cdot a \cdot (1-a) \cdot F \quad (3.9)$$

Por lo tanto, se obtiene una relación lineal entre la salida en voltaje del táctel y la fuerza normal aplicada sobre él, con una sensibilidad S dada por la siguiente ecuación:

$$S = k \cdot a \cdot (1-a) \quad (3.10)$$

Hay que hacer notar que dicha sensibilidad es máxima cuando el parámetro $a=0.5$; es decir, cuando la fuerza que soporta cada electrodo es la misma (están balanceadas).

Modelo mecánico básico

El sensor está fabricado superponiendo capas de materiales elásticos, así que en una primera aproximación puede realizarse un modelado simple basado en barras, que actúan como muelles, con sus constantes elásticas. Este modelo simple puede ayudar a comprender el comportamiento de los sensores y dar algunas guías para su diseño [Castellanos-Ramos *et al.* 2011]. Con esta aproximación se llega al modelo ilustrado en la Figura 3-17. El táctel se modela superponiendo una serie de capas con área A_{capa} , espesor l_{capa} y una constante elástica dada por la siguiente expresión:

$$K_{capa} = \frac{E_{capa} \cdot A_{capa}}{l_{capa}} \quad (3.11)$$

donde E_{capa} es el módulo de Young de cada una de las capas.

De la Figura 3-17 se pueden extraer las siguientes expresiones para las fuerzas de contacto soportadas por ambos electrodos:

$$F_{int} = \frac{(K_{cob} || K_{subsPEDOT} || K_{ais} || K_{int} || K_{subs})}{K_{eq}} \cdot F$$

$$F_{ext} = \frac{(K_{cob} || K_{subsPEDOT} || K_{ext} || K_{subs})}{K_{eq}} \cdot F \quad (3.12)$$

donde $K_{eq} = (K_{cob} || K_{subsPEDOT} || K_{ais} || K_{int} || K_{subs}) + (K_{cob} || K_{subsPEDOT} || K_{ext} || K_{subs})$ es la constante elástica equivalente del táctel completo. De las ecuaciones (3.8) y (3.12) se puede expresar el parámetro a de la siguiente manera:

$$a = \frac{(K_{cob} || K_{subsPEDOT} || K_{ais} || K_{int} || K_{subs})}{K_{eq}} \quad (3.13)$$

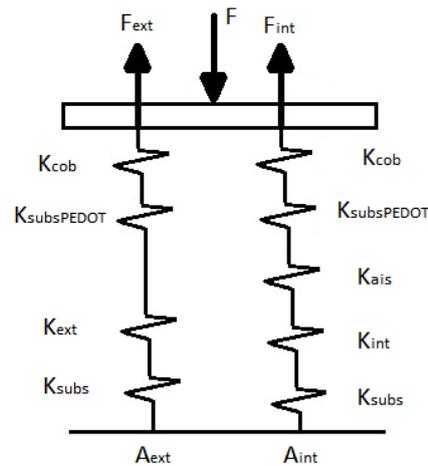


Figura 3-17. Modelo mecánico básico del táctel multicapa.

Idealmente puede ajustarse la sensibilidad del táctel del sensor eligiendo de forma apropiada los parámetros geométricos y las propiedades mecánicas de los distintos materiales (sus constantes elásticas por ejemplo). La condición de máxima sensibilidad se da en el caso de que $a=0.5$, las fuerzas soportadas por cada electrodo son idénticas, y para ello se tiene que cumplir que $K_{ext} = K_{ais} \parallel K_{int}$ o lo que es lo mismo:

$$K_{ais} = \frac{K_{ext} \cdot K_{int}}{K_{int} - K_{ext}} \quad (3.14)$$

Sin embargo, existen más posibilidades para alcanzar un equilibrio de las fuerzas soportadas por cada electrodo si realizamos algunas aproximaciones. En el caso de que $K_{ais} \gg K_{cob}$, en la ecuación (3.12) puede despreciarse K_{ais} (asumiendo también que se dan las siguientes relaciones: $K_{int} \gg K_{cob}$ y $K_{ext} \gg K_{cob}$). En la Figura 3-18 se muestra el cambio del parámetro a con la variación de los valores de los módulos de Young de las capas de aislante y cobertor. Los módulos elásticos del resto de capas de la ecuación (3.13) se muestran en la Tabla 3-2. La máxima sensibilidad ($a=0.5$) se alcanza para valores bajos del módulo de Young del cobertor y para valores altos del módulo de Young del aislante. Por el contrario, a medida que se incrementa el valor del módulo del cobertor y se disminuye el del aislante, el parámetro a , y por lo tanto la sensibilidad, disminuye. Hay que notar también que $a \leq 0.5$. Valores por encima de 0.5 significarían valores negativos de K_{ais} según el modelo de la Figura 3-17, lo cual es imposible. En este modelo la fuerza que soporta el electrodo externo es siempre mayor o igual

que la soportada por el electrodo interno. Sin embargo, si las condiciones geométricas del táctel no son las ideales, por ejemplo hay una diferencia de altura entre los electrodos, se puede dar el caso de valores de α por encima de 0.5. Esta cuestión se discutirá más adelante.

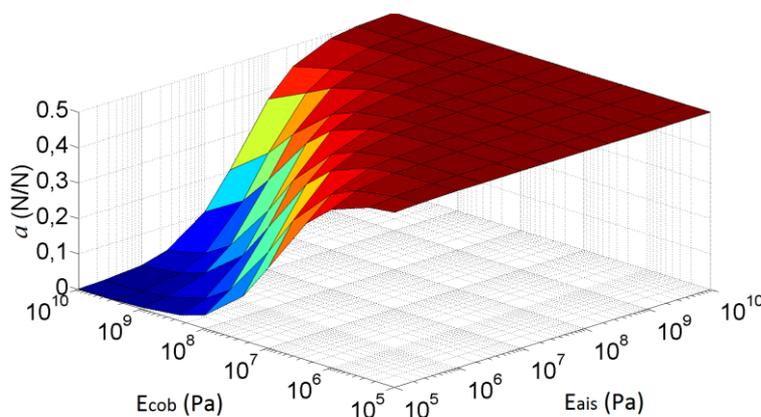


Figura 3-18. Parámetro α en función del módulo de Young de la capa de aislante y la capa de cobertor calculado mediante el modelo mecánico básico.

Tabla 3-2. Constantes elásticas obtenidas del módulo de Young de los materiales usados (Tabla 3-1) y la geometría del táctel (ver Figura 3-12 y ecuación (3.11)).

Capa	Constante elástica K (N/m)
Substrato PEDOT	$7.05 \cdot 10^8$
Electrodo externo	$1.68 \cdot 10^9$
Electrodo interno	$2.52 \cdot 10^9$
Substrato	$2.74 \cdot 10^8$

Análisis por elementos finitos (FEA)

Mediante una serie de simulaciones FEA se confirman los resultados obtenidos en la sección anterior con el modelo mecánico simple. El análisis de elementos finitos se realiza con la aplicación Comsol Multiphysic®. Se programa un táctel con la geometría y las condiciones descritas anteriormente. Para cada táctel se programan siete entidades, seis de ellas se corresponden con las distintas capas del mismo: el substrato, el electrodo externo, el aislante, el electrodo interno, la lámina con el polímero conductor y el cobertor. La séptima entidad es auxiliar y se trata de una placa de aluminio situada sobre el táctel sobre la que se ejerce la

fuerza. Las condiciones de contorno de todas las entidades son libres salvo las que se describen a continuación:

- El contorno inferior del substrato tiene programada la condición de fijo. Esto se hace para emular el apoyo del sensor sobre la base del sistema de caracterización, el sensor queda fijo y no puede desplazarse ni girarse.
- Los contornos laterales del substrato, la lámina PEDOT y el cobertor tienen programada la condición de plano de simetría. En las simulaciones sólo se programa un táctel, y esta condición emula el hecho de que estas capas continúan a lo largo del eje horizontal, ya que tienen otro táctel a cada lado.
- El contorno superior de la placa de aluminio tiene una carga aplicada en la dirección del eje y , emulando las cargas a las que se somete al sensor.

Las uniones de las distintas capas se realizan programando pares de identidad. Se programa además un par de contacto para la unión que se pretende estudiar, que es el contacto entre la superficie superior de los electrodos y la superficie inferior de lámina con el polímero conductor (lámina PEDOT). De esta manera se puede estudiar la distribución de presiones a lo largo de dicho contacto. Para programar el contacto es necesario definir un contorno que actúa como fuente y otro como destino. Como regla general se selecciona como fuente el contorno con mayor rigidez, por lo que la parte de los electrodos actúa en este caso como fuente y la lámina PEDOT como destino. El mallado usado es el triangular por defecto, teniendo sólo en cuenta una consideración: el contorno destino debe tener al menos el doble de nodos que el contorno fuente.

En las figuras Figura 3-19 a la Figura 3-25 se muestran los resultados de las simulaciones en siete puntos diferentes de la superficie a mostrados en la Figura 3-26. Para valores altos del módulo de Young del aislante y/o valores bajos del módulo de Young del cobertor se observa un equilibrio entre las presiones soportadas por los electrodos interno y externo. Por el contrario, valores bajos del módulo de Young del aislante y valores altos para el cobertor tienen como efecto un desbalanceo en las fuerzas soportadas por cada electrodo. Otro efecto que hay que hacer notar es el perfil desigual que se observa en la Figura 3-21 y Figura 3-23, debido a la penetración de los materiales en los bordes, especialmente en el caso de materiales blandos.

En la Figura 3-26 se muestra la superficie del mismo parámetro a ilustrado en la Figura 3-18 pero obtenido mediante las simulaciones FEA. Se realizaron simulaciones paramétricas

variando el valor de los módulos de Young del aislante y el cobertor, tomando los siguientes valores: 10^5 Pa, $2.5 \cdot 10^5$ Pa, 10^6 Pa, $2.5 \cdot 10^6$ Pa, 10^7 Pa, $2.5 \cdot 10^7$ Pa, 10^8 Pa, $2.5 \cdot 10^8$ Pa, 10^9 Pa, $2.5 \cdot 10^9$ Pa y 10^{10} Pa. La fuerza en el contacto se obtiene integrando la distribución de presión a lo largo de la superficie de cada electrodo. La diferencia entre ambas superficies se muestra en la Figura 3-27. La máxima diferencia en a es del 3.5% respecto al fondo de escala. Además, de la ecuación (3.10):

$$\frac{dS}{S} = \frac{1-2 \cdot a}{1-a} \cdot \frac{da}{a} \tag{3.15}$$

Donde dS/S se incrementa al disminuir el valor de a , y la máxima variación de la sensibilidad es también del 3.5% respecto al fondo de escala para $a=0$.

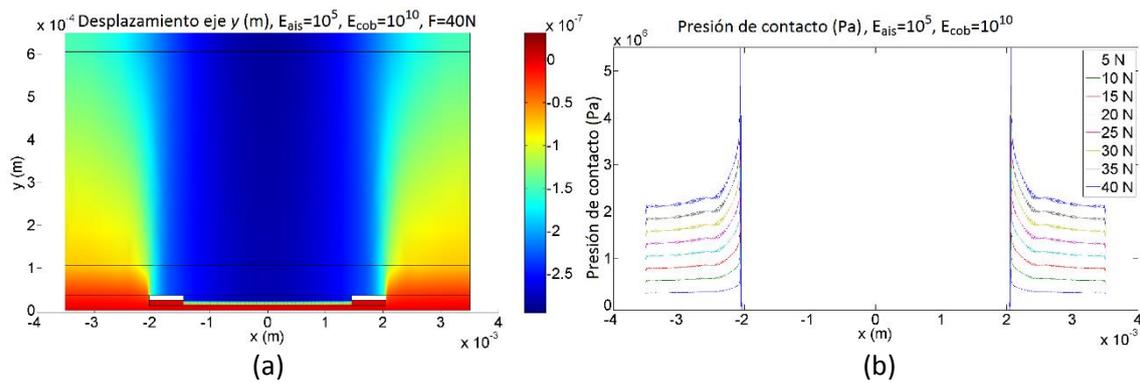


Figura 3-19. Simulación del punto P1 en la superficie a de la Figura 3-26. (a) Desplazamiento para una fuerza aplicada de 40N. (b) Presión de contacto para varias fuerzas aplicadas.

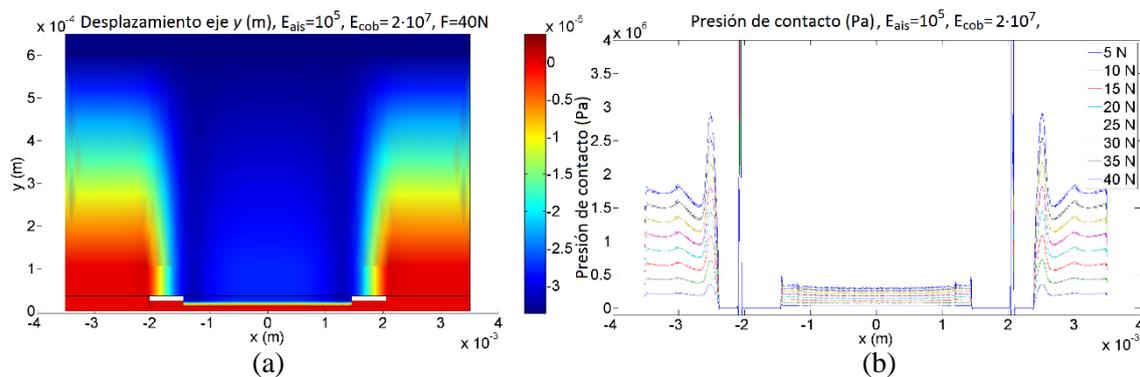


Figura 3-20. Simulación del punto P2 en la superficie a de la Figura 3-26. (a) Desplazamiento para una fuerza aplicada de 40N. (b) Presión de contacto para varias fuerzas aplicadas.

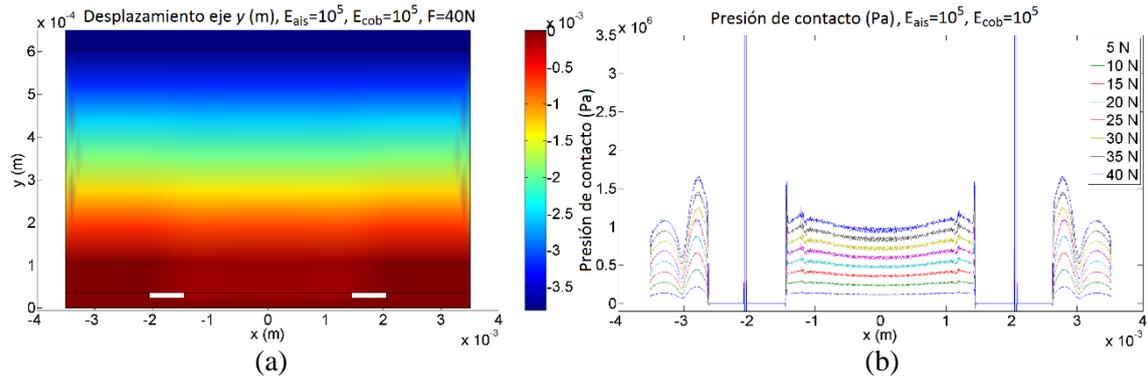


Figura 3-21. Simulación del punto P3 en la superficie α de la Figura 3-26. (a) Desplazamiento para una fuerza aplicada de 40N. (b) Presión de contacto para varias fuerzas aplicadas.

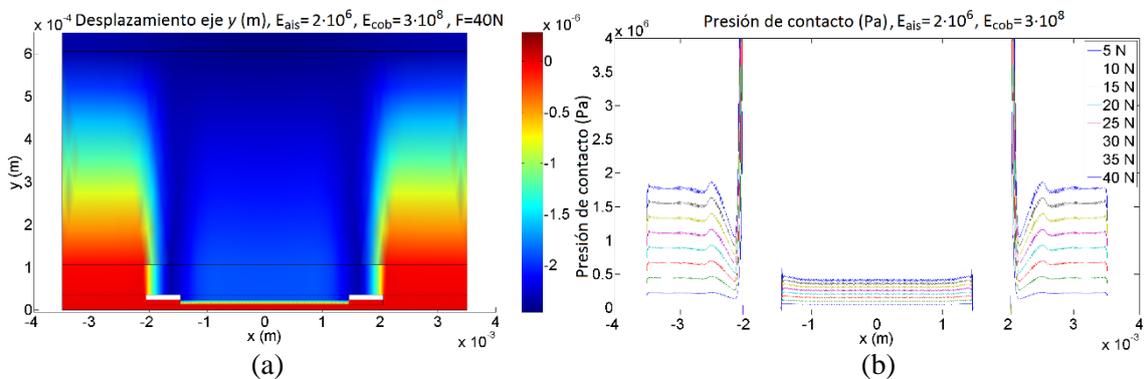


Figura 3-22. Simulación del punto P4 en la superficie α de la Figura 3-26. (a) Desplazamiento para una fuerza aplicada de 40N. (b) Presión de contacto para varias fuerzas aplicadas.

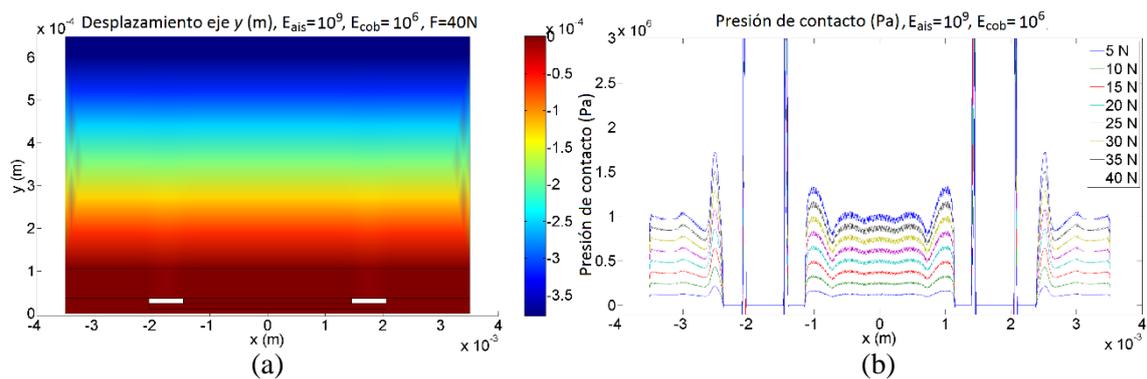


Figura 3-23. Simulación del punto P5 en la superficie α de la Figura 3-26. (a) Desplazamiento para una fuerza aplicada de 40N. (b) Presión de contacto para varias fuerzas aplicadas.

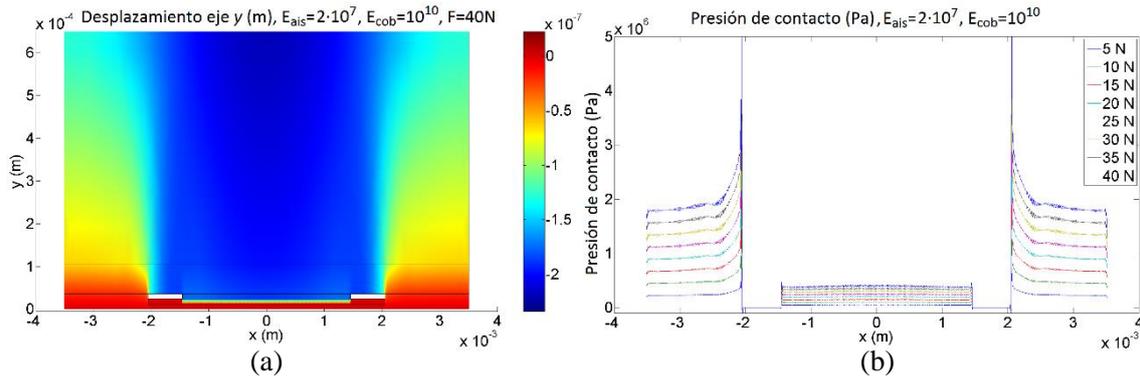


Figura 3-24. Simulación del punto P6 en la superficie α de la Figura 3-26. (a) Desplazamiento para una fuerza aplicada de 40N. (b) Presión de contacto para varias fuerzas aplicadas.

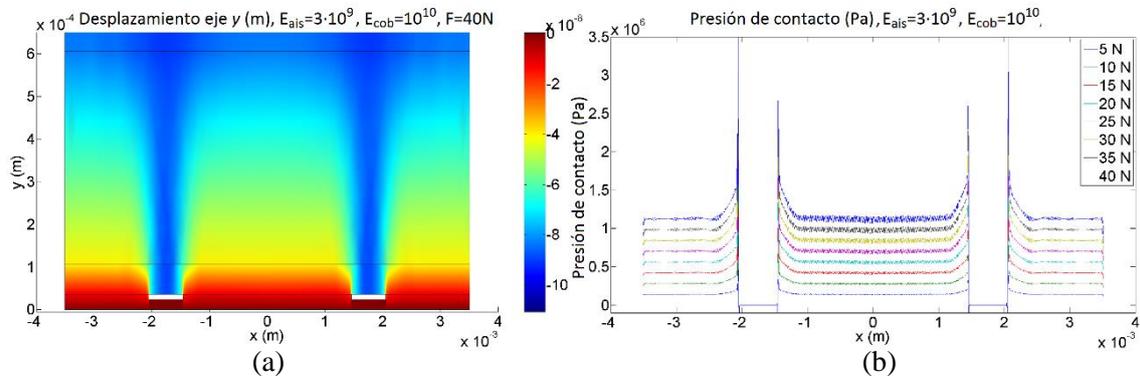


Figura 3-25. Simulación del punto P7 en la superficie α de la Figura 3-26. (a) Desplazamiento para una fuerza aplicada de 40N. (b) Presión de contacto para varias fuerzas aplicadas.

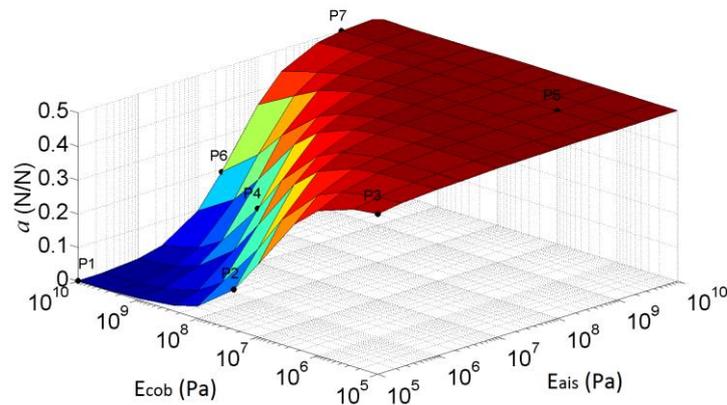


Figura 3-26. Parámetro α en función de los módulos de Young de la capa de aislante y cobertor obtenido mediante las simulaciones FEA.

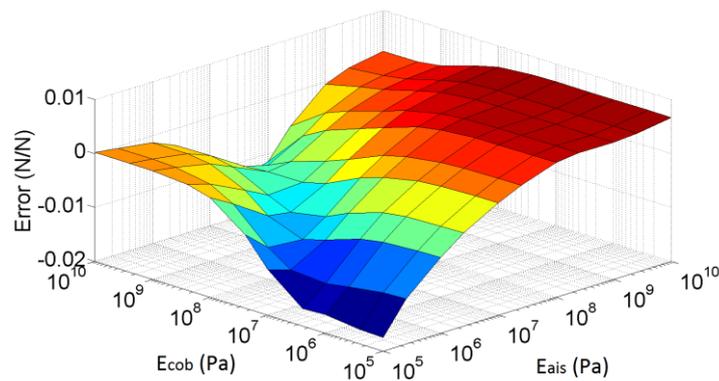


Figura 3-27. Diferencia del parámetro α calculado con el modelo mecánico básico y el obtenido de las simulaciones FEA.

Se comprueba que concuerdan los resultados de la sensibilidad predicha por los modelos básicos y por las simulaciones, a pesar de los efectos de borde observados en las simulaciones. Sin embargo, si la implementación del sensor se desvía mucho de las condiciones del modelo simple, ya no son de aplicación las ecuaciones para el cálculo de la sensibilidad.

Limitaciones del modelo simple

Los modelos simples descritos anteriormente hacen las siguientes suposiciones, que son además las metas a conseguir de un diseño ideal:

1. Las constantes de la ecuación (3.6) son iguales ($\alpha_{int} = \alpha_{ext}$) y no dependen de la fuerza aplicada al sensor F .
2. La fuerza aplicada se distribuye entre ambos electrodos como se indica en la ecuación (3.7), la fuerza total aplicada al táctel es la suma de las fuerzas que soporta cada electrodo.
3. El balance entre las fuerzas de ambos electrodos, el parámetro a , no depende de la fuerza aplicada F .
4. La superficie de los electrodos es plana y están situados a la misma altura.
5. La presión a lo largo de la superficie de contacto es uniforme.

La tecnología de *screen-printing*, descrita al inicio del capítulo, genera unos sensores con perfiles como los que se ilustran en las figuras Figura 3-33(c) a la Figura 3-37(c). El perfil de la parte conductora de la lámina con el polímero conductor (lámina PEDOT) se muestra en la

Figura 3-28. Ambas rugosidades, las de los electrodos y la de la lámina conductora, podrían sumarse y considerar una interfaz equivalente entre una superficie rugosa, con la rugosidad resultante, y una superficie plana [Hyun *et al.* 2004]. En las gráficas de las perfilometrías se observa que las rugosidades de los electrodos son significativas, apreciándose esto en las microfotografías realizadas sobre las matrices fabricadas Figura 3-29(a). La deposición de la última capa de material conductor sobre el material aislante para formar el electrodo interno no es uniforme. Este efecto es sobre todo notable en el caso del sensor con el aislante RojoEL, ver Figura 3-29(a). Esto es debido a la mayor rugosidad que presenta la capa de aislante RojoEL. Se observa esto también en el test de penetración, para la estimación de los módulos de Young, en donde las salidas correspondientes a las cuatro puntas están dispersas, ver Figura 3-29(b) [Pelletier *et al.* 2007], lo que indica una superficie irregular. En los perfiles de los sensores se observan también diferencias de alturas entre los electrodos interno y externos e incluso picos del material aislante, que en algunos casos sobresale por encima del electrodo interno. En este caso la ecuación (3.7) no se cumple, ya que parte de la fuerza aplicada es soportada por el material aislante. Por último, en las simulaciones de la sección anterior se muestran distribuciones irregulares en el contacto con un aumento de la presión en los bordes de los electrodos (ver figuras Figura 3-19 a Figura 3-25).

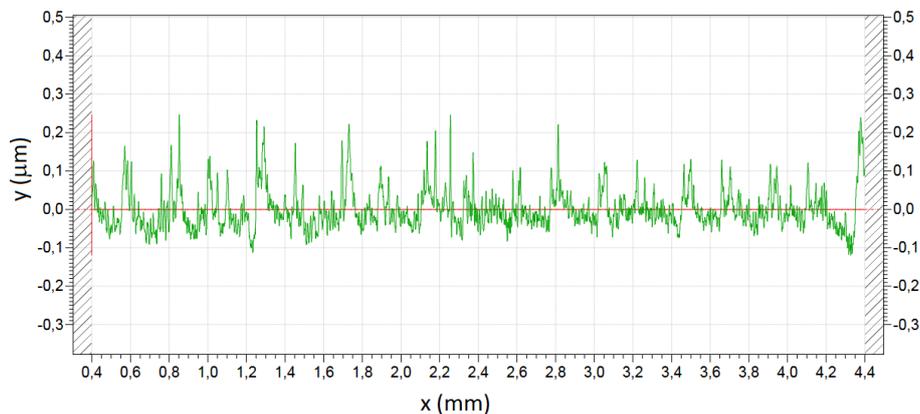


Figura 3-28. Perfil de la cara sensible de la lámina PEDOT.

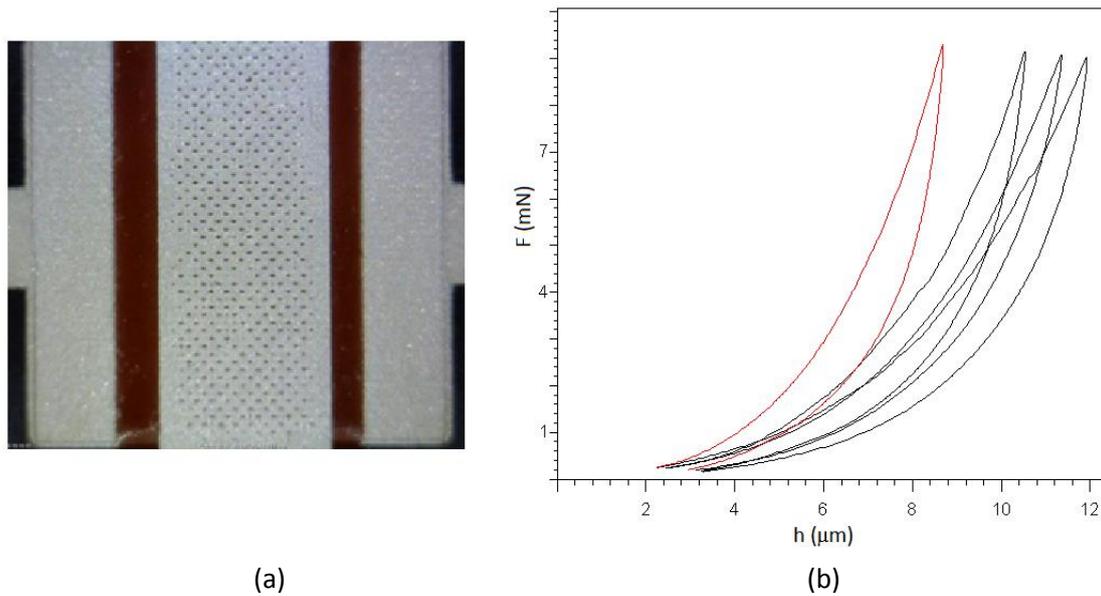


Figura 3-29. (a) Microfotografía del sensor con el aislante RojoEL. (b) Curvas de salida del test de penetración para la estimación del módulo de Young.

Los perfiles de presión de los sensores de la Figura 3-33(c) a la Figura 3-37(c) son mucho más complejos que los mostrados en la sección anterior. Realmente el área de contacto y la fuerza soportada por cada electrodo dependen de la fuerza aplicada y es de esperar un comportamiento no tan lineal como predicen los modelos simples. Este hecho se ilustra en la Figura 3-30, donde se muestra la simulación de un contacto plano y un contacto rugoso. El contacto simulado es el electrodo interno de un táctel, y la rugosidad se modela eliminando cuadrados distribuidos a lo largo del electrodo y dando diferente altura a los que quedan. La relación entre la fuerza aplicada y el desplazamiento de la capa de cobertor es lineal en el caso del contacto liso, mientras que esta linealidad desaparece en el caso del contacto con rugosidad. La conductancia en la interfaz de contacto puede expresarse como [Barber 2003]:

$$C_x = \frac{2}{\rho^* \cdot E^*} \cdot K_{int} \quad (3.16)$$

Donde ρ^* y E^* son la resistividad y el módulo de Young combinado de los materiales en contacto y $K_{int} = dF_x / d\delta$, siendo F_x la fuerza normal al contacto y δ el desplazamiento causado por dicha fuerza. Esta constante elástica de la interfaz K_{int} puede considerarse en serie con el resto de constantes en el modelo de la Figura 3-17 [Pastewka et al. 2013].

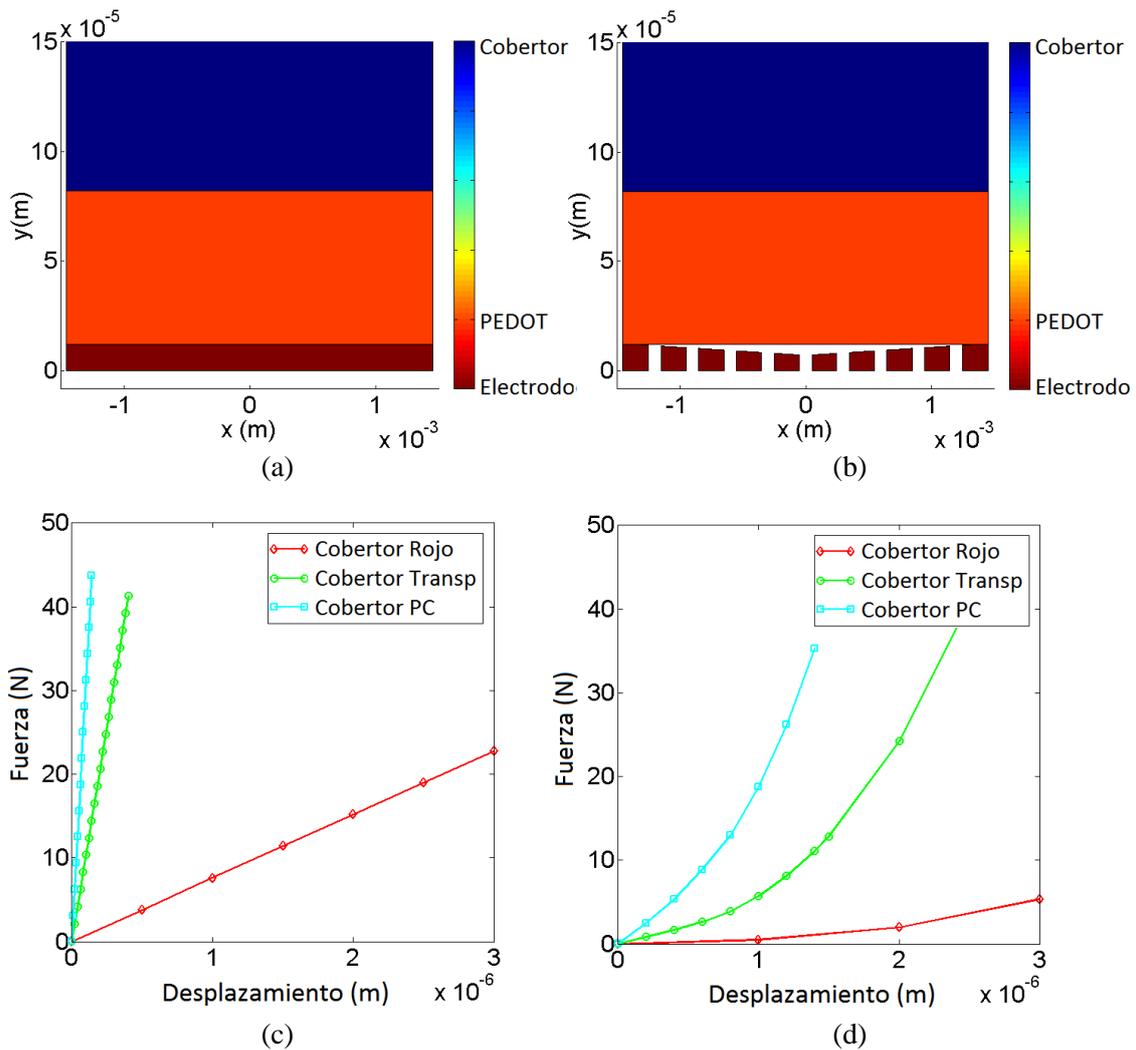


Figura 3-30. Geometría simulada de (a) un contacto plano y (b) un contacto rugoso. Salida de la simulación FEA para (c) el contacto plano y (d) el contacto rugoso.

En el límite termodinámico [Pastewka et al. 2013] la distribución estadística del tamaño de los contactos a nivel microscópico y de las presiones locales permanece constante con el incremento de la carga, con lo que K_{int} es lineal con respecto a F_x y la ecuación (3.3) sigue teniendo validez [Barber 2013; Pastewka et al. 2013].

Esto, sin embargo, no es cierto para pequeñas cargas, donde sólo se establecen unos pocos contactos microscópicos, o cuando hay bordes que provocan efectos de penetración. En estos casos la longitud de onda de baja frecuencia del perfil de la superficie es la que determina el comportamiento del régimen. La dimensión de esta longitud de onda determinará el

comportamiento de forma cuantitativa y su textura a nivel cualitativo [Ciavarella et al. 2008, 2004]. En este caso K_{int} ya no es lineal con respecto a la fuerza y se espera una gran diferencia entre distintas muestras. Al aumentar la carga, el área de contacto que permite esta onda de baja frecuencia alcanza un máximo y la constante de la interfaz y la conductancia vuelven a ser lineales con la presión en el contacto. Esto sólo ocurre si la longitud de onda es pequeña comparada con el tamaño del contacto [Barber 2013]. Si esto no ocurre la relación no es lineal y de nuevo la dispersión entre muestras es elevada. En este caso la ecuación (3.3) puede escribirse de la siguiente manera:

$$C_x = k_x \cdot P_x^m \quad (3.17)$$

donde $m=1$ en el límite termodinámico. Para cargas pequeñas y medianas, hay una dependencia no lineal, $m < 1$. Realmente m depende de la dimensión fractal D (exponente de Hurst) del perfil de la superficie [Pastewka et al. 2013; Pohrt et al. 2012]. Para una punta cuadrada finita el valor de $m \approx 0.2567 \cdot D$, que está dentro del rango 0.51 a 0.77 para una dimensión fractal de 2 a 3. Finalmente, los efectos de borde observados en las simulaciones FEA introducen también una dependencia no lineal.

Modelo extendido

Del análisis de la sección anterior se deduce que la longitud de onda de las rugosidades de las superficies en contacto tiene un impacto directo en la respuesta del sensor, concretamente en su sensibilidad y linealidad. Realizar una simulación del sensor completo de la Figura 3-29(a) teniendo en cuenta todas las rugosidades es una tarea muy compleja y no se alcanza una solución. Como alternativa para explicar el comportamiento del sensor, y tener en cuenta las limitaciones antes mencionadas, se propone usar un modelo de *Winkler*. Este modelo simple consiste en partir las distintas capas del táctel en barras de forma que cada una de ellas actúa como si fuera un muelle con su constante elástica. Este método ha sido usado para modelar la cubierta de un sensor en los dedos de una mano robótica [Harada et al. 2014], y el modelo puede extenderse al caso de múltiples capas [Nobili 2012]. De esta forma se puede realizar un modelo extendido de los sensores tratados como un conjunto de barras independientes cada una de ellas compuestas por varias capas, como se ilustra en la Figura 3-31.

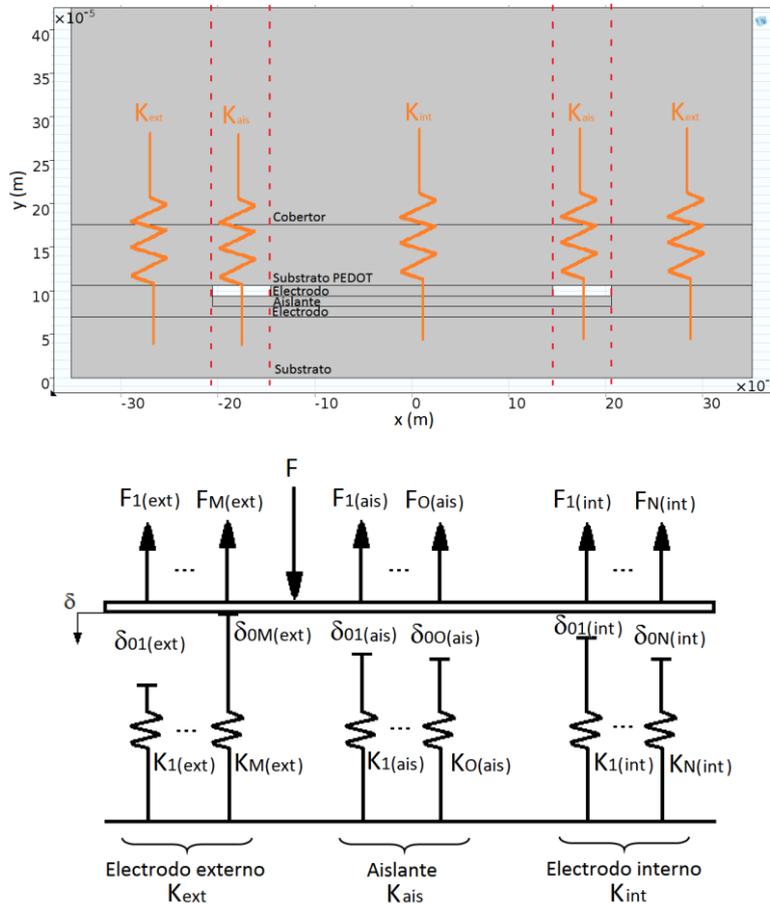


Figura 3-31. Modelo de Winkler de un táctel multicapa.

Para modelar la longitud de onda de baja frecuencia de las rugosidades se asigna una altura diferente a cada una de las barras del modelo. De esta forma el contacto se establece en un primer momento con las barras más altas y las demás van entrando en contacto a medida que la fuerza aplicada al táctel aumenta; puede haber incluso barras que nunca lleguen a entrar en contacto. Este enfoque se asemeja a las teorías clásicas en el sentido de que los contactos de las barras pretenden modelar contactos agrupados que actúan como un contacto simple del tamaño de la envolvente [Greenwood 1966], en el que la posición de las agrupaciones se modela con las rugosidades superficiales de gran escala y los contactos microscópicos con las rugosidades de pequeña escala [Barber 2003; Greenwood 1966; Archard 1957]. Se predice además una relación lineal entre la conductancia eléctrica y la fuerza normal aplicada independientemente de la forma de las rugosidades en la interfaz de contacto [Greenwood et al. 1966]. Este modelo, sin embargo, adolece de falta de interacción entre las barras (emulando a las rugosidades) [Greenwood et al. 2001]. Este efecto se puede contemplar

introduciendo además del desplazamiento local, un desplazamiento global de las barras que estén en contacto [Ciavarella et al. 2006]. El modelo aquí presentado se asemeja a este último enfoque en el sentido de que la fuerza que se ejerce sobre una barra depende de las fuerzas que soportan las demás. Las ecuaciones que rigen el comportamiento del modelo son las siguientes:

$$F_i = \begin{cases} K_i \cdot (\delta - \delta_{0i}) & \delta \geq \delta_{0i} \\ 0 & \delta < \delta_{0i} \end{cases} \quad (3.18)$$

$$\sum_i^N K_i \cdot (\delta - \delta_{0i}) = F; \quad \forall i \text{ tal que } \delta \geq \delta_{0i} \quad (3.19)$$

$$\delta = \frac{F + \sum_i^N (K_i \cdot \delta_{0i})}{\sum_i^N K_i}; \quad \forall i \text{ tal que } \delta \geq \delta_{0i} \quad (3.20)$$

Hay que hacer notar que F_i depende de δ , y δ se determina a partir de todas las barras que están en contacto, de forma que F_i se calcula de forma iterativa.

Si el área de todas las barras es la misma:

$$\begin{aligned} F_{int} &= \sum_{i=1}^N F_{i(int)} \\ F_{ext} &= \sum_{i=1}^M F_{i(ext)} \\ F_{ais} &= \sum_{i=1}^O F_{i(ais)} \end{aligned} \quad (3.21)$$

donde N , M y O son el número de barras para modelar el electrodo interno, externo y el aislante respectivamente. La fuerza normal aplicada al táctel es ahora:

$$F = F_{int} + F_{ext} + F_{ais} \quad (3.22)$$

Esta ecuación sustituye a la ecuación (3.7), ya que parte de la fuerza aplicada recae sobre el aislante. Teniendo en cuenta estas expresiones, la ecuación (3.6) puede expresarse de la siguiente manera:

$$V_o = \alpha \cdot \frac{\sum_i^N F_{i(int)}^m \cdot \sum_i^M F_{i(ext)}^m}{\sum_i^N F_{i(int)}^m + \sum_i^M F_{i(ext)}^m} \cdot R_{gan} \cdot V_{BIAS} \quad (3.23)$$

Hay que tener en cuenta que el contacto efectivo se produce entre las superficies de los electrodos y la lámina PEDOT, por lo que el contacto que pueda haber con el aislante no tiene efecto en la salida del sensor.

Este modelo extendido, aunque es simple, contempla la posible diferencia de tamaño de los electrodos, las diferentes fuerzas que puedan soportar cada electrodo y las diferencias de alturas que haya no solo entre los electrodos, sino dentro de un mismo electrodo (rugosidades). Esta última característica permite la posibilidad de que haya un umbral de presión en el sensor por la ausencia de contacto con alguno de los electrodos cuando la fuerza aplicada al sensor sea pequeña. El asentamiento progresivo del contacto con las barras, al aumentar la fuerza aplicada, del modelo de la Figura 3-31 introduce el efecto de textura y la dependencia del balanceo de las fuerzas en los electrodos interno y externo con la fuerza total aplicada al táctel. El parámetro m contempla la no linealidad de la salida cuando no se alcanza el límite termodinámico, en este caso a bajas fuerzas aplicadas. Teniendo en cuenta que el contacto se establece entre la lámina de polímero conductor y los electrodos de plata, se asume la misma dimensión fractal para el contacto de la barras sin importar la capa de aislante o cobertor que se use. Por simplicidad no se introduce la dependencia de m con la carga aplicada (en [Pastewka et al. 2013] se introduce una expresión teórica compleja para el límite entre la zona lineal y no lineal pero no se dispone de los datos necesarios para contemplarlo en el modelo). En resumen, el modelo extendido soluciona muchas de las limitaciones del modelo simple presentado en las secciones anteriores.

3.4.4. Resultados experimentales y discusión

En esta sección se muestran los resultados de la caracterización de un conjunto de sensores fabricados con distintos materiales para la capa de aislante y para la capa de cobertor, al objeto de determinar su influencia en la curva de entrada-salida. A continuación se detallan los experimentos y resultados y el análisis de los últimos a la luz de los modelos descritos en las secciones anteriores.

Primer conjunto de pruebas

Se evalúan en este experimento cinco sensores cada uno usando un material distinto para la capa de aislante. En la Figura 3-32 se muestran fotografías de estos sensores. Para ejercer la fuerza sobre los sensores se posa una placa cuadrada de 15.24 mm de lado y 4 mm de espesor. Dicha placa cubre el área de los cuatro tácteles centrales del sensor, y el sistema de caracterización aplica la fuerza en el centro de la placa. Se va a obtener por lo tanto en un solo ciclo la salida de los cuatro tácteles del sensor. Para cada sensor se realizan cinco ciclos de carga y descarga y el resultado será la media de todos los ciclos. Los resultados se representan en las figuras Figura 3-33 a la Figura 3-37. En cada gráfica se muestra la salida de los cuatro tácteles centrales del sensor, el valor medio de estos cuatro tácteles con su dispersión y el perfil de una de las filas del sensor. En la Figura 3-38 se muestran las medias de todos los ciclos de carga de los cinco sensores evaluados.

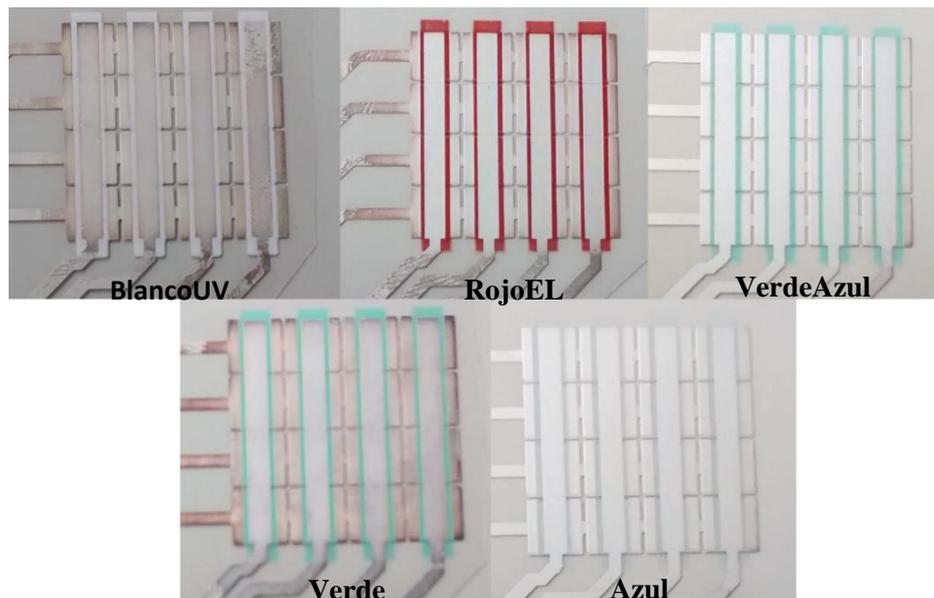


Figura 3-32. Sensores evaluados con distintos materiales para la capa aislante en el primer conjunto de pruebas.

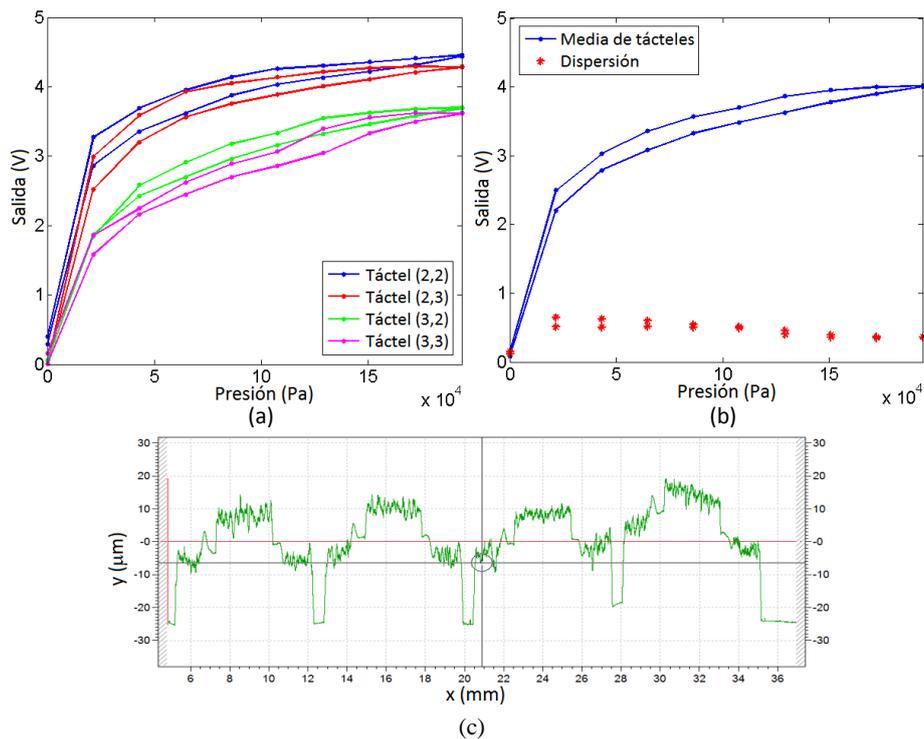


Figura 3-33. (a) Salida de los tácteles centrales del sensor con aislante BlancoUV. (b) Media y dispersión de los tácteles centrales. (c) Perfil de una fila del sensor.

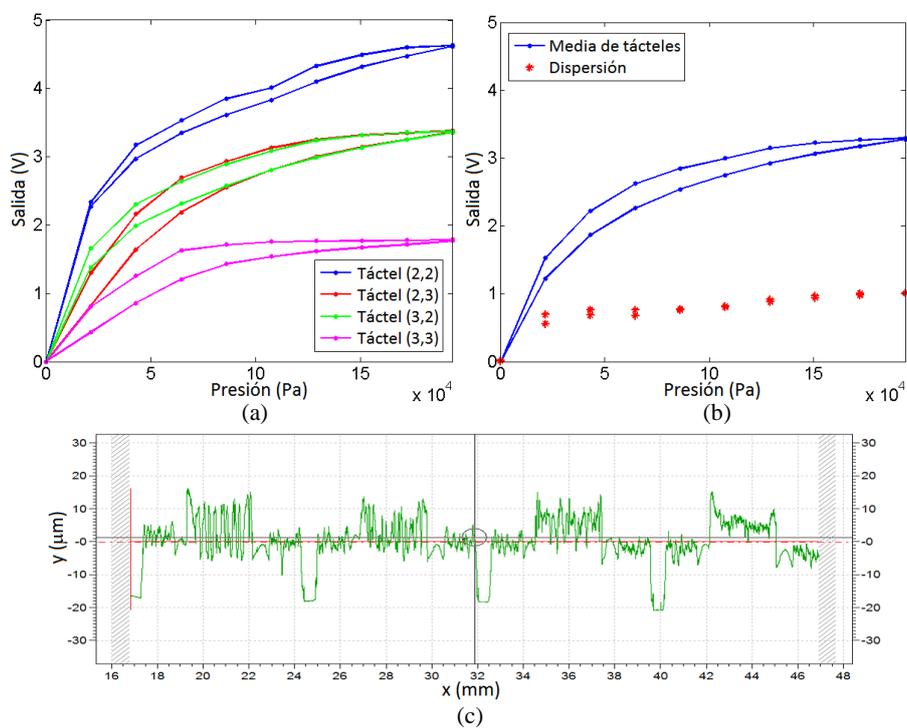


Figura 3-34. (a) Salida de los tácteles centrales del sensor con aislante RojoEL. (b) Media y dispersión de los tácteles centrales. (c) Perfil de una fila del sensor.

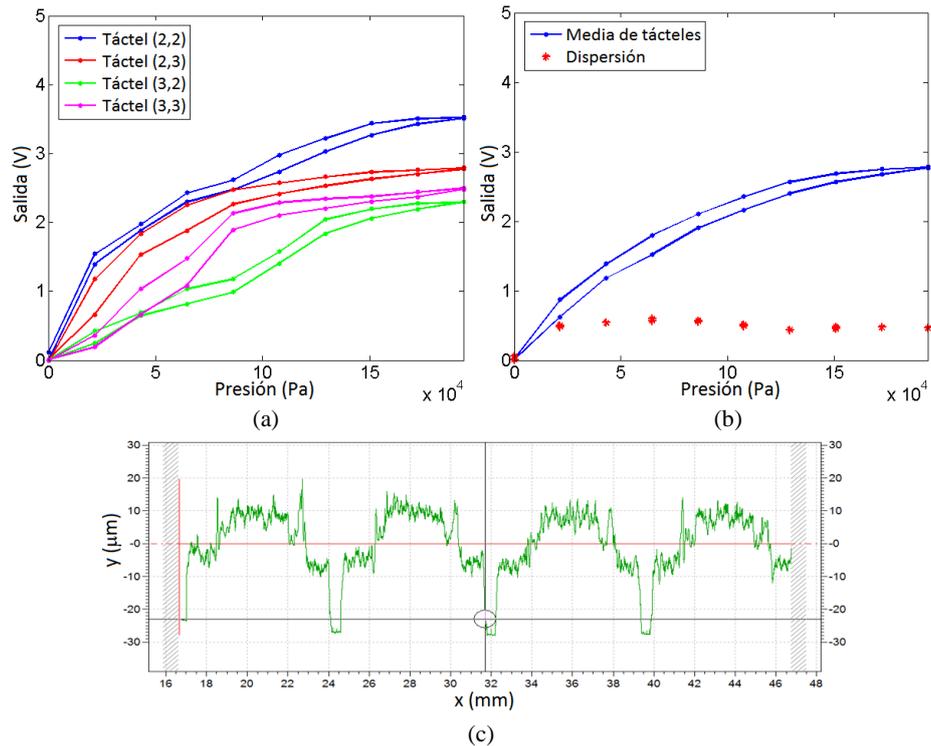


Figura 3-35. (a) Salida de los tácteles centrales del sensor con aislante VerdeAzul. (b) Media y dispersión de los tácteles centrales. (c) Perfil de una fila del sensor.

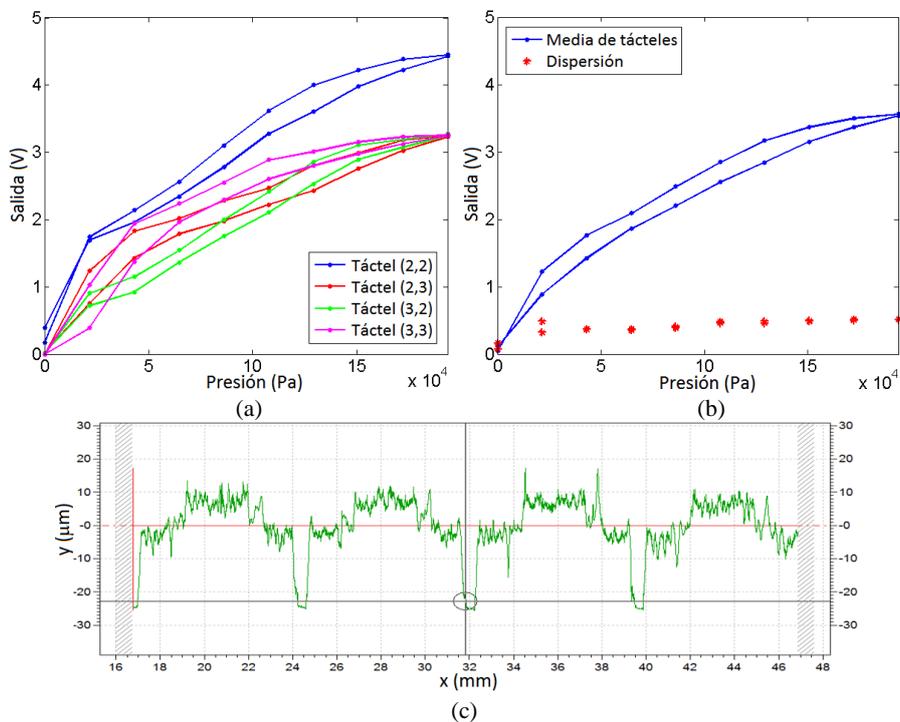


Figura 3-36. (a) Salida de los tácteles centrales del sensor con aislante Verde. (b) Media y dispersión de los tácteles centrales. (c) Perfil de una fila del sensor.

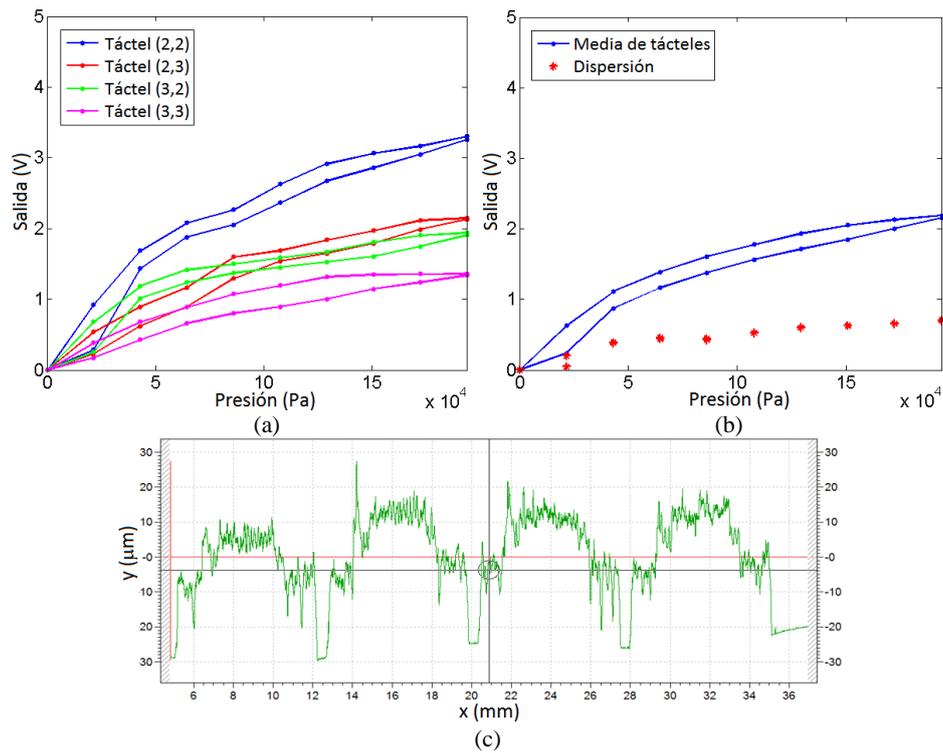


Figura 3-37. (a) Salida de los tácteles centrales del sensor con aislante Azul. (b) Media y dispersión de los tácteles centrales. (c) Perfil de una fila del sensor.

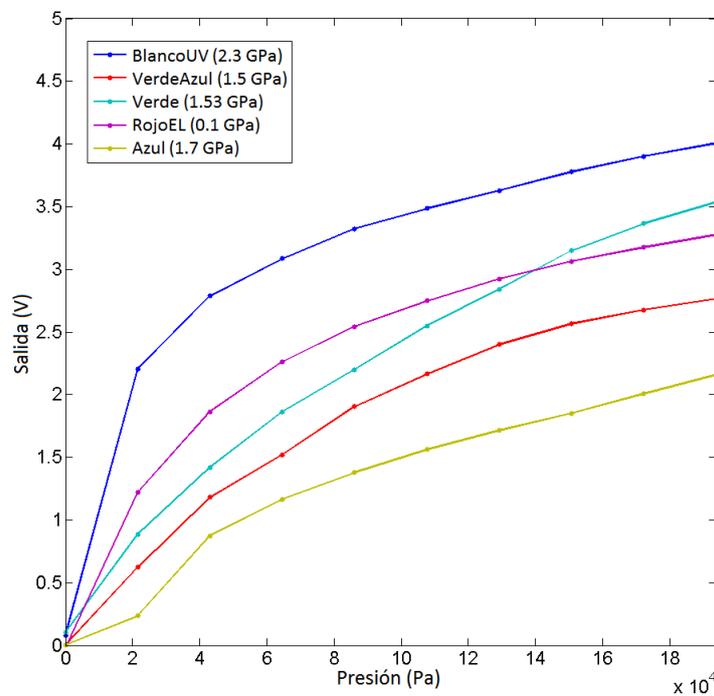


Figura 3-38. Media de las salidas de varios sensores con diferentes materiales para la capa aislante.

La rugosidad de los sensores es alta en comparación con su tamaño, por lo que es de esperar la gran dispersión que se observa en los distintos tácteles de un mismo sensor; en especial el sensor con el aislante RojoEL, que al tener la mayor rugosidad, presenta la mayor dispersión entre sus tácteles. Otro aspecto a destacar son los codos observados en el resto de curvas. En la Tabla 3-1 se pueden consultar los módulos de Young de los distintos materiales usados como aislantes. Cuando mayor es el módulo, menos moldeable es el material y peor se adapta a las superficies. El contacto se va estableciendo de forma más irregular a medida que la fuerza aumenta y esto provoca la aparición de los codos en las curvas, la primera derivada cambia de forma brusca varias veces a lo largo de la curva de salida del táctel. Se observa esta falta de uniformidad en las pendientes de todas las curvas, aunque es menor en el caso del aislante RojoEL. Comparando las salidas de todos los ciclos de carga de los sensores en la Figura 3-38 se observa que, en este caso, el módulo de Young de los materiales usados para las capas de aislante no es determinante en la sensibilidad del sensor. La influencia de la rugosidad se vuelve más importante al disminuir el tamaño del táctel. Se observa que las curvas medias de los tácteles son más lineales y con una variación más uniforme que la de los tácteles individuales, lo que indica la mejora de comportamiento al aumentar el tamaño del sensor.

Segundo conjunto de pruebas

El segundo grupo de pruebas se realiza sobre dos sensores con capas de aislante TranspUV ($E=3.3$ GPa) y RojoEL ($E=0.1$ GPa), con módulos de Young alto y bajo respectivamente, ver Figura 3-39. Para cada material aislante se prueban cuatro posibles capas de cobertor (ver Tabla 3-1 y Figura 3-40). Se tienen por lo tanto ocho posibles combinaciones de sensores. En este caso la placa metálica para ejercer la fuerza es cuadrada de 7.62 mm de lado y 4mm de espesor, que cubre un solo táctel del sensor. La plataforma de caracterización se programa para que vaya haciendo un seguimiento de todos los puntos, de forma que se realizan diez ciclos de carga y descarga en cada uno de ellos, registrándose así la salida de todos los tácteles. De nuevo la salida representada de cada táctel es la media resultante de todos los ciclos realizados. En la Figura 3-41 se muestran las salidas de cada uno de los tácteles de los sensores con el aislante RojoEL y los cobertores Pt, Rojo, Transp y PC; y en la Figura 3-42 la salida de los tácteles para los sensores con el aislante TranspUV y los distintos cobertores. Debido a algún problema en el proceso de medida la respuesta de algunos tácteles no se registró de forma

correcta, así que han sido eliminados de las gráficas para mayor claridad y para evitar confusiones.

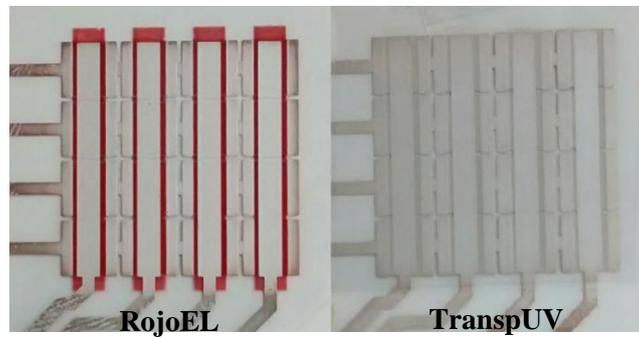


Figura 3-39. Sensores evaluados con distintos materiales para la capa aislante en el segundo conjunto de pruebas.

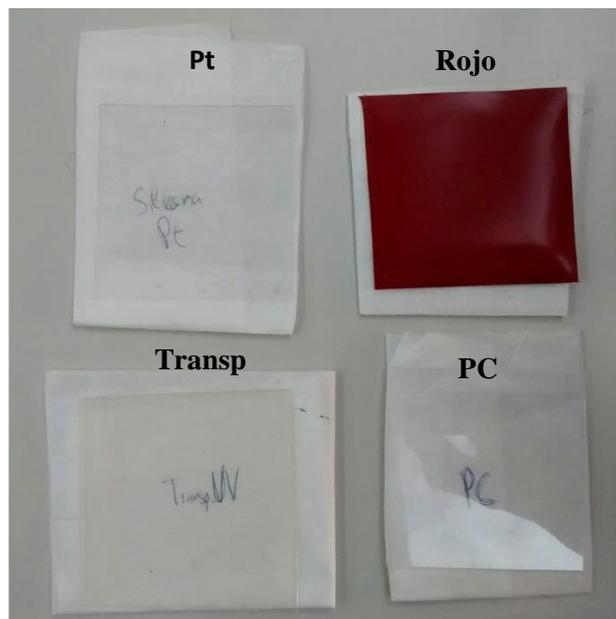


Figura 3-40. Capas de cobertor usadas en los experimentos.

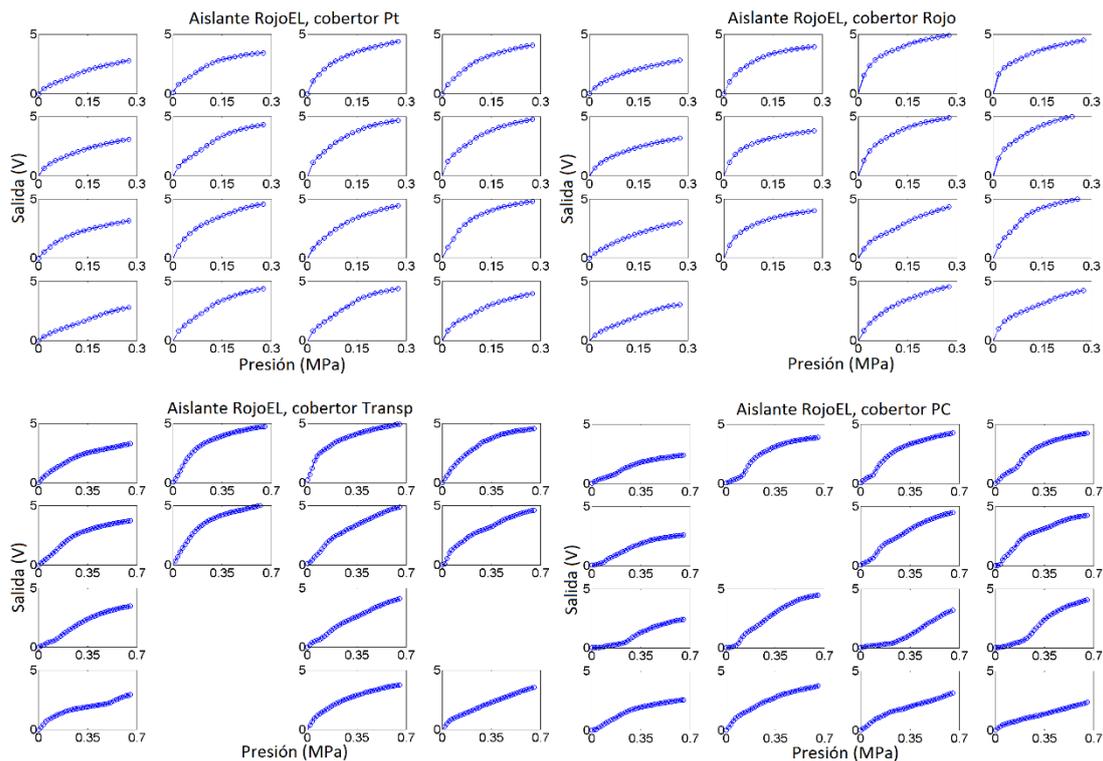


Figura 3-41. Salida de los tácteles para los sensores con el aislante RojoEL y las diferentes capas de cobertor.

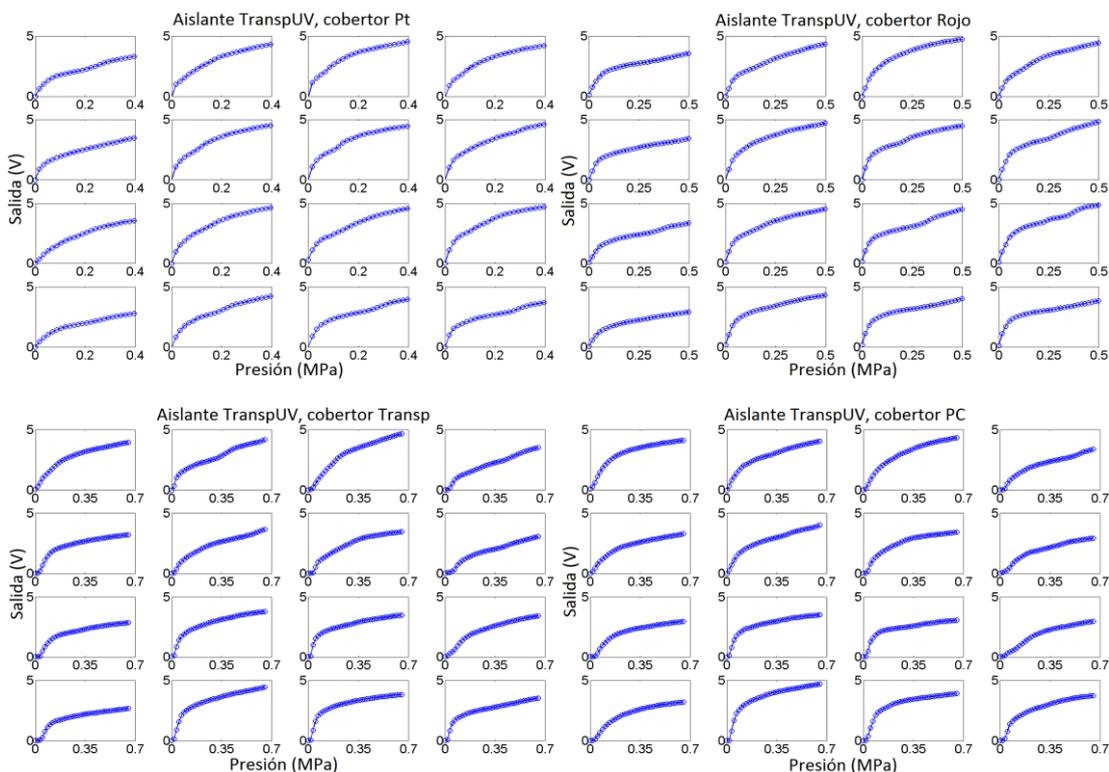


Figura 3-42. Salida de los tácteles para los sensores con el aislante TranspUV y las diferentes capas de cobertor.

Análisis y modelado de sensores con aislante blando

Las discusiones y los modelos descritos en la sección anterior se pueden usar para comprender la respuesta de los sensores de la Figura 3-41. Usando el perfil del táctel con el aislante RojoEL, ver Figura 3-43, se construye el parámetro de entrada del modelo extendido que define las alturas de cada barra. Se observa en el electrodo interno una envolvente en forma de “v”. Se observan también huecos profundos donde se hace improbable el contacto con la lámina de material conductor. Para modelar esta característica, se impone la condición de un porcentaje de barras que nunca entrarán en contacto con la lámina PEDOT. Para modelar la envolvente en forma de “v” se recrea esta misma forma en las barras con dos rectas con el mismo valor absoluto de pendiente pero distinto signo. Para definir la pendiente se marca el punto más bajo del valle, donde confluyen las dos rectas, siguiendo una distribución de probabilidad normal (con un intervalo de $15 \mu\text{m}$). Las alturas de las barras se obtienen sumando el valor de dicha envolvente con otro término aleatorio que sigue también una distribución normal ($6\cdot\sigma=3 \mu\text{m}$). La altura de las barras del electrodo externo se genera de igual forma con una distribución normal ($6\cdot\sigma=3 \mu\text{m}$). Finalmente se introduce también como factor aleatorio, igualmente con una distribución de probabilidad normal ($6\cdot\sigma=5 \mu\text{m}$), la diferencia media de altura entre los electrodos interno y externo. El número de barras usadas en el modelo es de 72, repartidas de forma uniforme a lo largo de la longitud del táctel (7.02 mm). Cada barra por lo tanto representa una anchura de $97.5 \mu\text{m}$ que es suficiente para modelar la rugosidad de baja frecuencia observada en los perfiles de los sensores. Para modelar cada uno de los electrodos (interno y externo) se usan 30 barras, mientras que para modelar al aislante se usan 12 barras.

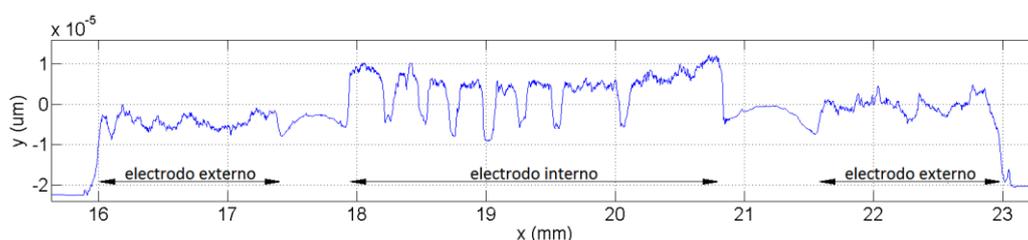


Figura 3-43. Detalle del perfil de un táctel con el aislante RojoEL.

En la Figura 3-44(a) se muestra la media de las curvas de la Figura 3-41 mientras que en la Figura 3-44(b) se muestra la media sólo de los cuatro tácteles centrales para aislar los efectos de borde. Dicho efecto se puede observar en la primera columna (columna de la izquierda) en los sensores de la Figura 3-41 y en el hecho de que la dispersión entre tácteles disminuye al

eliminar el borde. La Figura 3-44(c) muestra la salida del modelo simple ideal, y la Figura 3-44(d) la salida media de dieciséis curvas obtenidas con el modelo extendido (con líneas discontinuas se representa la dispersión). Comparando las salidas de las curvas medias de la Figura 3-44(a) con las salidas del modelo simple de la Figura 3-44(c) se observa cómo este modelo simple es capaz de predecir la dependencia de la sensibilidad de los sensores con la capa de cobertor usada. Sin embargo, las medias de las curvas experimentales no son lineales como sí lo son las del modelo simple. En este sentido, las salidas proporcionadas por el modelo extendido son más cercanas a las obtenidas experimentalmente. Sin embargo, hay que tener en cuenta que las salidas son la media de dieciséis muestras (equivalentes a dieciséis tácteles), lo que sería equivalente a la salida de un táctel cuatro veces más grande que el de la Figura 3-12; esto puede ser útil para predecir el comportamiento de sensores con una resolución espacial menor fabricados con la misma tecnología.

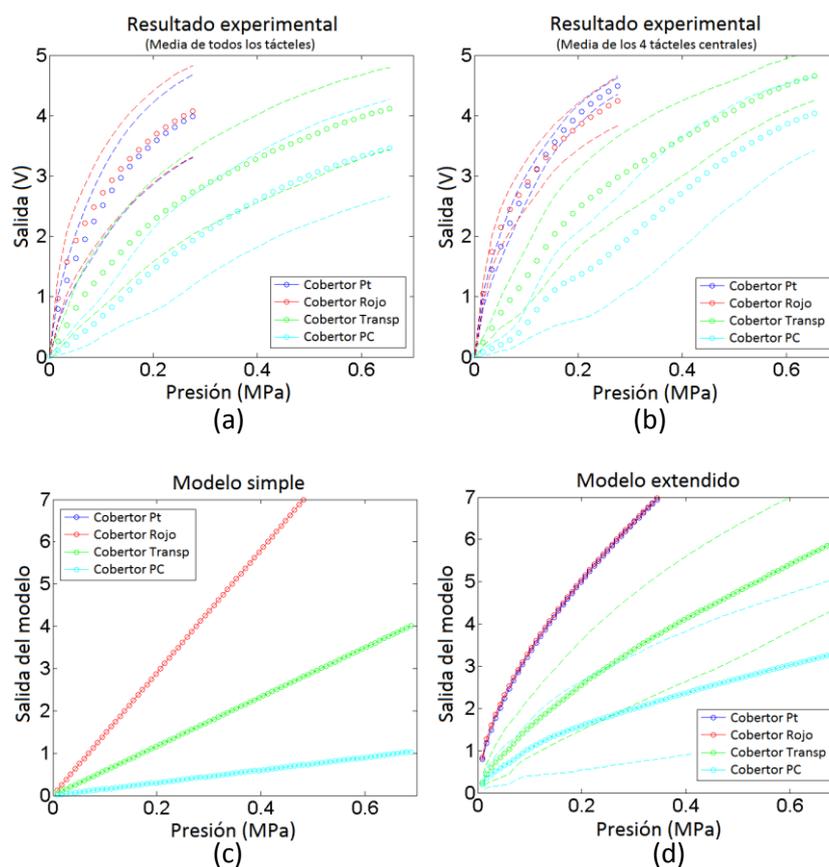


Figura 3-44. Salida de los sensores con el aislante RojoEL: (a) media de todos los tácteles y (b) media de los cuatro tácteles centrales. (c) Salida del modelo simple y (d) salida del modelo extendido.

Las curvas de la Figura 3-41 no sólo difieren cuantitativamente, sino también cualitativamente con respecto a la media. El modelo extendido que usa parámetros calculados de forma

aleatoria también predice esta dispersión. Concretamente la dispersión de las curvas asociadas a los cobertores blandos (Pt y Rojo) es baja en comparación con la dispersión obtenida con los cobertores más rígidos (Transp y PC) (Figura 3-44(b)). Este efecto también se observa en las salidas del modelo extendido. Aparte de la diferencia de sensibilidad en las curvas, se observa también una diferencia en la forma de las salidas de unos tácteles a otros. Como ya se ha comentado, el motivo es el asentamiento progresivo de la lámina de material conductor con las barras en el caso del modelo y con las rugosidades de los electrodos en el caso real. En la Figura 3-45(a) y (b) se representa un detalle de las curvas de salida de dieciséis tácteles obtenidas con el modelo extendido para los cobertores más rígidos (Transp y PC) en las que se puede observar las diferentes formas de las curvas e incluso los codos que aparecen al cambiar la pendiente de las curvas.

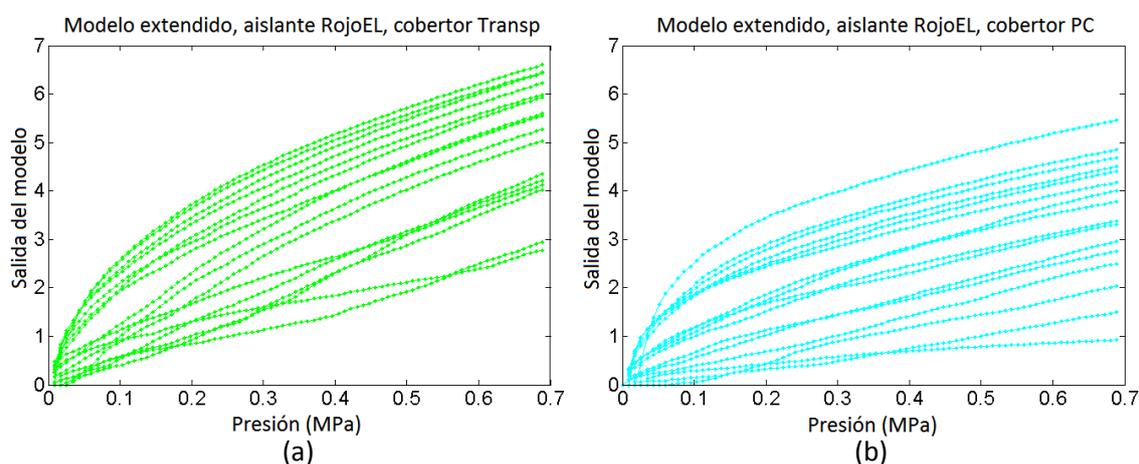


Figura 3-45. Conjunto de dieciséis salidas obtenidas con el modelo extendido para un sensor con el aislante RojoEL y (a) cobertor Transp y (b) cobertor PC.

Análisis y modelado de sensores con aislante rígido

Con respecto al sensor fabricado con el aislante más rígido TranspUV, el perfil del electrodo externo es similar al del electrodo externo de los sensores anteriores con aislante RojoEL. Esto es lógico ya que el proceso de fabricación es el mismo y constan de las mismas capas y de los mismos materiales. No ocurre lo mismo con el electrodo interno, en el que la capa de material conductor para la formación del electrodo se deposita sobre materiales distintos. En el caso del sensor con aislante TranspUV no existe esa clara envolvente en forma de “v” que se observa en los perfiles del sensor con aislante RojoEL. Por otro lado la forma del perfil es más parecida a unos dientes de sierra, mientras que en el caso del sensor con aislante RojoEL es

más parecida a un tren de pulsos cuadrados superpuestos a la envolvente en forma de “v”. En cuanto a la profundidad de los huecos, aunque es menor que para el sensor con aislante RojoEl, también están presentes en el sensor con aislante TranspUV. Finalmente, hay que hacer notar que el aislante presenta algunas protuberancias que superan en ocasiones al electrodo interno. En la Figura 3-46 se ilustra un detalle del perfil de un táctel de un sensor fabricado con el aislante TranspUV.

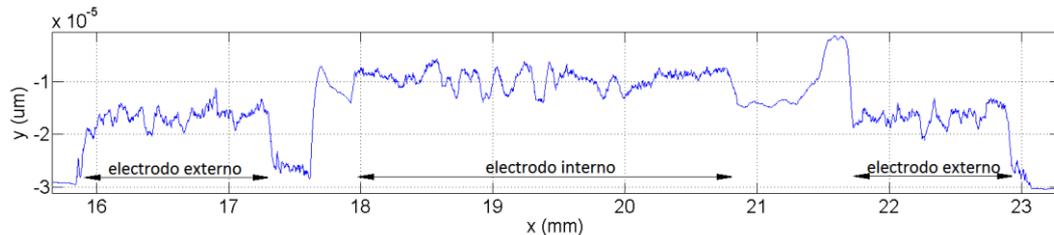


Figura 3-46. Detalle del perfil de un táctel con el aislante TranspUV.

En este caso la salida del modelo simple mostrado en la Figura 3-47(c) no refleja el comportamiento real observado en los experimentos en cuanto a la dependencia de la sensibilidad con el cobertor utilizado, cosa que sí hace el modelo extendido. En una primera aproximación, el parámetro de perfiles de alturas de las barras para el modelo extendido se genera asignando valores aleatorios según una distribución normal ($6\cdot\sigma=5\mu\text{m}$) sin añadir ningún perfil envolvente adicional. La salida obtenida, sin embargo, no se ajusta a los datos experimentales de la Figura 3-42. Las curvas obtenidas por el modelo presentan mayor sensibilidad, pero la mayor diferencia estriba en la ausencia de los codos para los sensores con los cobertores Transp y PC que se observan en las curvas experimentales. La razón de esta diferencia es la limitación del modelo de Winkler a la hora de modelar la interacción entre las barras. Esta interacción es más clara cuando tanto el aislante como el cobertor están constituidos por materiales poco moldeables. Como se ha mencionado con anterioridad el perfil del electrodo interno en el caso del aislante TranspUV presenta unos picos más afilados (ver Figura 3-46) que los del aislante RojoEL, que se asemeja a un tren de pulsos (ver Figura 3-43). Teniendo en cuenta la interacción entre las barras, el área real de contacto disminuye en el caso del aislante TranspUV siendo un porcentaje más pequeño del área del electrodo. Si este efecto se introduce en el modelo como un porcentaje de barras que nunca entran en contacto con la lámina de material PEDOT, los codos aparecen en las curvas de salida del modelo extendido. Este comportamiento se ilustra en la Figura 3-49, donde se muestran las curvas de salida del modelo extendido en el que se han eliminado diferentes porcentajes del

total de barras. La salida del modelo es similar ahora a los datos experimentales de la Figura 3-42. El modelo predice ahora una alta sensibilidad y baja dispersión para los cobertores más blandos (Pt y Rojo) y una sensibilidad menor, mayor dispersión y menor linealidad para los cobertores más rígidos (Transp y PC), ver Figura 3-47(d). El modelo también predice un pequeño umbral de presión en alguno de los tácteles que se observa en las curvas experimentales (ver en la Figura 3-42 las curvas correspondientes a los sensores con aislante TranspUV y cobertores Transp y PC) y puede apreciarse en la Figura 3-48(a) y (b), donde se han representado las curvas de salida del modelo extendido para dieciséis tácteles con los cobertores Transp y PC respectivamente. El umbral, como se ha comentado anteriormente, es debido a la falta de contacto de la lámina PEDOT con alguno de los electrodos cuando las fuerzas son pequeñas. Finalmente, la dispersión entre las curvas del modelo es menor en el caso del aislante Transp que en el caso del aislante RojoEL, lo que se observa también en las pruebas experimentales (ver Figura 3-44 y Figura 3-47).

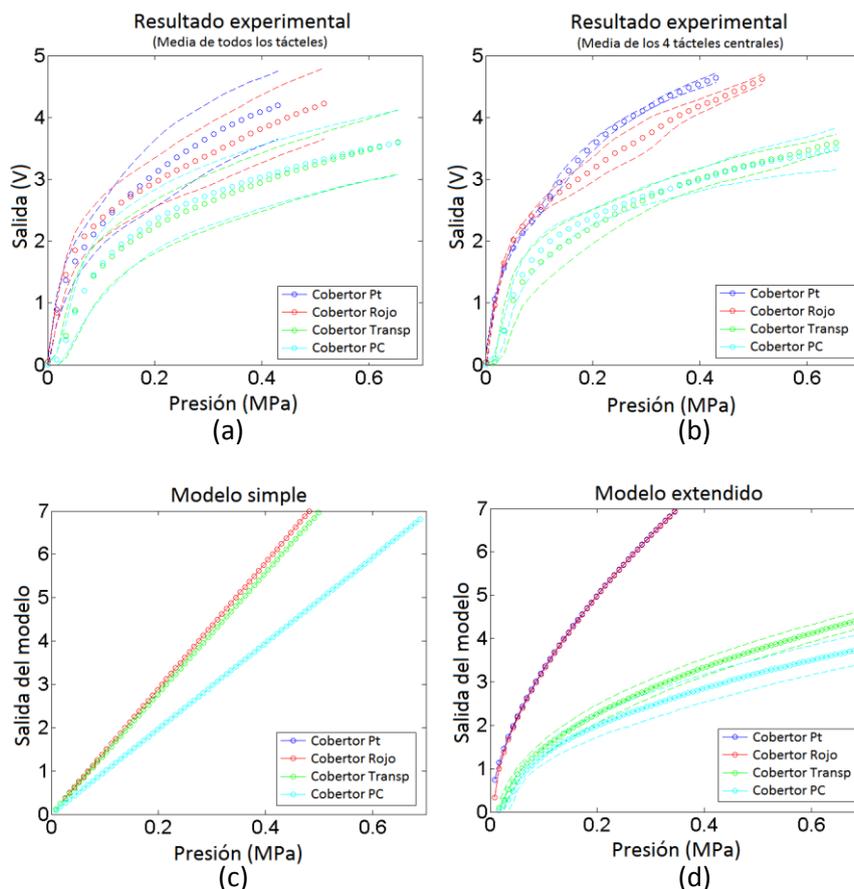


Figura 3-47. Salida de los sensores con el aislante TranspUV: (a) media de todos los tácteles y (b) media de los cuatro tácteles centrales. (c) Salida del modelo simple y (d) salida del modelo extendido.

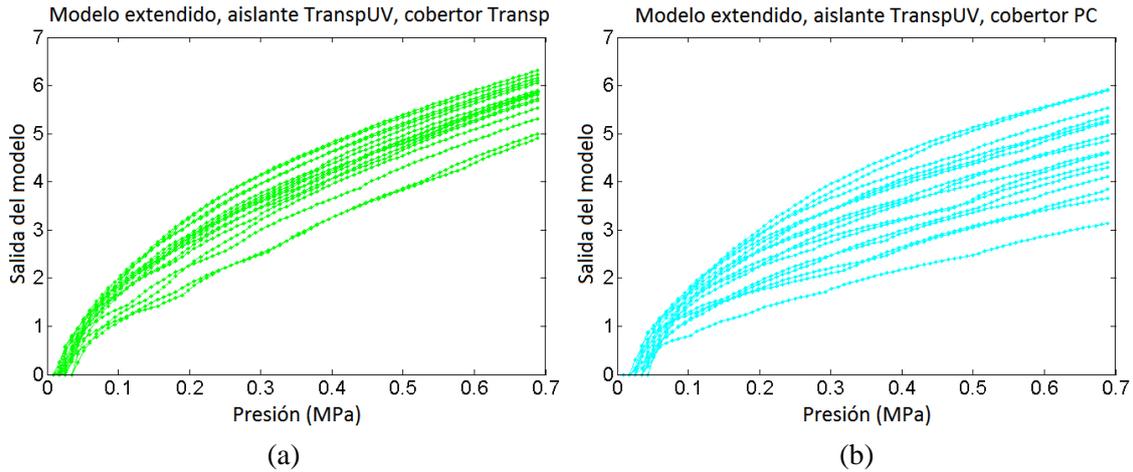


Figura 3-48. Conjunto de dieciséis salidas obtenidas con el modelo extendido para un sensor con el aislante TranspUV y (a) cobertor Transp y (b) cobertor PC.

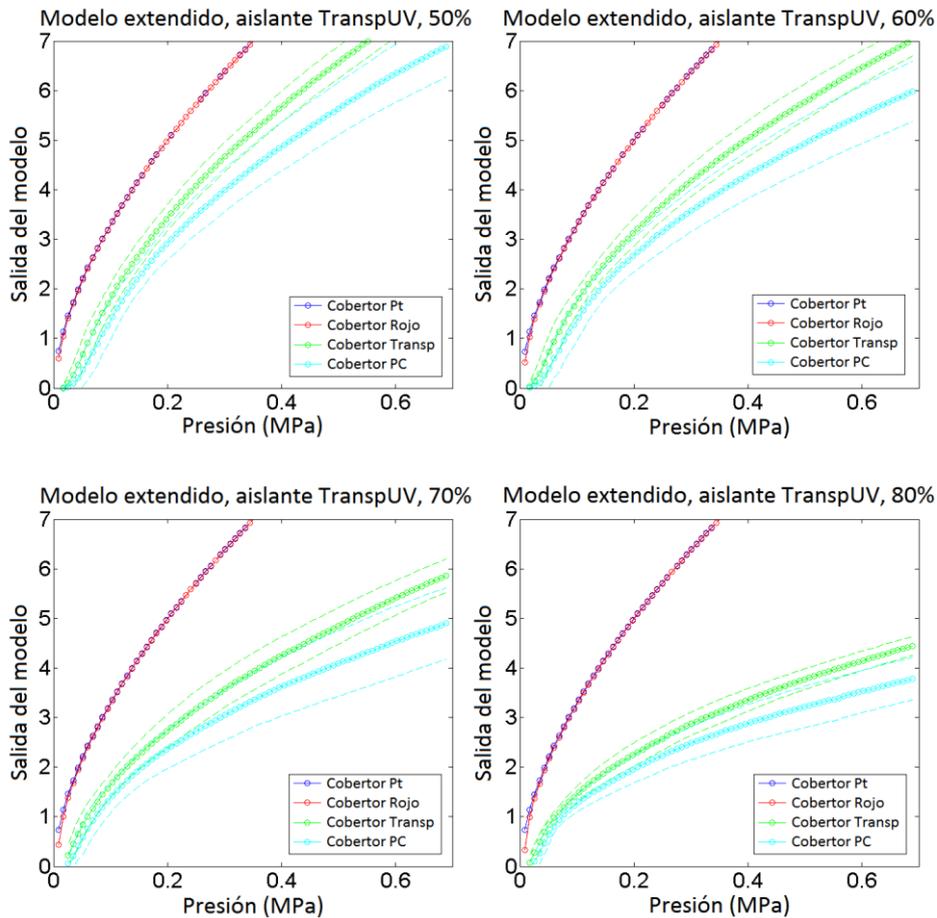


Figura 3-49. Salida del modelo extendido para los sensores con aislante TranspUV con diferentes porcentajes de barras eliminadas: (a) 50%, (b) 60%, (c) 70% y (d) 80%.

Notas sobre histéresis y linealidad

Para complementar el análisis del comportamiento de los sensores, en la Tabla 3-3 y en la Figura 3-50 se resume la información acerca de la histéresis y la linealidad de las curvas. En la Figura 3-50 se representa la media de los tácteles de cada sensor. Se representan los ciclos de carga y descarga de diferente color (azul y rojo respectivamente), y con puntos (asteriscos) se representa la dispersión de los tácteles. En la Tabla 3-3 se muestran los datos de la histéresis de las curvas medias y el área en valor absoluto de la segunda derivada de las curvas de carga. Este último valor nos va a dar una idea de la linealidad de la curva, teniendo menos codos y una variación más uniforme cuanto menor sea dicha área.

La capa de cobertor tiene influencia en la histéresis, siendo el Rojo el que menos histéresis presenta. Con respecto a la linealidad, las curvas medias de la Figura 3-50 y el dato del área de la segunda derivada de las curvas en la Tabla 3-3 apunta a un mejor comportamiento de los sensores con el aislante RojoEL. Sin embargo, ya se había observado que los sensores con este tipo de aislante y los cobertores más rígidos presentan una mayor dispersión entre los tácteles. En general, la linealidad se mejora usando cobertores blandos, mientras que el uso de aislantes rígidos y cobertores rígidos propicia la aparición de codos en la salida. Sin embargo, en las curvas medias y a la derecha del codo la curva es bastante lineal pero con un decremento de la sensibilidad inicial.

Tabla 3-3. Parámetros de las curvas del segundo experimento.

Aislante	Cobertor	Histeresis (%)	Área de la 2ª derivada (V/MPa)
RedEL	Pt	14.03	36.90
	Red	7.35	45.59
	Tranps	14.87	22.96
	PC	13.58	24.40
TranspUV	Pt	15.27	49.66
	Red	7.60	45.88
	Transp	13.58	51.59
	PC	11.68	48.01

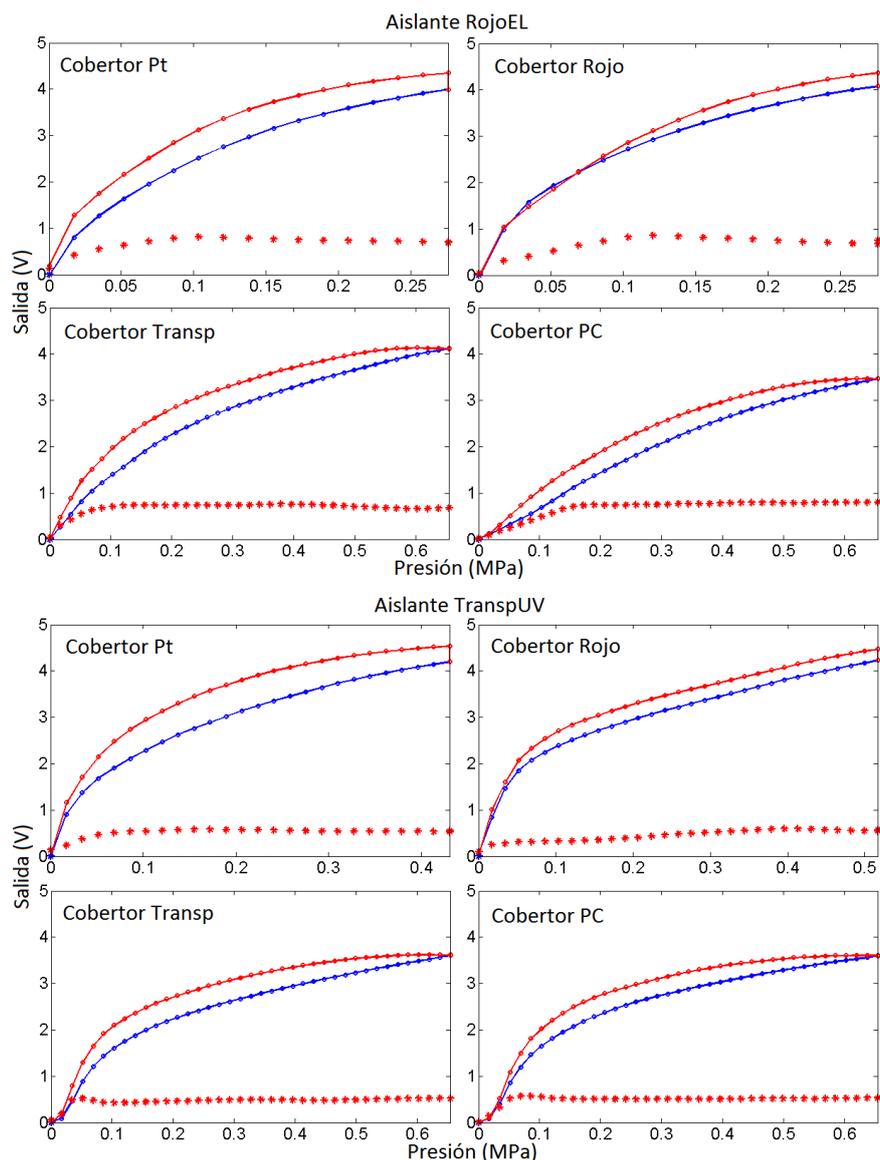


Figura 3-50. Media de los ciclos de carga y descarga (curvas azules y rojas respectivamente) de los sensores con los diferentes aislantes y cobertores. Los asteriscos representan la dispersión del sensor.

3.5. Conclusiones

En este capítulo se han presentado y evaluado dos propuestas de sensores fabricados con la tecnología de bajo coste de *screen-printing*. Se trata de una técnica de serigrafía con la que se fabrican los sensores a base de impresiones de distintas capas de distintos materiales unas encima de otras, dando así lugar a un sensor multicapa.

La primera propuesta nos ha servido para caracterizar el sensor desde un punto de vista estático y dinámico, realizando una comparación con los sensores fabricados con PCB. La principal diferencia es la aparición, en los sensores multicapas, de un umbral de presión. Dicho umbral puede ser regulado con diferentes técnicas:

- Cambiando las propiedades del material usado como aislante.
- Cambiando el grosor del sustrato del polímero piezorresistivo (PEDOT).
- Modificando la geometría del táctel multicapa.

La tercera de las técnicas da lugar al táctel multicapa mejorado, sobre el cual se realiza un análisis de su comportamiento estático para analizar cómo varía la salida de estos sensores con algunos parámetros mecánicos del táctel. Las discusiones y las conclusiones extraídas pueden aplicarse a cualquier sensor de las mismas características.

Para el análisis del comportamiento mecánico del táctel y su influencia en la sensibilidad y la forma de la curva de salida, se realizan algunos modelos del táctel apoyados en simulaciones FEA. De este estudio se obtienen las siguientes conclusiones:

- Se observa una clara discrepancia entre la salida ideal de un modelo simple y los datos experimentales obtenidos. El modelo ideal predice una salida lineal cuya sensibilidad puede ser graduada cambiando la rigidez de los materiales usados en las capas de aislante y cobertor. La respuesta real del sensor diverge de la del modelo excepto en el caso de aislantes blandos y al evaluar el sensor con su curva media. Pero al inspeccionar los distintos tácteles del sensor con el aislante blando se observa una gran dispersión entre ellos. La dispersión es tanto cuantitativa, diferente sensibilidad, como cualitativa, diferente forma de la curva. Esta dispersión es menor en el caso de aislantes más rígidos, pero aparece en este caso un codo en la curva (para cobertores rígidos), aunque la curva a la derecha de dicho codo es lineal (para fuerzas crecientes).
- Para explicar todas las características observadas en las curvas experimentales se hace necesario el uso de un modelo más preciso. Observando los perfiles de las matrices de electrodos de los sensores se observan irregularidades: diferencia de altura entre los electrodos, rugosidades en las capas de plata de los electrodos, picos del aislante que superan en algunos casos la altura del electrodo interno, etc. Estas irregularidades hacen que no se cumplan las suposiciones ideales para la aplicación de un modelo simple. La tribología es la ciencia que estudia el contacto y la fricción entre cuerpos, y

algunos resultados de estos estudios se incorporan al presente trabajo mediante un modelo de *Winkler* (modelo extendido) que tiene en cuenta las rugosidades.

- El modelo extendido consiste en dividir el táctel en barras verticales, que al mismo tiempo están compuestas por las distintas capas (horizontales) de materiales de las que consta el táctel. La conductancia asociada a cada barra es proporcional a la fuerza que soporta. La conductancia de un electrodo se calcula sumando la conductancia de todas las barras que lo compone; y la conductancia del táctel se calcula como la agrupación en paralelo de las conductancias de los dos electrodos. El resultado no es lineal si la relación entre la conductancia de ambos electrodos depende de la fuerza aplicada. Los perfiles usados como entrada al modelo están inspirados en los perfiles reales medidos de los sensores fabricados, a los que se les introducen parámetros aleatorios que emulan la dispersión debida al proceso de fabricación de las matrices de electrodos.
- Este modelo extendido reproduce con bastante exactitud el comportamiento de los sensores que usan el aislante blando. Sin embargo, presenta carencias cuando se trata de modelar los sensores con el aislante más rígido. Esto es debido a la falta de interacción entre las barras del modelo de *Winkler*. Mediante un proceso heurístico se introduce un parámetro para contemplar esta interacción y los resultados confirman que los codos en las curvas son debidos a una disminución del área real de contacto en el electrodo interno. En resumen, la diferencia de las interfaces en ambos electrodos y el progresivo contacto de las distintas barras a medida que la fuerza aplicada se incrementa son los responsables de la no linealidad de la salida.
- Las discusiones de los resultados se han apoyado también en simulaciones FEA, en las que se observa el efecto de los bordes de los electrodos penetrando en los materiales. Los cobertores más blandos mejoran el comportamiento de los sensores acercándolos a la salida obtenida del modelo simple ideal, aunque el efecto en los bordes es mayor. Al aumentar el área del sensor también se mejoran las características del mismo, como se puede observar al calcular las curvas medias de todos los tácteles del sensor. Una tecnología capaz de fabricar los contactos de forma más uniforme, disminuyendo el tamaño de las rugosidades, también mejoraría el resultado de los sensores. El contacto ideal sería aquel que fuera plano, igualando en altura los dos electrodos y con una pequeña componente de rugosidad fina añadida. Por último hay que hacer notar que se ha hablado siempre de dos electrodos: el interno y el externo, viendo el táctel

desde un punto de vista eléctrico; pero desde un punto de vista físico, el electrodo externo está dividido en dos partes, lo que aumenta la posibilidad de dispersión a la hora de la fabricación. Un táctel con un sólo contacto activo también haría mejorar sus características.

Capítulo 4. Diseño y fabricación de un táctel tri-axial

4.1. Introducción

Cada vez es más frecuente encontrar implementaciones de sensores capaces de medir tanto fuerzas normales como tangenciales; esta capacidad se usa para la detección del deslizamiento de los objetos en manipuladores [Tiwana et al. 2011; Huang et al. 2010; Beccai et al. 2008; Edin et al. 2008; Mingrino et al. 1994], de las fuerzas de reacción en bípedos que se desplazan [Liu et al. 2009; Hwang et al. 2007] o la estimación del coeficiente de rozamiento [Kwon et al. 2010]. La detección de la fuerza en los tres ejes de coordenadas cartesianas es asimismo necesaria en aplicaciones médicas, como en cirugía mínimamente invasiva [Eltaib et al. 2003],

Con respecto a la resolución de los sensores, hay reportados trabajos con implementaciones de tácteles miniaturizados haciendo uso de MEMS en silicio [Kim et al. 2006]. Como ya se ha mencionado, estos sensores tienen una gran resolución espacial [Kane et al. 2000; Wang et al. 2000], pero su gran inconveniente es que son frágiles y quebradizos si se deforman en exceso. Esto limita su uso a superficies planas, ya que no poseen la suficiente flexibilidad para adaptarse a superficies curvas, como es el caso de una mano de robot o cualquier parte del cuerpo. Ante esta necesidad, aparecen propuestas de implementaciones en las que se integran MEMS sobre placas de circuito impreso flexibles (FPCB) y se recubre con algún tipo de material flexible como el polidimetilsiloxano (PDMS) [Kwon et al. 2010; Cheng et al. 2010; Beccai et al. 2008; Hwang et al. 2007; Kim et al. 2006]. [Jung et al. 2015] propone un nuevo diseño basado en polímeros flexibles que utiliza cinco elementos sensitivos para determinar la fuerza normal y las fuerzas tangenciales en las direcciones de los ejes x e y sin necesidad de ningún tipo de procesado posterior de las señales de salida del sensor; las unidades básicas sensitivas están formadas por 2 láminas flexibles compuestas de nanotubos de carbono (CNT) y PDMS.

Para la implementación de los sensores tri-axiales, la mayoría de los autores disponen cuatro unidades sensoriales que se integran en algún tipo de estructura de forma que la fuerza aplicada sobre ella crea un desequilibrio en las salidas de dichas unidades sensoriales. La Figura 4-1 ilustra este concepto. De la componente diferencial de las unidades sensoriales ($F_1 - F_2$) se obtiene la fuerza tangencial aplicada F_x y de la componente común ($F_1 + F_2$) se obtiene la fuerza normal F_z .

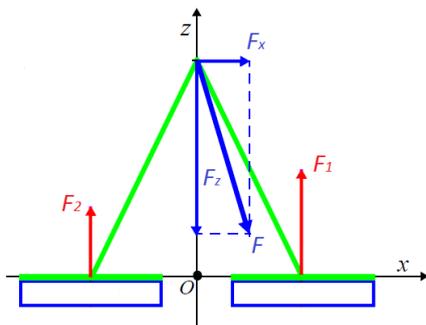


Figura 4-1. Esquema general de un táctel triaxial.

Las técnicas de transducción más utilizadas en los sensores basados en polímeros son la resistiva y la capacitiva. En los sensores resistivos la implementación más frecuente es integrar cuatro galgas extensiométricas en un sustrato flexible recubiertas de un material protector [Huang et al. 2010; Kwon et al. 2010; Hwang et al. 2007, 2006 ; Kim et al. 2006]. Las galgas se disponen de forma que están alineadas dos a dos con los ejes de coordenadas x e y . [Shan et al. 2005] propone la implementación con elementos piezorresistivos basados en silicio pero utiliza muchos elementos para la detección de las fuerzas, cuatro para las fuerzas tangenciales y otros cuatro para las fuerzas normales. Es frecuente también el uso de algún tipo de estructura (semiesfera, tronco de cono, etc.) que además de proteger al sensor, hace las veces de concentrador de fuerzas [Lee et al. 2008; Vásárhelyi et al. 2007].

La estructura de los sensores capacitivos es similar a la de los resistivos, salvo que las unidades sensoriales piezorresistivas se sustituyen por condensadores. La mayoría de las implementaciones usan también cuatro condensadores para extraer de ellos las componentes normal y tangencial de la fuerza aplicada [Chen et al. 2011; Lee et al. 2008; Rocha et al. 2008a]. [Cheng et al. 2010] propone un nuevo conexionado de forma que cada unidad sensorial tiene dos electrodos y un electrodo flotante común; de esta forma simplifica el cableado en la parte superior donde se encuentra el electrodo común, lo que disminuye el riesgo de rotura y facilita

la integración de las unidades del sensor. Aunque los sensores capacitivos son más sensibles a las fuentes de ruidos externos, ofrecen como ventaja una respuesta más lineal, son más inmunes a las variaciones de la temperatura y presentan una gran repetitividad en la respuesta.

En este capítulo, se presentan dos tácteles que detectan fuerzas en los tres ejes de coordenadas cartesianas con una resolución espacial máxima de $13 \times 13 \text{ mm}^2$. Las propuestas se orientan a aplicaciones que no necesitan una gran resolución espacial, como es el caso de la asistencia robótica en la interacción entre robot y humano en el que está involucrado el contacto de todo el cuerpo o gran parte de él [Yoshikai et al. 2009]. Otro ejemplo de ello es su uso en prótesis avanzadas [Liu et al. 2009]

La primera de las implementaciones que se presenta se basa en una estructura tetrápoda fabricada usando una impresora 3D con un material plástico. Para poder aumentar la resolución espacial se diseña una segunda estructura con un material más elástico en forma de tronco piramidal de $5.08 \times 5.08 \text{ mm}^2$ de base. Ambas estructuras se deforman al aplicarles una fuerza, que puede ser tanto normal a la superficie como tangencial a la misma, que se traduce en un cambio en la resistencia o capacidad de las unidades sensoriales acopladas a la estructura. En el caso que nos ocupa, la estructura se coloca sobre cuatro tácteles de un sensor piezorresistivo. Algunas implementaciones aprovechan la deformación de algún tipo de estructura como principio básico para el cálculo de las fuerzas aplicadas sobre la misma [Jordan et al. 2012; Huang et al. 2010]. En este caso no es la medida de ningún parámetro de la deformación de la estructura, sino la distribución de fuerzas creadas sobre los tácteles y el área de contacto, la variable que se usa para el cálculo de la fuerza aplicada.

Una ventaja de esta implementación es que se independiza la estructura usada del tipo de unidad sensorial. De esta forma se puede adaptar a casi cualquier tipo de sensor táctil, sin importar su principio de funcionamiento, para dotarle de la capacidad de medir fuerzas en los tres ejes (x , y y z). Esto no quiere decir que la misma eficiencia esté asegurada para cualquiera de ellos. A lo largo de este capítulo se verá que la misma estructura colocada sobre diferentes unidades sensoriales da lugar a distintos resultados en términos de precisión o capacidad de discriminación de la fuerza en sus tres componentes.

Una condición que mejora el comportamiento del táctel es que la distribución de presión que la estructura genere sobre cada unidad sensorial sea uniforme. Por tanto, se realizan estudios apoyándose en la herramienta de análisis de elementos finitos (FEA) Comsol Multiphysic® para

encontrar qué estructura puede proporcionar una distribución uniforme sobre las unidades sensoriales. Las simulaciones mostrarán la influencia que algunos parámetros geométricos de las estructuras tienen sobre el objetivo que se quiere alcanzar.

Además de las simulaciones, el capítulo presenta resultados experimentales obtenidos con ambas estructuras. La primera estructura, fabricada con un material plástico en una impresora 3D, se evalúa sobre un sensor comercial piezorresistivo (5800N de Tekscan) con una resolución de 1,27 mm entre tácteles. Cada unidad sensorial está compuesta por una matriz de 5x5 tácteles de este sensor comercial, de forma que también es posible observar la distribución de presiones sobre cada unidad sensorial. La segunda estructura, fabricada con un elastómero mediante un proceso de fresado con técnicas láser, se evalúa sobre el mismo sensor comercial. Esta estructura se fabrica con el objetivo de aumentar la resolución espacial y ser usada sobre los sensores caracterizados en el Capítulo 2 fabricados con la tecnología de PCB. Por lo tanto se evalúa también sobre los sensores m101v2 y m201v3 (ver Tabla 2-1).

4.2. Modelo

En esta sección se presenta el modelo funcional para un táctel tri-axial que permite estimar las componentes tangenciales y normal de la fuerza aplicada sobre él. El objetivo es aprovechar una matriz bidimensional de unidades sensoriales piezorresistivas, diseñada para medir fuerzas normales a su superficie, para extraer la información de las posibles componentes tangenciales (ver Figura 4-2(a)). La idea es agrupar las unidades sensoriales en grupos de dos por dos, de forma que un táctel tri-axial está formado por cuatro unidades de la matriz (ver Figura 4-2(b)). Sobre estas cuatro unidades se superpone la estructura que distribuirá la fuerza aplicada sobre todo el táctel tri-axial (ver Figura 4-3). Para fuerzas que sólo tienen componente normal, la descomposición de la fuerza aplicada se produce como se indica en la Figura 4-3(a). En este caso la magnitud de la fuerza se distribuye de igual manera entre las cuatro unidades sensoriales. En cambio, cuando la fuerza aplicada al táctel tri-axial tiene alguna componente tangencial, se produce un desbalanceo en la distribución de la fuerza entre las cuatro unidades sensoriales, como se muestra en la Figura 4-3(b). En ambos casos la magnitud y la dirección de la fuerza aplicada se evalúa haciendo uso de las fuerzas sobre cada una de las cuatro unidades sensoriales. En la Figura 4-3(c) y Figura 4-3(d) se muestra una proyección sobre el plano x-z e y-z respectivamente para tener una mejor perspectiva a la hora de obtener las ecuaciones del modelo.

Para que se dé la condición de equilibrio dinámico, la suma de todas las fuerzas aplicadas al sistema debe ser igual a cero, al igual que la suma de sus momentos. Si descomponemos las fuerzas en las tres componentes de los ejes cartesianos, estas condiciones se pueden expresar de la siguiente manera:

$$F_z = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 \tag{4.1}$$

$$F_x = \frac{d}{h} \cdot (F_1 + F_2 - F_3 - F_4) \tag{4.2}$$

$$F_y = \frac{d}{h} \cdot (F_1 - F_2 - F_3 + F_4) \tag{4.3}$$

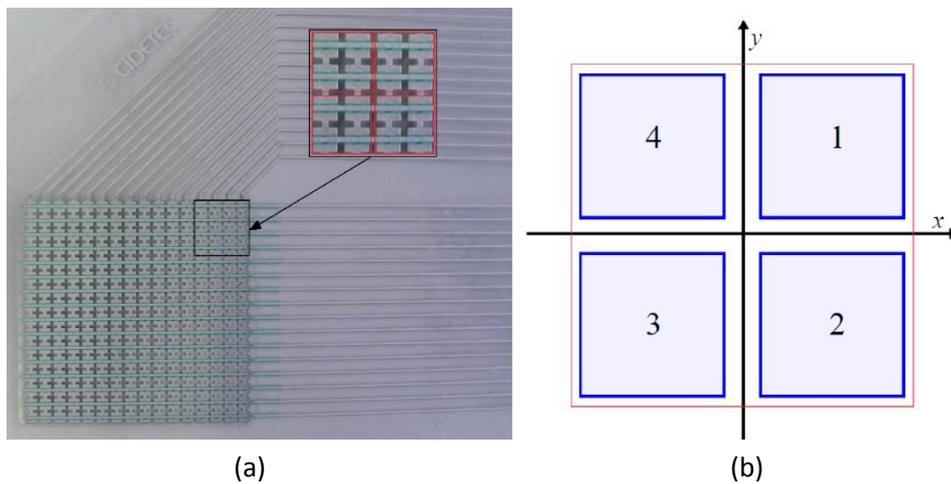


Figura 4-2. (a) Matriz de un sensor piezorresistivo genérico y agrupación en grupos de 2x2 tácteles. (b) Esquema de agrupación de cuatro tácteles para formar un táctel tri-axial.

Por otra parte, la fuerza que soporta cada una de las cuatro unidades puede expresarse de la siguiente manera:

$$F_i \approx k_i \cdot V_i \tag{4.4}$$

donde $i=1...4$, V_i es el voltaje de salida de la unidad sensorial i , y k_i es el correspondiente factor de calibración. Debido a la dispersión entre tácteles que presentan los sensores piezorresistivos estudiados, analizada en los capítulos anteriores, estas constantes k_i deben ser calculadas o estimadas de forma independiente para cada unidad sensorial. Sustituyendo

en las ecuaciones (4.1)-(4.3) se obtienen las ecuaciones que relacionan las diferentes componentes de la fuerza aplicada en el táctel tri-axial con la tensión de salida de las cuatro unidades sensoriales que lo componen.

$$F_z = k_1 \cdot V_1 + k_2 \cdot V_2 + k_3 \cdot V_3 + k_4 \cdot V_4 \quad (4.5)$$

$$F_x = \frac{d}{h} \cdot (k_1 \cdot V_1 + k_2 \cdot V_2 - k_3 \cdot V_3 - k_4 \cdot V_4) \quad (4.6)$$

$$F_y = \frac{d}{h} \cdot (k_1 \cdot V_1 - k_2 \cdot V_2 - k_3 \cdot V_3 + k_4 \cdot V_4) \quad (4.7)$$

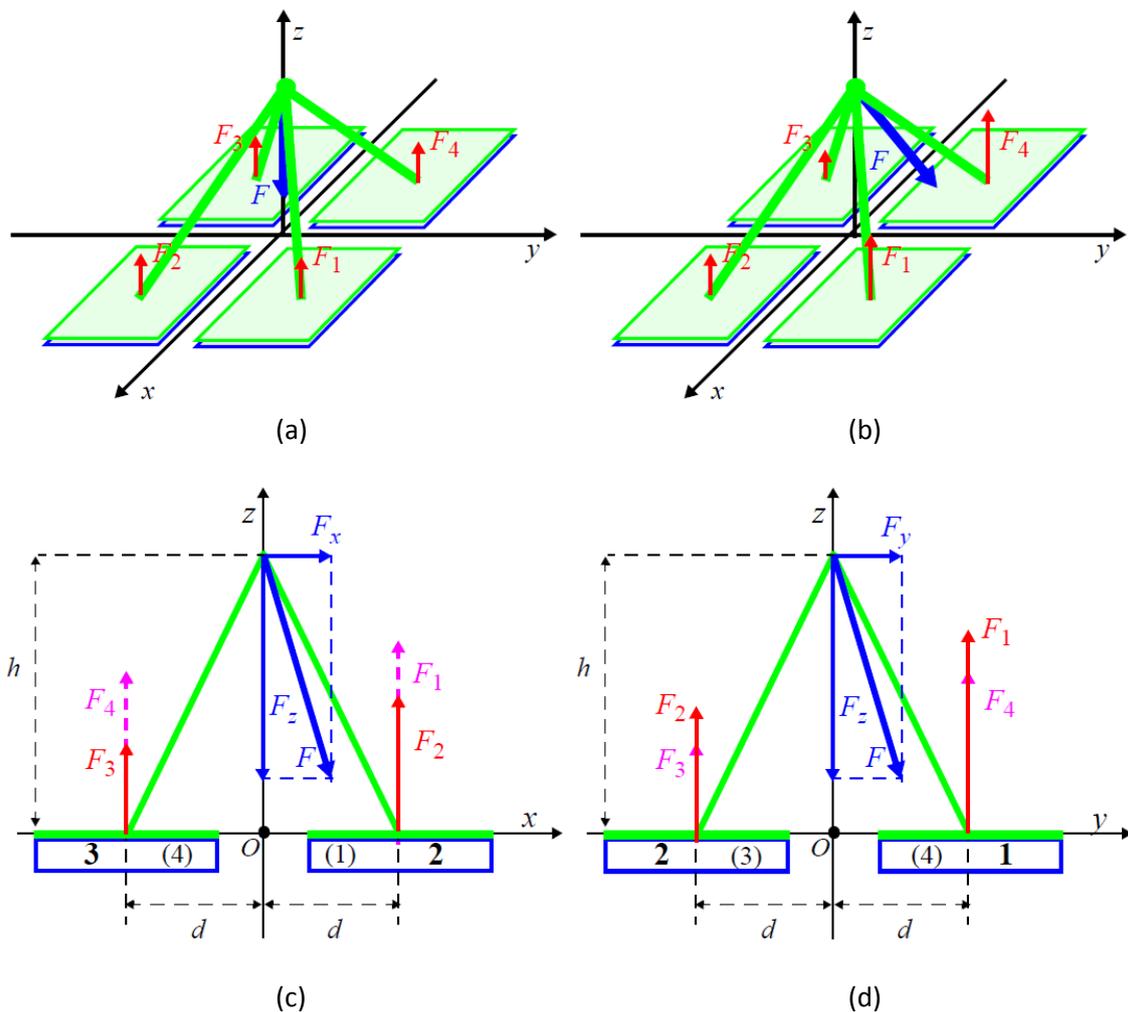


Figura 4-3. Diagrama de fuerzas para el modelo funcional del táctel tri-axial: (a) diagrama de fuerzas cuando se aplica una fuerza normal y (b) diagrama de fuerzas cuando la fuerza aplicada tiene componente normal y tangencial. (c) Proyección de las fuerzas en el plano x - z y (d) proyección de las fuerzas en el plano y - z en el caso de fuerza aplicada con componente normal y tangencial.

Las ecuaciones anteriores pueden escribirse como:

$$F_z = k_1 \cdot V_1 + k_2 \cdot V_2 + k_3 \cdot V_3 + k_4 \cdot V_4 + C_z \quad (4.8)$$

$$F_x = Ck_1 \cdot V_1 + Ck_2 \cdot V_2 - Ck_3 \cdot V_3 - Ck_4 \cdot V_4 + C_x \quad (4.9)$$

$$F_y = Ck_1 \cdot V_1 - Ck_2 \cdot V_2 - Ck_3 \cdot V_3 + Ck_4 \cdot V_4 + C_y \quad (4.10)$$

donde $Ck_i = k_i \cdot d / h$ son factores que dependen de la geometría de la estructura, y en última instancia pueden ser considerados como parámetros independientes de calibración. Además, son añadidos otros tres parámetros C_x , C_y y C_z para tener en cuenta el hecho experimental de obtener una lectura no nula en alguna de las cuatro unidades sensoriales ante la ausencia de alguna fuerza aplicada sobre el táctel tri-axial.

De esta forma, obtenemos un modelo con once parámetros que serán estimados de forma experimental realizando un ajuste con métodos de regresión lineal múltiple. Expresando las ecuaciones del modelo en forma matricial tenemos:

$$\mathbf{F} = \mathbf{K} \cdot \mathbf{V} + \mathbf{C} \quad (4.11)$$

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Ck_1 & Ck_2 & -Ck_3 & -Ck_4 \\ Ck_1 & -Ck_2 & -Ck_3 & Ck_4 \\ k_1 & k_2 & k_3 & k_4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ 3 \\ V_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_x \\ C_y \\ C_z \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

A continuación se presentan las dos estructuras propuestas, su análisis con simulaciones de elementos finitos y los resultados experimentales obtenidos con el modelo aquí descrito.

4.3. Primera estructura tri-axial

4.3.1. Propuesta y análisis

La estructura propuesta no asume ninguna geometría en particular para las unidades sensoriales, está pensada para poder ser usada sobre un sensor táctil genérico. Por ello, para maximizar la sensibilidad en la respuesta de cada unidad sensorial, se busca que la distribución de fuerzas ejercida sobre la superficie de cada una de ellas sea lo más uniforme posible. De esta forma, tanto una fuerza normal como una tangencial aplicada sobre el táctel tri-axial deben transmitirse a través de la estructura para producir dicha distribución uniforme sobre

las unidades sensoriales. Éste es el objetivo a alcanzar en la búsqueda de la estructura y la definición de sus parámetros geométricos.

Para seleccionar una estructura adecuada se ha hecho uso de la herramienta de análisis de elementos finitos (FEA) *COMSOL Multiphysics*®. Con ella se han realizado un conjunto de simulaciones en las que se han comparado las distribuciones de fuerzas sobre las unidades sensoriales para una fuerza normal aplicada y para una fuerza tangencial aplicada. El objetivo es encontrar la estructura concreta y los parámetros estructurales que garanticen una distribución de presión uniforme sobre las unidades sensoriales, independientemente de si la fuerza aplicada es normal o tangencial.

Tras el análisis de las simulaciones de diferentes propuestas se eligió la estructura mostrada en la Figura 4-4(a). Se trata de una pieza cuadrada de la que parten cuatro brazos en ángulo apoyándose cada uno en una base cuadrada. Sobre la pieza cuadrada se aplica la fuerza a la estructura, y cada una de las bases va apoyada sobre cada una de las unidades sensoriales de la matriz de sensores. El material con el que se fabrica la estructura debe ser rígido pero con una cierta elasticidad que permita una pequeña deformación de forma que la fuerza se transmita adecuadamente. En el prototipo final, el sistema completo, la estructura y el sensor, se encapsuló de forma que todas las piezas quedaban ancladas y se evitaba así el giro de la estructura (ver Figura 4-4(b)).

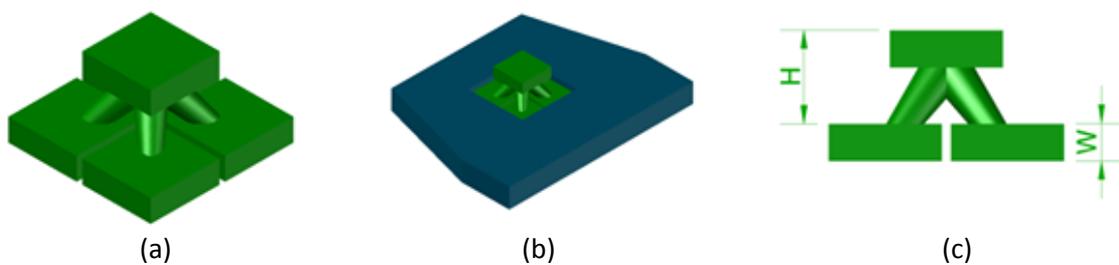


Figura 4-4. (a) Estructura tri-axial. (b) Estructura con el anclaje usado en el banco de pruebas. (c) Parámetros geométricos.

El tamaño de la estructura se ha seleccionado de forma que coincida con el tamaño del sensor usado para realizar los experimentos, que tiene un área cuadrada de 13 mm de lado.

Las simulaciones FEA permiten ver la influencia que los parámetros de la estructura tienen en la distribución de la fuerza sobre las unidades sensoriales. Los parámetros que se consideran son los siguientes (ver Figura 4-4(c)):

- Módulo de elasticidad (módulo de Young) del material de la estructura tri-axial.
- El ancho de las bases (W).
- La distancia de las bases a la tapa superior (H).
- La posición del punto de unión de los brazos con las bases.

Para simplificar las simulaciones se realiza un corte y se programa la estructura en dos dimensiones. En la Figura 4-5 se observa la geometría programada. Se consideran cuatro elementos: la estructura tri-axial, una lámina de elastómero (colocada entre la estructura y el sensor con las unidades sensoriales), dos unidades sensoriales, y el sistema de anclaje. Se programan cuatro pares de contacto para las uniones o contactos entre los distintos elementos. El par de contacto analizado (su presión de contacto) es el correspondiente a la unión entre la parte inferior del elastómero y la parte superior de cada unidad sensorial. En la Figura 4-6(a) se observa el resultado de la simulación para un conjunto de fuerzas normales aplicadas y en la Figura 4-6(b) el resultado para una fuerza aplicada con una componente normal de 10N sumada a una serie de componentes tangenciales. Ambos resultados son los ideales, y se han obtenido con un material para la estructura rígido pero lo suficientemente elástico para transmitir las fuerzas de manera apropiada (módulo de Young $E=2.42$ GPa). Hay que notar que tanto para fuerzas normales como tangenciales, la distribución de la presión en las unidades sensoriales puede considerarse uniforme.

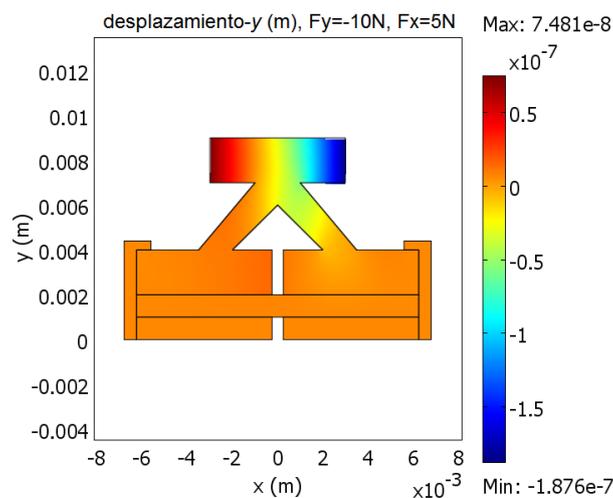


Figura 4-5. Geometría de la simulación y desplazamiento en la dirección del eje y.

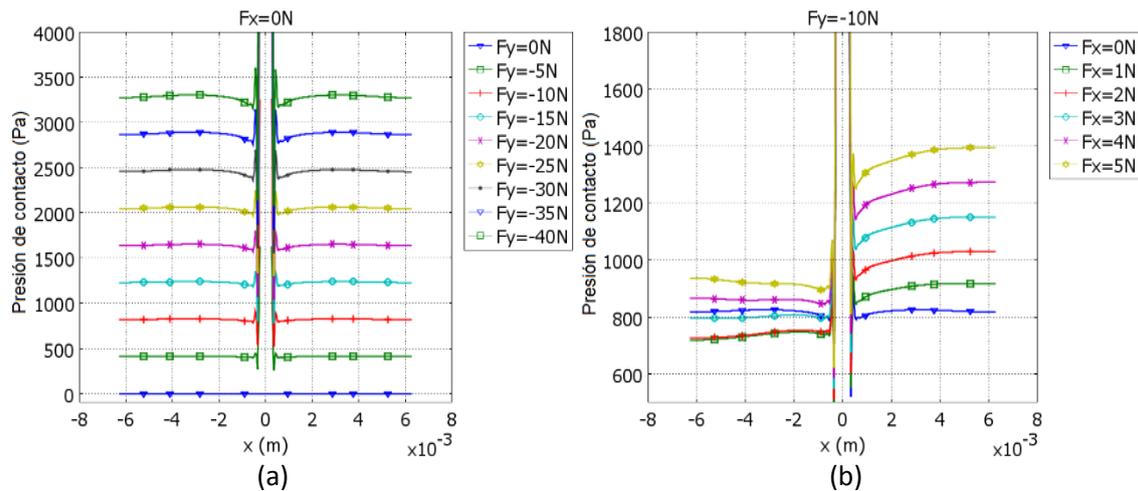
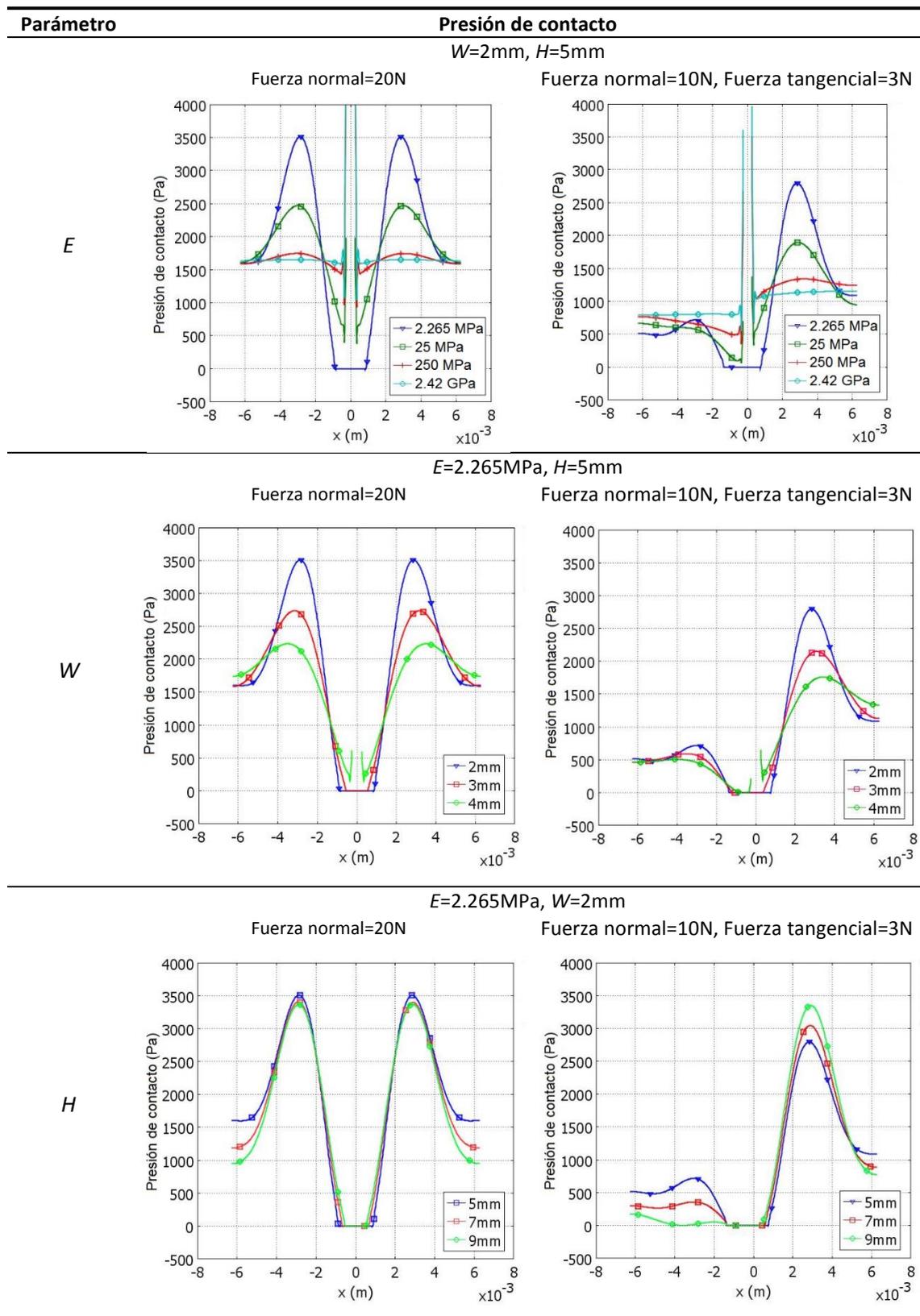


Figura 4-6. (a) Presión de contacto en las unidades sensoriales para una fuerza normal aplicada. (b) Presión de contacto en las unidades sensoriales para una fuerza con componente normal y tangencial aplicada.

En la Tabla 4-1 se resume el resultado de varias simulaciones en las que se varían de uno en uno los parámetros mencionados anteriormente. En la primera fila de la tabla se presentan los resultados obtenidos variando el módulo de Young del material de la estructura, en la segunda fila los resultados de variar el parámetro W y en la tercera fila los resultados de variar el parámetro H .

Analizando estos resultados, se observa (en la primera fila de la Tabla 4-1) que cuanto más rígido es el material, más uniforme es la distribución de presión sobre la superficie de las unidades sensoriales. Por lo tanto, un material más flexible causa una distribución menos uniforme, pero sin embargo acentúa la diferencia de presiones entre las dos unidades sensoriales. Esto hace que aumente la diferencia entre la fuerza tangencial máxima y mínima; es decir, el rango de salida. Con respecto a los parámetros geométricos W y H (segunda y tercera fila de la Tabla 4-1), el parámetro W , la variación de la altura de la base de la estructura, tiene un efecto similar al del incremento de rigidez (módulo de Young) de la estructura. Al aumentar el valor de W aumenta la uniformidad de la distribución de presión. Por su parte, un aumento de la altura H implica un aumento del par en caso de aplicar una fuerza tangencial, por lo que aumenta la diferencia de presiones entre las dos unidades sensoriales y por lo tanto capacidad de discriminar la magnitud de las fuerzas tangenciales. Tiene sin embargo poco efecto la variación de este parámetro en la distribución de presiones en el caso en el que la fuerza aplicada tenga sólo componente normal.

Tabla 4-1. Resultado de las simulaciones de la primera estructura propuesta.



Finalmente, por lo que respecta a la variación del punto de unión de los brazos con las bases, la Figura 4-7 muestra que el principal efecto es el desplazamiento del máximo pico de presión a lo largo del eje x y la aparición y ensanchamiento de una zona muerta central en la que la salida es nula.

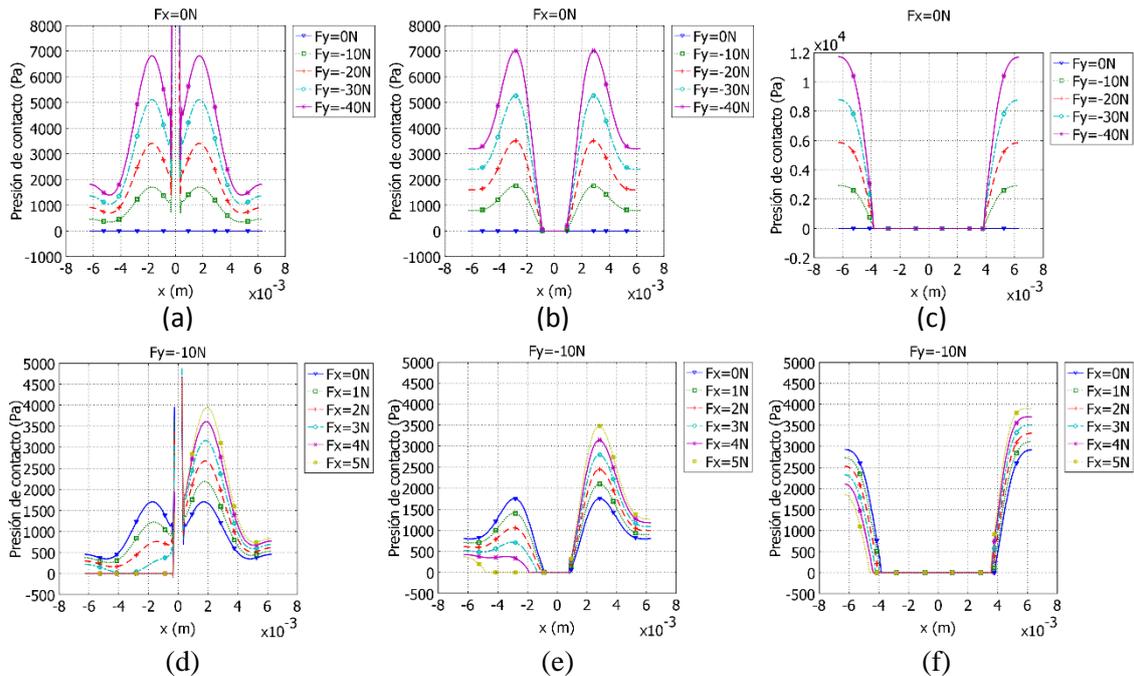


Figura 4-7. Resultado de variar la posición de contacto de los brazos con las bases para fuerzas normales: (a) posición de contacto a 1 mm del centro, (b) a 2 mm del centro y (c) a 4 mm del centro. Resultado para fuerzas con componente tangencial: (d) posición de contacto a 1 mm del centro, (e) a 2 mm del centro y (f) a 4 mm del centro.

La estructura de la Figura 4-4 se fabrica con una impresora 3D con lo que el parámetro E queda restringido al módulo de Young del material con el que se trabaja en dicha impresora. Con esta restricción seleccionamos los siguientes parámetros para la construcción de la estructura tri-axial:

- Material plástico (ABS_PLUS) con módulo de Young $E = 2265$ MPa.
- Ancho de la base $W = 2$ mm.
- Alto de los brazos de la estructura $H = 5$ mm.
- La posición de contacto de los brazos a la base a 2mm del centro de la estructura.

La Figura 4-8 muestra la distribución de presiones en la interfaz para la estructura fabricada. Se observa que la distribución no es uniforme; sin embargo, se realizan los experimentos necesarios para obtener los parámetros K y C del modelo de la ecuación (4.11) a fin de explorar la capacidad de la propuesta de detectar las tres componentes de la fuerza aplicada sobre el táctel tri-axial.

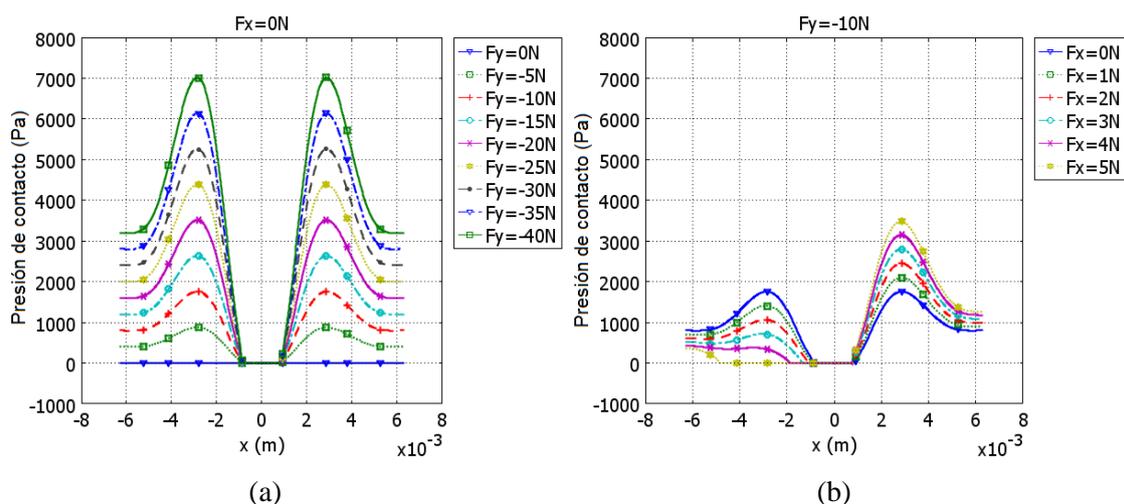


Figura 4-8. (a) Presión de contacto para fuerzas normales y (b) para fuerzas tangenciales de la estructura fabricada.

4.3.2. Experimentos y resultados

Para la realización de los experimentos se usa la plataforma de caracterización mostrada en la Figura 4-9. La base sobre la que se coloca el sensor tri-axial es una plataforma de translación motorizada, permitiendo el movimiento en los ejes x e y . Es mediante estos movimientos como se ejercen las fuerzas tangenciales en las dos direcciones perpendiculares. El tercer motor, colocado perpendicularmente a la plataforma de translación acciona un émbolo con un muelle en su interior para ejercer las fuerzas normales al sensor. En el extremo inferior del émbolo se sitúa un sensor de referencia que es el que entra en contacto con el táctel tri-axial para ejercer sobre él la fuerza deseada. Dicho sensor de referencia proporciona las tres componentes (F_x , F_y y F_z) de la fuerza aplicada. El sistema completo está controlado por un

PC mediante una aplicación desarrollada en Labview™. En el Anexo F se describe de forma más detallada esta plataforma de caracterización.

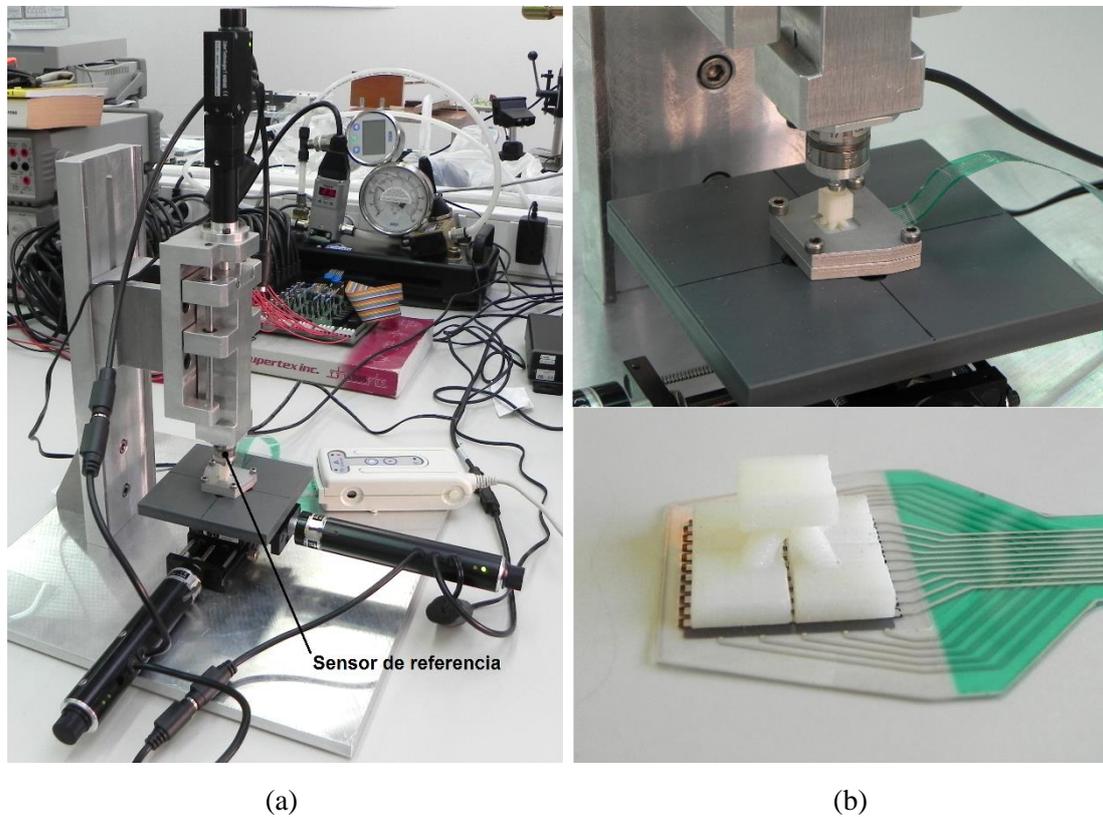


Figura 4-9. (a) Plataforma de caracterización. (b) Prototipo de táctel tri-axial.

Como unidades sensoriales se usan en este caso conjuntos de tácteles de un sensor comercial de la marca Tekscan (modelo 5800N). Es un sensor piezorresistivo de 10x10 tácteles con una resolución de 1.27mm entre ellos y un tamaño total de 13x13mm². El sensor 5800N se divide en grupos de 5x5 tácteles para formar cada uno de ellos una unidad sensorial del táctel tri-axial. Finalmente todo el conjunto se encapsula para realizar los experimentos como se aprecia en la Figura 4-9(b).

La Figura 4-10 ilustra el modo de operación del táctel propuesto. La imagen táctil generada por el sensor 5800N se muestra en Figura 4-10(a) para una fuerza normal, y en Figura 4-10(b) y Figura 4-10(c) para una fuerza con componentes normal y tangencial. Las figuras Figura 4-10(d), Figura 4-10(e), y Figura 4-10(f) muestran los valores calculados de la salida de las

cuatro unidades sensoriales (V_1 , V_2 , V_3 y V_4). Dichos valores se calculan realizando la media aritmética de los tácteles que componen cada unidad sensorial. El punto rojo representa el centro de masas de la imagen táctil, posicionado en el centro cuando se aplica una fuerza normal (Figura 4-10(d)) y desplazado en el caso de que la fuerza aplicada tenga alguna componente tangencial (Figura 4-10(e) y Figura 4-10(f)).

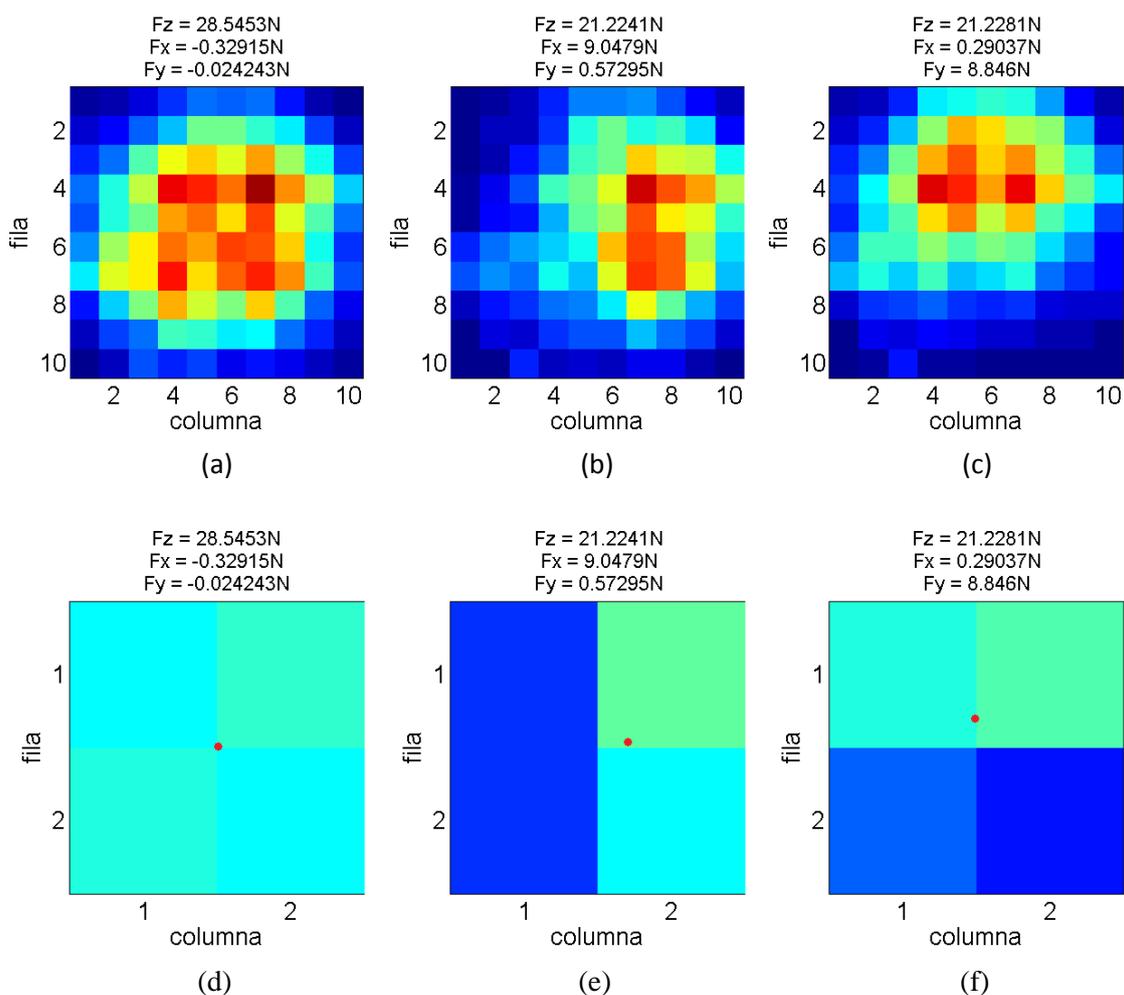


Figura 4-10. (a) Imagen táctil completa obtenida por el sensor 5800N para una fuerza normal aplicada, (b) para una fuerza normal y tangencial en el eje x , y (c) para una fuerza normal y tangencial en el eje y . (d) Valores de las cuatro unidades sensoriales para una fuerza normal, (e) para una fuerza normal y tangencial en el eje x , y (f) para una fuerza normal y tangencial en el eje y .

Para determinar los parámetros del modelo de la ecuación (4.11), se realizan una serie de experimentos, registrándose parejas de valores $\mathbf{F} \{F_x, F_y \text{ y } F_z\}$ (componentes de la fuerza aplicada sobre el táctel tri-axial) y $\mathbf{V} \{V_1, V_2, V_3 \text{ y } V_4\}$ (salida de las unidades sensoriales del sensor piezorresistivo 5800N). Con la ayuda del paquete estadístico de la aplicación Matlab® se realiza una regresión lineal múltiple para resolver la ecuación (4.11) y hallar la matriz de parámetros del modelo \mathbf{K} y \mathbf{C} (ver ecuación (4.12)). Para la obtención de los datos experimentales se sigue el siguiente proceso:

- Se ejerce una fuerza normal sobre el táctel que aumenta desde 0 N hasta los 40 N.
- Manteniendo una fuerza normal de alrededor de los 20 N, se incrementa la fuerza en el eje y negativo hasta los 9 N y en el eje y positivo desde los 0 N hasta los 9 N.
- Finalmente se repite el mismo proceso a lo largo del eje x.

Cada vez que se cambia el valor de la fuerza aplicada se registra y almacena una muestra con los siete datos correspondiente a las variables de los vectores \mathbf{F} y \mathbf{V} . En el experimento cuyos resultados se muestran en la Figura 4-11 y la Figura 4-12 se han registrado cincuenta y cinco muestras siguiendo el procedimiento anteriormente descrito; y aplicando el método de regresión lineal múltiple se obtienen los parámetros del modelo mostrados en la Tabla 4-2. El parámetro del método R^2 indica la bondad del ajuste por el método de mínimos cuadrados; cuanto más cercano es a 1 mejor es la aproximación. El parámetro estadístico f y su valor crítico p indican que la relación entre las variables independientes (V_1, V_2, V_3 y V_4) y las variables dependientes (F_x, F_y y F_z) no es aleatoria. El parámetro *bits* en cada eje representa los bits de resolución en la magnitud de la fuerza, y se calcula de la siguiente manera:

$$\varepsilon_{RMS}^2 = \frac{\sum_i^N (\tilde{F}_i - \hat{F}_i)^2}{N} \quad (4.13)$$

$$bits = \log_2 \left(\frac{fondo_escala}{2 \cdot \varepsilon_{RMS}} \right) \quad (4.14)$$

donde \tilde{F}_i es la fuerza medida para la muestra i por el sensor de referencia en un eje determinado, \hat{F}_i es la fuerza estimada de la muestra i calculada por el modelo y N el número de muestras registradas en el experimento.

Tabla 4-2. Resultados del análisis de regresión lineal múltiple.

Parámetros del modelo	Valor	Parámetros del método	Valor
Ck_1	$6.6801 \cdot 10^{-2}$ N/V	R^2	0.9938
Ck_2	$6.7539 \cdot 10^{-2}$ N/V	f	$2.4582 \cdot 10^3$
Ck_3	$6.8566 \cdot 10^{-2}$ N/V	P	$2.3037 \cdot 10^{-164}$
Ck_4	$6.3902 \cdot 10^{-2}$ N/V	$bits_x$	4
K_1	$1.1608 \cdot 10^{-1}$ N/V	$bits_y$	4
K_2	$2.1969 \cdot 10^{-2}$ N/V	$bits_z$	3
K_3	$1.3154 \cdot 10^{-1}$ N/V		
K_4	$2.0036 \cdot 10^{-2}$ N/V		
C_x	$-1.0210 \cdot 10^{-1}$ N		
C_y	$-1.6573 \cdot 10^{-1}$ N		
C_z	-3.3675 N		

Una vez resuelta la ecuación (4.11) y calculados los parámetros del modelo K y C , se puede calcular la fuerza estimada \hat{F} a partir de los datos medidos por el sensor \tilde{V} :

$$\hat{F} = K \cdot \tilde{V} + C \quad (4.15)$$

En la Figura 4-11 se muestra las tres componentes de la fuerza estimada por el modelo frente a las tres componentes de la fuerza aplicada suministrada por el sensor de referencia. La Figura 4-12 ilustra la secuencia temporal muestra por muestra seguida para obtener los valores según el procedimiento descrito anteriormente. Se aprecia que el modelo ajusta con una precisión aceptable los datos experimentales.

En la sección 4.3.1 se insiste en la importancia de que la distribución de presiones en las unidades sensoriales debe ser uniforme a lo largo de la superficie de contacto entre la estructura y dichas unidades. Se realizan simulaciones para obtener los mejores parámetros que cumplan esta condición, pero por razones tecnológicas en la construcción de la estructura y el tipo de material disponible para la impresora 3D no es posible alcanzar este objetivo. La Figura 4-10(a), Figura 4-10(b) y la Figura 4-10(c) muestran que los tácteles que forman una unidad sensorial presentan distintos niveles de presión. Aun así, los experimentos muestran la posibilidad no sólo de detectar componentes tangenciales en la fuerza aplicada sino que pueden discriminarse distintos niveles en su magnitud.

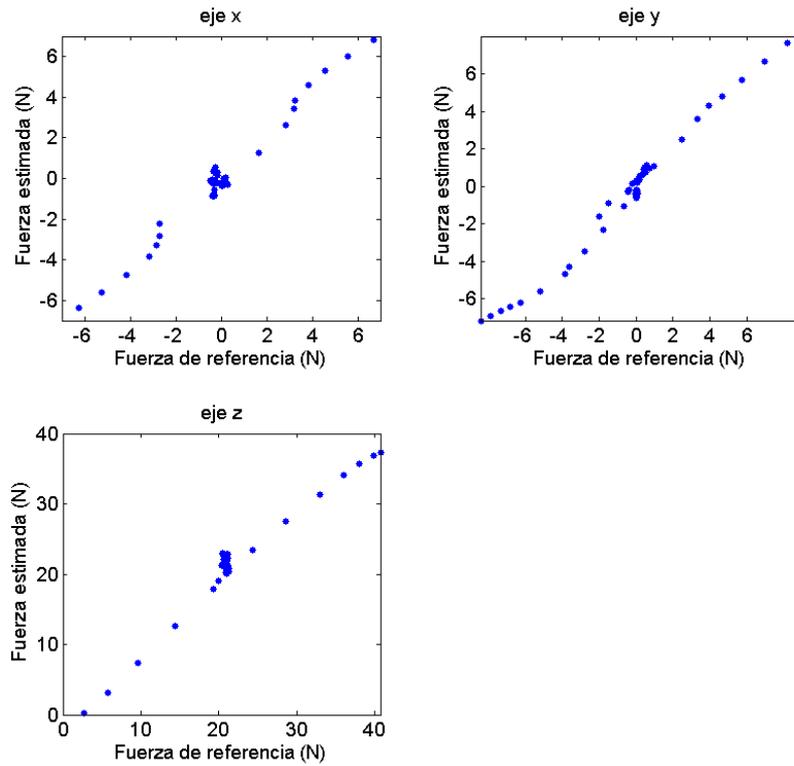


Figura 4-11. Fuerza estimada frente a la fuerza de referencia para cada eje.

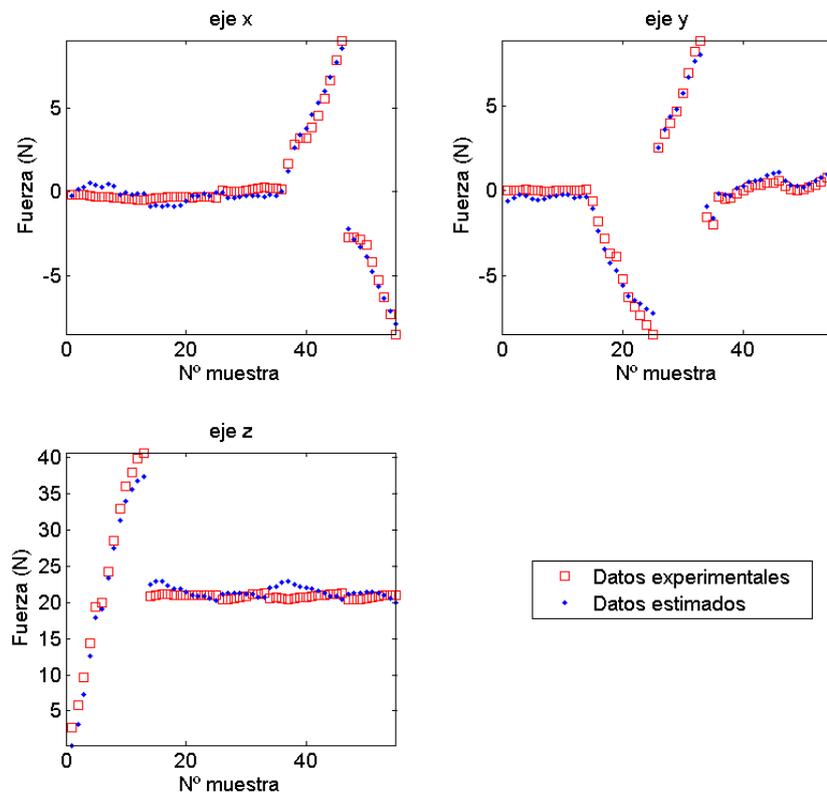


Figura 4-12. Fuerzas estimadas y de referencia para cada muestra.

4.4. Segunda estructura tri-axial

4.4.1. Propuesta y análisis

Tras haber verificado la viabilidad del uso de la estructura de los apartados anteriores, se propone aquí una nueva estructura realizando algunos cambios a tenor de los resultados obtenidos. En primer lugar se pretende reducir su tamaño para aumentar así la resolución del táctel tri-axial. El objetivo es usar como unidades sensoriales las matrices de electrodos fabricadas con la tecnología de PCB descritas en el Capítulo 2, de resolución 2.54mm (ver Tabla 2-1). En segundo lugar, y debido al cambio anterior, hay que simplificar la estructura. Por un lado la impresora 3D disponible no admite disminuir tanto las dimensiones de la estructura garantizando la robustez de sus partes, en especial la unión entre los brazos y las bases. Por otro lado es preferible la simplicidad siempre que se cumplan los objetivos. En el caso de la estructura anterior requería de un anclaje para evitar el movimiento de la misma con respecto a las unidades sensoriales. Hay varios trabajos de sensores capaces de medir fuerzas tangenciales que usan estructuras con forma de semiesfera o troncos de pirámides; y aunque usan otra tecnología, puede ser de aplicación en el caso que aquí nos ocupa [Liu et al. 2009; Lee et al. 2008].

La segunda estructura que se propone tiene forma de tronco de pirámide, ver Figura 4-13. Partiendo de un cubo de material elastómero se fresa mediante técnicas con láser hasta conseguir la forma deseada. Esta estructura tiene una serie de ventajas respecto a la anteriormente propuesta:

- El material es más elástico, se acomoda mejor tanto a las unidades sensoriales como al objeto que ejerce la fuerza. El coeficiente de rozamiento entre las superficies es mayor y esto hace que no haga falta ningún tipo de anclaje.
- La distribución de la estructura en forma de matriz es más sencilla de realizar. Una matriz de estructuras se coloca sobre una matriz de sensores piezorresistivos, el área de contacto es mayor, hay por lo tanto mayor rozamiento y mayor agarre también. Nuevamente se hace menos necesario el anclaje usado con la estructura anterior.
- Al ser más elástico el material de la estructura, es menos frágil y por lo tanto la estructura es más robusta, estando más protegida a sobreesfuerzos.

El tamaño de la estructura se hace coincidir con el tamaño de cuatro tácteles de las matrices sobre las que va a ser evaluado. De esta manera el tamaño de la base de la estructura es de $5.08 \times 5.08 \text{ mm}^2$.

Nuevamente se realizan simulaciones FEA para ver la influencia de los siguientes parámetros considerados (ver Figura 4-13):

- Módulo de elasticidad (módulo de Young E) del material de la estructura tri-axial.
- Superficie superior (D) de contacto del táctel tri-axial con el objeto que va a ejercer la fuerza.
- Altura de la estructura (H).

Para simplificar las simulaciones se realiza un corte y se programa la estructura en dos dimensiones (ver Figura 4-14). En este caso se consideran sólo dos elementos: la estructura y dos unidades sensoriales. No hace falta introducir el material elastómero por estar incluido en la propia estructura, que es de ese mismo material. Es necesario programar un solo par de contacto entre la superficie inferior de la estructura y la superficie superior de cada unidad sensorial. En ambos laterales inferiores de la estructura, antes de comenzar el tronco de pirámide, se configura una condición de contorno de plano de simetría para establecer la condición de que la estructura está integrada en una matriz; este hecho es lo que le da la estabilidad para que no gire o se desplace.

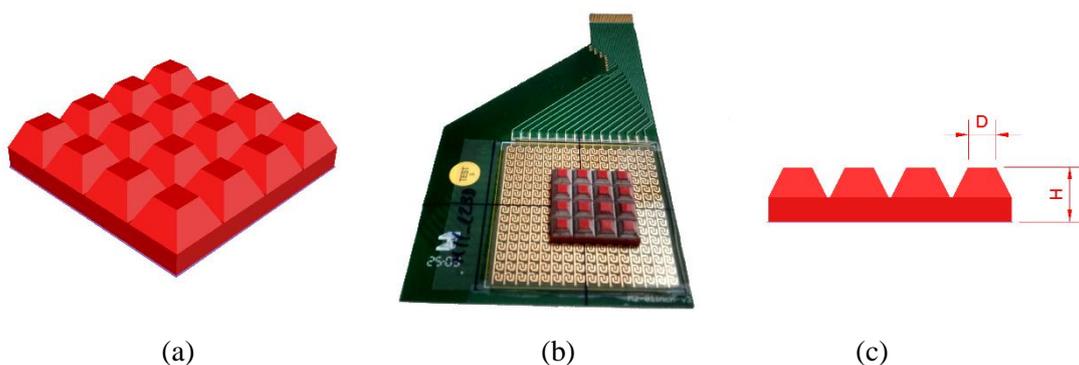


Figura 4-13. (a) Estructura propuesta en forma de tronco de pirámide. (b) Matriz de estructuras sobre un sensor piezorresistivo. (c) Parámetros geométricos.

En la Tabla 4-3 se resume el resultado de varias simulaciones en las que se varían los parámetros considerados anteriormente. En la primera fila de la tabla se presentan los

resultados obtenidos variando el módulo de Young del material de la estructura, en la segunda fila los resultados de variar el parámetro D , y en la tercera fila los resultados de variar el parámetro H .

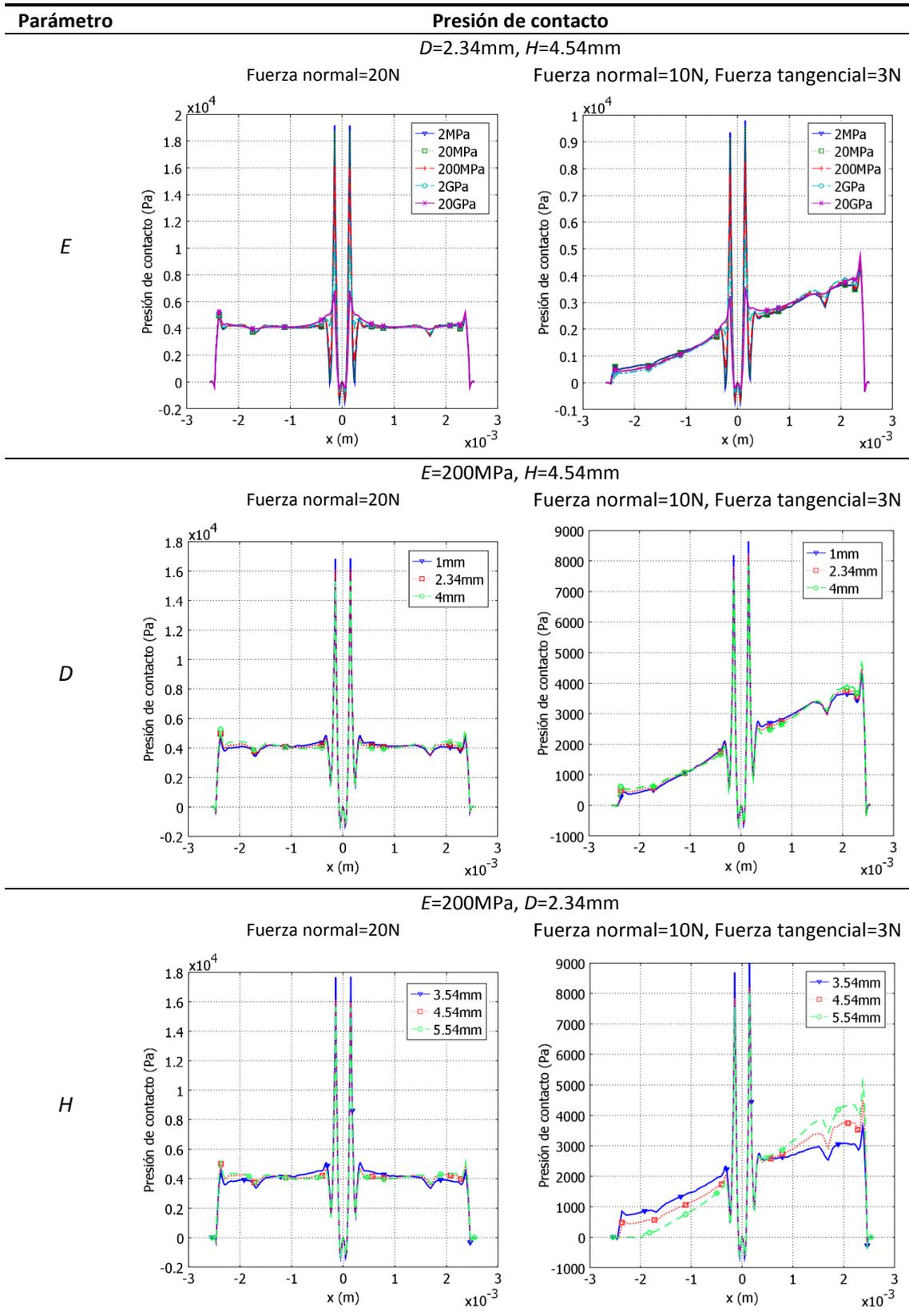
Se observa que esta estructura es más robusta frente a los cambios de parámetros desde el punto de vista de que la distribución de presiones no varía apenas con el cambio de los mismos. En todos los casos la distribución cuando se aplica una fuerza normal es uniforme en toda la superficie. No ocurre lo mismo cuando la fuerza aplicada tiene alguna componente tangencial, en este caso la distribución no es uniforme, siendo mayor la presión en uno de los extremos de las unidades sensoriales y disminuyendo hacia el otro extremo. Al aumentar el valor del parámetro E se suavizan los picos de presión en los bordes. Un aumento del parámetro D repercute en una ligera nivelación de la uniformidad de la distribución de presiones ante fuerzas tanto normales como tangenciales. Un aumento del parámetro H no tiene ningún efecto si la fuerza aplicada tiene sólo componente normal; en cambio si existe alguna componente tangencial, el aumento de H implica un aumento del par de la fuerza tangencial. Esto, al igual que en el caso de la estructura anterior, implica un aumento de la diferencia de presiones entre las dos unidades sensoriales, lo que se traduce en una mayor capacidad para discriminar la magnitud de las fuerzas tangenciales.

La estructura se fabrica partiendo de un bloque previamente confeccionado con un material elastómero. Dicho bloque es fresado con técnicas láser para darle la forma deseada. Se construye una matriz de 4x4 estructuras tri-axiales que cubren un cuarto de las matrices m101v2 y m201v3 (ver Tabla 2-1 en el Capítulo 2 y Figura 4-13(b)). De nuevo, el material disponible para el bloque de partida nos restringe el valor del parámetro E . Los parámetros para la construcción quedan de la siguiente manera:

- Material elastómero con módulo de Young $E = 0.2$ GPa.
- Superficie superior $D = 2.34$ mm.
- Altura de la estructura $H = 4.54$ mm.

En la Figura 4-14 puede apreciarse la geometría simulada, y en la Figura 4-15 se muestra la distribución de presiones de dicha estructura. La distribución de presiones, aunque es uniforme para fuerzas normales aplicada, no lo es para fuerzas tangenciales al igual que pasaba con la primera estructura propuesta (ver Figura 4-8). Aun así, viendo los resultados obtenidos con la primera estructura, se realizan los experimentos necesarios para evaluar esta segunda estructura.

Tabla 4-3. Resultado de las simulaciones de la segunda estructura propuesta.



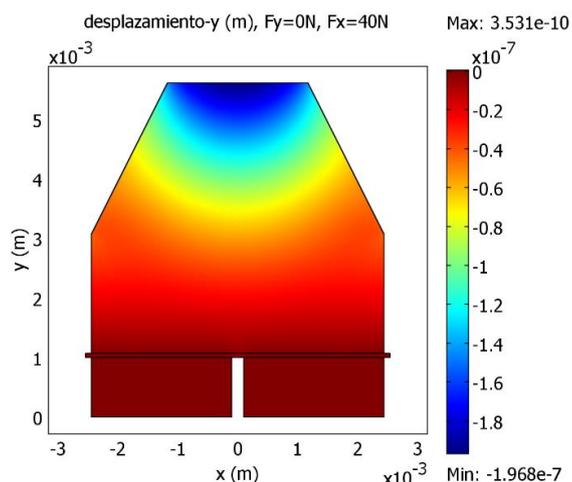


Figura 4-14. Geometría de la simulación y desplazamiento en la dirección del eje y.

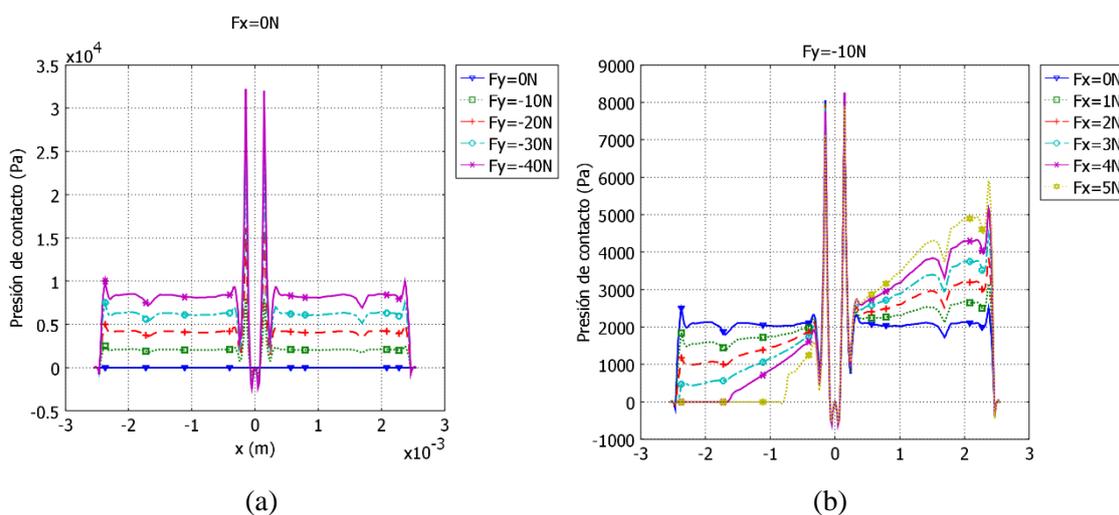


Figura 4-15. (a) Presión de contacto para fuerzas normales y (b) para fuerzas tangenciales de la estructura fabricada.

4.4.2. Experimentos y resultados

Para la realización de las pruebas se utiliza la misma plataforma de caracterización descrita en el apartado 4.3.2 (Figura 4-9(a)). Como unidades sensoriales se usarán en este caso tres sensores diferentes:

- Sensor 5800N de Tekscan.
- Sensor m101v2.
- Sensor m201v3.

En primer lugar se evalúa la estructura con el mismo sensor 5800N usado con la primera propuesta de estructura tri-axial. De este modo se podrá hacer una comparación de la efectividad de ambas estructuras. El táctel tri-axial cubre una superficie de 4x4 tácteles del sensor 5800N, por lo que una unidad sensorial sigue estando formada por una submatriz del sensor completo, en este caso de 2x2 tácteles. Más adelante se evalúa la estructura con otras dos matrices, m101v2 y m201v3, ambas evaluadas en el Capítulo 2. En estos dos últimos casos, un táctel tri-axial cubre una superficie de 2x2 tácteles, de manera que cada unidad sensorial está formada por un único táctel de la matriz.

En la Figura 4-16 se observa la posición de la estructura tri-axial sobre el sensor 5800N. Una estructura tri-axial ocupa un área de 4x4 tácteles, por lo que una unidad sensorial está formada por 2x2 tácteles. Los experimentos se realizan sobre el táctel tri-axial colocado sobre la submatriz [(5,5),(8,8)] (la esquina superior izquierda de la sub-matriz se posiciona en el táctel correspondiente a la fila 5 y la columna 5, y la esquina inferior derecha en el tactel correspondiente a la fila 8 y la columna 8). Cada valor V_1 , V_2 , V_3 y V_4 de las unidades sensoriales se calcula como la media aritmética de las salidas de los tácteles que lo componen:

- V_1 está compuesto por los tácteles (5,7), (5,8), (6,7) y (6,8).
- V_2 está compuesto por los tácteles (7,7), (7,8), (8,7) y (8,8).
- V_3 está compuesto por los tácteles (7,5), (7,6), (8,5) y (8,6).
- V_4 está compuesto por los tácteles (5,5), (5,6), (6,5) y (6,6).

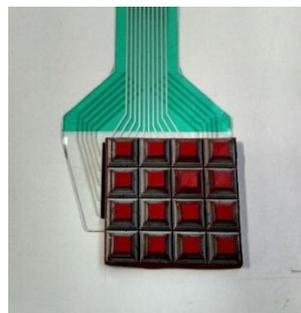


Figura 4-16. Matriz de estructuras tri-axiales sobre el sensor 5800N.

Para la obtención de los datos del experimento se sigue el procedimiento descrito en el apartado 4.3.2 para la evaluación de la primera estructura tri-axial. De esta forma, el centro de masas de la imagen táctil describe una trayectoria en forma de cruz. Se sigue también un nuevo procedimiento consistente en hacer que el centro de masas dibuje un círculo alrededor del origen (centro de los cuatro elementos sensoriales). Este procedimiento consiste en los siguientes pasos:

- Se ejerce una fuerza normal sobre el táctel que aumenta desde 0 N hasta los 40 N.
- Manteniendo una determinada fuerza normal, se incrementa la fuerza en uno de los ejes tangenciales.
- Manteniendo la fuerza normal y tangencial anterior se incrementa la fuerza en el otro eje tangencial.
- Se repite el proceso aumentando y disminuyen las fuerzas tangenciales en uno y otro eje de forma que el centro de masas describe un círculo alrededor del origen.

Se realizan siete pruebas: tres siguiendo el procedimiento en círculo y cuatro siguiendo el procedimiento en cruz. Todos los datos de cada procedimiento se usan para calcular los parámetros del modelo obteniendo los resultados mostrados en las figuras Figura 4-17 a la Figura 4-20. En la Tabla 4-4 y

Tabla 4-5 se muestran los parámetros de la bondad del método de regresión aplicado y el cálculo de los bits de precisión para cada eje.

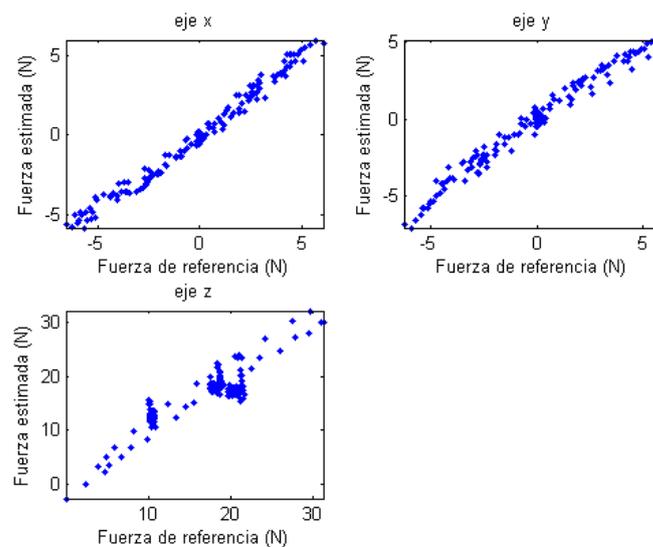


Figura 4-17. Fuerza estimada frente a la fuerza de referencia para cada eje para el caso del sensor 5800N siguiendo el procedimiento en círculo.

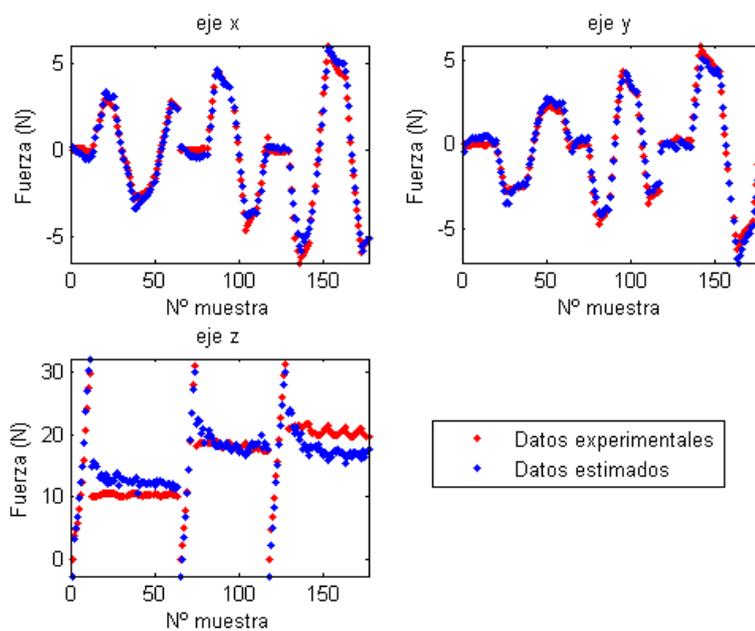


Figura 4-18. Fuerzas estimadas y de referencia para cada muestra para el caso del sensor 5800N siguiendo el procedimiento en círculo.

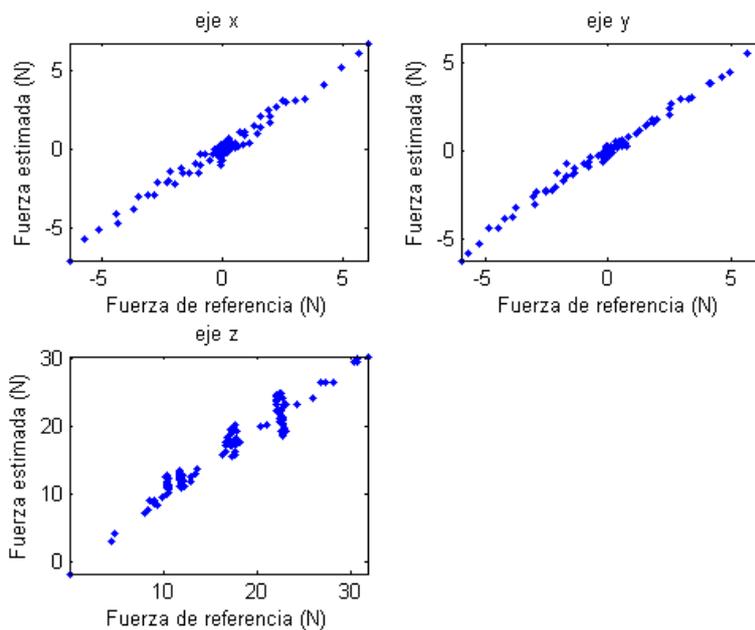


Figura 4-19. Fuerza estimada frente a la fuerza de referencia para cada eje para el caso del sensor 5800N siguiendo el procedimiento en cruz.

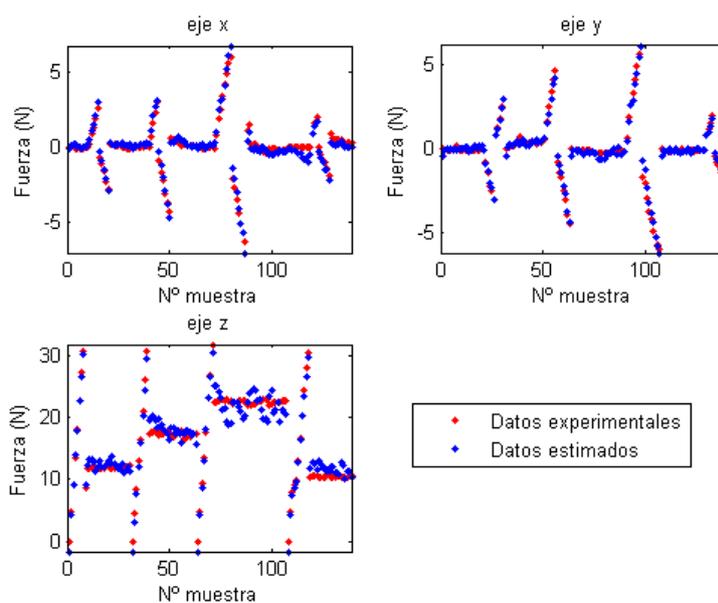


Figura 4-20. Fuerzas estimadas y de referencia para cada muestra para el caso del sensor 5800N siguiendo el procedimiento en cruz.

Tabla 4-4. Resultados del método de regresión para el sensor 5800N y el procedimiento en círculo.

Parámetros del modelo	Valor	Parámetros del método	Valor
Ck_1	$2.7757 \cdot 10^{-2}$ N/V	R^2	0.97313
Ck_2	$3.0171 \cdot 10^{-2}$ N/V	f	$1.8835 \cdot 10^3$
Ck_3	$2.6556 \cdot 10^{-2}$ N/V	P	0
Ck_4	$2.4482 \cdot 10^{-2}$ N/V	$bits_x$	3
K_1	$4.1444 \cdot 10^{-2}$ N/V	$bits_y$	3
K_2	$2.6351 \cdot 10^{-2}$ N/V	$bits_z$	2
K_3	$5.5910 \cdot 10^{-2}$ N/V		
K_4	$5.6303 \cdot 10^{-2}$ N/V		
C_x	$1.8285 \cdot 10^{-1}$ N		
C_y	$-4.6425 \cdot 10^{-1}$ N		
C_z	-2.5451 N		

Tabla 4-5. Resultados del método de regresión para el sensor 5800N y el procedimiento en cruz.

Parámetros del modelo	Valor	Parámetros del método	Valor
Ck_1	$2.7579 \cdot 10^{-2}$ N/V	R^2	0.98973
Ck_2	$2.7500 \cdot 10^{-2}$ N/V	f	$3.9119 \cdot 10^3$
Ck_3	$3.1974 \cdot 10^{-2}$ N/V	P	0
Ck_4	$3.6241 \cdot 10^{-2}$ N/V	$bits_x$	4
K_1	$1.4414 \cdot 10^{-1}$ N/V	$bits_y$	4
K_2	$-4.4250 \cdot 10^{-2}$ N/V	$bits_z$	3
K_3	$1.5277 \cdot 10^{-1}$ N/V		
K_4	$-7.5267 \cdot 10^{-2}$ N/V		
C_x	$-4.8534 \cdot 10^{-2}$ N		
C_y	$-3.8038 \cdot 10^{-1}$ N		
C_z	-1.6687 N		

Si tenemos en cuenta los experimentos según el procedimiento en cruz se observa que los resultados de las dos estructuras propuestas sobre el sensor 5800N son similares, se obtienen los mismos resultados de resolución en bits.

A continuación se evalúa la estructura sobre el sensor m101v2. En la Figura 4-21 se muestra cómo se posiciona la matriz de estructuras tri-axiales sobre dicho sensor. En este caso un táctel tri-axial ocupa 2x2 tácteles de la matriz m101v2 y por lo tanto cada unidad sensorial está definida por un solo táctel. Los valores V_1 , V_2 , V_3 y V_4 están definidos por la salida de los tácteles correspondientes del sensor m101v2 que en este caso son los siguientes:

- V_1 se corresponde con la salida del táctel (8,10).
- V_2 se corresponde con la salida del táctel (9,10).
- V_3 se corresponde con la salida del táctel (9,9).
- V_4 se corresponde con la salida del táctel (8,9).

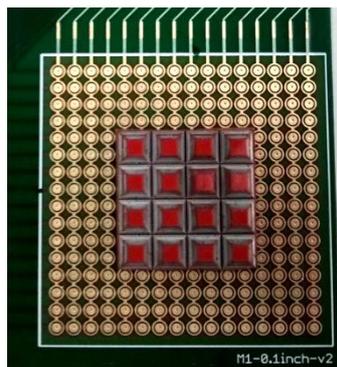


Figura 4-21. Posicionamiento de la estructura tri-axial sobre la matriz m101v2.

En la Figura 4-22, Figura 4-23 y Tabla 4-6 se muestran los resultados de la bondad del ajuste de regresión lineal siguiendo el procedimiento en cruz. En la Figura 4-24, Figura 4-25 y Tabla 4-7 se muestran los resultados de la bondad del ajuste de regresión lineal siguiendo el procedimiento en círculo.

Hay que hacer notar dos cuestiones: primero que la capacidad para detectar la magnitud de las fuerzas tangenciales y normales empeora al cambiar al sensor m101v2, y segundo que aparece un umbral en la detección de las fuerzas tangenciales. Pruebas realizadas aplicando fuerzas tangenciales que no superan 1N muestran que no son detectadas. Esto es debido a la geometría del táctel. Se está usando un único táctel para cada unidad sensorial, y se ha mostrado que la distribución de presiones no es uniforme sobre cada unidad (ver Figura 4-15),

sino que es radial, al igual que la geometría del táctel del sensor m101v2. Por este motivo hay direcciones para las que si la fuerza es pequeña, alguno de los electrodos no está suficientemente presionado y limita la salida de dicha unidad sensorial.

Tabla 4-6. Resultados del método de regresión para el sensor m101v2 y el procedimiento en cruz.

Parámetros del modelo	Valor	Parámetros del método	Valor
Ck_1	1.5775 N/V	R^2	0.97989
Ck_2	1.8307 N/V	f	$1.2621 \cdot 10^3$
Ck_3	1.6842 N/V	P	0
Ck_4	2.0561 N/V	$bits_x$	2
K_1	$3.6726 \cdot 10^1$ N/V	$bits_y$	1
K_2	$-4.0552 \cdot 10^1$ N/V	$bits_z$	3
K_3	$3.7981 \cdot 10^1$ N/V		
K_4	$-2.8890 \cdot 10^1$ N/V		
C_x	$2.1144 \cdot 10^{-1}$ N		
C_y	$8.2618 \cdot 10^{-1}$ N		
C_z	-4.4342 N		

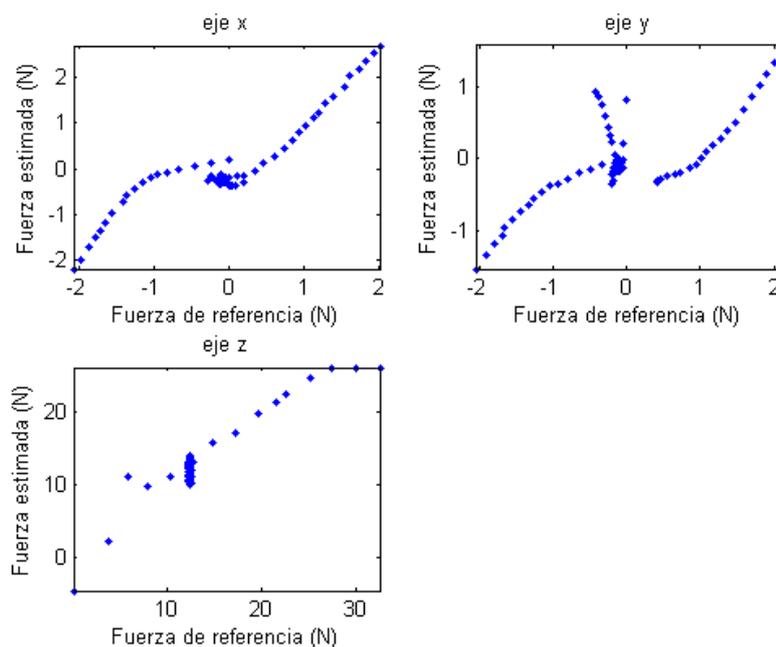


Figura 4-22. Fuerza estimada frente a la fuerza de referencia para cada eje para el caso del sensor m101v2 siguiendo el procedimiento en cruz.

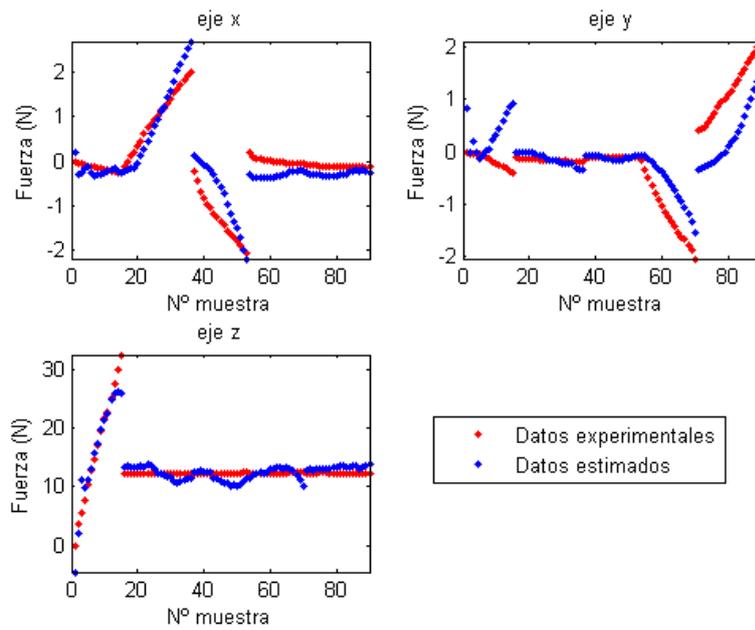


Figura 4-23. Fuerzas estimadas y de referencia para cada muestra para el caso del sensor m101v2 siguiendo el procedimiento en cruz.

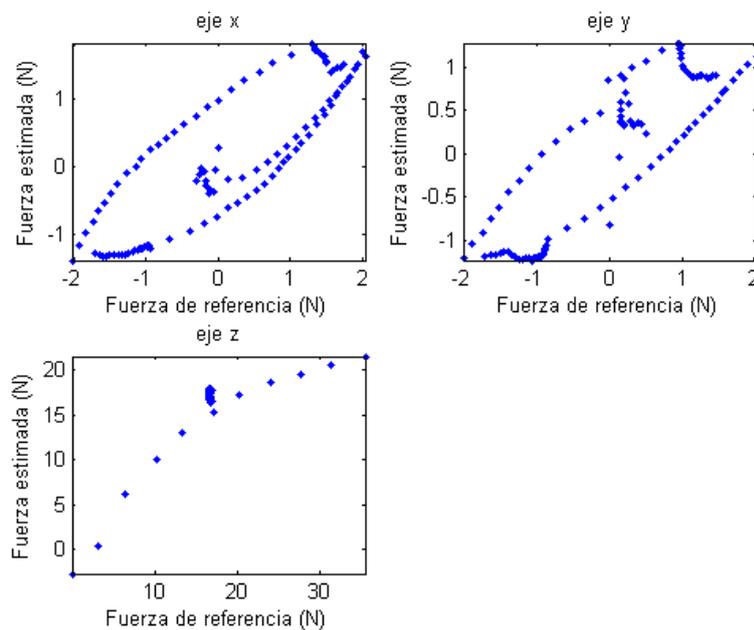


Figura 4-24. Fuerza estimada frente a la fuerza de referencia para cada eje para el caso del sensor m101v2 siguiendo el procedimiento en círculo.

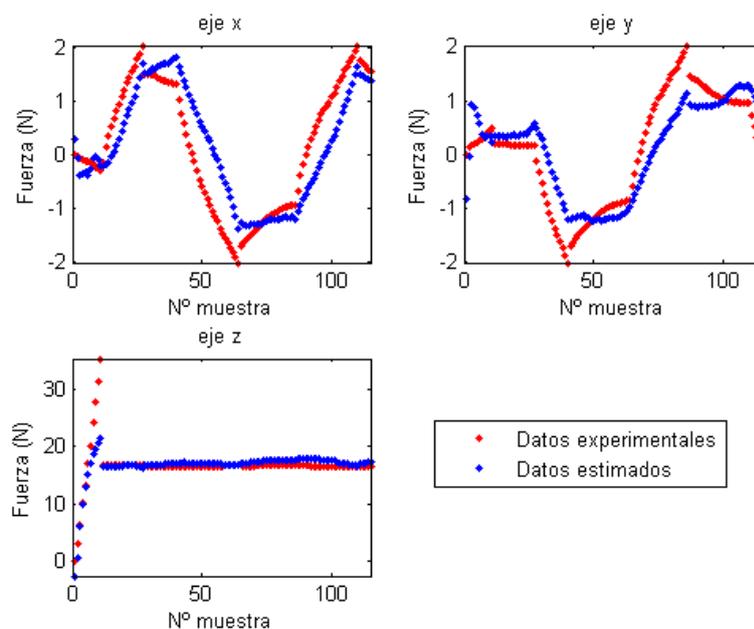


Figura 4-25. Fuerzas estimadas y de referencia para cada muestra para el caso del sensor m101v2 siguiendo el procedimiento en círculo.

Tabla 4-7. Resultados del método de regresión para el sensor m101v2 y el procedimiento en círculo.

Parámetros del modelo	Valor	Parámetros del método	Valor
Ck_1	1.6316 N/V	R^2	0.97572
Ck_2	1.5636 N/V	f	$1.3421 \cdot 10^3$
Ck_3	1.7243 N/V	P	0
Ck_4	1.9085 N/V	$bits_x$	1
K_1	3.3310 N/V	$bits_y$	1
K_2	$-8.1183 \cdot 10^{-1}$ N/V	$bits_z$	2
K_3	3.8699 N/V		
K_4	$-2.6144 \cdot 10^{-1}$ N/V		
C_x	$2.7799 \cdot 10^{-1}$ N		
C_y	$-8.2764 \cdot 10^{-1}$ N		
C_z	-2.7067 N		

Finalmente se evalúa la estructura con el sensor m201v3. En la Figura 4-26 se muestra cómo se posiciona la matriz de estructuras sobre el sensor m201v3. En este caso los valores de las unidades sensoriales están definidos de la siguiente manera:

- V_1 se corresponde con la salida del táctel (10,11).

- V_2 se corresponde con la salida del táctel (11,11).
- V_3 se corresponde con la salida del táctel (11,10).
- V_4 se corresponde con la salida del táctel (10,10).

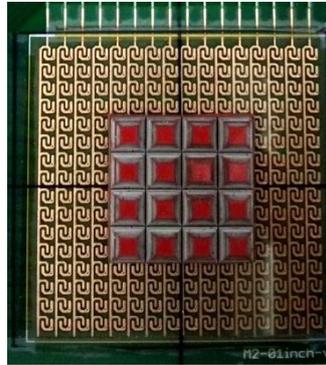


Figura 4-26. Posicionamiento de la estructura tri-axial sobre la matriz m201v3.

En la Figura 4-27, Figura 4-28 y Tabla 4-8 se muestran los resultados de la bondad del ajuste de regresión lineal siguiendo el procedimiento en cruz. En la Figura 4-29, Figura 4-30 y Tabla 4-9 se muestran los resultados de la bondad del ajuste de regresión lineal siguiendo el procedimiento en círculo.

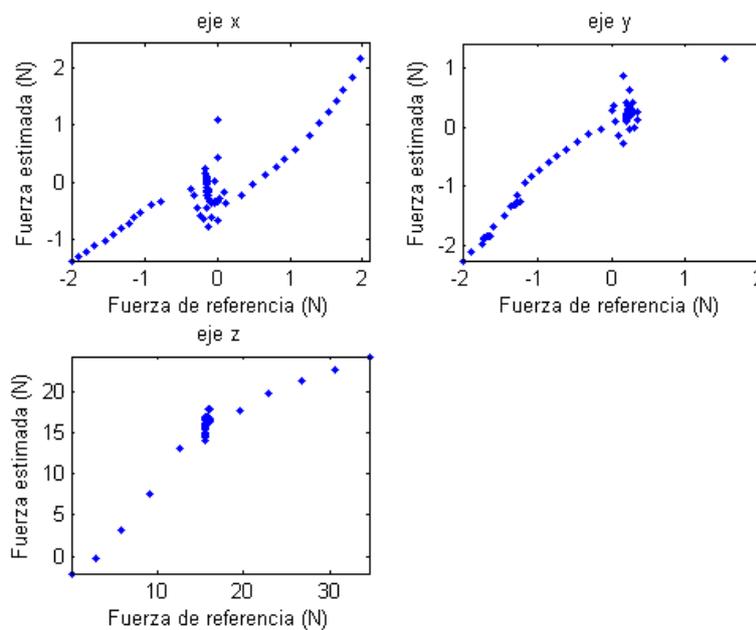


Figura 4-27. Fuerza estimada frente a la fuerza de referencia para cada eje para el caso del sensor m201v3 siguiendo el procedimiento en cruz.

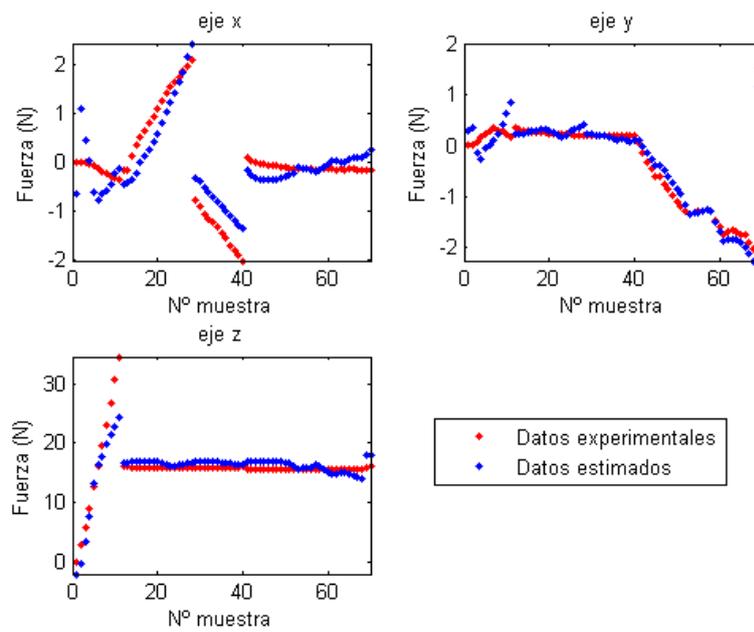


Figura 4-28. Fuerzas estimadas y de referencia para cada muestra para el caso del sensor m201v3 siguiendo el procedimiento en cruz.

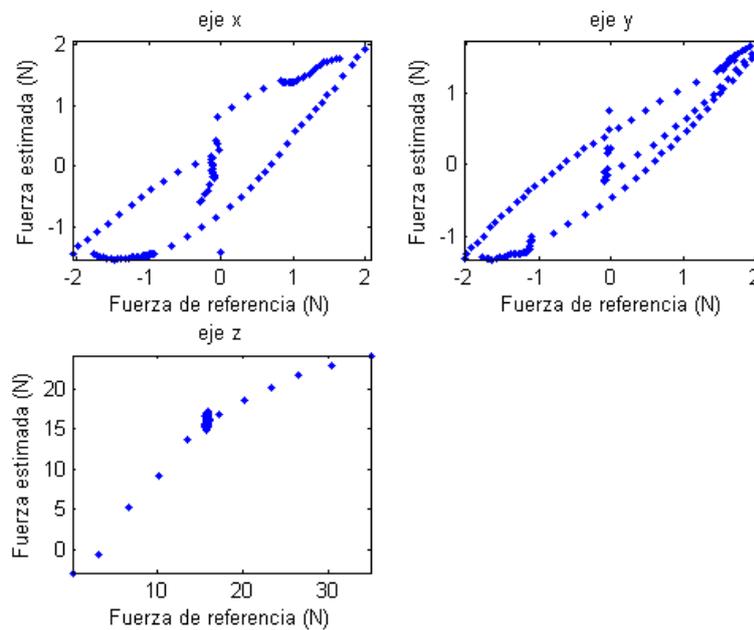


Figura 4-29. Fuerza estimada frente a la fuerza de referencia para cada eje para el caso del sensor m201v3 siguiendo el procedimiento en círculo.

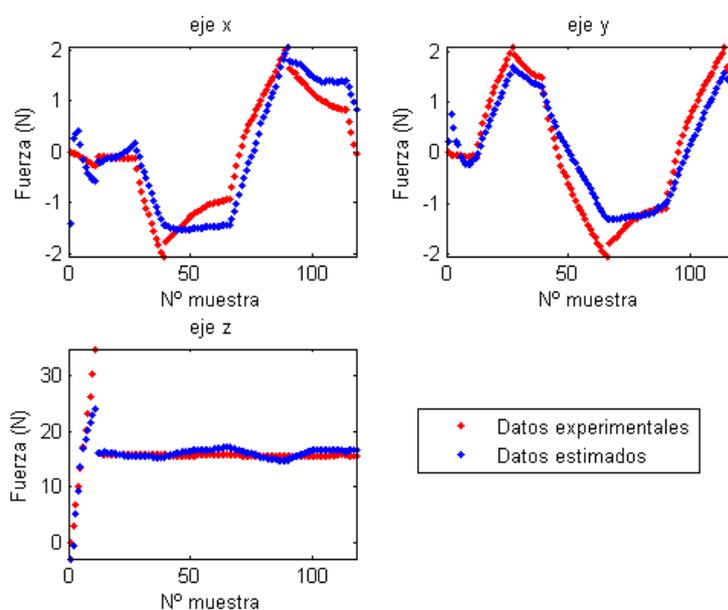


Figura 4-30. Fuerzas estimadas y de referencia para cada muestra para el caso del sensor m201v3 siguiendo el procedimiento en círculo.

Tabla 4-8. Resultados del método de regresión para el sensor m201v3 y el procedimiento en cruz.

Parámetros del modelo	Valor	Parámetros del método	Valor
Ck_1	3.3881 N/V	R^2	0.97728
Ck_2	1.6132 N/V	f	$8.5598 \cdot 10^2$
Ck_3	3.1813 N/V	P	0
Ck_4	1.7335 N/V	$bits_x$	2
K_1	-8.9579 N/V	$bits_y$	3
K_2	$1.8919 \cdot 10^1$ N/V	$bits_z$	2
K_3	$-1.2354 \cdot 10^1$ N/V		
K_4	9.1020 N/V		
C_x	$-6.6734 \cdot 10^{-1}$ N		
C_y	$2.8481 \cdot 10^{-1}$ N		
C_z	-2.1315 N		

Tabla 4-9. Resultados del método de regresión para el sensor m201v3 y el procedimiento en círculo.

Parámetros del modelo	Valor	Parámetros del método	Valor
Ck_1	1.9394 N/V	R^2	0.98448
Ck_2	1.5306 N/V	f	$2.1754 \cdot 10^3$
Ck_3	2.1070 N/V	P	0
Ck_4	1.4210 N/V	$bits_x$	2
K_1	-4.6551 N/V	$bits_y$	1
K_2	$1.0305 \cdot 10^1$ N/V	$bits_z$	3
K_3	-4.6212 N/V		
K_4	6.9953 N/V		
C_x	-1.4212 N		
C_y	$2.3530 \cdot 10^{-1}$ N		
C_z	-2.9719 N		

Acerca de estos resultados se destacan dos puntos: primero que mejora ligeramente la detección de las fuerzas tangenciales y segundo que el umbral de presión tangencial desaparece. Este último punto es debido a la geometría en forma de peine del sensor m201v3, que como se mostró en el Capítulo 2 es más sensible que el sensor m101v2 para bajas presiones y por su construcción es más improbable el desbalanceo de fuerzas entre los electrodos del táctel.

Con las pruebas realizadas siguiendo el procedimiento en cruz se obtienen mejores resultados que las realizadas con el procedimiento en círculo. El error se debe en parte al procedimiento de medida, ya que al realizar simultáneamente fuerzas en los ejes x e y se observa que se producen deslizamientos que introducen errores en los resultados.

4.5. Conclusiones

Se ha mostrado en este capítulo cómo es posible usar un sensor piezorresistivo genérico, diseñado para medir fuerzas normales a su superficie, para medir también fuerzas tangenciales. Para ello se agrupan los tácteles como mínimo en submatrices de 2×2 posicionando sobre ellos una estructura para distribuir la fuerza aplicada. Se crea de esta forma un táctel tri-axial. Si se replica este táctel a lo largo del sensor piezorresistivo se obtiene un sensor tri-axial con la mitad de resolución espacial que el original.

La estructura del táctel tri-axial se diseña para ser usada en un sensor genérico, de ahí la importancia de la uniformidad en la distribución de presiones sobre las unidades sensoriales. Los experimentos muestran que este objetivo no se alcanza, y por eso la efectividad del táctel tri-axial varía en función de las unidades sensoriales empleadas.

En los sensores m101v2 y m201v3 es donde más importancia toma la uniformidad de la distribución de presiones para obtener un mejor resultado, debido a la geometría de los tácteles de estos sensores. Ya se ha mostrado en los capítulos anteriores que si la distribución de las fuerzas soportadas por cada electrodo de un táctel no es igual, su sensibilidad disminuye. Este efecto se nota con estos sensores, en los que esta distribución varía en función de la magnitud y la dirección de la fuerza aplicada; no siempre es igual el área sometida a presión de los dos electrodos que componen el táctel.

Con respecto al umbral de fuerza tangencial observado con el sensor m101v2, el problema es el mismo que el descrito en el párrafo anterior. Se trata de un problema geométrico que

puede paliarse si se diseña un táctel de tal forma que siempre se ejerza la misma presión en sus dos electrodos. Este efecto parece disminuir en el caso de la matriz m201v3 (con forma de peine) puesto que los electrodos están más entrelazados y la posibilidad de que sólo se presione sobre uno de ellos es menor.

Por último, respecto al modelo, el número de parámetros podría reducirse si se mejoran dos aspectos de los sensores usados como unidades sensoriales: la linealidad de la salida y la dispersión. Mejorando la linealidad se mejora también la eficiencia del modelo, ya que precisamente es una de las condiciones para su aplicación.

Capítulo 5. Sensores basados en componentes discretos comerciales

5.1. Introducción

Se han mostrado en los capítulos anteriores dos posibles maneras de fabricar las matrices de electrodos para construir un sensor táctil. Así mismo, se ha ilustrado que un sensor táctil consta básicamente de una matriz de sensores de fuerza adecuadamente distribuidos, por lo que otra posibilidad para su fabricación es la de usar sensores de fuerza comerciales para construir dicha matriz. Es el caso de una piel artificial fabricada para cubrir el brazo de un robot destinado al rescate de personas [Vidal-Verdú, Barquero, et al. 2011]. Con este tipo de realización no se alcanza una gran resolución espacial; y éste es un punto interesante que muestra este trabajo, que hay aplicaciones en las que la resolución no es tan crítica, incluso en tareas de manipulación, como es el caso.

Para la realización de la piel se usaron unos sensores de fuerza comerciales soldados en una placa de circuito impreso flexible, formando una matriz de tácteles. La disposición es similar a la de los sensores propuestos en los capítulos anteriores: en filas y columnas, usando una electrónica de acondicionamiento similar a la descrita en el Anexo B para la lectura de cada táctel y la cancelación de la diafonía. Estos sensores comerciales se rigen por el principio piezorresistivo y presentan las mismas características de histéresis, deriva y dispersión descritos en las secciones anteriores [Hollinger et al. 2006]. El rango de funcionamiento de la piel es de 6 N con una sensibilidad de 0.6 V/N. La matriz diseñada es de 16x9 tácteles con una resolución espacial de 18.5 mm y es leída con una velocidad de 78 imágenes táctiles (matrices completas) por segundo. El acondicionamiento de la señal y la lectura se realiza con un microcontrolador PIC18F4680. El diseño es modular y se desarrolla la comunicación vía bus CAN, por lo que se pueden conectar varias matrices para ampliar el área a cubrir.

El uso del sensor va a ser el de cubrir el brazo del robot de rescate ALACRANE [García-Cerezo 2015]. Lo que se pretende con él es evitar colisiones violentas que puedan dañar a las personas. Cuando un humano entra en contacto con la superficie de algún objeto lo hace habitualmente con una fuerza que oscila entre 0.1 N y 2 N; este rango debe tenerse por lo tanto en cuenta como el mínimo valor para ser detectado y no causar dolor. Con respecto a la máxima fuerza, la presión media ejercida sobre la piel por el peso de un cuerpo sobre los brazos es aproximadamente de 14 KPa (0.15 Kg/cm^2) al que habría que añadir un cierto margen de seguridad [Mukai et al. 2008]. El tiempo de respuesta en el que un humano completa todo el proceso de detección del estímulo, procesamiento de la información y actúa oscila entre los 100-200 ms. Estos tiempos se usan como referencia para la captura y procesado de la información en sensores táctiles inteligentes [Iwata et al. 2002]. Con respecto a la resolución espacial, la distancia a la que la piel en el antebrazo es capaz de discriminar dos puntos simultáneos y distintos de contacto es de 38 mm [Weinstein 1968]. Todas estas especificaciones de diseño quedan cubiertas con el sensor diseñado.

A lo largo del capítulo, se va a describir el proceso seguido para la construcción del sensor de gran área haciendo uso de las unidades discretas comerciales, así como las modificaciones realizadas sobre dichas unidades discretas para su correcto funcionamiento tras su montaje. Se describirá brevemente la plataforma de caracterización utilizada para la realización de las pruebas, a raíz de las cuales se detectaron una serie de deficiencias en el diseño del sensor, que se irán describiendo por considerar que son puntos importantes y conocimientos que pueden ser de aplicación a otros trabajos similares. Finalmente, se presentarán las conclusiones obtenidas del trabajo.

5.2. Diseño del sensor

Se pueden encontrar en el mercado varios sensores de fuerza (FSR) de las marcas Lusense, Tekscan e Interlink Electronics. Tres de ellos de distintas marcas han sido comparados en algunos trabajos [Hollinger et al. 2006; Vecchi et al. 2000] y finalmente el seleccionado para la implementación del sensor de gran área es el de la marca Interlink [Interlink Electronics 2015] por ser el más robusto; hay que tener en cuenta el peso relativamente grande y el entorno hostil al que va a estar sometido el sensor, puesto que va acoplado al brazo de un robot de rescate. Además este sensor FSR tiene un buen compromiso entre deriva, histéresis y

precisión. El modelo en concreto seleccionado es el FSR 402 cuyas principales características dadas por el fabricante se resumen en la Tabla 5-1.

Tabla 5-1. Principales características del sensor FSR 402 de Interlink Electronics.

Parámetro	Valor
Tamaño	18,28 mm (diámetro)
Fuerza de actuación	0.1 N
Durabilidad	10 millones de ciclos
Rango de fuerzas	0.1-10 N
Repetitividad	0.2-0.6%
Histéresis	+10%
Temperatura de operación	-30°C a 70°C

Los sensores FSR se disponen de forma triangular sobre una PCB flexible como se ilustra en la Figura 5-1(a); posteriormente será enrollada formando un cilindro para ajustarse al brazo del robot. Un punto importante para entender el funcionamiento del sensor FSR y realizar las modificaciones pertinentes es el espaciador que el FSR posee entre los electrodos y el material piezorresistivo (ver la Figura 5-1(b)). Con él se asegura que la lectura del FSR es cero ante la ausencia de alguna fuerza, reduciendo también la histéresis. Pero tiene como inconveniente que si el objeto con el que se contacta es rígido, no se deforma ni adapta a la superficie del FSR, el área de contacto entre los electrodos de un FSR y su correspondiente material piezorresistivo es muy pequeña o incluso nula; por lo que el sensor no registra ninguna salida. Se realizaron pruebas en las que se presionaba el sensor con una lámina de metal lisa y sólo unos pocos FSR registraban alguna salida. La solución adoptada fue usar elementos que concentraran la fuerza sobre el área sensible de los FSR, se trata de unos conos de poliuretano (protectores circulares BS-01R de Durometer con una dureza A60-70 [*Bumper Specialties, Inc. 2015*]), como se observa en la Figura 5-1(c) y en la Figura 5-1 (d). Se hicieron pruebas con láminas de material continuo de diferente dureza y la conclusión fue que la respuesta variaba mucho en función del material usado. El hecho de usar los conos como elementos individuales sobre cada FSR aporta como ventaja que cualquier fuerza ejercida sobre su superficie se traslada exclusivamente sobre la superficie activa del FSR, además de poder caracterizarlos de forma individualizada.

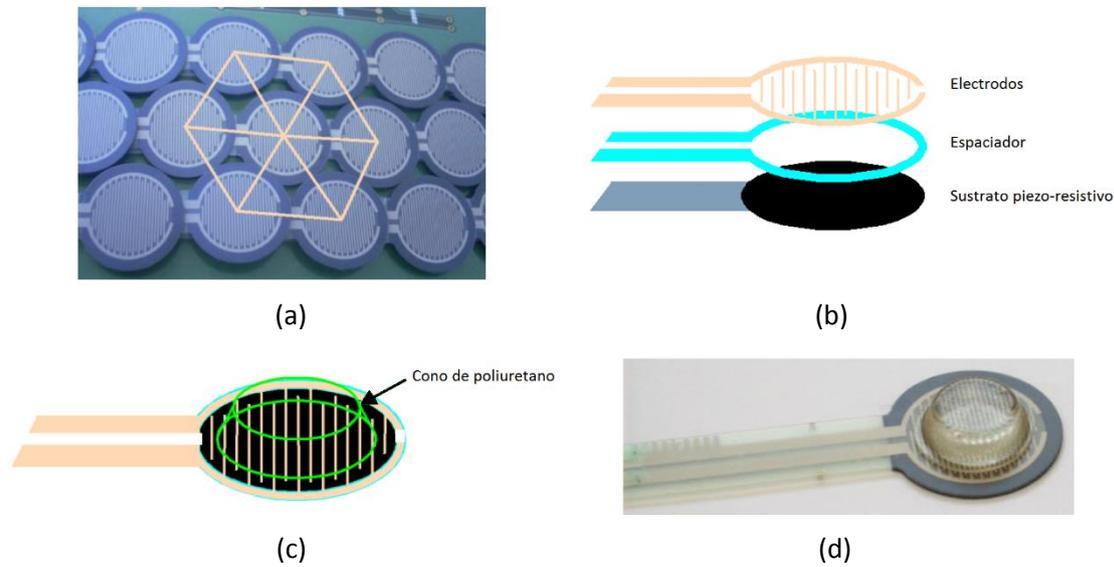


Figura 5-1. (a) Detalle de la disposición de los FRS. (b) Capas del sensor FSR de Interlink. (c) Esquema del FSR con el cono de poliuretano y (d) fotografía del sensor FSR modificado.

5.3. Plataforma de caracterización

Para comprobar el funcionamiento del sensor es necesario realizar algunas pruebas de caracterización estáticas y dinámicas. Con la realización de las pruebas estáticas se detectaron algunas deficiencias en el diseño que fueron subsanadas y se irán describiendo. La plataforma de caracterización usada fue el sistema de caracterización de fuerzas normales de la Figura 5-2, de la que se puede obtener una información más detallada en el Anexo C. La piel montada (el sensor) se va trasladando sobre la base del sistema de forma que cada FSR queda alineado con el émbolo que aplica la fuerza. Se realizan de esta forma ciclos de carga y descarga sobre varios de los sensores comerciales (tácteles del sensor). Para la realización de las pruebas dinámicas, se desmonta el motor que activa el émbolo y se monta un émbolo manual que mediante un golpe aplica la fuerza al sensor, midiendo en todo momento la salida del sensor de fuerza de referencia de la plataforma (entrada) y la salida del FRS estudiado (salida) con el osciloscopio.

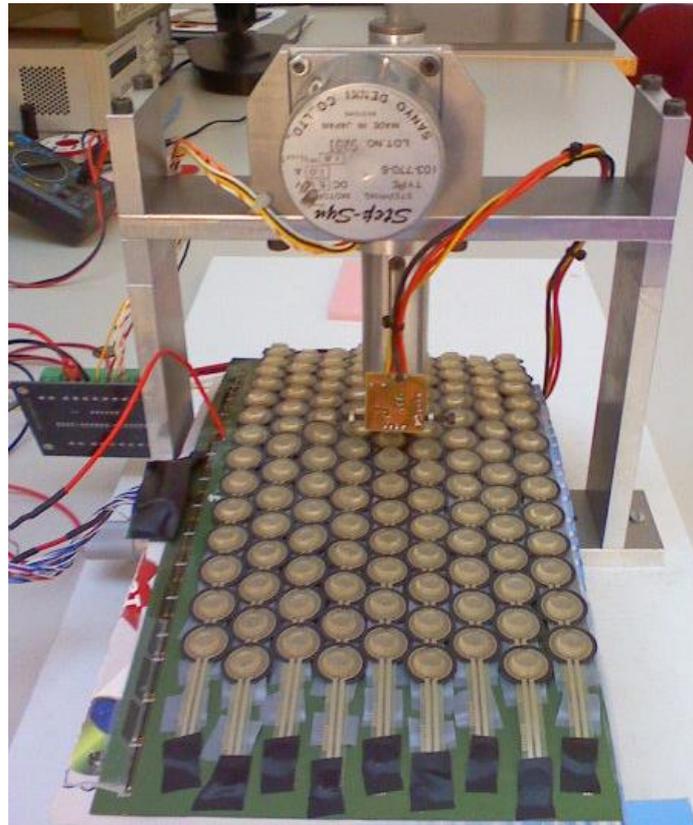


Figura 5-2. Sistema de caracterización usado en las pruebas.

5.4. Experimentos y discusión de los resultados

Para realizar la calibración del sensor de referencia de la plataforma, se sustituye la base móvil manual del sistema y el sensor de la Figura 5-2 por una balanza de precisión. En un primer experimento, para ver la influencia del cono sobre el FSR, se realiza la calibración del sensor de referencia con y sin el cono (ver Figura 5-1(c)) entre el sensor de referencia y la balanza de calibración. De esta forma se obtiene una curva que relaciona la salida en voltios del sensor de referencia con la fuerza aplicada. En la Figura 5-3 se observa que la diferencia entre ambas curvas es despreciable, por lo que se concluye que el cono no introduce ninguna perturbación significativa en términos de linealidad ni histéresis.

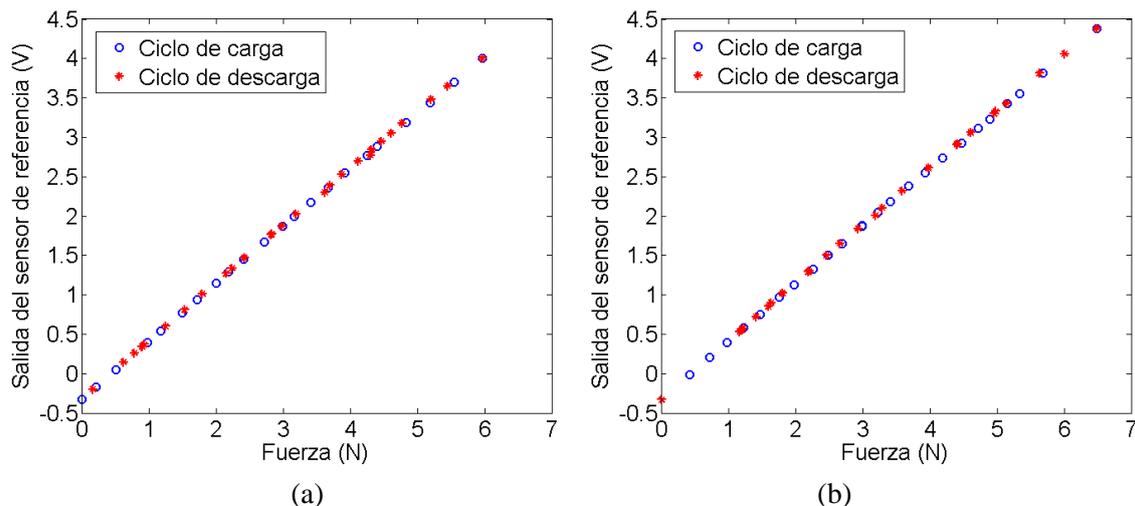


Figura 5-3. (a) Curva normal de calibración del sensor de referencia. (b) Curva de calibración con el cono de poliuretano entre el sensor de referencia y la balanza de calibración.

Otra prueba realizada consistió en realizar una caracterización estática de una unidad FSR con el cono, ver la Figura 5-4(a) y la Figura 5-4(b). Se registraron diez ciclos de carga y descarga aplicando la fuerza sobre el cono. El mismo experimento se realizó sustituyendo el cono por una pieza de metal e interponiendo entre ella y la unidad FSR una tela, los resultados se muestran en la Figura 5-4(c) y la Figura 5-4(d). Las curvas son de nuevo muy similares. La ganancia es ligeramente mayor en el caso de usar la pieza metálica, pero hay que hacer notar que el diámetro de dicha pieza (11.5 mm) es ligeramente superior al diámetro de la base del cono (10.2 mm), por lo que hay más área activa de contacto con la pieza de metal. El área activa del sensor FSR es de 12.7 mm, por lo que un cono con este diámetro en su base mejoraría el resultado. Nuevamente se ilustra que el cono no altera ni introduce errores apreciables en la salida del sensor FSR.

Se realizaron dos pruebas más para observar la respuesta dinámica del sensor FSR modificado con el cono. Se aplicó con la misma plataforma un pulso de fuerza sobre el FSR modificado. En la Figura 5-5 se muestran los resultados de la prueba, en el canal 1 se muestra la señal del sensor de referencia que genera el pulso y en el canal 2 la salida del sensor FSR modificado. El tiempo de subida es del orden de las centenas de microsegundos, por lo que está dentro de las especificaciones.

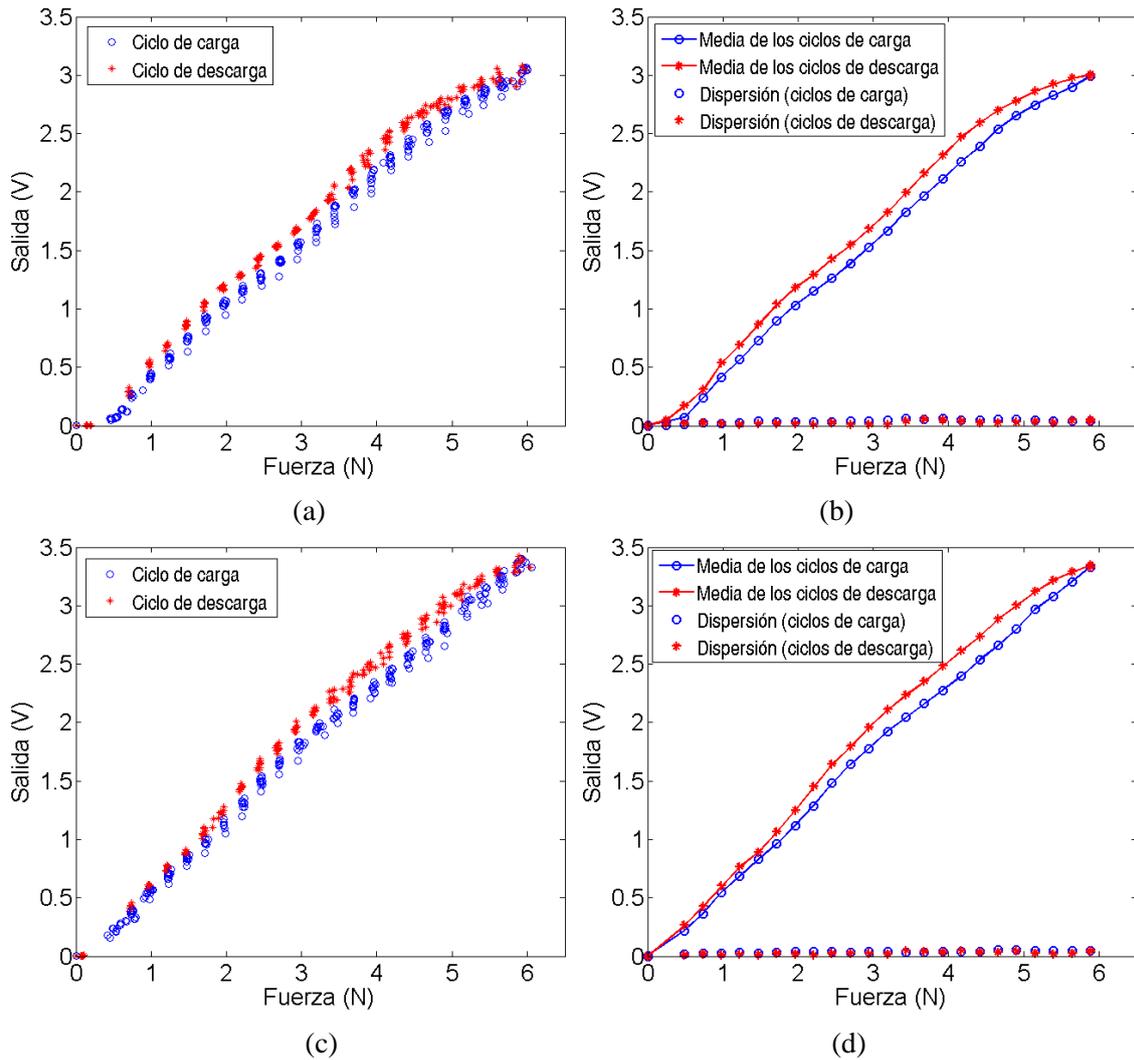


Figura 5-4. (a) Respuesta estática del sensor para diez ciclos de carga y descarga y (b) media de los ciclos con su dispersión para el caso de una unidad FSR con el cono de poliuretano. (c) Respuesta estática del sensor para diez ciclos de carga y descarga y (d) media de los ciclos con su dispersión para el caso de unidad FSR presionada mediante una pieza de metal.

Con respecto a la deriva, se siguió un procedimiento similar al usado con anterioridad, consistente no sólo en medir la deriva ante una fuerza sin haber estado el sensor cargado previamente, sino también cuando ha estado cargado previamente con fuerzas de diferentes valores. El resultado es análogo a los obtenidos con los sensores caracterizados en los capítulos anteriores. El sensor presenta menor deriva si ha estado cargado previamente. En la Figura 5-6 se observa el resultado de este experimento. Se observa una deriva máxima del 10.7% en el

peor de los casos para un tiempo de 1974 segundos, y se da cuando el sensor no ha sido previamente cargado.

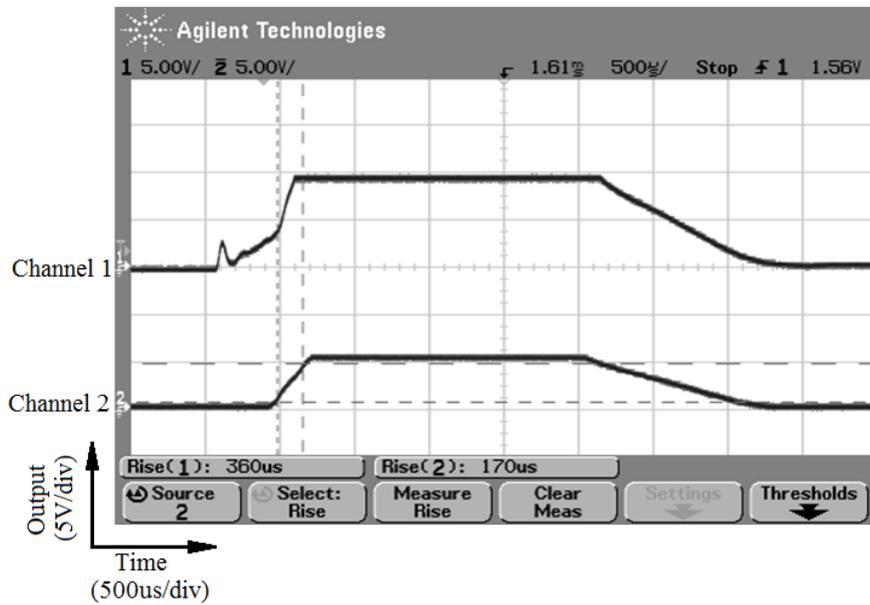


Figura 5-5. Respuesta del táctel FSR modificado frente a un pulso. El canal 1 representa la señal del sensor de referencia, mientras que el canal 2 representa la salida del táctel FSR.

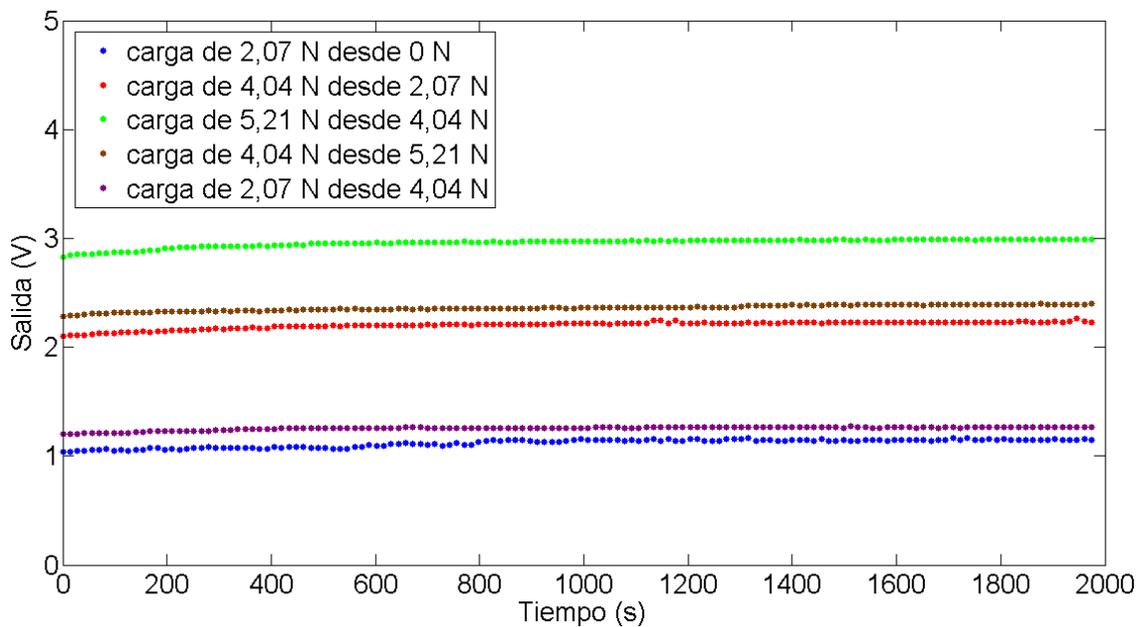


Figura 5-6. Medida de la deriva del sensor FSR modificado.

Hasta aquí se ha realizado la caracterización de las unidades FSR modificadas por separado, fuera del entorno real de operación, y todo apunta a que se cumplen con las especificaciones marcadas. Ahora hay que ensamblar las unidades FSR en la PCB flexible. Las unidades FSR tienen unas patas de longitud más de tres veces el diámetro del área activa, en cuyo final se encuentran los conectores. Para optimizar el área hay que superponerlos de forma que el área activa de una unidad FSR se apoya sobre las patas de la unidad situada a su derecha, ver Figura 5-7.

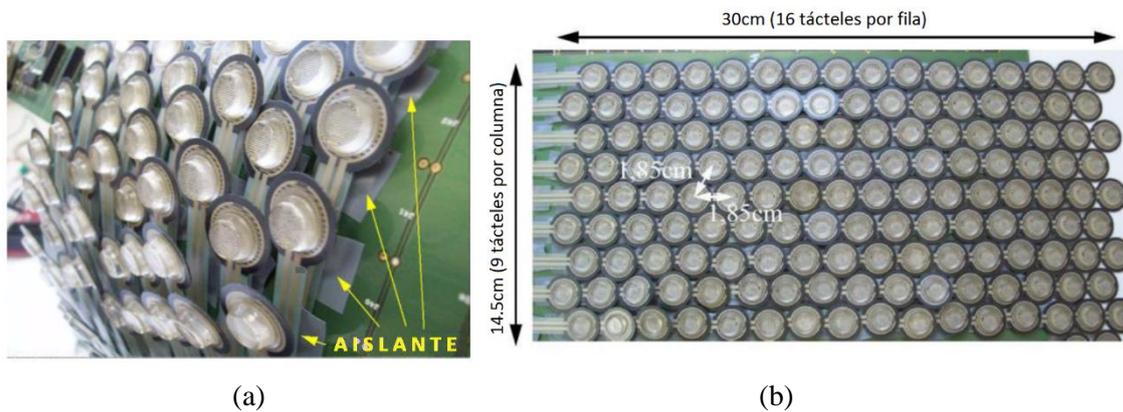


Figura 5-7. (a) Detalle del posicionamiento de las unidades FSR y (b) fotografía de la matriz completa.

Una vez puesto el sistema completo en funcionamiento y aplicando la fuerza con diferentes objetos, se observaron dos fenómenos importantes. El primero fue que aparecieron interferencias a pesar de que la electrónica de lectura está diseñada para cancelar la diafonía, interferencias entre tácteles. Tras investigar la causa se observó que el causante era el punto de soldadura de una unidad FSR sobre las patas de la siguiente. Para solucionarlo, aunque los sensores debieran estar aislados, se taparon todas las soldaduras con cinta adhesiva aislante como se muestra en la Figura 5-7(a). En la Figura 5-8 se muestra el efecto de la interferencia antes y después de aislar los puntos de soldadura cuando se presiona un objeto circular sobre el sensor.

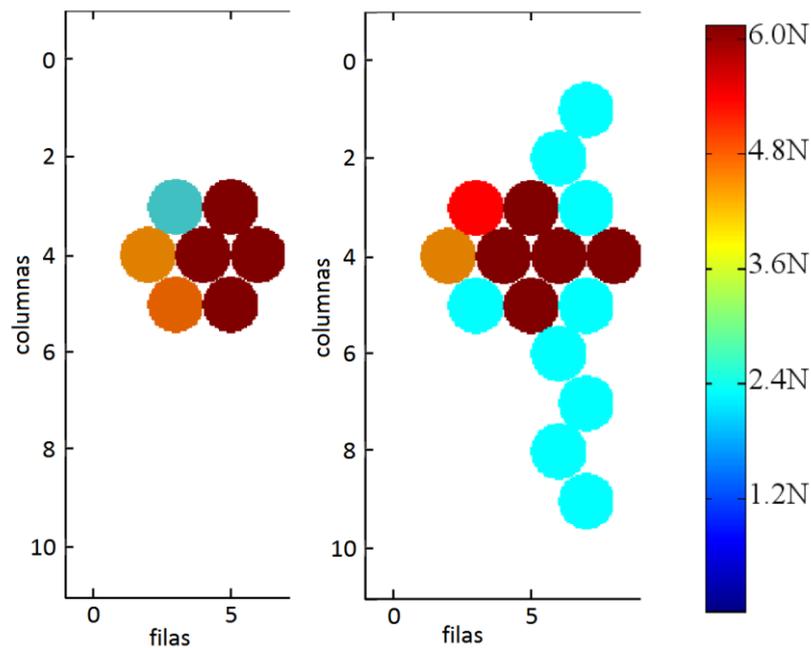


Figura 5-8. Imagen táctil de un objeto circular sobre el sensor **(a)** con los puntos de soldadura aislados y **(b)** sin los puntos de soldadura aislados.

El segundo fenómeno fue la disminución de la sensibilidad del sensor. El sensor montado según la Figura 5-7 y caracterizado (una unidad FSR) en el sistema de caracterización de fuerzas normales dio como resultado la salida mostrada en la Figura 5-9(a). La respuesta de la unidad FSR en este caso se ha distorsionado, es no lineal, con quiebros, y la histéresis se ha invertido. Este efecto se debe a que las unidades, al apoyarse sobre las patas del resto de unidades, no están mecánicamente estables. Para reducir este efecto se dispuso una pieza circular de plástico rígido debajo de cada unidad FSR, como se observa en la Figura 5-9(c). De esta forma se obtuvo una curva de salida lineal y con buena sensibilidad, como se observa en la Figura 5-9(b), similar a la obtenida cuando se caracterizaron las unidades FSR por separado (Figura 5-4(a)).

Finalmente se realizó una caracterización de varios tácteles para hacer una estimación de la dispersión del sensor. Se realizaron ciclos de carga sobre 16 tácteles y los resultados son los mostrados en la Tabla 5-2. La dispersión es tolerable para el caso práctico de uso del sensor, aunque aprovechando las capacidades del microcontrolador podría realizarse algún proceso de equilibrado.

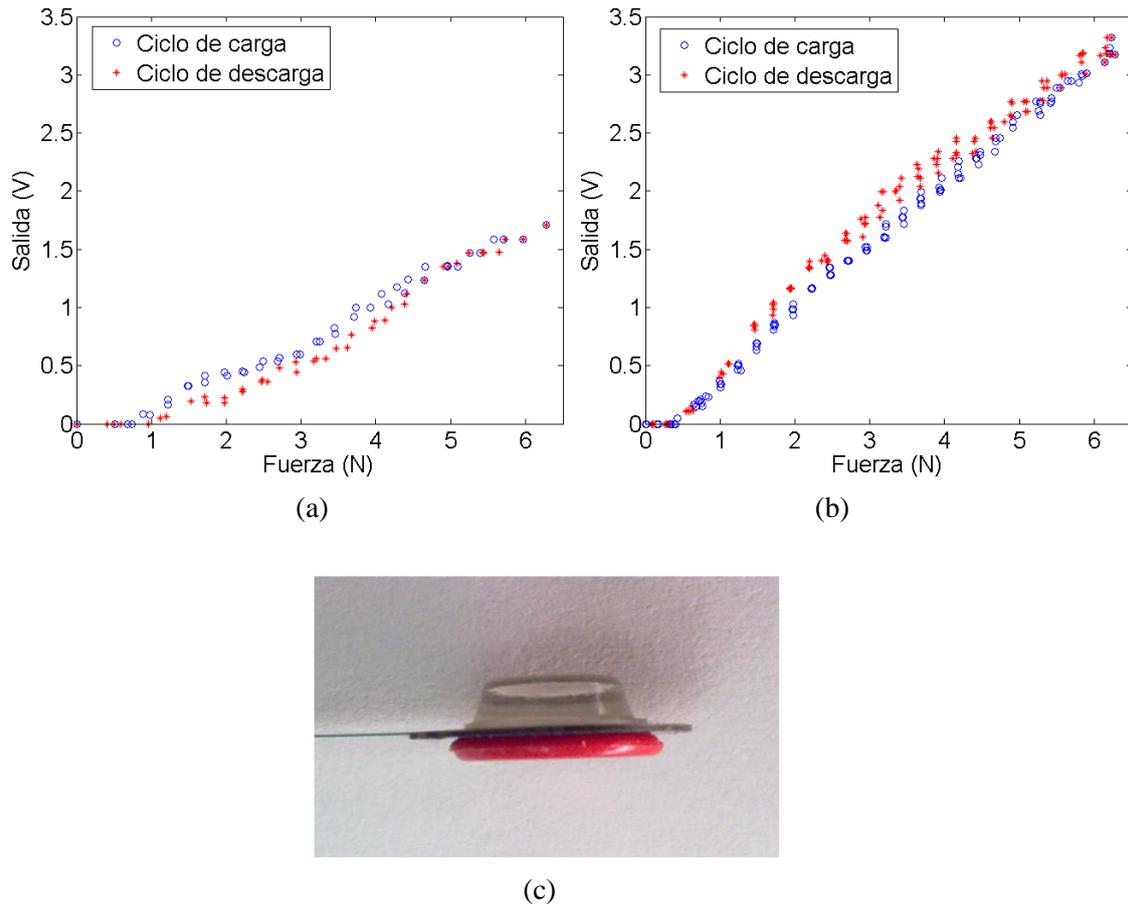


Figura 5-9. (a) Salida del táctel sin la base rígida y (b) con la base rígida. (c) Fotografía del táctel FSR modificado con el cono de poliuretano y la base plástica rígida.

Tabla 5-2. Dispersión del sensor de gran area.

Coordenadas del táctel	Ganancia (V/N)
(5,1)	0.57
(5,3)	0.63
(5,7)	0.65
(5,9)	0.59
(6,9)	0.62
(6,8)	0.68
(6,3)	0.55
(6,2)	0.65
(5,2)	0.55
(5,4)	0.65
(5,6)	0.69
(5,8)	0.61
(5,10)	0.55
(5,11)	0.57
(6,11)	0.57
(6,1)	0.47
Media	0.60
Desviación estándar	0.06

El sensor fue montado en el brazo del robot de rescate ALACRANE (ver Figura 5-10), con el que se realizaron pruebas para comprobar la viabilidad y buen funcionamiento del sensor, siendo el resultado positivo [Vidal-Verdú, Barquero, et al. 2011].

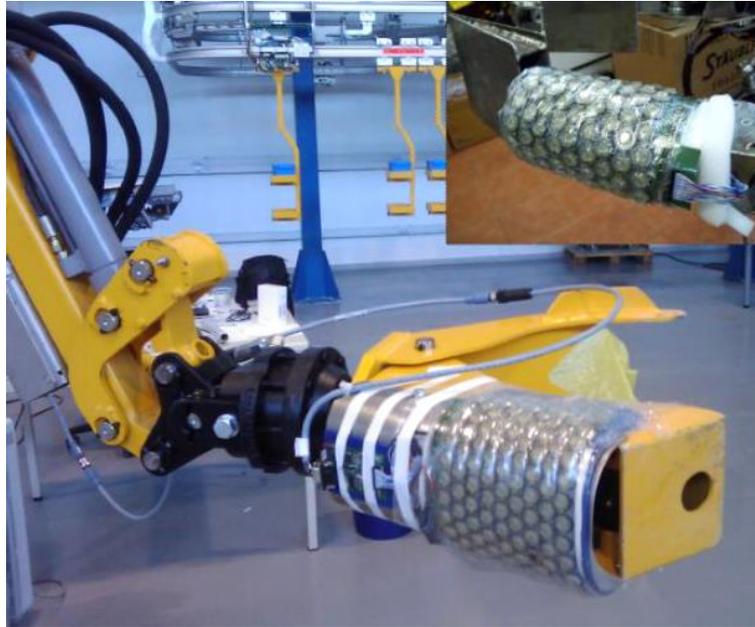


Figura 5-10. Sensor montado en el brazo del robot ALACRANE [Vidal-Verdú, Barquero, et al. 2011].

5.5. Conclusiones

El sensor aquí caracterizado se usó para cubrir el brazo de un robot de rescate sobre el que se realizaron pruebas satisfactorias. Se asocia muchas veces el concepto de sensor táctil a un dispositivo para cubrir una mano robótica que necesita mucha resolución; pero vemos que no siempre es así y que los sensores con menor resolución también tienen su campo de aplicación. En este sentido es donde hay que explotar los sensores descritos en este trabajo.

Con respecto al trabajo en concreto del sensor de gran área, se llega a tres conclusiones importantes:

- Los sensores deben tener alguna capa que lo cubra por arriba que cumple dos funciones: la primera es la de proteger al sensor frente al contacto con cuerpos rígidos que puedan dañarlo, y la segunda la de concentrar de forma apropiada las fuerzas que se ejercen sobre las unidades sensoriales (táctiles) del sensor.

- El apoyo del sensor debe ser estable. En este sentido, aunque el sensor sea flexible y se adapte a una superficie curva, cada unidad sensorial debe tener un apoyo plano, rígido y estable.
- Es importante que la calibración y/o equilibrado de los sensores se haga si es posible con el sensor montado en el dispositivo en el que se vaya a usar; y si no es posible, hay que intentar reproducir de la forma más exacta posible la situación de uso mientras se realiza el proceso.

Conclusiones

Esta Tesis realiza las siguientes aportaciones:

- Se proponen, analizan y caracterizan diferentes sensores táctiles basados en polímeros conductores electro-activos, y orientados a aplicaciones de gran área con tecnologías de bajo coste. Los sensores básicamente se construyen con una lámina con el polímero sobre una matriz de electrodos flexibles.
- Para la fabricación de las matrices de electrodos se consideran dos tipos de tecnologías: una basada en PCB flexible, y otra en técnicas de *screen-printing*. En cada una de ellas se han propuesto y fabricado sensores con tácteles de diferente geometría, se ha caracterizado su respuesta (curva de calibración, sensibilidad, histéresis y deriva) y se han analizado diferentes aspectos que la determinan.

En concreto, para los sensores basados en PCB flexible:

- Se ha analizado la influencia en su respuesta de factores como: la conductividad de la lámina y la geometría de los electrodos (tamaño absoluto y tamaño relativo de un electrodo con respecto al otro, y forma de los mismos). Las principales conclusiones son las siguientes:
 - Para una resolución espacial dada, para maximizar la sensibilidad del táctel es necesario igualar el área de cada uno de los electrodos.
 - El aumento de la resolución del sensor conlleva la disminución del área de cada táctel, lo que supone disminuir su sensibilidad. Para contrarrestar este efecto se puede aumentar la conductividad de la lámina conductora.
 - Todos los sensores presentan histéresis y deriva con el tiempo. La histéresis es más pequeña en las matrices con tácteles de geometría circular que en las matrices con electrodos en forma de peine.

- Todos los sensores presentan dispersión en la respuesta de los tácteles individuales por lo que un procedimiento de equilibrado se hace necesario para su uso. La dispersión es más pequeña en las matrices con tácteles de geometría circular que en las matrices con electrodos en forma de peine. La dispersión aumenta al aumentar la resolución espacial del sensor.
- Se analiza experimentalmente el origen de la dispersión entre tácteles. Se encuentra que en este fenómeno intervienen tanto las diferencias entre los electrodos a lo largo de la superficie de la PCB, como la distribución no homogénea del polímero conductor sobre la lámina. Ambos factores dependen del proceso de fabricación, y se concluye que el segundo es el que más influye en nuestra tecnología.

Para los sensores basados en *screen-printing*:

- Se ha propuesto una matriz a partir de un táctel de estructura simple multicapa. Este sensor presenta una respuesta semejante a la obtenida con el sensor basado en PCB en cuanto a la forma de su curva de calibración, pero con una menor histéresis y un claro umbral de presión. Esta propuesta ilustra la viabilidad y limitaciones de la tecnología.
- Se proponen y se fabrican una serie de matrices de sensores a partir de un táctel de estructura multicapa más compleja que elimina el umbral. Para este último caso se propone el control de la sensibilidad y el rango del sensor con la constante elástica de la capa de aislante entre los electrodos y la capa cobertor. Las principales conclusiones obtenidas experimentalmente son:
 - Sólo en el caso de aislantes blandos, y promediando las curvas de todos los tácteles de la matriz, los datos experimentales están de acuerdo con el orden de sensibilidad predicho por un modelo simple según los valores de las constantes elásticas de las capas de cobertor.
 - La dispersión es grande, la respuesta de tácteles diferentes difiere cuantitativamente, tienen diferente sensibilidad, y cualitativamente, tienen diferente forma.
 - La dispersión es menor para aislantes y cobertores blandos, aunque la curva es no lineal, con un codo destacado, siendo más lineal para fuerzas crecientes.

Para explicar este comportamiento se recurre a un modelo de *Winkler* en el que cada capa se descompone en una serie de barras elásticas o muelles. Esta estrategia permite un modelado de la rugosidad de la superficie de contacto entre el polímero y la matriz de electrodos, lo que incluye la diferencia de altura de los electrodos de un mismo táctel. También se recurre a simulaciones de elementos finitos con *COMSOL Multiphysics*[®] que reflejan los efectos de borde en el perímetro de los electrodos. Estos modelos confirman los resultados obtenidos por otros autores relativos a la dependencia de la conductividad con la presión en la interfaz de contacto entre dos conductores, y en concreto en la gran dispersión que aparece entre distintas muestras si la longitud de onda de la rugosidad de la superficie de contacto tiene un tamaño del orden de la del electrodo. En conclusión:

- La rugosidad está detrás de la dispersión en el valor de la sensibilidad y en la forma de la salida de distintos tácteles, y tiene una influencia mayor que la de la constante elástica de los materiales, especialmente si éstos son duros.
 - Además, la diferencia de alturas entre electrodos y el efecto de borde aumentan la no linealidad.
 - En resumen, para mejorar el rendimiento se debe aumentar el tamaño de los tácteles o se debe recurrir a otra tecnología. También se deben reducir los bordes e igualar las alturas, usando idealmente un solo electrodo activo. El uso de cobertores blandos también acerca la respuesta a la ideal.
- Se proponen y fabrican dos estructuras que permiten extraer información tanto de la componente normal, como de las componentes tangenciales de la fuerza aplicada. La propuesta consiste en agrupar los tácteles del sensor piezorresistivo que sirve de base en grupos de cuatro, que son excitados simultáneamente, y superponer una estructura que distribuye la fuerza sobre ellos. De esta forma las componentes tangenciales de la fuerza pueden obtenerse del desequilibrio de fuerzas que dicha estructura genera sobre los tácteles base. Cada una de las propuestas se analiza en base a una herramienta de análisis de elementos finitos, y se muestran resultados experimentales que ilustran su viabilidad.

- Se proponen, implementan y evalúan diversas estrategias de diseño que mejoran la respuesta de sensores FSR comerciales en aplicaciones robóticas de sensores táctiles de gran área.

Como producto adicional de este trabajo de Tesis:

- Se ha creado una infraestructura de caracterización de sensores táctiles muy útil para futuros trabajos en esta área: se han diseñado dos plataformas de caracterización para la automatización de la evaluación de sensores. También se ha modificado una plataforma comercial para automatizarla y así aumentar la eficiencia de los procesos de caracterización.
- Se ha obtenido información valiosa acerca de cómo abordar el diseño y cómo utilizar no sólo la clase de sensores táctiles aquí propuestos, sino muchos de aquellos desarrollados con tecnologías afines que emplean principios piezorresistivos.

Anexo A. Publicaciones en revistas y congresos

A continuación se detallan aquellas publicaciones, tanto en revistas como en actas de congresos, que se han realizado como consecuencia del trabajo desarrollado en la presente Tesis.

A.1. Publicaciones en revistas internacionales indexadas en el JCR

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. **Revista indexada en el JCR Instruments & Instrumentations. Primer cuartil.**

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. **Revista indexada en el JCR Instruments & Instrumentations. Primer cuartil.**

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. **Revista indexada en el JCR Engineering, Electrical & Electronics. Segundo cuartil.**

A.2. Publicaciones en actas de congresos internacionales

Castellanos-Ramos, J., Navas-González, R. y Vidal-Verdú, F. 2013. **Tri-axial tactile sensing element**. Proc. SPIE 8765, Bio-MEMS and Medical Microdevices. Grenoble, France, pp. 87650P-87650P-10. <http://dx.doi.org/10.1117/12.2016981>.

Castellanos-Ramos, J., Navas-González, R., Ochoteco, E. y Vidal-Verdú, F. 2011. **Finite element analysis of tactile sensors made with screen printing technology**. Proc. SPIE 8068, Bioelectronics, Biomedical, and Bioinspired Systems V; and Nanotechnology V . Prague, Czech Republic, pp. 806804-1-806804-10. <http://dx.doi.org/10.1117/12.890092>.

Castellanos-Ramos, J., Navas-Gonzalez, R., Macicior, H., Ochoteco, E. y Vidal-Verdú, F. 2009. **Tactile sensors based on conductive polymers**. Proc. SPIE 7362, Smart Sensors, Actuators, and MEMS IV, 73620G. Dresden, Germany, pp. 73620G-73620G-9. <http://dx.doi.org/10.1117/12.821627>.

Castellanos-Ramos, J., Navas-González, R., Pomposo, J.A., Ochoteco, E. y Vidal-Verdú, F. 2008. **Evaluation of a Tactile Sensor Based on Conductive Polymers**. XXIII Conference on Design of Circuits and Integrated Systems. Grenoble, France, ISBN 978-2-84813-124-5.

Castellanos, J., Navas-Gonzalez, R., Ochoteco, E. y Vidal-Verdu, F. 2008. **Evaluation of a low cost piezorresistive material for high resolution tactile sensors**. 2008 2nd European Conference Exhibition on Integration Issues of Miniaturized Systems - MOMS, MOEMS, ICS and Electronic Components (SSI). Barcelona, Spain, pp. 1-3. ISBN 978-3-8007-3081-0.

Anexo B. Electrónica de acondicionamiento

Los sensores propuestos están formados por tácteles dispuestos de forma matricial. El principio de funcionamiento es piezorresistivo y como ya se ha mostrado el esquema eléctrico de un táctel es el de una resistencia variable, cuyo valor depende de la fuerza que se ejerza sobre él. Se necesita por lo tanto medir de forma directa o indirecta esta resistencia de cada táctel. Si por cada uno de ellos se utilizase dos cables, para una matriz de $N \cdot M$ se necesitaría $2 \cdot N \cdot M$ cables; esto es más costoso a medida que el tamaño de la matriz aumenta. Para reducir el número de cables necesario, se disponen los tácteles unidos por filas y columnas. Los electrodos internos de los tácteles de una misma fila están unidos, al igual que los electrodos externos de los tácteles de una misma columna. De esta forma el número de cables que se necesita para realizar la lectura de un sensor se reduce a $N+M$.

El problema que surge al realizar las conexiones de esta forma es la aparición de resistencias parásitas si se pretende realizar la lectura directamente entre una fila y una columna. Esto se debe a que sobre los electrodos se posa una lámina continua piezorresistiva. El fenómeno provocado por estas resistencias parásitas se denomina diafonía, y se trata de interferencias o ruido sobre la señal de un táctel provocadas por los demás. Hay realizados estudios al respecto evaluando diversos métodos para la lectura y sus errores [D'Alessio 1999; Liu et al. 2010]. La solución adoptada en este trabajo es la mostrada en la Figura B-1. Las lecturas se realizan de forma simultánea para todos los tácteles de una fila activando dicha fila y desactivando el resto; de esta forma y junto con los amplificadores, que están forzando una tierra virtual, se consigue que las posibles resistencias parásitas tengan el mismo voltaje en ambos terminales estando virtualmente cortocircuitadas, eliminándose así su efecto. El proceso de lectura de una imagen táctil, en el caso de los sensores propuestos en este trabajo, es realizar un ciclo de activación, una por una, de las 16 filas y en cada ciclo realizar la lectura simultánea de la salida de los 16 operacionales. Es fundamental que sólo una fila esté activada en el momento de

realizar la lectura de las columnas. La resistencia de cada táctel se obtiene de forma indirecta a través de la tensión de salida de los amplificadores operacionales en configuración inversora de la siguiente manera:

$$V_{Oj} = -\frac{R_j}{R_{Sij}} \cdot V_{BIASi} \quad (\text{B.1})$$

donde V_{BIASi} es la tensión de activación de la fila i (igual a 2.5V en nuestro sistema para activar la fila y 0 V para desactivarla), R_j es la resistencia de realimentación del amplificador de la columna j y R_{Sij} es la resistencia equivalente del táctel ubicado en la fila i y la columna j .

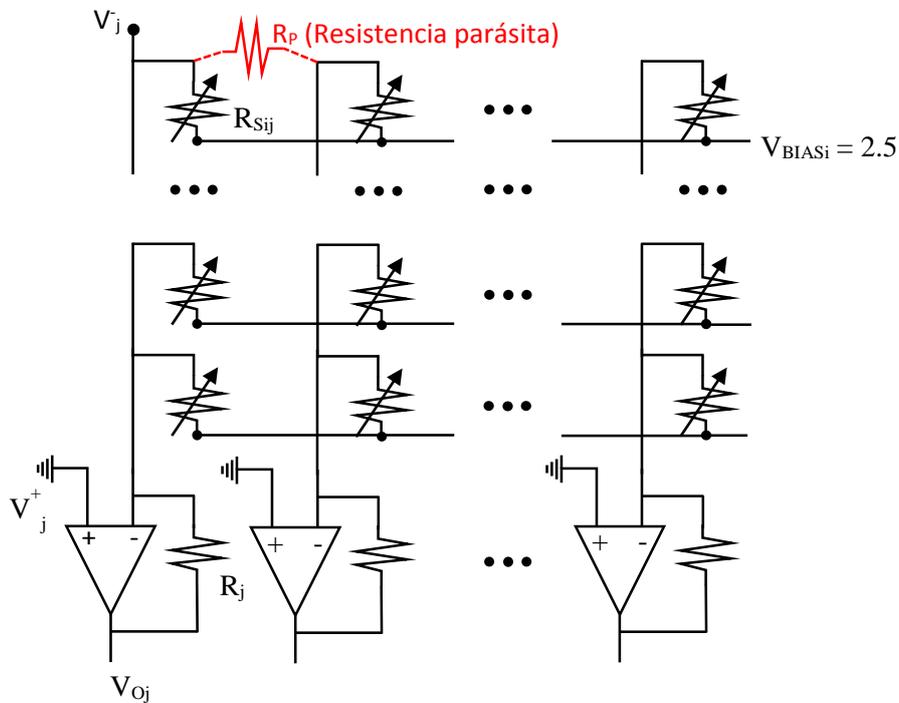


Figura B-1. Esquema eléctrico del sensor y circuito de lectura.

Cuando se activa una fila k , aplicando la ley de Ohm a las mallas del circuito obtenemos lo siguiente:

$$I(j, j) = \frac{(V_{BIASi} - V_j^-)}{R_{Sij}} \quad (\text{B.2})$$

$$V_j^- = V_j^+ = 0 \text{ V} \quad (\text{B.3})$$

$$V_{BIAS_i}(i = k) = 2.5 \text{ V} \quad (\text{B.4})$$

$$V_{BIAS_i}(i \neq k) = 0 \text{ V} \quad (\text{B.5})$$

Sustituyendo en la ecuación (B.2), para el caso en el que se activa la fila k tenemos:

$$I(i = k, j) = \frac{V_{BIAS_i}(i = k)}{R_{Sij}} \quad (\text{B.6})$$

$$I(i \neq k, j) = \frac{V_{BIAS_i}(i \neq k)}{R_{Sij}} = 0 \text{ V} \quad (\text{B.7})$$

Se concluye que el resto de resistencias que no van a medirse (aquellas que no están situadas en la fila k) quedan virtualmente cortocircuitadas, como se ha comentado anteriormente, eliminándose la aparición de resistencias parásitas.

Esta electrónica de acondicionamiento está integrada en dos placas de circuito impreso que se describen en los siguientes anexos, dependiendo de la plataforma de caracterización usada.

Anexo C. Plataforma de caracterización de fuerzas normales

A continuación se describe y explica el sistema utilizado para la realización de las pruebas estáticas sobre un táctel. Este sistema de caracterización se usó en las pruebas preliminares para ver el comportamiento de las primeras versiones de los sensores fabricados con la tecnología de PCB y para la caracterización del sensor de gran área basado en componentes discretos comerciales. Se necesita algún sistema que ejerza una fuerza normal conocida sobre el táctel. El sensor, conectado a la correspondiente placa de acondicionamiento para la lectura, proporciona una tensión para cada fuerza aplicada. Se obtienen así las curvas que representan la tensión de salida frente a la fuerza aplicada que caracteriza el comportamiento del táctel de un sensor.

El sistema utilizado para ejercer la fuerza consta de un muelle en el interior de un cilindro controlado por un motor paso a paso. El motor se controla a su vez mediante una placa controladora conectada al PC mediante el puerto serie. En la punta del cilindro hay colocado un sensor de fuerza de referencia para monitorizar la fuerza aplicada por el muelle sobre el táctel. Dicho sensor está conectado a un multímetro, que a su vez está también conectado al PC mediante el puerto serie. El PC, mediante una aplicación de control desarrollada en MATLAB®, controla al motor paso a paso para que ejerza más o menos fuerza, que es medida por el sensor de fuerza y transmitida al PC a través del multímetro. Con este bucle podemos aplicar una fuerza conocida. El sensor táctil está conectado, mediante una placa de acondicionamiento, a una tarjeta de adquisición de datos insertada en el PC. De esta forma se cierra el bucle, el sistema es capaz de aplicar una fuerza conocida y obtener la salida de los tácteles del sensor.

C.1. Descripción de los componentes de la plataforma

En la Figura C-1 se ilustra un diagrama de bloques funcional del sistema, y en la Figura C-2 se muestra una fotografía en la que se indican los principales componentes del sistema.

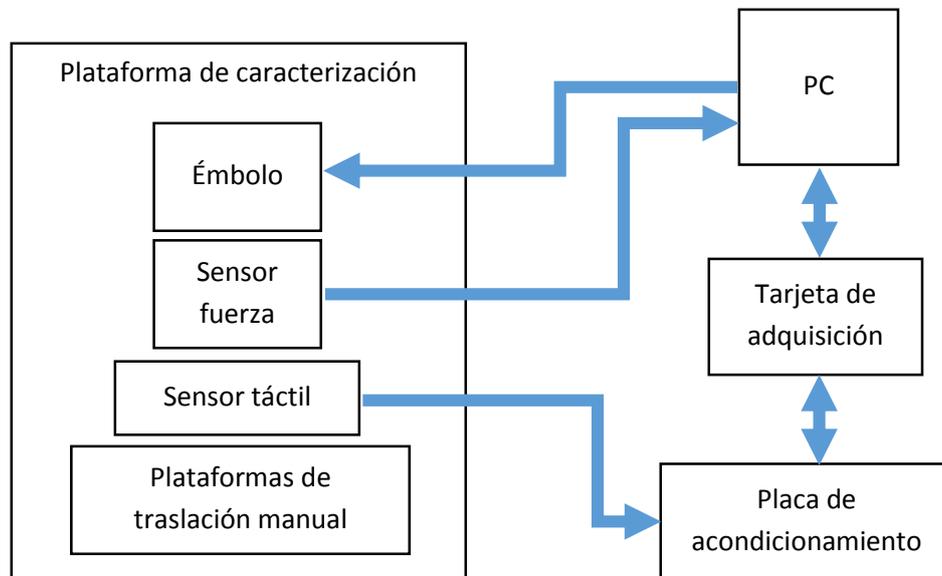


Figura C-1. Diagrama de bloques de la plataforma de caracterización de fuerzas normales.

Los principales componentes que forman la plataforma de caracterización son los siguientes:

- Sensor de fuerzas normales de referencia.
- Motor.
- Placa de acondicionamiento.
- Tarjeta de adquisición de señales.

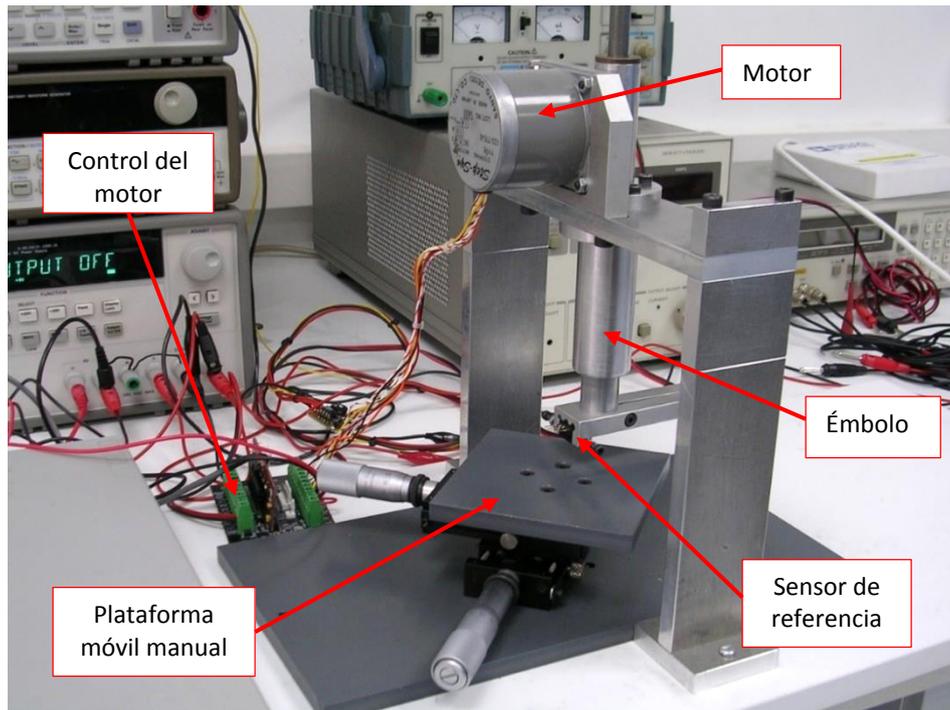


Figura C-2. Plataforma de caracterización de fuerzas normales.

C.1.1. Sensor de fuerza

El sensor de fuerza de referencia usado es de la marca Honeywell, modelo FSG15N1A [Honeywell 2015]. Se trata de un sensor de precisión que mide sólo fuerzas normales a su superficie. En la Tabla C-1 se describe sus principales características.

Tabla C-1. Principales características del sensor de referencia FSG15N1A.

Parámetro	Valor
Rango de fuerza	1500 g
Sensibilidad	0.24 mV/g
Excitación	10V
Temperatura de operación	-40°C - 85°C

El sensor de referencia FSG15N1A es un sensor piezorresistivo cuya señal de salida (V_0) es una tensión proporcional a la fuerza aplicada. En la Figura C-3 se muestra el esquema eléctrico y una fotografía del sensor.

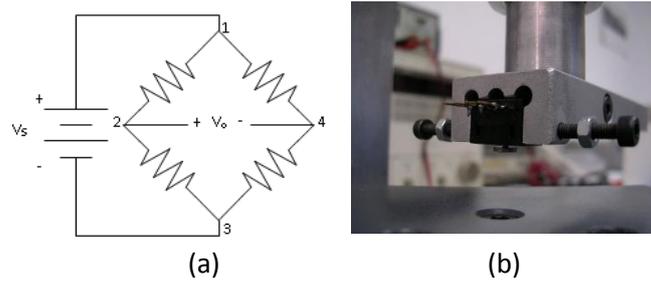


Figura C-3. (a) Esquema eléctrico y (b) fotografía del sensor de referencia FSG15N1A.

Para realizar la lectura del sensor hay que utilizar un circuito de amplificación con un amplificador de instrumentación (el usado en este caso es el INA121). En la Figura C-4 se ilustra el esquema del circuito de amplificación con la ecuación para el cálculo de la señal de salida.

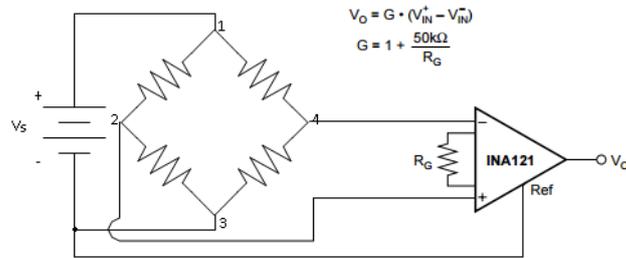


Figura C-4. Esquema del circuito de amplificación.

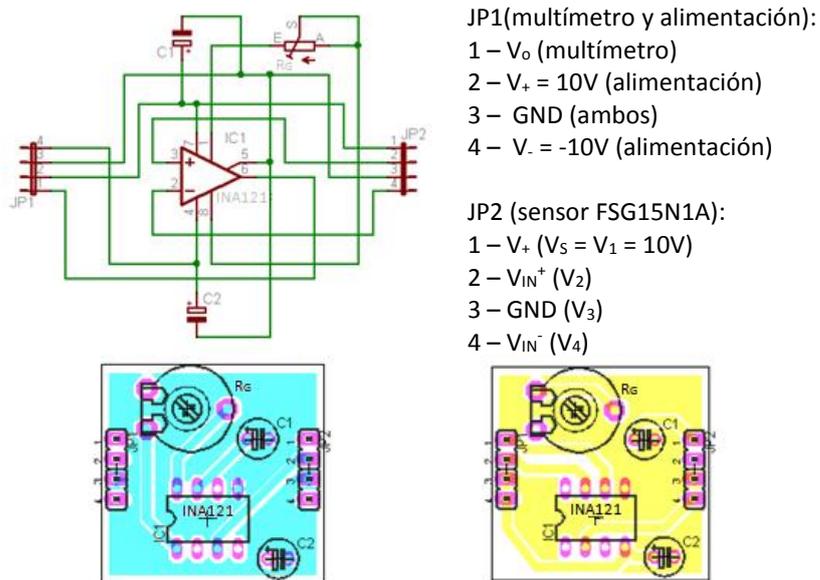


Figura C-5. Esquemático y huella de la placa de circuito impreso de la etapa de amplificación para el sensor de referencia FSG15N1A.

La salida amplificada del sensor de referencia V_0 se conecta a un multímetro de precisión de la marca Agilent, modelo 34401A [Keysight Technologies 2015]. Este multímetro a su vez se conecta a un PC mediante el puerto serie. De esta manera, mediante un sistema de comandos, el PC puede realizar la lectura de la fuerza aplicada.

Para la calibración del sensor y calcular la curva característica que relaciona la fuerza aplicada con la tensión de salida del sensor V_0 se usa una balanza de precisión de la marca Kern, modelo 440-47N [KERN & SOHN GmbH 2015]. Para el proceso de calibración se retira la plataforma de traslación manual y se coloca en su lugar la balanza. Se realiza un ciclo de carga y descarga y se obtiene una curva de calibración como la mostrada en la Figura C-6.

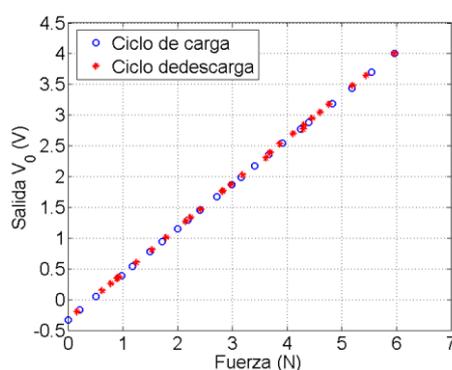


Figura C-6. Curva de calibración para el sensor de referencia FSG15N1A.

C.1.2. Motor paso a paso

La plataforma dispone de un motor paso a paso de la marca Sanyo Denki, modelo 103-770-61 [Sanyo Denki 2015], que es el encargado desplazar el muelle en el interior del émbolo para ejercer la fuerza deseada. Las principales características del motor se muestran en la Tabla C-2.

Tabla C-2. Características del motor paso a paso Sanyo Denki 103-770-61.

Parámetro	Valor
Inercia del rotor	$105\text{Kg}\cdot\text{m}^2\cdot 10^{-7}$
Aceleración teórica	59000 rad/s^2
Par de retención bipolar	62N·cm
Par de retención unipolar	49 N·cm
Peso	0.54Kg
Corriente unipolar	1A
Resistencia	5.1 Ω
Inductancia	9mH

El motor se controla a través de la controladora Easystep 3000 que va conectada al PC a través del puerto serie. Mediante comandos, el PC envía la información del movimiento al motor para realizar los ciclos de carga y descarga sobre los sensores a caracterizar.

C.1.3. Placa de acondicionamiento

La placa de acondicionamiento sirve de interfaz entre las matrices de sensores y la tarjeta de adquisición de señales. Está diseñada para conectar como máximo sensores de 16 filas por 16 columnas, y para ello dispone de dos conectores: uno de inserción macho de 34 vías doble de 2.54mm de paso para las matrices fabricadas con la tecnología de *screen-printing* descritas en el Capítulo 3 y otro plano hembra de 32 vías para conectar las matrices fabricadas sobre PCB flexible de 0.3 mm de espesor descritas en el Capítulo 2.

Dicha interfaz se encarga de acondicionar las señales de entrada, que provienen del PC a través de la tarjeta de adquisición de señales, para la selección de las filas de la matriz de sensores, y las señales de salida que son enviadas al PC, también a través de la tarjeta de adquisición de señales. La Figura C-7 ilustra el diagrama de bloques funcional y la Figura C-8 una fotografía de dicha placa.

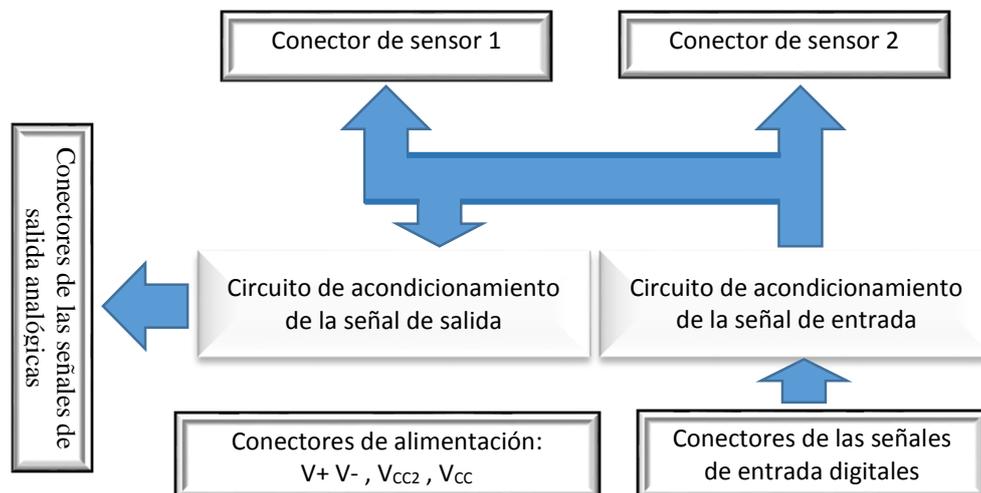


Figura C-7. Diagrama de bloques de la placa de acondicionamiento.

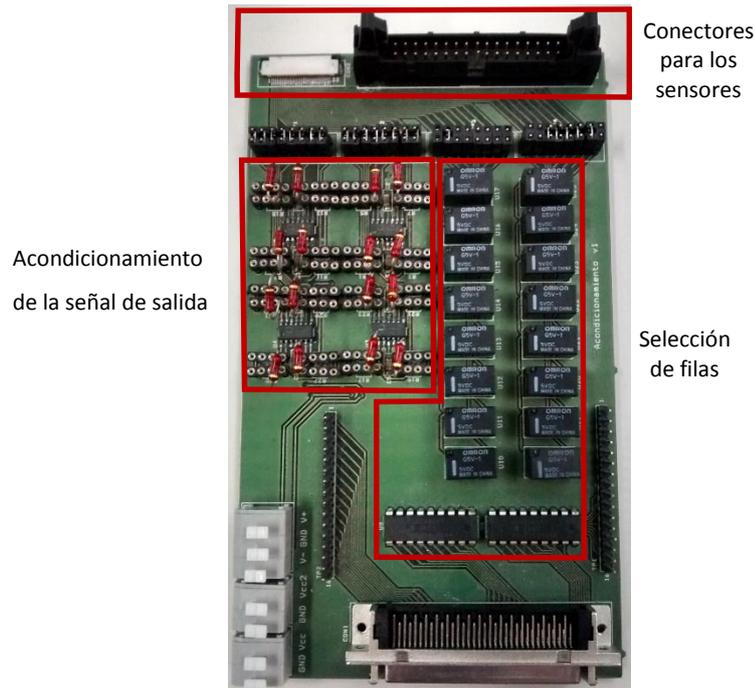


Figura C-8. Fotografía de la placa de acondicionamiento “acondicionamientov1”.

Las señales de entrada son digitales para la activación de cada una de las filas que se van a leer. Hay una señal digital por cada una de las 16 posibles filas de una matriz. Esta señal, tras pasar por un buffer, activa (a nivel alto) un relé, que alimenta a su vez cada fila de la matriz. Para realizar una lectura de una matriz completa, hay que hacer un barrido de activación y desactivación de los 16 relés. Los relés son el cuello de botella para poder realizar una lectura rápida de la matriz de sensores, pero como lo que se pretende es hacer una caracterización estática esto no supone un problema. El sistema está programado para que los relés se activen cada 200 ms aproximadamente en cada barrido.

Las señales de salida son analógicas provenientes de un circuito de amplificación con un operacional en configuración inversora. Este circuito está diseñado para cancelar posibles interferencias por la aparición de resistencias parásitas en la matriz de sensores (ver Anexo B). En la Figura C-9 se ilustra el circuito de amplificación de la señal de salida. Cada vez que se activa una fila, se realiza una lectura de las 16 señales correspondiente a las columnas. De esta forma se obtiene una matriz de 16x16 valores correspondientes a la imagen táctil del sensor. La señal de salida de cada columna V_{Oj} viene dada por la siguiente ecuación:

$$V_{0j} = -\frac{R_j}{R_{Sij}} \cdot V_i \quad (\text{C.1})$$

El subíndice i hace referencia a la fila de la matriz, mientras que el subíndice j se refiere a la columna. Ambos toman valores entre 1 y 16.

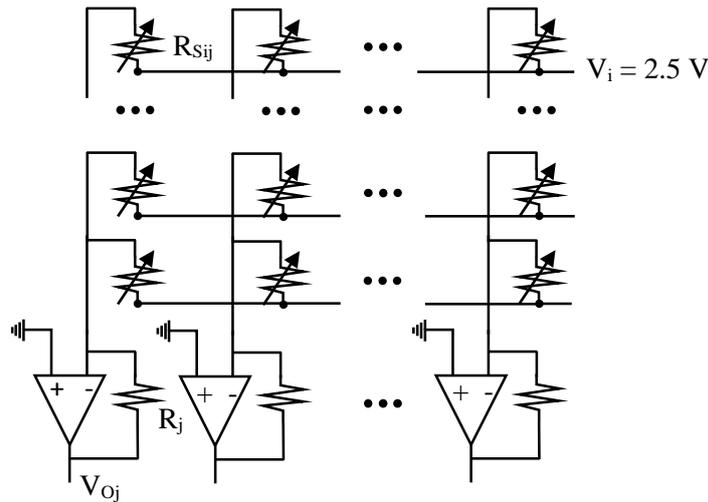


Figura C-9. Esquema eléctrico del circuito de acondicionamiento de la señal de salida.

Si fijamos el rango de salida de los sensores táctiles entre 0 y -5 V, el valor de las resistencias de amplificación R_j dependerá del rango de valores de resistencias del sensor (R_{Sij}). Por esta razón en la placa estas resistencias R_j no están soldadas, sino que en su lugar hay unos zócalos en los que podemos conectar las resistencias que deseemos en cada momento, en función del sensor conectado.

C.1.4. Tarjeta de adquisición de señales

La tarjeta de adquisición de señales conecta la placa de acondicionamiento con el PC. Las señales digitales generadas para la activación de las filas de las matrices de sensores son suministradas por esta tarjeta. Así mismo las señales analógicas de salida ya acondicionadas son enviadas al PC también a través de ella. Se trata de una tarjeta de adquisición de datos de propósito general de Keithley modelo KCPI-3104 [Keithley Instruments Inc. 2015]. En la Tabla C-3 se describen sus principales características.

Tabla C-3. Características de la tarjeta de adquisición Keithley 3100.

Entradas analógicas	
Número entradas	16 (8 diferenciales)
Resolución	12 bits
Máxima velocidad de muestreo	400KHz
Máximo rango de entrada	± 10 V
Salidas analógicas	
Número de salidas	2
Resolución	16 bits
Máxima velocidad de muestreo	400KHz
Máximo rango de salida	± 10 V
Entradas/salidas digitales	
Número	23
Contadores/temporizadores	4

C.2. Aplicación para el control de la plataforma

Para el control manual y automático del sistema se desarrolló una aplicación programada en Matlab®. Con esta aplicación es posible controlar simultáneamente el movimiento del motor, la lectura del sensor de fuerza de referencia y la tarjeta de adquisición de señales para obtener las imágenes táctiles del sensor que se está caracterizando. La aplicación permite obtener una lectura aislada del sensor caracterizado con varias posibilidades y distintos tipos de vistas, a la vez que almacena la información de la fuerza aplicada y la imagen táctil obtenida en un fichero. Así mismo se puede programar ciclos de carga y descarga cuyos resultados se visualizan en tiempo real en la pantalla al mismo tiempo que se almacenan en archivos. En la Figura C-10 se observa una captura de la ventana de la aplicación.

En el apartado de movimiento del motor están los botones para configurar la controladora del motor paso a paso: velocidad, tipo de paso, etc. Se pueden almacenar posiciones del motor para luego acceder rápidamente a ellas. El motor se puede manejar también de forma manual.

En las distintas gráficas se visualiza la salida del sensor: en la parte superior se visualiza la salida de un táctel definido en los campos "fila" y "columna", a su derecha se muestra la desviación de la medida, y en la parte central de la ventana se muestra la imagen táctil completa del sensor en dos o tres dimensiones. Si en el campo "muestras" el valor es n , mayor que 1, se realizan n lecturas consecutivas de la matriz y se realiza la media, siendo esta media el valor de la salida del táctel correspondiente. La desviación cometida en este cálculo es lo que se muestra en la gráfica de desviación situada en la esquina superior derecha de la ventana de la aplicación.

Cada vez que se realiza una medida, ya sea automática o manual, se muestra el valor de la fuerza aplicada al sensor, suministrada por el sensor de referencia, en los campos “fuerza final” y “fuerza aplicada”.

En la parte derecha de la ventana, en la sección “Línea” se puede activar de forma manual y de forma independiente cada una de las filas de la matriz. Esto es útil en el caso de realizar las pruebas dinámicas de respuesta de un táctel ante un impulso.

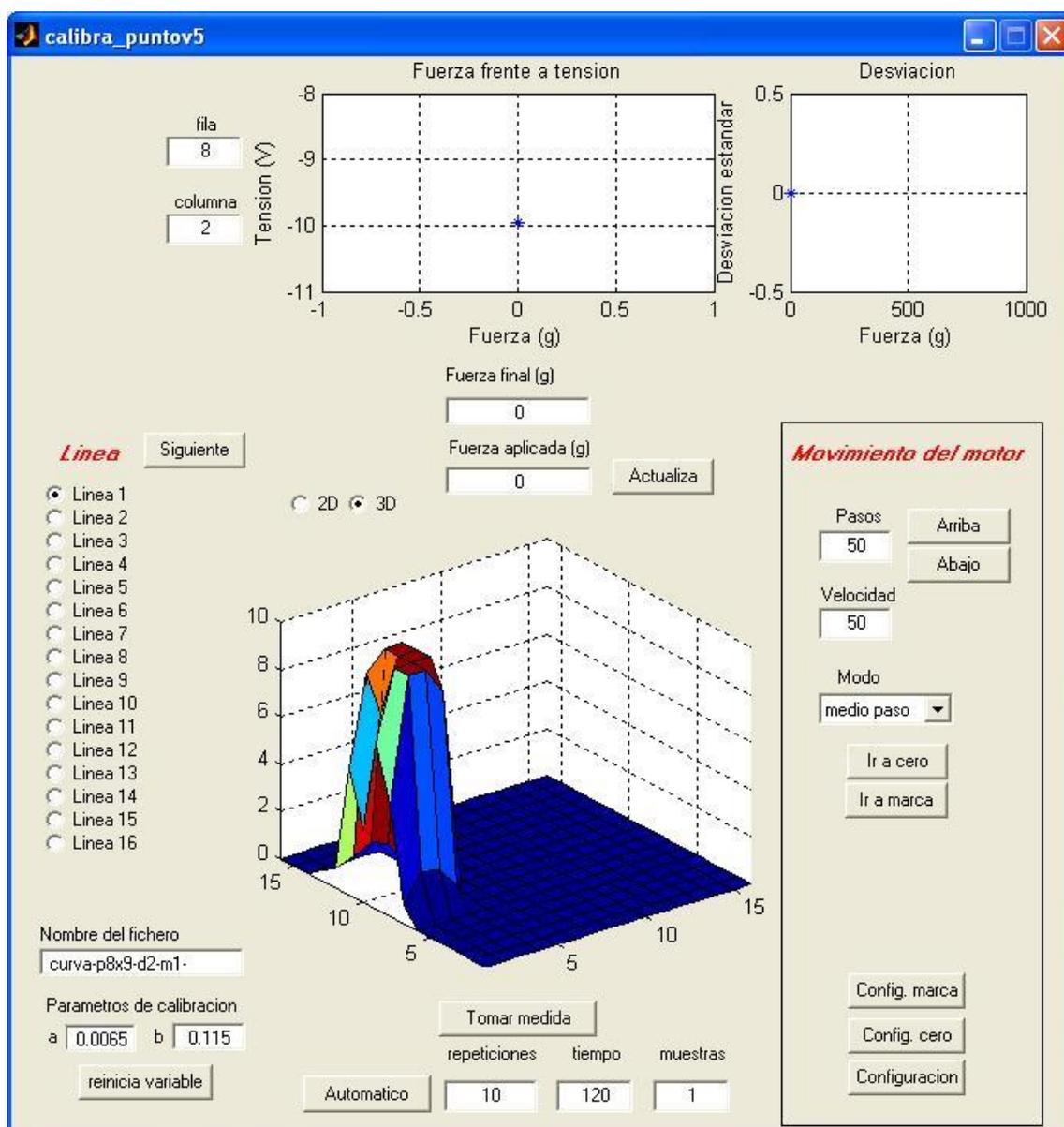


Figura C-10. Ventana del programa de control del sistema.

Los campos “a” y “b” de “parámetros de calibración” son los parámetros obtenidos al calibrar el sensor de referencia. Se obtienen al realizar un ajuste lineal a la curva de calibración mostrada en la Figura C-6.

El botón “Tomar medida” realiza una única lectura de la matriz completa y almacena los datos en el fichero cuyo nombre se indica en el campo “Nombre de fichero”. Si se pulsa de nuevo el botón “Tomar medida”, se realiza una nueva lectura y los datos se añaden al fichero de salida.

Al pulsar el botón “Automático” se inicia un ciclo de carga y descarga tantas veces como se indique en el campo “repeticiones”. El campo “tiempo” indica el tiempo de espera entre una medida y otra. Los incrementos de fuerza van a depender de la configuración del motor, y la máxima fuerza alcanzada es de 1500 g (que es la máxima fuerza admitida por el sensor de referencia). Los datos de todos los ciclos se almacenan en el fichero de salida.

El fichero de salida tiene el formato *.mat propio de Matlab® y contiene dos variables: *fuerza* y *datos*. La variable *fuerza* es un vector que contiene las fuerzas aplicadas en cada lectura, y la variable *datos* es una matriz de tamaño MxN que contiene todas las imágenes táctiles del sensor de cada una de las lecturas. Una imagen táctil consiste en una matriz de 16x16 tácteles; entonces si se realizan 3 lecturas, M será igual a 16x3=48 y N es igual a las columnas de la matriz que es un valor fijo e igual a 16.

Anexo D. Plataforma de caracterización neumática

En este apartado se describen los distintos componentes y el funcionamiento de la plataforma de caracterización neumática, así como el programa que la controla de forma manual o automatizada. Este sistema ha sido utilizado para la realización de las pruebas estáticas de caracterización tanto de los sensores basados en PCB como los basados en la tecnología de *screen-printing*.

Se realiza una modificación del sistema de equilibrado de Tekscan PB100E para automatizarlo y poder ser controlado mediante un PC. El sistema consta de un receptáculo en el que se insertan los sensores. Mediante una membrana de uretano que se llena con aire a presión se ejerce una presión uniforme a toda la superficie del sensor. De esta forma se caracteriza el sensor completo y es posible, con los datos así obtenidos, aplicar técnicas de equilibrado. En la Figura D-1 se muestra un diagrama de bloques funcional del sistema. El PC controla la presión ejercida mediante un regulador de presión conectado al puerto serie. La salida de los sensores, conectados a una placa de acondicionamiento, es enviada al PC a través de una tarjeta de adquisición de señales. Finalmente, se desarrolló una aplicación en Labview™ para el control del sistema completo.

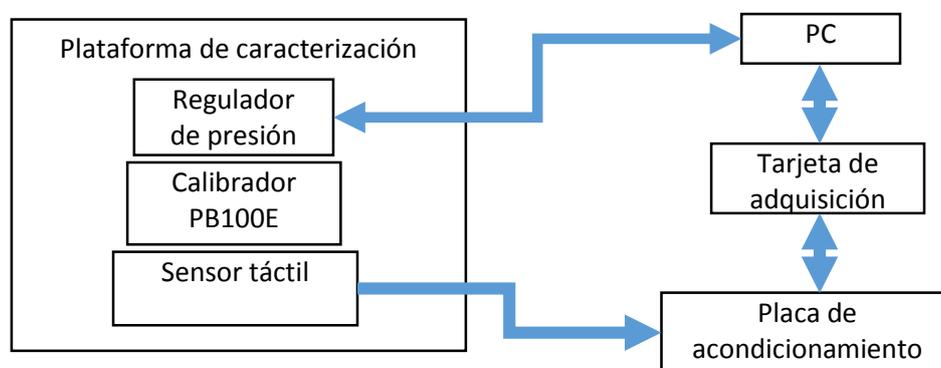


Figura D-1. Diagrama de bloques de la plataforma de caracterización neumática.

En la Figura D-2 se muestra el esquema neumático del sistema y en la Figura D-3 una fotografía del mismo en la que están marcados los principales componentes.

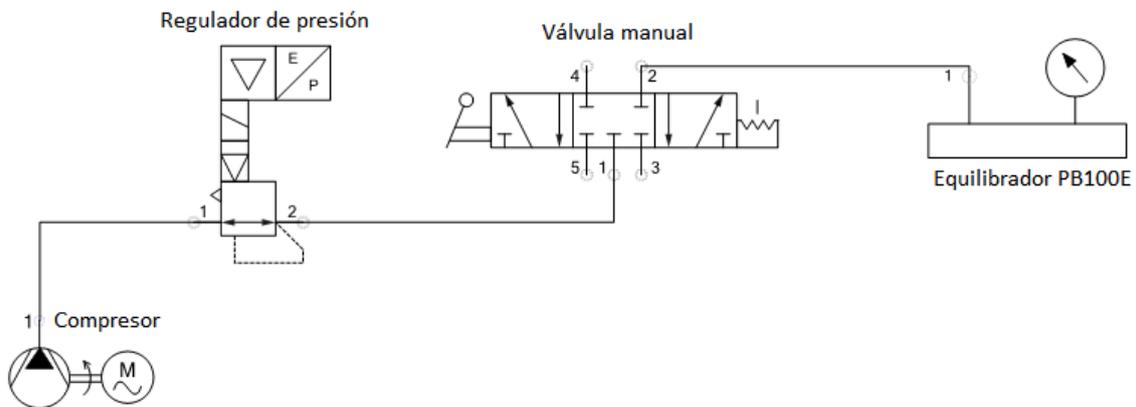


Figura D-2. Esquema neumático del sistema.

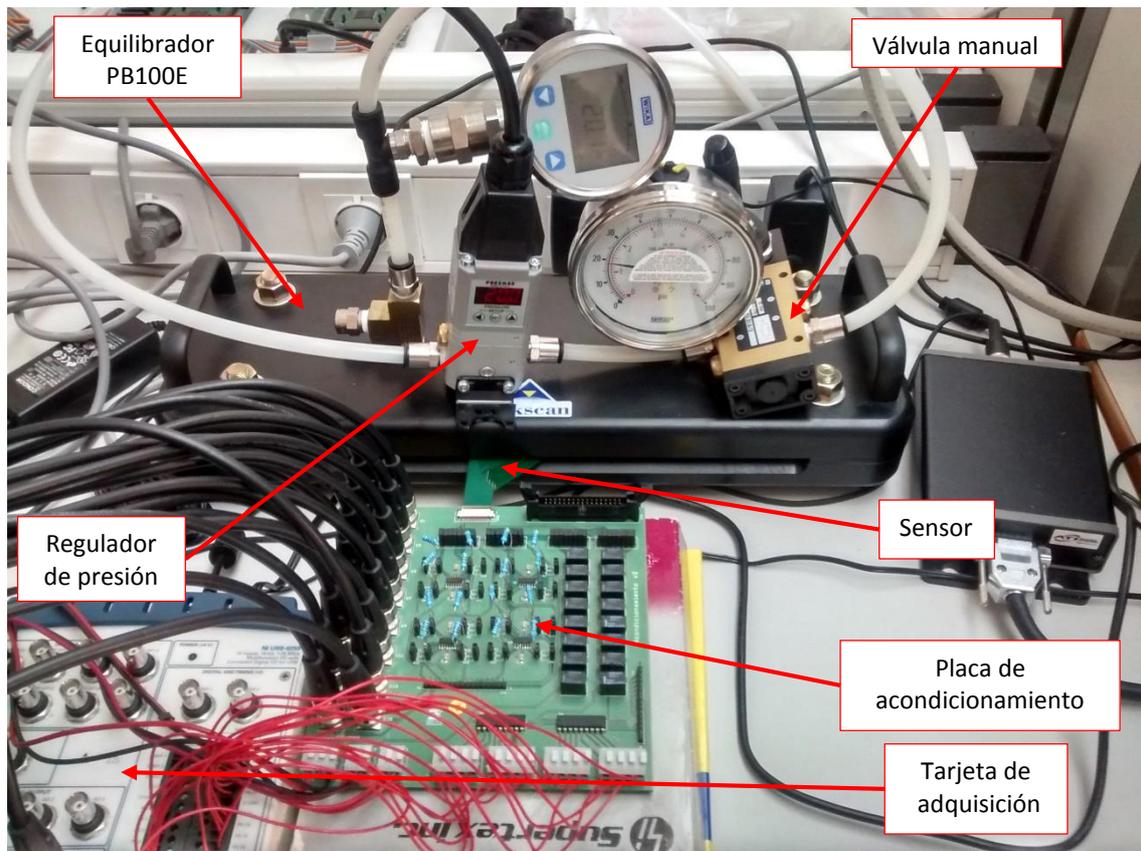


Figura D-3. Plataforma de caracterización neumática.

D.1. Descripción de los componentes de la plataforma

A continuación se describen los principales componentes que forman la plataforma de caracterización:

- Compresor.
- Regulador de presión y válvula manual.
- Sistema de equilibrado PB100E
- Placa de acondicionamiento.
- Tarjeta de adquisición de señales.

El diseño eléctrico de la placa de acondicionamiento es el descrito en el Anexo B. Para el conjunto formado por la placa de acondicionamiento y la tarjeta de adquisición de señales hay dos posibilidades: la descrita en el Anexo C o la que se describirá a continuación.

D.1.1. Compresor

Se trata de un compresor comercial portátil Herkules CW-24/DI. Capaz de comprimir 24l de aire a 10 bar a razón de 180l/min. A la salida del compresor se acopla un filtro de aire para filtrar impurezas al resto del sistema.



Figura D-4. Compresor de aire.

D.1.2. Regulador de presión

El sistema comercial adquirido de la marca Tekscan disponía de un regulador de presión manual que fue sustituido por el regulador de la marca Pneumax, modelo 171E2N.T.D.0009 [Pneumax 2015]. Se trata de un regulador de presión proporcional de control electrónico en tensión.

El regulador se conecta al PC a través del puerto serie y tiene un modo de comandos. Mediante este modo se controla todas sus funciones con comandos enviados desde el PC. La entrada del regulador se conecta a la salida del compresor, y la salida a una válvula manual (referencia 224.53.31.9/2) de 5/3. La función de la válvula es la de poder bloquear manualmente la presión en el equilibrador y la de vaciar su bolsa. La salida del regulador se conecta al sistema de equilibrado PB100E. En la Tabla D-1 se enumeran las principales características del regulador.

El regulador posee un amplio abanico de posibles configuraciones y modos de funcionamiento para alcanzar la presión deseada.

Tabla D-1. Características del regulador de presión proporcional.

Parámetro	Valor
Presión mínima de entrada	Presión deseada + 1 bar
Presión máxima de entrada	10 bar
Presión de salida	0 – 9 bar
Conexión de alimentación	G 1/4
Conexión de utilización	G 1/4
Conexión de escape	G 1/8
Tensión de alimentación	24V
Entrada digital	24V
Salida digital	24V
Conector	D-sub 15 polos
Linealidad	< ± 0.3%FS
Histéresis	< 0.3%FS
Sensibilidad	< ± 0.3%FS

D.1.3. Sistema de equilibrado PB100E

El sistema de equilibrado usado es de la marca Tekscan, modelo PB100E [Tekscan 2015a]. Consiste en una estructura con una cámara de aire construida con una membrana de uretano que se llena con aire a presión. De esta forma, es posible ejercer la misma presión sobre toda

la superficie del sensor a caracterizar. Esta parte del sistema se modificó sustituyendo el regulador manual por el regulador proporcional descrito en el apartado anterior. En la Figura D-5 se muestra un esquema del equilibrador PB100E, y en la Tabla D-2 se muestran sus principales características.

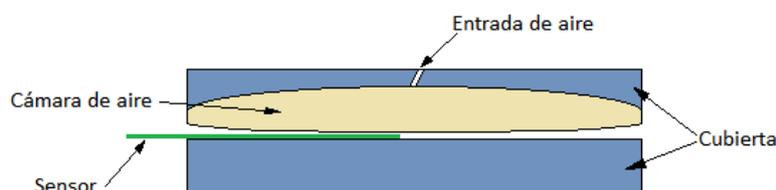


Figura D-5. Esquema del equilibrador PB100E.

Tabla D-2. Características del equilibrador PB100C.

Parámetro	Valor
Área activa	127mm x 311mm
Ancho	152mm
Largo	451mm
Alto	152mm
Peso	10.5Kg
Material de la estructura	Aluminio
Material de la cámara de aire	Uretano
Precisión	1%FS
Rango de presiones	0-689KPa (0-100PSI)

D.1.4. Placa de acondicionamiento

La placa de acondicionamiento “acondicionamientov2” sirve de interfaz entre las matrices de sensores y la tarjeta de adquisición de señales. Está diseñada para poder conectar matrices de como máximo 16 filas y 16 columnas, para ello tiene dos conectores, uno de inserción macho de 34 vías doble de 2.54mm de paso para las matrices fabricadas con la tecnología de *screen-printing* y otro conector plano de 32 vías para conectar las matrices fabricadas sobre PCB flexible de 0.3 mm de espesor.

La placa “acondicionamientov2” se encarga de acondicionar las señales de entrada, que provienen del PC a través de la tarjeta de adquisición de señales, para la selección de las filas de la matriz de sensores; y las señales de salida que son enviadas al PC, también a través de la

tarjeta de adquisición de señales. En la Figura D-6 se observa un diagrama de bloques funcional de la placa y en la Figura D-7 una fotografía de la misma.

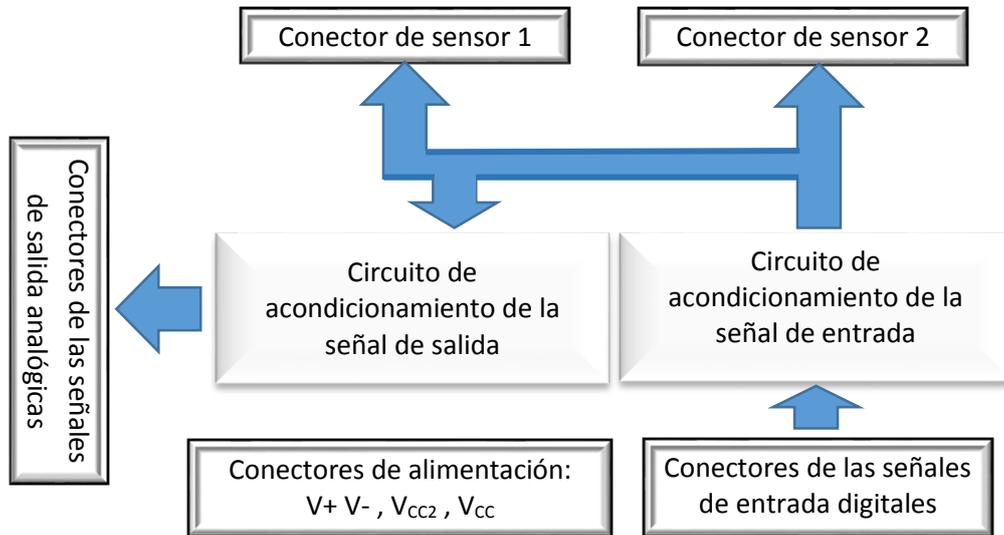


Figura D-6. Diagrama de bloques funcional de la placa "acondicionamiev2".

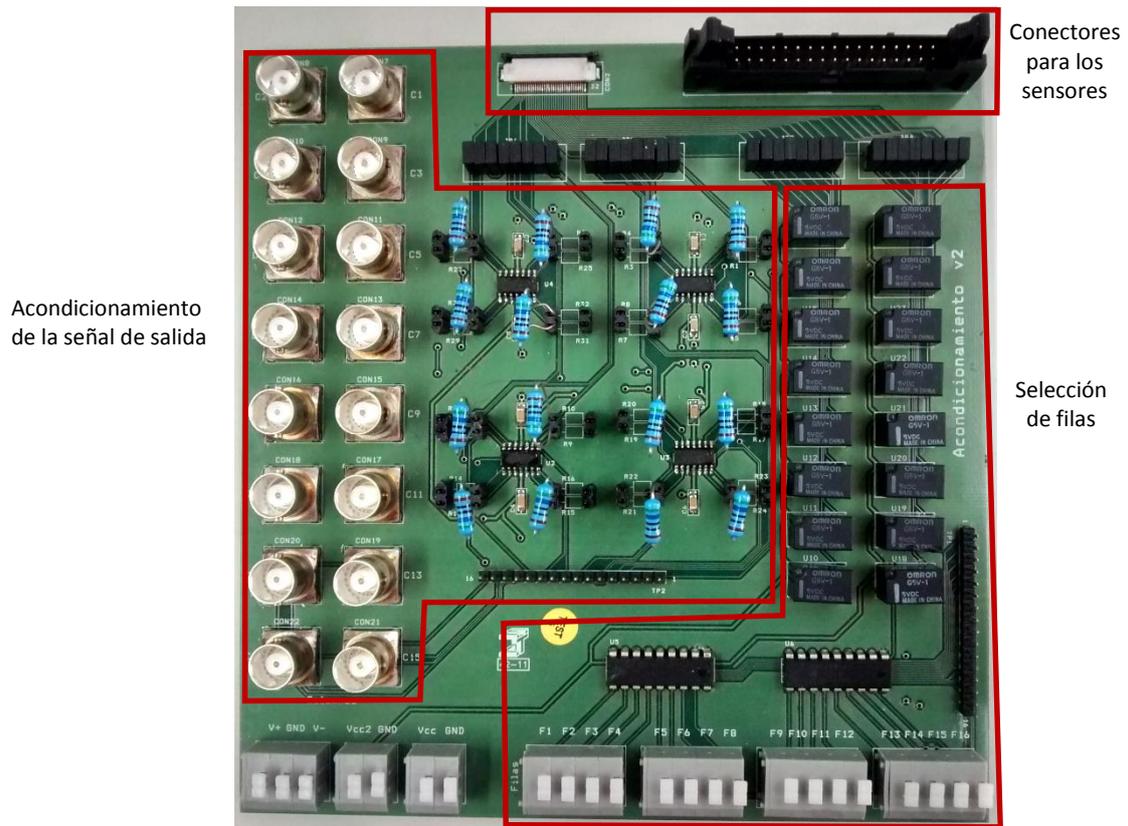


Figura D-7. Fotografía de la placa de acondicionamiento "acondicionamiev2".

Las señales de entrada son digitales para la activación de cada una de las filas que se van a leer. Hay una señal digital por cada una de las 16 posibles filas de una matriz. Esta señal, tras pasar por un buffer, activa (a nivel alto) un relé, que alimenta a su vez la fila de la matriz. Para realizar una lectura de una matriz completa, hay que hacer un barrido de activación y desactivación de los 16 relés. Los relés son el cuello de botella para poder realizar una lectura rápida de la matriz de sensores, pero como lo que se pretende es hacer una caracterización estática esto no supone un problema. El sistema está programado para que los relés se activen cada 200 ms aproximadamente en cada barrido.

Las señales de salida son analógicas provenientes de un circuito de amplificación con un operacional en configuración inversora. Este circuito está diseñado para cancelar posibles interferencias por la aparición de resistencias parásitas en la matriz de sensores. En la siguiente figura se observa el circuito de amplificación de la señal de salida. Cada vez que se activa una fila, se realiza una lectura de las 16 señales correspondiente a las columnas. De esta forma se obtiene una matriz de 16x16 valores correspondientes a la imagen táctil del sensor.

Para que la placa “acondicionamiento2” funcione correctamente necesita ser alimentada con tres tensiones diferentes:

- $V_{CC} = 5\text{ V}$ para alimentar los buffers.
- $V_{CC2} = 2.5\text{ V}$ de entrada a los relés para la selección de las filas.
- $V_+ = 0\text{ V}$, $V_- = -5\text{ V}$ para alimentar a los amplificadores operacionales.

Estas tensiones se suministran mediante dos fuentes de alimentación variables. La señal de salida de cada columna V_{0j} viene dada por la siguiente ecuación:

$$V_{0j} = -\frac{R_j}{R_{Sij}} \cdot V_i \quad (\text{D.1})$$

El subíndice i hace referencia a la fila de la matriz, mientras que j se refiere a la columna. Ambos toman valores entre 1 y 16.

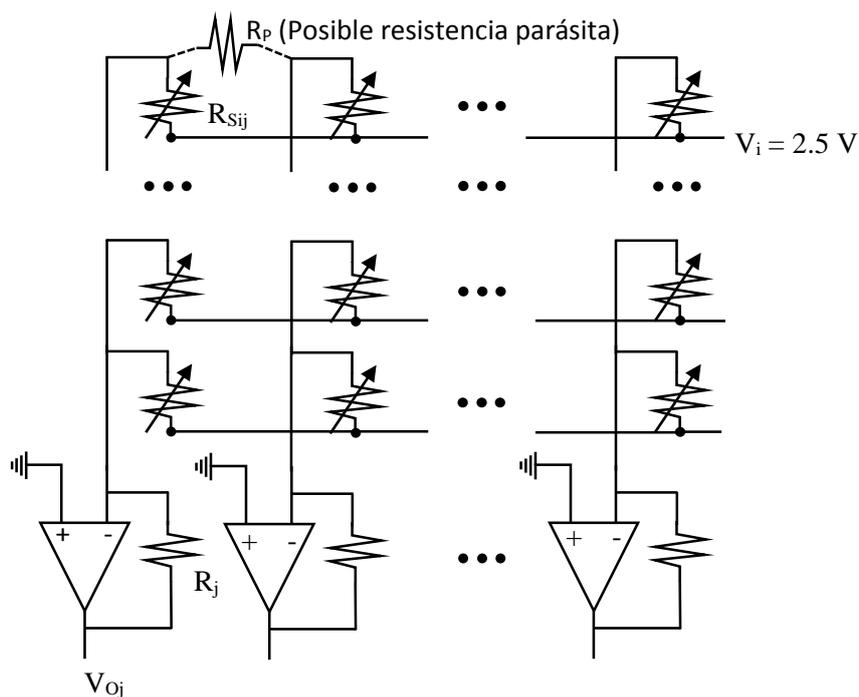


Figura D-8. Esquema eléctrico del circuito de acondicionamiento de la señal de salida.

Si fijamos el rango de salida de los sensores táctiles entre 0 y -5 V, el valor de las resistencias de amplificación R_j dependerá del rango de valores de resistencias del sensor (R_{Sij}). Por esta razón en la placa estas resistencias R_j no están soldadas, sino que en su lugar hay unos zócalos en los que podemos conectar las resistencias que deseemos en cada momento, en función del sensor que vaya a conectarse.

D.1.5. Tarjeta de adquisición de señales

La tarjeta de adquisición de señales sirve de interfaz entre el PC y la placa “acondicionamiento2”. Las señales digitales generadas para la activación de los relés son suministradas por esta tarjeta. Así mismo las señales analógicas de salida ya acondicionadas son enviadas al PC también a través de ella. Se trata de una tarjeta de adquisición de datos de propósito general de National Instruments modelo USB-6259 BNC [National Instruments 2015]. En la Tabla D-3 se describen sus principales características.

Tabla D-3. Principales características de la tarjeta de adquisición de datos USB-6259 BNC.

Entradas analógicas	
Conectores	BNC
Número entradas	32 (16 diferenciales)
Resolución	16 bits
Máxima velocidad de muestreo	1.25 MS/s
Máximo rango de entrada	±10 V
Salidas analógicas	
Conectores	BNC
Número de salidas	4
Resolución	16 bits
Máxima velocidad de muestreo	2.86 MS/s
Máximo rango de salida	±10 V
Corriente máxima	20mA
Entradas/salidas digitales	
Conectores	Atornillados
Número	48
Contadores/temporizadores	2
Voltaje de protección	±20 V

D.2. Aplicación para el control de la plataforma

Para controlar el sistema completo se desarrolló la aplicación en Labview™ “CalibraRegProp.vi”. La aplicación permite realizar ciclos de carga y descarga de forma automática. Los resultados parciales se van visualizando en las distintas ventanas gráficas. Además toda la información extraída de los sensores se va almacenando en ficheros para poder ser posteriormente procesada.

La ventana de la aplicación se puede dividir en tres zonas atendiendo a su funcionalidad:

- Zona de información.
- Zona de control del regulador de presión.
- Zona de programación de pruebas.

En la Figura D-9 están marcadas cada una de estas zonas. En la primera de ellas se muestra un campo con la información del valor de presión dentro de la cámara de aire del PB100E proporcionada por el regulador de presión. Bajo este campo se pueden ver tres gráficas que representan la salida del sensor táctil estudiado. De izquierda a derecha se tiene una gráfica en tres dimensiones de la tensión de salida de cada uno de los tácteles del sensor, la misma información pero representada en dos dimensiones (codificada en una escala de colores) y

finalmente una representación en dos dimensiones también del valor de la tensión de salida de un táctel seleccionado de la matriz en los campos “Row” y “Column”.

La zona 2 de la aplicación está dedicada al control del regulador de presión. Desde esta zona se envían los comandos para regular la presión de la cámara de aire. Hay parámetros de configuración que determinan la forma en la que se alcanza la presión deseada y el rango de error admisible para ello. El procedimiento es seleccionar el comando adecuado, dar valores a los parámetros que necesite cada comando y finalmente enviar el comando.

En la zona 3 están las opciones y botones para realizar pruebas manuales y configurar los parámetros necesarios para las pruebas automáticas.

D.2.1. Programación de pruebas

La aplicación permite realizar tres tipos de pruebas o medidas:

- Medidas manuales.
- Medidas automáticas de ciclos de carga y descarga.
- Medidas automáticas de deriva.

Para realizar una medida manual basta con pulsar el botón “Measure”. El sistema realizará la activación secuencial de las 16 filas de la matriz y tomará los datos de las 16 columnas, obteniendo así los valores de la salida de los 256 tácteles de la matriz. El valor de la matriz se representa en las dos primeras gráficas en 3 y 2 dimensiones, en la gráfica de la derecha se representará un punto correspondiente al valor de la salida para el táctel seleccionado en los campos “Row” y “Column”. Para la aplicación tanto las filas como las columnas se numeran del 0 al 15. Si hay más puntos dibujados en la gráfica, se añade el nuevo punto y se une mediante una línea al anterior. Los datos medidos, los 256 valores de cada táctel, así como la lectura de las tres componentes de la fuerza aplicada, son almacenados en un fichero de texto designado por el valor del campo “File name”; al nombre de este campo la aplicación le añade automáticamente la extensión “.txt”. Cada vez que se pulsa el botón “Measure” se añade un punto en la gráfica de la derecha y se añade un nuevo conjunto de valores al fichero de texto. Pulsando el botón “Reset variable” se resetean los buffers de memoria borrando también el fichero de texto y la gráfica de la derecha para la siguiente lectura.

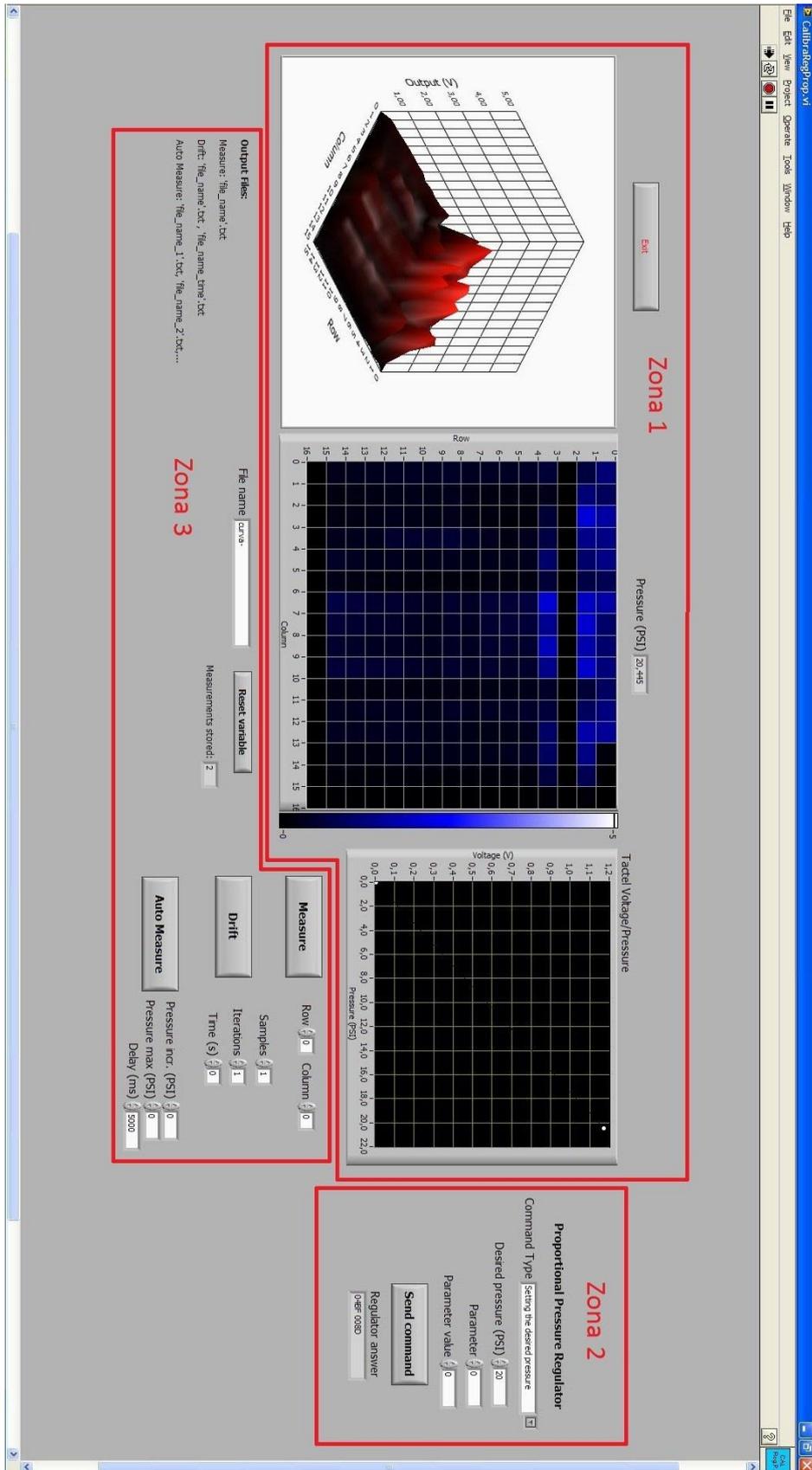


Figura D-9. Ventana de la aplicación “CalibraRegProp.vi”

Se pueden realizar ciclos de carga y descarga de forma automática. Para ello hay que ajustar algunos parámetros en la aplicación y pulsar el botón “Auto Measure”. El regulador de presión comienza a aumentar la presión dentro de la cámara hasta llegar al máximo programado; en ese momento comienza a disminuir la presión hasta cero. De esta forma se obtiene un ciclo de carga y descarga. Este ciclo se repite tantas veces como se haya programado. Una vez terminado un ciclo se representan todos los puntos del táctel seleccionado, unidos por líneas, en la gráfica de la derecha. Se crean tantos ficheros como ciclos se hayan programado, al nombre del fichero se le añade un índice indicando el número de ciclo. Si por ejemplo se programan 3 ciclos se añadirán los índices “_1”, “_2” y “_3” al final del nombre del archivo y antes de la extensión. En la siguiente tabla se describe los parámetros usados en las pruebas automáticas.

Tabla D-4. Descripción de los parámetros usados en las pruebas automáticas.

Parámetro	Descripción
Row	Fila del táctel a mostrar
Column	Columna del táctel a mostrar
Pressure incr. (PSI)	Incremento de presión entre cada medida
Pressure max (PSI)	Presión máxima que se alcanza en el ciclo de carga
Delay (ms)	Tiempo medido en milisegundos que transcurre desde que se fija la presión deseada hasta que se toma una medida del sensor táctil (5000 ms por defecto)
Iterations	Número de ciclos de carga y descarga a realizar
Samples	En cualquier medida es el número de imágenes táctiles capturadas. La imagen guardada es el promedio de todas ellas
Time (s)	Tiempo en segundos entre muestras adquiridas en la prueba de deriva.

La tercera prueba que puede realizarse es la de deriva. Se aplica una carga determinada al sensor manteniéndola durante un periodo de tiempo determinado. Cada cierto intervalo de tiempo se toma una medida del sensor táctil y se almacena. En el campo “Iterations” se indica el número de medidas que se van a tomar y en el campo “Time (s)” el tiempo en segundos entre cada muestra. El tiempo total de la prueba se calcula multiplicando el valor de ambos campos. Los datos de esta prueba se almacenan en dos ficheros, uno con los datos de la fuerza aplicada y la salida del sensor táctil y otro de tiempos en el que se almacena el tiempo en el que se ha tomado cada muestra.

D.2.2. Formato de los ficheros

La aplicación utiliza archivos de texto como salida para almacenar los resultados de las pruebas. A continuación se describirá el formato de estos archivos y para qué son usados.

- “*nombre de fichero.txt*”

Este fichero se genera al realizar una medida manual o las pruebas automáticas. En caso de realizar una medida manual no se le añade nada al nombre del fichero. Si se realiza una medida automática se le añade un índice al final del nombre indicando el número de iteración, si fueran 3 iteraciones se añadirían a cada nombre de fichero “_1”, “_2” y “_3”. Por ejemplo si en el campo del nombre de archivo se introduce “SME1v2A” y se está realizando una prueba automática y va por la iteración 4, los datos se almacenan en el fichero con nombre “SME1v2A_4.txt”. En este fichero se almacena tanto la presión ejercida como la lectura de una matriz táctil de 16x16 tácteles. Es un archivo de texto plano organizado por grupos de 17 líneas:

- Primera línea: valor de la presión.
- Sigüientes 16 líneas: 16 valores por línea separados por un espacio. Cada línea representa una fila de la matriz y los 16 valores de cada fila representan los valores de las columnas.

Los valores de la presión están datos en PSI, mientras que los valores de la salida de la matriz táctil están dados en Voltios. Para una prueba en la que se ha tomado n valores distintos de fuerza el archivo tendría el siguiente aspecto:

Presión1

1Tactel1-1 1Tactel1-2 1Tactel1-3 1Tactel1-4 1Tactel1-5 ... 1Tactel1-16
 1Tactel2-1 1Tactel2-2 1Tactel2-3 1Tactel2-4 1Tactel2-5 ... 1Tactel2-16
 1Tactel3-1 1Tactel3-2 1Tactel3-3 1Tactel3-4 1Tactel3-5 ... 1Tactel3-16

...

1Tactel16-1 1Tactel16-2 1Tactel16-3 1Tactel16-4 1Tactel16-5 ... 1Tactel16-16

Presión2

2Tactel1-1 2Tactel1-2 2Tactel1-3 2Tactel1-4 2Tactel1-5 ... 2Tactel1-16
 2Tactel2-1 2Tactel2-2 2Tactel2-3 2Tactel2-4 2Tactel2-5 ... 2Tactel2-16
 2Tactel3-1 2Tactel3-2 2Tactel3-3 2Tactel3-4 2Tactel3-5 ... 2Tactel3-16

...

2Tactel16-1 2Tactel16-2 2Tactel16-3 2Tactel16-4 2Tactel16-5 ... 2Tactel16-16

...

Presiónn

nTactel1-1 nTactel1-2 nTactel1-3 nTactel1-4 nTactel1-5 ... nTactel1-16

nTactel2-1 nTactel2-2 nTactel2-3 nTactel2-4 nTactel2-5 ... nTactel2-16
nTactel3-1 nTactel3-2 nTactel3-3 nTactel3-4 nTactel3-5 ... nTactel3-16
...
nTactel16-1 nTactel16-2 nTactel16-3 nTactel16-4 nTactel16-5 ... nTactel16-16

- “*nombre de fichero_time.txt*”

En caso de realizar una prueba de deriva, junto con el primer archivo descrito se genera otro con la información del tiempo en el que se han registrado las medidas. En el fichero de tiempos se almacena en cada línea la hora en la que se ha tomado cada medida en el formato hora:minutos:segundos, los segundos se expresa con 3 puntos decimales. Un fichero de una prueba en la que se han tomado 9 medidas tendría la siguiente forma:

18:42:34,406
18:42:45,437
18:42:56,468
18:43:07,593
18:43:18,953
18:43:29,984
18:43:41,000
18:43:52,031
18:44:03,046

Anexo E. Plataforma de caracterización dinámica

Una de las pruebas dinámicas realizadas a los sensores es la de medir su respuesta ante un estímulo dinámico. Dicho estímulo será un escalón, que estará caracterizado por su tiempo de subida (t_s) y baja (t_b), así como por el ancho del pulso (t_w). El escalón de presión es ejercido por un sistema neumático sobre uno de los tácteles del sensor. Mediante un transmisor de presión mediremos una señal eléctrica proporcional a la presión ejercida, obteniendo por un lado el estímulo aplicado. En la Figura E-1 se ilustra la forma de uno de los pulsos aplicados.

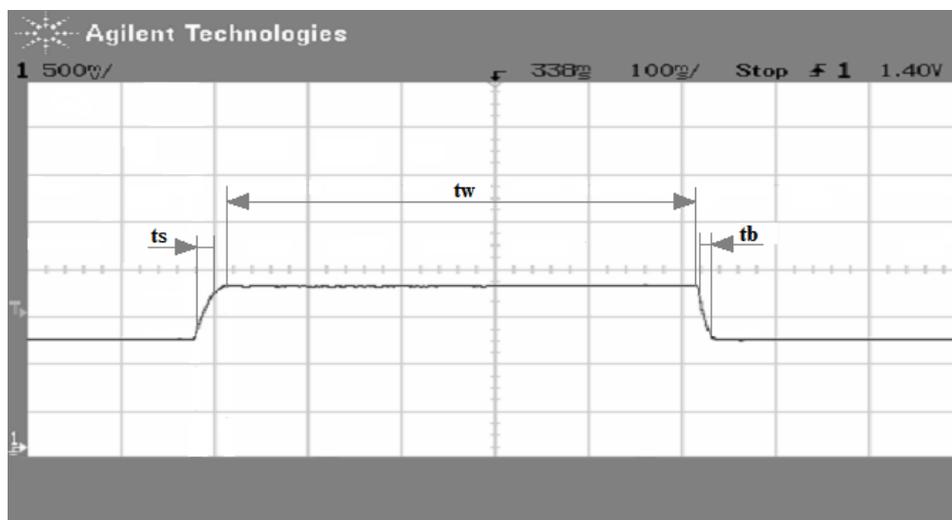


Figura E-1. Estímulo escalón aplicado a un táctel del sensor.

Tras acondicionar la señal que nos proporciona el transmisor de presión, la señal que obtenemos (ver Figura E-1) está comprendida entre 1 y 5 V para unas presiones entre 0 y 1MPa (10 bar). La ecuación que relaciona la tensión con la presión ejercida es la siguiente:

$$P = 2.5 \cdot V - 2.5 \quad (\text{E.1})$$

Donde P es la presión en bares y V la tensión en voltios. En el caso de la Figura E-1 la tensión máxima del pulso es 1.6 V que equivale a 1.5 bar (0.15MPa).

Por otro lado, la medida de la salida del táctel del sensor sobre el que ejercemos el escalón la obtenemos de la misma forma que en las pruebas estáticas. La salida es una señal que varía entre 0 y -5 V.

En el resultado de la prueba dinámica se representan dos señales: por un lado la señal eléctrica suministrada por el transmisor de presión (entrada) y por otro la salida del táctel (salida).

E.1. Descripción de los componentes de la plataforma

Para realizar la prueba dinámica usamos un sistema neumático compuesto por un compresor de aire, un regulador de presión con manómetro, una electroválvula de tres vías y un transmisor de presión. La presión sobre el sensor se ejerce mediante un tubo con una membrana en su extremo, de forma que cuando llenamos el tubo, la presión que hay en el mismo se transmite a través de dicha membrana (ver Figura E-2).

En la Figura E-3 se muestra un esquema del sistema completo, el cual tiene una entrada de control y dos puntos de lectura. La entrada de control es la señal que activa a la electroválvula, que es la que permite el paso del aire comprimido hacia el tubo con la membrana para generar el estímulo. Esta señal de control se genera con un generador de señales. Se trata de un pulso cuadrado entre 0 y 5 voltios, y con un ancho de pulso igual a t_w (el ancho del pulso de la señal que queremos generar como estímulo). Hay que notar que t_w será siempre algo mayor que el pulso de la señal de control debido al retraso en la activación y desactivación de la electroválvula y su circuito de acondicionamiento. Uno de los puntos de lectura es la salida del transmisor de presión (V_e), que nos informa del estímulo, la entrada del sistema; y el otro es la salida del táctel del sensor (V_s), que es la salida del sistema.

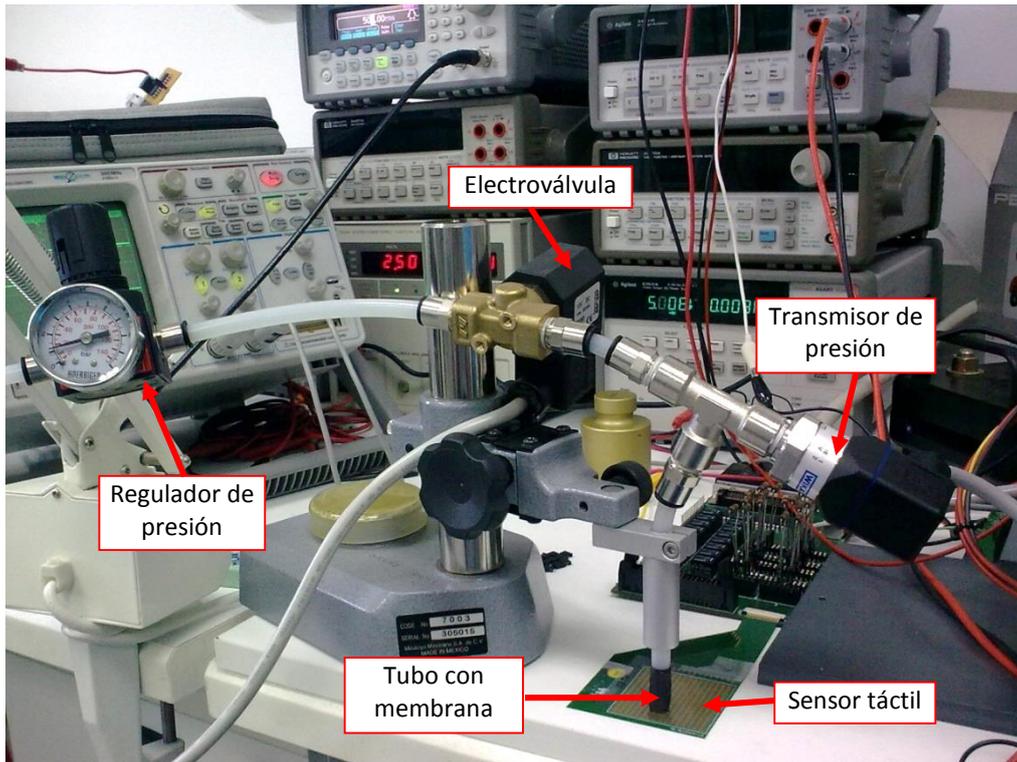
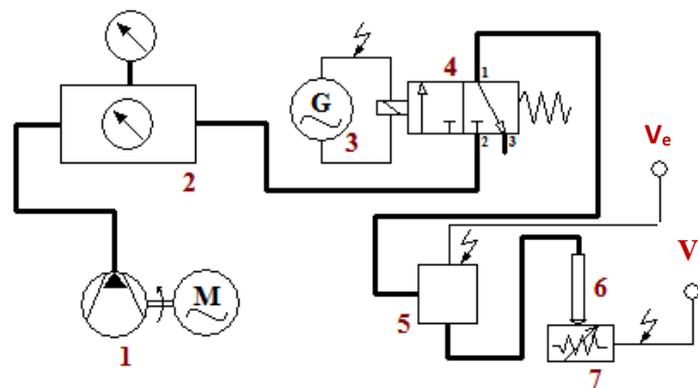


Figura E-2. Foto de los principales componentes del sistema neumático.



- 1 – Compresor de aire
- 2 – Regulador de presión con manómetro
- 3 – Circuito para la activación de la electroválvula
- 4 – Electroválvula de tres vías
- 5 – Transmisor de presión
- 6 – Tubo con membrana
- 7 – Sensor táctil
- V_e – Señal de entrada (excitación)
- V_s – Señal de salida (salida del sensor táctil)

Figura E-3.- Esquema del sistema neumático completo.

Los pasos a seguir para la realización de las pruebas son los siguientes:

- Se enciende el compresor para comprimir el aire por encima de la presión de trabajo a usar.
- Mediante el regulador, se ajusta la presión de trabajo. Ésta será siempre menor que la presión a la que se ha cargado el compresor, y será la presión que alcance el pulso de excitación.
- Cuando se aplica un pulso en la señal de control (flanco de subida), la electroválvula se activa, dejando pasar el aire comprimido al tubo con la membrana.
- La membrana transmite la presión al táctel del sensor.
- Mediante la electrónica de acondicionamiento descrita en el Anexo B se obtiene la tensión de salida del táctel (valores comprendidos entre 0 y -5 V). Al mismo tiempo, el transmisor de presión proporciona el valor en voltios de la presión ejercida por la membrana (valores comprendidos entre 1 y 5 V).
- Cuando el pulso de control finaliza (flanco de baja), la electroválvula se desactiva y el aire que hay en el tubo con la membrana sale al exterior a través de la tercera vía; finalizando así la presión que se ejerce sobre el sensor.

A continuación se describen las características fundamentales de los elementos del sistema neumático.

E.1.1. Compresor

Se trata de un compresor comercial portátil Herkules CW-24/DI. Capaz de comprimir 24 l de aire a 10 bar a razón de 180 l/min. A la salida del compresor se acopla un filtro de aire para filtrar impurezas al resto del sistema.



Figura E-4. Compresor de aire.

E.1.2. Regulador de presión

Para regular la presión proporcionada por el compresor se utiliza un regulador de presión manual con manómetro (MRP-08) que admite una presión máxima de 1MPa (10 bar).

E.1.3. Electroválvula.

La electroválvula utilizada en el sistema es de tres vías y de activación a 12V. El circuito de entrada se conecta por el racor 2 y el de salida por el racor 1. Cuando la electroválvula está desactivada la salida y la tercera vía están conectadas, evacuando el aire del tubo con la membrana; mientras que cuando está conectada es la entrada la que se conecta con la salida. En la Figura E-5 se muestra un esquema de la electroválvula y el acondicionamiento usado para su activación.

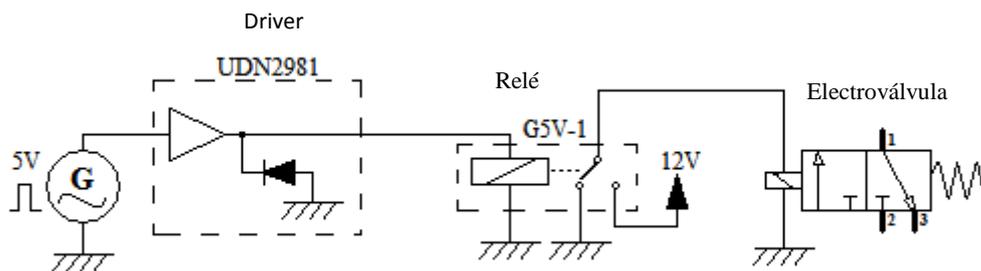


Figura E-5. Esquema del circuito de activación de la electroválvula.

E.1.4. Transmisión de presión.

Para medir la presión de entrada ejercida sobre el táctel se utiliza el transmisor de presión WIKA A-10 [WIKA España 2015], el cual suministra una salida de corriente en función de la presión medida. Admite una presión máxima de 1MPa (10 bar). La salida de dicho transmisor tiene un rango de salida de 4 a 20 mA para unas presiones de entrada desde 0 a 10 bar. En la Figura E-6 se muestra el circuito de acondicionamiento utilizado para transformar la salida en corriente del transmisor en una señal en tensión con un rango de 1 a 5 V.

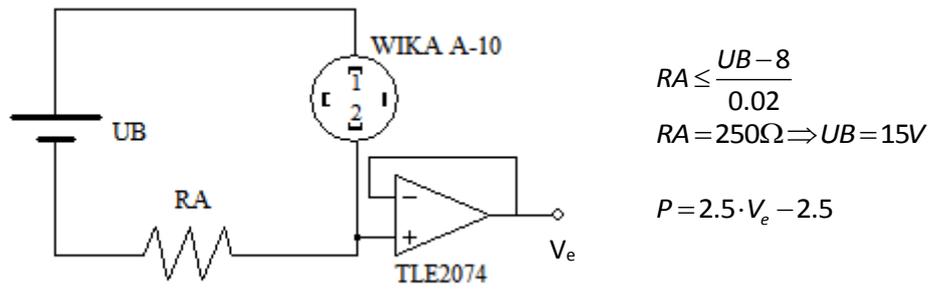


Figura E-6. Acondicionamiento del transmisor de presión.

Anexo F. Plataforma de caracterización de fuerzas tri-axial

En este apartado se describe y explica el funcionamiento de la plataforma de caracterización para fuerzas aplicadas en tres ejes (x , y , z) así como el programa que controla dicha plataforma de forma automatizada.

El sistema está compuesto por un sistema mecánico con tres motores controlados mediante un PC. Uno de los motores controla un émbolo con un muelle en su interior que es el que se encarga de ejercer la fuerza en el eje z . En el extremo inferior del émbolo está colocado un sensor de fuerza que proporciona la fuerza aplicada en los tres ejes de coordenadas cartesianas x , y , z . Los otros dos motores están colocados en dos plataformas de traslación que se mueven a lo largo de los ejes x e y . El sensor que va a ser caracterizado se coloca sobre la plataforma de traslación y con el movimiento de los tres motores se ejerce sobre el sensor las fuerzas en los tres ejes deseadas. El sensor táctil a caracterizar está conectado a una placa de acondicionamiento que a su vez está conectada a una tarjeta de adquisición de datos conectada a un PC. Igualmente, el sensor de fuerza de tres ejes está conectado al PC. Mediante una aplicación programada en Labview™ el PC controla los motores para ejercer la fuerza deseada sobre el sensor táctil, usando como realimentación la lectura de la fuerza que se está aplicando suministrada por el sensor de fuerza de tres ejes. La lectura de la salida proporcionada por el sensor táctil es leída también por el PC.

Con el siguiente sistema se realizan pruebas estáticas de caracterización de los sensores táctiles así como pruebas de deriva. En la Figura D-1 se muestra un esquema del sistema y sus conexiones.

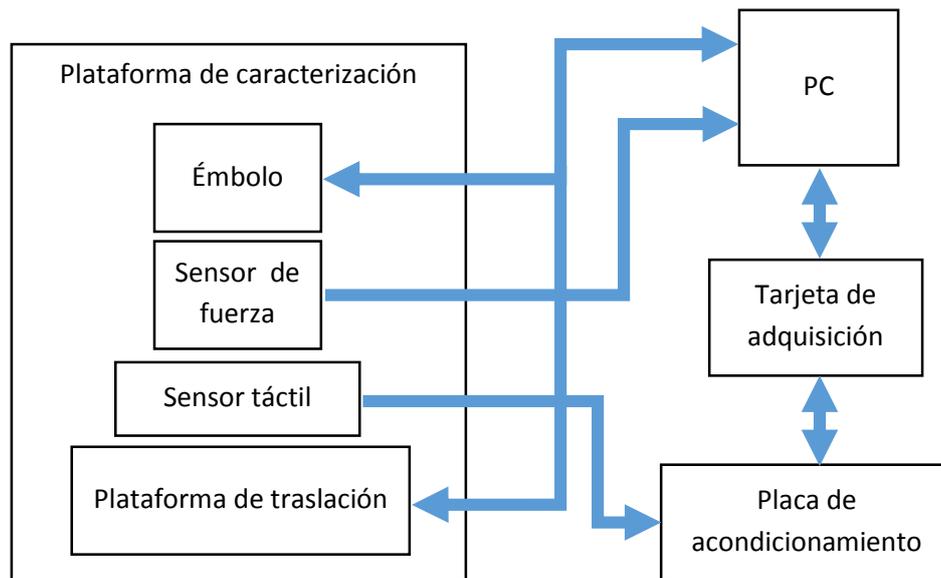


Figura F-1. Diagrama de bloques de la plataforma de caracterización tri-axial.

F.1. Descripción de los componentes de la plataforma

A continuación se describen los distintos componentes que forman la plataforma de caracterización:

- Sensor de fuerza en tres ejes de referencia.
- Motores.
- Placa de acondicionamiento.
- Tarjeta de adquisición de señales.

En la Figura F-2 se observa una fotografía de la plataforma de caracterización sobre la que se han marcado los principales elementos.

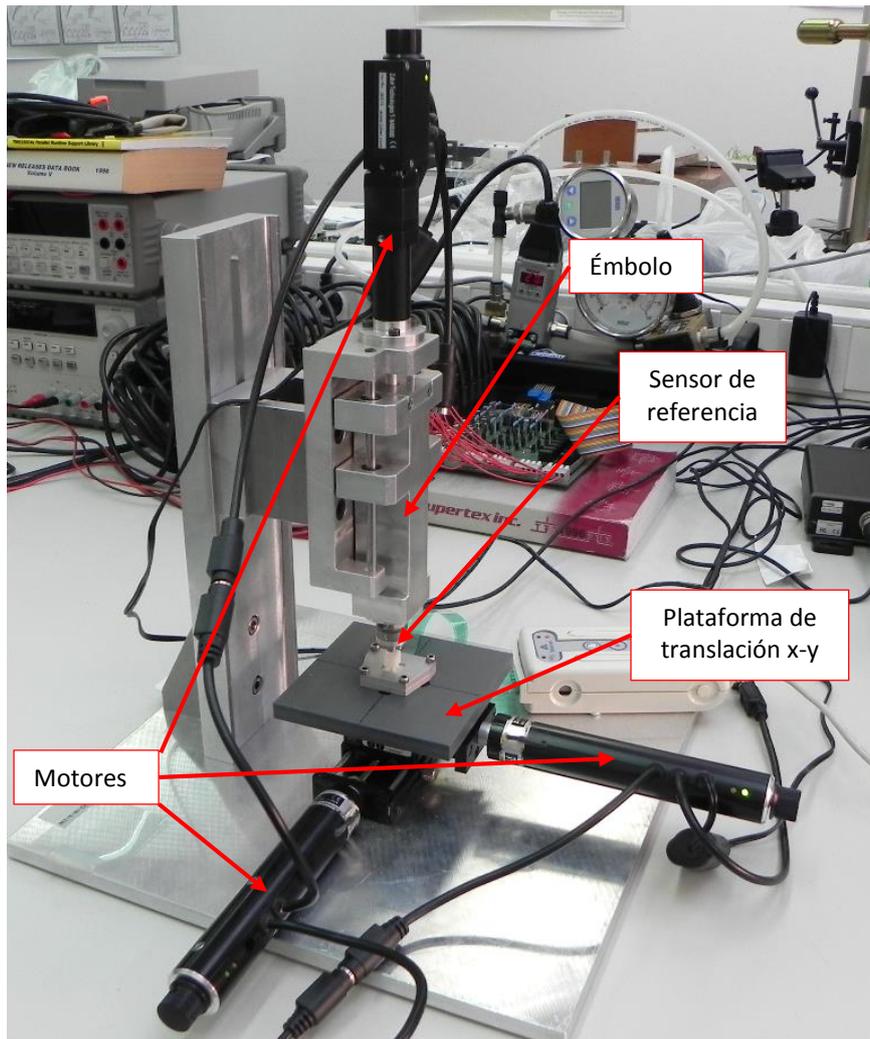


Figura F-2. Plataforma de caracterización tri-axial.

F.1.1. Sensor de fuerza en tres ejes

El sensor usado es de la marca ATI Industrial Automation, modelo nano 17 [ATI Industrial Automation 2015]. Se trata de un sensor de precisión que mide fuerzas en los tres ejes de coordenadas cartesianas x , y , z . Sus principales características técnicas vienen descritas en la Tabla F-1.

Tabla F-1. Especificaciones del sensor nano 17.

Rango	
F_x, F_y	50 N
F_z	70 N
T_x, T_y	500 N·mm
T_z	500 N·mm
Resolución	
F_x, F_y	1/80 N
F_z	1/80 N
T_x, T_y	1/16 N·mm
T_z	1/16 N·mm
Frecuencia de resonancia	
F_x, F_y, F_z	7200 Hz
T_x, T_y, T_z	7200 Hz
Especificaciones físicas	
Peso	0.00907 Kg
Diámetro	17 mm
Altura	15 mm

El fabricante suministra junto con el sensor el hardware necesario con una placa PCI para insertarse en el PC, así como los drivers necesarios para realizar la lectura del sensor mediante cualquier aplicación realizada en Labview™. La Figura F-3 muestra una foto del sensor nano17.

**Figura F-3.** Sensor de referencia nano17.

F.1.2. Motores

El movimiento de la plataforma de caracterización está automatizado mediante motores lineales paso a paso de precisión de la marca Zaber. Se utilizan dos modelos diferentes, uno para la motorización del émbolo y otro para la motorización de la plataforma de traslación.

El émbolo tiene en su interior un muelle con constante elástica $K = 1.3 \text{ N/mm}$, la máxima compresión del mismo es de 31.2 mm y su longitud en reposo es de 110 mm; por lo que es capaz de ejercer una fuerza de 102.44 N. Esta fuerza es superior a los 50 N que se establece como máxima fuerza normal aplicable por la plataforma. Teniendo en cuenta este parámetro

de máxima fuerza aplicable de 50 N el motor seleccionado para accionar el émbolo es el modelo T-NA08A50 [Zaber 2015b]. Para la plataforma de traslación se utiliza el modelo T-LA60A [Zaber 2015a], de características similares al anterior.

Los tres motores se alimentan mediante dos transformadores conectados uno al motor T-NA08A50 y el otro a los dos motores T-LA60A, que comparten alimentación. La comunicación con el PC se realiza mediante un protocolo serie RS232. El cable de datos es compartido con los tres motores. La comunicación se realiza mediante un protocolo de paquetes de datos en el que va incluida una dirección para identificar el motor al que va dirigido el paquete. De esta forma el PC controla de forma independiente cada uno de los motores y puede recibir información de ellos.

En la Tabla F-2 y la Tabla F-3 se detallan las principales características de ambos modelos de motores.

Tabla F-2. Características del motor modelo T-NA08A50.

Parámetro	Valor
Tamaño del paso	0.047625 μm
Recorrido	50.8 mm
Velocidad máxima	8 mm/s
Velocidad mínima	0.00022 mm/s
Máxima fuerza de empuje	50 N
Pico de empuje	65 N
Voltaje de alimentación	12-16 V (DC)
Conector de alimentación	2.1 mm (centro positivo)
Conector cable de datos	mini-DIN 6 pines
Peso	0.15 Kg

Tabla F-3. Características del motor modelo T-LA60A.

Parámetro	Valor
Tamaño del paso	0.09921875 μm
Recorrido	60 mm
Velocidad máxima	4 mm/s
Velocidad mínima	0.0009302 mm/s
Máxima fuerza de empuje	15 N
Pico de empuje	25 N
Voltaje de alimentación	12-16 V (DC)
Conector de alimentación	2.1 mm (centro positivo)
Conector cable de datos	mini-DIN 6 pines
Peso	0.15 Kg

La plataforma ejerce sobre el sensor táctil a caracterizar tanto fuerzas normales como tangenciales. La fuerza normal se aplica accionando el motor del émbolo, mientras que las fuerzas tangenciales en cada componente x e y , se aplica desplazando la plataforma de traslación. Para cada caso particular hay que calcular la máxima fuerza tangencial que se puede aplicar al sensor táctil dependiendo de la fuerza normal aplicada, de forma que la punta de aplicación de la fuerza no deslice sobre el sensor táctil a evaluar.

F.1.3. Placa de acondicionamiento

La placa de acondicionamiento "acondicionamientov2" sirve de interfaz entre las matrices de sensores y la tarjeta de adquisición de señales. Está diseñada para poder conectar matrices de como máximo 16 filas y 16 columnas, para ello tiene dos conectores: uno de inserción macho de 34 vías doble de 2.54mm de paso para las matrices fabricadas con la tecnología de *screen-printing*, y otro de conector hembra plano de 32 vías para conectar las matrices fabricadas sobre PCB flexible de 0.3 mm de espesor.

La placa "acondicionamientov2" se encarga de acondicionar las señales de entrada, que provienen del PC a través de la tarjeta de adquisición de señales, para la selección de las filas de la matriz de sensores; y las señales de salida que son enviadas al PC, también a través de la tarjeta de adquisición de señales. En la Figura F-4 se observa un diagrama de bloques funcional de la placa y en la Figura F-5 una fotografía de la misma.

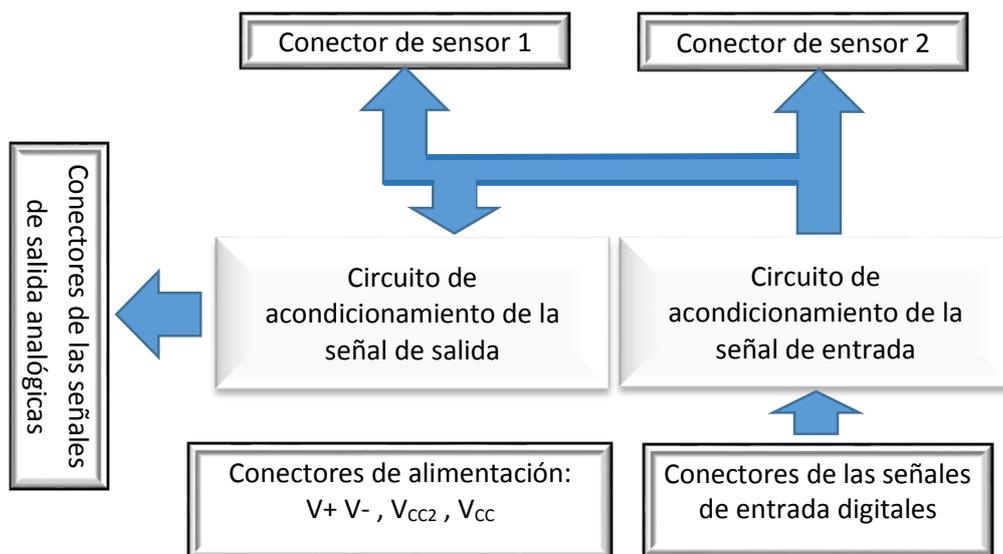


Figura F-4. Diagrama de bloques funcional de la placa "acondicionamientov2".

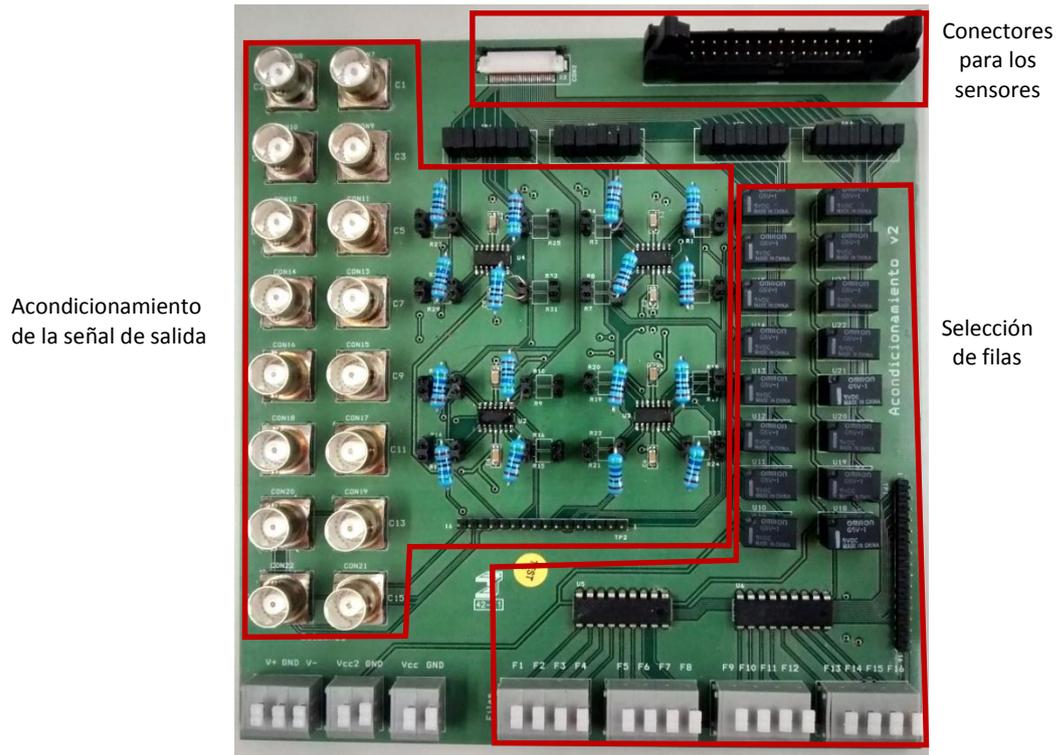


Figura F-5. Fotografía de la placa de acondicionamiento "acondicionamientov2".

Las señales de entrada son digitales para la activación de cada una de las filas que se van a leer. Hay una señal digital por cada una de las 16 posibles filas de una matriz. Esta señal, tras pasar por un buffer, activa (a nivel alto) un relé, que alimenta a su vez la fila de la matriz. Para realizar una lectura de una matriz completa hay que hacer un barrido de activación y desactivación de los 16 relés. Los relés son el cuello de botella para poder realizar una lectura rápida de la matriz de sensores, pero como lo que se pretende es hacer una caracterización estática esto no supone un problema. El sistema está programado para que los relés se activen cada 200 ms aproximadamente en cada barrido.

Las señales de salida son analógicas provenientes de un circuito de amplificación con un operacional en configuración inversora. Este circuito está diseñado para cancelar posibles interferencias por la aparición de resistencias parásitas en la matriz de sensores. En la Figura F-6 se observa el circuito de amplificación de la señal de salida. Cada vez que se activa una fila, se realiza una lectura de las 16 señales correspondiente a las columnas. De esta forma se obtiene una matriz de 16x16 valores correspondientes a la imagen táctil del sensor.

Para que la placa “acondicionamiento2” funcione correctamente necesita ser alimentada con tres tensiones diferentes:

- $V_{CC} = 5\text{ V}$ para alimentar los buffers.
- $V_{CC2} = 2.5\text{ V}$ de entrada a los relés para la selección de las filas.
- $V_+ = 0\text{ V}$, $V_- = -5\text{ V}$ para alimentar a los amplificadores operacionales.

Estas tensiones se suministran mediante dos fuentes de alimentación variables. La señal de salida de cada columna V_{Oj} viene dada por la siguiente ecuación:

$$V_{Oj} = -\frac{R_j}{R_{Sij}} \cdot V_i \quad (\text{F.1})$$

El subíndice i hace referencia a la fila de la matriz, mientras que j se refiere a la columna. Ambos toman valores entre 1 y 16.

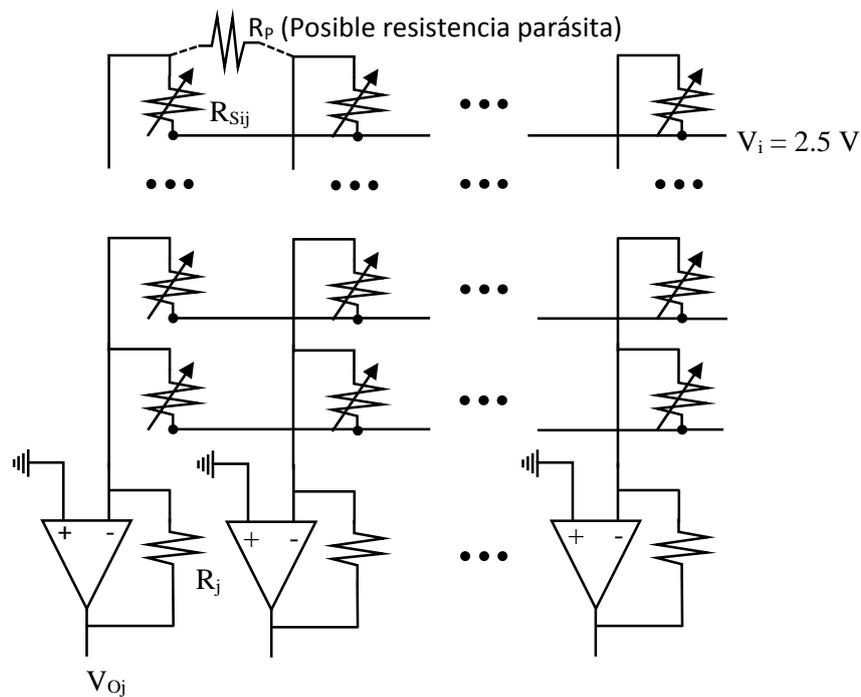


Figura F-6. Esquema eléctrico del circuito de acondicionamiento de la señal de salida.

Si fijamos el rango de salida de los sensores táctiles entre 0 y -5 V, el valor de las resistencias de amplificación R_j dependerá del rango de valores de resistencias del sensor (R_{Sij}). Por esta razón en la placa estas resistencias R_j no están soldadas, sino que en su lugar hay unos zócalos

en los que podemos conectar las resistencias que deseemos en cada momento, en función del sensor conectado.

F.1.4. Tarjeta de adquisición de señales

La tarjeta de adquisición de señales sirve de interfaz entre el PC y la placa “acondicionamiento2”. Las señales digitales generadas para la activación de los relés son suministradas por esta tarjeta. Así mismo las señales analógicas de salida ya acondicionadas son enviadas al PC también a través de ella. Se trata de una tarjeta de adquisición de datos de propósito general de National Instruments modelo USB-6259 BNC [National Instruments 2015]. En la Tabla F-4 se describen sus principales características.

Tabla F-4. Principales características de la tarjeta de adquisición de datos USB-6259 BNC.

Entradas analógicas	
Conectores	BNC
Número entradas	32 (16 diferenciales)
Resolución	16 bits
Máxima velocidad de muestreo	1.25 MS/s
Máximo rango de entrada	±10 V
Salidas analógicas	
Conectores	BNC
Número de salidas	4
Resolución	16 bits
Máxima velocidad de muestreo	2.86 MS/s
Máximo rango de salida	±10 V
Corriente máxima	20mA
Entradas/salidas digitales	
Conectores	Atornillados
Número	48
Contadores/temporizadores	2
Voltaje de protección	±20 V

F.2. Aplicación para el control de la plataforma

Con la aplicación “Calibra_v33.vi” desarrollada en Labview™ se controla el sistema completo, permitiéndonos realizar ciclos de carga y descarga de forma automática en distintos tácteles de las matrices. Así mismo se pueden visualizar algunos resultados parciales de estas pruebas automáticas, o ir viendo los resultados en las pruebas manuales. Toda la información extraída por los sensores se va almacenando en ficheros para poder ser procesados y examinados con posterioridad.

La pantalla de la aplicación podría dividirse en tres zonas:

- Zona de información.
- Zona de control de los motores.
- Zona de programación de pruebas.

En la Figura F-7 se puede ver una captura de la ventana de la aplicación, en la que se han marcado cada una de estas zonas. En la primera de ellas se muestra la información del sensor de referencia nano17, el valor de las tres componentes de la fuerza que se está aplicando sobre el sensor táctil a estudiar. El botón “Sensor calibrate” calibra el cero del sensor de referencia, antes de realizar algún ciclo de pruebas es conveniente realizar esta calibración. Bajo estos campos se pueden ver tres gráficas que representan la salida del sensor táctil estudiado. De izquierda a derecha se tiene una gráfica en tres dimensiones de la salida de cada uno de los tácteles del sensor, la misma información pero representada en dos dimensiones y finalmente una representación en dos dimensiones también del valor de un táctel seleccionado de la matriz. En la gráfica en tres dimensiones se muestra el valor de la salida en voltios del sensor para cada uno de sus tácteles. En la gráfica en dos dimensiones la salida está codificada en una escala de colores mostrada junto a la gráfica. En la última gráfica se muestra la salida en voltios del tactel seleccionado en los campos “Row” y “Column”, los puntos son los datos medidos y se unen mediante rectas para la representación.

La zona 2 de la aplicación está dedicada al control de los 3 motores. Son motores paso a paso que pueden moverse o bien indicándoles una posición absoluta (en pasos) a la que moverse, o bien indicándoles una posición relativa a la que llegar desde la posición actual. La velocidad de cada motor se puede configurar de forma independiente. En la zona “Save/load location” podemos guardar posiciones absolutas de los motores y asignarles un nombre para luego movernos a ellas de forma más rápida. Al final de la zona hay un menú desplegable con los distintos comandos que admiten los motores, a su lado hay otro desplegable para seleccionar a qué motor se va a enviar el comando (motor x, y o z), y finalmente el botón para enviar el comando por el puerto serie. Cada comando usa los parámetros que necesite de la configuración que se haya establecido en el momento de enviarlo.

En la zona 3 están las opciones y botones para realizar pruebas manuales y configurar los parámetros necesarios para las pruebas automáticas.

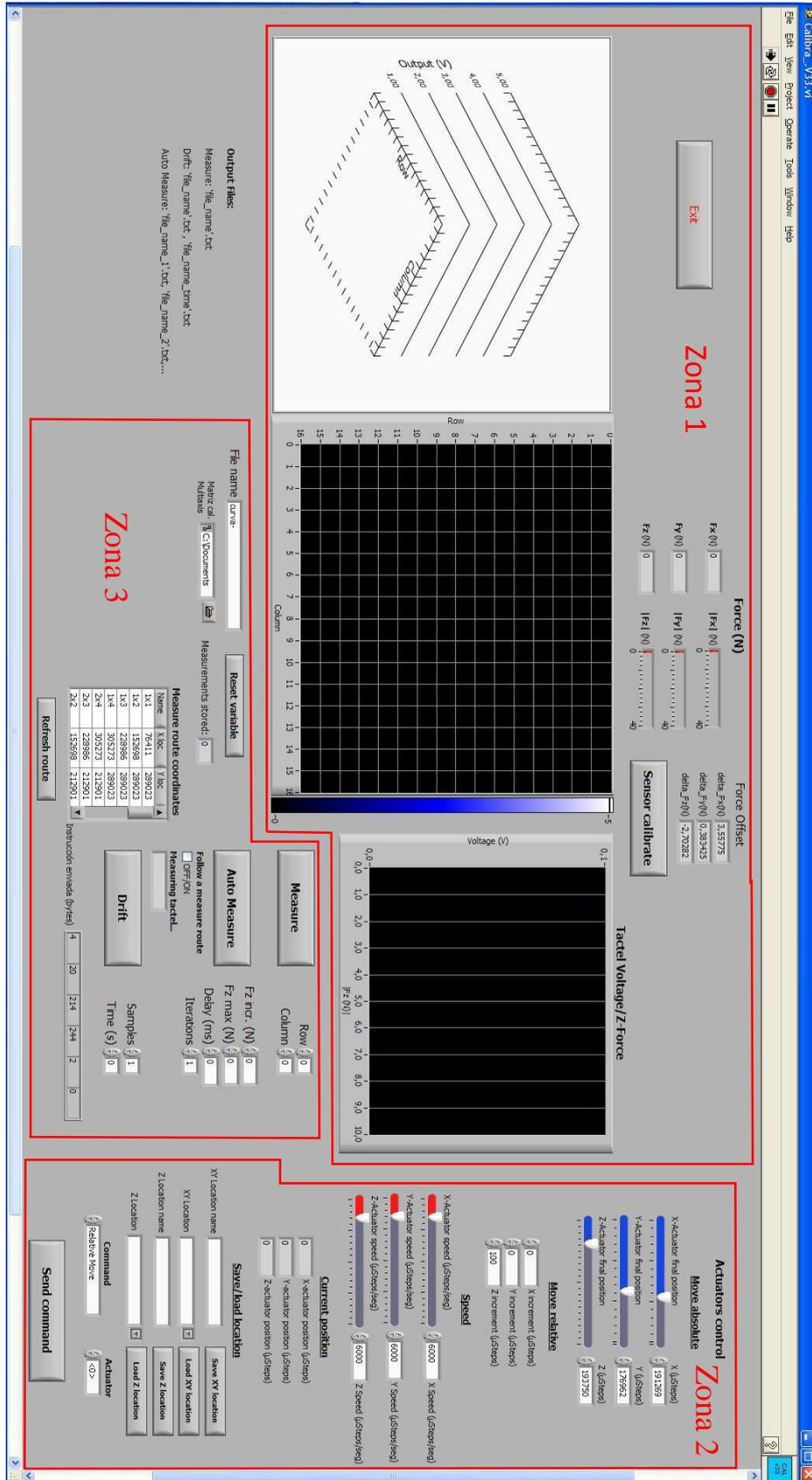


Figura F-7. Ventana de la aplicación "Calibra_v33.vi".

F.2.1. Programación de pruebas

Con esta aplicación se puede realizar tres tipos de pruebas o medidas:

- Medidas manuales.
- Medidas automáticas de ciclos de carga y descarga.
- Medidas automáticas de deriva.

Para realizar una medida manual basta con pulsar el botón “Measure”. El sistema realizará la activación secuencial de las 16 filas de la matriz y tomará los datos de las 16 columnas, obteniendo así los valores de la salida de los 256 tácteles de la matriz. El valor de la matriz se representa en las dos primeras gráficas en 3 y 2 dimensiones, en la gráfica de la derecha se representará un punto correspondiente al valor de la salida para el táctel seleccionado en los campos “Row” y “Column”. Para la aplicación tanto las filas como las columnas se numeran del 0 al 15. Si hay más puntos dibujados en la gráfica, se añade el nuevo punto y se une mediante una línea al anterior. Los datos medidos, los 256 valores de cada táctel, así como la lectura de las tres componentes de la fuerza aplicada, son almacenados en un fichero de texto designado por el valor del campo “File name”; la aplicación añade automáticamente al nombre de este campo la extensión “.txt”. Cada vez que se pulsa el botón “Measure” se añade un punto en la gráfica de la derecha y se añade un nuevo conjunto de valores al fichero de texto. Pulsando el botón “Reset variable” se resetean los buffers de memoria borrando también el fichero de texto y la gráfica de la derecha para la siguiente lectura.

Se pueden realizar ciclos de carga y descarga de forma automática. Para ello hay que ajustar algunos parámetros en la aplicación y pulsar el botón “Auto Measure”. Al iniciar esta operación el vástago controlado por el motor del eje z comienza a bajar hasta entrar en contacto el sensor de referencia con el sensor táctil, en ese momento se toma una medida de la matriz. El sensor de referencia sigue entonces bajando, aumentando la fuerza aplicada hasta el siguiente intervalo y se vuelve a tomar una medida de la matriz. El proceso se repite hasta alcanzar la fuerza máxima programada. En este punto se invierte el movimiento del motor del eje z para ir disminuyendo la fuerza aplicada. De esta forma se obtiene un ciclo de carga y descarga. Este ciclo se repite tantas veces como se haya programado. Una vez terminado un ciclo se representan todos los puntos del táctel seleccionado, unidos por líneas, en la gráfica de la derecha. Se crean tantos ficheros como ciclos se hayan programado, al nombre del fichero se le añade un índice indicando el número de ciclo. Si por ejemplo se programan 3

ciclos se añadirán los índices “_1”, “_2” y “_3” al final del nombre del archivo y antes de la extensión. Los ciclos programados de esta forma se realizan sobre un mismo táctel. Existe la posibilidad de automatizar el movimiento de la plataforma motorizada para que, tras terminar todos los ciclos, se desplace hasta otro táctel y comience sobre él otros ciclos. Para ello hay que indicar en el archivo “XY_route.dat” las coordenadas de los tácteles, es un fichero de texto en el que en cada línea están las posiciones de los tácteles. En la Tabla F-5 se describen los parámetros usados en las pruebas automáticas.

Tabla F-5. Descripción de los parámetros usados en las pruebas automáticas.

Parámetro	Descripción
Row	Fila del táctel a mostrar
Column	Columna del táctel a mostrar
Fz incr. (N)	En el ciclo de carga el motor z aumenta su posición hasta que se alcanza el incremento de fuerza, tras el que se para para tomar una medida del sensor táctil.
Fz max (N)	Fuerza máxima que se alcanza en el ciclo de carga.
Delay (ms)	Tiempo medido en milisegundos que transcurre desde que el motor z se para hasta que se toma una medida del sensor táctil (3000 ms por defecto).
Iterations	Número de ciclos de carga y descarga a realizar.
Follow a measure route	Marcar esta opción en caso de querer realizar ciclos en distintos tácteles de forma automática. En este caso hay que tener las coordenadas de los tácteles almacenadas en el archivo de texto “XY_route.dat”
Z Speed (μ Steps)	Velocidad de movimiento del motor z expresada en micro pasos.
X Speed (μ Steps)	Velocidad de movimiento del motor x expresada en micro pasos.
Y Speed (μ Steps)	Velocidad de movimiento del motor y expresada en micro pasos.

La tercera prueba que puede realizarse es la de deriva. Se aplica una carga determinada al sensor en un táctel manteniéndola durante un periodo de tiempo determinado. Cada cierto intervalo de tiempo se toma una medida del sensor táctil y se almacena. En el campo “Iterations” se indica el número de medidas que se van a tomar y en el campo “Time (s)” el tiempo en segundos entre cada muestra. El tiempo total de la prueba se calcula multiplicando el valor de ambos campos. Los datos de esta prueba se almacenan en dos ficheros, uno con los datos de la fuerza aplicada y la salida del sensor táctil, y otro de tiempos en el que se almacena el tiempo en el que se ha tomado cada muestra.

F.2.2. Formato de los ficheros

La aplicación utiliza archivos de texto como entrada para adquirir parámetros y variables, y como salida para almacenar los resultados de las pruebas. A continuación se describirá el formato de estos archivos y para qué son usados.

Ficheros de entrada

- “default.ini”

Este fichero se lee al ejecutarse la aplicación por primera vez y contiene las velocidades por defecto de los motores y la posición de inicio. Al arrancar la aplicación los motores se mueven a la posición indicada en este fichero. La velocidad está expresada en μ pasos por segundo y la posición en pasos en valor absoluto del motor medidos desde su posición de inicio absoluto. La primera línea indica la velocidad separada por espacios del motor x, y, z. En la segunda línea se indica las posiciones de estos mismos motores. Un ejemplo de archivo sería el siguiente:

```
SpeedXYZ 6000 6000 6000  
LocXYZ 191269 176962 193750
```

- “XY_locations.dat”

En la zona de control de los motores está el área para salvar y cargar posiciones de la mesa motorizada y del vástago. Los datos de la mesa motorizada se guardan en este fichero y es cargado al iniciar la aplicación. De esta forma podemos mover la mesa a una posición anteriormente definida de forma rápida y sencilla. Cada posición se almacena en una línea del fichero, que incluye un nombre del punto, la coordenada x y la coordenada y, separados por espacios. Las coordenadas son posiciones absolutas en pasos de los motores. Un ejemplo de archivo sería el siguiente:

```
centro 191269 176962  
1x1 76411 289023  
1x2 152698 289023  
1x3 228986 289023
```

- “Z_locations.dat”

De la misma manera que en el caso anterior, la posición del émbolo se almacena en este archivo. Un ejemplo del fichero sería el siguiente:

```
InicioZ 342126
```

Cercano 250354

- “XY_route.dat”

Este archivo es usado en caso de que se active la opción “Follow a measure route” para realizar un recorrido por los tácteles de forma automática. El archivo contiene las coordenadas de los tácteles a recorrer. El formato es el mismo que los archivos de localización anteriores; cada línea corresponde con la localización de un táctel. Un ejemplo de fichero es el siguiente:

```
1x1 76411 289023
1x2 152698 289023
1x3 228986 289023
1x4 305273 289023
2x1 76411 212901
2x2 152698 212901
2x3 228986 212901
2x4 305273 212901
3x1 76411 136778
3x2 152698 136778
3x3 228986 136778
3x4 305273 136778
4x1 76411 60656
4x2 152698 60656
4x3 228986 60656
4x4 305273 60656
```

Ficheros de salida

- “nombre de fichero.txt”

Este fichero se genera al realizar una medida manual o las pruebas automáticas. En caso de realizar una medida manual no se le añade nada al nombre del fichero. Si se realiza una medida automática sin seguimiento de ruta se le añade un índice al final del nombre indicando el número de iteración, si fueran 3 iteraciones se añadirían a cada nombre de fichero “_1”, “_2” y “_3”. Si la prueba es automática con seguimiento de ruta, antes del índice de la iteración se añade el nombre del táctel precedido de un guión bajo. Por ejemplo si en el campo del nombre de archivo se introduce “SME1v2A” y se está realizando una prueba automática con seguimiento de ruta y se está realizando las pruebas sobre el punto llamado “2x3” y va por la iteración 4, los datos se almacenan en el fichero con nombre “SME1v2A_2x3_4.txt”. En este fichero se

almacena tanto las fuerzas en los ejes x, y, z, como la lectura de una matriz táctil de 16x16 tácteles. Es un archivo de texto plano organizado por grupos de 17 líneas de la siguiente manera:

- Primera línea: valor de fuerza z, valor de fuerza x, valor de fuerza y. Separados los valores por un espacio. La fuerza z es negativa al ejercer la fuerza hacia abajo.
- Sigüientes 16 líneas: 16 valores por línea separados por un espacio. Cada línea representa una fila de la matriz y los 16 valores de cada línea representan a los tácteles de las distintas columnas.

Los valores de la fuerza están dados en Newton, mientras que los valores de la salida de la matriz táctil están dados en Voltios. Para una prueba en la que se ha tomado n valores distintos de fuerza el archivo tendría el siguiente aspecto:

```

Fuerza1Z Fuerza1X Fuerza1Y
1Tactel1-1 1Tactel1-2 1Tactel1-3 1Tactel1-4 1Tactel1-5 ... 1Tactel1-16
1Tactel2-1 1Tactel2-2 1Tactel2-3 1Tactel2-4 1Tactel2-5 ... 1Tactel2-16
1Tactel3-1 1Tactel3-2 1Tactel3-3 1Tactel3-4 1Tactel3-5 ... 1Tactel3-16
...
1Tactel16-1 1Tactel16-2 1Tactel16-3 1Tactel16-4 1Tactel16-5 ... 1Tactel16-16
Fuerza2Z Fuerza2X Fuerza2Y
2Tactel1-1 2Tactel1-2 2Tactel1-3 2Tactel1-4 2Tactel1-5 ... 2Tactel1-16
2Tactel2-1 2Tactel2-2 2Tactel2-3 2Tactel2-4 2Tactel2-5 ... 2Tactel2-16
2Tactel3-1 2Tactel3-2 2Tactel3-3 2Tactel3-4 2Tactel3-5 ... 2Tactel3-16
...
2Tactel16-1 2Tactel16-2 2Tactel16-3 2Tactel16-4 2Tactel16-5 ... 2Tactel16-16

...

FuerzanZ FuerzanX FuerzanY
nTactel1-1 nTactel1-2 nTactel1-3 nTactel1-4 nTactel1-5 ... nTactel1-16
nTactel2-1 nTactel2-2 nTactel2-3 nTactel2-4 nTactel2-5 ... nTactel2-16
nTactel3-1 nTactel3-2 nTactel3-3 nTactel3-4 nTactel3-5 ... nTactel3-16
...
nTactel16-1 nTactel16-2 nTactel16-3 nTactel16-4 nTactel16-5 ... nTactel16-16

```

- “nombre de fichero_Zlocations.txt”

Al mismo tiempo que el archivo anterior y siguiendo el mismo patrón con respecto al nombre se crea este archivo que contiene la información de las posiciones, en valor absoluto y en μ pasos del émbolo que contiene el sensor de referencia, en las que se ha realizado una medida. En cada línea se almacena una posición. Para el caso de la

prueba descrita en el archivo anterior, el nombre de este fichero sería “SME1v2A_2x3_4_Zlocations.txt” y tendría el siguiente aspecto:

Pasos1

Pasos2

...

Pasosn

- “nombre de fichero_time.txt”

En caso de realizar una prueba de deriva, junto con el primer archivo descrito se genera otro con la información del tiempo en el que se han registrado las medidas. En el fichero de tiempos se almacena en cada línea la hora en la que se ha tomado cada medida en el formato hora:minutos:segundos, los segundos se expresa con 3 puntos decimales. Un fichero de una prueba en la que se han tomado 9 medidas tendría la siguiente forma:

18:42:34,406

18:42:45,437

18:42:56,468

18:43:07,593

18:43:18,953

18:43:29,984

18:43:41,000

18:43:52,031

18:44:03,046

Referencias

Aguilar, R.N. y Meijer, G.C.M. 2002. Fast interface electronics for a resistive touch-screen. *Sensors, 2002. Proceedings of IEEE*. S.l.: s.n., pp. 1360 - 1363 vol.2.

Amarasinghe, Y.W.R., Kulasekera, A.L. y Priyadarshana, T.G.P. 2013. Quantum Tunneling Composite (QTC) based tactile sensor array for dynamic pressure distribution measurement. (En línea). S.l.: IEEE, pp. 1-4. [Consultado: 24 noviembre 2015]. ISBN 978-1-4673-5222-2. Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6727794>.

Archard, J.F. 1957. Elastic Deformation and the Laws of Friction. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, vol. 243, no. 1233, pp. 190-205. ISSN 0080-4630.

ATI Industrial Automation 2015. ATI Industrial Automation: F/T Sensor Nano17. (En línea). [Consultado: 17 octubre 2015]. Disponible en: http://www.atia.com/products/ft/ft_models.aspx?id=Nano17.

Barber, J.R. 2003. Bounds on the electrical resistance between contacting elastic rough bodies. *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 459, no. 2029, pp. 53-66. ISSN 1364-5021, 1471-2946. DOI 10.1098/rspa.2002.1038.

Barber, J.R. 2013. Incremental stiffness and electrical contact conductance in the contact of rough finite bodies. *Physical Review E*, vol. 87, no. 1, pp. 013203. DOI 10.1103/PhysRevE.87.013203.

Baumbach, P. L. 1981. Patent number 2 073891. 2 073891. 2 073891.

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. *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*, vol. 13, no. 2, pp. 158 -168. ISSN 1083-4435. DOI 10.1109/TMECH.2008.918483.

Bekhti, R., Duchaine, V. y Cardou, P. 2014. Miniature capacitive three-axis force sensor. *Intelligent Robots and Systems (IROS 2014), 2014 IEEE/RSJ International Conference on* (En línea). S.l.: IEEE, pp. 3939–3946. [Consultado: 29 enero 2015]. Disponible en: http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6943116.

Bumper Specialties, Inc. 2015. Self-Adhesive Molded Polyurethane Bumpers. (En línea). [Consultado: 17 octubre 2015]. Disponible en: <http://www.bumperspecialties.com/>.

Buyuksahin, U. y Kirli, A. 2014. Multi point, high sensitive tactile sensing module for robots and devices. *2014 IEEE SENSORS*. S.l.: s.n., pp. 366-369.

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. *Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems, 2006 IEEE International Conference on*. S.l.: s.n., pp. 160 -166.

Cannata, G., Maggiali, M., Metta, G. y Sandini, G. 2008. An embedded artificial skin for humanoid robots. *IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems, 2008. MFI 2008*. Seoul, Korea: IEEE, pp. 434-438. ISBN 978-1-4244-2143-5.

Castellanos, J., Navas-Gonzalez, R., Ochoteco, E. y Vidal-Verdu, F. 2008. Evaluation of a low cost piezoresistive material for high resolution tactile sensors. *2008 2nd European Conference Exhibition on Integration Issues of Miniaturized Systems - MOMS, MOEMS, ICS and Electronic Components (SSI)*. Barcelona, Spain: s.n., pp. 1-3. ISBN 978-3-8007-3081-0.

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.

Castellanos-Ramos, J., Navas-González, R., Ochoteco, E. y Vidal-Verdú, F. 2011. Finite element analysis of tactile sensors made with screen printing technology. *Proc. SPIE 8068, Bioelectronics, Biomedical, and Bioinspired Systems V; and Nanotechnology V* (En línea). Prague, Czech Republic: s.n., pp. 806804-1-806804-10. [Consultado: 1 agosto 2015]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1117/12.890092>.

Chen, A., Lin, K.-L., Hong, C.-C., Liou, T.-M., Shieh, J. y Chen, S.-H. 2012. Flexible tactile sensors based on nanoimprinted sub-20 NM piezoelectric copolymer nanoglass films. *2012 IEEE Sensors*. S.l.: s.n., pp. 1-4.

Cheng, M.-Y., Lin, C.-L. y Yang, Y.-J. 2010. Tactile and shear stress sensing array using capacitive mechanisms with floating electrodes. *Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), 2010 IEEE 23rd International Conference on* (En línea). S.l.: IEEE, pp. 228–231. [Consultado: 24 septiembre 2015]. Disponible en: http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5442525.

Chen, T.-Y., Wang, Y.-C., Lo, C.-Y. y Chen, R. 2011. A novel integrated transparent flexible tactile sensor. *Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference (TRANSDUCERS), 2011 16th International* (En línea). S.l.: IEEE, pp. 1052–1055. [Consultado: 24 septiembre 2015]. Disponible en: http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5969170.

Chu, Z., Sarro, P.M. y Middelhoek, S. 1995. Silicon Three-axial Tactile Sensor. , vol. 1, pp. 656-659. DOI 10.1109/SENSOR.1995.717315.

Ciavarella, M., Delfine, V. y Demelio, G. 2006. A «re-vitalized» Greenwood and Williamson model of elastic contact between fractal surfaces. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, vol. 54, no. 12, pp. 2569-2591. ISSN 0022-5096. DOI 10.1016/j.jmps.2006.05.006.

Ciavarella, M., Dibello, S. y Demelio, G. 2008. Conductance of rough random profiles. *International Journal of Solids and Structures*, vol. 45, no. 3-4, pp. 879-893. ISSN 0020-7683. DOI 10.1016/j.ijsolstr.2007.09.009.

Ciavarella, M., Murolo, G., Demelio, G. y Barber, J.R. 2004. Elastic contact stiffness and contact resistance for the Weierstrass profile. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, vol. 52, no. 6, pp. 1247-1265. ISSN 0022-5096. DOI 10.1016/j.jmps.2003.12.002.

Cidetec 2015. Centro Tecnológico CIDETEC. (En línea). [Consultado: 20 octubre 2015]. Disponible en: <http://www.cidetec.es/cas/sensores.aspx>.

Cowie, B.M., Webb, D.J., Tam, B., Slack, P. y Brett, P.N. 2007. Fibre Bragg grating sensors for distributive tactile sensing. *Measurement Science and Technology*, vol. 18, no. 1, pp. 138-146. ISSN 0957-0233, 1361-6501. DOI 10.1088/0957-0233/18/1/017.

Crouch, E., Cowell, D.C., Hoskins, S., Pittson, R.W. y Hart, J.P. 2005. A novel, disposable, screen-printed amperometric biosensor for glucose in serum fabricated using a water-based carbon ink. *Biosensors and Bioelectronics*, vol. 21, no. 5, pp. 712-718. ISSN 0956-5663. DOI 10.1016/j.bios.2005.01.003.

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, 1558-1748. 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. 1991. Tactile sensing: Technology and applications. *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 26, no. 1-3, pp. 251-256. ISSN 0924-4247. DOI 10.1016/0924-4247(91)87001-J.

De Maria, G., Natale, C. y Pirozzi, S. 2012. Force/tactile sensor for robotic applications. *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 175, pp. 60-72. ISSN 09244247. DOI 10.1016/j.sna.2011.12.042.

Drimus, A., Jankovics, V., Gorsic, M. y Mátéfi-Tempfli, S. 2014. Novel high resolution tactile robotic fingertips. *SENSORS, 2014 IEEE* (En línea). S.l.: IEEE, pp. 791-794. [Consultado: 4 septiembre 2015]. Disponible en: http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6985118.

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.

Edin, B.B., Ascari, L., Beccai, L., Roccella, S., Cabibihan, J.-J. y Carrozza, M.C. 2008. Bio-inspired sensorization of a biomechatronic robot hand for the grasp-and-lift task. *Brain Research Bulletin*, vol. 75, no. 6, pp. 785-795. ISSN 03619230. DOI 10.1016/j.brainresbull.2008.01.017.

Eltaib, M.E.H. y Hewit, J.R. 2003. Tactile sensing technology for minimal access surgery—a review. *Mechatronics*, vol. 13, no. 10, pp. 1163-1177. ISSN 0957-4158. DOI 10.1016/S0957-4158(03)00048-5.

Engel, J., Chen, J., Fan, Z. y Liu, C. 2005. Polymer micromachined multimodal tactile sensors. *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 117, no. 1, pp. 50-61. ISSN 0924-4247. DOI 10.1016/j.sna.2004.05.037.

Engel, J., Chen, J. y Liu, C. 2003. Development of polyimide flexible tactile sensor skin. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 13, no. 3, pp. 359-366. ISSN 0960-1317. DOI 10.1088/0960-1317/13/3/302.

Engel, J., Chen, N., Tucker, C., Liu, C., Kim, S.-H. y Jones, D. 2006. Flexible Multimodal Tactile Sensing System for Object Identification. *5th IEEE Conference on Sensors, 2006*. S.l.: s.n., pp. 563-566.

Franklin N. Eventoff 1982. Electronic pressure sensitive transducer apparatus. US4314227 A. (En línea). US4314227 A. [Consultado: 15 septiembre 2015]. US4314227 A. Disponible en: <http://www.google.com/patents/US4314227>. US 06/078,323

García-Cerezo, A. 2015. Mobile Robotic Assistant for Exploration and Rescue Missions. (En línea). [Consultado: 17 octubre 2015]. Disponible en: <http://www.isa.uma.es/C8/Alacrane/default.aspx>.

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*. Kobe, Japan: s.n., pp. 895-901.

Gray, B.L. y Fearing, R.S. 1996. A surface micromachined microtactile sensor array. *Robotics and Automation, 1996. Proceedings., 1996 IEEE International Conference on*. S.l.: s.n., pp. 1 -6 vol.1.

Greenwood, J.A. 1966. Constriction resistance and the real area of contact. *British Journal of Applied Physics*, vol. 17, no. 12, pp. 1621-1632. ISSN 0508-3443. DOI 10.1088/0508-3443/17/12/310.

Greenwood, J.A. y Williamson, J.B.P. 1966. Contact of Nominally Flat Surfaces. *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 295, no. 1442, pp. 300-319. ISSN 1364-5021, 1471-2946. DOI 10.1098/rspa.1966.0242.

Greenwood, J.A. y Wu, J.J. 2001. Surface Roughness and Contact: An Apology. *Meccanica*, vol. 36, no. 6, pp. 617-630. ISSN 0025-6455, 1572-9648. DOI 10.1023/A:1016340601964.

Harada, K., Tsuji, T., Uto, S., Yamanobe, N., Nagata, K. y Kitagaki, K. 2014. Stability of soft-finger grasp under gravity. *2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. Hong Kong, China: s.n., pp. 883-888.

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. En: PMID: 19742084PMCID: PMC2723691, *The Iowa Orthopaedic Journal*, vol. 29, pp. 43-47. ISSN 1541-5457.

Hellard, G. y Russell, R.A. 2006. A tactile sensor array that also grasps objects. *Proceedings of the Australasian conference on robotics and automation* (En línea). S.l.: s.n., pp. 6-8. [Consultado: 27 abril 2015]. Disponible en: http://www.araa.asn.au/acra/acra2006/papers/paper_5_2.pdf.

Ho, C., Su, W.-S., Hu, C.-F., Lin, C.-M., Fang, W. y Yang, F.-L. 2010. A flexible, highly-sensitive, and easily-fabricated carbon-nanotubes tactile sensor on polymer substrate. *Solid-State and Integrated Circuit Technology (ICSICT), 2010 10th IEEE International Conference on* (En línea). S.l.: IEEE, pp. 1388-1391. [Consultado: 24 noviembre 2015]. Disponible en: http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5667624.

Hollinger, A. y Wanderley, M.M. 2006. Evaluation of commercial force-sensing resistors. *Proceedings of International Conference on New Interfaces for Musical Expression* (En línea). S.l.: Citeseer, [Consultado: 12 mayo 2015]. Disponible en: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.186.4191&rep=rep1&type=pdf>.

Honeywell 2015. Honeywell - Sensing and Control. (En línea). [Consultado: 17 octubre 2015]. Disponible en: <http://sensing.honeywell.es/products/force-sensors4?Ne=2308&N=3471>.

Hou, J., Bonser, R.H. y Jeronimidis, G. 2012. Developing tactile sensors for a soft-bodied robot. *Robotics and Biomimetics (ROBIO), 2012 IEEE International Conference on* (En línea). S.l.: IEEE, pp. 1979-1984. [Consultado: 24 noviembre 2015]. Disponible en: http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6491258.

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. DOI 10.1007/s00542-010-1091-z.

Hu, C.-F., Huang, H.-Y., Wen, C.-C., Lin, L.-Y. y Fang, W. 2010. Implementation of a flexible silicon-based tactile sensor array. *Sensors, 2010 IEEE* (En línea). S.l.: IEEE, pp. 1736-1739. [Consultado: 24 noviembre 2015]. Disponible en: http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5689897.

Hussain, M., Choa, Y.-H. y Niihara, K. 2001. Conductive rubber materials for pressure sensors. *Journal of Materials Science Letters*, vol. 20, no. 6, pp. 525-527. ISSN 0261-8028. DOI 10.1023/A:1010972315505.

Hwang, E.-S., Seo, J.-H. y Kim, Y.-J. 2006. A Polymer-Based Flexible Tactile Sensor for Normal and Shear Load Detection. *Micro Electro Mechanical Systems, 2006. MEMS 2006 Istanbul. 19th IEEE International Conference on*. S.l.: s.n., pp. 714 -717.

Hwang, E.-S., Seo, J. y Kim, Y.-J. 2007. A Polymer-Based Flexible Tactile Sensor for Both Normal and Shear Load Detections and Its Application for Robotics. *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 16, no. 3, pp. 556-563. ISSN 1057-7157. DOI 10.1109/JMEMS.2007.896716.

Hyun, S., Pei, L., Molinari, J.-F. y Robbins, M.O. 2004. Finite-element analysis of contact between elastic self-affine surfaces. *Physical Review E*, vol. 70, no. 2, pp. 026117. DOI 10.1103/PhysRevE.70.026117.

Interlink Electronics 2015. Interlink Electronics. (En línea). [Consultado: 17 octubre 2015]. Disponible en: <http://www.interlinkelectronics.com/standard-products.php>.

Iwata, H. y Sugano, S. 2002. Whole-body covering tactile interface for human robot coordination. *IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2002. Proceedings. ICRA '02*. S.l.: s.n., pp. 3818-3824 vol.4.

Jamali, N. y Sammut, C. 2010. Material classification by tactile sensing using surface textures. *2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. S.l.: s.n., pp. 2336-2341.

Jian Him Shan, Tao Mei, Lei Sun, De Yi Kong, Zheng Yong Zhang hu, Lin Ni, Max Meng y Jia Ru Chu 2005. The design and fabrication of a flexible three-dimensional force sensor skin. , pp. 1818- 1823. DOI 10.1109/IROS.2005.1545265.

Jockusch, J., Walter, J. y Ritter, H. 1997. A tactile sensor system for a three-fingered robot manipulator. , *1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1997. Proceedings*. Albuquerque, New Mexico, USA: s.n., pp. 3080-3086 vol.4.

Johan Tegin y Jan Wikander 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.

Jordan, A. y Buttgenbach, S. 2012. A new material concept for three-dimensional tactile piezoresistive force sensors. *Manipulation, Manufacturing and Measurement on the Nanoscale (3M-NANO), 2012 International Conference on* (En línea). S.l.: IEEE, pp. 196-199. [Consultado: 24 septiembre 2015]. Disponible en: http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6472942.

Jung, Y., Lee, D.-G., Park, J., Ko, H. y Lim, H. 2015. Piezoresistive Tactile Sensor Discriminating Multidirectional Forces. *Sensors*, vol. 15, no. 10, pp. 25463-25473. DOI 10.3390/s151025463.

Kalamdani, A., Messom, C. y Siegel, M. 2006. Tactile Sensing by the Sole of the Foot Part II: Calibration and Real-time Processing. *3rd Int. Conf. on Autonomous Robots and Agents* (En línea). Palmerston North, New Zealand: s.n., [Consultado: 15 septiembre 2015]. Disponible en: <http://repository.cmu.edu/robotics/929/>.

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. *Microelectromechanical Systems, Journal of*, 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.

Keithley Instruments Inc. 2015. KPCI-3104A/Documents - Keithley Instruments Inc. (En línea). [Consultado: 17 octubre 2015]. Disponible en: <http://www.keithley.de/products/accessories/ieee/usb/?path=KPCI-3104A/Documents>.

KERN & SOHN GmbH 2015. Precision balance 440 - KERN & SOHN GmbH. (En línea). [Consultado: 17 octubre 2015]. Disponible en: <http://www.kern-sohn.com/shop/en/laboratory-balances/precision-balances/440/>.

Kerpa, O., Weiss, K. y Worn, H. 2003. Development of a flexible tactile sensor system for a humanoid robot. *2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2003. (IROS 2003). Proceedings*. S.l.: s.n., pp. 1-6 vol.1.

Keysight Technologies 2015. 34401A Digital Multimeter, 6½ Digit | Keysight (Agilent). (En línea). [Consultado: 17 octubre 2015]. Disponible en: <http://www.keysight.com/en/pd-1000001295%3Aepsg%3Apro-pn-34401A/digital-multimeter-6-digit?cc=ES&lc=eng>.

Khan, S., Dahiya, R., Tinku, S. y Lorenzelli, L. 2014. Conformable tactile sensing using screen printed P (VDF-TrFE) and MWCNT-PDMS composites. *SENSORS, 2014 IEEE* (En línea). S.l.: IEEE, pp. 862–865. [Consultado: 24 noviembre 2015]. Disponible en: http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6985136.

Khan, S., Dang, W., Lorenzelli, L. y Dahiya, R. 2015. Flexible Pressure Sensors Based on Screen-Printed P(VDF-TrFE) and P(VDF-TrFE)/MWCNTs. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, vol. 28, no. 4, pp. 486-493. ISSN 0894-6507, 1558-2345. DOI 10.1109/TSM.2015.2468053.

Khan, S., Lorenzelli, L. y Dahiya, R.S. 2015. Technologies for Printing Sensors and Electronics Over Large Flexible Substrates: A Review. *IEEE Sensors Journal*, vol. 15, no. 6, pp. 3164-3185. ISSN 1530-437X, 1558-1748. DOI 10.1109/JSEN.2014.2375203.

Kilaru, R., Celik-Butler, Z., Butler, D.P. y Gonenli, I.E. 2013. NiCr MEMS Tactile Sensors Embedded in Polyimide Toward Smart Skin. *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 22, no. 2, pp. 349-355. ISSN 1057-7157, 1941-0158. DOI 10.1109/JMEMS.2012.2222867.

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.

Kirchmeyer, S. y Reuter, K. 2005. Scientific importance, properties and growing applications of poly(3,4-ethylenedioxythiophene). *Journal of Materials Chemistry*, vol. 15, no. 21, pp. 2077. ISSN 0959-9428, 1364-5501. DOI 10.1039/b417803n.

Kita, G., Shikida, M., Suzuki, Y., Tsuji, Y. y Sato, K. 2010. Large-sized fabric tactile sensors for detecting contacted objects. *Micro & Nano Letters*, vol. 5, no. 6, pp. 389. ISSN 17500443. DOI 10.1049/mnl.2010.0130.

Kobayashi, K., Ito, N., Mizuuchi, I., Okada, K. y Inaba, M. 2009. Design and realization of fingertiped and multifingered hand for pinching and rolling minute objects. *9th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, 2009. Humanoids 2009*. Paris, France: s.n., pp. 263-268.

Ko, W.H. y Wang, Q. 1997. Touch mode capacitive pressure sensors for industrial applications. *Micro Electro Mechanical Systems, 1997. MEMS '97, Proceedings, IEEE., Tenth Annual International Workshop on*. S.l.: s.n., pp. 284 -289.

Kwon, H.-J. y Choi, W.-C. 2010. Design and fabrication of a flexible three-axial tactile sensor array based on polyimide micromachining. *Microsystem Technologies*, vol. 16, no. 12, pp. 2029-2035. ISSN 0946-7076. DOI 10.1007/s00542-010-1125-6.

Lederman, S.J. y Browse, R.A. 1988. The Physiology and Psychophysics of Touch. En: P. Dario (ed.), *Sensors and Sensory Systems for Advanced Robots* (En línea). S.l.: Springer Berlin Heidelberg, NATO ASI Series, 43, pp. 71-91. [Consultado: 24 abril 2015]. ISBN 978-3-642-83412-7. Disponible en: http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-83410-3_4.

Lee, H.-K., Chang, S.-I. y Yoon, E. 2006. A Flexible Polymer Tactile Sensor: Fabrication and Modular Expandability for Large Area Deployment. *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 15, no. 6, pp. 1681-1686. ISSN 1057-7157. DOI 10.1109/JMEMS.2006.886021.

Lee, H.-K., Chung, J., Chang, S.-I. y Yoon, E. 2008. Normal and Shear Force Measurement Using a Flexible Polymer Tactile Sensor With Embedded Multiple Capacitors. *Microelectromechanical Systems, Journal of*, vol. 17, no. 4, pp. 934 -942. ISSN 1057-7157. DOI 10.1109/JMEMS.2008.921727.

Lee, J.-I., Pyo, S., Kim, M.-O., Chung, T., Lee, H.-K., Lim, S.-C., Park, J. y Kim, J.-H. 2013. Development of flexible tactile sensor based on contact resistance of integrated carbon nanotubes. *Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), 2013 IEEE 26th International Conference on* (En línea). S.l.: IEEE, pp. 37-40. [Consultado: 24 noviembre 2015]. Disponible en: http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6474170.

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. 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.

Leineweber, M., Pelz, G., Schmidt, M., Kappert, H. y Zimmer, G. 2000. New tactile sensor chip with silicone rubber cover. *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 84, no. 3, pp. 236-245. ISSN 0924-4247. DOI 10.1016/S0924-4247(00)00310-1.

Li, C., Wu, P.-M., Lee, S., Gorton, A., Schulz, M.J. y Ahn, C.H. 2008. Flexible Dome and Bump Shape Piezoelectric Tactile Sensors Using PVDF-TrFE Copolymer. *Microelectromechanical Systems, Journal of*, vol. 17, no. 2, pp. 334 -341. ISSN 1057-7157. DOI 10.1109/JMEMS.2007.911375.

Lin, F., McKnight, M., Dieffenderfer, J., Whitmire, E., Ghosh, T. y Bozkurt, A. 2014. Microfabricated impedance sensors for concurrent tactile, biopotential, and wetness

detection. *SENSORS, 2014 IEEE* (En línea). S.l.: IEEE, pp. 1312–1315. [Consultado: 24 noviembre 2015]. Disponible en: http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6985252.

Liu, C. C. 1987. Patent number 4 655. 4 655. 4 655.

Liu, H., Meusel, P. y Hirzinger, G. 1995. A tactile sensing system for the DLR three-finger robot hand. *ISMCR'95, 4. Int. Symposium on Measurement and Control in Robotics, S molenice Castle, Slovakia, June 12-16, 1995* (En línea). Oberpfaffenhofen: s.n., pp. pp. 91-96. Disponible en: <http://elib.dlr.de/28344/>.

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, R.H., Wang, L. y Beebe, D.J. 1998. Progress towards a smart skin: fabrication and preliminary testing. *Engineering in Medicine and Biology Society, 1998. Proceedings of the 20th Annual International Conference of the IEEE*. S.l.: s.n., pp. 1841 -1844 vol.4.

Liu, T., Inoue, Y. y Shibata, K. 2009. A Small and Low-Cost 3-D Tactile Sensor for a Wearable Force Plate. *IEEE Sensors Journal*, vol. 9, no. 9, pp. 1103-1110. ISSN 1530-437X. DOI 10.1109/JSEN.2009.2026509.

Liu, Y.-C., Sun, C.-M., Lin, L.-Y., Tsai, M.-H. y Fang, W. 2011. Development of a CMOS-Based Capacitive Tactile Sensor With Adjustable Sensing Range and Sensitivity Using Polymer Fill-In. *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 20, no. 1, pp. 119-127. ISSN 1057-7157, 1941-0158. DOI 10.1109/JMEMS.2010.2090494.

Lomas, T., Tuantranont, A. y Cheevasuvit, F. 2003. Micromachined piezoresistive tactile sensor array fabricated by bulk-etched MUMPs process. *Circuits and Systems, 2003. ISCAS '03. Proceedings of the 2003 International Symposium on*. S.l.: s.n., pp. IV-856 - IV-859 vol.4.

Lorenz, B. y Persson, B.N.J. 2009. Interfacial separation between elastic solids with randomly rough surfaces: comparison of experiment with theory. *Journal of Physics: Condensed Matter*, vol. 21, no. 1, pp. 015003. ISSN 0953-8984. DOI 10.1088/0953-8984/21/1/015003.

Maita, F., Maiolo, L., Pecora, A., Minotti, A., Fortunato, G., Smecca, E. y Alberti, A. 2014. Low-temperature flexible piezoelectric AlN capacitor integrated on ultra-flexible poly-Si TFT for advanced tactile sensing. *SENSORS, 2014 IEEE* (En línea). S.l.: IEEE, pp. 1730–1733. [Consultado: 24 noviembre 2015]. Disponible en: http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6985357.

Makihata, M., Tanaka, S., Muroyama, M., Matsuzaki, S., Yamada, H., Nakayama, T., Yamaguchi, U., Mima, K., Nonomura, Y., Fujiyoshi, M. y Esashi, M. 2012. Integration and packaging technology of MEMS-on-CMOS capacitive tactile sensor for robot application using thick BCB isolation layer and backside-grooved electrical connection. *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 188, pp. 103-110. ISSN 09244247. DOI 10.1016/j.sna.2012.04.032.

Mei, H., Wang, R., Wang, Z., Feng, J., Xia, Y. y Zhang, T. 2015. A flexible pressure-sensitive array based on soft substrate. *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 222, pp. 80-86. ISSN 09244247. DOI 10.1016/j.sna.2014.11.014.

Mei, T., Li, W.J., Ge, Y., Chen, Y., Ni, L. y Chan, M.H. 2000. An integrated MEMS three-dimensional tactile sensor with large force range. *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 80, no. 2, pp. 155-162. ISSN 0924-4247. DOI 10.1016/S0924-4247(99)00261-7.

Melchiorri, C. 2000. Slip detection and control using tactile and force sensors. *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*, vol. 5, no. 3, pp. 235 -243. ISSN 1083-4435. DOI 10.1109/3516.868914.

Mingrino, A., Bucci, A., Magni, R. y Dario, P. 1994. Slippage control in hand prostheses by sensing grasping forces and sliding motion. *Proceedings of the IEEE/RSJ/GI International Conference on Intelligent Robots and Systems '94. «Advanced Robotic Systems and the Real World», IROS '94*. S.l.: s.n., pp. 1803-1809 vol.3.

Mittendorfer, P. y Cheng, G. 2011. Humanoid Multimodal Tactile-Sensing Modules. *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 27, no. 3, pp. 401-410. ISSN 1552-3098, 1941-0468. DOI 10.1109/TRO.2011.2106330.

Mukai, T., Onishi, M., Odashima, T., Hirano, S. y Luo, Z. 2008. Development of the Tactile Sensor System of a Human-Interactive Robot #x201C;RI-MAN #x201D; *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 24, no. 2, pp. 505-512. ISSN 1552-3098. DOI 10.1109/TRO.2008.917006.

National Instruments 2015. NI USB-6259 BNC - National Instruments. (En línea). [Consultado: 17 octubre 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.

Nobili, A. 2012. Variational Approach to Beams Resting on Two-Parameter Tensionless Elastic Foundations. *Journal of Applied Mechanics*, vol. 79, no. 2, pp. 021010-021010. ISSN 0021-8936. DOI 10.1115/1.4005549.

Oballe-Peinado, O., Castellanos-Ramos, J., Hidalgo-Lopez, J.A. y Vidal-Verdu, F. 2009. Direct Interfaces for Smart Skins based on FPGAs. *Proceedings of SPIE, the International Society for Optical Engineering* (En línea). Dresden, Germany: s.n., [Consultado: 23 mayo 2012]. Disponible en: <http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=22130196>.

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 Biomechanics (BioRob)*. S.l.: s.n., pp. 112-117.

Obinata, G., Dutta, A., Watanabe, N. y Moriyam, N. 2007. Vision Based Tactile Sensor Using Transparent Elastic Fingertip for Dexterous Handling. En: S. Kolski (ed.), *Mobile Robots: Perception & Navigation* (En línea). S.l.: Pro Literatur Verlag, Germany / ARS, Austria, [Consultado: 11 mayo 2012]. ISBN 3-86611-283-1. Disponible en: http://www.intechopen.com/books/mobile_robots_perception_navigation/vision_based_tactile_sensor_using_transparent_elastic_fingertip_for_dexterous_handling.

Ochoteco, E., Pomposo, J.A., Sikora, T., Vidal, F., Martinez, F., Obieta, G. y Grande, H. 2007. 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.

Papakostas, T.V., Lima, J. y Lowe, M. 2002. A large area force sensor for smart skin applications. *Sensors, 2002. Proceedings of IEEE*. Orlando, Florida, USA: s.n., pp. 1620 - 1624 vol.2.

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.

Pastewka, L., Prodanov, N., Lorenz, B., Müser, M.H., Robbins, M.O. y Persson, B.N.J. 2013. Finite-size scaling in the interfacial stiffness of rough elastic contacts. *Physical Review E*, vol. 87, no. 6, pp. 062809. DOI 10.1103/PhysRevE.87.062809.

Pelletier, C.G.N., Dekkers, E.C.A., Govaert, L.E., Den Toonder, J.M.J. y Meijer, H.E.H. 2007. The influence of indenter-surface misalignment on the results of instrumented indentation tests. *Polymer Testing*, vol. 26, no. 7, pp. 949-959. ISSN 0142-9418. DOI 10.1016/j.polymertesting.2007.06.009.

Pneumax 2015. Regulador de presión proporcional. *Pneumax* (En línea). [Consultado: 17 octubre 2015]. Disponible en: <http://www.pneumaxspa.com/ESP/Default.aspx?MOD=CTG&SEZ=2&PAG=3&CAT=470&PRD=299>.

Pohrt, R. y Popov, V.L. 2012. Normal Contact Stiffness of Elastic Solids with Fractal Rough Surfaces. *Physical Review Letters*, vol. 108, no. 10, pp. 104301. DOI 10.1103/PhysRevLett.108.104301.

Pomposo, J.-A., Ochoteco, E., Pozo, C., Carrasco, P.-M., Grande, H.-J. y Rodríguez, F.-J. 2006. Conductivity enhancement in raw polypyrrole and polypyrrole nanoparticle dispersions. *Polymers for Advanced Technologies*, vol. 17, no. 1, pp. 26-29. ISSN 1099-1581. DOI 10.1002/pat.692.

Pressure Profile Systems, Inc. 2015. Tactile Sensors and Pressure Mapping Solutions. *Pressure Profile Systems* (En línea). [Consultado: 1 agosto 2015]. Disponible en: <http://www.pressureprofile.com/>.

Rocha, J.G. y Lanceros-Mendez, S. 2008a. *Sensors: focus on tactile force and stress sensors*. Croatia: In-Teh. ISBN 978-953-7619-31-2.

Rocha, J.G. y Lanceros-Mendez, S. 2008b. Three Dimensional Capacitive Force Sensor for Tactile Applications. En: J.G. Rocha y S. Lanceros-Mendez (eds.), *Sensors: Focus on Tactile Force and Stress Sensors* (En línea). S.l.: InTech, [Consultado: 24 noviembre 2015]. ISBN 978-953-7619-31-2. Disponible en: http://www.intechopen.com/books/sensors-focus-on-tactile-force-and-stress-sensors/three_dimensional_capacitive_force_sensor_for_tactile_applications.

Salo, T., Vancura, T., Brand, O. y Balthes, H. 2003. CMOS-based sealed membranes for medical tactile sensor arrays. *Micro Electro Mechanical Systems, 2003. MEMS-03 Kyoto. IEEE The Sixteenth Annual International Conference on*. S.l.: s.n., pp. 590 - 593.

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.

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.

Sanyo Denki 2015. SANMOTION -SANYO DENKI GLOBAL SITE-. (En línea). [Consultado: 17 octubre 2015]. Disponible en: http://www.sanyodenki.com/contents/product_information/sanmotion/list_01.html.

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., Bonino, B. y Metta, G. 2010. A tactile sensor for the fingertips of the humanoid robot icub. *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2010 IEEE/RSJ International Conference on* (En línea). S.l.: IEEE, pp. 2212-2217. [Consultado: 24 noviembre 2015]. Disponible en: http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5648838.

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.

Seminara, L., Pinna, L., Ibrahim, A., Noli, L., Capurro, M., Caviglia, S., Gastaldo, P. y Valle, M. 2014. Electronic Skin: Achievements, Issues and Trends. *Procedia Technology*, vol. 15, pp. 549-558. ISSN 22120173. DOI 10.1016/j.protcy.2014.09.015.

Sensitronics 2015. Sensitronics. (En línea). [Consultado: 11 septiembre 2015]. Disponible en: <http://www.sensitronics.com/products.php>.

Shadow, P.H. 2012. QTC™ Material Technology. (En línea). [Consultado: 11 septiembre 2015]. Disponible en: <http://www.peratech.com/qtc-technology.html>.

Shan, J.H., Mei, T., Sun, L., Kong, D.Y., Zhang, Z.Y., Ni, L., Meng, M. y Chu, J.R. 2005. The design and fabrication of a flexible three-dimensional force sensor skin. *Intelligent Robots and Systems, 2005.(IROS 2005). 2005 IEEE/RSJ International Conference on* (En línea). S.l.: IEEE, pp. 1818-1823. [Consultado: 22 septiembre 2015]. Disponible en: http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1545265.

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. *Sensors Journal, IEEE*, vol. 4, no. 5, pp. 589 - 596. ISSN 1530-437X. DOI 10.1109/JSEN.2004.833152.

Shirafuji, S. y Hosoda, K. 2014. Detection and prevention of slip using sensors with different properties embedded in elastic artificial skin on the basis of previous experience. *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 62, no. 1, pp. 46-52. ISSN 09218890. DOI 10.1016/j.robot.2012.07.016.

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.

Sohgawa, M., Watanabe, K., Kanashima, T., Okuyama, M., Abe, T., Noma, H. y Azuma, T. 2014. Texture measurement and identification of object surface by MEMS tactile sensor. *SENSORS, 2014 IEEE* (En línea). S.l.: IEEE, pp. 1706–1709. [Consultado: 24 noviembre 2015]. Disponible en: http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6985351.

Someya, T., Sekitani, T., Iba, S., Kato, Y., Kawaguchi, H. y Sakurai, T. 2004. A large-area, flexible pressure sensor matrix with organic field-effect transistors for artificial skin applications. En: PMID: 15226508, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 101, no. 27, pp. 9966-9970. ISSN 0027-8424, 1091-6490. DOI 10.1073/pnas.0401918101.

Strohmayr, M.W., Saal, H.P., Potdar, A.H. y Van der Smagt, P. 2010. The DLR touch sensor I: A flexible tactile sensor for robotic hands based on a crossed-wire approach. *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2010 IEEE/RSJ International Conference on* (En línea). S.l.: IEEE, pp. 897–903. [Consultado: 26 noviembre 2015]. Disponible en: http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5650191.

Strohmayr, M.W., Worn, H. y Hirzinger, G. 2013. The DLR artificial skin step I: Uniting sensitivity and collision tolerance. *2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. Karlsruhe, Germany: s.n., pp. 1012-1018.

Suzuki, M., Takahashi, T. y Aoyagi, S. 2012. Flexible Tactile Sensor Using Polyurethane Thin Film. *Micromachines*, vol. 3, no. 4, pp. 315-324. ISSN 2072-666X. DOI 10.3390/mi3020315.

Tada, Y., Hosoda, K., Yamasaki, Y. y Asada, M. 2003. Sensing the texture of surfaces by anthropomorphic soft fingertips with multi-modal sensors. *2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2003. (IROS 2003). Proceedings*. S.l.: s.n., pp. 31-35 vol.1.

Taylor Hobson Ltd 2015. Taylor Hobson - Surface Profilers | Surface Profilometer. (En línea). [Consultado: 1 agosto 2015]. Disponible en: <http://www.taylor-hobson.com/products/13/107.html>.

Tee, B.C.-K., Chortos, A., Berndt, A., Nguyen, A.K., Tom, A., McGuire, A., Lin, Z.C., Tien, K., Bae, W.-G., Wang, H., Mei, P., Chou, H.-H., Cui, B., Deisseroth, K., Ng, T.N. y Bao, Z. 2015. A skin-inspired organic digital mechanoreceptor. En: PMID: 26472906, *Science*, vol. 350, no. 6258, pp. 313-316. ISSN 0036-8075, 1095-9203. DOI 10.1126/science.aaa9306.

Tekscan 2015a. PB100E Equilibration Device. *Tekscan* (En línea). [Consultado: 17 octubre 2015]. Disponible en: <https://www.tekscan.com/products-solutions/equilibrators/pb100e-equilibration-device>.

Tekscan 2015b. Tekscan | Pressure Mapping, Force Measurement, & Tactile Sensors. *Tekscan* (En línea). [Consultado: 1 agosto 2015]. Disponible en: <https://www.tekscan.com/>.

THIEME GmbH & Co. KG 2015. THIEME 1000E. (En línea). [Consultado: 1 agosto 2015]. Disponible en: <http://www.thieme.eu/en/thieme-1000e-screen-printing-machine>.

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.

Tiwana, M.I., Shashank, A., Redmond, S.J. y Lovell, N.H. 2011. Characterization of a capacitive tactile shear sensor for application in robotic and upper limb prostheses. *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 165, no. 2, pp. 164-172. ISSN 09244247. DOI 10.1016/j.sna.2010.09.012.

Trujillo-León, A. y Vidal-Verdú, F. 2014. Driving Interface Based on Tactile Sensors for Electric Wheelchairs or Trolleys. *Sensors*, vol. 14, no. 2, pp. 2644-2662. DOI 10.3390/s140202644.

Vásárhelyi, G., Fodor, B. y Roska, T. 2007. Tactile sensing-processing: Interface-cover geometry and the inverse-elastic problem. *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 140, no. 1, pp. 8-18. ISSN 0924-4247. DOI 10.1016/j.sna.2007.05.028.

Vecchi, F., Freschi, C., Micera, S., Sabatini, A.M., Dario, P., Sacchetti, R. y Others 2000. Experimental evaluation of two commercial force sensors for applications in biomechanics and motor control. *5th Ann. Conf. of Int. FES* (En línea). S.l.: s.n., [Consultado: 17 octubre 2015]. Disponible en: http://www.researchgate.net/profile/Silvestro_Micera/publication/228790680_Experimental_evaluation_of_two_commercial_force_sensors_for_applications_in_biomechanics_and_motor_control/links/0fcfd50c058ed8272c000000.pdf.

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. *Sensors*, vol. 11, no. 5, pp. 5489-5507. ISSN 1424-8220. DOI 10.3390/s110505489.

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. *Sensors*, vol. 11, no. 3, pp. 3249-3266. DOI 10.3390/s110303249.

Wang, L. y Beebe, D.J. 2000. A silicon-based shear force sensor: development and characterization. *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 84, no. 1-2, pp. 33-44. ISSN 0924-4247. DOI 10.1016/S0924-4247(99)00342-8.

Wang, L., Ding, T. y Wang, P. 2009. Thin Flexible Pressure Sensor Array Based on Carbon Black/Silicone Rubber Nanocomposite. *IEEE Sensors Journal*, vol. 9, no. 9, pp. 1130-1135. ISSN 1530-437X. DOI 10.1109/JSEN.2009.2026467.

Weinstein, S. 1968. Intensive and Extensive Aspects of Tactile Sensitivity as a Function of Body Part, Sex and Laterality. *The Skin Senses: Proceedings*, pp. 195-218.

Weiss, K. y Wörn, H. 2004. Tactile Sensor System for an Anthropomorphic Robotic Hand. *IEEE International Conference on Manipulation and Grasping* (En línea). Genua, Italy: s.n., [Consultado: 23 mayo 2012]. Disponible en: <http://www.docstoc.com/docs/29690837/Tactile-Sensor-System-for-an-Anthropomorphic-Robotic-Hand>.

Weiss, K. y Worn, H. 2005. The working principle of resistive tactile sensor cells. *Mechatronics and Automation, 2005 IEEE International Conference*. Niagara Falls, Canada: s.n., pp. 471-476 Vol. 1.

Weiss Robotics 2015. Weiss Robotics GmbH & Co. KG. (En línea). [Consultado: 15 septiembre 2015]. Disponible en: <http://www.weiss-robotics.de/en/>.

Wen, C.-C. y Fang, W. 2008. Tuning the sensing range and sensitivity of three axes tactile sensors using the polymer composite membrane. *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 145-146, no. 0, pp. 14-22. ISSN 0924-4247. DOI 10.1016/j.sna.2007.10.011.

WIKA España 2015. Transmisor de presión - A-10 - WIKA España. (En línea). [Consultado: 17 octubre 2015]. Disponible en: http://www.wika.es/a_10_es_es.WIKA.

Wisitsoraat, A., Patthanasetakul, V., Lomas, T. y Tuantranont, A. 2007. Low cost thin film based piezoresistive MEMS tactile sensor. *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 139, no. 1-2, pp. 17-22. ISSN 0924-4247. DOI 10.1016/j.sna.2006.10.037.

Wolffenbuttel, M.R. 1994. *Surface Micromachined Capacitive Tactile Image Sensor*. S.l.: Delft Univ Pr. ISBN 90-6275-967-X.

Yang, Y.-J., Cheng, M.-Y., Shih, S.-C., Huang, X.-H., Tsao, C.-M., Chang, F.-Y. y Fan, K.-C. 2009. A 32 × 32 temperature and tactile sensing array using PI-copper films. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 46, no. 9-12, pp. 945-956. ISSN 0268-3768, 1433-3015. DOI 10.1007/s00170-009-1940-z.

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.

Yoshikai, T., Hayashi, M., Kadowaki, A., Goto, T. y Inaba, M. 2009. Design and development of a humanoid with Soft 3D-deformable sensor flesh and automatic recoverable mechanical overload protection mechanism. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2009. IROS 2009*. S.l.: s.n., pp. 4977 -4983.

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 0924-4247. DOI 10.1016/j.sna.2011.02.038.

Zaber 2015a. Linear Actuator T-LA60A. (En línea). [Consultado: 17 octubre 2015]. Disponible en: http://www.zaber.com/products/product_detail.php?detail=T-LA60A.

Zaber 2015b. Linear Actuator T-NA08A50. (En línea). [Consultado: 17 octubre 2015]. Disponible en: http://www.zaber.com/products/product_detail.php?detail=T-NA08A50.

Zhang, X.-E. 2004. *Screen printing methods for biosensor production*. J. Cooper and T. Cass. S.I.: Oxford University Press, USA. Biosensors 2nd. Chapter 3. ISBN 978-0-19-153869-8.