



Universidad Carlos III de Madrid

Departamento de Departamento de Sistemas y Automática

TESIS DOCTORAL

*Metodología de diseño de manos robóticas basada
en los estados de su sistema accionador*

Autor: Ramiro Cabás

Director: Dr. Carlos Balaguer Bernaldo de Quiros

23 de enero de 2011

Universidad Carlos III de Madrid

Publication Data:

Ramiro Cabás

Metodología de diseño de manos robóticas basada en los
estados de su sistema accionador

Universidad Carlos III de Madrid

Copyright ©2011 Ramiro Cabás

TESIS DOCTORAL

Metodología de diseño de manos robóticas basada en los estados de su sistema accionador

Autor: **Ramiro Cabás**

Director: **Carlos Balaguer Bernardo de Quiroz**

Firma del Tribunal Calificador:

	Nombre y Apellidos	Firma
Presidente:		
Vocal:		
Vocal:		
Vocal:		
Secretario:		

Calificación:

Leganés, de de 2011.

A mis hijos...

Agradecimientos

Antes que nada quiero agradecer a mi tutor Carlos no solo por haberme guiado en este proyecto sino también por haberme permitido entrar en este mundo de la robótica desde un punto de vista diferente que ha sido una aventura realmente enriquecedora y por darme el apoyo en todas y cada una de las ideas y proyectos que se me venían a la mente, cuando muchas veces los recursos no eran suficiente. Simplemente muchas gracias por la confianza.

A Luigi por su imprescindible traspaso de conocimiento y profesionalidad a lo largo del proyecto. A Lorenzo por su asesoramiento matemático que dio forma a una idea que simplemente parecía no tenerla.

A mi amigo Diego con el cual compartimos un sin fin de *tormentas de ideas* interminables y de las cuales ha salido parte de los conceptos que han encaminado este trabajo y por su apoyo a lo largo del mismo.

He de agradecer a los ingenieros a los que he dirigido su Proyecto fin de carrera y que su trabajo ha aportado un grano de arena muy importante en este proyecto: Ana, Diana, Luis, Manuel, Marcelo, Rubén y Victor.

Al grupo de investigación del brazo robótico ASIBOT: Antonio, Alberto y Raúl. Gracias por esos grandes momentos en los que me hacían cumplir el sueño de *construir un robot*.

A todas las personas del Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, especialmente a María por ser una gran investigadora y ante todo una gran amiga.

A los integrantes de la Oficina Técnica Jose y Angela quienes han sido claves a la hora de ejecutar mis ideas materialmente, y me permitieron avanzar sin pausa.

A Cecilia, que frente a mi muy mala redacción cada noche se quedaba junto a mi para revisar mis escritos y a Luis María y Chelita que lo hacían a la distancia, y en conjunto lograron que se pueda entender.

Por su puesto a mi mujer, por haber aceptado transitar este camino juntos y hacer que sea una de las personas mas importantes en mi vida y sobre todo por su incansable apoyo. A mis dos hijos Albertina y Fabricio que me muestran día a día lo pequeño que puede ser este proyecto frente al tan bonito de construir una familia y quienes espero este trabajo en el futuro les transmita ganas de tener pasión por algo.

Por supuesto a mis padres, que sin su sacrificio y apoyo desinteresado nada de esto hubiese podido pasar y a quienes respeto y admiro. Mi hermano Luigi por ser el barco que abre el camino y aprovecharme de él para que el mio sea mas sencillo y a mi hermana Candelaria que sin tener un barco sé que navega junto a mi en todos mis proyectos.

A mi madre por haberme comprado maderas, a mis tíos y abuelos por haberme regalado motores viejos y a mi padre por haberme ayudado a construir mi primer *robot* y permitirme a los 7 años soñar que realmente lo estaba consiguiendo.

A los amigos que han llenado esos pequeños espacios vacíos con momentos únicos, amigos cercanos y a la distancia.

Y finalmente agradecer a todas aquellas pizarras llenas de diseños, garabatos, letras, símbolos y números que han dado forma a un sin fin de ideas, de las cuales muchas no han podido ser plasmadas en este trabajo pero que sin embargo han sido compartidas con personas muy importantes para la finalización del mismo.

A todos, muchas gracias por haber estado presentes a lo largo de este gran proyecto de vida que es una tesis doctoral y que comienza cuando uno aprende a respirar.

Resumen

La mano humana es una de las herramientas más asombrosas de la naturaleza, tanto que no ha podido ser superada en ningún aspecto hasta el momento.

Siendo el principal medio por el cual se ha creado y construido, directa o indirectamente, todo lo artificial que actualmente nos rodea, es natural pensar de que gran parte de la comunidad científica relacionada con la robótica dedique grandes esfuerzos por imitarla.

En la actualidad se puede realizar un extenso catálogo de manos robóticas desarrolladas y todas buscan resolver un determinado comportamiento de la mano humana, aún así, éstas se pueden dividir en tres grupos bien definidos: las pinzas robóticas, de las cuales se caracterizan por su aplicación industrial en tareas de agarre firme de elementos específicos y por su robustez, precio y vida útil; por otro lado, están las manos robóticas subactuadas en las que se buscan mecanismos cada vez más complejos que hagan disminuir la cantidad de actuadores y la complejidad de su sistema de control a favor de mejorar la funcionalidad de las pinzas robóticas en lo que se refiere a extender su capacidad de agarre a objetos con formas y tamaños cada vez más diferentes; y finalmente encontramos las demás manos robóticas en las que su objetivo es la experimentación de un determinado comportamiento de la mano humana más centrada en las tareas de manipulación.

Esta tesis propone una metodología de diseño de manos robóticas desde un punto de vista particular, que es el de los estados que puede ofrecer su sistema de accionamiento, teniendo en cuenta la capacidad de combinarlos y hacerlos independientes. Los elementos móviles que componen una mano robótica son accionados por un actuador o conjunto de actuadores. El sistema accionador es el *órgano* principal que da *vida* a un determinado sistema robótico como una mano robótica, por lo tanto es preciso identificar la capacidad que tiene el mismo de hacer que ese movimiento pueda generar tareas cada vez más complejas.

La forma de identificar esta capacidad se resume en los estados y la calidad de los mismos que el sistema accionador puede ofrecer. Esta metodología de diseño se basa fundamentalmente en este concepto y que si bien en este trabajo es aplicado a manos robóticas, puede ser extendido a cualquier sistema robótico que disponga de un sistema accionador y de esta forma optimizar sus recursos no solo a nivel funcional, sino también en el ahorro de energía.

En el transcurso de este trabajo se han diseñado dos manos robóticas con esta metodología y se ha realizado un ensayo de viabilidad técnica de un actuador capaz de ofrecer un número finito de estados mayor a los tres que ofrece actualmente cualquier actuador. Estos diseños han demostrado que este tipo de metodología puede ofrecer una alternativa para la optimización del sistema accionador de una mano robótica. Por otro lado, la misma también puede ser aplicada a cualquier tipo de mano robótica y para cualquier aplicación y servir como una herramienta útil para el análisis del diseño de las manos robóticas actuales y buscar puntos de optimización para futuros desarrollos.

Índice general

Agradecimientos	I
Resumen	II
Índice General	III
Índice de Figuras	VI
Índice de Tablas	XII
1. Introducción	1
1.1. Motivación	2
1.2. Objetivo de la tesis	3
1.3. Estructura del documento	3
2. Manos Robóticas	5
2.1. Introducción	5
2.2. La mano humana	5
2.3. Caracterización de manos robóticas	9
2.3.1. Antropomorfismo	11
2.3.2. Capacidad funcional	12
2.3.3. Destreza	12
2.3.4. Sistema sensorial	13
2.3.5. Cantidad de actuadores	13
2.3.6. Integración	13
2.4. Manos robóticas	14
2.4.1. Manos robóticas antropomórficas	14
2.4.2. Manos robóticas semi-antropomórficas	31
2.4.3. Manos robóticas no-antropomórficas	41
3. Actuadores para manos robóticas	51
3.1. Introducción	51
3.1.1. El actuador humano	52
3.2. Actuadores	54
3.2.1. Clasificación de actuadores	54



3.2.2.	Actuadores eléctricos	54
3.2.2.1.	Movimiento rotativo	55
3.2.2.2.	Movimiento lineal	57
3.2.3.	Actuadores neumáticos	64
3.2.4.	Actuadores hidráulicos	66
3.3.	Definición de calidad de los actuadores	67
4.	Funcionalidad de las manos robóticas	70
4.1.	Introducción	70
4.2.	Tipos de agarres	72
4.3.	Agarre y manipulación	75
4.3.1.	Tareas de agarre	76
4.3.1.1.	Planificación del agarre	79
4.3.1.2.	Estabilidad del agarre	79
4.3.1.3.	Distribución de las fuerzas en el dedo	80
4.3.2.	Tareas de manipulación	82
4.3.2.1.	Formulación del problema de manipulación	83
5.	Metodología de diseño de Manos Robóticas Multi-Estado	87
5.1.	Introducción	87
5.2.	Características de diseño de las manos robóticas	88
5.2.1.	Cantidad de dedos	89
5.2.2.	Palma	90
5.2.3.	Grados de Libertad y Grados de Libertad Actuados	90
5.2.4.	Tipos de actuadores	91
5.2.5.	Tipo de transmisión de la fuerza	91
5.2.6.	Mecanismos	92
5.2.7.	Tipos de sensores	93
5.2.8.	Materiales estructurales	93
5.2.9.	Métodos de fabricación	94
5.3.	Manos robóticas	94
5.3.1.	Estudio funcional de las manos robóticas	98
5.4.	Sistema accionador	102
5.4.1.	Grado de accionamiento de un sistema accionador	103
5.4.2.	Tipos de estados de un sistema accionador	105
5.4.3.	Estudio funcional de un sistema accionador	106
5.4.3.1.	Sistema accionador compuesto por un único actuador	107
5.4.3.2.	Actuador Multi-Estados (AME)	108
5.4.4.	Grado de funcionalidad de un sistema accionador	110
5.5.	Metodología de diseño propuesta	116
5.5.1.	Definición de requisitos y especificaciones	117
5.5.2.	Diseño y desarrollo de subsistemas	118
5.5.3.	Diseño y desarrollo del prototipo final	119
6.	Aplicación de la metodología de diseño de Manos Robóticas Multi-Estado	121
6.1.	Introducción	121
6.2.	Mano Robótica RL1	122
6.2.1.	Brazo robótico ASIBOT	122



6.2.2.	Definición de requisitos	125
6.2.2.1.	Requisitos pre-establecidos	125
6.2.2.2.	Análisis de las características de diseño	126
6.2.2.3.	Análisis funcional del sistema accionador	132
6.2.3.	Subsistemas	133
6.2.3.1.	Dedo principal	134
6.2.3.2.	Sistema accionador	137
6.2.3.3.	Sistema de control	139
6.2.4.	Diseño y desarrollo de la Mano Robótica RL1	141
6.3.	Mano Robótica RL2	144
6.3.1.	Definición de requisitos	146
6.3.1.1.	Análisis funcional del sistema accionador	148
6.3.2.	Subsistemas	149
6.3.2.1.	Dedo principal	149
6.3.2.2.	Sistema accionador	150
6.3.3.	Diseño de la Mano Robótica RL2	151
6.4.	Mano Robótica RL3	154
6.4.1.	Robot Humanoide RH0	155
6.4.2.	Definición de requisitos	157
6.4.2.1.	Análisis de las características de diseño	159
6.4.2.2.	Análisis funcional del sistema accionador	162
6.4.3.	Actuador Multi Estado - AME	164
6.4.3.1.	Funcionamiento conceptual del MTE	165
6.4.3.2.	MTE Basado en fuerzas electromagnéticas	167
6.4.3.3.	MTE Basado en aleaciones con memoria de forma	172
6.4.4.	Entorno virtual	176
6.5.	Cuadros comparativos	177
7.	Conclusión	179
7.1.	Aportaciones de esta tesis doctoral	180
7.2.	Futuros desarrollos y temas abiertos	182
	Apéndices	185
A.	Sistema de control de la Mano Robótica RL3	185
A.1.	Electrónica de control y comunicación	186
A.2.	Electrónica de potencia	187
A.3.	<i>Firmware</i> y lenguaje de programación	188
	Bibliografía	193

Índice de figuras

2.1. Cara palmar (a) y Cara dorsal (b) de la mano humana [156]	6
2.2. Topología funcional de la mano humana [156]	7
2.3. Ahuecamiento palmar de la mano humana [156]	7
2.4. Tendones, ligamentos, poleas fibrosas, vainas digitales y pliegues palmares de la mano humana [156]	7
2.5. Huesos de la muñeca humana [156]	8
2.6. Movimientos de la muñeca humana [156]	8
2.7. Músculos y ligamentos de la muñeca humana [156]	9
2.8. Gráfico de evaluación del nivel de antropomorfismo de una mano robótica [30]	9
2.9. Gráfico de evaluación del nivel de antropomorfismo de una mano robótica según los autores [30]	10
2.10. Gráfico de evaluación del índice de destreza de una mano robótica según los autores [30]	11
2.11. Robot humanoide para usos espaciales Robonaut - NASA	15
2.12. Robonaut Hand - NASA	15
2.13. Estructura interna de la Robonaut Hand - NASA	16
2.14. Tokyo Hand - Universidad de Tokyo	17
2.15. Ultralight Anthropomorphic Hand - Research Center of Karlsruhe	18
2.16. Esquema del actuador neumático y estructura del dedo de la Ultralight Anthropomorphic Hand	18
2.17. Robot humanoide ARMAR, brazo robótico accionado por un motor ultrasónico esférico y esquema del actuador esférico	19
2.18. TUAT-Karlsruhe Humanoid Hand - Universidad de Tokyo y Karlsruhe	19
2.19. Mecanismos independientes de la Manus-Hand	20
2.20. Esquema del sistema de poleas y los tendones cruzados de la Manus-Hand	21
2.21. Esquema de la Rueda de Génova y esquema de funcionamiento del pulgar de la Manus-Hand	21
2.22. Manus-Hand	22
2.23. GIFU Hand II - Universidad de GIFU	23
2.24. Sensores táctiles distribuidos de FSR de la GIFU Hand II	23
2.25. Sensores táctiles distribuidos de FSR de la GIFU Hand III	24
2.26. GIFU Hand III - Universidad de GIFU	25
2.27. Ejemplos de agarre esférico, cilíndrico y prismático de la GIFU Hand III	25



2.28. KH Hand Type S - Universidad de GIFU	26
2.29. Sistema de maestro-esclavo de la KH Hand Type S	26
2.30. UB Hand II - Universidad de Bologna	27
2.31. Integración de la UB Hand II con un antebrazo	27
2.32. UB Hand III - Universidad de Bologna	28
2.33. Esquema de la estructura interna del dedo de la UB Hand III	28
2.34. La UB Hand III integrada a su antebrazo	28
2.35. Ejemplos de manipulación y agarre de la UB Hand III	29
2.36. Prototipos anteriores de la Shadow Hand - Shadow Robot Company	30
2.37. Shadow Hand C3 - Shadow Robot Company	30
2.38. Ejemplos de manipulación y de movimientos de la Shadow Hand	31
2.39. Sensores de tacto desarrollados en cooperación con la Universidad de Bielefeld para la Shadow Hand	31
2.40. Utah-MIT Dextrous Hand - Universidad de Utah y MIT	32
2.41. Sistema de control de la Utah-MIT Dextrous Hand	32
2.42. Robot Humanoide COG - Laboratorio de Inteligencia Artificial del MIT	33
2.43. Mano robótica del Robot Humanoide COG - Laboratorio de Inteligencia Artificial del MIT	33
2.44. DIST-Hand - Universidad de Gnova	35
2.45. <i>DLR three finger robot hand</i> - Centro de Investigación Aeroespacial Alemán	36
2.46. DLR Hand I - Centro de Investigación Aeroespacial Alemán	36
2.47. Actuador lineal DLR de la DLR Hand I	37
2.48. Estructura interna del dedo robótico de la DLR Hand I	37
2.49. DLR Hand II - Centro de Investigación Aeroespacial Alemán	38
2.50. La DLR Hand II tocando el piano	38
2.51. La DLR Hand II realizando tareas montada en un brazo robótico	39
2.52. HIT/DLR hand - Harbin Institute of Technology y el Centro de Investigación Aeroespacial Alemán	39
2.53. La HIT/DLR hand realizando tareas	39
2.54. La DLR/HIT hand - Centro de Investigación Aeroespacial Alemán y el Harbin Institute of Technology	40
2.55. MA-I Hand - Universidad Politécnica de Cataluña	40
2.56. Configuración de los actuadores y su ubicación dentro de la MA-I Hand	41
2.57. Stanford/JPL Hand - Universidad de Stanford	42
2.58. Barrett Hand - Barrett Technology Inc.	42
2.59. MARS Hand - Universidad de Laval	43
2.60. SARAH M1 Hand - Universidad de Laval	45
2.61. SARAH P1 Hand - Universidad de Laval	45
2.62. SARAH CSA Hand - Universidad de Laval	45
2.63. SARAH UKAEA Hand - Universidad de Laval	46
2.64. SARAH Pneumatic Hand - Universidad de Laval	46
2.65. Esquema de la Karlsruhe Dextrous Hand II - Universidad de Karlsruhe	47
2.66. Configuración del dedo de la Karlsruhe Dextrous Hand	47
2.67. Karlsruhe Dextrous Hand II - Universidad de Karlsruhe	48
2.68. Sensor fuerza-par de la Karlsruhe Dextrous Hand II	49
2.69. La Karlsruhe Dextrous Hand II realizando tareas de manipulación	49
2.70. High-Speed Tokyo Hand - Universidad de Tokyo	49
2.71. La High-Speed Tokyo Hand realizando tareas de manipulación de objetos	50



2.72. La High-Speed Tokyo Hand sujetando un cilindro que cae	50
3.1. Componentes de un Actuador	52
3.2. Representación del ángulo de pennation	53
3.3. Clasificación de transformadores de energía según su fuente	54
3.4. Clasificación de transmisores de movimiento según la tecnología aplicada	55
3.5. Componentes básicos de un motor eléctrico	56
3.6. Tipos de motores eléctricos según sus imanes permanentes	58
3.7. Diferentes tipos de motores piezo-eléctricos rotativos comerciales	58
3.8. Curva genérica de la fuerza en función de la distancia recorrida que desarrolla un solenoide	59
3.9. Motores lineales comerciales	59
3.10. Principio de funcionamiento de los materiales piezo-eléctricos	60
3.11. Principio de funcionamiento de un motor piezo-eléctrico rotativo	61
3.12. Principio de funcionamiento de un actuador basado en materiales piezo-eléctricos. 1-Estator, 2-Material piezoeléctrico, 3-Material piezoeléctrico, 4-Junta, 5-Actuador	61
3.13. APA - Actuador Piezoeléctrico Amplificado	62
3.14. Proceso de transformación de un material SMA	63
3.15. Mecanismo de memoria de forma de los materiales SMA	64
3.16. PAM - <i>Pneumatic Artificial Muscles</i> , principio de funcionamiento	65
3.17. PPAM - <i>Pleated Pneumatic Artificial Muscles</i>	66
4.1. Evolución de la mano humana	70
4.2. Clasificación de agarres según Cutkosky [84]	72
4.3. Recorte de la tabla de clasificación de tipos de agarre realizada por Thomas Feix dentro del proyecto GRASP según los estudios realizados hasta el momento	73
4.4. Recorte de la tabla de clasificación de tipos de agarre realizada por Thomas Feix dentro del proyecto GRASP utilizando una herramienta virtual	74
4.5. Tareas de agarre dinámico de la <i>High Speed Multifingered Hand</i>	77
4.6. Tareas de agarre dinámico de la <i>High Speed Multifingered Hand</i> con el objeto en movimiento impredecible	78
4.7. Robot humanoide haciendo malabares con tres pelotas usando embudos de cocina	78
4.8. Fuerzas ejercidas por la mano robótica en los puntos de contacto con el objeto	81
4.9. Tipos de contacto	81
4.10. Esquema de un agarre de poder (<i>Power Grasp</i>)	83
4.11. Problema de manipulación típica. Movimiento del objeto desde la posición A hasta la posición B	84
4.12. Interacción de las Matrices Jacobianas de Agarre y de la Mano. Se consideran también las velocidades	85
4.13. Esquema de ejes de coordenadas para el caso de contactos rodantes o deslizantes	85
5.1. Configuraciones de un sistema accionador dentro de un mecanismo	95
5.2. Brazo artificial de E. Spellerberg - 1864	96
5.3. Mano artificial de F. C. Henning - 1918	96



5.4. Mano artificial de A. Pringle - 1919	97
5.5. Relación existente entre los diferentes grupos dentro de la manipulación robótica	98
5.6. Representación de la filosofía de diseño de una mano robótica	99
5.7. Representación de la filosofía de diseño de una mano robótica subactuada	100
5.8. Representación de la filosofía de diseño de una mano robótica subactuada con un solo actuador	101
5.9. Representación de la metodología de diseño de pinzas robóticas	101
5.10. Representación de la metodología de diseño de las <i>Manos Robóticas Multi-Estados</i>	104
5.11. Relación existente entre los diferentes grupos dentro de la manipulación robótica teniendo en cuenta el grupo de <i>Manos Robóticas Multi-Estados</i> .	105
5.12. Componentes de un Actuador	107
5.13. Componentes de un Actuador simplificado	107
5.14. Configuración genérica de un actuador	108
5.15. Configuración de un Actuador Multi-Estados (AME)	109
5.16. Configuración teórica de un Mecanismo de Tres Estados (MTE)	109
5.17. Configuración teórica de un Mecanismo Multi-Estados (MME)	110
5.18. Configuración genérica de un AME con n MTEs	110
5.19. Sistema robótico compuesto por dos elementos con dos GDLs	112
5.20. Sistemas accionadores analizados	112
5.21. Cuadro de reducción de la funcionalidad de un sistema accionador	113
5.22. Metodología de diseño básica utilizada	116
5.23. Descripción de la fase de diseño y desarrollo de subsistemas	119
5.24. Descripción de la fase de diseño y desarrollo del prototipo final	120
6.1. Brazo Robótico ASIBOT desarrollado por el Laboratorio de Robótica de la Universidad Carlos III de Madrid.	122
6.2. ASIBOT: Brazo robótico autocontenido.	123
6.3. Brazo Robótico ASIBOT desarrollando tareas	124
6.4. Diseños de anclajes analizados	124
6.5. Diseño de anclaje implementado en el Brazo Robótico ASIBOT	125
6.6. Entorno laboral típico con objetos que se pueden sujetar	127
6.7. Tramos estructurales del anclaje unido al brazo	128
6.8. Ubicación de la RL1 dentro del anclaje	128
6.9. Secuencia de estados que debe realizar la RL1 para estar operativa	129
6.10. Configuración del sistema accionador de la RL1	129
6.11. Diagrama simplificado del sistema accionador de la RL1	132
6.12. Estructura A: Concepto de funcionamiento	135
6.13. Estructura A: Prototipo fabricado	135
6.14. Estructura B: Concepto de funcionamiento	136
6.15. Estructura B: Prototipo fabricado	136
6.16. Aplicaciones desarrolladas para el dimensionamiento de las poleas del dedo	137
6.17. Componentes del mecanismo de extracción de la mano: movimiento de traslación	138
6.18. Componentes del mecanismo de accionamiento de la mano: movimiento de rotación	139
6.19. Prototipo de validación de los mecanismos	140



6.20. Interfaz Directa de Control de la RL1	141
6.21. Diseño definitivo del dedo de la RL1	142
6.22. La RL1 alojada en el interior del anclaje	142
6.23. Mecanismo de extracción de la RL1	143
6.24. Desarrollo final de la RL1	144
6.25. Posiciones que adopta la RL1 a través de los diferentes estados ofrecidos por el sistema accionador	144
6.26. La RL1 realizando tareas de agarre de diferentes tipos de objetos	144
6.27. Fenómenos negativos en las manos robóticas subactuadas	145
6.28. Diagrama simplificado del sistema accionador de la RL2	148
6.29. Concepto de funcionamiento de un dedo de la RL2	149
6.30. Prototipo del dedo de la RL2	150
6.31. Diseño definitivo del dedo de la RL2	152
6.32. Posición de la RL2 dentro del anclaje	152
6.33. Sistema de extracción de la RL2	153
6.34. Sistema accionador de la RL2	154
6.35. Posiciones que adopta la RL2 a través de los diferentes estados ofrecidos por el sistema accionador	154
6.36. Diseño final de la RL2	155
6.37. Robot Humanoide RH0 desarrollado por el Laboratorio de Robótica de la Universidad Carlos III de Madrid	156
6.38. Robot Humanoide RH1: Actualización del RH0	157
6.39. Configuración estructural de la Mano UC3M con 20 GDLs	159
6.40. Configuración estructural de la Mano UC3M con 16 GDLs	159
6.41. Diagrama de configuración propuesto para el AME de la RL3	165
6.42. Principio de funcionamiento del MTE	167
6.43. Diagrama modificado para el MTE propuesto usando fuerzas electromagnéticas	168
6.44. Diagrama para el cálculo de la longitud real de un hilo dentro de un carrete	169
6.45. Curvas obtenidas de n , N y F_{mm} en función de D (rojo) y b (negro)	170
6.46. Curvas obtenidas de n , N y F_{mm} en función de I (verde) y d_h (azul)	171
6.47. Diseño del prototipo MTE basado en fuerzas electromagnéticas	171
6.48. Diagrama del MTE propuesto con tecnología SMA	173
6.49. Diseño del MTE basado en SMA con el despiece correspondiente	174
6.50. Sección transversal del prototipo MTE basado en SMA	175
6.51. Diseño preliminar de la mano utilizada para validar el simulador virtual	176
6.52. Simulador virtual con la mano y alguno objetos simulados	177
6.53. Esquema de relaciones de los elementos de la mano utilizada en el simulador	177
A.1. Esquema electrónico completo del sistema de control de la RL3	185
A.2. Diagrama de la etapa de control y de comunicación	186
A.3. Placa entrenadora de la etapa de control y de comunicación	187
A.4. Placa prototipo de la etapa de control y de comunicación de la RL3	187
A.5. Diagrama de la etapa de control y de adquisición de datos	188
A.6. Diagrama de la etapa de potencia	189
A.7. Placa prototipo de la electrónica de potencia del sistema de control de la RL3	189
A.8. Prototipo completo de la electrónica de control de la RL3	190



A.9. Estructura de un paquete de instrucciones y funciones en el lenguaje de programación diseñado	192
A.10. Entorno de programación del HCCE de la RL3	192

Índice de cuadros

5.1. Transformación ofrecida por el MTE dependiendo de la posición que adopte	111
5.2. Configuraciones posibles de reducción del funcionalidad para un AME con 2 MTEs	113
5.3. Configuraciones posibles de reducción del funcionalidad para un AME con 3 MTEs	114
5.4. Configuraciones posibles de reducción del funcionalidad para un AME con 6 MTEs	115
6.1. Instrucciones generales disponibles de la IDC	140
6.2. Cuadro de las configuraciones funcionales posibles de la estructura de la RL3 de 20 GDLs y de 16 GDLs	160
6.3. Comportamiento de un GDL según el modo de funcionamiento del MTE	167
6.4. Comparación entre los sistemas accionadores de la RL1 y la RL2	178
6.5. Comparación entre las diferentes configuraciones de los sistemas accionadores para la RL3 con 20 GDLs	178
6.6. Comparación entre las diferentes configuraciones de los sistemas accionadores para la RL3 con 16 GDLs	178
A.1. Instrucciones básicas del interprete principal	190
A.2. Funciones básicas dentro del entorno <i>BUCLE</i>	191

Introducción

La mano humana puede decirse que es la herramienta más maravillosa que la naturaleza ha creado. Unas de las citas que ha impactado al autor y que en cierta forma lo ha guiado a conocer mucho más sobre manos robóticas es la que tuvo oportunidad de leer en un libro de Kapandji [157] y que se transcribe a continuación:

”La mano del hombre, en su complejidad, se revela, pues, como una estructura perfectamente lógica y adaptada a sus diferentes funciones. Su arquitectura refleja el principio de economía universal. Es uno de los más bellos logros del universo.”

La mano humana actualmente es utilizada para un increíble número de aplicaciones dentro del desarrollo del ser humano, y lo que es mejor aún, cada vez aparecen nuevas aplicaciones que se van sumando o simplemente se va mejorando la destreza de las ya existentes. Estas aplicaciones las podemos resumir en las cuatro más importantes: explorar, comunicar o interactuar con el entorno y con otros seres humanos, contener objetos y manipular objetos [37].

En la actualidad el estudio de la mano humana y su imitación es una de las áreas de la robótica más explorada. Su justificación viene dada debido a que es la herramienta universal perfecta. Los avances tecnológicos en materia de actuadores, sensores y materiales indican que el avance técnico que apoye a la evolución científica relacionada a la robótica es realmente importante. Sin embargo, aún se está muy lejos de poder conseguir un manipulador robótico que reemplace en su totalidad a la mano humana.

Si bien a nivel industrial solo se persigue desarrollar pinzas robóticas que sean destinadas a una aplicación concreta y dentro de la misma a que realice una determinada tarea de agarre, la comunidad científica se viene planteando utilizar manos robóticas en prótesis para seres humanos. Este desafío abre a nivel científico un gran abanico de problemas que necesitan ser resueltos antes de que esto sea posible.

Aún así, en los últimos años se vienen desarrollando una gran cantidad de manos robóticas destinadas a investigar determinados comportamientos de la mano humana con diferentes tecnologías, consiguiéndose avances realmente interesantes.

Dentro de éstas manos robóticas, se puede decir que hay tres grandes grupos bien definidos: las pinzas robóticas, las manos robóticas subactuadas y las manos robóticas totalmente actuadas y éstas últimas a su vez se pueden diferenciar entre sí de diversas formas como por ejemplo su configuración estructural, la aplicación a nivel de comportamiento que persiguen o simplemente por la tecnología implementada. La diferencia principal que existe entre estos grupos está definida por la relación que hay entre los grados de libertad (GDLs) que poseen y la cantidad de actuadores que componen su sistema

accionador.

Una de las principales causas que pueden justificar el que existan estos tres grupos bien definidos de manos robóticas es la complejidad de su sistema de control, sobre todo cuando el sistema accionador esta compuesto por una cantidad considerable de actuadores.

Para que un sistema accionador sea realmente eficiente, el sistema robótico debe estar provisto de un sistema sensorial igual o más complejo y una estructura que permita sacar todo el provecho al movimiento que puede otorgar dicho sistema accionador.

Una perfecta combinación entre sistema accionador, sistema sensorial, sistema de control y la estructura que lo soporte, puede hacer que una mano robótica sea una herramienta verdaderamente versátil ya que puede permitir realizar tareas de agarre y manipulación tal y como lo puede hacer una mano humana. El problema radica en que las técnicas estudiadas a nivel teórico todavía no están lo suficientemente optimizadas o simplificadas como para que la tecnología de la que se dispone pueda permitirlo. Estas técnicas avanzan o se hacen cada vez más complejas y la tecnología va siempre por detrás. Es por este motivo que continuamente se están buscando diseños y realizando estudios para conseguir de alguna forma simplificar algún sistema sin perder la eficiencia del conjunto.

En lo que se refiere a la relación entre la estructura mecánica y el sistema accionador, estas técnicas y estudios están centrados en el diseño de las manos robóticas subactuadas ya que el desarrollo de mecanismos especiales puede en algún momento aumentar la funcionalidad de una mano robótica con una mínima cantidad de actuadores. En la actualidad existen una gran cantidad de centros y universidades a nivel mundial que destinan grandes esfuerzos en buscar continuamente ese mecanismo específico que permitiese sacar el máximo provecho a un sistema accionador con una mínima cantidad de actuadores para dotar a una mano robótica de una funcionalidad completa. Pero lo cierto es que la limitación viene dada por la capacidad del sistema accionador y no en el ingenio del investigador.

1.1. Motivación

Dentro del gran abanico de temas relacionados con la robótica, el desarrollo de nuevas técnicas de control, de sistemas sensoriales y algoritmos de planificación se llevan la mayor parte de interés, mientras que el área de la investigación dedicada al estudio de nuevas estructuras mecánicas o conceptos de mecanismos específicos o simplemente a nuevas tecnologías que permitiesen abordar aspectos relacionados con la mecánica es más bien pequeño ya que por lo general se piensa que en este área no hay mucho por innovar.

Por otro lado, en el Laboratorio de Robótica de la Universidad Carlos III de Madrid, se están desarrollando diferentes sistemas robóticos como un brazo manipulador y un robot humanoide y para los que es necesario el diseño de manos robóticas con unas especificaciones muy parecidas: bajo peso, mínima cantidad de actuadores, sistema de control independiente y sencillo y sobre todo con la máxima funcionalidad. Por este motivo, las manos robóticas subactuadas fueron el punto de mira perfecto para cumplir con dichas especificaciones.

El descubrimiento por parte del autor de que la limitación que sufren las manos robóticas subactuadas viene dado exclusivamente por la capacidad de su sistema accionador, ha motivado al mismo a buscar una metodología de diseño que no se centre en mecanismos especiales ni en la estructura mecánica de las manos robóticas subactuadas para mejorar su funcionalidad sino que la analice desde el origen de su limitación, el sistema



accionador.

La funcionalidad de un sistema accionador viene dado por la capacidad y la calidad de movimiento que el mismo puede proveer a un determinado mecanismo. Por lo tanto, en este aspecto el autor identifica que existe un pre concepto de que un actuador solo puede generar una cantidad finita de movimiento y que todos los actuadores actuales poseen esa misma capacidad y que es implícita a la definición de actuador. Sin embargo el definir el concepto de estado dentro de un sistema accionador y a su vez que dicho estado este reflejado en una determinada acción dentro de mecanismo o sistema robótico, abre la posibilidad de explorar en cómo aumentar la capacidad o funcionalidad de un sistema accionador haciendo que la cantidad de estados sea mayor.

1.2. Objetivo de la tesis

Actualmente, para aumentar la destreza de una mano robótica se recurría a diseñar sistemas accionadores con la mayor cantidad de actuadores posible de forma que cada grado de libertad (GDL) del sistema robótico tuviese un control independiente.

El nuevo concepto de estados de un sistema accionador, permite redefinir esta metodología que se focaliza en aumentar la cantidad de actuadores en analizar de que forma se puede aumentar la capacidad que tiene el sistema accionador en ofrecer estados a un sistema robótico.

Por lo tanto el objetivo de esta tesis es la de definir una metodología que optimice la capacidad de los sistemas accionadores basándose en los estados que puede ofrecer sin la necesidad de tener que aumentar la cantidad de actuadores para conseguirlo. Este objetivo a su vez tiene que ir acompañado de la definición de un Actuador Multi-Estado que permitiese que un único actuador pueda ofrecer una cantidad finita de estados mayor a la convencional.

Esta metodología por otro lado, permitirá unificar todos los grupos de manos robóticas en un único grupo denominado Manos Robóticas Multi-Estados y eliminar ese salto tan grande que existe entre las manos robóticas subactuadas y las manos robóticas totalmente actuadas cambiando el concepto que se tiene para definir su funcionalidad.

Para dar consistencia a esta metodología, se diseñan por un lado tres manos robóticas: RL1, RL2 y RL3. Siendo las dos primeras la base conceptual de la metodología y la tercera un ensayo escalado a una mano robótica con una cierta destreza. Por otro lado, se diseñaron dos prototipos de Mecanismos de Tres Estados (MTEs) que son el elemento clave en el desarrollo de un Actuador Multi-Estado.

Como complemento a los diseños mecánicos de las manos robóticas RLx y del MTE, se buscarán herramientas que permitían comprobar el buen funcionamiento de los sistemas robóticos. Estas herramientas serán sistemas sensoriales específicos que alimenten a sistemas de control sencillos. A su vez, se desarrollaran entornos virtuales para probar y optimizar algoritmos de control para tareas de agarre y manipulación sin que fuera necesario disponer del sistema robótico o prototipo real.

1.3. Estructura del documento

Aparte de este capítulo de introducción en el que se aborda de forma resumida el problema y en el que se describe los principios básicos que dieron inicio a la metodología como resultado de la presente tesis, el trabajo se divide en otros seis capítulos.



En el Capítulo 2 se hace un recorrido por las manos robóticas más analizadas por el autor y en las que de alguna forma u otra han llamado su atención. El capítulo comienza con un método de caracterización de manos en el que se definen ciertas características. Luego, divide las manos robóticas en tres grupos bien definidos dependiendo del grado de antropomorficidad de las mismas.

El Capítulo 3, hace un recorrido por las diferentes tecnologías de actuadores existentes en la actualidad aplicadas a manos robóticas con algunos ejemplos que se encuentran aún en fase de experimentación base pero que prometen abordar soluciones interesantes.

Para conocer de forma resumida el comportamiento de las manos robóticas y del alcance que pueden llegar a tener en función de las tareas que realizan, en el Capítulo 4 se explican las diferencias entre las tareas de agarre y las tareas de manipulación y como actualmente la comunidad científica aborda estos problemas con diferentes técnicas de control y de planificación.

En el Capítulo 5 es donde se explica la teoría que da origen a la metodología de diseño desarrollada en el presente trabajo y en el que se definen los diferentes índices como el grado de accionamiento y el grado de funcionalidad de los sistema accionadores para poder ser comparados y conseguir así, una optimización de los mismos en diferentes aplicaciones robóticas.

En el Capítulo 6 se describen los diseños y ensayos realizados basados en la metodología desarrollada en el Capítulo 5 a modo de aplicación práctica. Estos diseños son las Manos Robóticas RL1, RL2 y RL3 y para dar movimiento a ésta última se diseñó un prototipo de Mecanismo de Tres Estados (MTE) que formaría parte del Actuador Multi-Estados (AME) que sería parte del sistema accionador de la misma. Otros trabajos realizados en materia de complemento como ayuda a los diseños anteriores también son explicados, como los sistemas de control, sistemas sensoriales y un entorno virtual para practicar algoritmos de tareas de agarre y manipulación de objetos.

Finalmente en el Capítulo 7 se reflejan las conclusiones y las aportaciones de la tesis a la comunidad científica como también se proponen una serie de futuros trabajos para la continuación de este estudio.

Manos Robóticas

2.1. Introducción

El área de la robótica destinada al estudio de manos robóticas o terminales activos en brazos manipuladores está adquiriendo cada vez más importancia. Esto se debe en parte a los adelantos tecnológicos en materia de actuadores, sensores y sistemas de control. Por este motivo, también se ha vuelto imprescindible la búsqueda de técnicas y diseños que aprovechen al máximo estas tecnologías.

La finalidad de esta investigación es imitar a la mano humana. De esta forma, se podrían llevar a cabo ciertas actividades que hasta hoy sólo las realiza una persona con su mano. Tal y como se explica en esta tesis, cada Mano Robótica o Pinza Robótica presenta una destreza particular. Se trata de abarcar la mayor cantidad de tipos de agarres y manipulaciones posibles.

En los últimos años, casi todos los sistemas de este tipo se han desarrollado para ser incorporados en robots humanoides, prótesis humanas y teleoperación. Asimismo, se han utilizado para conocer más a fondo el comportamiento de la mano humana.

La pregunta ¿Cuánto está de lejos la mano robótica de la humana? aparece con frecuencia en la mayoría de los artículos, revistas y conferencias sobre la Manipulación Robótica. Ante este interrogante, comienzan a surgir sin parar otras incógnitas. En ese momento, resulta necesario utilizar un determinado criterio para clasificar los distintos terminales activos y manos robóticas existentes. Así se facilita la comparación entre éstas y la mano humana.

En el presente capítulo se hará en primer lugar una breve descripción de la anatomía de la mano humana, destacando algunas características que ayudarán a entender un poco más los objetivos a alcanzar por las manos robóticas. Después, se describirán algunas de las características más importantes que revisten las manos robóticas o terminales activos existentes en la actualidad. Finalmente, se detallarán algunos ejemplos de las propiedades de diversas manos robóticas creadas que han supuesto un paso adelante en innovación.

2.2. La mano humana

El filósofo griego Aristóteles se refería a la mano del hombre como *el instrumento de los instrumentos*. Para el entendimiento del autor de este trabajo, es una de las maravillas naturales.

La mano es una de las herramientas más maravillosas y más difíciles de imitar. Hay numerosos estudios e investigaciones científicas que sólo se dedican a descubrir su funcio-

namiento, tanto muscular como sensorial. Uno de los más prestigiosos son los Cuadernos de Fisiología articular, del Dr. Kapandji [156].

Según recoge el citado estudio, la estructura de la mano humana está compuesta básicamente por huesos, músculos, tendones, ligamentos y un sistema nervioso sensorial muy sofisticado. Todos estos elementos, funcionando simultáneamente de forma coordinada, dan a la mano humana una innumerable cantidad de posiciones, movimientos y acciones. Todo ello gracias a su función más importante: la prensión.

Podemos encontrar una gran cantidad de seres vivos en la naturaleza que disponen de elementos o herramientas para realizar tareas de agarre, manipulación y corte; pero es en la mano humana donde todo encuentra prácticamente la perfección. Este grado de perfección se debe básicamente a la disposición que tiene el pulgar con respecto a los demás dedos de la mano. Como curiosidad, existen tantas manos diferentes como seres humanos en el planeta. Todas ellas tienen casi la misma capacidad de movimientos y acciones.

La mano como *extremidad efectora* es ayudada, en gran parte, por otros elementos del cuerpo humano como, por ejemplo, el brazo (que permite posicionarla y trasladarla en el espacio) y la muñeca (que, además de dar orientación, ayuda a realizar tareas de adaptación y movimiento).

El sistema sensorial de la mano es extremadamente sensible y preciso. Es asimismo imprescindible, no solo para la propia acción sino también para la interpretación visual de las distancias y los grosores, y es un educador de la vista, con la capacidad de reconocer un objeto sin la contribución de la misma. Tal y como dice el Dr. Kapandji, "... *nuestra visión del mundo sería aplanada y sin relieve sin la mano...*".

Centrándose exclusivamente en la mano; está formada por una palma, un pulgar y cuatro dedos. La palma de la mano, en la cara palmar, está compuesta por tres partes: la palma propiamente dicha, la eminencia tenar y la eminencia hipotecar. En la cara dorsal se encuentran la red venosa, que se encarga de drenar la totalidad de la sangre de la mano; los dedos y los tendones extensores (Figura 2.1).

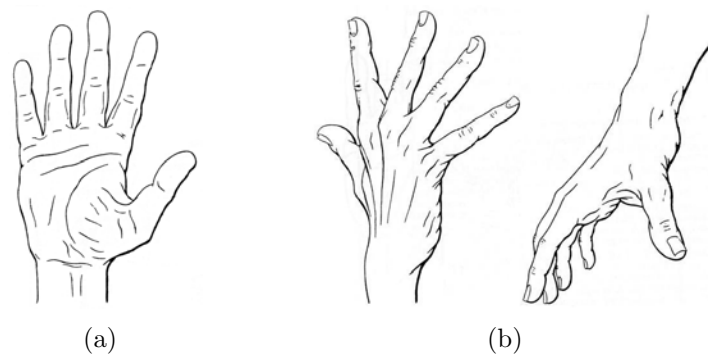


Figura 2.1: Cara palmar (a) y Cara dorsal (b) de la mano humana [156]

La topografía funcional de la mano esta dividida en tres partes principales (Figura 2.2): el pulgar (I), el índice y el medio (II) y el anular y el meñique (III). El pulgar representa casi la totalidad de las funciones de la mano. El índice y el medio, junto con el pulgar, son los encargados de hacer las tomas de precisión. Las pinzas del pulgar con los dedos y el anular y el meñique son indispensables para las tomas palmares, asegurando la firmeza del puño.

El macizo carpiano es uno de los elementos más importantes de la palma, ya que adopta diferentes formas, según el elemento que se va sujetar. Se denomina a este movimiento

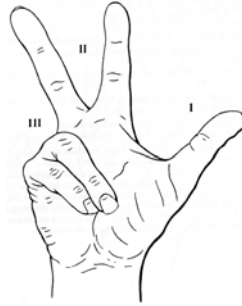


Figura 2.2: Topología funcional de la mano humana [156]

ahuecamiento palmar (Figura 2.3).

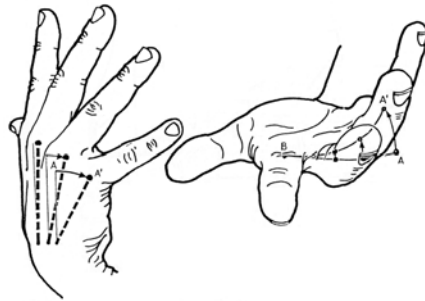


Figura 2.3: Ahuecamiento palmar de la mano humana [156]

La mano humana cuenta con 23 músculos ubicados en el antebrazo y la palma. Éstos son los encargados de realizar los movimientos de las articulaciones. Lo hacen por medio de tendones que son guiados de forma compleja y simétrica a través de correderas, poleas fibrosas y vainas, tal y como muestra la Figura 2.4.

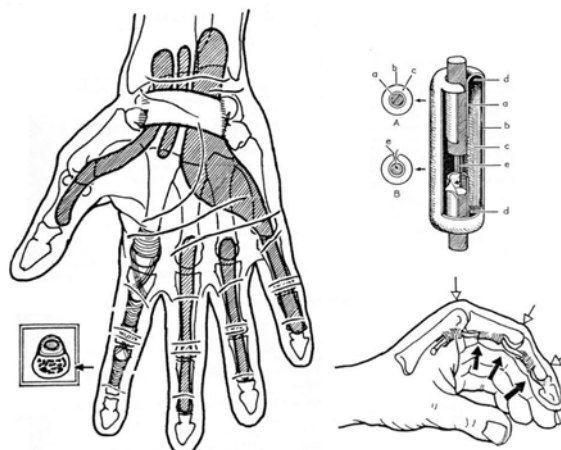


Figura 2.4: Tendones, ligamentos, poleas fibrosas, vainas digitales y pliegues palmares de la mano humana [156]

La muñeca, como su complemento, cumple una labor muy importante en lo que a movimientos de la mano se refiere al permitir que se presente en la posición óptima

para realizar su tarea. En ese sentido, la muñeca posee dos GDLs, que otorgan a la mano los movimientos de abducción-aducción y flexión-extensión. Combinados, realizan el movimiento de circunducción, que recorre una superficie en forma de cono no regular y su vértice corresponde al centro de la muñeca. Por otro lado, la mano humana tiene dos articulaciones, la radiocarpiana y la mediocarpiana. A simple vista, pueden confundirse con huesos correspondientes a la palma de la mano (Figura 2.5).

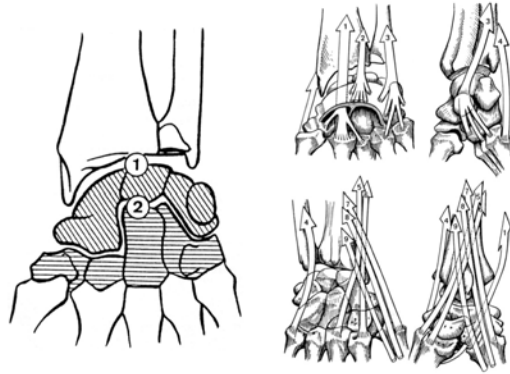


Figura 2.5: Huesos de la muñeca humana [156]

Por otra parte, la muñeca posee varios ligamentos: laterales, anteriores y posteriores. Su función es la de estabilizar los planos frontal y sagital de la misma. Para realizar sus movimientos (Figura 2.6), en la muñeca hay básicamente nueve músculos ubicados en el antebrazo, que transmiten su fuerza a través de los tendones en la mayoría de las ocasiones (Figura 2.7). Estos músculos se distribuyen en cuatro grupos, que son los encargados de realizar los movimientos citados anteriormente. Ninguno de ellos realiza una acción pura para cada movimiento. Siempre interviene más de un grupo.

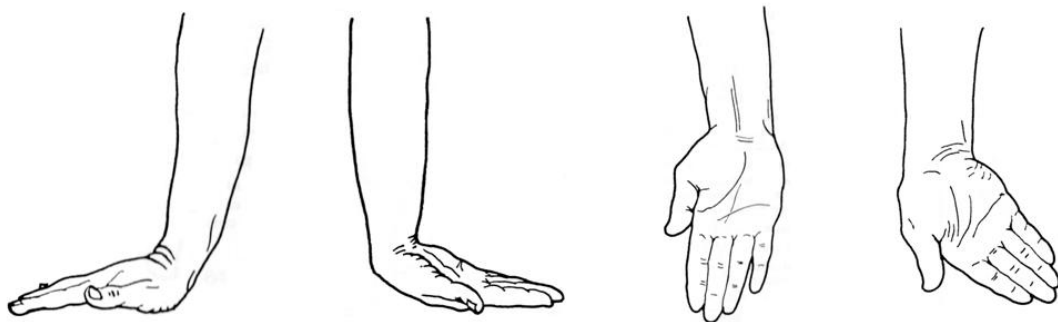


Figura 2.6: Movimientos de la muñeca humana [156]

En casos particulares, y dependiendo del tipo de acción de la mano, puede que algunos músculos encargados de mover los dedos de la mano actúen en movimientos de la muñeca. Incluso, a veces, los músculos de la muñeca tienen una acción sinérgica y estabilizadora de algunos músculos de los dedos. La muñeca también realiza movimientos complejos internamente que permiten a la mano tomar formas y posiciones especiales.

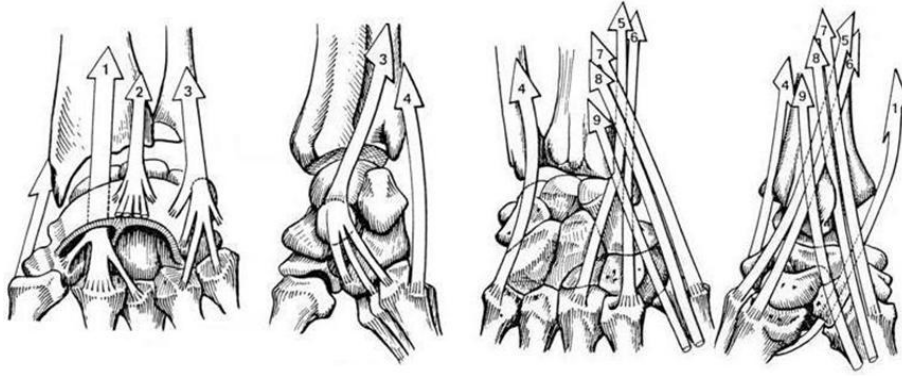


Figura 2.7: Músculos y ligamentos de la muñeca humana [156]

2.3. Caracterización de manos robóticas

En todo el siglo XX y en lo que va del siglo XXI, se han desarrollado una gran cantidad de manos robóticas. A medida que la tecnología ha ido avanzando y las teorías han ido evolucionando, sus configuraciones y los objetivos científicos también lo han hecho. No fue hasta el año 2002 cuando Biagiotti, Lotti, Melchorri y Vassura realizaron un estudio y una revisión de las manos robóticas desarrolladas en la actualidad para caracterizarlas y poder compararlas entre sí [30].

Para comparar las manos robóticas entre sí, estos investigadores asignaron un *índice de antropomorfismo* a cada una de ellas. Este índice depende de ciertas características y es representado por un valor numérico donde el 1 corresponde a la mano humana. Algunas de las características son la estructura mecánica, el nivel de destreza, la configuración cinemática de las manos robóticas, el sistema sensorial o su sistema de control.

En la Figura 2.8 se muestra una estructura general de las características de las manos robóticas, que tiene en cuenta el citado estudio según ciertos niveles, donde $x_{i,j,k}$ son dichas características.

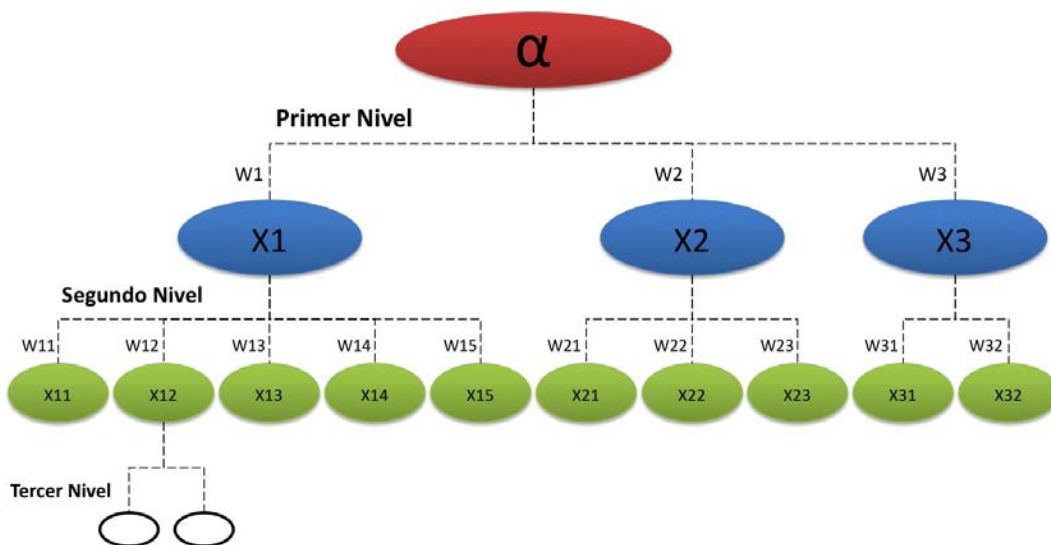


Figura 2.8: Gráfico de evaluación del nivel de antropomorfismo de una mano robótica [30]

Por lo tanto el *índice de antropomorfismo* (α) se calcula de la siguiente manera [31]:

$$\alpha = \frac{\sum_i w_i x_i}{\sum_i w_i x_{i,max}}$$

donde x_i es el valor atribuido a las diferentes características o cualidades de la mano robótica penalizado por un factor w_i , según la importancia de esta característica. De la misma forma, se debe tener en cuenta el que cada valor de x_i debe estar entre 0 y 1 ($x_i \in [0, 1]$) y $\sum_i w_i = 1$. El máximo valor de α es el atribuido a la mano humana y es el valor 1. Por lo tanto, se puede decir que el *índice de antropomorfismo* para cada mano robótica será:

$$\alpha = \sum_i w_i x_i$$

Por ende α es la suma de las diferentes características x_i . Esto es si se considera el primer nivel. Para tener en cuenta los siguientes niveles se replica la misma filosofía que el primer nivel, donde el resultado de x_i es la contribución de los diferentes aspectos $x_{i,j}$ de acuerdo con:

$$w_i = \sum_j w_{i,j} x_{i,j}$$

Por lo tanto:

$$w_{i,j} = \sum_k w_{i,j,k} x_{i,j,k}$$

Si lo trasladamos a n niveles, tenemos:

$$\alpha = \sum_{i,j,k\dots n} (w_i \times w_{i,j} \times w_{i,j,k} \times w_{i,j,k\dots n}) x_{i,j,k\dots n}$$

Se puede apreciar en la Figura 2.9 un ejemplo de estructura para calcular el *índice de antropomorfismo*, que utilizaron los autores para clasificarlas [31].

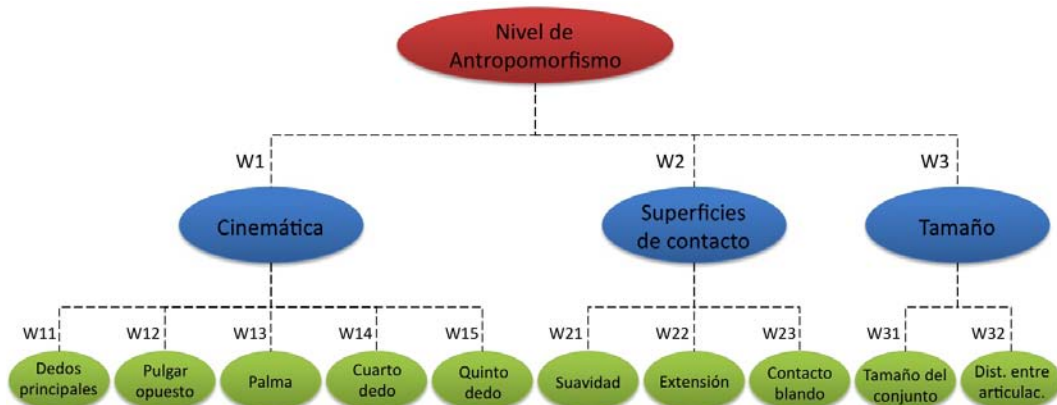


Figura 2.9: Gráfico de evaluación del nivel de antropomorfismo de una mano robótica según los autores [30]

Con la misma filosofía de cálculo que se hace para el *índice de antropomorfismo*, el mismo estudio realiza una medida del *índice de destreza*. En este caso, las características

que lo gobiernan son diferentes y apuntan a un aspecto más funcional de la mano robótica. Aspectos tales como la calidad de agarre y el grado de habilidad en la manipulación de objetos son los que principalmente gobiernan este índice. En la Figura 2.10 se muestra un ejemplo de la estructura de niveles del *índice de destreza*.



Figura 2.10: Gráfico de evaluación del índice de destreza de una mano robótica según los autores [30]

Se hará una breve explicación de cada una de las características o cualidades más relevantes que se pueden considerar en un análisis para caracterizar una mano robótica con el objetivo de conocerlas más a fondo. Entre estas características, algunas no tienen un nivel lo suficientemente alto en el índice de antropomorfismo. Sin embargo, se cree que deben explicarse igualmente.

2.3.1. Antropomorfismo

El antropomorfismo es un concepto que se refiere a la capacidad de un actuador robótico de imitar a la mano humana, en parte o en su totalidad, en aspectos tales como su estética, su color, su temperatura, su aspecto general, etc. Algunas de las propiedades que el antropomorfismo considera más importantes son:

- *Cinemática*: es el estudio de las cualidades de los elementos morfológicos de la mano robótica tales como los dedos, el pulgar, la palma de la mano. Los compara con los de la mano humana (por ejemplo, el número de articulaciones de cada uno).
- *Superficie de contacto*: se refiere a la extensión y a la suavidad de las superficies de contacto, así como a la capacidad de determinar el punto de contacto en la superficie de cada elemento de la mano.
- *Tamaño*: compara el tamaño de la mano robótica con respecto al tamaño medio de una mano humana. Igualmente, el correcto radio de giro de todas las articulaciones en comparación con sus elementos.

Estas propiedades sumadas a otras, que se analizarán más adelante, generan índices comparativos que ayudan al antropomorfismo de la mano robótica.

El antropomorfismo es deseable en las manos robóticas por las siguientes razones:

- Se persigue que las manos robóticas operen en entornos idénticos a los de la mano humana, por lo que es fundamental que tengan dimensiones similares para poder sujetar los mismos objetos, trabajar en las mismas acciones y desenvolverse en los mismos ámbitos.
- Existe alta probabilidad de que las manos robóticas sean teleoperadas por medio de dispositivos especiales. Así que deben tener un alto grado de similitud al comportamiento de la mano humana para poder realizar las mismas operaciones.
- Una circunstancia que puede darse es que la mano robótica sea montada en humanoides. Debido a esto, sería conveniente que estéticamente se pareciera a una mano humana.
- En un futuro próximo, las manos robóticas podrán ayudar a personas con necesidades especiales o capacidades diferentes. Hasta podrían ser usadas como prótesis. Así que el aspecto estético es realmente importante.

2.3.2. Capacidad funcional

La funcionalidad de una mano robótica depende de dos aspectos:

- **Prensión:** habilidad de la mano para agarrar con firmeza y sostener diferentes objetos de distintos tamaños y formas.
- **Aprensión:** habilidad de la mano de entender la forma del objeto, a través del sentido del tacto.

Gracias a estos aspectos, la mano robótica podría actuar como un dispositivo de salida o como un dispositivo de entrada. Como dispositivo de salida, tendría la capacidad de ejercer las fuerzas necesarias para un buen agarre, mientras que como dispositivo de entrada aportaría del mismo modo información sobre el objeto que esta sujetando o manipulando. Sería capaz de explorar nuevos entornos desconocidos.

2.3.3. Destreza

En las manos robóticas, el término *destreza* tiene un significado bastante amplio. Está asociado a la creciente complejidad de tareas que se les exige realizar. Por consiguiente, este término puede ser dividido en dos áreas para su mejor análisis:

- **Agarre (*Grasping*):** se refiere a la calidad de agarre de objetos que tiene la mano, procurando que dicha calidad no se reduzca a medida que pase el tiempo. Es decir, que exista una cierta invariabilidad de agarre en la toma de objetos por la mano.
- **Manipulación Interna (*Internal Manipulation*):** se refiere al control de los movimientos de la mano en el proceso de agarre, con una cierta variación en el transcurso del tiempo.

Las dos definiciones anteriores están relacionadas con el tipo de agarre, en el sentido de la forma en que la mano robótica sujeta o manipula al objeto, ya sea utilizando todos sus elementos (dedos, pulgar y palma), o bien, usando sólo los dedos o las puntas de los dedos.

Los conceptos de *antropomorfismo* y *destreza* no van emparejados. El aumento en el índice de uno no implica un aumento en el otro. Por el contrario, suelen moverse en direcciones opuestas.

2.3.4. Sistema sensorial

La sensorización de la mano humana, definida como sentido del tacto, está comprendida por 20 tipos de nervios. Ésta es la propiedad más importante para interactuar con los objetos que vaya a sujetar o manipular. Por medio de la misma, sabrá la presión o fuerza requeridas para obtener un buen agarre. Además, conocerá la dirección con la que debe dirigir una determinada fuerza. Por otro lado, permite obtener nociones sobre el tipo de objeto, la temperatura, el tipo de superficie del mismo, por ejemplo. Estos parámetros le indican la mejor manera de interactuar con el objeto.

Aparte del sentido del tacto, se encuentra el sentido de la vista. Éste es un complemento sensorial muy importante para la mano. Antes de entrar en contacto con los objetos, agrega a los parámetros anteriores otros nuevos que indican características tales como su color, su posición o su forma. Todas las propiedades previamente enunciadas, y explicadas, se relacionan estrechamente con la vista, debido a que le otorga un poco de realismo a la mano robótica.

2.3.5. Cantidad de actuadores

Cada uno de los 20 músculos de la mano humana cumple una función específica en cuanto a la destreza o al agarre de objetos. Otros 20 músculos del antebrazo operan también en ella. Si la mano robótica pretende imitar a la humana, se debe considerar que el número de actuadores que debe tener será directamente proporcional al control y al peso de la misma. Por ende, en la actualidad resulta muy complicado implementar la misma cantidad de actuadores en una mano robótica, teniendo en cuenta la cantidad de músculos que tiene una mano humana.

En este aspecto, se deben agudizar las ideas para desarrollar mecanismos o dispositivos que puedan sacar el máximo provecho de un actuador. El objetivo sería reemplazar de manera efectiva varios músculos.

2.3.6. Integración

La integración de la mano robótica es de vital importancia, dependiendo sobre todo de la utilidad que se le dé. Su diseño, y que pueda ser montada con diferentes manipuladores, haciendo las veces de herramienta genérica, no es similar al diseño de una mano para un brazo robótico en particular o meramente para un robot humanoide.

Por lo general, las manos robóticas que se diseñan son independientes o, en algunos supuestos, están montadas a brazos sencillos con el fin de analizar su destreza en el manejo de determinados objetos. Las manos robóticas utilizadas por robots humanoides, sin embargo, priorizan la estética ante la destreza y, en algunos casos, sólo actúan como un simple manipulador simbólico.

Una vez hecho un resumen de las características y propiedades expuestas, se comprende la noción de humanización de una mano robótica. Más allá de la eficiencia en la realización de las tareas esperadas, este concepto refleja cuánto de lejos o de cerca está de parecerse a una mano humana.

2.4. Manos robóticas

En este apartado se hará un estado del arte de las manos robóticas, separándolas en tres grupos dependiendo de la cantidad de dedos que tienen y de su configuración: manos robóticas antropomórficas, manos robóticas semiantropomórficas y manos robóticas no-antropomórficas.

- Manos robóticas antropomórficas: todas aquellas manos que poseen cuatro dedos y un pulgar. Su configuración es similar a la de la mano humana.
- Manos robóticas semiantropomórficas: todas aquellas manos a las que les falta uno o varios dedos. Su configuración es similar a la de la mano humana.
- Manos robóticas no-antropomórficas: todas aquellas manos robóticas que no tienen una configuración similar a la mano humana independientemente del número de dedos.

Se explicarán también cuáles son sus características más importantes y se añadirán comentarios que ayuden a entender el alcance de cada una de ellas. Dentro de cada grupo, se ordenarán atendiendo al año de creación. Se hará de forma ascendente para entender mejor qué avances se fueron realizando en materia de tecnología y en qué medida se aprovecharon posteriormente.

2.4.1. Manos robóticas antropomórficas

Robonaut Hand - NASA (1999)

La mano robótica del robot humanoide para aplicaciones espaciales Robonaut, desarrollado por la NASA [16, 41], es probablemente, en estos momentos, la mano robótica con mayor similitud a la mano humana.

El Robonaut (Figura 2.11) fue diseñado para ayudar a los astronautas en tareas en el espacio (*Extra Vehicular Activity - EVA*). Se llegó a él después de muchos años de investigaciones destinadas exclusivamente a humanoides. Su primer antecesor fue creado en 1973, en el Johnson Space Center de la NASA. Este robot móvil estaba compuesto por dos brazos y unas manos robóticas no-antropomórficas en sus extremos y dos cámaras estéreo para conseguir una visión tridimensional. El Robonaut, que es el último humanoide para aplicaciones espaciales que se ha desarrollado, está dotado de una tecnología muy superior a su predecesor. No sólo a nivel electrónico; sino también a nivel de materiales, actuadores y sistemas de control inteligente.

La finalidad del Robonaut es reemplazar a los astronautas en las tareas de la nave, tanto dentro como fuera de ellas, y en aquellos lugares donde el ser humano corre peligro. Por este motivo, el robot fue concebido con forma y escala idéntica al hombre y es teleoperado. No es un humanoide autónomo. Por otro lado, puede manipular y sujetar las herramientas de los astronautas y desplazarse por ambientes similares. El Robonaut sólo posee una pierna. Al final de la misma, tiene un anclaje que le permite fijarse a las superficies que están preparadas para tal fin a modo de anclaje.

Aparte de ser el primer robot humanoide en poseer un movimiento fino y un control de torque-fuerza para realizar sus movimientos; la destreza de su mano robótica, la *Robonaut Hand* (Figura 2.12), se encuentra lo suficientemente elevada como para llevar a cabo tareas prácticamente imposibles con cualquiera del resto de las manos robóticas ideadas en esa



Figura 2.11: Robot humanoide para usos espaciales Robonaut - NASA

época. Para que esto sea posible, el peso y las dimensiones de la *Robonaut Hand* son realmente antropomórficos [189]. De esta forma, es capaz de realizar movimientos y de tener una destreza similar a la mano humano.



Figura 2.12: Robonaut Hand - NASA

La *Robonaut Hand* está compuesta por cuatro dedos y un pulgar. Junto con la muñeca y el antebrazo, poseen 22 GDLs o articulaciones (20 en la mano y dos en la muñeca). De éstos, 14 (12 en la mano y 2 en la muñeca) son controlados y accionados de manera remota por motores sin escobillas ubicados en el antebrazo, cuyo diámetro es de cuatro pulgadas. La cinemática del dispositivo se aproxima, en un alto porcentaje, a la de la estructura humana. La estructura interna de la *Robonaut Hand* se puede ver en la Figura 2.13.

La mano está claramente dividida en dos partes: el conjunto que interviene en la manipulación con destreza y el conjunto que interviene en el agarre y que permite a la mano mantener estable un objeto. Con esta estructura, la mano cumple las principales propiedades que se deben tener para la manipulación de herramientas de propósito general en actividades dentro de las EVA, según diversos artículos [147, 148]. El conjunto de destreza está compuesto por dos dedos con tres GDLs (índice y central) y el pulgar, mientras que el conjunto de agarre consiste en dos dedos con un GDL (anular y meñique)

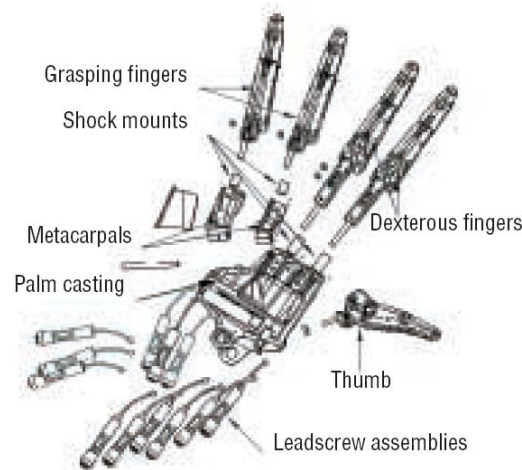


Figura 2.13: Estructura interna de la Robonaut Hand - NASA

y la palma con su GDL.

El accionamiento de los motores es guiado desde el antebrazo a través de tendones a cada una de las articulaciones controladas. Dichos tendones están fabricados con varas flexibles, que al ser giradas por los motores, realizan un movimiento lineal dentro de la mano, utilizando unos tornillos modulares. Los drivers de los motores también se encuentran en el antebrazo.

El sistema sensorial de la mano está compuesto por 42 sensores (sensores de posición de los motores y de las articulaciones, sensores de tensión de los tendones). Actualmente, le están incorporando sensores táctiles (FSR), con lo que la mano es apta para entrar en contacto con el objeto, tanto con los dedos como con la palma.

Esta mano robótica es un claro ejemplo de integración directa a un sistema robótico general, debido a que no puede funcionar de manera independiente.

Tokyo Hand - Universidad de Tokyo (1999)

La mano robótica *Tokyo Hand*, diseñada en la Universidad de Tokyo, fue concebida para ayudar a personas mayores o discapacitadas. Por tal motivo, los robots deben tener manipuladores o manos robóticas con movimientos suaves.

El principal adelanto tecnológico que incorporó esta mano robótica fue el desarrollo de un actuador neumático liviano y pequeño basado en el Músculo Artificial de McKibben [175]. Este actuador, creado especialmente para la mano robótica, tiene sólo 3,5mm de diámetro y una longitud de 380mm. Gracias a sus materiales, este actuador realiza una fuerza máxima de 700gr, con una contracción inversamente proporcional a la fuerza de 30mm. Todo ello a una presión de 0,35MPa. Precisamente, una de las grandes ventajas de este actuador es que es capaz de realizar una gran cantidad de fuerza ocupando un espacio reducido y con un peso muy bajo. Esto, sin contar la fuente de alimentación del aire a presión. Este generador de aire a presión puede ser reemplazado por pequeños cartuchos de aire.

Para construir la estructura de la mano robótica de la *Tokyo Hand*, que se muestra en la Figura 2.14, se partió de un modelo del esqueleto de una mano humana. La mano robótica posee 17 elementos independientes y 16 articulaciones. De éstas, 12 (una en la

muñeca y 11 en la mano) son controladas por los actuadores neumáticos. Tanto los dedos como la palma de la mano son capaces de entrar en contacto con los objetos.



Figura 2.14: Tokyo Hand - Universidad de Tokyo

La energía neumática de los actuadores es suministrada a través de unas válvulas electromagnéticas, controladas directamente a través de un microprocesador. La fuerza mecánica, generada con la contracción de cada actuador, es la encargada de mover las articulaciones de la mano.

Los músculos neumáticos no sólo proveen a la mano de una gran fuerza, sino que también pueden funcionar como sensores de tensión [175]. La presión interior del aire cambia acorde a la carga aplicada en el exterior y todo es controlado a través de un microprocesador y un programa especial. Esta última propiedad es muy interesante, pero la información aportada en este aspecto es muy poca y no queda muy clara la verdadera fiabilidad del sistema.

La mano robótica está integrada a un antebrazo. Por lo tanto, no es posible utilizarla independientemente, aunque no depende del funcionamiento del mismo.

Ultralight Anthropomorphic Hand - Research Center of Karlsruhe (2000)

La *Ultralight Anthropomorphic Hand*, desarrollada por el Centro de Investigación de Karlsruhe (Figura 2.15), es una de las manos robóticas más livianas en la actualidad considerando su relación peso-tamaño, tal y como indica su nombre. Su objetivo principal es el inicio de una línea de investigación para el desarrollo de manos robóticas para ser usadas en manos de robots humanoides o prótesis humanas.

La estructura de la mano está compuesta por 17 elementos independientes y 18 articulaciones. 13 de éstas (tres en la muñeca y diez en los dedos) son controladas. El tamaño de la *Ultralight Anthropomorphic Hand* es mayor que el de la mano humana [252], pero mantiene su cinemática antropomórfica. Esto se puede interpretar como que la mano robótica fue diseñada para fines científicos y como un primer prototipo de prueba.

La mano robótica está dividida en tres secciones. Una primera con los dedos que contienen los actuadores, con los sensores de flexión y con los sensores de tacto. Una segunda con el metacarpo, que se provee de espacio suficiente para alojar el microcontrolador, las micro-válvulas, la fuente de energía y el micro-compresor. Una última con la muñeca, que contiene los actuadores necesarios para flexionar la mano.

Una de las novedades tecnológicas que ofrece esta mano robótica es el desarrollo de unos actuadores hidráulicos flexibles con una relación tamaño-fuerza favorable. Los



Figura 2.15: Ultralight Anthropomorphic Hand - Research Center of Karlsruhe

actuadores, gracias a su especial diseño, están completamente integrados en los dedos y pueden realizar movimientos complejos, con un costo de manufactura relativamente bajo. Básicamente, la estructura del actuador está compuesta por dos elementos que unen las partes móviles y, a su vez, forman una bisagra. Dentro de la misma, se encuentra el actuador hidráulico flexible, que separa los dos elementos, realizando el movimiento y proporcionando la fuerza necesaria, cuando se le inyecta el fluido. Se muestra un esquema del actuador en la Figura 2.16. La ventaja de los actuadores neumáticos son: construcción robusta, capacidad de efectuar grandes fuerzas (desde los 3N a los 6N, dependiendo de la articulación) y una significativa eficiencia. Los actuadores desarrollados para esta mano tienen ventajas importantes en relación con las demás, tales como un diseño flexible ante diferentes construcciones mecánicas (los hace más adaptables), una capacidad de realizar movimientos complejos, un peso muy bajo y un reducido costo de producción. El modelo matemático del actuador puede ser revisado en [251].

La *Ultralight Anthropomorphic Hand* posee gran habilidad para manipular objetos de diferentes tamaños, de forma natural y con una gran consistencia. Toda la superficie de la mano es apta para entrar en contacto con el objeto.

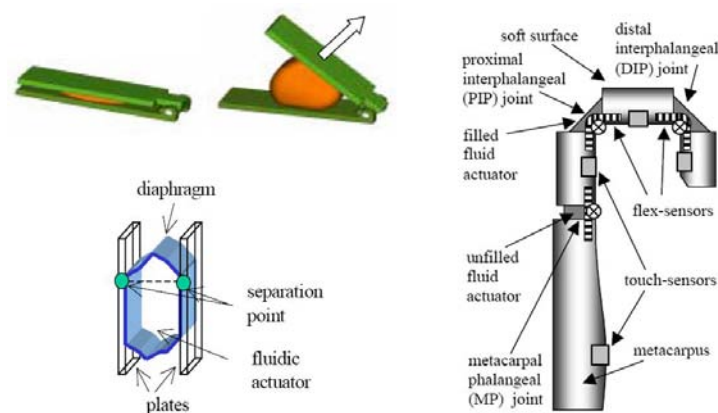


Figura 2.16: Esquema del actuador neumático y estructura del dedo de la Ultralight Anthropomorphic Hand

TUAT-Karlsruhe Humanoid Hand - Universidad de Tokyo y Karlsruhe (2000)

La mano robótica *TUAT-Karlsruhe Humanoid Hand*, desarrollada en conjunto entre la Universidad de Tokyo y la Universidad de Karlsruhe, fue diseñada para ser montada en el robot humanoide ARMAR y puede trabajar de forma autónoma o interactuar en cooperación con humanos. También se pensó como posible prótesis para seres humanos. Por tal motivo, el brazo robótico donde se monta la mano robótica se parece a un brazo humano. La curiosidad de este brazo es que es accionado a través de motores ultrasónicos esféricos [109]. En la Figura 2.17, se puede apreciar el robot humanoide ARMAR, el brazo robótico accionado por un motor ultrasónico esférico y un esquema del actuador esférico.

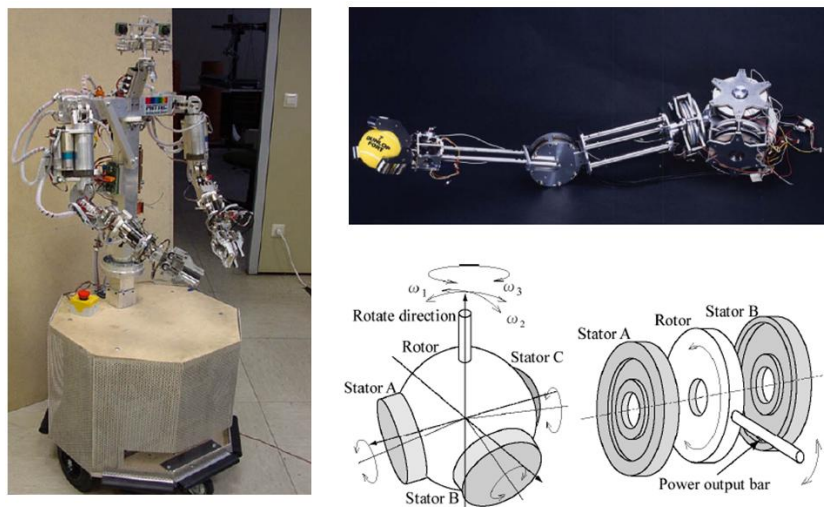


Figura 2.17: Robot humanoide ARMAR, brazo robótico accionado por un motor ultrasónico esférico y esquema del actuador esférico

La *TUAT-Karlsruhe Humanoid Hand* tiene la habilidad de sujetar objetos de diferentes formas y tamaños. Su estructura interna es idéntica a la de la mano humana (cuatro dedos y un pulgar). Su principal propiedad reside en la forma de su palma. Ésta se modifica dependiendo de la posición en la que se ubiquen los dedos y el pulgar, con el fin de efectuar un mejor agarre, tal como sucede en el mano humana (Figura 2.18).

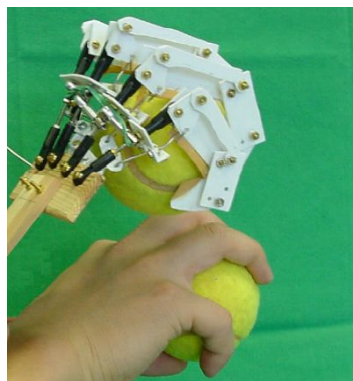


Figura 2.18: TUAT-Karlsruhe Humanoid Hand - Universidad de Tokyo y Karlsruhe

En total, la mano robótica posee 22 elementos estructurales y 24 GDLs o articulaciones. Todas ellas son accionadas con un solo actuador (motor eléctrico) que puede ser montado dentro o alrededor de la mano. Esto hace que el diseño cinemático de la mano sea verdaderamente sorprendente, dejando claro que el prototipo está concebido sólo para tareas de agarre. En ese sentido, su configuración no le permite hacer tareas de manipulación de objetos, puesto que el control sobre cada uno de los elementos estructurales es prácticamente nulo.

El sistema sensorial de la mano robótica se resume en un sensor de posición del motor y en un sistema de auto-adaptación de formas gracias al diseño de la estructura. Debido a la simplicidad del sistema sensorial, no se conoce que por ahora la mano tenga un sistema de control.

Manus Hand (2000)

La *Manus Hand* es un desarrollo en conjunto entre el Consejo Superior de Investigaciones Científicas-CSIC (España), la Universidad Católica de Leuven (Bélgica), el Centro de Recuperación de Minusválidos Físicos del IMSERSO (España), la *Alorman Advanced Medical Technologies Ltd.* (Israel) y el *Advanced Material Technologies N.V.* (Bélgica) [231]. El objetivo principal de este proyecto es el de desarrollar una mano robótica antropomórfica para prótesis en seres humanos. Esto justifica que su configuración sea igual a la de la mano humana.

Una de las características de diseño más importantes que se han tenido en cuenta en ella es lo que se denomina manos robóticas subactuadas. Es conseguir una máxima capacidad de agarre y manipulación con una gran cantidad de elementos estructurales, que permitan adaptarse a las tareas esperadas con la menor cantidad posible de actuadores. Esto significa que un solo actuador puede ejercer su acción en varias articulaciones activas. Las demás características de diseños fueron establecidas según valores deseados de configuración, basados en un estudio de personas a las que podría ir destinada la prótesis.

La estructura de la *MANUS-Hand* está compuesta por diez articulaciones. Sólo tres son controladas de forma independiente. El resto están asociadas con diferentes tipos de mecanismos a las articulaciones controladas (dedos subactuados). Se pueden identificar tres mecanismos independientes (Figura 2.19):

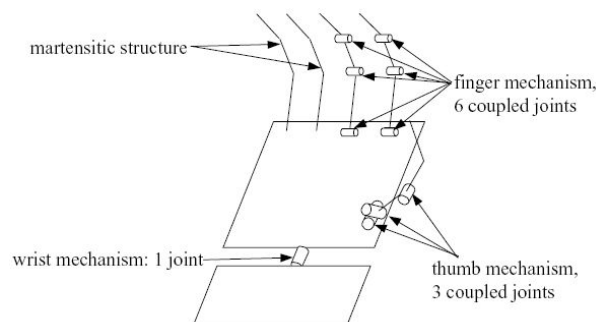


Figura 2.19: Mecanismos independientes de la Manus-Hand

- Mecanismo de los dedos índice y medio: un actuador acciona seis articulaciones, que están asociadas entre sí por medio de un sistema de poleas y tendones cruzados (Figura 2.20).

- Mecanismo del pulgar: un actuador acciona tres articulaciones y realiza sus movimientos ayudado por un mecanismo denominado Rueda de Génova, que hace que el pulgar se flexione y, por otro lado, se ponga en posición opuesta a los dedos. En la Figura 2.21, se puede apreciar el esquema de movimiento del pulgar.
- Mecanismo de la muñeca: un actuador para una articulación.

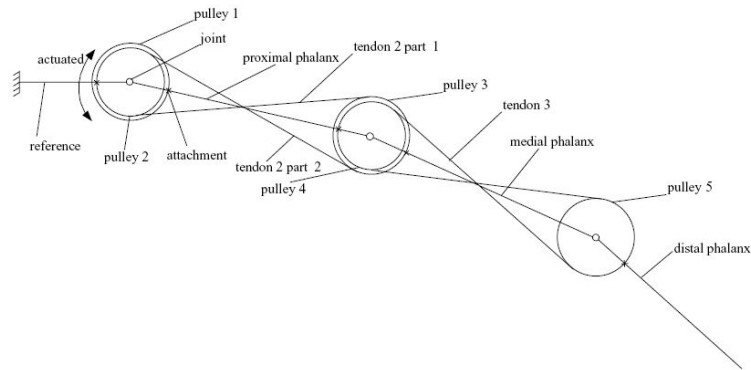


Figura 2.20: Esquema del sistema de poleas y los tendones cruzados de la Manus-Hand

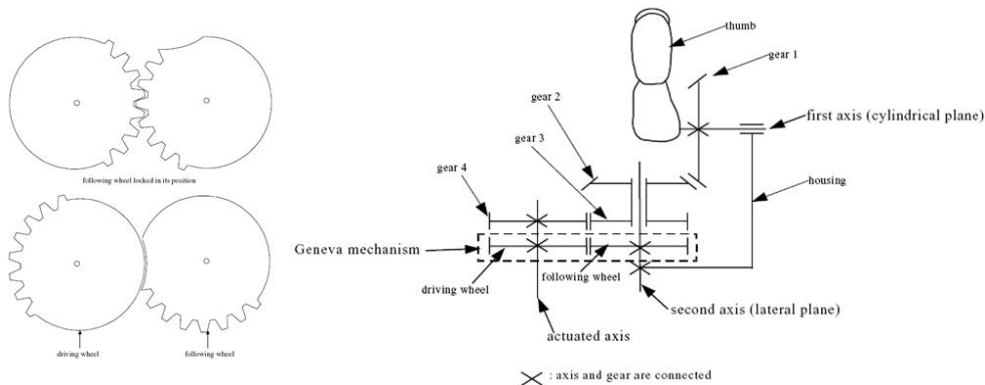


Figura 2.21: Esquema de la Rueda de Génova y esquema de funcionamiento del pulgar de la Manus-Hand

Cada dedo anular y meñique posee dos flejes de material martensítico de cuatro milímetros de ancho y un milímetro de espesor para que sus articulaciones sean flexibles y puedan doblarse. Estos dedos son posicionados manualmente para agarres de larga duración o simplemente por estética.

Las características estructurales más importantes y el diseño final de la *MANUS-Hand* se pueden apreciar en la Figura 2.22. El control de las manos se hace a través de las señales EMG residuales de las personas amputadas y algunas pruebas realizadas a través de una HMI (Interfaz Hombre Maquina), simulada por un ordenador. Las tareas para las que fue creada son de agarre cilíndrico, de precisión, de gancho y lateral. Más adelante, se describirán con más detalle.

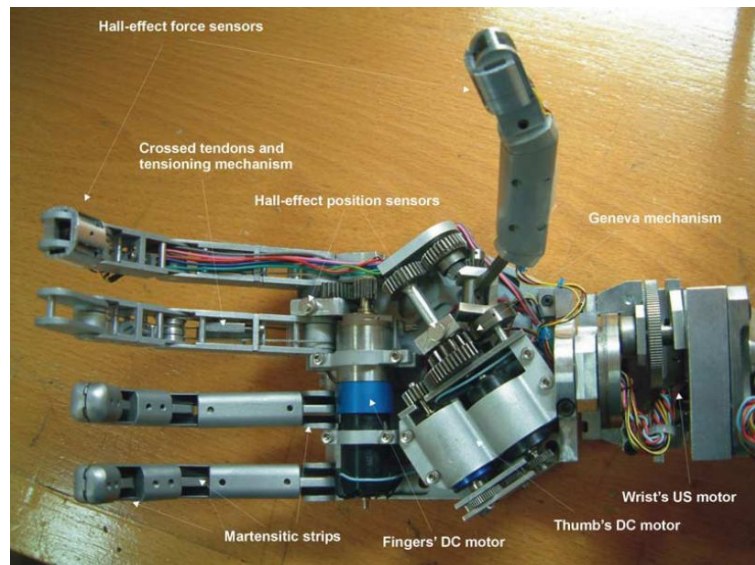


Figura 2.22: Manus-Hand

GIFU Hand - Universidad de GIFU (1997-2004)

La Universidad de GIFU viene desarrollando manos robóticas, que llevan su nombre, desde 1997. Precisamente, en ese año se dio a conocer la *GIFU Hand I* [158, 159], la primera de ellas. La *GIFU Hand II* [160] surgió en 1999; la *GIFU Hand III* [209], en 2002 y; por último, la *KH Hand Type S* [208], en 2004.

En general, las cuatro manos son muy similares a simple vista. Esto se debe a que el concepto de diseño se mantuvo en cada una de ellas, modificando y mejorando ciertos aspectos relacionados con las nuevas tecnologías y materiales.

Las manos fueron concebidas como plataforma de investigación en agarres y manipulación. Por tal motivo; son compactas, livianas y antropomórficas en términos de geometría y tamaño. Otro concepto importante que se mantuvo en la evolución de las manos robóticas GIFU es su fácil mantenimiento y su fabricación sencilla, lográndose de forma especial en la última de ellas.

A continuación, se hará una breve descripción de las tres últimas.

GIFU Hand II

La mano robótica *GIFU Hand II* (Figura 2.23) está compuesta por una palma, cuatro dedos y un pulgar. Su estructura está formada por 21 elementos y 20 GDLs o articulaciones. 16 de ellas son controladas. El tamaño es similar al de una mano humana, siendo una mano antropomórfica.

La diferencia entre la *GIFU Hand I* y la *GIFU Hand II* reside básicamente en dos cuestiones:

- Un rediseño estructural basado en elementos finitos que, por un lado, eliminaba la pérdida de fuerza ocasionada por el rozamiento de los reductores lo que incrementaba su fuerza y su rapidez y, por el otro, permitía reducir el espesor de los elementos estructurales en lugares críticos.
- Una mejora en el sistema sensorial.

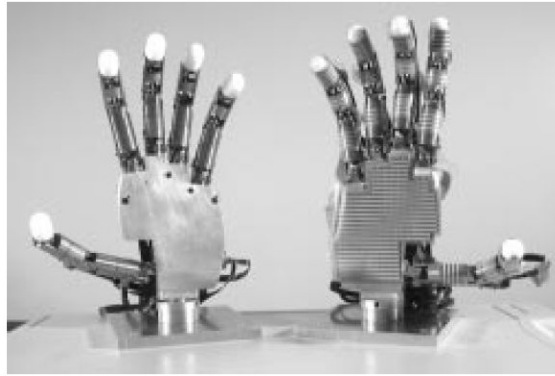


Figura 2.23: GIFU Hand II - Universidad de GIFU

Cada articulación controlada es accionada por servo-motores MAXON, que están ubicados sobre las falanges de los dedos y sobre la palma. Así, el accionamiento es directo.

El pulgar tiene cuatro articulaciones con cuatro GDLs. Cada uno de los dedos, en cambio, tienen sólo tres GDLs. No obstante, también cuentan con cuatro articulaciones y con un eje ortogonal cercano a la palma, que intenta simular los movimientos de la mano humana.

El sistema sensorial de la mano está compuesto por sensores de posición de los motores, sensores de fuerza táctiles de seis ejes y sensores de tacto resistivos. Este último es capaz de detectar 624 puntos de contacto en toda la superficie (Figura 2.24). Para probar el sistema sensorial se desarrollaron dos manos robóticas simétricas a las que se equipó con diferentes sensores.

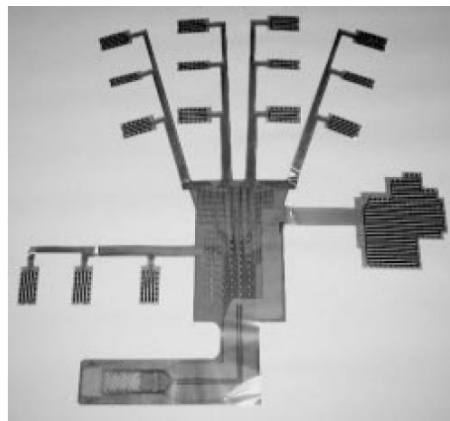


Figura 2.24: Sensores táctiles distribuidos de FSR de la GIFU Hand II

Para el sistema de control, se utilizaron dos ordenadores: uno realizaba el trabajo de control y accionamiento de la mano al que se le añade una unidad externa PCI bus y el otro era utilizado como visualización del comportamiento de los sensores de la mano robótica.

Esta configuración estructural, junto a la sensorización implementada, hace que la *GIFU Hand II* tenga un alto grado de maniobrabilidad de objetos, simulando movimientos de la mano humana de manera muy efectiva. A nivel de integración es una mano robótica que puede ser montada en cualquier brazo, ya que su funcionamiento es totalmente

independiente del mismo.

GIFU Hand III

En este caso, la diferencia entre la *GIFU Hand II* y la *GIFU Hand III* reside en las siguientes cuestiones:

- Una optimización en el diseño de los engranajes, reduciendo aún mas el rozamiento e incrementando la eficiencia de los motores y mayor respuesta.
- Incorporación de un nuevo sensor de tacto distribuido que incrementaba de 624 a 859 puntos de contacto (Figura 2.25).
- Un nuevo sistema de control con operación en tiempo real llamado ART-Linux
- Una breve reducción en el tamaño de los dedos pero un incremento en la longitud total de la mano robótica.
- Optimización en el grado de movimiento de oposición del pulgar, consiguiendo de esta forma mejorar el agarre de la mano.
- Mejora en la cuarta articulación de los dedos, incorporando un nuevo diseño del mecanismo.

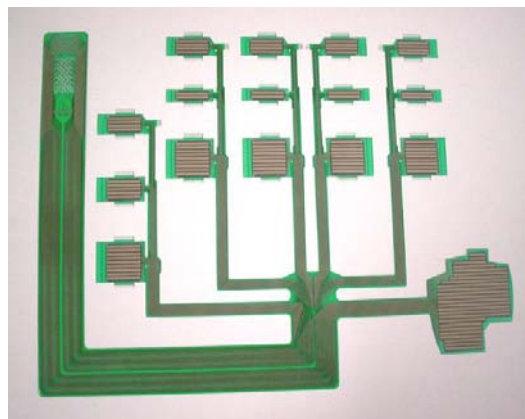


Figura 2.25: Sensores táctiles distribuidos de FSR de la GIFU Hand III

Como se puede apreciar en la Figura 2.26, a simple vista la diferencia con su antecesora es mínima, puesto que ya mantiene su configuración estructural de 21 elementos con 20 GDLs. De ellos, 16 son controlados.

Todas las modificaciones implementadas en la *GIFU Hand III*, y el avance tecnológico en materia de velocidad de procesamiento, proporcionaron una mejora considerable en el control de agarre de diferentes tipos de objetos tal y como se muestra en la Figura 2.27.

Por otro lado, comparándola con la mano humana, este prototipo de mano robótica ha superado la velocidad de operación y respuesta.

KH Hand Type S

Esta es la última versión de manos robóticas diseñadas por la Universidad de GIFU, y como sucedió con las tres anteriores, las diferencias básicamente se centraron en optimizar al prototipo anterior. En este caso, las diferencias son las siguientes:



Figura 2.26: GIFU Hand III - Universidad de GIFU

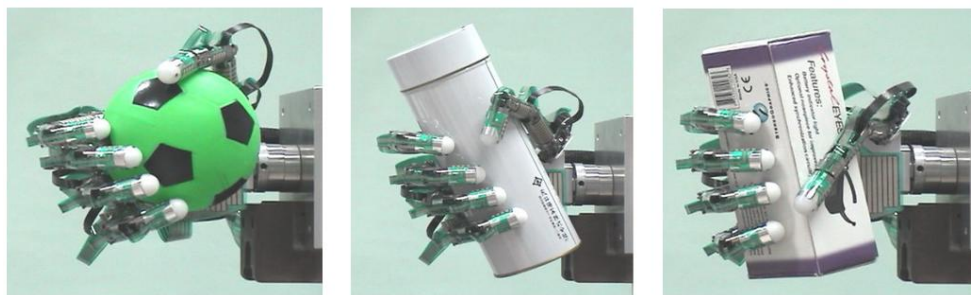


Figura 2.27: Ejemplos de agarre esférico, cilíndrico y prismático de la GIFU Hand III

- Reducción del peso de la mano, reemplazando materiales metálicos con materiales poliméricos en la palma y titanio en los dedos.
- Una nueva optimización en el diseño de los engranajes, utilizando un cuerpo elástico.
- Una reducción en el tamaño de los dedos y en la longitud total de la mano robótica, en parte debida a un cambio en los motores eléctricos que se reducen de 12 a diez milímetros de diámetro.

En la Figura 2.28, se puede ver a la *KH Hand Type S*. Su configuración estructural se mantiene idéntica a la *GIFU Hand III*, de 21 elementos con 20 GDLs. Pero, en este caso sólo hay 15 articulaciones controladas.

El peso total de la mano robótica es de unos 656 gramos, reduciéndolo en más de un 50 % con respecto a su antecesora, la *GIFU Hand III*, que pesaba 1.400 gramos.

Para demostrar la efectividad de la mano robótica, fue montada en un brazo robótico y se construyó un sistema maestro-esclavo con retorno de fuerza para poder realizar tareas de teleoperación, Figura 2.29. Los resultados demostraron que la mano robótica es capaz de realizar gran cantidad de tareas de agarre y manipulación de forma óptima.

UB Hand - Universidad de Bologna (1988 - 2004)

La Universidad de Bologna desarrolla manos robóticas desde 1988, año en el que presentó su primer prototipo, la *UB Hand I* [42]. Su segunda versión, la *UB Hand II* fue

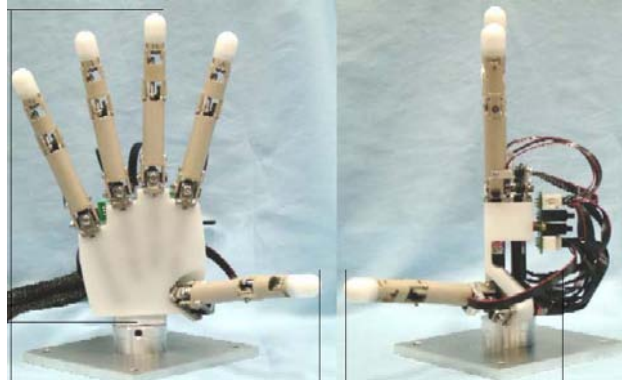


Figura 2.28: KH Hand Type S - Universidad de GIFU

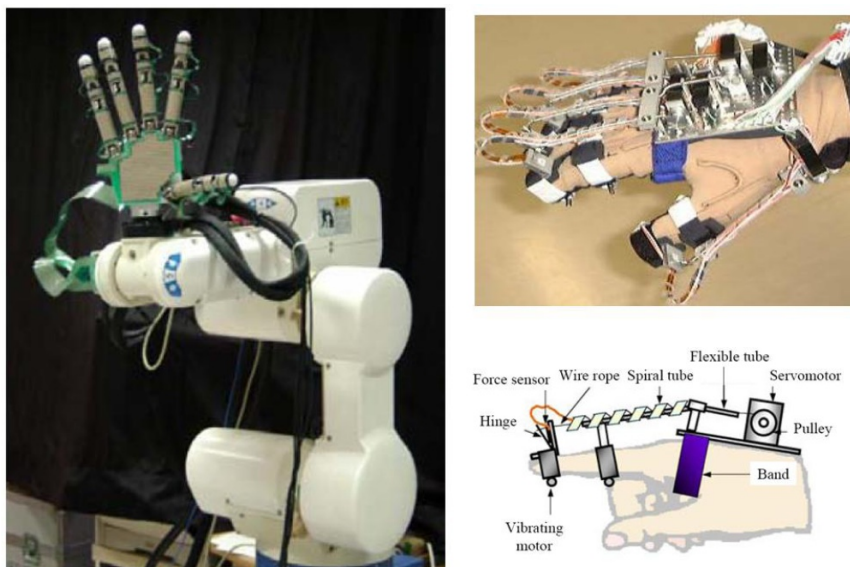


Figura 2.29: Sistema de maestro-esclavo de la KH Hand Type S

construida en 1992 [43, 197, 99]. La tercera versión, y la más avanzada, la *UB Hand III* [32, 33, 29, 186, 187], fue construida en 2004.

El salto tecnológico entre la segunda versión y la tercera es muy grande. Sus configuraciones son completamente diferentes. De hecho, la segunda versión no es una mano robótica antropomórfica. A continuación, se hará una descripción independiente de ambas.

UB Hand II

La estructura de la segunda versión de la *UB Hand* es prácticamente idéntica a la de la primera. Está compuesta por una palma, dos dedos y un pulgar. Este último consta a su vez de 14 elementos independientes y 13 GDLs o articulaciones (dos en la muñeca y 11 en la mano). 13 son controladas. El tamaño de la mano es similar al de la mano humana y todas sus superficies (palma, falanges y punta de los dedos) son aptas para entrar en contacto con el objeto (Figura 2.30).

La posición completamente opuesta del pulgar frente a los dos dedos permite a la mano robótica realizar una gran cantidad de agarres. Como experiencia de la primera

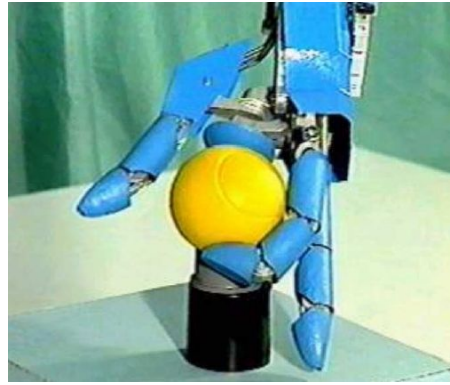


Figura 2.30: UB Hand II - Universidad de Bologna

versión, se mejoraron las superficies de contacto de la palma y los dedos. Cada elemento de los dedos fue mecanizado en un centro de mecanizado controlado por CNC.

La mano robótica está integrada a un antebrazo donde están situados los actuadores (motores eléctricos) y su acción es transmitida hasta las articulaciones por medio de poleas y tendones (Figura 2.31).

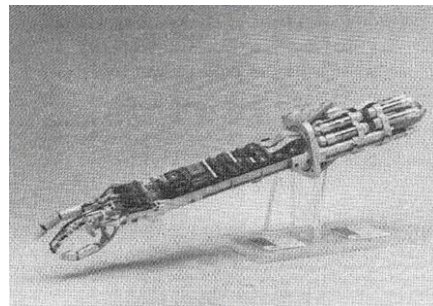


Figura 2.31: Integración de la UB Hand II con un antebrazo

El sistema sensorial de la mano está compuesto por sensores de posición de las articulaciones de efecto Hall y sensores IT (*Intrinsic Tactile*) de seis ejes, ubicados en las falanges y la palma.

UB Hand III

La estructura de tercera versión de la *UB Hand* es totalmente diferente a las anteriores. Incorpora asimismo nuevas tecnologías y nuevos conceptos de diseño.

La estructura de la *UB Hand III* está compuesta por una palma, un pulgar y cuatro dedos (Figura 2.32). Todos los dedos y el pulgar poseen cuatro GDLs y tienen la capacidad de ser accionados independientemente o en parejas, imitando el funcionamiento real de la mano humana.

La estructura del dedo es particularmente diferente a lo que se puede ver en las manos robóticas tradicionales. Su diseño está inspirado en el modelo biológico del dedo humano. No posee articulaciones convencionales rotativas. Por el contrario, sus falanges están unidas por medio de bisagras elásticas accionadas por tendones (Figura 2.33). Este concepto de diseño hace que el dedo sea más simple y más económico, sin perjudicar el aspecto funcional del mismo [188]. El dedo finalmente es recubierto y protegido por un material elástico y sintético que reproduce la textura de la piel humana.



Figura 2.32: UB Hand III - Universidad de Bologna

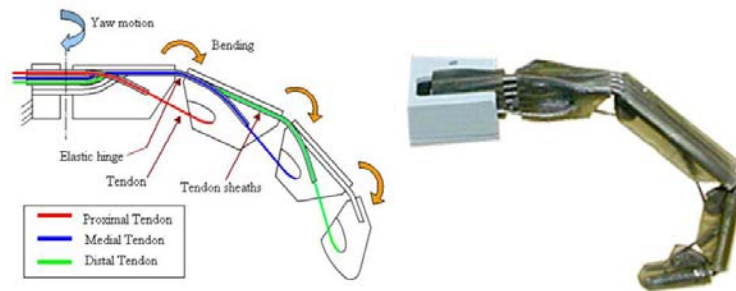


Figura 2.33: Esquema de la estructura interna del dedo de la UB Hand III

Con respecto al tipo de actuadores que utiliza, actualmente se están evaluando dos alternativas: actuadores basados en Músculos Artificiales de McKibben o motores sin escobillas con husillos de bolas. En cualquier caso, los diseñadores aseguran que la mano robótica posee la versatilidad de adaptarse a cualquier tipo de actuador, tanto los existentes ahora como los que puedan surgir en el futuro. Debido al escaso espacio libre que queda en la estructura de la mano robótica, la totalidad de los actuadores van ubicados en el antebrazo, tal y como se puede ver en la Figura 2.34.

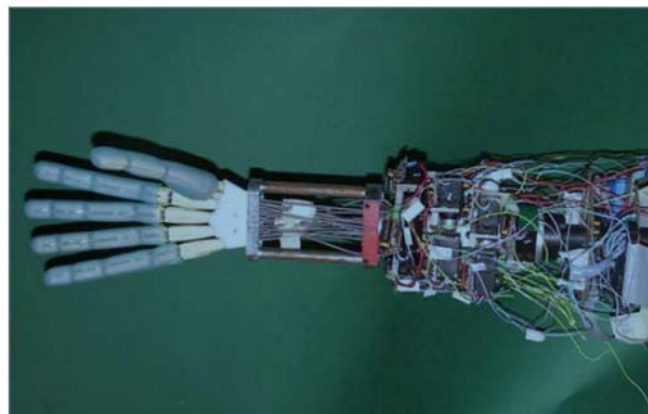


Figura 2.34: La UB Hand III integrada a su antebrazo

El sistema sensorial de la mano robótica está compuesto por sensores de fuerza (matriz de sensores de tacto y sensores de tacto intrínsecos), sensores en las articulaciones

que permiten conocer la posición de la articulación y sensores de curvatura que eliminan errores de posición y saben si las articulaciones flexibles tienen alguna deformación indeseable.

Algunas de las tareas logradas con esta mano se pueden ver en la Figura 2.35.



Figura 2.35: Ejemplos de manipulación y agarre de la UB Hand III

Shadow Hand - Shadow Robot Company (2007)

La *Shadow Robot Company* [10] es una empresa de robótica que en los últimos años ha enfocado una de sus principales líneas de investigación al desarrollo de una mano robótica, la *Shadow Hand*.

Esta mano robótica ha tenido varios prototipos y versiones de cada uno de ellos. Han evolucionado desde el Prototipo A hasta el más reciente, que es el Prototipo C. Básicamente, la diferencia entre ellos fueron avances tecnológicos en materia de control, nuevos materiales, mejoras estructurales y configuraciones más avanzadas que imitaban de mejor forma el movimiento y la cinemática de la mano humana.

No se encuentra información directa de todos los prototipos, sólo se han dado publicidad a aquellos en los que se alcanzaban objetivos verdaderamente interesantes o los que han sido presentados en algún congreso o exposición. En la Figura 2.36, se pueden ver modelos anteriores a la *Shadow Hand*.

Se describirán características y propiedades generales a todos los prototipos de las manos robóticas, pero siempre tomando como base el último de los prototipos, el C3 (Figura 2.37) [275, 233, 241, 13].

La *Shadow Hand* es una mano robótica integrada a su antebrazo. Por ende, no se puede utilizar de forma independiente. La razón de esta característica se debe a que la totalidad de sus actuadores están ubicados en el antebrazo.

Los materiales utilizados para la construcción de la estructura de los prototipos son una gran variedad de sintéticos, aluminios, aceros, otros metales especiales hasta corcho; haciendo que la mano robótica pese 3,9 kilogramos en su último prototipo (sin tener en cuenta su fuente de energía neumática).

La estructura del Prototipo B de la mano robótica está formada por 24 elementos y 23 articulaciones o GDLs. De estos, 23 son controlados (16 de los dedos, cinco del

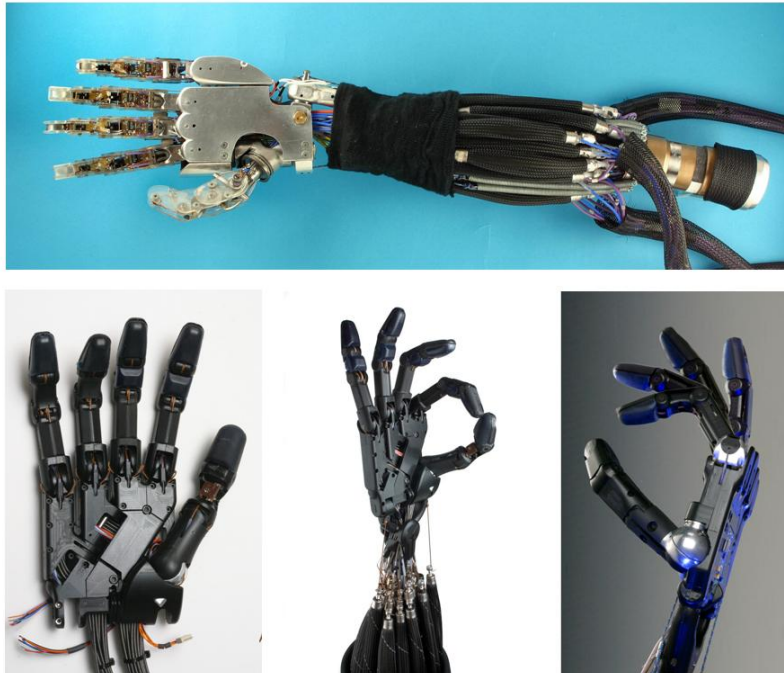


Figura 2.36: Prototipos anteriores de la Shadow Hand - Shadow Robot Company



Figura 2.37: Shadow Hand C3 - Shadow Robot Company

pulgar y dos de la muñeca). El Prototipo C incrementa en dos los GDLs, transformando la estructura a 26 elementos y 25 articulaciones. Esto permite a la mano robótica realizar tareas muy cercanas a la mano humana (Figura 2.38).

La mano robótica es accionada por medio de actuadores neumáticos basados en los Músculos de McKibben. Su movimiento es guiado desde el antebrazo hasta cada articulación a través de tendones. Para el funcionamiento de toda la mano, se necesitan, en un principio, 32 de estos actuadores y, después, en la última versión, 40.

El sistema sensorial del Prototipo B sólo posee sensores de efecto Hall y sensores de tacto. La *Shadow Robot Company* desarrolló, en cooperación con la Universidad de Bielefeld, unos sensores de tacto divididos en 34 regiones dentro de la misma yema del dedo (Figura 2.39) para añadir al Prototipo C.

El sistema de control, y la electrónica, de los prototipos es lo que más ha ido evolucionando y lo que más ha variado. Partió de sistemas lentos, costosos y voluminosos. Ahora,



Figura 2.38: Ejemplos de manipulación y de movimientos de la Shadow Hand

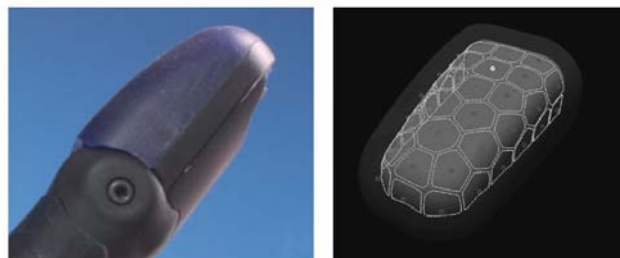


Figura 2.39: Sensores de tacto desarrollados en cooperación con la Universidad de Bielefeld para la Shadow Hand

está prácticamente integrado en la mano y es de dominio público (GNU GPL).

La *Shadow Hand* es la primera mano robótica antropomórfica avanzada que es comercial. Además de la propia mano robótica, se pueden adquirir diferentes accesorios como, por ejemplo, un prototipo del dedo de la mano totalmente independiente.

2.4.2. Manos robóticas semi-antropomórficas

Utah-MIT Dextrous Hand - Universidad de Utah y MIT (1983)

La *Utah-MIT Dextrous Hand*, desarrollada en cooperación con la Universidad de Utah y el Laboratorio de Inteligencia Artificial del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT), fue construida a principios de los 80 y marcó grandes avances relacionados con la investigación sobre conceptos básicos de la teoría de la manipulación, diseños de sistemas de control y sensorización táctil de manos robotizadas [144, 143, 196, 122, 108].

La configuración de la *Utah-MIT Dextrous Hand* está compuesta por una palma, un

pulgar y tres dedos. Su estructura esta formada por 17 elementos y 16 articulaciones o GDLs, controlados en su totalidad con dos actuadores por articulación, lo que suman una cantidad de 32 actuadores (Figura 2.40).

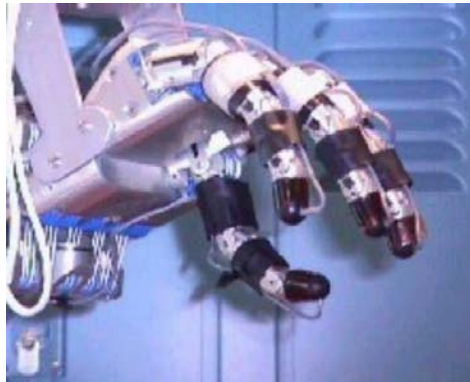


Figura 2.40: Utah-MIT Dextrous Hand - Universidad de Utah y MIT

Cada dedo posee cuatro articulaciones. Tres realizan el movimiento de flexión/extensión. La cuarta articulación, perpendicular a las otras tres, realiza el movimiento radial.

Esta mano robótica fue diseñada para realizar pruebas y estudios de agarre y manipulación; por lo que las superficies de las yemas de los dedos, de las falanges y de la palmas son aptas para entrar en contacto con el objeto.

La totalidad de sus actuadores (cilindros neumáticos) están ubicados fuera de la mano. Así que es una mano integrada a un sistema externo rígido. Sólo puede ser utilizado con este sistema. La fuerza ejercida por cada actuador es guiada a través de poleas y tendones hasta cada una de las articulaciones.

El sistema Sensorial de la mano está compuesto por diferentes sensores. Estos son sensores de posición; sensores rotativos de efecto hall; sensores de tensión de tendones; y sensores de tacto distribuidos en la yema de los dedos, las falanges y la palma.

El sistema de control, tal y como se puede ver en la Figura 2.41, es excesivamente voluminoso. La configuración de la mano, junto con la cantidad de actuadores que posee, hacen que el control de la mano sea muy complejo, sobre todo cuando varias articulaciones del mismo dedo funcionan simultáneamente.

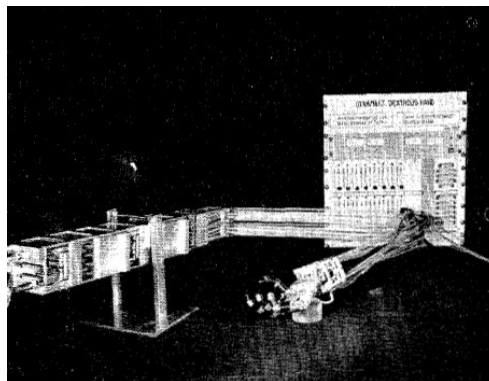


Figura 2.41: Sistema de control de la Utah-MIT Dextrous Hand

Esta mano robótica revolucionó todas las áreas de estudio relacionadas con las manos robóticas. Pero, principalmente, generó la creación de dos áreas de investigación importantes: la referida a la experimentación sobre conceptos básicos de la teoría de la manipulación, diseños de sistemas de control y sensorización táctil; y la relacionada con el diseño de mecanismos y sistemas de sensorización necesarios para la imitación de la mano humana.

Mano robótica del Robot Humanoide COG - Laboratorio de Inteligencia Artificial del MIT (1997)

La mano robótica desarrollada para el Robot humanoide COG (Figura 2.42) en el Laboratorio de Inteligencia Artificial del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) tiene la particularidad de contener la totalidad de los actuadores, 36 sensores y la electrónica de control sobre la estructura de la propia mano robótica [195].



Figura 2.42: Robot Humanoide COG - Laboratorio de Inteligencia Artificial del MIT

La configuración de la mano robótica fue diseñada basándose en la teoría de que una pinza con cuatro dedos es capaz de sujetar el 99% de los objetos que retiene una mano humana [190]. Lo hace utilizando uno de los dedos de forma opuesta a los otros tres, como si fuera un pulgar [243]. Por tal motivo, la mano robótica posee una palma, tres dedos y un pulgar ubicado de forma opuesta (Figura 2.43).

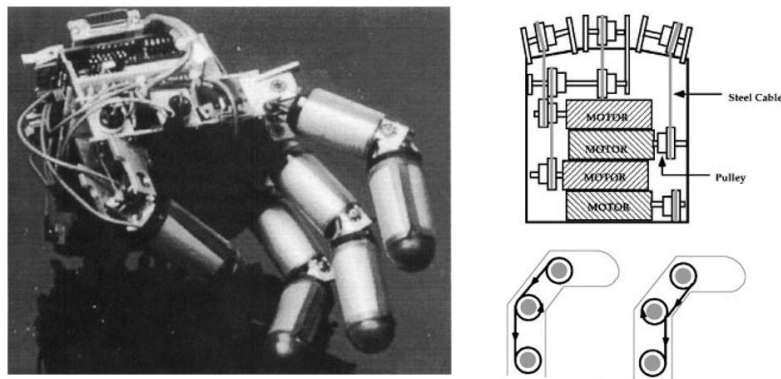


Figura 2.43: Mano robótica del Robot Humanoide COG - Laboratorio de Inteligencia Artificial del MIT

El objetivo principal de esta mano robótica no fue la de conseguir la mano mecánica más avanzada hasta el momento. Fue la de llegar a una herramienta que explore y aprenda el entorno, como haría la mano de un niño, manteniendo los mecanismos cruciales de una estructura antropomórfica simple.

Cada dedo posee dos articulaciones, mientras que cada falange está ahuecada para dejar espacio a la circulación de los tendones. Por otro lado, el pulgar sólo tiene una articulación y está fijado a la palma de la mano. En total, se suman siete articulaciones o GDLs. Las puntas de los dedos están construidas de polietileno. Las superficies de los mismos están cubiertas de un delgado film de vinilo.

Los actuadores (cuatro motores eléctricos montados en la palma de la mano) ejercen su fuerza y movimiento a las articulaciones a través de tendones, usando una innovadora estrategia de guiado que minimiza el peso y la complejidad. Cada polea por la que circulan los tendones posee micro rodamientos de bolas y un eje de acero fijado a la falange. Esto reduce su fricción.

Las articulaciones no son controladas independientemente (un motor por cada dedo y uno para el pulgar) a no ser que se ejerza una fuerza externa a una falange que impida el movimiento de la misma y, de esta forma, conocer la posición de la otra falange (dedos subactuados). Para poder reducir la cantidad de motores, cada uno realiza el movimiento en los dos sentidos de la articulación. Esto se logra rizando el tendón en la propia polea, tal y como se muestra en la Figura 2.43. Para conseguirlo, la longitud del cable debe ser calculada con mucha precisión, para que quede tenso en todas las direcciones.

Su sistema sensorial está formado por 36 sensores que recogen valores de tacto, posición y torque de cada una de las falanges y articulaciones. Para el caso de los sensores de tacto, se han utilizado FSR (*Force Sensor Resistor*) comerciales, que tienen la propiedad de ser muy finos y flexibles. Al ser así, pueden envolver cada falange y la palma de la mano. Para el caso de los sensores de rotación, se han utilizado potenciómetros, con el objetivo de reducir el peso de la mano.

El sistema de control del robot humanoide COG es operado a través de un ordenador MIMD que hace de cerebro. Parte de los recursos del mismo se destinan al control del agarre y manipulación de la mano robótica. Esto le da la propiedad de combinar los movimientos de la mano en paralelo con otras partes del cuerpo del robot humanoide. La mano, por su parte, posee la capacidad de auto-aprendizaje, gracias al importante sistema de visión del robot humanoide.

DIST-Hand - Universidad de Génova (1998)

La *DIST-Hand* fue desarrollada por el *GRAAL-LAB* de la Universidad de Génova en 1998. Su objetivo principal fue la de investigar con manos robotizadas antropomórficas a través de teleoperación en tareas de manipulación fina. Es decir, sólo utilizando las yemas de los dedos [62, 63].

Esta mano robótica posee una palma, tres dedos y un pulgar en posición opuesta a los dedos, pero su tamaño es algo superior al de la mano humana. Su diseño modular es debido a que todos los dedos son exactamente iguales, simplificando su control y permitiendo en un futuro agregarle un dedo más y que su configuración sea antropomórfica. La estructura está formada por 17 elementos y 16 articulaciones, que son controladas en su totalidad, y su peso es aproximadamente de un kilogramo (Figura 2.44).

La mano robótica posee 20 actuadores, motores eléctricos de bajo coste, ubicados de forma externa. Como no tiene un antebrazo, los mismos deben ser fijados indepen-

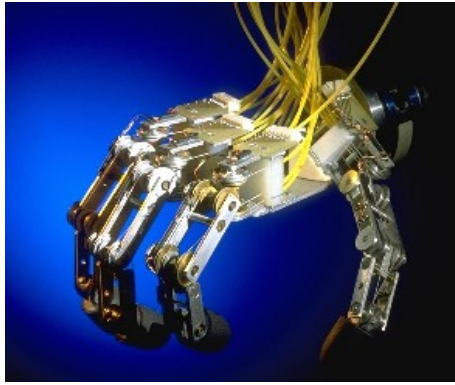


Figura 2.44: DIST-Hand - Universidad de Gnova

dientemente a la estructura que soporta la mano. Para que la ubicación de los motores no afecte directamente a las articulaciones, el movimiento de los mismos es realizado mediante tendones que son recubiertos con vainas flexibles.

El sistema sensorial está compuesto por sensores de efecto hall, sensores de tacto intrínsecos de tres ejes y sensores de posición de los motores.

El sistema es controlado usando VME-Bus programado con la herramienta *fast prototyping*. La última actualización del sistema de control es la incorporación de FPGAs (*Field Programmable Gate Array*) en su arquitectura [115].

DLR-Hand - Centro de Investigación Aeroespacial Alemán (2000)

El Centro de Investigación Aeroespacial Alemán (DLR) inició a mediados de los 90 una nueva fase de diseño de manos robotizadas, que denominó *DLR Hands*. Esta línea de investigación tenía como principal objetivo el desarrollo de un brazo manipulador de los cuales se desarrollaron hasta la actualidad tres prototipos: el LWR-I, el LWR-II y el LWR-III, que es el último y más avanzado para ser teleoperado en tareas espaciales, desde la propia nave o desde tierra [129].

Referido a las manos robóticas, se desarrolló un primer prototipo, con el que se realizaron pruebas de manipulación. La *DLR Three Finger Robotic Hand* consistía en una pinza robótica de tres dedos con tres articulaciones o GDLs, ubicados de forma simétrica (Figura 2.45). Era un diseño de laboratorio. No se montaba en ningún manipulador y sirvió como base para probar sistemas sensoriales [184].

A partir de este prototipo, se fueron desarrollando diversas manos robóticas como la *DLR Hand I*, la *DLR Hand II* y, finalmente, con intenciones de ser comercializada la *HIT/DLR Hand*. A continuación se hará una breve descripción de cada una.

DLR Hand I

La *DLR Hand I* fue diseñada en 1997. Como puede apreciarse en la Figura 2.46 posee una palma, tres dedos y un pulgar compuestos por 17 elementos estructurales con un total de 16 GDLs. 12 de ellos son controlados. Los tres dedos y el pulgar son idénticos. En su momento, la particularidad de este desarrollo fue que la totalidad de sus actuadores estaban integrados en la palma o directamente en las articulaciones de los dedos. La estructura de la mano está compuesta por cerca de 1.000 componentes mecánicos.

En la época en que fue construida, la tecnología en materia de actuadores no estaba especialmente avanzada, por lo que estos eran voluminosos. Si se pretendía tener cierta

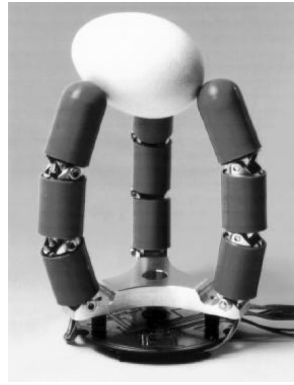


Figura 2.45: *DLR three finger robot hand* - Centro de Investigación Aeroespacial Alemán



Figura 2.46: *DLR Hand I* - Centro de Investigación Aeroespacial Alemán

destreza, controlar todas las articulaciones de la mano robótica y si éstas excedían en un mínimo; no había otra solución que ubicar sus actuadores en la palma o fuera de la mano robótica. El tamaño de la *DLR Hand I* es 1,5 veces el de la mano humana.

Los actuadores que se montaron en la *DLR Hand I* fueron desarrollados por el DLR. Realizaban una acción directa sobre las articulaciones, ya que estaban ubicados dentro de cada falange. Transmitían el movimiento a través de tendones, lo que dotó a la mano de una gran precisión. Los mencionados actuadores consistían en un motor eléctrico combinado con un eje hueco y un reductor planetario, especialmente diseñado para la aplicación [53] (Figura 2.47).

La estructura mecánica interna de cada dedo, tal y como se puede ver en la Figura 2.48 junto con un esquema de funcionamiento, es compleja. Esto hace que su fabricación, montaje y calibrado sea una tarea muy complicada.

El sistema sensorial de la mano está formado por 112 sensores, distribuidos básicamente entre sensores de posición, sensores de fuerza-par, sensores de tacto ubicados en las yemas de los dedos, sensores de temperatura y un sensor de fuerza-par de seis dimensiones en la muñeca.

El sistema de control de la mano estaba a cargo de un multiprocesador en tiempo real, mientras que la arquitectura de control fue ideada de forma modular y dividida en dos niveles: un nivel superior que controla la mano y un nivel local que controla cada uno

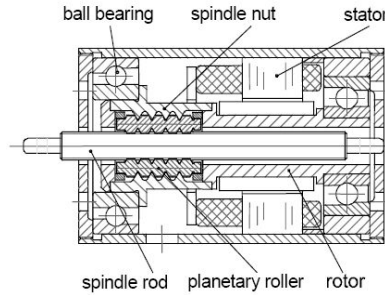


Figura 2.47: Actuator lineal DLR de la DLR Hand I

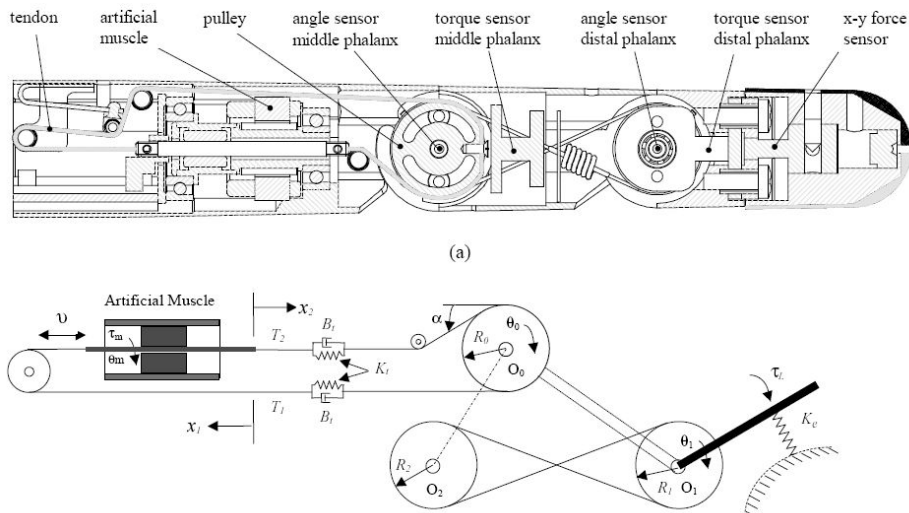


Figura 2.48: Estructura interna del dedo robótico de la DLR Hand I

de los dedos [185, 183].

DLR Hand II

La segunda generación de manos robóticas multi-sensoriales del DLR, la *DLR Hand II* (Figura 2.49), incorpora una gran cantidad de avances tecnológicos en materia de actuadores, materiales, sensores y arquitecturas de control. A nivel estratégico se realizaron grandes esfuerzos relacionados con la tecnología de agarre [52].

La configuración de la mano robótica mantiene su semi-antropomorfismo: una palma, tres dedos y un pulgar compuestos por 18 elementos estructurales con 17 GDLs de los cuales 13 de éstos son controlados con actuadores (motores eléctricos).

Debido a las complicaciones estructurales con la *DLR Hand I*, la *DLR Hand II* incorpora una estructura esquelética abierta con un mantenimiento más sencillo y con el concepto de ahorro de costes de fabricación. La palma, por su lado, tiene la propiedad de reconfigurarse dependiendo del objeto a sujetar o manipular. El pulgar y el cuarto dedo pueden cambiar su posición ayudando a la palma [44, 51], tal y como se puede ver en la Figura 2.50.

Aunque se mantiene la filosofía de ubicar la totalidad de los actuadores sobre la palma y en las mismas articulaciones, los actuadores montados son más potentes que los de su antecesora. Tienen la capacidad de realizar una fuerza de 30N en la yema de los dedos.



Figura 2.49: DLR Hand II - Centro de Investigación Aeroespacial Alemán

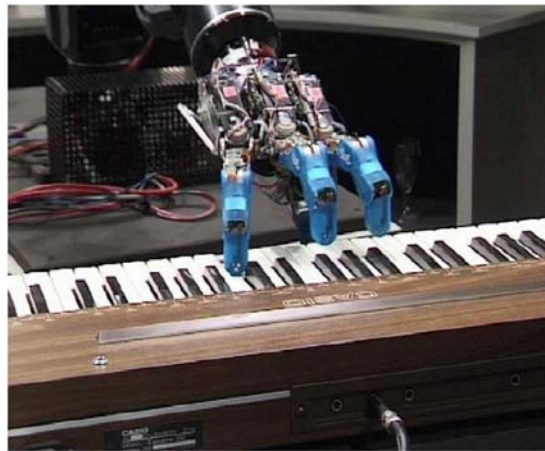


Figura 2.50: La DLR Hand II tocando el piano

Por otro lado, el movimiento de los actuadores es transferido a las articulaciones a través de Harmonic drives y reductores, lo que aumenta aún más su precisión.

En relación con los materiales con los que se fabricó la mano, su avance radica en que las yemas de los dedos fueron recubiertas de silicona. Esto mejora en gran medida la sujeción del objeto con la mano y se acerca al funcionamiento de la mano humana.

El sistema sensorial de la mano está compuesto por sensores de posición de los motores, potenciómetros para conocer el ángulo de giro de las articulaciones y sensores de fuerza de seis ejes en la yema de los dedos. Gracias a su configuración y el concepto de colocar toda su electrónica y la totalidad de los actuadores sobre la propia mano robótica, la *DLR Hand II* es totalmente independiente de cualquier sistema, lo que le permite ser montada en diferentes estructuras o brazos robóticos (Figura 2.51).

DLR/HIT Hand

La *DLR/HIT Hand* es una mano robótica creada en conjunto entre el Centro de Investigación Aeroespacial Alemán (DLR) y el *Harbin Institute of Technology* (HIT). Toma como base los conocimientos obtenidos en el desarrollo de la *HIT AR Hand* [137], la *HIT/DLR Hand* [111, 149, 302, 125] (Figura 2.52 y 2.53) y la *DLR Hand II*; e incorpora nuevos conceptos de fabricación y nuevas tecnologías con la idea final de ser comercializada. Para tal motivo, se consideraron ciertos aspectos no permitidos en la *DLR Hand II*; debido a la complejidad de su fabricación, al uso de elementos mecánicos y electrónicos



Figura 2.51: La DLR Hand II realizando tareas montada en un brazo robótico

especiales hechos a medida y a la complicada calibración del sistema.

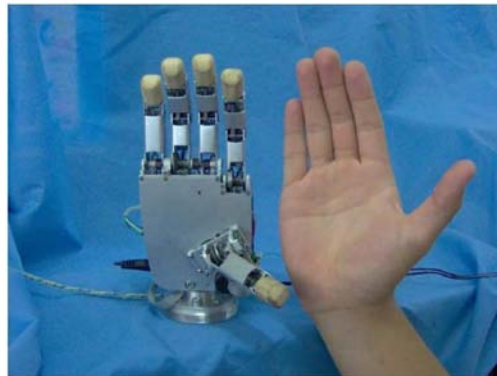


Figura 2.52: HIT/DLR hand - Harbin Institute of Technology y el Centro de Investigación Aeroespacial Alemán

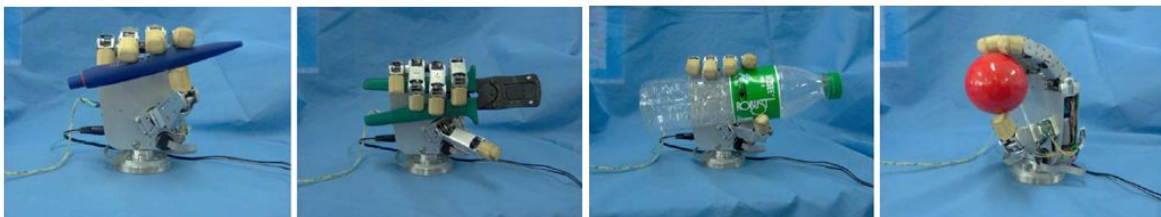


Figura 2.53: La HIT/DLR hand realizando tareas

Como la *DLR Hand II*, la *DLR/HIT Hand* [3] posee una palma, tres dedos y un pulgar, tal y como se puede observar en la Figura 2.54. Cada dedo tiene cuatro articulaciones y tres actuadores. De acuerdo con esta característica, las dos últimas articulaciones están unidas con una conexión rígida. Por otra parte, el pulgar agrega una articulación más para una manipulación más fina y un agarre más potente. Las articulaciones son accionadas por motores eléctricos comerciales, con sus respectivos reductores ubicados en la palma y en las mismas articulaciones. Éstas disfrutan de una gran velocidad, cerca de 180

grados/segundo, y ejercen una fuerza de cinco newton en la yema de los dedos. El peso total de la mano robótica es de 2,2 kilogramos.

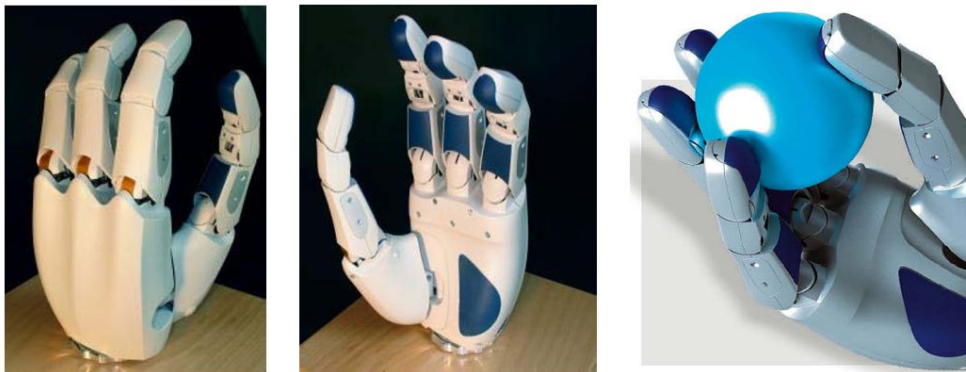


Figura 2.54: La DLR/HIT hand - Centro de Investigación Aeroespacial Alemán y el Harbin Institute of Technology

El sistema sensorial está compuesto en cada articulación por sensores magnéticos de ángulo y sensores de fuerza-par. Cada motor tiene su sensor de posición y sensores de fuerza-par. Finalmente, cada yema de los dedos contiene sensores de tacto de seis ejes.

El sistema de comunicación es muy potente, funcionando hasta a 25Mbps a una distancia de cinco metros de la mano. Se necesitan sólo cuatro cables para conectar la mano con el procesador que trabaja a 225Mhz.

MA-I Hand - Universidad Politécnica de Cataluña (2003)

La Mano Mecánica MA-I (Mano Artificial Inteligente), que se muestra en la Figura 2.55, fue realizada y diseñada en la Universidad Politécnica de Cataluña, con propósitos de investigación en el área de aprehensión y manipulación de objetos [259, 260].

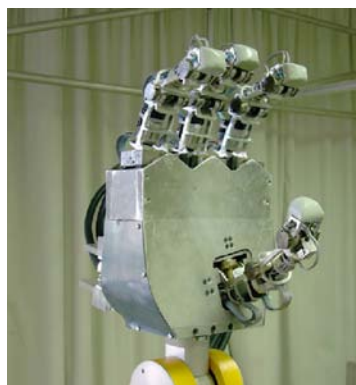


Figura 2.55: MA-I Hand - Universidad Politécnica de Cataluña

Su configuración es de una palma, tres dedos y un pulgar. Cada dedo tiene cuatro articulaciones o GDLs, que están controlados en su totalidad por 16 motores eléctricos con una reductora de sinfín y corona ubicados en la palma de la mano y en las falanges de los dedos, tal y como se puede apreciar en la Figura 2.56. El tamaño de la MA-I es considerablemente superior a la mano humana con sus dedos extendidos, las medidas

de la mano son 36 centímetros de alto, 25 centímetros de ancho y 30 centímetros de profundidad y su peso es de unos cuatro kilogramos. Su peso elevado es debido a que su estructura base de la palma está construida en fundición, mientras que los dedos están hechos de aluminio en su gran mayoría.

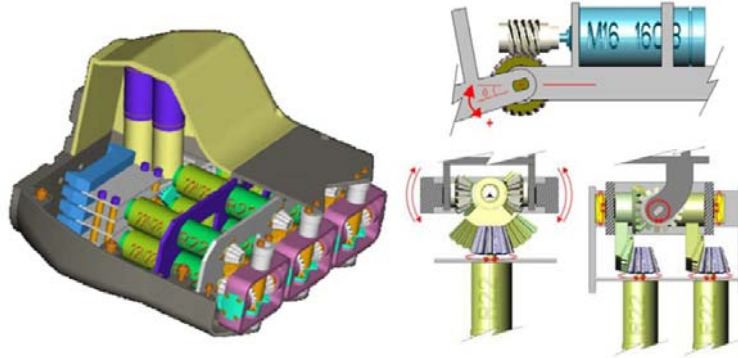


Figura 2.56: Configuración de los actuadores y su ubicación dentro de la MA-I Hand

El sistema sensorial está compuesto por sensores de posición de los motores, finales de carrera. Se puede colocar cualquier tipo de sensor a las yemas de los dedos.

La mano robótica MA-I fue diseñada para ser integrada o montada en cualquier brazo robótico industrial, con lo que podemos decir que es auto-contenida e independiente. Su objetivo no es el de ser una mano antropomórfica, sino el de investigar más a fondo el funcionamiento de la mano humana en las tareas de *pinch grasp*.

2.4.3. Manos robóticas no-antropomórficas

Stanford/JPL Hand - Universidad de Stanford (1983)

La Universidad de Stanford y el *Jet Propulsion Laboratory* (JPL) desarrollaron la *Stanford/JPL Hand*, también conocida como la *Salisbury Hand*. A pesar de haber sido creada hace 25 años, es uno de los manipuladores robóticos más referenciados y considerados en los desarrollos actuales [245]. El diseño de la pinza está motivado por consideraciones antropomórficas relacionadas a la cinemática y al control de la mano humana [122].

Su estructura está compuesta por 10 elementos y 9 articulaciones, haciendo que su configuración sea de tres dedos con tres GDLs. Cada uno se acciona independientemente. La pinza robótica no posee palma, ya que solo fue pensada para utilizar las yemas de los dedos y realizar tareas de manipulación fina o *pinch grasping* (Figura 2.57).

Los actuadores montados en la pinza son motores eléctricos con reductores. Su movimiento es guiado a cada articulación a través de poleas y tendones en algunos tramos envainados.

El sistema sensorial está compuesto por sensores de posición de los motores (encoders), sensores de tensión de los tendones, sensores de tacto y una matriz de sensores de 8 x 8 en la superficie cilíndrica de las yemas de los dedos [101, 66].

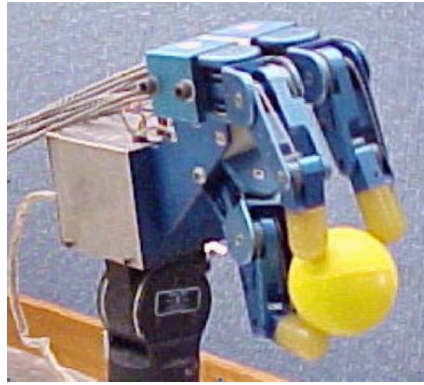


Figura 2.57: Stanford/JPL Hand - Universidad de Stanford

Barrett Hand - Barrett Technology Inc.

La *Barrett Hand*, desarrollada por la empresa *Barrett Technology Inc.* [1] por primera vez en 1988, fue una de las primeras manos robóticas no-antropomórficas con un sistema de control complejo que se comercializó. Ha ido evolucionando a través de los años manteniendo su configuración. Lo que ha variado son los materiales constructivos, actuadores, sensores y sistemas de control. La versión BH8-250 (Figura 2.58) es una de las últimas. Se hará una breve descripción a continuación [276, 14].



Figura 2.58: Barrett Hand - Barrett Technology Inc.

Desde su creación hasta la actualidad; una gran cantidad de Universidades, Institutos Tecnológicos o empresas innovadoras utilizan a la *Barrett Hand* como plataforma para sus propios desarrollos o investigaciones, puesto que es una pinza robótica muy robusta y versátil.

Tanto la *Barrett Hand* BH8-250 como sus antecesoras están compuestas por una palma y tres dedos idénticos. Dos de ellos son capaces de cambiar su posición hasta ponerse en paralelo y en el mismo sentido que el tercero. Cada dedo posee dos articulaciones que son accionadas por un solo motor eléctrico. En la palma, se encuentra un cuarto motor que es el encargado de posicionar a los dos dedos móviles. Estos actuadores permiten ejercer una fuerza de 15 newton en la punta de los dedos. El peso total de la pinza es de 1,18 kilogramos.

El paquete electrónico de control se encuentra debajo de la palma y está compuesto por un microprocesador central, que coordina cuatro microprocesadores que controlan el

movimiento de los motores. Estos microprocesadores se comunican entre sí a través de una línea RS232. A su vez, el microprocesador central se comunica con un ordenador personal que hace de interfaz de usuario y que se encarga de la programación, de la gestión y del control de la pinza.

Comercialmente, la mano incorpora sensores de posición de los motores (encoders incrementales) y deja a voluntad del investigador o el usuario final el añadir otros sistemas sensoriales a la pinza.

MARS Hand y SARAH Hand - Universidad de Laval

El Laboratorio de Robótica de la Universidad de Laval en Canadá [5], viene investigando y desarrollando manos robóticas con mínima cantidad de actuadores (manos robóticas subactuadas) para aplicaciones espaciales desde principios de los 90'. En estas investigaciones se desarrollaron dos manos robóticas no-antropomórficas, la *MARS Hand* y la *SARAH Hand*, y de esta última surgieron diferentes prototipos como el P1, el M1, el CSA, el neumático y por último el UKAEA.

MARS Hand

Fue la primera pinza robótica desarrollada en 1996 con el objetivo de usarla como plataforma de ensayos para investigar el funcionamiento y los posibles diseños de manos robóticas subactuadas. La *MARS Hand* (Figura 2.59) posee una palma y 3 dedos con 3 articulaciones cada uno y están montados directamente sobre el módulo de accionamiento. Estos módulos de accionamiento independientes están a su vez montados sobre la estructura base de la pinza robótica, lo que permite a cada dedo rotar sobre si mismo para adoptar diferentes posiciones dependiendo del objeto a sujetar. La configuración de la mano es muy parecida a la de la *Barrett Hand* con la diferencia que agrega una articulación más a cada dedo y los dedos móviles giran en su propio eje no alrededor de la palma como la hacen en la *Barrett Hand* [119].



Figura 2.59: MARS Hand - Universidad de Laval

La superficie de los dedos es plana para facilitar su mecanización y el estudio de estrategias de agarre de objetos en este tipo de superficies. Cada dedo a su vez es accionado por un solo motor eléctrico para los movimientos de apertura y cierre y la transmisión de dicho movimiento se hace a través de un husillo de bolas y correas dentadas, esta última permite que el tamaño de la pinza sea mas compacta y a su vez modificar el radio de transmisión sin complicaciones ni nuevos diseños. Por otro lado, cada modulo

de accionamiento consta también de un moto-reductor para controlar el movimiento de posicionamiento del dedo para que gire 60 grados. Esto hace que la fuerza realizada en cada dedo sea controlada independientemente. Por lo tanto la *MARS Hand* posee un total de 6 actuadores que proporcionan el movimiento a 12 articulaciones o GDLs con un peso total de la pinza robótica de 9Kg.

El sistema sensorial de la *MARS Hand* se compone solamente de sensores de posición de los motores y sensores de tacto ubicados en la superficie plana de los dedos y en la palma.

SARAH Hand

Para reducir el número de actuadores montados en la *MARS Hand* y, por ende, reducir la complejidad del sistema de control necesario, la *SARAH Hand* (*Self-Adaptive Robotic Auxiliary Hand*) introduce el concepto de *subactuado* en los dedos y en lo que hace entre ellos mismos. Por otro lado, se desarrolla un mecanismo denominado reductor diferencial [39], que permite emparejar el movimiento de orientación de los dedos.

La configuración de la pinza robótica es la misma que la de la *MARS Hand*: una palma y tres dedos con tres GDLs más un GDL para el movimiento de orientación. Esto suma un total de diez GDLs que son accionados con sólo dos actuadores; uno, para la apertura y cierre sincronizado de los tres dedos y, otro, para el movimiento de orientación de los mismos. A diferencia de la *MARS Hand*, en la *SARAH Hand* no es posible controlar la fuerza de cada dedo de forma independiente y así asegurar de forma óptima la fuerza de cierre. Por otro lado, para poder realizar todos los movimientos de la pinza con sólo dos actuadores, son necesarios 16 reductores, con lo que aumenta la complejidad del diseño y el montaje. Precisamente, el diseño de esta pinza robótica está protegido por las patentes US650870 y CA2406921 y por la patente mundial pendiente WO2001/091979.

La *SARAH Hand* tiene varios prototipos con diferentes aplicaciones, basándose en el mismo concepto y estructura. Estos prototipos se describen a continuación:

- **Prototipo M1:** fue desarrollado en colaboración con el *MD Robotics Limited*, fue adaptado para el SPDM (*Special Purpose Dexterous Manipulator*) del *Canadian Space Arm* y fue usado en la Estación Espacial Internacional. Si bien este prototipo de prueba está calificado para el espacio; la versión final, con materiales y lubricantes correctos, todavía se encuentra en fase de desarrollo. Las características más relevantes de este prototipo son que es accionado externamente a través del anclaje del SPDM con mecanismos especiales y que no tiene sistema sensorial incorporado. Su estructura está construida básicamente en aluminio anodizado de alta resistencia (Figura 2.60).
- **Prototipo P1:** era una réplica del Prototipo M1, pero construido en plástico. Este prototipo tenía por finalidad la validación rápida de los mecanismos y el concepto general en tierra de la pinza robótica. También fue usado como herramienta de demostración y como plataforma de prueba de las tareas que iba a realizar en el espacio el Prototipo M1, con cierta reducción de sus funciones debido a la robustez de los materiales (Figura 2.61).
- **Prototipo CSA:** fue diseñado por la Agencia Espacial Canadiense (CSA - *Canadian Space Agency*) para ser montado en uno de los dos brazos robóticos del *CSA Automation and Robotic Testbed* (CART). El tamaño y configuración es similar al Prototipo M1 (Figura 2.62).



Figura 2.60: SARAH M1 Hand - Universidad de Laval

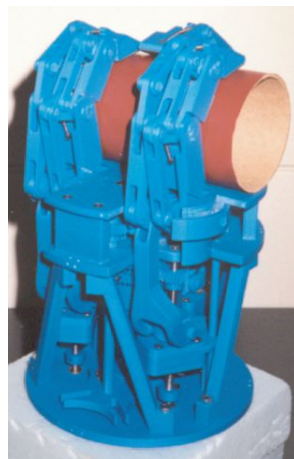


Figura 2.61: SARAH P1 Hand - Universidad de Laval

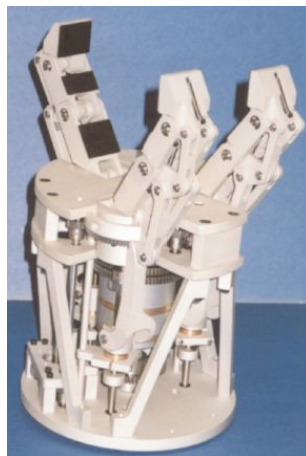


Figura 2.62: SARAH CSA Hand - Universidad de Laval

- Prototipo UKAEA: fue desarrollado por el *United Kingdom Atomic Energy Authority*

para ser utilizado en tareas de limpieza en centrales nucleares (Figura 2.63).



Figura 2.63: SARAH UKAEA Hand - Universidad de Laval

- **Prototipo Neumático:** se reemplazó el reductor diferencial que provee el movimiento a los dedos por un actuador neumático. Este prototipo se pueden ver en la Figura 2.64.

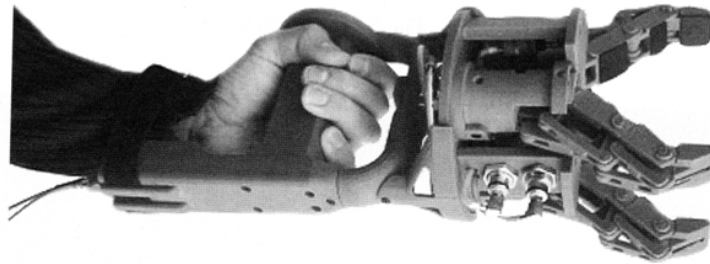


Figura 2.64: SARAH Pneumatic Hand - Universidad de Laval

Karlsruhe Dextrous Hand II - Universidad de Karlsruhe (2001)

La pinza robótica *Karlsruhe Dextrous Hand II* es la segunda versión de mano robótica no-antropomórfica desarrolladas por la Universidad de Karlsruhe. El desarrollo de la primer pinza robótica, denominada *Karlsruhe Dextrous Hand* [277, 93], se inició en 1990 y comenzó a dar resultados experimentales a partir de 1994. Es una pinza robótica basada en un concepto modular y está compuesta por tres dedos con tres GDLs cada uno. En total, tiene nueve GDLs totalmente independientes (Figura 2.65).

Su principal objetivo era investigar sobre la programación de sistemas complejos y el desarrollo de un control en tiempo real con información multisensorial, que permita manipular con destreza y fiabilidad [278]. Esta versión de la *Karlsruhe Dextrous Hand* fue construida con componentes industriales disponibles, lo que permitía construir y testar diferentes configuraciones cinemáticas y geométricas. Ésta es la razón principal por la cual se desarrolló con una estructura modular.

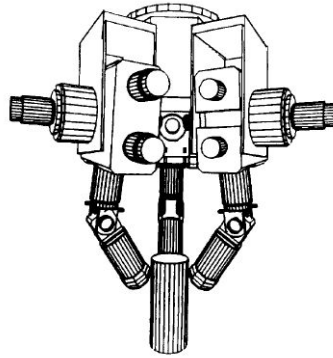


Figura 2.65: Esquema de la Karlsruhe Dextrous Hand II - Universidad de Karlsruhe

Los tres dedos modulares están montados en triángulo sobre el plano base de la mano, que a su vez es montado en un brazo robótico. Los tres dedos son idénticos. Sus tres GDLs independientes hacen que sea la configuración mínima necesaria para manipular un objeto en un espacio cartesiano. La configuración de cada dedo se puede apreciar en la Figura 2.66.

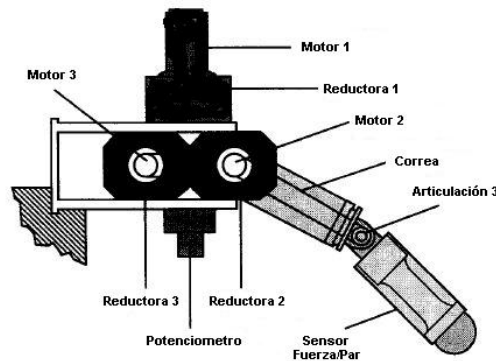


Figura 2.66: Configuración del dedo de la Karlsruhe Dextrous Hand

La cinemática de cada dedo está formada por dos articulaciones distales, que rotan en ejes paralelos entre sí, y por una tercera articulación, ubicada en la base del dedo y que rota en un eje perpendicular a las demás articulaciones. Cada articulación es accionada por motores DC conectados a unas reductoras *Harmonic-Drives*. Las articulaciones distales son accionadas directamente desde las reductoras, mientras que la articulación que está ubicada en la base es accionada a través de correas de acero. Esto minimiza la fricción y los efectos de la elongación.

El sistema sensorial está compuesto por *encoders* incrementales que miden la posición y la velocidad de las articulaciones. En el extremo de cada dedo están situados unos sensores fuerza/par de tres ejes. Este tipo de sensor, especialmente diseñado, mide una fuerza y dos pares, que luego permiten calcular la fuerza normal y las fuerzas tangenciales ejercidas sobre la yema del dedo.

Los problemas más importantes que ha tenido la *Karlsruhe Dextrous Hand* radican en la transmisión elegida para trasladar el movimiento de los actuadores hacia las articulaciones y en el control debido a la fricción de los mismos.

En base a la experiencia y a los avances tecnológicos, la Universidad de Karlsruhe desarrolló su segunda versión de mano robótica, la *Karlsruhe Dextrous Hand II*. Ésta está conformada por cuatro dedos autónomos ubicados ortogonalmente entre sí. Éstos tienen tres articulaciones independientes cada uno. No es en absoluto antropomórfica, pero su propósito principal no es la estética, sino manipular objetos de manera eficiente (Figura 2.67). El sistema mecánico de la mano está compuesto por: una estructura mecánica, un sistema de actuadores independientes y un sistema sensorial [265, 220].

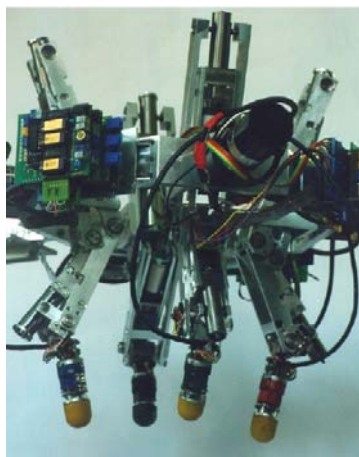


Figura 2.67: Karlsruhe Dextrous Hand II - Universidad de Karlsruhe

Los diferentes tamaños y la posición de los dedos de la mano humana facilitan, en la mayoría de los casos, la manipulación y el agarre de diferentes objetos. Trasladado esto a una mano robótica, su control se complica enormemente y hace que se incremente el coste significativamente. El disponer de dedos robóticos simétricos, idénticos y con la misma configuración hace que el coste de la *Karlsruhe Dextrous Hand II* disminuya.

El sistema sensorial de la *Karlsruhe Dextrous Hand II* está compuesto por encoders angulares, ubicados directamente en el eje de los motores. Como se encuentran antes de las reductoras, se incrementa su precisión. Para sentir la fuerza aplicada por cada dedo al objeto, se diseñaron sensores fuerza-par de seis dimensiones especiales (Figura 2.68). Por último, en la palma de la mano se ubican tres sensores de triangulación láser colineales para determinar tanto la distancia del objeto como la orientación de una de las superficies del mismo.

En esta mano robótica, el sistema mecánico es el que define la forma de la mano y el tipo de objetos que puede agarrar o manipular. El sistema de actuadores, en cambio, precisa la fuerza que puede desarrollar y los movimientos que puede realizar.

La *Karlsruhe Dextrous Hand II* fue diseñada para aplicaciones en entornos industriales y para la manipulación de objetos propios de esa actividad (Figura 2.69), tales como cajas o cilindros. Lo novedoso de esta mano fue el agregar un actuador a la yema de cada dedo, que hace que gire sobre si misma.

High-Speed Tokyo Hand - Universidad de Tokyo (2001)

La *High-Speed Tokyo Hand* es una mano desarrollada especialmente para coger objetos a alta velocidad. Como se observa en la Figura 2.70, está formada por ocho articulaciones y tres dedos [212].

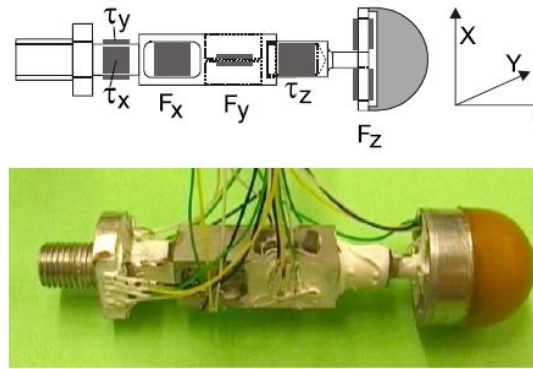


Figura 2.68: Sensor fuerza-par de la Karlsruhe Dextrous Hand II

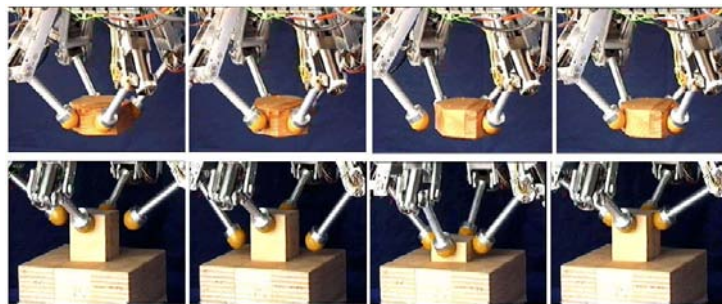


Figura 2.69: La Karlsruhe Dextrous Hand II realizando tareas de manipulación



Figura 2.70: High-Speed Tokyo Hand - Universidad de Tokyo

La filosofía de diseño utilizada en esta pinza robótica se basa en maximizar la fuerza que pueda ejercer minimizando la cantidad de mecanismos que intervienen, particularmente está focalizado en tres aspectos: bajo peso, alta velocidad y aceleración y por último la precisión.

La estructura de la *High-Speed Tokyo Hand* esta formada por tres dedos montados en una plataforma que no alcanza a ser una palma denominados dedo derecho, índice e izquierdo. El dedo índice posee dos GDLs mientras que los dedos derecho e izquierdo poseen tres GDLs cada uno, sumando así ocho GDLs en total.

Cada articulación es accionada por un mini-actuador de alta prestación con reductores

Harmonic Drive, especialmente diseñados y adecuados para ella. Para la sensorización, a cada articulación se le incorporaron unas galgas extensiométricas y un sistema de visión. El conjunto mecánico de la mano tiene un peso de sólo 800 gramos, sin considerar el sistema de visión. Posee gran capacidad de movimiento a alta velocidad (puede cerrarse a una velocidad de 180 grados en 0,1 segundos) y un amplio poder de agarre (en la yema de los dedos se pueden efectuar fuerzas de hasta 28 newton).

El factor mas importante del sistema de control es el *feedback* otorgado por la cámara de visión. Ésta esta compuesta por dos cámaras con un sistema masivo de visión paralela denominado CPV (*Column-Parallel High Speed Vision System*) [289].

En la Figura 2.71 se puede apreciar tareas de manipulación realizadas por la *High-Speed Tokyo Hand* y en la Figura 2.72 se muestra una secuencia de agarre en la que se ha dejado caer un cilindro sobre la mano y ésta logra sujetarlo con sus tres dedos. Algunos estudios y ejemplos de manipulación y sujeción se analizan en las referencias [287, 95, 266, 214, 293, 284]

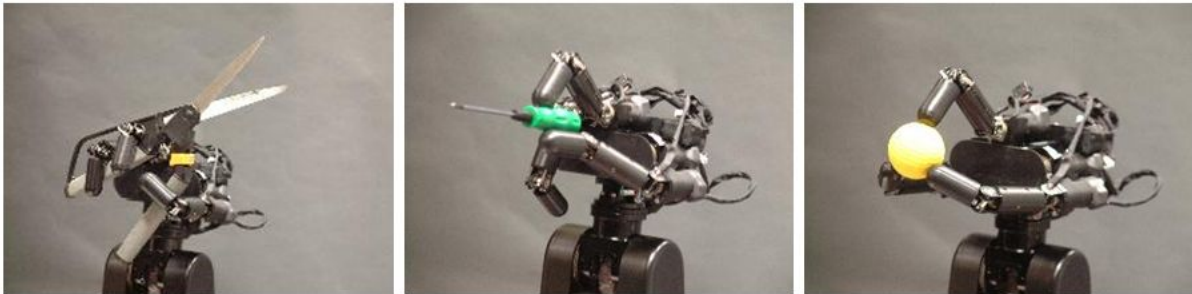


Figura 2.71: La High-Speed Tokyo Hand realizando tareas de manipulación de objetos

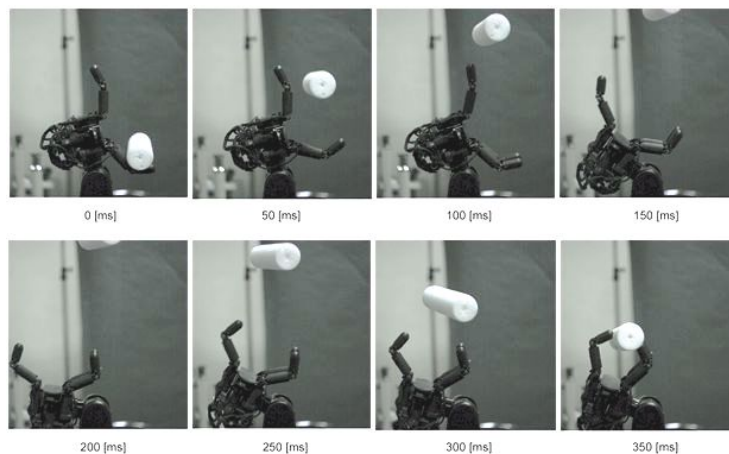


Figura 2.72: La High-Speed Tokyo Hand sujetando un cilindro que cae

Actuadores para manos robóticas

3.1. Introducción

Actualmente no existe una definición exacta de actuador, de hecho la Real Academia Española aun no la ha incorporado en su diccionario como una palabra a pesar de la intensa utilización en el ámbito de la ingeniería.

Si aceptamos que la palabra actuador deriva de la palabra del idioma inglés *actuator* nos encontramos con una gran cantidad de definiciones dependiendo del ámbito en la que se la quiera definir. Las siguientes definiciones son las que más se acercan al tema de esta tesis:

IEEE Terms and Definitions - *A mechanical device that accepts a data signal and performs an action based on that signal.*

RobotWorx (www.robot.com) - *A piece of equipment that allows a robot to move by conversion of different energy types such as electrical or mechanical processes using liquid or air.*

Bettscomputers - *A device which performs the physical movement of a robot.*

Wikipedia - *An actuator is a mechanical device for moving or controlling a mechanism or system. It takes energy, usually transported by air, electric current, or liquid, and converts that into some kind of motion.*

Como se puede observar la palabra actuador no esta asociada a un solo elemento sino que a un conjunto de elementos que a través de un determinado evento es capaz de transformar un tipo de energía en un movimiento, acción o fuerza.

Basándonos en esta definición de actuador, podemos decir que el mismo esta compuesto por diferentes elementos que se pueden ver representados en el diagrama de la Figura 3.1.

Uno de los elementos más importantes de un actuador es el transformador de energía ya que es un elemento indispensable del mismo y es el encargado de transformar un determinado tipo de energía (eléctrica, neumática e hidráulica) en algún tipo de movimiento (lineal o rotacional). Dependiendo del tipo de movimiento que el transformador de energía entrega es necesario que el actuador incorpore un sistema de transmisión de movimiento. Éste se encarga tanto de cambiar el tipo de movimiento como de trasladar simplemente ese movimiento de un sitio a otro. Para finalizar, el sistema de transformación de datos

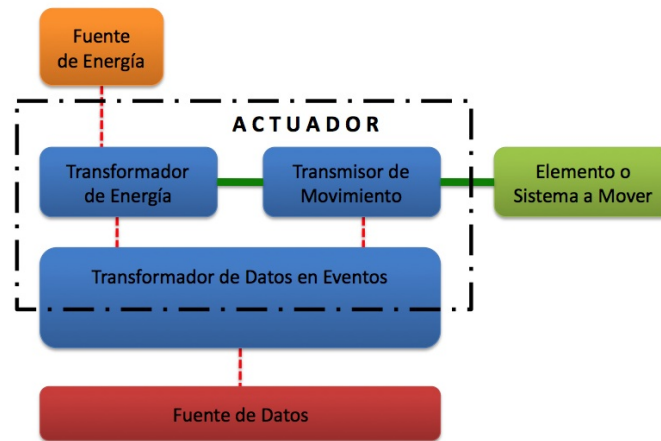


Figura 3.1: Componentes de un Actuador

en eventos es el elemento que adquiere información exterior y la transforma de forma tal que se ven reflejadas como acciones que el actuador llevará a cabo. Es importante aclarar que los datos que recibe el sistema de transformación de datos en eventos obtiene datos ya elaborados por un sistema central como un sistema de control o una unidad central de procesos (CPU).

3.1.1. El actuador humano

Si trasladamos esta configuración de actuador al cuerpo humano podemos decir que el transformador de energía es el músculo ya que el cuerpo humano utiliza los carbo-hidratos como fuente de energía y es éste quien transforma esta fuente de energía realizando una contracción y por lo tanto un movimiento; el transformador de movimiento esta representado como una combinación de la posición del músculo dentro de la estructura ósea y la propia estructura ósea, haciendo que el movimiento efectuado por el músculo se vea reflejado en el movimiento de un brazo, la flexión de una pierna, el agarre de un objeto o la manipulación de diferentes entornos. El sistema de transformación de datos en eventos es el conjunto compuesto por el sistema sensorial y el sistema nervioso haciendo de sistema central el cerebro.

Unas de las particularidades que tiene el actuador humano es que por el contrario de lo que se puede pensar, la dirección de movimiento del músculo con respecto a la dirección del movimiento efectivo del mismo no son paralelos sino que guardan una relación denominada ángulo de alineamiento de las fibras o también llamado ángulo de pennation. Si bien en la comunidad científica mantiene un continuo debate de porqué la naturaleza elige esta relación como configuración para cada músculo, se puede encontrar un análisis detallado en el estudio realizado por Diego Fernández [103, 104, 105] basándose en el modelo estructural del músculo natural propuesto por Gans [110] quien afirma que esto se debe a la optimización de la configuración de la posición, de la longitud y de la deformación de un grupo de fibras musculares para conseguir una determinada fuerza bajo un mínimo esfuerzo y consumo de energía.

En la Figura 3.2 se puede observar una representación del ángulo de pennation en el músculo natural de Gans y también que el mismo solo depende de dos variables: la deformación relativa de las fibras y el ángulo de pennation. Dicha relación se puede ver

representada en la siguiente ecuación:

$$d^2 - 2 \cdot d \cdot L_f \cdot \cos(\theta) = (\Delta L_f)^2 - 2 \cdot L_f \cdot \Delta L_f$$

Esta fórmula luego nos indica que a mayor deformación relativa de las fibras mayor es la deformación relativa del músculo y por otro lado cuanto mayor sea el ángulo θ menor será la fuerza realizada por el músculo pero mayor será la contracción relativa del mismo actuando el $\cos(\theta)$ como un atenuador de la fuerza y como un factor de incremento de la contracción del músculo.

En el estudio realizado por Diego Fernández [103, 104, 105] se llega a la definición del ángulo de pennation óptimo como la expresión analítica del ángulo que maximiza la deformación minimizando la pérdida de fuerza y que se ve representada por la siguiente ecuación:

$$\theta_{opt} = \arccos \sqrt{2 \cdot \left(\frac{\Delta L_f}{L_f} \right) - \left(\frac{\Delta L_f}{L_f} \right)^2}$$

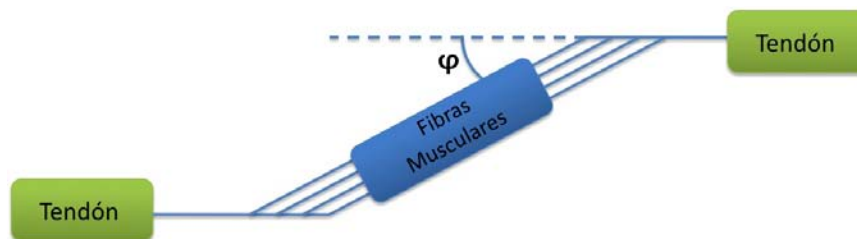


Figura 3.2: Representación del ángulo de pennation

Con este estudio se demuestra que la naturaleza a través del ángulo de pennation puede conseguir optimizar la energía consumida para lograr el mayor esfuerzo posible, y por otro lado la ubicación de las fibras musculares dentro del músculo junto con la deformación de los tendones y las formas truncadas de la estructura ósea son el mecanismo que hace que cada sistema actuador humano consiga alcanzar el ángulo de pennation específico para cada caso.

El actuador humano queda definido de esta manera como uno de los sistemas más óptimos que se puedan ver actualmente, utilizando la fibra muscular como transformador de energía, la conformación de las fibras musculares dentro del músculo junto con la unión a los tendones y el montaje del mismo dentro de la estructura ósea como transmisión de movimiento y el ángulo de pennation como la ley natural que debe cumplir este sistema para que su comportamiento sea óptimo.

A nivel de la robótica se puede observar que un actuador es un sistema mecatrónico con una gran cantidad de variables que da la posibilidad de desarrollar sistemas cada vez más complejos optimizando su funcionamiento de tal forma de poder sacar el mayor provecho a la tecnología actual.

A continuación se analizarán los actuadores basándose en los transformadores de energía. Se podría decir que son la parte más importante de los mismos. Los avances tecnológicos en la actualidad atacan de forma independiente a cada uno de los elementos

de un actuador y el desafío está en conseguir el mayor rendimiento del mismo combinándolos para un determinado objetivo, sin olvidar que un factor muy importante es la definición de una ley que, ayudada por sistemas mecánicos específicos, pueda conseguir la optimización física del conjunto de tal forma que el ahorro de energía y recursos sea el máximo.

3.2. Actuadores

3.2.1. Clasificación de actuadores

A los transformadores de energía se los puede diferenciar según el tipo de fuente de energía y el tipo de movimiento que otorgan al actuador. Dependiendo de a cuál se le da mayor prioridad tendremos diferentes estructuras de clasificación. La que se considera en este capítulo, y la que es la más habitual de encontrar, es priorizando el tipo de fuente de energía y luego en un segundo plano el tipo de movimiento que otorga al actuador. En la Figura 3.3 se puede apreciar en diagrama de bloques la representación de esta clasificación.

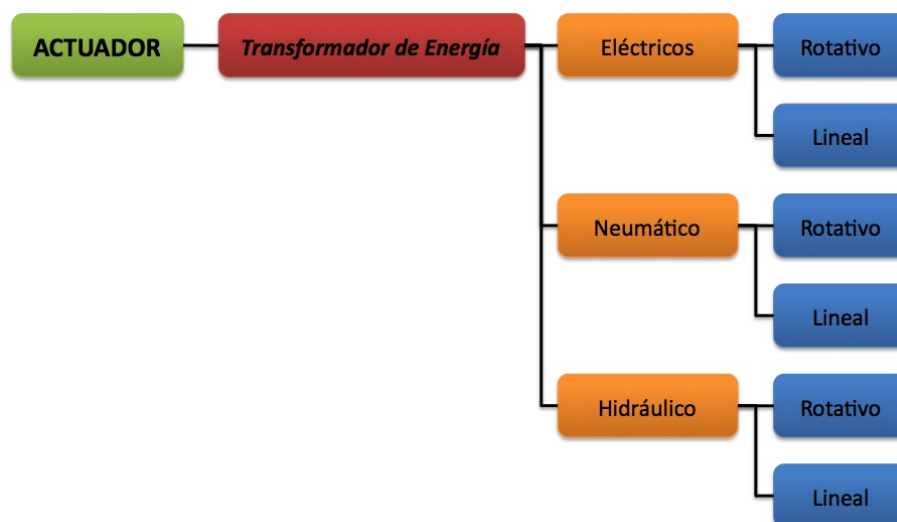


Figura 3.3: Clasificación de transformadores de energía según su fuente

Para el caso de los transmisores de movimiento la clasificación depende en primer lugar del tipo de tecnología aplicada y en un segundo plano el tipo de material utilizado. En la Figura 3.4 podemos observar en diagrama de bloques la representación de esta clasificación.

A continuación se entrará en más detalle respecto de la clasificación de actuadores tal y como se representó en la Figura 3.3 en cada uno de los tipos mencionados en las diferentes clasificaciones.

3.2.2. Actuadores eléctricos

Los actuadores eléctricos como su nombre lo indica son todos aquellos que utilizan como fuente de energía la electricidad. Esta fuente de energía es la más utilizada en la robótica debido a ciertas ventajas mencionadas a continuación:

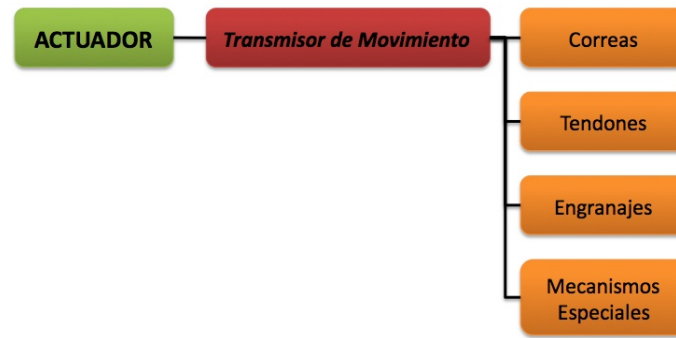


Figura 3.4: Clasificación de transmisores de movimiento según la tecnología aplicada

- Es una fuente de energía limpia ya que no produce desperdicios en su utilización
- No requiere mantenimiento
- El traslado de un sitio a otro se hace a través de cables que son livianos y con un tamaño reducido
- El almacenamiento de este tipo de energía es poco voluminoso
- Debido a su masificación, su costo es bajo
- Fácilmente controlable

Aún así posee las siguientes desventajas:

- La cantidad de energía depende del tipo de almacenamiento. En la mayoría de los casos son baterías, y si se necesita un prolongado tiempo de funcionamiento, ellas podrían ser grandes y pesadas y con el agregado de que luego hay que recargarlas o cambiarlas.
- Si se prescinde de las baterías, la fuente de energía es la propia red eléctrica. Ello hace que el actuador no pueda ser totalmente independiente en sus movimientos estando restringido a la longitud de un cable o sistema de alimentación eléctrico.

En cualquier caso las ventajas frente a las desventajas hacen que este tipo de actuadores sean los más utilizados en el ámbito de la robótica y por tal motivo los más desarrollados y a los que se le otorga mayor dedicación en innovación. Gracias a esto en la actualidad se pueden encontrar una infinidad de tipos y modelos para cada aplicación.

En los siguientes apartados se hará un breve resumen de los actuadores eléctricos más usados en robótica, analizando las ventajas que pueden tener en aplicaciones de manos robóticas sin entrar en detalles técnicos que no es el alcance de este estudio.

3.2.2.1. Movimiento rotativo

Motores eléctricos: Cuando nos referimos a actuadores eléctricos rotativos lo primero que nos viene a la mente son los motores eléctricos y esto se debe a que ocupan la totalidad de este tipo de actuadores en aplicaciones robóticas.

Su principio básico de funcionamiento es la transformación de energía eléctrica en un campo magnético para luego aprovecharlo para generar un movimiento rotativo con una determinada energía mecánica.

Un motor eléctrico básicamente está compuesto por un estator o inductor, un rotor o inducido, una carcasa o estructura soporte y todos aquellos elementos accesorios necesarios para el correcto funcionamiento del actuador (Figura 3.5). Dependiendo del tipo de energía eléctrica utilizada, estructura y fabricación de cada una de estas partes, deriva su clasificación.

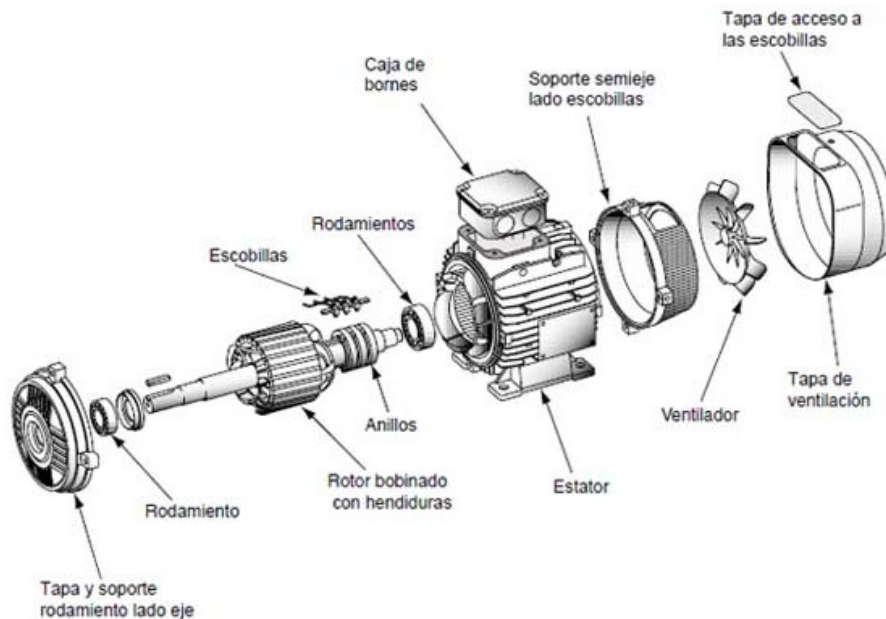


Figura 3.5: Componentes básicos de un motor eléctrico

Si bien dentro de este tipo de transformador de energía hay una gran variedad y tipos, su clasificación se la puede simplificar de la siguiente manera:

- *Motores de corriente alterna:* Dentro de los motores de corriente alterna se pueden identificar dos grandes familias dependiendo del movimiento de su campo magnético:
 1. Motores asíncronos
 2. Motores síncronos

En la actualidad no se conocen aplicaciones de estos motores en manos robóticas debido a su tamaño y peso. En algunos casos suelen tener aplicaciones en pinzas industriales de gran tamaño y gran capacidad ya que el suministro eléctrico más común en la industria es la corriente alterna. Por otro lado teniendo en cuenta de que la corriente alterna no se puede almacenar ni en grandes ni pequeñas cantidades, hace que la viabilidad de este tipo de motores para manos robóticas se reduzca enormemente.

- *Motores de corriente continua:* Debido a la facilidad de almacenar este tipo de energía, estos motores son los más usados en manos robóticas: son de bajo consumo,

tamaño reducido y generan en la mayoría de los casos el esfuerzo suficiente para lograr el objetivo deseado. A este tipo de motores se los puede sub-agrupar en las siguientes familias, dependiendo del funcionamiento interno:

1. Con escobillas
2. Sin escobillas
3. Paso a paso

Si bien la diferencia sustancial entre cada uno de ellos es su principio de funcionamiento, la principal decisión en la elección de un tipo u otro es la complejidad en su control y la electrónica asociada a los mismos donde la aplicación u objetivo al que esta destinada la mano robótica es la que valora y requiere un determinado uso de actuador. En otros casos, y en menor medida, la decisión viene dada por el mantenimiento y vida útil siendo los que contienen escobillas los más perjudicados.

Otra característica importante de los motores es la cantidad de polos o fases que poseen. De esta características también derivan clasificaciones dependiendo de como están situados en el rotor o en el estator, de si están representados por bobinas de múltiples espiras o simplemente de una o por imanes permanentes de diferentes tipos de materiales.

Si bien parece que no se puede innovar en lo que respecta a motores, se siguen haciendo investigaciones buscando nuevas maneras de aprovechar al máximo la energía eléctrica o simplemente adaptando un determinado dispositivo para una aplicación concreta. Algunas de estas investigaciones están enfocadas a disminuir al máximo el numero de polos con la consecuente reducción de costes para aplicaciones masivas [225], estudios realizados para determinar el comportamiento de diferentes tipos y formas de imanes permanentes [224, 226] (Figura 3.6), aplicaciones específicas limitando algunas de sus características como el angulo de rotación [89, 90, 83] y en algunos casos estudios realizados para definir modelos o ciertos parámetros generales y poder compararlos [198].

Otros tipos de actuadores eléctricos rotativos: En la actualidad hay varios desarrollos de actuadores eléctricos que no usan el campo magnético para generar un esfuerzo sino que usan la reacción que producen ciertos tipos de materiales cuando una corriente eléctrica pasa a través de ellos. Algunos de estos materiales serán explicados con más detalle a posteriori. Estos materiales por lo general son materiales piezo-eléctricos [145, 11] o materiales con memoria de forma. Los materiales piezo-eléctricos pueden conseguir grandes pares, con velocidades pequeñas y con reducido tamaño, estos motores también son llamados motores por ultrasonido debido a la alta frecuencia a la que funcionan [124, 271, 246, 232, 65, 301, 126]. Este tipo de actuadores ya se encuentran de forma comercial y con altas prestaciones [8, 7]. Los materiales con memoria de forma, en cambio, debido a su funcionamiento claramente no lineal, son más complicados de adaptarlos para que genere un movimiento rotativo sin que tenga que intervenir otro tipo de energía o algún mecanismo que puede ser confundido por un transmisor de movimiento [261].

3.2.2.2. Movimiento lineal

Solenoides: Los solenoides son actuadores eléctricos lineales que tienen muy poca utilidad en manos robóticas y en cualquier caso solo se los utilizan para hacer accionamientos puntuales y como soporte a otro actuador. Están compuestos por una bobina alimentada con una corriente eléctrica y que rodea a un núcleo de material ferromagnético móvil.

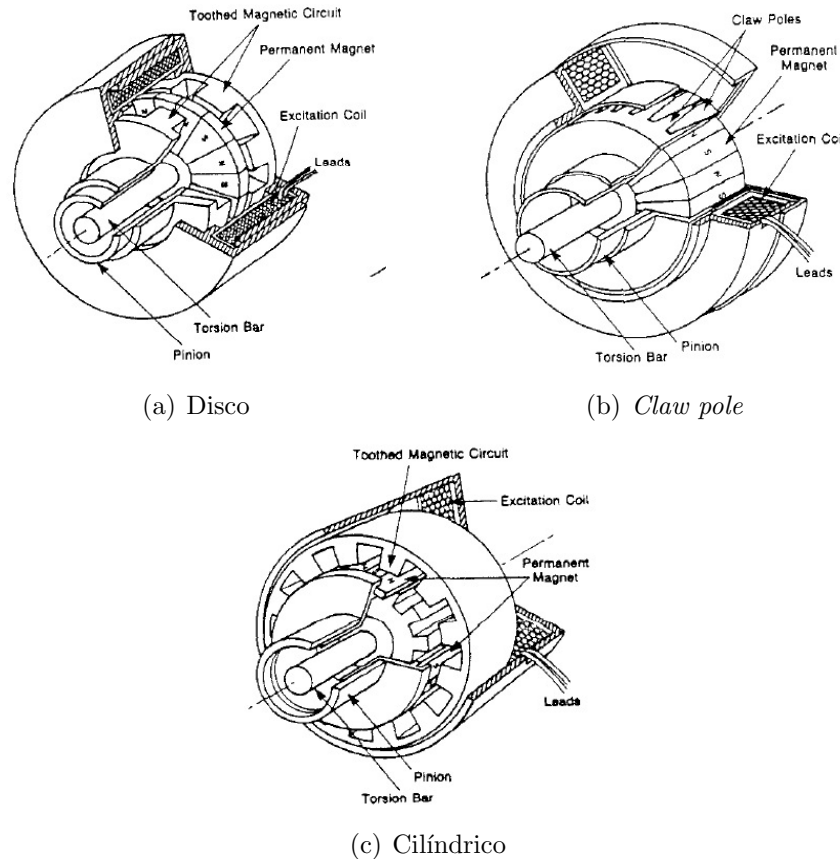


Figura 3.6: Tipos de motores eléctricos según sus imanes permanentes

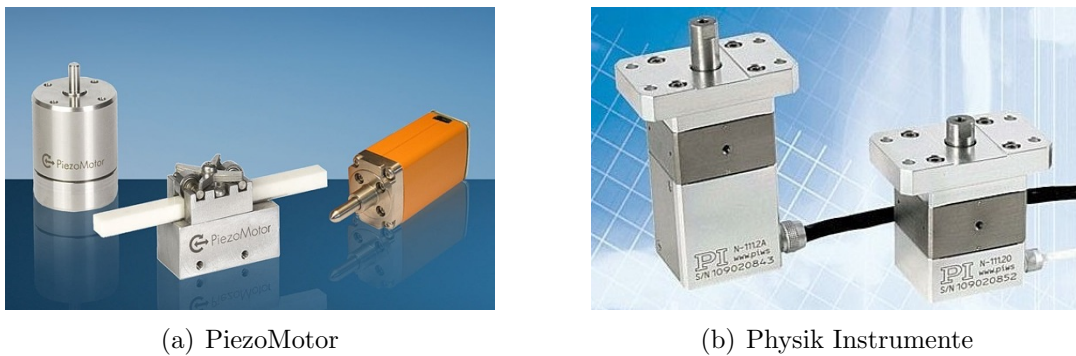


Figura 3.7: Diferentes tipos de motores piezo-eléctricos rotativos comerciales

Cuando la bobina es excitada con dicha corriente, el núcleo móvil se desplaza buscando la posición de equilibrio electromagnético realizando un determinado esfuerzo. Tienen la ventaja de ser muy económicos, de fácil construcción y que pueden desarrollar una fuerza elevada. Las desventajas son que no se pueden controlar en posición ni en fuerza, que el peso de la bobina sumado al peso del núcleo hacen un peso total elevado y que la relación de la fuerza desarrollada en función de la distancia recorrida es una curva asintótica (Figura 3.8). Todas estas desventajas hacen que este tipo de actuador lineal sea prácticamente descartado para aplicaciones robóticas directas, en cambio muy utilizados como complemento o elemento de un sistema actuador más complejo como podría ser el accionamiento de un freno de un motor eléctrico.

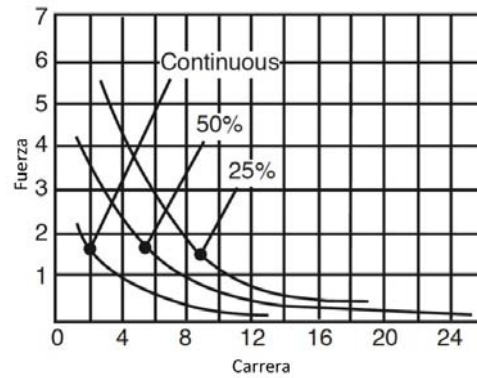


Figura 3.8: Curva genérica de la fuerza en función de la distancia recorrida que desarrolla un solenoide

Motores lineales: Como consecuencia de querer aprovechar las grandes fuerzas realizadas por un solenoide surgen los motores lineales, que deben su nombre a la adaptación de la estructura de un motor rotativo con su estator y su rotor a un sistema lineal. Con esta configuración se consigue aprovechar las ventajas de los motores rotativos en lo que se refiere al control de fuerza y posición y la ventaja de un solenoide de poder realizar grandes esfuerzos. Si bien parece que todo es positivo, este tipo de actuador eléctrico lineal no termina de posicionarse en aplicaciones robóticas, especialmente en manos robóticas, debido a su tamaño, peso y sobre todo a su volumen de operación. En la Figura 3.9 se puede observar alguno de estos actuadores lineales comerciales.

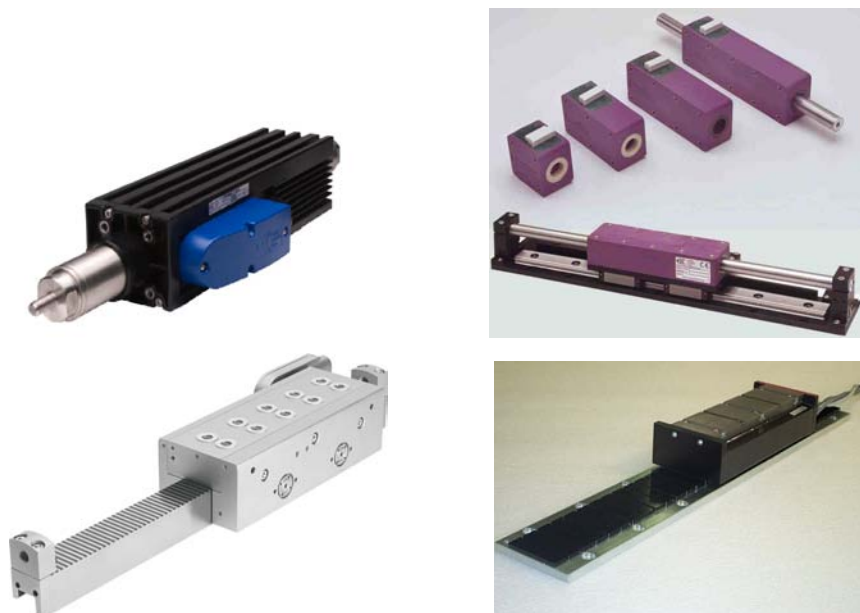


Figura 3.9: Motores lineales comerciales

Actuadores lineales basados en materiales piezo-eléctricos: Otro tipo de actuadores que son muy utilizados son los basados en materiales piezo-eléctricos. La piezoelectricidad es un fenómeno físico de ciertos materiales en los cuales aparece una diferencia de potencial eléctrica entre sus caras cuando este es sometido a una presión mecánica,

este efecto se lo denomina piezo-eléctrico directo. En el efecto piezo-eléctrico inverso, el material sufre una deformación cuando se aplica una diferencia de potencial entre las caras del cristal. Los materiales que poseen esta propiedad se los denomina materiales piezo-eléctricos (Figura 3.10)

Esta propiedad fue demostrada por primera vez por los hermanos Pierre y Jacques Curie en el año 1880. Sin embargo la propiedad inversa de estos materiales de generar un determinado esfuerzo mecánico cuando pasamos una corriente eléctrica a través de ellos fue descubierta un año más tarde por Gabriel Lippmann [180]. A partir de aquí la comunidad científica focalizó todos sus esfuerzos en determinar qué materiales poseían esta propiedad y rara vez encaminaban sus investigaciones hacia aplicaciones específicas como un sensor, siendo la primera aplicación comercial como sonar en la primera guerra mundial en 1917. Estos materiales generan grandes campos eléctricos con solo unas pequeñas deformaciones en su estructura, pero a una alta frecuencia. Esta propiedad es una limitación cuando se necesita generar movimientos con carreras considerables que puedan ser utilizados como un actuador lineal.

Un motor piezo-eléctrico es un tipo de motor que utiliza la electricidad para producir vibraciones de forma que produzca un movimiento lineal o rotatorio. Los motores piezo-eléctricos tienen mucha fuerza en movimientos lentos. Ésto en robótica es muy importante. Por otro lado, tienen muy pocas piezas, no necesitan lubricación, son muy eficientes energéticamente y esta eficiencia no está condicionada a su tamaño.

En la Figura 3.10 se puede apreciar el principio de funcionamiento de estos actuadores. Primero, cuando se activa el material piezoeléctrico se flexionan formando una onda empujando el actuador en la misma dirección que la onda generada (Figura 3.10(a)); Luego tras el paso de la onda el actuador se mueve todo lo posible hacia la izquierda (Figura 3.10(b)); una vez alcanzado el máximo punto, el actuador para y sufre un retroceso hacia la derecha con las crestas de la onda (Figura 3.10(c)); y por último con la llegada de nuevas ondas se vuelve a iniciar el ciclo de avance (Figura 3.10(d)).

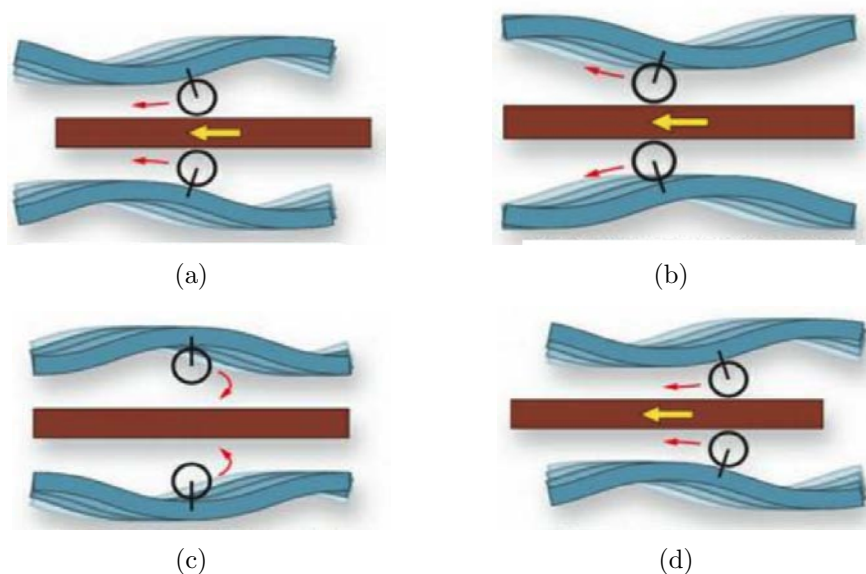


Figura 3.10: Principio de funcionamiento de los materiales piezo-eléctricos

Para el caso de los motores piezo-eléctricos rotativos el principio de funcionamiento es el de crear un movimiento elíptico en el punto de contacto entre rotor y estator que de

lugar al movimiento del motor. Para ello se generan ondas de flexión que se propagan a través del disco anular dentado, el estator. A consecuencia de esta onda, cada uno de los puntos sobre las caras de dicho disco describe un movimiento elíptico que se aprovecha entonces para impulsar a otro disco (el rotor) por contacto directo. Este principio de funcionamiento se puede ver en la Figura 3.11.

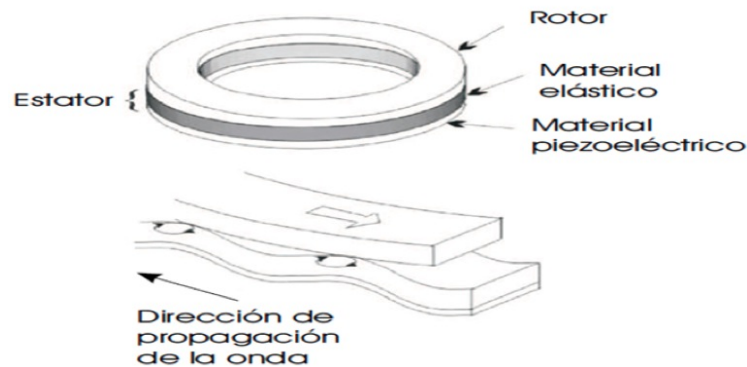


Figura 3.11: Principio de funcionamiento de un motor piezo-eléctrico rotativo

Una forma de contrarrestar esta limitación que tienen los materiales piezo-eléctricos es deformarlo de forma parcial y en determinadas zonas. De esta manera y con un diseño específico se puede generar ondas que cuando se deslizan sobre otra superficie generan una fuerza de rozamiento entre las mismas haciendo que se muevan entre si en una determinada dirección, generando el movimiento. Este principio de funcionamiento se puede ver en la Figura 3.12 y es utilizado para generar distintos tipos de movimiento para actuadores específicos.

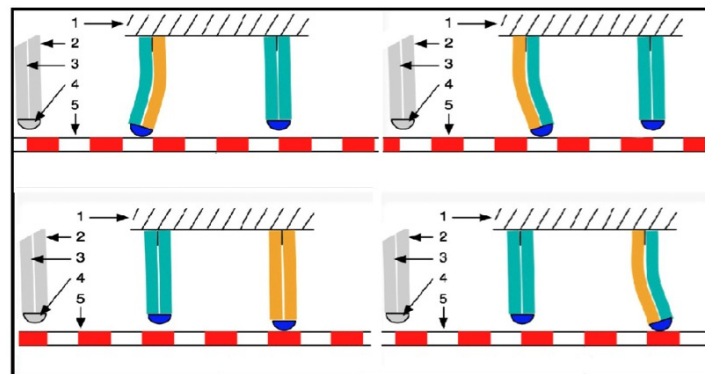


Figura 3.12: Principio de funcionamiento de un actuador basado en materiales piezo-eléctricos. 1-Estator, 2-Material piezoeléctrico, 3-Material piezoeléctrico, 4-Junta, 5-Actuador

Otra forma de conseguir aumentar la carrera de estos actuadores es utilizando diseños específicos como los denominados APA - *Amplified Piezoelectric Actuator* [176] (Figura 3.13) desarrollados por CEDRAT Technologies [2].

Actuadores lineales basados en aleaciones con memoria de forma: Las aleaciones con memoria de forma [294, 91, 213] (abreviado SMA, del inglés *Shape Memory*



Figura 3.13: APA - Actuador Piezoeléctrico Amplificado

Alloy) son aleaciones metálicas que, después de una deformación aparentemente plástica, vuelven a su forma original tras un calentamiento. Estos efectos están relacionados con la transformación martensítica termoelástica que experimenta el material. La transformación martensítica termoelástica es un cambio de fase sin difusión reversible térmicamente y que se caracteriza por un cambio en la estructura cristalina del material. Estas características hacen que los materiales SMA puedan potencialmente aplicarse para generar fuerza o movimiento (efecto memoria de forma) o para almacenar energía (pseudoelasticidad).

Si bien la aplicación del calor al material para producir la transformación puede venir de diferentes fuentes, la más comúnmente utilizada es aplicando una corriente eléctrica a los extremos del material el cual actúa como resistencia. De ahí su clasificación como un actuador eléctrico.

La transformación se produce en un rango de temperaturas, denominadas temperaturas características o temperaturas de transformación, que constituyen un parámetro fundamental para la caracterización de las aleaciones SMA. La transformación martensítica se produce en un rango de temperaturas definido por M_s y M_f (Figura 3.14), que son las temperaturas a las que empieza y acaba la transformación martensítica, y A_s y A_f , las que marcan el inicio y fin de la transformación inversa (o transformación austenítica). En la práctica, son necesarios tanto un sub-enfriamiento como un sobre-calentamiento para que den comienzo las transformaciones martensítica y austenítica respectivamente.

En el proceso de enfriamiento, la primera de esas temperaturas es la temperatura de inicio de la transformación martensítica (M_s), a partir de la cual se empieza a formar martensita por temperatura. Esta transformación termina cuando la temperatura cae hasta valores cercanos a la temperatura final de transformación martensítica (M_f).

Durante el calentamiento, al alcanzar A_s (temperatura de inicio de la transformación austenítica), comienza a formarse la fase madre por nucleación y crecimiento; este proceso dura hasta que se alcanza la temperatura final de la transformación austenítica (A_f). Dicha transformación forma una estructura cristalina cúbica centrada en las caras, rígida y dura. Cuando elevamos la temperatura por encima de A_f , la deformación se recupera completamente, obteniendo el efecto memoria de forma.

Como podemos observar en la Figura 3.14, la transformación de fase del material presenta histéresis, puesto que la transformación no sigue el mismo camino en ambos

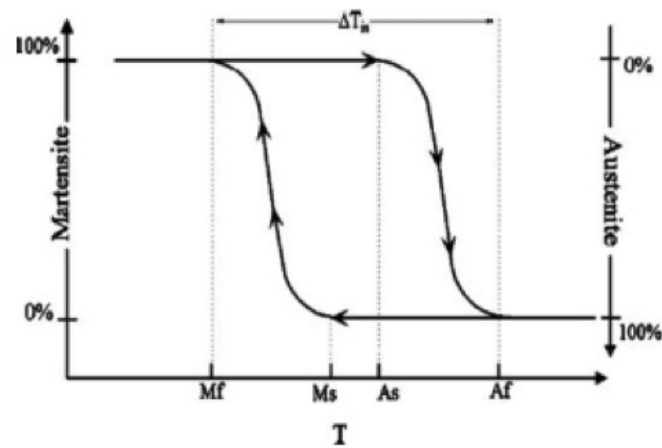


Figura 3.14: Proceso de transformación de un material SMA

sentidos. Microscópicamente, dicha histéresis puede asociarse al rozamiento debido al movimiento de las fronteras durante el proceso de maclado. Por otro lado, esta transformación presenta una clara no-linealidad en su funcionamiento que complica en gran medida su control.

Dentro de los dos mecanismos principales de los materiales SMA es claramente el de memoria de forma el que se aplica como actuador y que consiste en lo siguiente:

1. Al reducir la temperatura, el material se transforma en martensita, sin producirse ninguna variación de su forma (martensita autoacomodada).
2. Cuando se aplica una deformación, ésta se acomoda gracias a un movimiento de *twinning* que evita la deformación plástica del material. Dicha deformación puede producirse tensando el SMA al aplicarle una fuerza, dando lugar a una distribución de las variantes de martensita que pueden formarse.
3. Al calentar el material, éste vuelve a su forma inicial, puesto que a escala microscópica no se ha visto afectado por la deformación macroscópica. Además, sólo existe una estructura reversible, por lo que se recupera la forma original.

Este mecanismo se puede observar en la Figura 3.15.

Hay que notar que la memoria de forma ocurre una única vez en este proceso, durante el calentamiento del material. De forma macroscópica, no existe un cambio de forma debido al enfriamiento desde temperaturas superiores a A_f hasta temperaturas menores a M_f , por lo que la memoria de forma sólo puede realizarse si deformamos previamente la martensita. La recuperación de la forma se produce en el calentamiento, entre las temperaturas A_s y A_f . Por este motivo, este fenómeno también se conoce como memoria de forma simple. Las deformaciones que se pueden recuperar suelen ser de hasta del 7%, aunque existen aleaciones que alcanzan el 10%.

Estos actuadores claramente son lineales y si bien hay una gran cantidad de aleaciones que presentan esta propiedad básicamente difieren en sus características como su temperatura de transición, histéresis, consumo, proceso de fabricación.

La principal desventaja de estos materiales es su no-linealidad cuando se necesita controlar su fuerza o su posición en aplicaciones robóticas, sin embargo en los últimos

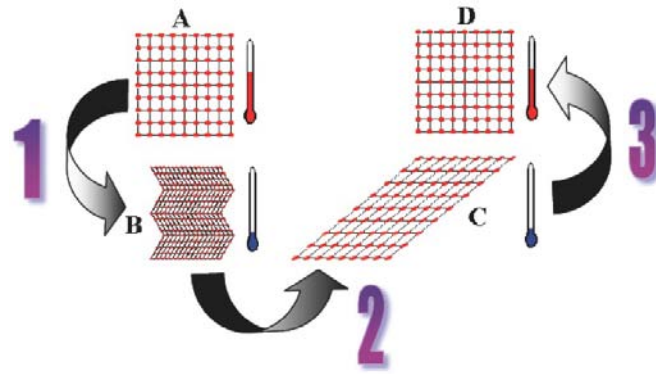


Figura 3.15: Mecanismo de memoria de forma de los materiales SMA

años se han realizado nuevos estudios para poder comprender mejor su funcionamiento y tratar de superar esta barrera [202, 253, 254, 107, 167, 263, 221].

En la actualidad se pueden encontrar desarrollos de actuadores basados en SMA aplicados directamente a sistemas novedosos para robótica sobre todo cuando los mismos tienen formas complicadas y son de tamaño reducido [227, 163, 182, 274, 166, 96] así como en algunos casos para mover manos robóticas de diferentes tipos de tamaño, incluso muy pequeñas [270, 173, 295, 70, 71, 240], o como complemento de accionamiento de otro tipo de actuadores [165].

3.2.3. Actuadores neumáticos

Los actuadores neumáticos, como su nombre lo indica, utilizan la energía almacenada en la presión de un gas que actúa como fluido para producir un determinado movimiento o fuerza cuando se expande o se lo libera dentro de una cámara diseñada para aprovechar dicho movimiento que puede ser tanto lineal como rotativo dependiendo del tipo de actuador y de su aplicación.

Si bien este principio de funcionamiento se puede aplicar a cualquier tipo de gas, el que se utiliza en todas las aplicaciones es el aire, en algunos casos con algún tipo de tratamiento previo (filtrado, purificado, etc). Las ventajas de utilizar aire como fluido en estos actuadores es que es inocuo para las personas y no es inflamable, por lo tanto es muy seguro.

Basándose en el principio de funcionamiento general de este tipo de actuadores que es el almacenar energía como presión de aire comprimido y luego liberarlo para conseguir un accionamiento, y basándose también en los elementos básicos que permita diseñar este dispositivo, se puede encontrar una gran cantidad de desarrollos innovadores [117, 216, 285, 164].

La ventaja principal de estos actuadores neumáticos frente a los actuadores eléctricos es que pueden conseguir una gran fuerza en un tamaño reducido, sin contaminantes y muy seguros, pero poseen la desventaja de ser de muy difícil control en posición y en fuerza debido a la compresibilidad que tienen los gases. Dicha compresibilidad puede presentarse con un comportamiento amortiguador que lo hace inestable. Aún así existen numerosos estudios que buscan técnicas de control complejas ayudados de válvulas específicas que reducen considerablemente este problema [69, 303, 20, 256, 136]. Estos avances en el control de los actuadores neumáticos han conseguido incorporar actuadores neumáticos

a desarrollos de sistemas robóticos y brazos y manos robóticas con éxito [38, 64, 283, 127, 273, 297]. De estos desarrollos merece la pena destacar los diseños realizados por la Shadow Robot Company LTD. [10].

Uno de los actuadores neumáticos más usados en la robótica son los PAM (siglas del inglés *Pneumatic Artificial Muscle*) y por lo general van montados de a pares donde cada uno realiza una acción en sentido contrario al otro y de esta forma se complementan en fuerzas. El primer desarrollo de los PAMs fue el denominado Músculo Artificial de McKibben en el año 1950, luego la empresa japonesa Bridgestone Rubber lo comercializó con el nombre de *Rubbertuators* y finalmente paso a conocerse bajo su denominación actual.

Básicamente el PAM esta compuesto por una membrana tubular fijada en sus dos extremos rígidos a través de los cuales se sujetan las partes mecánicas que transfieren la fuerza al sistema. Cuando esta membrana es inflada realiza un movimiento de acercamiento de los extremos el cual produce la fuerza. Por el contrario cuando el aire o el gas es expulsado del interior de la membrana, el sistema se relaja y se alejan los extremos. En la Figura 3.16 se puede observar que mientras se introduce aire comprimido dentro de la membrana aumentando la presión interior, aumenta el volumen y la deformación de la misma produciendo un esfuerzo en dirección a los dos extremos del actuador. Un estudio interesante de este tipo de actuador neumático es el realizado por Dearden y Lefeber en 2002 [88]

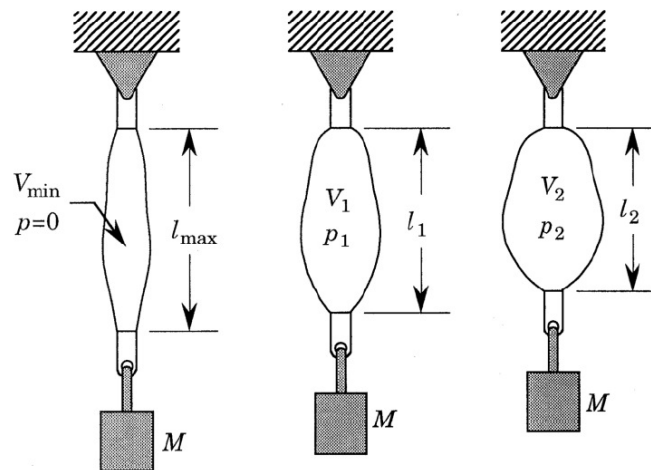
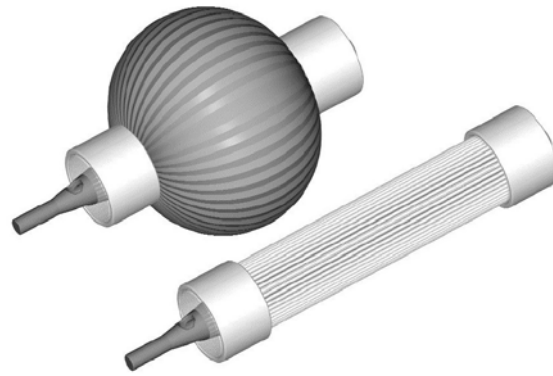


Figura 3.16: PAM - *Pneumatic Artificial Muscles*, principio de funcionamiento

La principal desventaja que tienen estos actuadores es la no-linealidad en su funcionamiento que hace que el modelado matemático del mismo sea complicado y como consecuencia, su control, poco preciso.

Una variante al PAM es el PPAM (siglas del inglés *Pleated Pneumatic Artificial Muscle*) Figura 3.17. Este actuador fue desarrollado por Daerden [86, 87] y tiene la ventaja de que el material con el que esta fabricado no sufre estiramiento transversal y por lo tanto podría ser un material no elástico que, por consiguiente no necesita consumir energía para expandir la membrana ni pierde energía debido a la fricción de sus componentes.

Como se puede observar, uno de los principales problemas que tienen los actuadores neumáticos aparte de su complicada modelización y controlabilidad es que necesitan de una fuente de aire comprimido para funcionar, y cuanto mayor energía se necesite, más

Figura 3.17: PPAM - *Pleated Pneumatic Artificial Muscles*

voluminoso será el sistema de generación de aire comprimido. Esto reduce la autonomía de los sistemas robóticos basados en actuadores neumáticos.

3.2.4. Actuadores hidráulicos

Los actuadores hidráulicos son similares a los actuadores neumáticos ya que en la mayoría de los casos lo único que varía es el fluido que utilizan para generar el movimiento manteniendo su principio de funcionamiento.

Cambiar el tipo de fluido tiene su justificación en que el factor de compresión de un líquido es mucho menor que el de los gases. Esta propiedad hace que cuando efectuemos un esfuerzo sobre el actuador, el fluido interior no se comprimirá obteniendo un control de posición más preciso. Por otro lado nos permite utilizar mayores presiones en el circuito y así poder realizar esfuerzos exteriores superiores haciendo de estos actuadores mucho más robustos en estructura.

Los sistemas de alimentación como también los sistemas de control son considerablemente más voluminosos que los de un sistema neumático sin descuidar que en este caso el sistema de alimentación debe disponer de un depósito de líquido del circuito, aunque la principal desventaja con respecto a los actuadores neumáticos es su mantenimiento ya que una mínima pérdida en su circuito implica pérdidas de aceite en el entorno de trabajo del robot. Debido a problemas de inflamación o contaminación actualmente se están realizando estudios para poder reemplazar aceites con agua en aplicaciones robóticas con contacto humano [286].

A pesar de la aparente cantidad de desventajas que poseen estos actuadores tienen un protagonismo casi exclusivo en robots industriales estáticos, brazos hidráulicos montados sobre camiones o pinzas de gran tamaño. La gran ventaja que poseen estos actuadores en estas aplicaciones es que, a partir de un cierto tamaño, la relación peso/potencia y tamaño/potencia es mucho más beneficiosa frente a motores eléctricos convencionales.

Hay algunas aplicaciones sin embargo en las que por seguridad no es conveniente utilizar corriente eléctrica. Por otro lado las mismas necesitan un control de posición extremadamente preciso por lo que los motores no pueden ser utilizados y donde los hidráulicos solo encuentran su aplicación en tamaños más pequeños. Es el caso de manipuladores tele-operados para cirugía o para operaciones de seguridad [140, 28].

En robótica en general, por los motivos antes mencionados, es complicado encontrar aplicaciones a estos actuadores; sin embargo se pueden encontrar algunos desarrollos

actuales que merece la pena citarlos, tanto sea por su sistema de control como por su diseño innovador [238, 49, 130, 50, 174].

3.3. Definición de calidad de los actuadores

Un análisis que merece la pena realizar a la hora de clasificar a los actuadores es la calidad de los mismos dependiendo de las propiedades que para una determinada aplicación final son más importantes.

El sistema de accionamiento compuesto por una cantidad determinada de actuadores en un sistema de mano robótica pasa a ser muy importante si tenemos en cuenta características como el tamaño, el peso, el consumo y el ruido, y hace prácticamente indispensable disponer de una herramienta que nos permita clasificarlos dependiendo de su calidad para una determinada aplicación.

Para el caso de las manos robóticas de baja cantidad de actuadores (manos robóticas subactuadas), la selección de un actuador, siendo este uno de los dispositivos más importantes del sistema robótico, es una tarea muy complicada ya que se debe sacar el máximo provecho del mismo y dotarlo de transmisores de movimiento innovadores y complejos que potencien su funcionalidad sin perjudicar considerablemente su rendimiento.

Para este caso el dotar de herramientas de evaluación que permitan determinar la calidad de un transformador de energía es vital e indispensable.

En el estudio realizado por Pons [231] se considera, para la MANUS-Hand y su aplicación como prótesis humana, 11 propiedades importantes que habría que tener en cuenta para determinar la calidad de cada transformador de energía como componente del actuador de dicha mano robótica:

1. **Eficiencia:** El rendimiento del tipo de actuación viene dado por relación entre la potencia mecánica de salida y la potencia de entrada, sea esta eléctrica, neumática o hidráulica. En esta propiedad solo se tiene en cuenta el transformador de energía. El rendimiento del actuador es importante si tenemos en cuenta la capacidad de almacenamiento de energía del sistema.
2. **Ancho de banda:** En esta propiedad son considerados tanto el ancho de banda como el tiempo de respuesta debido a que son dos aspectos relacionados entre sí. Una mano robótica con una aplicación como prótesis humana requiere un mínimo tiempo de respuesta y una gran velocidad.
3. **Capacidad de almacenamiento de energía:** Tanto el peso como el volumen de la unidad de almacenamiento de energía son importantes y esta propiedad incluye a ambos. Si analizamos el tamaño de la mano humana podemos observar que este aspecto en la mayoría de los casos suele ser una de las especificaciones más críticas aunque también es cierto que ninguna mano robótica en la actualidad contiene, dentro de su estructura, su propia fuente de energía.
4. **Robustez:** La robustez se puede decir que es una propiedad bastante genérica y abarca una gran cantidad de propiedades como la vida útil, el mantenimiento, etc. Cuando tenemos en cuenta la cantidad de actuadores que puede incorporar una mano robótica así como el hecho de que a cada actuador hay que cambiarlo, mantenerlo, repararlo, es cuando esta característica se vuelve importante. Por el contrario, si tenemos en cuenta a las manos robóticas subactuadas, que se caracterizan por



tener baja cantidad de actuadores, el ahorro en mantenimiento es considerable. Eso significa que cuanto menor sea la cantidad de actuadores también lo será su mantenimiento. Sin embargo en lo que respecta a los transmisores de movimiento de las manos robóticas subactuadas, el mantenimiento de los mismos suele ser verse incrementado.

5. **Potencia específica:** La potencia específica se considera como la relación entre la potencia media del actuador y el peso medio del mismo.
6. **Potencia volumétrica:** De forma similar a la potencia específica, la potencia volumétrica es la relación entre la potencia media del actuador y el volumen medio del mismo.
7. **Necesidad de un transmisor de movimiento:** El incorporar un transmisor de movimiento a un actuador implica que parte de la energía que otorga el transformador de energía se pierde según el rendimiento de dicho transmisor como fricción de sus elementos. Por tal motivo esta propiedad del actuador debe ser bien controlada y, a la hora de diseñar un transmisor de movimiento, se debe tener en cuenta su alto rendimiento.
8. **Auto-frenante:** El que un actuador tenga la propiedad de ser auto-frenante implica que cuando el mismo está parado la propia configuración del mismo hace que mantenga un torque constante sin necesidad de consumo de energía. Esta propiedad también se la puede conocer como irreversibilidad del actuador. Para el caso de las manos robóticas esta propiedad puede ser muy importante ya que si después de una tarea de agarre se deja de alimentar al actuador, este nos puede mantener la misma fuerza sin que se tenga que consumir energía. En la mayoría de los casos esta propiedad no es del todo efectiva ya que la propia elasticidad de los materiales hace que en algún determinado momento de sollicitación externa, y sobre todo cuando esta puede ser variable, la fuerza media realizada por el actuador sea variable también.
9. **Ruido:** Si bien el ruido innecesario no es un aspecto favorable en ningún caso, cuando nos referimos a manos robóticas que pueden estar destinadas a prótesis humanas, lo negativo de esta propiedad se incrementa debido a la incomodidad que puede sufrir su propio usuario.
10. **Controlabilidad:** La controlabilidad de un actuador corresponde a la facilidad con la que un actuador puede alcanzar una determinada velocidad y posición con una precisión previamente especificada. Este aspecto incluye el software y el hardware.
11. **Seguridad:** Dependiendo de la aplicación que pueda tener la mano robótica y principalmente si la misma entra en contacto con seres humanos esta propiedad puede ser crítica y tomar una elevada relevancia. Hay actuadores que pueden manejar una gran cantidad de energía y si en algún momento esta energía se descontrola por algún tipo de fallo, puede ocasionar graves lesiones a las personas que se encuentran cerca.

Como se puede observar, cada una de estas propiedades puede tomar una determinada importancia dependiendo de la aplicación o la finalidad con la que se desarrolla una mano robótica, de la metodología con la que se diseña, o simplemente de su configuración.



Para el caso del estudio realizado por Pons, se tomo como método de comparación y valoración el Método de Dominic. Este método utiliza la combinación de diferentes tablas en las que se describen diferentes valoraciones. En este caso se utilizó una tabla en la que se distinguía entre muy importante, importante y poco importante a cada una de las propiedades; una segunda tabla en la que se establece con qué calidad un determinado transformador de energía al que se lo identifica con una letra asume cada propiedad entre excelente, bueno, suficiente, insuficiente y pobre; y finalmente una tercer tabla que combina las dos tablas anteriores en la que en la primera columna contiene la calidad, en la primera fila contiene la importancia de cada propiedad y el contenido de la tabla las letras correspondientes a cada tipo de transformador de energía.

Este sistema puede significar una valiosa herramienta para poder evaluar diferentes tipos de actuadores aún cuando sus fuentes de energía sean claramente distintas.

Otra de las ventajas que tiene este método es que la valoración de cada propiedad puede ser modificada y, en caso de ser necesario, hasta se puede incorporar una nueva propiedad o un nuevo tipo de actuador sin que el método incremente su complejidad, para seleccionar un actuador optimo a ser implementado en una mano robótica

Funcionalidad de las manos robóticas

4.1. Introducción

La mano humana ha sido y es el órgano principal que tiene el ser humano para la manipulación física del medio siendo su principal fuente de información táctil del entorno. Su sistema sensorial y su sistema nervioso son los más complejos de todo el cuerpo y la yema de los dedos una de las zonas con más terminaciones nerviosas.

La evolución de la mano a través de la historia de la humanidad ha ido siempre relacionada a la complejidad de las tareas que debía realizar el ser humano, siendo en sus inicios destinada solo al agarre firme de los objetos y luego, a medida que la inteligencia iba evolucionando, las tareas de manipulación con destreza iban tomando más importancia y por lo tanto la mano iba adaptándose a las mismas. Esta evolución puede verse en el crecimiento y posición del dedo pulgar y en el tamaño e importancia de la palma (Figura 4.1).

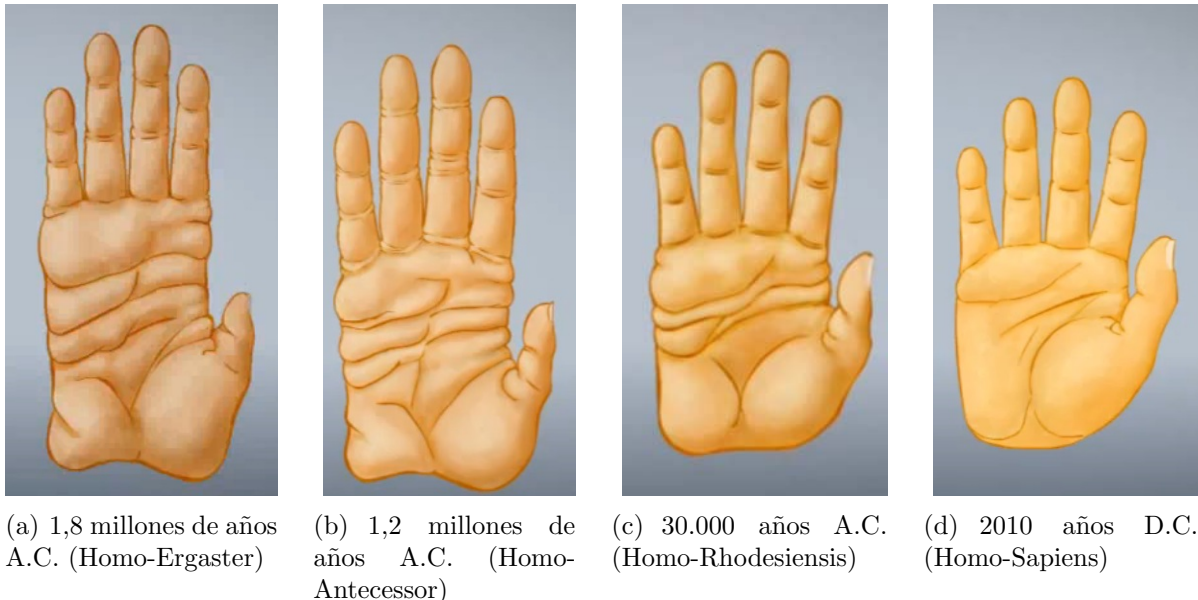


Figura 4.1: Evolución de la mano humana

Básicamente en las tareas de agarre firme es necesario tener la mayor cantidad de superficie rodeando el objeto, de esta forma se consigue una estabilidad controlada. Esto se puede ver en el tamaño de la palma y el efecto de cierre que se consigue con los dedos en



una configuración lineal y sin tener demasiada importancia el dedo pulgar (Figura 4.1(a)). Esta configuración se la suele ver en las manos de algunos primates que continuamente se encuentran arriba de los árboles donde la principal función de la mano es sujetarse firmemente de las ramas que por lo general son volúmenes cilíndricos. Cuando las tareas de manipulación comienzan a tomar importancia la presencia de un pulgar en posición opuesta es imprescindible y una palma demasiado alargada y de gran tamaño que lo aleje de los dedos deja de ser necesaria (Figura 4.1(d)).

Como se trata de una de las principales herramientas que el ser humano utiliza para realizar todas sus tareas, ya sean de menor o mayor complejidad, la robótica está dedicando gran parte de su esfuerzo a imitar sus movimientos y entender su funcionamiento y comportamiento en determinadas tareas. Aunque el camino por recorrer para poder conseguirlo aún es demasiado largo y el objetivo esté lejos, se van consiguiendo logros parciales que permiten acercarse con éxito. Por otro lado los avances tecnológicos cada vez son mayores y hoy día se puede encontrar una gran diversidad de tecnologías aún no exploradas que abren cada vez más el abanico de posibilidades y nichos en los que poder investigar.

Como la mano humana, que ha medida que la complejidad de las tareas iba evolucionando, una mano robótica también puede variar su configuración por el mismo motivo. En este caso, las configuraciones son muy diversas y posiblemente algunas se alejen completamente del parecido antropomórfico de una mano humana manteniéndose sin embargo, el concepto esencial.

Una de las formas de poder comparar la mano humana con una mano robótica determinada, es haciéndolo a través del tipo de tareas que puede realizar esta última con respecto a la primera.

Como se ha comentado anteriormente, las tareas que puede realizar una mano humana se las clasifica en dos grandes familias: tareas relacionadas con el agarre de un objeto y tareas de manipulación de uno o más objetos a la vez. Más adelante se hará un análisis más detallado de cada una de estas dos familias de tareas.

La complejidad de las manos robóticas está relacionada con los tipos de tareas que es capaz de realizar. Por lo tanto cuanto más compleja es la mano robótica, más complejo será el diseño mecánico, su sistema sensorial, su sistema actuador y su sistema de control. Conseguir todo esto y además que la mano sea estéticamente parecida a la mano humana es el objetivo final. Como se pudo apreciar en el capítulo 2, esta complejidad también está relacionada con la clasificación de la mano robótica en antropomórfica, semi-antropomórfica o pinza robótica.

Dentro de todas las áreas que se afrontan para conseguir una mano robótica ideal, una de las barreras principales y, la más complicada aparte de la tecnología, es la complejidad del sistema de control. El mismo puede estar asociado a una determinada mano robótica que tenga como objetivo realizar una gran cantidad de tareas tanto de agarre como de manipulación. La complejidad de los sistemas de control además de estar relacionada con los algoritmos que contienen, también lo está a la cantidad de salidas (sistema actuador) que debe manejar y a la cantidad de entradas (sistema sensorial) que debe procesar, y todo esto prácticamente en tiempo real.

Si consideramos un sistema actuador simple con una cantidad de actuadores mínima y un sistema sensorial acorde a la información que se puede procesar para que el accionamiento sea óptimo, conseguimos reducir la complejidad del sistema de control. Esto por otro lado tiene la ventaja de reducir el peso, el tamaño y el volumen de funcionamiento de la mano robótica que en algunas aplicaciones son características muy restrictivas.

Para que la mano robótica no pierda prestaciones o funcionalidad en favor de simplificar su sistema de control, se recurre a diseños de sistemas mecánicos cada vez más complejos e innovadores, todo esto sin dejar de lado la propiedad antropomórfica del sistema. Esta es la filosofía que persigue un tipo de manos robóticas específicas denominadas *manos robóticas subactuadas*.

Antes que esto, y para entender un poco más cuál es el objetivo y el alcance de una mano robótica, se analizarán de forma resumida los tipos de agarres que puede realizar la mano humana, esto a su vez permitirá comprender un poco más la diferencia entre tareas de agarre y tareas de manipulación.

4.2. Tipos de agarres

La clasificación de tipos de agarre se puede dividir en dos grandes grupos: agarres firmes o de poder [84] (Figura 4.2) en los que por lo general intervienen todos los elementos de la mano robótica, y agarres con destreza o de precisión a los que se los relaciona más comúnmente con la yema de los dedos. Los del primer grupo están más asociados a aquellas tareas en las que es necesario fijar el objeto en una posición invariable en el tiempo. Los del segundo grupo, con aquellas tareas en las que no solo varía la posición del objeto en función del tiempo sino que también puede variar el tipo de agarre.

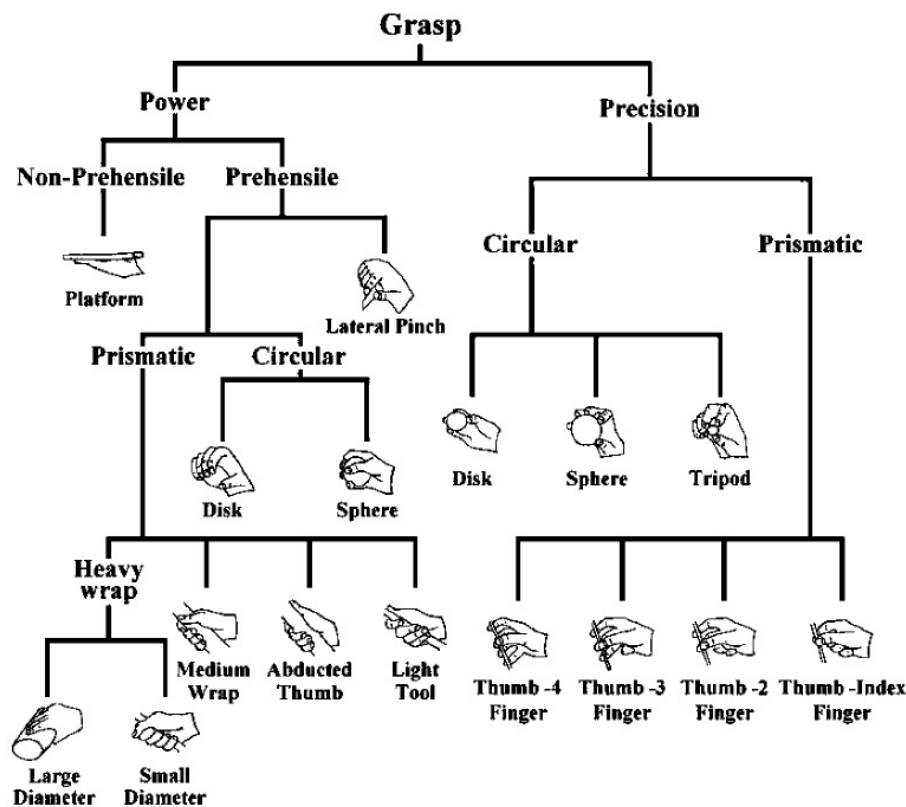


Figura 4.2: Clasificación de agarres según Cutkosky [84]

El proyecto GRASP [9] que aún se encuentra en marcha, es un Proyecto Integrado financiado por la Comisión Europea a través de su Unidad de Cognición en virtud de las Tecnologías de la Sociedad de la Información del Séptimo Programa Marco y en el

que están reunidas una gran cantidad de universidades europeas líderes en la materia. El proyecto fue lanzado en 2008 y tiene como objetivo diseñar un sistema cognitivo capaz de realizar tareas de prensión y manipulación en ambientes al aire libre, tratando principalmente la novedad, la incertidumbre y las situaciones imprevisibles.

Los estudios realizados en este proyecto tienen como objetivo principal entender mejor el comportamiento de la mano humana para poder imitarlo artificialmente y de esta forma conseguir prótesis de mano cada vez más sofisticadas. Uno de sus paquetes de trabajo es identificar y clasificar los tipos de agarre que puede realizar una mano humana analizando los movimientos, trayectorias y posiciones que puede adoptar cada uno de los elementos como la palma, el pulgar y los cuatro dedos.

Se puede decir que actualmente la base de datos más importante relacionada a la clasificación de tipos de agarre se puede encontrar en el proyecto GRASP en una tabla realizada por Thomas Feix [4] la que se puede ver, parcialmente debido a su tamaño, en la Figura 4.3. En esta tabla se pueden observar las clasificaciones parciales y que fueron realizadas en los últimos 60 años por diferentes investigadores en las que se han basado muchos estudios [255, 262, 79, 210, 97, 181, 191, 168, 85, 84, 151, 152, 74, 75, 98]. Sin embargo también se han realizado clasificaciones parciales no observando al total de las funciones de una mano humana sino a los determinados tipos de agarre necesarios en ciertas aplicaciones y entornos definidos [299, 300]. Estos estudios están enfocados a canalizar la funcionalidad que debía tener una mano robótica para poder ser implementada en dichas aplicaciones y entornos.

Otto Bock Thomas Feix 05.12.2008	Palm VF1: P VF2: 2-5 VF3:	Palm VF1: P VF2: 2-5 VF3:	Palm VF1: P VF2: 2-5 VF3:	Palm VF1: P VF2: 2-5 VF3: (t)	Pad VF1: 1 VF2: 2-5 VF3:	Pad VF1: 1 VF2: 2-4 VF3:	Pad VF1: 1 VF2: 2-3 VF3:	Pad VF1: 1 VF2: 2 VF3:	Palm VF1: P VF2: 2-5 VF3:	Palm VF1: P VF2: 2-5 VF3:	Pad VF1: 1 VF2: 2-5 VF3:	Pad VF1: 1 VF2: 2-5 VF3:	Pad VF1: 1 VF2: 2-3 VF3:	Palm VF1: P VF2: 2-5 VF3:	Palm VF1: P VF2: 2-5 VF3:
Name	Large Diameter	Small Diameter	Medium Wrap	Adapted Thumb	Light Tool	Prismatic 4 Finger	Prismatic 3 Finger	Prismatic 2 Finger	Palmar Pinch	Power Disk	Power Sphere	Precision Disk	Precision Sphere	Tripod	Fixed Hook
Grasp Number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Entries	10	3	6	2	2	4	4	2	12	3	8	2	6	8	2
Causticity 1999 1999	Large Diameter	Small Diameter	Medium Wrap	Adapted Thumb	Light Tool	Thumb 4 Finger	Thumb 3 Finger	Thumb 2 Finger	Thumb Index 2 Finger	Power	Sphere	Disk	Sphere	Tripod	Hook
Kamakura 1980			Standard Type			Parallel Mid 2 Finger Grip		Tip Prohibition					Source/Grasp Mid 2 Finger Grip	Tripod Grip	Hook Type
Kapandji 1982	zylindrische Gegenstrich		zylindrische Gegenstrich			Thumb 3 Finger		Fingerboengriff			rundliche Gegenstrich		Fingerboengriff	Fingerboengriff Schublen	Finger Handlich
Lisner 1984	Spann Grasp	Power Grasp						Pulp Pinch						Chuck Grip	Hook
						Hook		Pinch							

Figura 4.3: Recorte de la tabla de clasificación de tipos de agarre realizada por Thomas Feix dentro del proyecto GRASP según los estudios realizados hasta el momento

La clasificación de tipos de agarre que presenta Feix en [102] se divide en tres grandes grupos generales: agarres de poder, agarres de precisión y agarres intermedios. En su tabla los distingue con diferentes colores dando el amarillo a los agarres de poder, verde a los agarres de precisión y amarillo-verde a los agarres intermedios. Luego, pone en color rojo aquellas configuraciones que considera que no están dentro de la definición de agarre pero que sin embargo algún autor las ha tenido en cuenta en su estudio.

En total ha conseguido listar y comparar 147 tipos de agarre en 45 patrones diferentes que luego los ha simplificado en 33 debido a que los demás no entraban dentro de lo que se considera agarre. Esta tabla representa un estado del arte actual de los tipos de agarre que se han analizado hasta el momento, unificando todos los estudios realizados y que da una idea bien formada de cómo englobar la clasificación general de tipos de agarre.

Dentro del proyecto GRASP, y gracias a los avances tecnológicos, se ha desarrollado una herramienta virtual que permite representar cada uno de los tipos de agarre. Esta herramienta es la utilizada para generar una segunda tabla de clasificación general de tipos de agarre, la cual se puede observar, parcialmente debido a su tamaño, en la Figura 4.4.

Opposition Type:	Power					Intermediate			Precision					
	Palm		Pad			Side			Pad			Side		
Virtual Finger 2:	3-5	2-5	2	2-3	2-4	2-5	2	3	3-4	2	2-3	2-4	2-5	3
Thumb Abd.														
Thumb Add.														

Figura 4.4: Recorte de la tabla de clasificación de tipos de agarre realizada por Thomas Feix dentro del proyecto GRASP utilizando una herramienta virtual

En dicha tabla se colocan los tipos de agarres (de poder, de precisión e intermedios) en tres diferentes columnas, en el siguiente escalón de clasificación se define el concepto de *tipo de oposición* como la dirección normal por la cual la mano humana puede aplicar fuerzas. En este caso hay tres tipos de *oposiciones* definidos por Iberall en 1987 [138]:

- **Oposición con la yema de los dedos (*Pad opposition*):** Las fuerzas son aplicadas con las yemas de los dedos en una dirección más o menos paralela a los ejes distal de los dedos.
- **Oposición con la palma (*Palm opposition*):** La palma de la mano es usada como uno de los lados del agarre mientras que el otro lado lo componen dedos o yemas de dedos. En este caso los ejes de las fuerzas aplicadas son más o menos perpendiculares a la palma.
- **Oposición de lado (*Side opposition*):** En este caso el costado de uno o más dedos



son usados para fijar el objeto. La dirección de las fuerzas son más o menos paralelas a los ejes radiales de los dedos.

Por otro lado, nuevamente Iberall en 1997 [139], define el concepto de *dedo virtual* refiriéndose tanto a cada elemento como al grupo de elementos que conforman la mano robótica y que interviene en un agarre para fijar un objeto, sea la palma, el pulgar, un dedo o varios dedos. La condición necesaria es que dichos elementos o grupos de elementos generen la fuerza suficiente para asegurar la fijación del objeto. A los *dedos virtuales* se los define como VF1, VF2 o VF3 (del inglés *virtual finger*) y luego dependiendo del tipo de oposición del agarre se asocia a cada uno de estos *dedos virtuales* como la palma (P), el pulgar (1) o los dedos (2-5). Ejemplos claros de este tipo de clasificación se pueden apreciar en la tabla generada por Feix [4] y que parcialmente se representan en la Figura 4.3.

4.3. Agarre y manipulación

Tal y como se describió en el capítulo 2, una de las clasificaciones que existen de las tareas que realiza una mano robótica es en dos grandes familias: tareas de agarre o fijación y tareas de manipulación. Las tareas de agarre o fijación se refieren a la calidad de agarre de objetos que tiene una mano procurando que dicha calidad no se reduzca a medida que pase el tiempo, es decir, que exista una cierta invariabilidad de agarre en la toma de objetos por la mano. En cambio, la manipulación de objetos se refiere al control de los movimientos de la mano en el proceso de agarre, con una cierta variación en el transcurso del tiempo. Esto es lo que diferencia a ambos tipos de tareas. Todo esto independientemente de los elementos de la mano que intervengan en las mismas: palma, dedos y pulgar.

En esta clasificación de tipos de agarre, también se debe tener en cuenta que las tareas de agarre no solo están relacionadas con tipos de agarre firme sino que también lo están con tipos de agarre con destreza siempre y cuando el tipo de agarre no varíe el tiempo. Las tareas de manipulación por su parte siempre están relacionadas con tipos de agarre con destreza que son los que permiten una cierta variación del tiempo. Por lo tanto una determinada tarea u operación de agarre o manipulación puede involucrar uno o varios tipos de agarre.

Actualmente no existe un árbol de clasificación completo que abarque todas las tareas relacionadas con agarre y manipulación de la mano humana. Esto es, en cierta forma, debido a que todavía se está muy lejos de poder conseguir que una mano robótica que satisfaga, por un lado todas las tareas u operaciones cotidianas y de trabajo, y por otro, el gran número de movimientos complejos, posturas y posiciones que se puede realizar con la mano humana y que aún no ha sido objeto de clasificación y de asociación a algunas de estas tareas.

Por tal motivo es mucho más sencillo iniciar la clasificación a través de los tipos de agarre que se pueden realizar con una mano humana para luego analizar cómo la misma puede variar estos tipos de agarre en función del tiempo, definiendo y asociando los mismos a los diferentes tipos de tareas.

Otra forma simplificada y específica de clasificar el funcionamiento de una mano robótica es relacionándola con el objetivo para el cual fue creada o según el entorno o sector en el cual está realizando las tareas: industrial, cirugía, prótesis, etc.



Algunos estudios han concluido que aun tratándose de un análisis específico de tareas de agarre y manipulación asociado a un determinado sector como es el industrial, se ha descubierto que para una determinada tarea de agarre cada individuo puede utilizar un tipo de agarre diferente dependiendo del tamaño y forma de sus manos obteniendo los mismos resultados aún cuando el tipo de agarre utilizado este representado en diferentes sitios del árbol de clasificación [85, 84].

Por otro lado cabe mencionar la serie de estudios enfocados a descubrir nuevos tipos de agarres y sus respectivos análisis funcionales que ha habido en los últimos tiempos, aunque más enfocados a un aspecto general [155, 191, 168, 151, 152].

4.3.1. Tareas de agarre

Los sistemas de control relacionados con las tareas de agarre suelen ser vistos como los más sencillos de analizar y de conseguir de forma óptima. Lo cierto es que no es así.

Esta idea surge porque en la mayoría de los casos las manos robóticas diseñadas para realizar tareas de agarre son destinadas a la industria. Estas manos robóticas tienen la característica de poder procesar solo un tipo de agarre destinado a un objeto en particular con lo que ésta configuración hace que el sistema de control alcance su punto más robusto, que es el de abrir y cerrar los dedos mecánicos.

Todos los estudios realizados para controlar las tareas de agarre de las manos y pinzas robóticas se basan de una forma u otra en lo que se denomina la estabilidad del agarre y la optimización de los esfuerzos. Esto consiste en sujetar el objeto de forma estable en el transcurso del tiempo con el menor gasto de esfuerzo.

Si bien este tipo de estudios comenzó con los primeros desarrollos de manos robóticas, hasta la década del 80 las manos robóticas eran consideradas como "*manos mecánicas*" para diferentes herramientas en sistemas automáticos dentro del sector industrial. Con la llegada de nuevas tecnologías y el desarrollo de componentes cada vez más pequeños, el ingenio de los investigadores se ha ido agudizando. Una de las investigaciones más importantes de esa misma década y que dio inicio a muchos estudios en este tema, es la realizada por John Kenneth Salisbury en su tesis doctoral denominada *Análisis cinemático y de fuerzas de manos articuladas*, así como otras publicaciones relacionadas del mismo autor [242, 244]. Por otro lado, se puede destacar el análisis cinemático y de agarre realizado por David Montana y que da luz a la Ecuación de Contacto que lleva su nombre [203, 204, 205] y otros estudios cinemáticos de tareas de agarre [206, 121]. Estos estudios básicamente tratan la tarea del agarre en su aspecto cinemático, siendo también el dinámico [194, 211, 192, 133, 279, 280, 258] y el puramente geométrico [193] sectores interesantes de investigación.

Estos tres tipos de análisis de una tarea de agarre, el cinemático, el dinámico y el puramente geométrico, son los tres pilares fundamentales en los que se basan prácticamente todos los controles de sistemas robóticos. A partir de éstos surgen, en el caso de manos robóticas por ejemplo, una gran cantidad de estudios que los profundizan, los integran o incluso adaptan al método por elementos finitos, y en los que se considera no solo la cinemática y la magnitud de las fuerzas sino también el posible deslizamiento que pueda surgir en las superficies de contacto, acercándose un poco más al comportamiento real de una mano humana [73].

Si al análisis realizado anteriormente se le suma el hecho de que el objeto puede variar su forma y en algunos casos esa forma puede ser no percibida correctamente, la complejidad del sistema de control puede alcanzar niveles muy elevados. En estos casos

para conseguir realizar la tarea de forma óptima se debe dotar al sistema robótico de un sistema sensorial más complejo como por ejemplo la visión estereoscópica. En los últimos años este tipo de estudios esta ganando trascendencia gracias a tres motivos: la visión es uno de los principales retornos de información que tiene el ser humano para saber con cierta certeza qué objeto va a sujetar; la tecnología de que se puede disponer hoy día para este tipo de aplicaciones ha avanzado enormemente y continúa haciéndolo; y por último, que los estudios realizados en este aspecto han demostrado la importancia del avance que se consigue en entornos estructurados [146, 257] y no estructurados [40, 150, 247, 248, 249].

Analizando todas estas tareas desde un punto de vista diferente, se puede decir que el entorno en el que se desenvuelven tanto la mano robótica como el objeto a sujetar es estático es decir, el objeto se encuentra inmóvil en una ubicación dada y es la mano robótica la que se desplaza a una determinada posición para realizar su tarea de agarre. Todo ello conociendo previamente la posición tanto del objeto como la de la mano y controlando ambas en todo momento.

Hay estudios en los que se ha ido un paso más allá. Se ha considerado que la mano robótica se encuentra en una posición conocida y que es el objeto que se mueve de forma predecible. Aquí se dota a la mano de un sistema sensorial externo, como puede verse en la *High Speed Multifingered Hand* de la Figura 4.5.

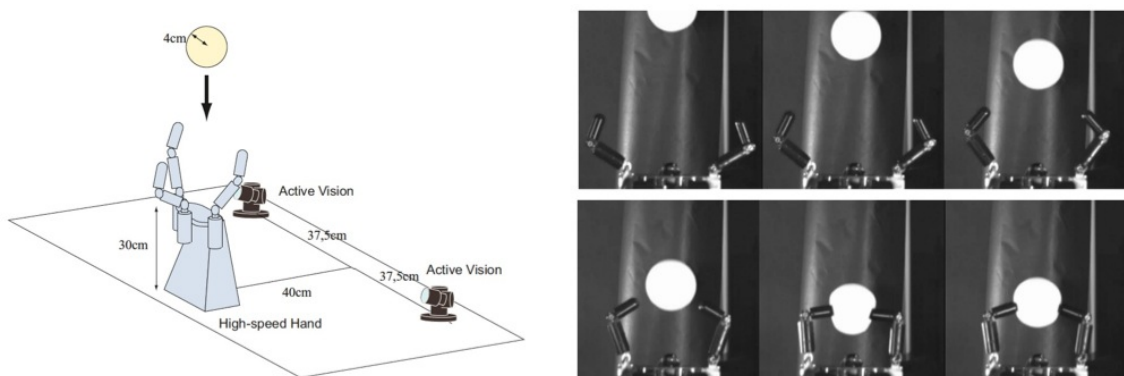


Figura 4.5: Tareas de agarre dinámico de la *High Speed Multifingered Hand*

En otros estudios se ha considerado que el entorno es dinámico y también que el objeto puede moverse de forma impredecible y se ha conseguido el objetivo de forma óptima (Figura 4.6).

Analizando estos estudios y la eficacia con la que realizan las tareas, se puede llegar a pensar erróneamente que se esta a un paso de conseguir imitar a la mano humana. Sin embargo solo basta darse cuenta que para ello habría que concebir un sistema robótico que no solo consiga todas estas tareas sino que además sea capaz de realizar malabares con diferentes objetos de diferentes formas a la vez y que cada objeto sea sujetado y liberado de forma correcta en todo momento y en un entorno totalmente dinámico. Así se ve la complejidad que esto puede llegar a alcanzar. En este aspecto, si bien no se ha estudiado a fondo el tema de la tarea de agarre en si, se ha comenzado a analizar los movimientos que realizan los brazos que son el medio por el cual es posible situar a la mano en un entorno tridimensional [235] (Figura 4.7).

Como se puede observar, la mayoría de los estudios realizados parten de la presunción que el objeto a sujetar es rígido o, en algunos casos, con una pequeña deformación aceptable. En el supuesto en el que el objeto sea flexible, suma en complejidad en dos aspectos: la posición inicial del objeto puede ser de infinita cantidad de formas y que al momento

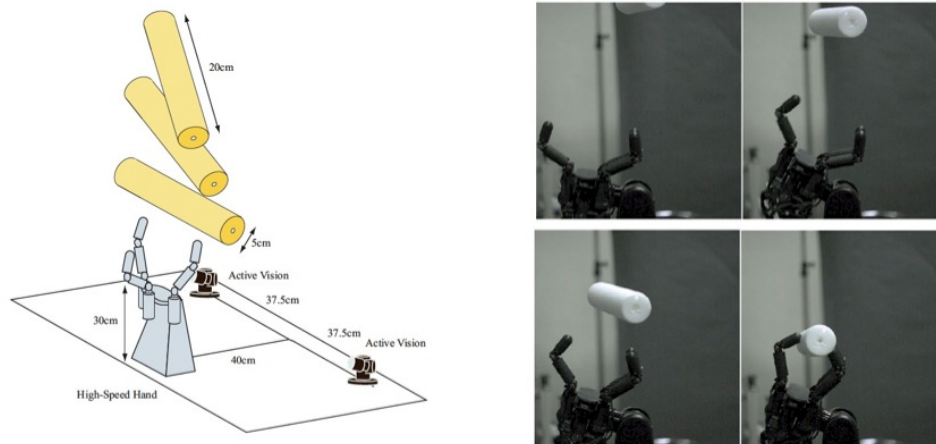


Figura 4.6: Tareas de agarre dinámico de la *High Speed Multifingered Hand* con el objeto en movimiento impredecible

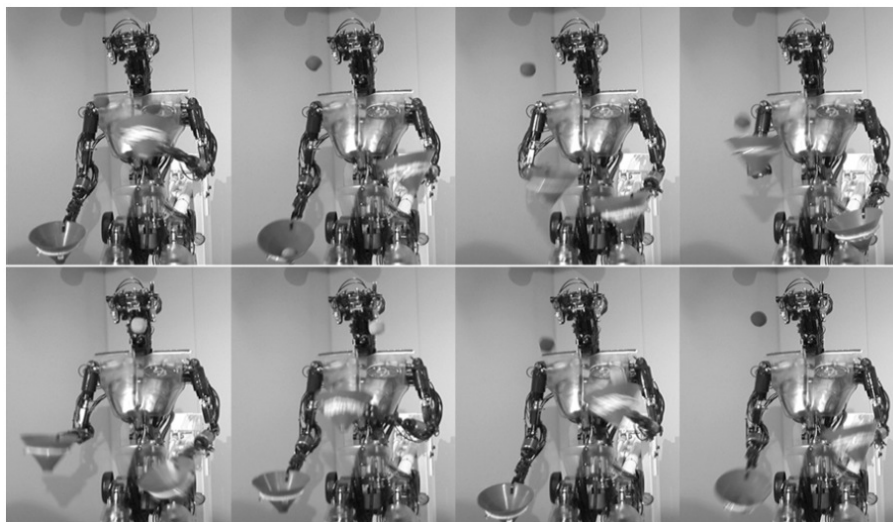


Figura 4.7: Robot humanoide haciendo malabares con tres pelotas usando embudos de cocina

de realizar el primer contacto entre la mano y el objeto, éste puede variar su forma de manera impredecible (i.e. telas, bolsas, etc.). Esto último, sin embargo, puede no ser tan perjudicial dando la ventaja de que en cierta forma el objeto se pueda adaptar también al tipo de agarre. Un estudio que es interesante mencionar es el realizado por Doulgeri y Fahantidis en el que no solo definen una estrategia de agarre para estos casos sino que también desarrollan una pinza robótica de dos dedos con dos grados de libertad cada uno, de bajo coste y para su aplicación en la industria [94]. Otro estudio que analiza la misma problemática pero desde diferente perspectiva y en el que concluyen con la misma idea de desarrollar una pinza robótica destinada a la industria capaz de fijar telas, cueros, carne y pescados, es el realizado por Llen y Davis [179]. En este último caso el estudio define los principios básicos para el desarrollo de dicha pinza robótica.

4.3.1.1. Planificación del agarre

La complejidad del sistema de control va asociado directamente a la complejidad de la mano robótica que a su vez, en la mayoría de los casos, se relaciona con la cantidad de tareas que la misma puede realizar. Si se enfatiza en el hecho que una mano robótica está pensada sólo para ciertos tipos de tareas de agarre, esto indica directamente que la mano robótica es capaz de alcanzar diferentes tipos de agarre. El saber qué tipo de agarre utilizar, bajo qué configuración de la mano robótica, con qué ángulo atacar al objeto, de qué forma y en qué momento iniciarlo, y todo ello de la forma más óptima posible, es el objetivo del sistema de control y de la técnica denominada Planificación del Agarre (o del inglés *Grasp Planning* o *Grasp Synthesis*). Todo lo anterior se puede resumir en una única pregunta: ¿En qué puntos de la superficie del objeto deben ser colocados los dedos? Si bien este tipo de decisiones en el ser humano son tomadas de forma instintiva e intuitiva, para una mano robótica cuya configuración estructural y cinemática es diferente, no es una decisión tan simple [12].

En este aspecto se ha realizado una gran cantidad de estudios relacionados exclusivamente con lo que a planificación del agarre se refiere [48, 120, 123, 72, 234, 296, 199, 118] así como otros estudios más focalizados a la síntesis del agarre [267, 200, 76, 229, 288]. Por otro lado, el análisis en sí del agarre con el fin de calificar los diferentes tipos y definir cuál es el más óptimo es también un motivo de estudio [100, 161, 228, 239, 45] así como, en algunos casos, se han establecido también medidas de calidad [178, 106, 68, 264, 46].

4.3.1.2. Estabilidad del agarre

Es necesario tener en cuenta que el agarre de un determinado objeto con una determinada mano robótica de forma estable y equilibrada puede llegar a dar infinitos resultados. Si se toma una misma posición inicial de la mano robótica para todos los casos posibles, ésta puede asumir diferentes configuraciones en las que el gasto de esfuerzo para alcanzar la posición final sea diferente o, simplemente puede suceder que ante un mismo gasto de esfuerzo la robustez de las posiciones finales sean diferentes, tratando siempre de alcanzar el planteamiento óptimo [162]. Si bien esta sección de la investigación forma parte de lo que se conoce como Planificación del Agarre, es necesario resaltar que el agarre no puede ser efectivo si finalmente el objeto es inestable dentro de la mano robótica que lo sujeta.

La pregunta principal en este punto es: ¿Cuántos dedos o contactos son necesarios para restringir el movimiento del objeto una vez sujetado?. Numerosos estudios se han realizado para definir cual es la menor cantidad de estos contactos que permitan satisfacer esta condición [215, 193].

Los términos de *Force Closure Grasp* y *Form Closure Grasp* surgen de estos estudios y si bien su significado conceptual depende en muchos casos del criterio de cada autor [230, 34, 290], se consideran en este estudio los que define Bicchi [35] y se los puede resumir de la siguiente forma:

- ***Force Closure Grasp***: los movimientos del objeto sujetado son completamente (o parcialmente) restringidos a pesar de cualquier perturbación externa, debido a las grandes fuerzas de contacto.
- ***Form Closure Grasp***: es la capacidad de una mano para evitar movimientos del objeto, basándose únicamente en la restricción del contacto sin fricción.

Partiendo de los conceptos anteriores se han analizado los efectos de la *Force Closure Grasp* y la *Form Closure Grasp* en ecuaciones de segundo orden (a nivel de aceleraciones) obteniéndose estudios de gran relevancia que permitieron caracterizar la completa inmovilización del objeto [131, 237, 236].

La componente de fricción en el agarre reduce, en teoría, el número de contactos necesarios para conseguir la inmovilización del objeto. Esto guarda concordancia con la realidad ya que el ser humano puede alcanzar un agarre seguro con solo dos dedos. Esto se debe a la fuerte dependencia que tiene la mano humana respecto de la fricción para realizar tareas de agarre.

Para que esto suceda de forma eficiente en manos robóticas y pueda ser de provecho, es necesario dotar a las superficies de contacto de la mano una buena sensibilización [47]. Esto actualmente no es posible debido a que tecnológicamente no hemos llegado a desarrollar un dispositivo con estas características.

4.3.1.3. Distribución de las fuerzas en el dedo

Uno de los aspectos más importantes en el control y la planificación de tareas de agarre es el esfuerzo realizado por cada dedo sobre el objeto a sujetar en cada momento. El conocer esta información y, a su vez, poder modificarlas según fuere necesario, es el punto clave de todo sistema de control de manos robóticas.

Como se ha comentado anteriormente, si el tipo de agarre se mantiene constante se está frente a una tarea de agarre, mientras que si el tipo de agarre varía en el tiempo o, si los elementos de la mano cambian de posición, se estaría frente a una tarea de manipulación. En todo caso, el equilibrio de las fuerzas y momentos (esfuerzos o sollicitaciones) ejercidos sobre el objeto debe siempre asegurarse.

Si se considera el ejemplo de la Figura 4.8 la expresión que resume esta condición es la siguiente:

$$\bar{P} = [W]\bar{F} \quad (4.1)$$

Donde \bar{P} son los esfuerzos (fuerzas y momentos) experimentados en el centro de gravedad del objeto y esta dado por $[\bar{f}^T \bar{n}^T]^T$; por otro lado \bar{F} es el vector de fuerzas y momentos ejercidos por la mano robótica al objeto en los L puntos de contactos y esta dado por $[\bar{F}_1^T \cdots \bar{F}_L^T]^T$; y finalmente $[W]$ es la matriz denominada Matriz de Agarre y depende de la localización de los puntos de contacto en la superficie del objeto incorporando el conocimiento de la geometría de agarre.

La Matriz de Agarre no es una matriz cuadrada, sus dimensiones dependen de la cantidad de puntos de contacto que se produzcan en el agarre, por lo tanto, en el caso más general, tendrá una dimensión $6 \times 6L$. Esto debido a que si se consideran las tres dimensiones, en cada punto de contacto se pueden ejercer tres fuerzas y tres momentos.

Normalmente la cantidad de fuerzas y momentos transmitidos por los contactos a una superficie no llegan a completarse, por lo que si se considera a d como dicha cantidad, el tamaño de la Matriz de Agarre se simplifica a $6L \times d$, donde $d = 3$ si se tiene en cuenta puntos de contacto con fricción y $d = 4$ si se considera un contacto blando (de la traducción del inglés *soft contact*) en el dedo [37]. Por lo tanto para generalizar este concepto se dice que el tamaño de la Matriz de Agarre corresponde a $6 \times (3a + 4b)$, donde a es la cantidad de contactos con fricción y b es la cantidad de contactos blandos que existen en dicho agarre.

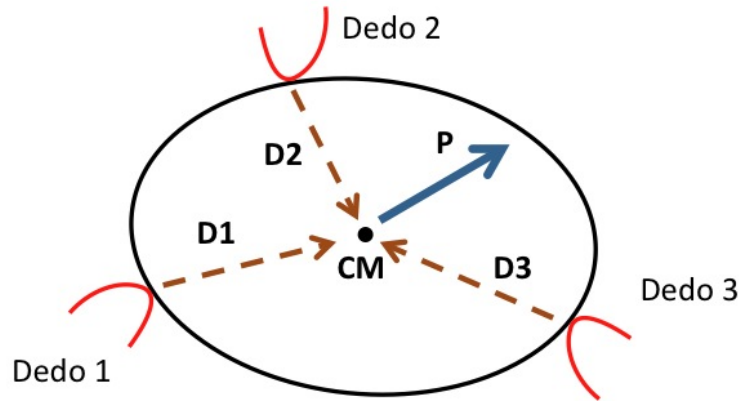


Figura 4.8: Fuerzas ejercidas por la mano robótica en los puntos de contacto con el objeto

En la Figura 4.9 se puede observar los tres tipos de contactos que se pueden considerar. Las ecuaciones que corresponden a cada uno de ellos se las puede resumir de la siguiente forma:

▪ Ecuación de contacto con y sin fricción

$$f_{tx}^2 + f_{ty}^2 \leq f_n^2$$

▪ Ecuación de *soft contact*

$$f(f_{tx}, f_{ty}, m_z) \leq f_n$$

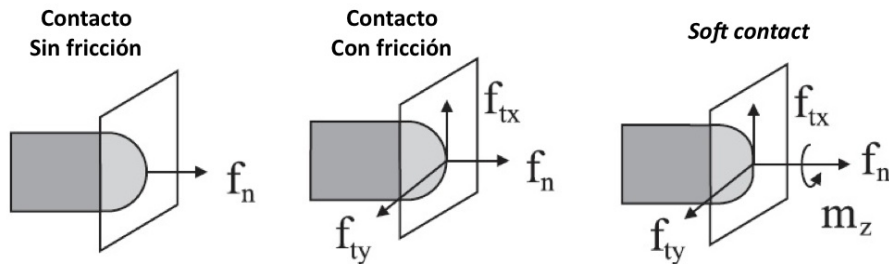


Figura 4.9: Tipos de contacto

Los puntos de contacto sin fricción solo pueden resistir a una fuerza unidireccional en el mismo sentido de la superficie de contacto. Al añadir fricción se permite al punto de contacto resistir a fuerzas tangenciales a la misma con una magnitud igual a la condición misma de fricción. Finalmente en el caso del *soft contact* se puede sumar la propiedad de poder resistir momentos sobre la superficie normal al contacto. El denominado *cono de fricción* utilizado generalmente en estos estudios define la relación entre la fuerza tangencial y la fuerza normal a la superficie que aseguran que no haya deslizamientos. Hay estudios realizados para el caso de superficies límites de fricción más complicadas relacionadas a los *soft contacts* [135, 282].

En el espacio tridimensional todo objeto tiene 6 grados de libertad (GDL) y para que su situación llegue a un equilibrio estático, los dedos a través de los puntos de contacto deben restringirle esos 6GDL. Tanto si consideramos contactos con fricción como si consideramos *soft contacts*, cada dedo nos puede restringir como mínimo 3GDL lo que refleja que con más de dos puntos de contacto la Matriz de Agarre vuelve al sistema como indeterminado. Como consecuencia de ello, hay una cantidad infinita de soluciones pudiendo los L puntos de contacto dividir los esfuerzos para conseguir el equilibrio del sistema.

Una solución general a este problema se puede explicar en la siguiente expresión:

$$\bar{F} = [W^+] \bar{P} + [I - W^+W] \bar{\varepsilon} \quad (4.2)$$

Donde $[W^+]$ es la inversa generalizada de $[W]$, I es la matriz de identidad $LdxLd$ y $\bar{\varepsilon}$ es un vector arbitrario que evalúa cual es la posible solución elegida de la ecuación 4.1 para \bar{F} . La ecuación 4.2 representa la base de la gran mayoría de estudios y teorías aplicados a como distribuir las fuerzas en tareas de agarre, focalizándolos en cómo calcular $\bar{\varepsilon}$ para los diferentes casos de la forma más óptima [169, 222, 67, 207].

Encontrar una solución óptima de distribución de fuerzas no es tan sencillo como solucionar la ecuación 4.2. En realidad hay otras restricciones que son realmente importantes como pueden ser la fricción [291, 171], o la naturaleza de este tipo de contactos que sólo pueden *empujar* el objeto pero no *tirar* a través del mismo.

Como se ha comentado anteriormente, aparte de haber tareas de agarre que utilizan las yema de los dedos denominadas agarres de precisión, existen aquellas en las que se utilizan todas las falanges de los dedos y en algunos casos la palma (Figura 4.10). Este último tipo de agarres se lo denomina agarres de poder (de su traducción del inglés *power grasp*). En referencia a este tema se han realizado numerosos estudios [142, 201, 116, 132, 298, 219, 128] en los que se asegura que este tipo de agarre es mucho más estable que el agarre de precisión. Sin embargo, son más complicados de analizar debido a la excesiva cantidad de restricciones que realiza la mano robótica sobre el objeto a través de todos los puntos de contacto.

4.3.2. Tareas de manipulación

Como se ha venido comentando, las tareas de manipulación se diferencian de las tareas de agarre gracias a la variación en el tiempo del tipo de agarre o de los elementos de la mano que intervienen en la tarea. El ser humano utiliza generalmente este tipo de tareas para observación, movimiento o transformación del objeto. Gran parte de la corteza motora esta destinada a tareas de manipulación y, si se tiene en cuenta el número y la sensibilidad de los mecanorreceptores de las palmas y yemas de los dedos, ello es indicio de la importancia que la manipulación tiene en los seres humanos. Por otro lado, la mayoría de las veces intervienen en dichas tareas más de un sistema robótico, entre los que podemos identificar los dedos, manos y brazos robóticos. Por este motivo es que la mayoría de los análisis que se realizan en este área se centran en el objeto y no en el sistema general. El problema se formula en términos de qué objeto se va a manipular, cómo se comporta y qué fuerzas serán ejercidas sobre el mismo [217].

Actualmente todas las manos robóticas destinadas a estudiar las tareas de manipulación, lo hacen en un entorno de laboratorio. Sin embargo los avances en el modelado han estado dando resultados interesantes referidos al comportamiento de la mano humana en la manipulación con destreza [272].

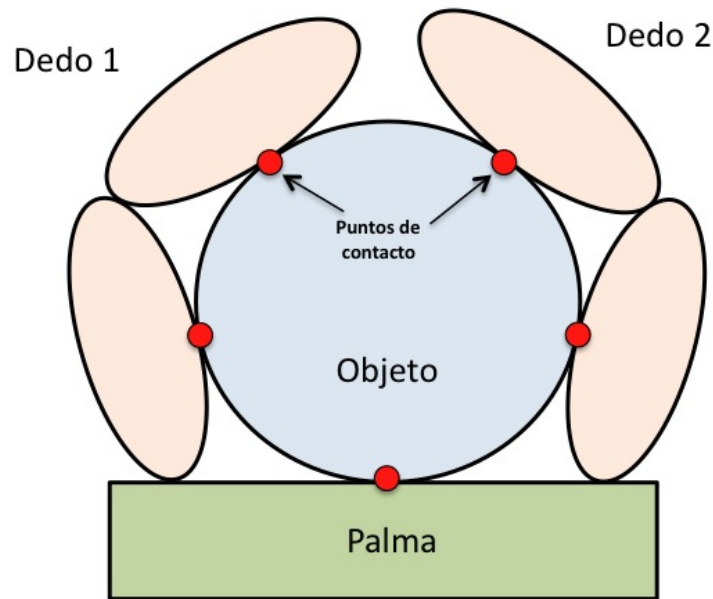


Figura 4.10: Esquema de un agarre de poder (*Power Grasp*)

Si nuestro interés radica en conocer cómo se comportará un objeto cuando se mueve de un sitio a otro, o al cambiar su configuración, el primer punto a analizar será el de la formulación del problema de la tarea de manipulación.

4.3.2.1. Formulación del problema de manipulación

La formulación del problema de manipulación que se puede observar en la Figura 4.11 establece el marco de estudio para determinar qué esfuerzos son necesarios para producir el efecto deseado en el objeto. Este estudio requiere el conocimiento de la relación geométrica entre el sistema robótico y el objeto, como también la cinemática del conjunto. Finalmente, se pasa al análisis dinámico del agarre, ya que tanto el objeto como el sistema robótico se encuentran continuamente en movimiento.

El primer paso que se debe dar para formular el problema de manipulación es definir y desarrollar la cinemática del sistema robótico en función del objeto a manipular. Esto se hace definiendo los esfuerzos necesarios a ser realizados sobre el objeto en dicha tarea. La base de este cálculo es la relación de la Matriz Jacobiana del conjunto [194].

$$f_{obj} = G f_{tip}$$

Donde G es la Matriz Jacobiana de Agarre (o Mapa de Agarre según algunos autores) y puede ser obtenida resolviendo cada fuerza de contacto que se ejerce sobre el objeto en un único eje de coordenadas referido al mismo.

Generalmente las fuerzas ejercidas por las yemas de los dedos son representadas en un eje de coordenadas en el mismo contacto instantáneo con la superficie del objeto. Luego cuando se identifica qué tipo de contacto es, se definen cuantas fuerzas y direcciones posibles puede haber en dicho punto.

Para producir estas fuerzas en las yemas de los dedos de la mano robótica, se debe obtener la Matriz Jacobiana de la Mano J_h , la cual permite calcular el par que es necesario realizar en cada articulación de la mano robótica para conseguir dicha fuerza. La Matriz

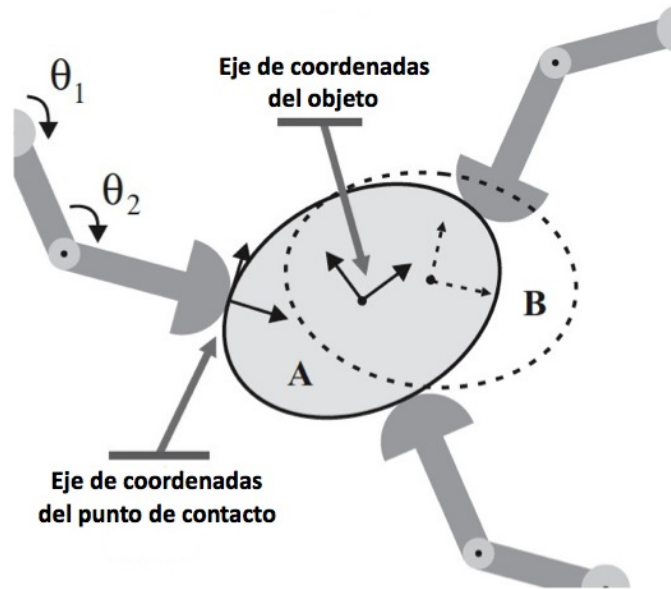


Figura 4.11: Problema de manipulación típica. Movimiento del objeto desde la posición A hasta la posición B

Jacobiana de la Mano se basa en una Matriz Jacobiana estándar referida a cada dedo como un manipulador individual.

$$\tau_i = J_i^T f_{tip_i}$$

Luego, cada una de estas Matrices Jacobianas Individuales se unen para formar la Matriz Jacobiana de la Mano.

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \dots \\ \tau_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1^T & 0 & \dots & 0 \\ 0 & J_2^T & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & J_m^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{tip_1} \\ f_{tip_2} \\ \dots \\ f_{tip_m} \end{bmatrix}$$

En la Figura 4.12 se puede observar cómo la Matriz Jacobiana de Agarre y la Matriz Jacobiana de la Mano interactúan juntas, tanto en lo que a fuerzas y torques se refiere como también a las velocidades que son necesarias en cada caso [217].

Por lo general, las yemas de los dedos en una mano robótica ruedan o se deslizan sobre la superficie. Tener en cuenta las restricciones de contacto deslizantes o rodantes en la formulación del problema de la manipulación implica la aplicación de la geometría diferencial y una parametrización del contacto de los dedos y la superficie del objeto. En la actualidad se puede encontrar una importante cantidad de estudios destinados a desarrollar teorías referidas a contactos rodantes [78, 177, 292, 92, 36, 250] y contactos deslizantes [47, 134, 269, 170, 153, 154, 27, 281] en las tareas de manipulación.

El análisis de contactos deslizantes y rodantes toma como entradas las velocidades relativas (angulares y lineales) de los ejes de coordenadas del contacto tanto sobre el dedo como sobre el objeto, y como salidas las velocidades parametrizadas que describen el movimiento del contacto sobre el dedo y la superficie del objeto (Figura 4.13) [217].

Para el caso de la Planificación del Agarre en tareas de manipulación, se puede decir que hay dos objetivos principales:

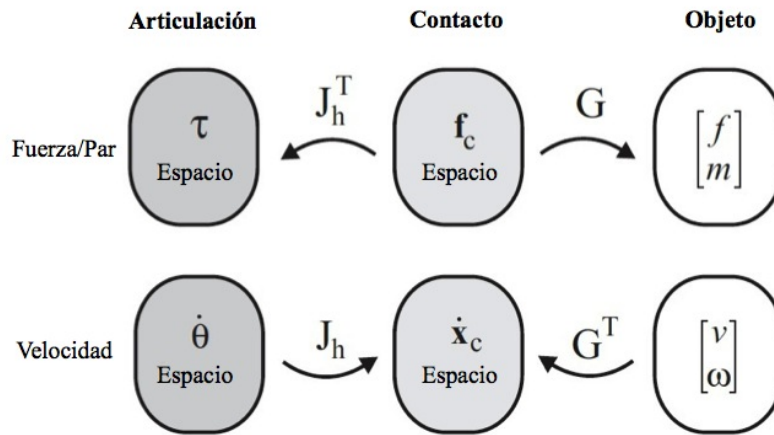


Figura 4.12: Interacción de las Matrices Jacobianas de Agarre y de la Mano. Se consideran también las velocidades

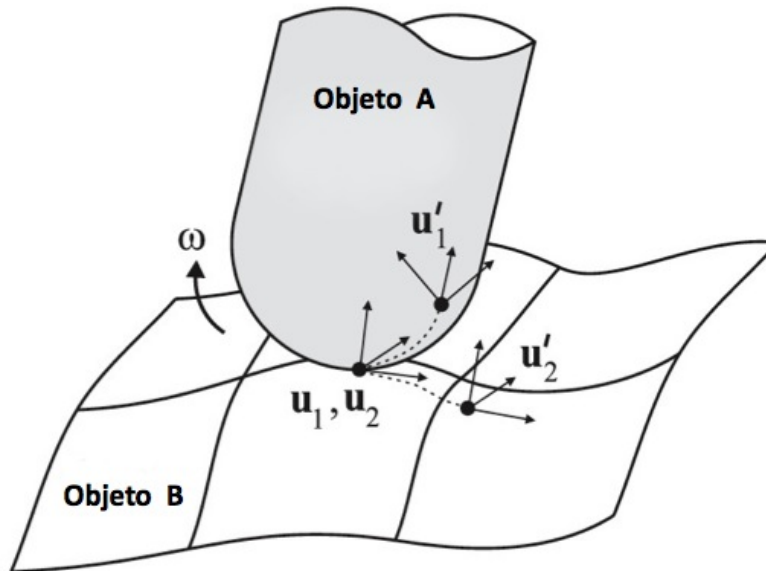


Figura 4.13: Esquema de ejes de coordenadas para el caso de contactos rodantes o deslizantes

- Planificación del movimiento del objeto para alcanzar su configuración final deseada o el acompañamiento de una tarea más compleja.
- Análisis del tipo de agarre correcto y la elección del conjunto de puntos de contacto óptimos con su debida configuración de esfuerzos.

A raíz de esto, uno de los problemas a los que se debe enfrentar en las tareas de manipulación cuando se desea calcular es la distribución de fuerzas, es el relacionado a la variación de dicha distribución en el tiempo cuando se cambia de un tipo de agarre a otro. Esto se denomina sincronización del dedo (de su traducción del inglés *finger gating*). En esta aspecto se han realizado numerosos estudios [194, 77, 218, 35].



Con lo visto hasta el momento, se puede dividir la complejidad del control en las tareas de manipulación en tres niveles: alto, medio y bajo

- **Nivel Alto:** es donde se desarrolla la planificación del movimiento o la tarea, se define el tipo de agarre óptimo y se genera el sistema de eventos discretos.
- **Nivel Medio:** incluye las fases de manipulación cuando el dedo esta operando de forma independiente o en coordinación con otros elementos. Se generan los eventos discretos puntuales y se analizan las transiciones.
- **Nivel bajo:** se realiza la formulación dinámica y de control de cada fase, la cinemática y los esfuerzos

Como se ha visto en el apartado anterior, la complejidad del sistema de control está relacionada con la cantidad de tipos de agarre que puede procesar la mano robótica. En los casos de tareas de agarre, una vez alcanzada la fijación del objeto, la tarea se da por concluida. En cambio en el control de las tareas de manipulación, no sólo debe asegurar que un determinado tipo de agarre se realiza correctamente sino que además se debe procesar qué posiciones o posturas debe adoptar la mano robótica en el tiempo que dure la tarea para alcanzar su siguiente tipo de agarre manteniendo siempre al objeto en la posición deseada.

La gran mayoría de estudios relacionados con este campo rara vez buscan su aplicación a la industria y centran más su objetivo en conocer o saber interpretar de mejor forma el comportamiento de la mano humana. Para poder conseguir este objetivo se han desarrollado innumerables manos robóticas de diferentes tipos de estructuras y configuraciones. En algunos casos se han diseñado sistemas robóticos muy complejos con el solo objetivo de dar a entender un poco más cómo la mano humana consigue realizar tareas de manipulación táctil.

El diseño de manos robóticas muchas veces se ve obligado a centrar sus esfuerzos solo en conseguir abordar unas pocas tareas de manipulación priorizando en muchos casos esta característica frente a la propia antropomorficidad de la mano. Sin embargo la comunidad científica es consiente de que la única forma que una mano robótica pueda conseguir realizar todas las tareas que realiza una mano humana solo es imitándola a la perfección en todos sus sentidos.

En algunos casos también hay que tener en cuenta de que en las tareas de manipulación al haber una variación en el tiempo de sus tipos de agarre, ello puede no ocasionar la variación en sí en los tipos de agarres pero sí en los elementos intervinientes tales como los dedos, la palma y el pulgar, aún cuando el tipo de agarre sea el mismo. Un ejemplo claro es el de enroscar o desenroscar un tornillo o una bombilla de luz [278, 277].

Metodología de diseño de Manos Robóticas Multi-Estado

5.1. Introducción

El desarrollo de manos robóticas subactuadas tiene un gran interés dentro de la robótica debido a que son livianas, pequeñas y fáciles de controlar. A lo largo del desarrollo de este trabajo, el autor se ha encaminado en éste área aprovechando las propiedades que tienen este tipo de manos robóticas buscando el mecanismo universal que permitiese con una mínima cantidad de actuadores conseguir una destreza considerable, chocando continuamente con la misma limitación: no poder controlar de forma independiente diferentes GDLs que son accionados con un mismo actuador.

A raíz de esta limitación, se descubre que para que un GDL sea independiente, el sistema accionador debe proveerle, de forma independiente, un cierto movimiento o accionamiento. Estos movimientos o accionamientos no pueden ser compartidos por diferentes GDLs sin que esto impida un control individual de los mismos.

Este trabajo se centra en analizar, desde el punto de vista del sistema accionador, la capacidad que tiene el mismo de ofrecer movimiento a un sistema robótico y, por lo tanto, una cierta funcionalidad.

Antes de entrar en el desarrollo de la metodología propuesta, es necesario disponer de ciertas herramientas de análisis y comparación. Estas herramientas permiten definir conceptos que hasta ahora no se habían analizado en profundidad y que son las siguientes:

- **Características de diseño:** Permiten analizar determinados aspectos de diseño de manos robóticas que estructuran de alguna forma el camino a seguir previamente al desarrollo del prototipo. En este aspecto y debido a la tecnología actual, el autor ha revisado cada una de estas características adaptándolas a la nueva metodología y ha incorporado algunas nuevas que consideró que han tomado importancia en los últimos años.
- **Estudio funcional de las manos robóticas:** Este estudio establece el concepto de mano robótica como un sistema robótico accionado por un sistema accionador en base a la relación que tienen entre ambos. A partir de este concepto, se redefinen las configuraciones actuales de pinza robótica, mano robótica subactuada y mano robótica actuada y se las relaciona con los conceptos de mano robótica actuada, sobreactuada y subactuada en función del sistema accionador que posea.

- **Grado de accionamiento:** Este índice permite definir que dos sistemas accionadores sean equivalentes para su posterior comparación. Por otro lado, da la idea de capacidad de un sistema accionador de dar movimiento a un sistema robótico.
- **Estados de un sistema accionador:** El movimiento o accionamiento que provee un sistema accionador se traduce en determinados estados en el que se encuentra en cada momento. Para definir la calidad de los estados que puede ofrecer un sistema accionador y si esta se ve disminuida, se analizan los diferentes tipos de estados que se pueden encontrar en los actuadores actuales.
- **Concepto de Actuador Multi-Estado:** Es el actuador que permite proveer a un sistema robótico una cantidad finita de estados. Esto es debido al diseño de mecanismos especiales denominados Mecanismo de Tres estados y Mecanismo Multi-Estado y que tienen la capacidad de multiplicar los tres estados normales de un transformador de energía convencional. Estos mecanismos también se los denomina transformadores de estados.
- **Grado de funcionalidad:** Este índice permite comparar la calidad de accionamiento de un sistema accionador para determinar cual de las diferentes configuraciones establecidas es la óptima. Este índice es un valor numérico y solo tiene coherencia cuando se comparan dos sistemas accionadores que tengan el mismo grado de accionamiento.

Una vez definidos estos conceptos y herramientas, se desarrollará la metodología de diseño para manos robóticas basadas en los estados de su sistema accionador centrándose en una filosofía modular. Esta filosofía permite diseñar y desarrollar cada módulo, denominado subsistema, de forma independiente consiguiendo que los mismos se realicen de forma paralela con ciertas iteraciones sin que ésto afecte al diseño y desarrollo final del prototipo.

5.2. Características de diseño de las manos robóticas

Como se comentaba en capítulos anteriores, uno de los objetivos más deseados por los investigadores es crear un manipulador universal, capaz de reemplazar a la mano humana en todas las tareas que la misma realiza. Progresivamente, cada obstáculo que separa una mano robótica de una mano humana se va superando, sea esto gracias al avance tecnológico en calidad de materiales, recursos computacionales, nuevos planteamientos matemáticos referidos a determinados comportamientos reales, actuadores o sistemas sensores. Sin embargo cada vez que se consigue superar algún obstáculo, se plantean otros desafíos que da la sensación de que se está en una espiral en la que el centro se encuentra siempre a la misma distancia. Es solo cuando se mira hacia atrás cuando se descubre el gran trabajo que se ha realizado en el pasado y se esta realizando en el presente.

Lo que sí se puede afirmar es que cada desarrollo de mano robótica aporta dentro de su vía de investigación un avance importante que lo diferencia de las demás. A su vez, éste avance se ve reflejado en el siguiente diseño el cual probablemente mejora su rendimiento, siendo esta filosofía la evolución normal que sigue la investigación en todos sus sectores.

Sin embargo, como se pudo apreciar en el Capítulo 2, solo algunos desarrollos se han involucrado fuertemente en incorporar la mayor cantidad de avances en cada diseño

para poder imitar a la mano humana, diseños tales como las manos desarrolladas por el DLR, la mano del Robonaut de la NASA, las manos de la Universidad de Bologna o las desarrolladas por la GIFU. Algunas de ellas están por la cuarta generación y otras posiblemente con un prototipo comercial.

En cualquier caso siempre que se plantea iniciar un nuevo diseño de mano robótica teniendo en cuenta las limitaciones actuales es casi obligado definir el objetivo que se quiere alcanzar con dicho diseño y posteriormente surgen los interrogantes de qué características de diseño son más importantes y cuáles pasan a un nivel secundario con el fin de cumplir dicho objetivo.

En este apartado, se tratará de explicar las características que se deben tener en cuenta a la hora de diseñar manos robóticas. Esta selección de características, principalmente, esta basada en el estudio realizado por Alba, Armada y Ponticelli [15] en la que teniendo en cuenta un conjunto de manos robóticas desarrolladas, buscan preferencias de diseño y las toman como características, sean estas: cantidad de dedos considerados, grados de libertad y grados de libertad actuados, tipos de actuadores, tipo de transmisión de la fuerza, tipos de sensores y materiales estructurales. Por otro lado, se suman a estas características analizadas por el estudio mencionado, algunas que se consideran importantes y que no han estado planteadas, sean estas: existencia de la palma, mecanismos y métodos de fabricación.

5.2.1. Cantidad de dedos

Se puede decir que definir la cantidad de dedos de un diseño es la característica más relevante, ya que los dedos son los elementos más importantes de la mano porque a través de ellos se entra en contacto con el objeto. Por otro lado, el definir una cantidad apropiada va en directa relación el objetivo buscado sean estos: realizar tareas de manipulación, tareas de agarre, definir un determinado comportamiento, analizar algoritmos de planificación y control, etc.

Según el estudio realizado por Alba, Armada y Ponticelli [15], se llega a la conclusión de que la preferencia respecto a la cantidad de dedos que deba tener una mano robótica es la configuración antropomórfica o sea, de cuatro dedos más un pulgar. Ésto es posible gracias a las nuevas tecnologías (electrónica más eficiente, actuadores más pequeños, nuevos materiales y recursos computacionales más potentes), que permiten conseguir prestaciones cada vez más ambiciosas. Esta tendencia es sencilla de comprender, ya que el objetivo es imitar a la mano humana. En la actualidad, aproximadamente la mitad de las manos robóticas poseen esta configuración. El resto se divide prácticamente en partes iguales entre las que tienen tres dedos y las que tienen cuatro, siendo el pulgar parte o no de la configuración.

En los casos en los que las configuraciones se alejan de la antropomorficidad es debido a que el objetivo principal del diseño no es la imitación de la mano humana, sino realizar una tarea o grupos de tareas específicas y analizar su comportamiento. Esto puede ser realizado de forma más eficiente con una configuración diferente. Esta decisión siempre suele estar respaldada por estudios previos que la justifiquen.

Otros de los factores que influyen directamente sobre la decisión de definir la cantidad de dedos es el coste computacional que puede requerir el control, el peso, en número de actuadores involucrados o el sistema de sensores que se debe implementar, características que se tratarán más adelante.

5.2.2. Palma

La palma de la mano no es un elemento que siempre se lo tenga en cuenta, de hecho una gran cantidad de manos simplemente la colocan por cuestiones estéticas ya que su funcionalidad es nula.

La decisión de colocar una palma funcional en una mano robótica se basa directamente en el tipo de tareas que se desean realizar, sean estas de manipulación o de agarre.

Si tomamos dos extremos en lo que a tipo de tareas se refiere, en el que de un lado se coloca a las tareas de agarre de poder y en el otro extremo las tareas de precisión con yemas de dedos, podemos decir que la palma pasa a ser un elemento imprescindible en las primeras y es totalmente obviado en las segundas. En las tareas intermedias la palma puede ser o no un elemento a tener en cuenta.

La palma es uno de los elementos mas complejos de diseñar, es por este motivo que muchas veces se trata de evitarlo o simplemente simplificarlo hasta el punto de que se lo reduce a un elemento de simple apoyo. En la mano humana es un elemento que tiene propiedades y funcionalidades muy importantes ya que no solo es la estructura base de los dedos sino que también tiene la capacidad de deformarse en función del objeto a sujetar o manipular, dando total flexibilidad a los dedos para posicionarse. Actualmente no se ha conseguido diseñar una mano capaz de cumplir estas propiedades.

5.2.3. Grados de Libertad y Grados de Libertad Actuados

Definir los grados de libertad que tiene una mano humana es una tarea compleja, ya que cada articulación o posible articulación en algunos casos están definidas como parciales. Por lo tanto si lo que se busca es imitar los movimientos de la mano humana a la perfección, el objetivo planteado es muy complicado.

Sin embargo se puede tomar que cada articulación de la mano humana es rotativa sin que esto haga que el objetivo se aleje demasiado. Bajo estas condiciones, se puede decir que una mano humana tiene entre 16 y 22 grados de libertad (GDL) dependiendo de cuan complejo se quiera hacer la palma o la estructura soporte de los dedos.

Como el numero de GDL esta relacionado con las tareas que se deseen realizar con la mano robótica el interrogante está en considerar cuáles serán dichos objetivos y en la calidad de destreza que se quiera otorgar a la misma. Por ejemplo, físicamente podemos decir que un objeto se puede sujetar en un espacio de tres dimensiones con tres o cuatro puntos de contacto, esto se puede conseguir con relativa sencillez ya que la posición de dichos puntos de contacto no tiene porque ser específica, en cambio si se desea realizar una tarea de manipulación de un objeto en el que el posicionamiento de los puntos de contacto es muy delicado, cuanto mayor cantidad de GDL se tengan, con mayor precisión se podrá posicionar dichos puntos de contacto.

Se puede decir que un grado de libertad dentro de una mano es la propiedad que permite que dos elementos se muevan entre si en una determinada dirección. Dicho movimiento puede ser accionado de forma directa, indirecta o de forma relativa a otros elementos dependiendo de la posición que toman los mismos. Por ejemplo cuando un actuador esta asociado directamente a una articulación y solo a esta, se puede decir que es un GDL actuado de forma directa; cuando un único actuador puede accionar a dos o mas articulaciones se dice que estas articulaciones tienen GDL accionados de forma indirecta, ya que si bien el accionamiento del actuador hace que se muevan, su posición no esta definida directamente con la posición del actuador; y finalmente un GDL tiene

un accionamiento relativo a otros elementos cuando la posición del mismo depende directamente de la posición o condición de otros elementos de la mano o del objeto. Un ejemplo sencillo de GDL accionado de forma relativa son los que posee la mano humana en la palma, ya que no hay un músculo que accione directamente sobre los mismos, sino que dependiendo de los esfuerzos que realizan los dedos y éstos sobre un objeto, la palma se va adaptando.

El diseñar y sobretodo saber definir la configuración de estas características, es uno de los trabajos mas complicados a la hora de desarrollar una mano robótica. La realidad demuestra que los investigadores prefieren manos robóticas con la mayor cantidad de Grados de Libertad (GDL) y con la menor cantidad de actuadores. Esto simplifica el control y la estructura funcional de la misma.

5.2.4. Tipos de actuadores

En el Capítulo 3 se pudo apreciar una breve clasificación de tipos de actuadores que básicamente se agrupaban en actuadores eléctricos, neumáticos e hidráulicos.

Lo primero que se debe definir a la hora de seleccionar un actuador es su fuente de energía y de cómo se accederá a la misma, ésto se ve condicionado dependiendo de la plataforma robótica a la que irá montada la mano robótica.

Una vez definido la fuente de energía se escoge el actuador que mejor cumpla con las especificaciones de funcionalidad de la mano robótica, sean estas el par necesario, tipo de control, peso y tamaño

Muy pocos son los sistemas que utilizan actuadores neumáticos. Son los menos preferibles porque su controlabilidad no es muy precisa y su fuente de energía es muy voluminosa. La ventaja que tienen este tipo de actuadores es que pueden realizar una gran cantidad de fuerza en comparación a su tamaño. La misma suerte corren los actuadores hidráulicos.

Los actuadores eléctricos son los mas utilizados y como se ha podido ver en capítulos anteriores hay una gran variedad desde motores hasta músculos artificiales. Por una cuestión de peso, los músculos artificiales y los SMAs están adquiriendo una importancia considerable a la hora de preferirlos en los diseños. El avance tecnológico, de la mano de nuevos estudios y materiales, hace que aparezcan nuevos actuadores, con propiedades interesantes [26, 141], de forma cada vez más rápida. Los músculos artificiales tienen la gran ventaja de que su tamaño es considerablemente mas pequeño y su tipo de funcionamiento es el mas adecuado para estas aplicaciones aunque poseen la desventaja de que su control todavía no esta solucionado.

5.2.5. Tipo de transmisión de la fuerza

El sistema de trasmisión de fuerza es el encargado de acondicionar el esfuerzo del actuador y trasladar dicho esfuerzo desde el lugar donde se encuentra situado el mismo hasta la articulación a la que se le debe efectuar el accionamiento.

Los parámetros que definen el tipo de transmisión a utilizar suelen ser el material, su flexibilidad, el peso, el volumen, su rendimiento y su precisión ya que los mismos pueden acarrear errores en la medición, generar rozamientos y pérdidas de fuerza y, por ende, errores en el control de la mano robótica ya que el modelado de los mismos no es siempre tan sencillo. Hasta el momento, se utilizan cuatro medios para transmitir la fuerza: tendones, engranajes, una combinación de tendones y engranajes y acción directa.

Los tendones se utilizan en aproximadamente un 55 % del total de las manos robóticas. Su ventaja es que el actuador se puede colocar en el sitio más conveniente y transmitir la fuerza a través de los mismos, su inconveniente es que dependiendo del material con el que esta fabricado se pueden estirar en función de la fuerza que esta transmitiendo. Otro problema que tiene asociado el sistema de transmisión por tendón es cuando los actuadores están ubicados de tal forma que algunos tendones, de forma obligada, deben pasar por articulaciones intermedias. Esta característica hace que el movimiento de las articulaciones intermedias afecten a la posición de las articulaciones mas alejadas y que no solo necesite un modelado muy preciso sino que también un continuo control de dichas articulaciones mas alejadas para poder compensar la variación.

Los engranajes, por su parte, están en aproximadamente un 22 % de las manos robóticas. Esta opción da mucha precisión al sistema y da más confianza al control. Uno de los inconvenientes es que genera fricción con la consecuente caída del rendimiento. Otro de los inconvenientes con el uso de engranajes es que hace al sistema de transmisión muy voluminoso y posiblemente muy pesado, sobretodo en las propias articulaciones ya que deben compensar cambios de dirección. Por otro lado, en los engranajes también se repite el mismo problema que en la transmisión por tendones relacionados a las articulaciones alejadas cuando la posición de los actuadores hace que haya articulaciones intermedias.

La combinación de engranajes y tendones es una opción que puede mejorar alguna de las transmisiones si se usa individualmente. Da mucha versatilidad y posibilidades de jugar con el diseño para conseguir mejores resultados. Este tipo de transmisión compartida se ve en aproximadamente un 17 % de las manos robóticas.

La mejor alternativa es, sin duda, la acción directa, ya que elimina todo elemento intermedio entre el actuador y la articulación. La gran desventaja de esta opción es que, si tenemos actuadores muy voluminosos o muy pesados, cada articulación se ve incrementada proporcionalmente a este tamaño y peso. Este tipo de transmisión es el menos usado, sólo en el 6 % de las manos robóticas. Por lo general, son sistemas muy grandes y se utilizan a modo de investigación relacionada con el comportamiento teórico de las manos humanas y su proyección a las manos robóticas, consiguiendo que la precisión sea la máxima y que sus resultados sean más fiables. Con el desarrollo de la tecnología relacionada con los actuadores y con la incorporación de nuevos materiales, poco a poco se verán más manos robóticas que apliquen una acción directa en sus articulaciones.

5.2.6. Mecanismos

Una vez seleccionado el sistema accionador constituido por el actuador con su transmisión es posible recurrir a determinados mecanismos que pueden permitir sacar aún mas provecho del sistema.

Esta característica de diseño no se tiene en cuenta ya que actualmente no es posible recurrir a una caracterización o lista de posibles mecanismos que puedan ser analizados y solo se recurre a la innovación de los diseñadores. En cambio, si en el proceso de definir la configuración de la nueva mano robótica se analizan los diseños de manos robóticas desarrollados en el pasado, se pueden extraer diversos mecanismos independientes que han reducido en su momento la complejidad de la mano robótica en general utilizando la filosofía de hacer mas complejo el diseño mecánico a expensas de simplificar el sistema de control.

Esta demostrado que la incorporación de nuevos mecanismos o la optimización de antiguos es una característica que puede ahorrar recursos computacionales a nivel de

control. En el pasado la incorporación de estos mecanismos exigía materiales especiales y procesos de fabricación que quizás no existían. Actualmente esta limitación cada vez es menor ya que los procesos son cada vez mas accesibles y la lista de materiales posibles cada vez mas larga.

El analizar esta característica en el proceso de definición debería ser un punto a considerar ya que si bien parece que una mano robótica esta compuesta por una estructura mecánica fija unida a determinados eslabones a través de articulaciones, es un concepto que se debería descartar ya que en los últimos años la tendencia es incorporar cada vez mas mecanismos que permitan una mayor versatilidad de la mano robótica.

5.2.7. Tipos de sensores

El sistema sensorial de la mano humana es uno de los mas complejos de todo el cuerpo, posee la mayor concentración de terminales nerviosos. Esto es aceptable teniendo en cuenta de que es el elemento principal cuando nos referimos al sentido del tacto. La configuración sensorial de la mano humana es extremadamente compleja y eficaz ya que puede determinar qué tipo y forma de superficie está tocando y tener una idea de su temperatura, como también detectar variaciones que nos dan la idea de deslizamiento de dicha superficie con la mano. La retroalimentación en una mano robótica es muy importante y debería dar prácticamente la misma información o, por lo menos, gran parte de ella.

En la actualidad, el avance tecnológico en esta materia es rápido. No obstante, aún se está muy lejos de poder imitar al sistema sensorial de una mano humana, no se ha podido diseñar una *piel sensorial* que pueda manejar la misma cantidad y tipo de variables y que sea flexible de forma de que pueda cubrir todas la superficie expuesta de una mano robótica.

Aún así, el sistema sensorial del que hoy la tecnología puede aportar puede ser lo suficientemente complejo como para poder asumir un mínimo de funcionalidad, que si bien no están incorporados en una sola *piel sensorial*, pueden dar la suficiente información. Entre los sensores que se utilizan en las manos robóticas actualmente, se encuentran: sensores táctiles, sensores de presión, potenciómetros, encoders o sensores ópticos. Un sistema que se esta utilizando cada vez mas para ayudar al sistema sensorial de las manos robóticas es una retroalimentación visual estereoscópica, dando muy buenos resultados.

La preferencia de alguna de estas tecnologías viene dada básicamente por el objetivo al que se va a destinar la mano robótica y por la capacidad que tiene la misma de albergar a dicho sistema sensorial.

5.2.8. Materiales estructurales

En un primer momento, los materiales más usados en la construcción de manos robóticas fueron los aceros, aluminios y plásticos que formaban parte de estructuras relativamente simples de mecanizar y modificar. Esto ofrecía a las manos robóticas un aspecto poco agradable, muy pesado y poco antropomórfico. En cualquier caso, en la mayoría de los casos el objetivo que se buscaba era entender un poco mas el comportamiento de la mano humana.

El siguiente paso fue incorporar aleaciones de aluminio más resistentes que consiguieron desplazar por completo al acero en elementos estructurales porque conseguían tener una resistencia casi similar con una importante reducción del peso. Esto, por otro lado,

reducía las especificaciones de los actuadores y todo a su vez el peso y volumen general del diseño haciendo manos robóticas más amigables, dinámicas y estructuradas.

Actualmente, como se comentaba anteriormente, la lista de materiales disponibles para este tipo de aplicaciones es muy extensa y no para de crecer, lo que conduce a tomar esta característica como un punto muy importante a definir previamente.

5.2.9. Métodos de fabricación

A nivel estructural, el método de fabricación de una pieza puede ser fundamental, ya que dependiendo del mismo, la pieza en cuestión puede comportarse de formas diferentes frente a sollicitaciones externas.

Actualmente hay una gran variedad de métodos de fabricación que pueden facilitar el desarrollo de manos robóticas, con la posibilidad de generar piezas con formas complejas que hasta hace unos pocos años parecía imposible construirlas sin que se tenga que destinar una gran cantidad de dinero en desarrollo. Estos nuevos métodos permiten fabricar piezas de diferentes materiales y formas lo que obliga a que se los tenga en cuenta como una característica de diseño a la hora de definir cuanto menos la estructura.

Hace una década atrás, la definición de la estructura de un sistema robótico estaba condicionada en gran parte a la viabilidad de la fabricación de las piezas que lo componían. Esto en muchos casos hacía que la definición de dicho sistema se vea modificada perjudicando al objetivo final. Los avances tecnológicos en materia de mecanizado o métodos de fabricación han logrado hoy día estar por delante de estas imposibilidades permitiendo a la comunidad científica generar estructuras robóticas sin limitaciones estructurales mas que la propia resistencia del material y a costos realmente reducidos.

Los métodos de fabricación tradicionales como el mecanizado de materiales metálicos y plásticos han avanzado de forma considerable, agregando mas ejes a los centros de mecanizado permitiendo realizar formas verdaderamente complejas con una precisión importante sin que el coste se incremente de forma prohibitiva.

Un método que cada vez esta tomando mas importancia en diferentes ámbitos de la ingeniería de prototipos es el denominado prototipado rápido o impresión 3D. Este método permite generar piezas plásticas y metálicas con una gran variedad de materiales de formas verdaderamente complejas simplemente partiendo de un modelo 3D de ordenador. Ésta técnica ha revolucionado el sector de la ingeniería dedicada al desarrollo de prototipos ya que da una versatilidad importante a la hora de diseñar, fabricar, verificar, modificar y volver a fabricar prototipos en un tiempo realmente reducido.

5.3. Manos robóticas

El área de la robótica referida a manos robóticas se puede dividir en tres grupos bien definidos: pinzas robóticas, manos robóticas subactuadas y manos robóticas sobreactuadas. Este apartado se centrará en describir principalmente el concepto de manos robóticas subactuadas ya que a nivel de investigación es el que en cierta forma ha motivado esta nueva metodología de diseño al autor: conseguir una mano robótica con una mínima cantidad de actuadores y una máxima funcionalidad, tal que pueda compararse con una mano robótica con múltiples actuadores.

Si se toma a una mano robótica como un mecanismo que necesita un sistema accionador para realizar determinados movimientos entre los elementos que lo componen,

matemáticamente hablando, estas tres áreas de las manos robóticas se pueden definir de la siguiente manera:

■ **Mecanismos actuados**

$$n_{GDL} = n_{act} \quad (5.1)$$

■ **Mecanismos sobreactuados**

$$n_{GDL} < n_{act} \quad (5.2)$$

■ **Mecanismos subactuados**

$$n_{GDL} > n_{act} \quad (5.3)$$

En la Figura 5.1 se puede observar como sería la configuración en cada una de estas condiciones, tomando como ejemplo a un mecanismo con dos elementos que necesita de un sistema accionador para realizar su movimiento.

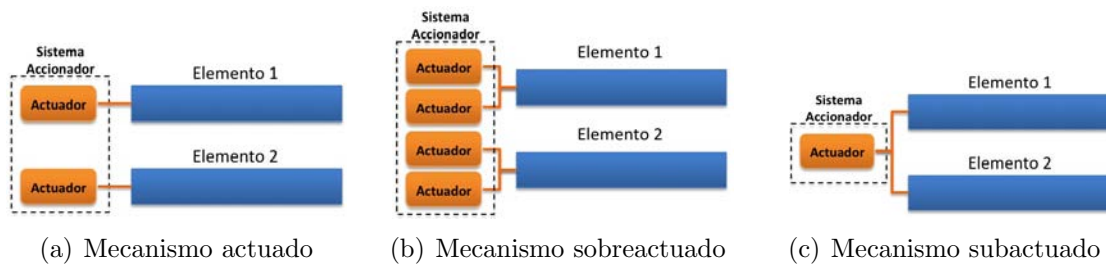


Figura 5.1: Configuraciones de un sistema accionador dentro de un mecanismo

El concepto de *subactuación* (en inglés *underactuation*) es conocido hace muchos años y se considera que si bien tiene la ventaja de accionar un sistema robótico con una mínima cantidad de actuadores frente a los GDLs, tiene una gran limitación a nivel funcionalidad ya que el control independiente de cada GDL es bastante limitado y por lo general las variables que los gobiernan dependen en cierta forma de la interacción del sistema con el entorno, que si no es conocido o simplemente es variable, lo dotan de una gran incertidumbre.

Los avances que se han realizado en materia de la *subactuación* en la mayoría de los casos están relacionados al diseño de nuevos mecanismos innovadores que permiten optimizar el sistema y dar la sensación de mayor gobierno de las acciones. Estos mecanismos se los puede ver en la industria en casi todos los sistemas mecánicos complejos que están dotados de algún tipo de actuador para generar un movimiento. Esto es simplemente porque este tipo de metodología de diseño ayuda a reducir costes y complejidad de control, por lo tanto, tiempo de desarrollo.

La metodología de diseño utilizando sistemas subactuados ha tenido sus orígenes en los primeros autómatas debido a que la tecnología de actuadores era muy limitada y para poder sacar mayor provecho a los sistemas mecánicos se diseñaban mecanismo innovadores, y esto en su momento era la *ultima tecnología*.

Estos mecanismos remontan desde mediados del Siglo XIX como el brazo artificial de E. Spellerberg que data de 1864 (Figura 5.2), la mano artificial de F. C. Henning

de principios del Siglo XX en 1918 (Figura 5.3), o la patentada en 1919 por A. Pringle (Figura 5.4), la cual usaba dedos elásticos contruidos de muelles para autoadaptarse a los objetos. Aunque Da Vinci en el Siglo XV ya realizaba estudios que se podrían referir a mecanismos diseñados con esta filosofía [39].

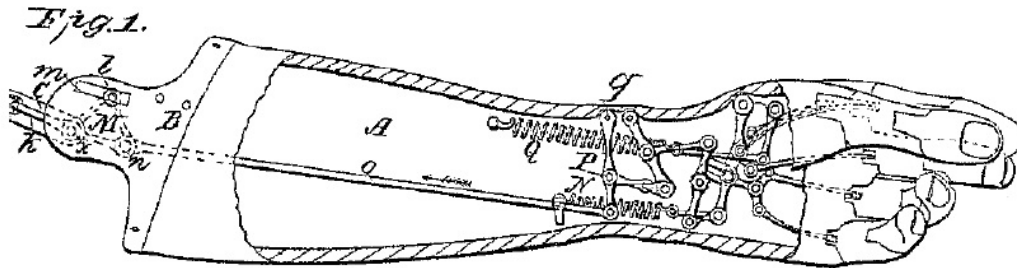


Figura 5.2: Brazo artificial de E. Spellerberg - 1864

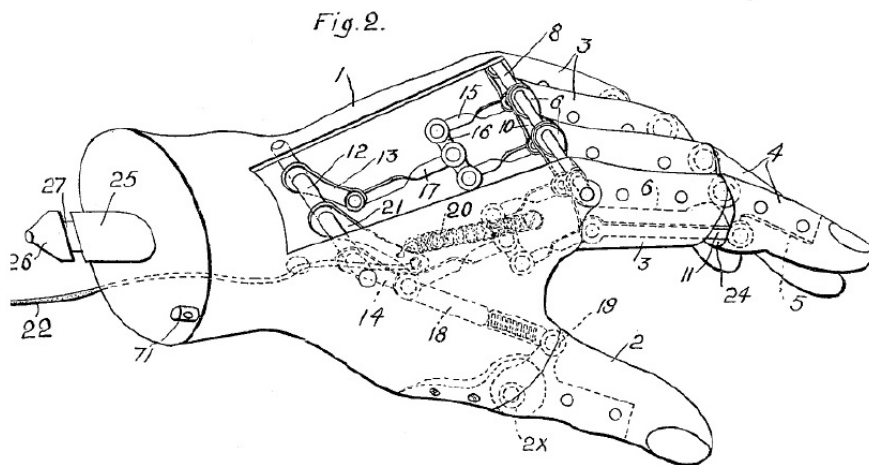


Figura 5.3: Mano artificial de F. C. Henning - 1918

Con el paso del tiempo y los avances tecnológicos en materia de actuadores, sumado a que dotar a un sistema de mayor controlabilidad le daba más funcionalidad a una mano robótica, los mecanismos pasaron a un segundo plano, se prefería poner un actuador más a tener que ingeniarse un mecanismo que lo reemplace. Esto generó una corriente de numerosos estudios y desarrollos relacionados a incrementar considerablemente la cantidad de GDL independientes dentro de la mano robótica.

Sin embargo, la industria encontró una verdadera oportunidad ya que el desarrollo de pinzas robotizadas para aplicaciones específicas dentro de un determinado entorno, requerían una mínima destreza pero una gran fiabilidad en su agarre, sumado al requisito imprescindible de su bajo costo. Las manos robóticas subactuadas encontraron un nicho de desarrollo y han evolucionado considerablemente hasta la actualidad, pudiéndose encontrar hoy día catálogos de pinzas robóticas para casi todo tipo de aplicaciones, mientras estas sean solo de fijar un objeto.

Esto encasilló a las manos robóticas subactuadas en la filosofía de manos robóticas de poca funcionalidad pero gran fiabilidad en tareas de agarre y los desarrollos a nivel in-

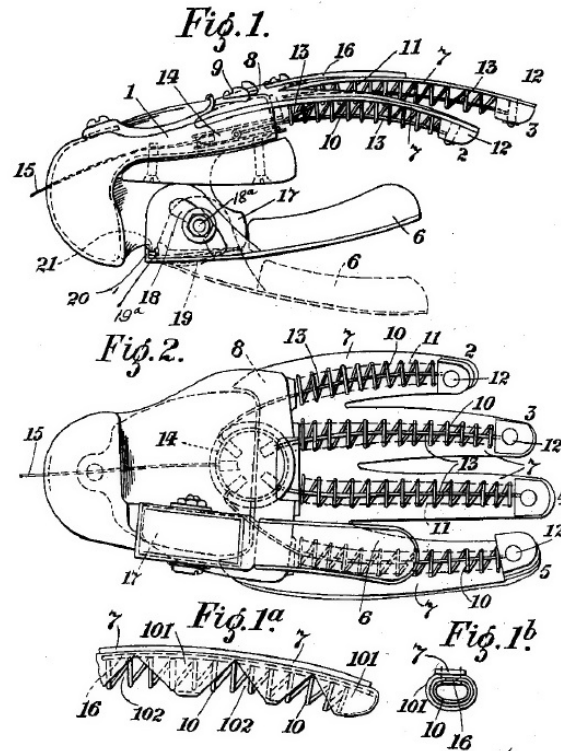


Figura 5.4: Mano artificial de A. Pringle - 1919

vestigación generalmente se centraban en manos robóticas subactuadas complementarias para sistemas robóticos más complejos. Mientras por el contrario, las manos robóticas con mayor destreza se desarrollaban para tareas de manipulación e investigación en comportamiento de la mano humana y poca importancia daban a las tareas de agarre.

Otra aplicación importante aunque menos considerable de las manos robóticas subactuadas es en el sector espacial, ya que las especificaciones en materia de robustez, peso y fiabilidad en la mayoría de los casos son mucho más fuertes que cualquier otra característica [172].

En los últimos años se ha empezado a generar una nueva corriente de investigación dedicada a esta filosofía de mecanismos subactuados y Bruno Siciliano comenta en el prólogo del libro *Underactuated robotic hands* [39] que: "... la subactuación, como metodología de diseño de sistemas con una baja cantidad de actuadores frente a los grados de libertad ofrecidos, es reconocida como el camino prometedor para unir el espacio tan grande que existe entre las tradicionales pinzas robóticas industriales y las manos robóticas avanzadas totalmente accionadas...". Esto da la sensación que la comunidad científica necesita de un cambio en este aspecto.

En algunos casos, estos cambios están relacionados a estudios que, beneficiándose de la gran capacidad de recursos computacionales que hay hoy día, se centran en cómo mejorar las tareas de agarre de las manos robóticas subactuadas analizando el tipo de contacto de los dedos y la magnitud de la fuerza en los mismos y de esta forma optimizar los esfuerzos realizados por el actuador sin enfocar dichos estudios a como hacer que un sistema subactuado sea más funcional o pueda realizar tareas de manipulación.

El objetivo de la presente tesis es dar un primer paso en este aspecto dotando a la comunidad científica una nueva metodología de diseño de manos robóticas con una mínima

cantidad de actuadores para que las mismas puedan efectuar tareas de manipulación con cierta destreza, manteniendo la ventaja de realizar las tareas de agarre con las mismas propiedades que las manos robóticas subactuadas desarrolladas hasta el momento, la sencillez de control, la reducción de peso y de volumen.

5.3.1. Estudio funcional de las manos robóticas

Como se ha venido diciendo en los apartados anteriores, el objetivo principal del área de la robótica destinada a la manipulación es el de imitar total o parcialmente todas o algunas tareas que realiza la mano humana, con el afán de poder en algún momento ser reemplazada en determinados entornos.

Esta área de la robótica, se la puede dividir en tres grupos bien identificados: pinzas robóticas, manos robóticas subactuadas y manos robóticas. En la Figura 5.5, se puede ver representado de forma gráfica como están posicionadas entre si.

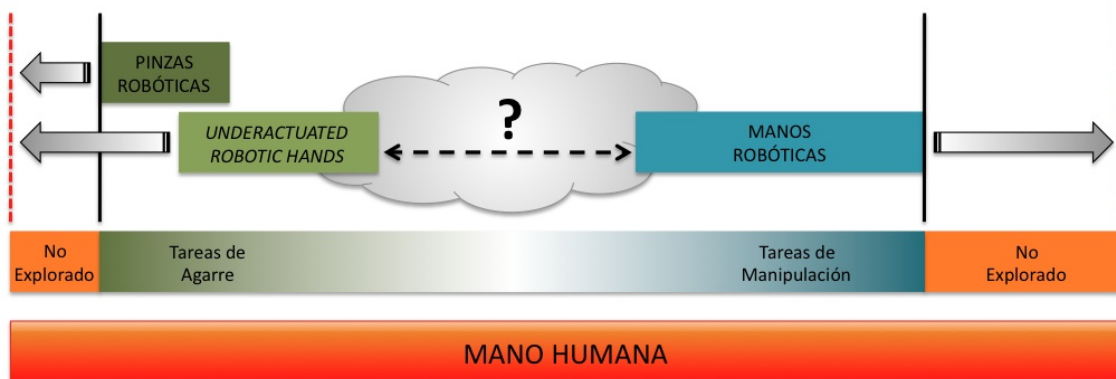


Figura 5.5: Relación existente entre los diferentes grupos dentro de la manipulación robótica

En la Figura 5.5 se puede apreciar que si bien las pinzas robóticas están parcialmente relacionadas con las manos robóticas subactuadas, estas dos están considerablemente lejos de las manos robóticas. Ésta distancia que existe y la imposibilidad hasta el momento de poder unir las y hasta solaparlas es uno de los objetivos de este trabajo, completando así los espacios vacíos.

Si se toma a la mano humana como una mano robótica y analizamos sus especificaciones técnicas, se debería decir que posee alrededor de 20 GDLs, con la doble cantidad de actuadores (músculos) y más de 15.000 sensores táctiles en un volumen relativamente pequeño y con un peso de cerca de medio kilo. Todos estos elementos están conectados a un sistema de control formado por un 35-40% del cerebro humano que si bien todavía no se sabe como realmente funciona, sí se puede decir que ocupa cerca de 400cm³ y puede pesar unos 400gr. Con estas especificaciones y teniendo en cuenta la tecnología actual se aprecia casi de forma abrumante cuan lejos está hoy día la comunidad científica de poder imitarla.

Por lo tanto, teniendo en cuenta estas características, se puede decir que la filosofía de diseño de la misma puede ser representada como el diagrama de bloques de la Figura 5.6.

En este diagrama (Figura 5.6), se define como *elementos* a las estructuras que pueden ser accionados dentro del sistema robótico: dedos, pulgar o palma. Cada uno de estos

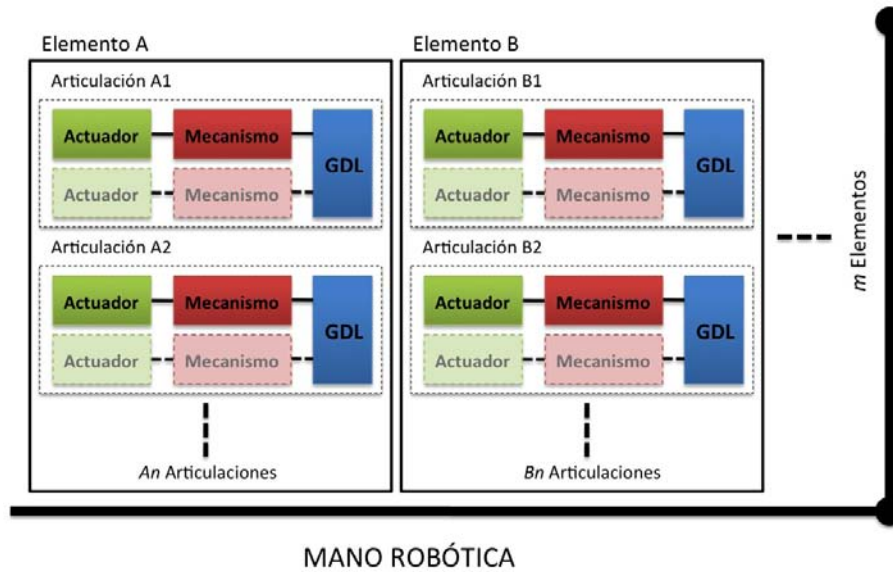


Figura 5.6: Representación de la filosofía de diseño de una mano robótica

elementos puede contener una n cantidad de GDL accionados con uno o mas actuadores a través de un mecanismo determinado.

Cuando se plantea diseñar una mano robótica, se puede atacar cada bloque de forma independiente teniendo en cuenta las características de diseño comentadas en la Sección 5.2 y definir cada una de estas características solo dependiendo del objetivo a alcanzar con dicho desarrollo.

Para el caso de las manos robóticas, el numero de actuadores debe ser igual o superior que los GDL establecidos en el diseño, por lo tanto son sistemas robóticos totalmente actuados o con actuación redundante. Matemáticamente expresado de la siguiente manera según las ecuaciones 5.1 y 5.2.

$$n_{GDL} = n_{act}$$

$$n_{GDL} < n_{act}$$

Estos sistemas robóticos son los mas complejos ya que al tener todos sus GDLs actuados independientemente, es posible tener un mayor control sobre los mismos, esto a su vez ayuda a la idea de dotarlos de sistemas sensoriales específicos con la única limitación de la tecnología actual y de la capacidad de procesamiento dotada a sus sistema de control.

Si bien, las manos robóticas son sistemas verdaderamente complejos, en la mayoría de los caso son desarrollados para realizar tareas complejas de manipulación o tareas de agarre variable y pocas veces están pensados para tareas de agarre simple o de potencia. Estas últimas no es que se las considere tareas menos complejas, sino que simplemente al tener menor cantidad de variables su sistema de control es mas simple.

En el otro extremo del diagrama de la Figura 5.5, se encuentran las pinzas robóticas y las manos robóticas subactuadas. En este caso, estos dos grupos se encuentran parcialmente solapados ya que tienen en común en la mayoría de los casos el objetivo para las que son diseñadas: tareas de agarre firme. Por otro lado, los avances obtenidos en el ámbito científico son fácilmente extrapolables a la industria lo que hace que sus metodologías de diseño estén muy relacionadas.

Adaptando el diagrama de filosofía de diseño de manos robóticas de la Figura 5.6 a la de las manos robóticas subactuadas, ésta nos queda representada en la Figura 5.7.

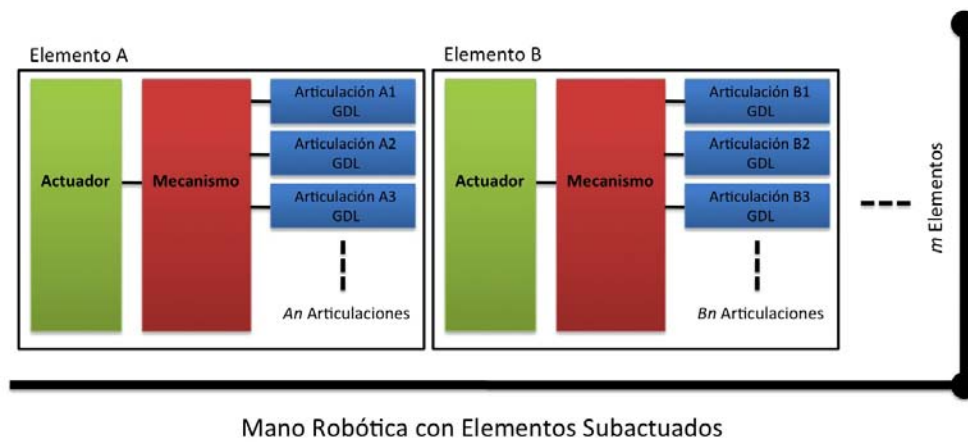


Figura 5.7: Representación de la filosofía de diseño de una mano robótica subactuada

Como se puede observar en la Figura 5.7, cada actuador puede accionar varios GDL a través de un mecanismo que los mantiene independientes, pero esto no implica que solo haya un actuador dentro del sistema robótico. Para diferenciar este aspecto dentro de las manos robóticas subactuadas, se dice que los elementos tienen su propio actuador dentro de la mano, llamándolos: dedo subactuado, pulgar subactuado o simplemente sistema subactuado, dejando el nombre de manos robóticas subactuadas para aquellas manos que solo poseen un actuador para mover todos los GDL que poseen Figura 5.8.

Para el caso de las manos robóticas subactuadas con un solo actuador, se transmite el accionamiento de dicho actuador a través de un mecanismo que mantiene los GDLs independientes.

Como en este grupo de sistemas robóticos tenemos menor cantidad de actuadores con respecto a la cantidad de GDL establecidos en el diseño, matemáticamente se las expresa según la Ecuación 5.3.

$$n_{GDL} > n_{act}$$

Casi de forma obvia, se puede interpretar de que este tipo de sistemas robóticos tienen una limitación física y sobre todo una indeterminación matemática para poder controlarlos, generando así una serie de incertidumbres que repercuten en la funcionalidad a la que pueden estar destinados. Básicamente, el objetivo son tareas de agarre firme o de potencia.

Todos los esfuerzos de la comunidad científica hoy día focalizados en este grupo son destinados a dotar a las manos robóticas subactuadas de un cierto sistema sensorial un poco mas complejo y que el mismo sea capaz de decidir de qué forma se debe agarrar un objeto, como se debe posicionar el objeto o, de forma mas rigurosa, cómo interpretar cuando el agarre se ha producido, fenómenos de deslizamiento, rodadura, de puntos de contacto con fuerzas negativas o simplemente optimizar el esfuerzo realizado por el actuador para que el mismo no sea excesivo.

Para el caso de las manos robóticas subactuadas, si bien las características de diseño siguen siendo las mismas que para las manos robóticas, se tiene un cambio radical

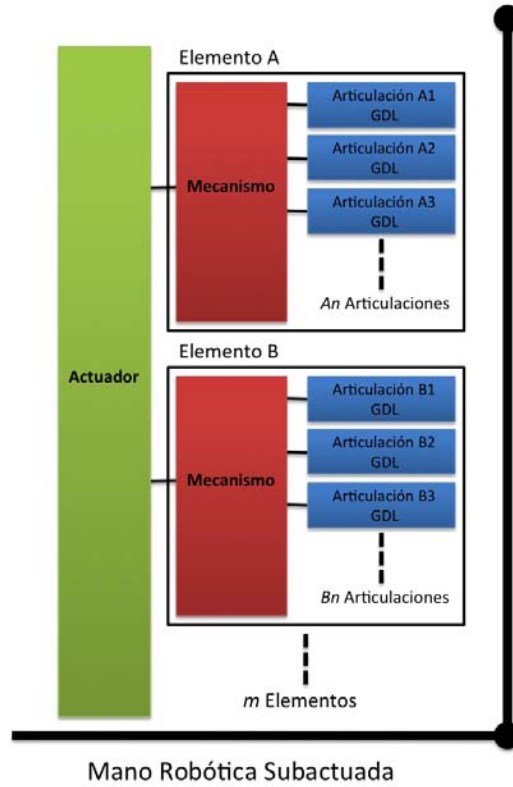


Figura 5.8: Representación de la filosofía de diseño de una mano robótica subactuada con un solo actuador

relacionado con el objetivo a alcanzar. En este caso las características de diseño que predominan son: Cantidad de elementos (dedos, pulgar y palma) que tendrá el sistema, los GDLs de cada elemento, la cantidad de actuadores y los mecanismos. Una vez definidas estas características, las demás se adaptan.

Finalmente, las pinzas robóticas tienen la característica de ser unas manos robóticas no-antropomórfica con un solo actuador y un único GDL, con lo que el diagrama de filosofía de diseño es el que se puede apreciar en la Figura 5.9.

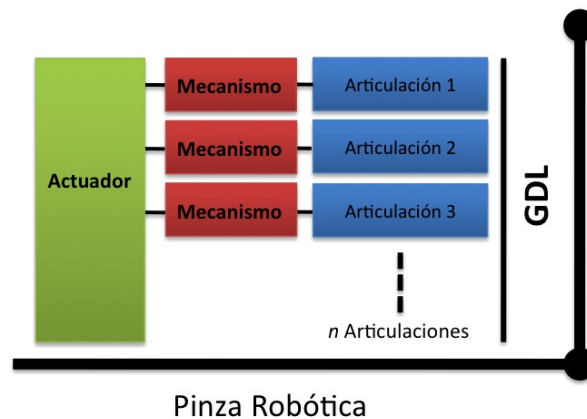


Figura 5.9: Representación de la metodología de diseño de pinzas robóticas

Las pinzas robóticas tienen la misma cantidad de actuadores que GDL, o sea uno. Esto hace que matemáticamente respondan a la Ecuación 5.1 de las manos robóticas.

$$n_{GDL} = n_{act}$$

Teniendo un único actuador es comprensible saber que la condición de mano robótica sobre-actuada en el caso de un sistema robótico con un solo actuador no es aplicable de ninguna forma. Por otro lado, la definición matemática de una pinza robótica se corresponde a una de las condiciones matemáticas de las manos robóticas (Ecuación 5.1), no es aplicable decir que parte de las mismas se puede solapar con éstas, ya que cada una corresponde a una determinada condición de dicha ecuación y que se expresa a continuación:

- Para el caso de manos robóticas:

$$n_{GDL} = n_{act} \iff n_{GDL} \geq 2$$

- Para el caso de pinzas robóticas:

$$n_{GDL} = n_{act} \iff n_{GDL} = 1$$

Por lo tanto, es comprensible interpretar que las pinzas robóticas se encuentran mas asociadas a las manos robóticas subactuadas que a las manos robóticas.

Como se puede apreciar, la metodología de diseño de un sistema robótico relacionado al agarre y manipulación de objetos esta alrededor de su sistema accionador ya que es el encargado de dar movimiento a los elementos que ejecutan las tareas, en cambio el sistema sensorial es el encargado de reconocer el entorno. Si un sistema accionador es limitado, quita sentido improvisar en sistemas sensoriales complejos, con lo que es necesario definir el concepto de la metodología de diseño en base a sus sistemas accionadores.

5.4. Sistema accionador

Para poder analizar desde un punto de vista mas profundo a los sistemas accionadores es necesario definir ciertos conceptos y características de los mismos.

Uno de estos conceptos es el *grado de accionamiento* de un sistema accionador, este índice permite definir cuando dos sistemas accionadores son equivalentes en base a la cantidad de estados que pueden ofrecer.

Luego, se analizarán los diferentes tipos de estados que se pueden encontrar dentro de un sistema accionador, esta característica es la que permitirá definir la calidad de los mismos.

Posteriormente se hará un estudio funcional de los sistemas accionadores en el que se analizarán, en base a ciertas consideraciones, un sistema accionador compuesto por un único actuador convencional para luego introducir el concepto de Actuador Multi-Estado y los mecanismos que lo componen: Mecanismo de Tres Estados y Mecanismo Multi-Estado.

Finalmente, con todas estas herramientas, se introducirá el concepto de *grado de funcionalidad* de un sistema accionador y los factores que pueden reducirlo. Esta reducción, como se verá, esta en función de la configuración del sistema accionador. Para poder calcular dicho *grado de funcionalidad* se definirá la **función del grado de funcionalidad** con algunos ejemplos.

5.4.1. Grado de accionamiento de un sistema accionador

Un sistema accionador está relacionado directamente con los estados que el mismo puede ofrecer a un sistema robótico. Si se tiene en cuenta que un actuador es capaz de ofrecer a un sistema robótico como máximo de tres estados (dos sentidos de movimiento más un estado estático o de parada), la máxima capacidad que tiene un sistema accionador de ofrecer diferentes tipos de estados o combinación de los mismos es 3^n , donde n es el número de actuadores que posee el sistema robótico. Si se denomina *grado de accionamiento* de un sistema accionador a ϑ , se lo puede definir matemáticamente como:

$$\vartheta = x^n, \quad (5.4)$$

donde x es el número de estados que puede ofrecer el actuador y n es el número de actuadores que posee el sistema accionador.

Para el caso en que un sistema accionador posea diferentes tipos de actuadores de los cuales ofrecen una diferente cantidad de estados, la ecuación general quedaría como:

$$\vartheta = x_1^{n_1} \cdot x_2^{n_2} \cdot \dots \cdot x_m^{n_m},$$

donde m es la cantidad de diferentes tipos de actuadores que posee el sistema robótico. Por lo tanto el *grado de accionamiento* se puede representar de forma general como:

$$\vartheta = \prod_{j=1}^m x_j^{n_j} \quad (5.5)$$

Un *grado de accionamiento* elevado de un sistema robótico no asegura una alta destreza o una alta funcionalidad ya que en este caso estas características también están asociadas a la configuración estructural, el sistema sensorial y al sistema de control, pero sí puede dar una idea de la capacidad que puede aportar el sistema accionador para poder acompañar al sistema robótico a realizar tareas complejas. Sin embargo, un *grado de accionamiento* bajo de un sistema robótico implica una gran limitación para poder realizar tareas complejas.

Este concepto resume en cierta forma las limitaciones que tienen las pinzas robóticas y las manos robóticas subactuadas para poder realizar tareas complejas ya que si tenemos en cuenta la Ecuación 5.5, podemos afirmar que:

*”para aumentar el grado de destreza o funcionalidad de una mano robótica es imprescindible aumentar el grado de accionamiento del sistema y esto solo se puede realizar de dos maneras: aumentando el número de actuadores (n) o **aumentando el número de estados que pueda ofrecer cada actuador (x)”***

Esto se lo puede apreciar en el siguiente ejemplo: tres actuadores que ofrecen tres estados tienen el mismo grado de accionamiento que un actuador capaz de ofrecer 27 estados, ya que:

si $x = 3$ y $n = 3$ tenemos:

$$\vartheta_1 = 3^3 = 27$$

y si $x = 27$ y $n = 1$

$$\vartheta_2 = 27^1 = 27$$

Por lo tanto $\vartheta_1 = \vartheta_2$, entonces los dos sistemas accionadores son equivalentes y tienen la misma capacidad de realizar las mismas tareas aunque uno de ellos posea un solo actuador.

Con este nuevo concepto definido en este trabajo es posible unir la sencillez que poseen los sistemas robóticos con una mínima cantidad de actuadores (manos robóticas subactuadas) con la complejidad de las manos robóticas, ya que se puede conseguir la simpleza de control de un solo actuador con varios estados para realizar tareas con casi la misma destreza que lo puede conseguir un conjunto de actuadores independientes.

Como un actuador está compuesto por un transformador de energía y los estados que puede ofrecer el mismo son tres, el incorporar un mecanismo que permita multiplicar dichos estados y transformarlos en estados diferentes e independientes, hace que sea posible conseguir que un único actuador pueda ofrecer una cantidad finita superior de estados a un sistema robótico o mecanismo.

Esta nueva filosofía de diseño enfocada a los estados de un sistema accionador más que a la cantidad de actuadores que pueda poseer, se la denomina **”Manos Robóticas Multi-Estados”** y se la puede ver representada en el diagrama de la Figura 5.10.

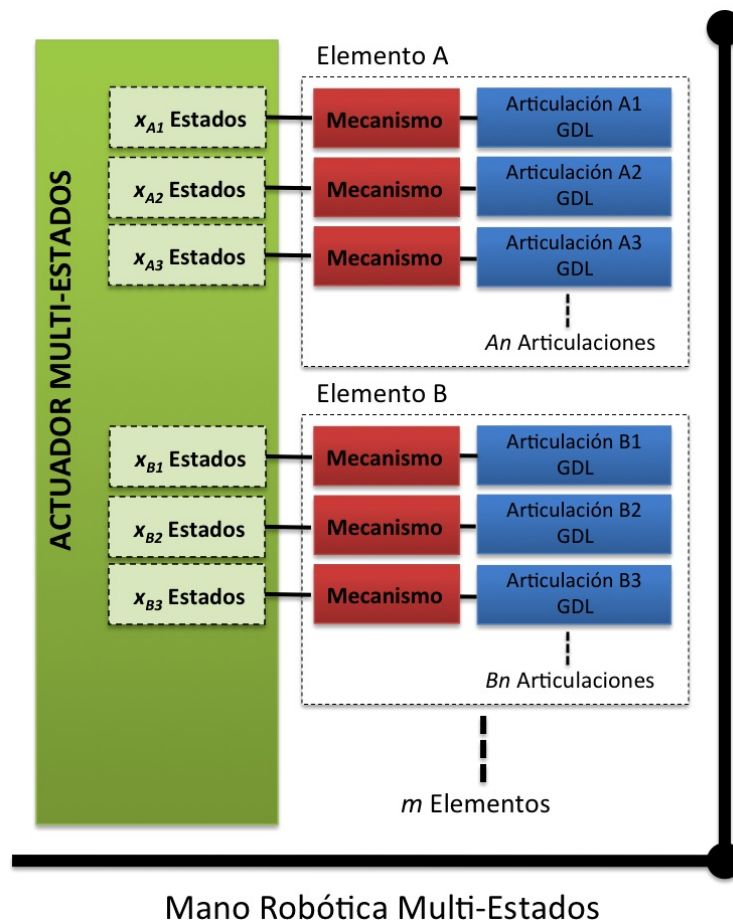


Figura 5.10: Representación de la metodología de diseño de las *Manos Robóticas Multi-Estados*

Teniendo en cuenta esta nueva metodología de diseño se podría agregar un nuevo grupo de sistemas robóticos focalizados al agarre y manipulación de objetos, con lo que la representación de la Figura 5.5, quedaría actualizado a la Figura 5.11.

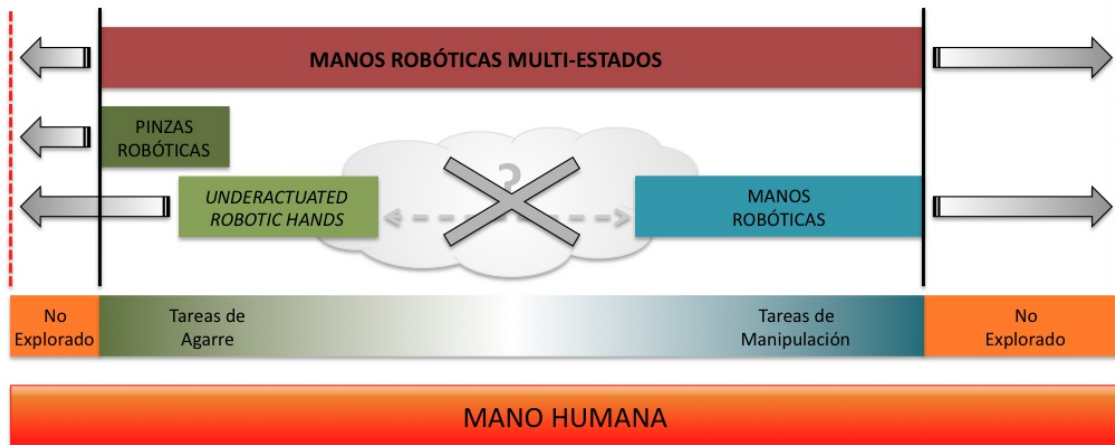


Figura 5.11: Relación existente entre los diferentes grupos dentro de la manipulación robótica teniendo en cuenta el grupo de *Manos Robóticas Multi-Estados*

5.4.2. Tipos de estados de un sistema accionador

Un sistema accionador puede estar compuesto por un único actuador o, una cantidad finita del mismo. A su vez estos actuadores puede ofrecer al sistema robótico una cierta cantidad de estados.

Se pueden definir tres tipos de estados dentro de un sistema accionador, organizados en dos clases desde el punto de vista de la dinámica. Todos ellos dependen de su implicación o consecuencia dentro del sistema robótico.

- **Estado de movimiento:** son aquellos que producen una acción sobre el elemento al que esta asociado y existen dos tipos de estados de movimiento.
 - *Relativo:* estos estados pueden tomar dos sentidos de movimiento y su valor absoluto puede variar con respecto al tiempo y en todo momento para una determinada acción.
 - *Discretos:* estos estados pueden tomar dos sentidos de movimiento pero su valor permanece constante en el tiempo y en todo momento para una determinada acción.
- **Estados estáticos:** son aquellos estados que no efectúan ningún tipo de acción sobre el sistema robótico, haciendo que el elemento del sistema robótico sobre el que se actúa permanezca invariable con respecto al tiempo.

Por otro lado, la condición de un estado puede ser:

- *Completa:* es el equivalente al estado de funcionalidad plena.
- *Reducida:* es el estado que ofrece una funcionalidad reducida con respecto al equivalente en funcionalidad plena.

A nivel de funcionalidad, los estados de movimiento relativo y estático son estados *completos*; en cambio el estado de movimiento discreto ofrece una funcionalidad *reducida*.

Por lo general cada estado esta asociado al movimiento de un determinado elemento dentro de un sistema robótico. En cadenas de elementos, en los cuales la posición relativa de algunos elementos depende en cierta forma por los elementos predecesores, puede suceder que dos estados discretos o relativos se anulen haciendo que el estado resultante de dicho elemento parezca ser estático. En realidad la definición de estado no esta asociado al movimiento relativo de cada elemento entre sí sino al movimiento absoluto del actuador que lo genera. Esta propiedad es muy común en manos robóticas en las que el sistema de transmisión de movimiento son tendones, ya que existe un problema cuando hay que transmitir una determinada acción a una articulación alejada y la misma debe pasar por varias articulaciones intermedias, en ese caso se generan determinados estados relativos a todas las articulaciones para que el movimiento de la articulación mas alejada sea nulo.

Un actuador ofrece un estado discreto cuando una vez realizada su acción no es posible variar sus parámetros de velocidad asociados, y siempre que dicho actuador realiza una acción, el movimiento es el mismo. Esta característica se la puede observar en las pinzas neumáticas industriales como también en motores eléctricos que carecen de algún tipo de control de velocidad.

Se puede decir en cambio que todos los estados que ofrecen hoy día los actuadores en los sistemas robóticos son estados relativos. Esto es debido a que para garantizar un verdadero control de determinadas tareas a todos los niveles, es imprescindible que los estados ofrecidos por un sistema accionador sean relativos. Esto permite variar las características de la acción en todo momento o lo que es lo mismo, permitan ser controladas para que cada acción tenga una consecuencia determinada dentro del sistema robótico. Este tipo de propiedades es lo que hace que robots humanoides caminen con diferentes velocidades, que brazos robóticos obtengan trayectorias específicas y que manos robóticas puedan manipular objetos con diferentes configuraciones. Por lo tanto se puede decir que un sistema accionador que sea implementado en un sistema robótico debe ofrecer solo estados estáticos y estados relativos dejando los estados discretos para determinadas acciones específicas que no necesiten un control determinado.

5.4.3. Estudio funcional de un sistema accionador

Para realizar un estudio funcional de un sistema accionador es necesario definir ciertas consideraciones que se deben tener en cuenta que relacionan al sistema accionador con el sistema robótico, mas bien con los GDLs que posee:

- Cada GDL de un sistema robótico debe recibir tres estados ofrecidos por el sistema accionador: un estático, y dos movimientos en sus diferentes sentidos.
- Los estados que definen el movimiento de un elemento dentro del sistema robótico pueden ser tanto discretos, relativos o combinación de los mismos.
- Algunos estados ofrecidos por un sistema accionador pueden ser compartidos por diferentes GDLs, este es el caso de las manos robóticas subactuadas.
- Un mismo transformador de energía puede ofrecer a través de mecanismos internos dentro del propio actuador diferentes tipos y cantidad de estados.

Estas consideraciones son las que en cierta forma definen las bases de funcionamiento de un sistema accionador y son normas que se pueden apreciar en todos los sistemas robóticos.

5.4.3.1. Sistema accionador compuesto por un único actuador

El sistema accionador mas sencillo es aquel formado por un solo actuador que ofrece a un sistema robótico los tres estados necesarios. Si observamos la Figura 5.12, se puede observar que un actuador esta formado por un transformador de energía, un transmisor de movimiento y en algunos casos parte del transformador de datos en eventos. El tipo de estado que puede otorgar un actuador a un sistema robótico viene dado por la configuración entre el transformador de energía y el tipo de transmisor de movimiento.

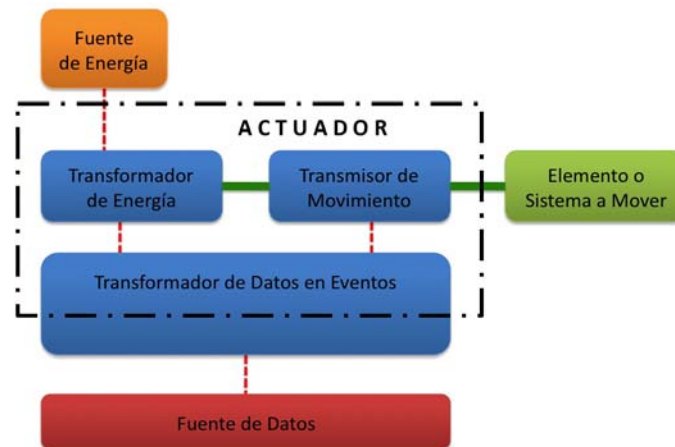


Figura 5.12: Componentes de un Actuador

Un transformador de energía de forma natural solo puede ofrecer un estado estático y dos estados discretos en diferentes sentidos dentro de un sistema accionador. La forma de transformar dichos estados discretos en estados relativos depende del tipo de sistema de control, del transformador de datos en eventos y de la configuración del sistema transmisor. Éste último, se lo puede dividir en tres partes: transmisor de movimiento positivo, transmisor de movimiento negativo y mecanismo de fijación para el estado estático. Por lo tanto la Figura 5.12, a los efectos de este análisis concreto, se puede simplificar tal y como se observa en la Figura 5.13.

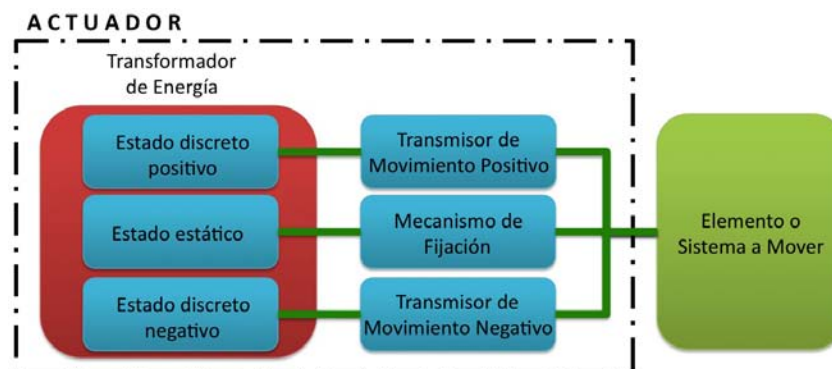


Figura 5.13: Componentes de un Actuador simplificado

Los mecanismos encargados de transmitir el movimiento al elemento, pueden ser independientes como también pueden estar asociados entre si o simplemente ser el mismo

mecanismo. Para el caso de la Figura 5.13 se puede decir que para cada estado discreto del transformador de energía, el actuador tiene una transmisión de movimiento específico. Un ejemplo de esta configuración es la formada por un motor eléctrico el cual transmite su movimiento positivo a través de tendones; el estado estático puede ser a través de una reductora irreversible con el motor parado o simplemente un freno electromagnético; y el movimiento negativo es a través de un muelle de recuperación. Como se puede observar, en este caso, las leyes que gobiernan cada estado pueden ser diferentes aunque el transformador de energía solo ofrezca estados discretos.

Si en el caso anterior se dota al transformador de energía un sistema de control, se puede decir que el sistema accionador tiene un estado de movimiento positivo relativo, un estado estático y un estado de movimiento negativo discreto que no puede ser controlado y depende exclusivamente de la función física del muelle de recuperación.

La configuración mas genérica de un actuador es la que se puede apreciar en la Figura 5.14 en la que cada estado del transformador de energía puede ser tomado por cada transmisor de movimiento dependiendo de las condiciones del sistema de control o del sistema robótico.

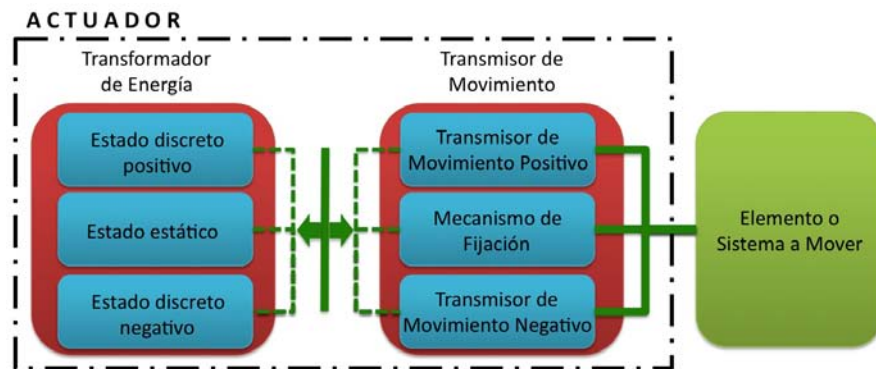


Figura 5.14: Configuración genérica de un actuador

5.4.3.2. Actuador Multi-Estados (AME)

Para que la metodología de diseño de Manos Robóticas Multi-Estados sea posible, es necesario diseñar y desarrollar un sistema accionador formado por actuadores que permitan proveer una cierta cantidad finita de estados superior al que puede ofrecer un actuador normal de tres estados.

Estos Actuadores Multi-Estados (AME) deben estar compuestos por un transformador de energía, un transformador de datos en eventos y un sistema de mecanismos que permita multiplicar los estados del transformador de energía. Los mecanismos a través de los cuales un determinado estado ofrecido por un transformador de energía pueda cambiar y dar como resultado al GDL asociado, un estado diferente al original ofrecido por el mismo se los denomina *transformadores de estados*. La configuración de un AME podría representarse como la Figura 5.15.

En este caso el transformador de energía posee tres estados discretos (ie, motor eléctrico) que gracias al transformador de datos en eventos pueden pasar a ser estados relativos. Por otro lado, se incorporan mecanismos especiales denominados Mecanismos de Tres Estados (MTE) que son los encargados de agrupar n conjuntos de tres estados los cuales



Figura 5.15: Configuración de un Actuador Multi-Estados (AME)

proveerían a cada GDL del sistema robótico la funcionalidad necesaria.

El MTE es un mecanismo capaz de recibir un determinado estado de un transformador de energía y dependiendo de la configuración de su mecanismo dar una determinada acción sobre un elemento o sistema con una cierta relación al estado original (Figura 5.16). Esto permite que un actuador dotado de un único transformador de energía convencional pueda convertirse en un AME dependiendo de la cantidad de MTEs que posea dentro de su estructura. Básicamente un MTE es un transformador de estados.



Figura 5.16: Configuración teórica de un Mecanismo de Tres Estados (MTE)

El mecanismo del MTE tiene una configuración que solo puede proveer tres tipos de estados. Si se tiene en cuenta las consideraciones iniciales, cada GDL de un sistema robótico debe recibir de un sistema accionador tres estados, por lo tanto esta configuración agrupa lo mínimo para cumplir con esta consideración. Si por el contrario se necesita que un mecanismo de transformación de estados disponga de mas transformaciones se puede lograr que un MTE se transforme de forma general en un Mecanismo Multi-Estados (MME) que pueda diversificar aún mas los estados de un transformador de energía. Por ejemplo hacer que los estados del MME puedan ser tanto discretos como relativos y de esta forma conseguir mayor funcionalidad al sistema accionador. Esta configuración de

MME puede representarse en la Figura 5.17.

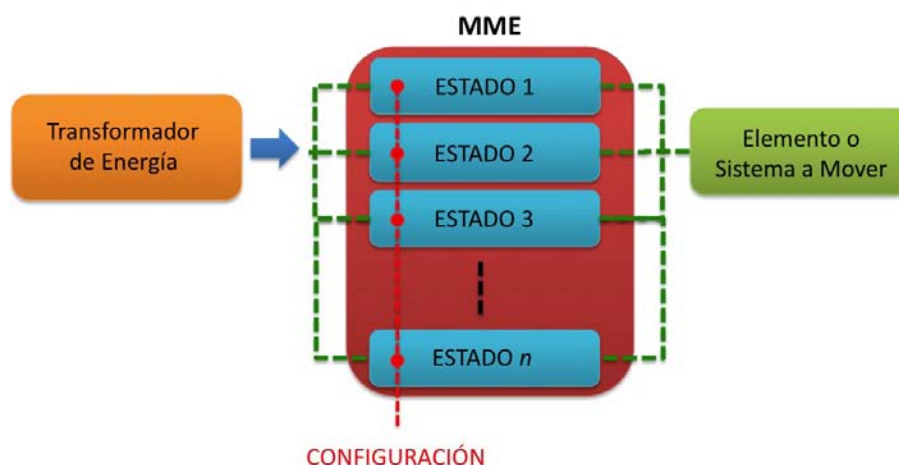


Figura 5.17: Configuración teórica de un Mecanismo Multi-Estados (MME)

5.4.4. Grado de funcionalidad de un sistema accionador

Para definir el grado de funcionalidad (ρ) de un sistema accionador, se analizará una configuración genérica de un AME con n MTEs. En la Figura 5.18 se puede observar dicha configuración, la cual está formada por un TE que provee a todo el actuador de dos estados relativos y un estado estático.

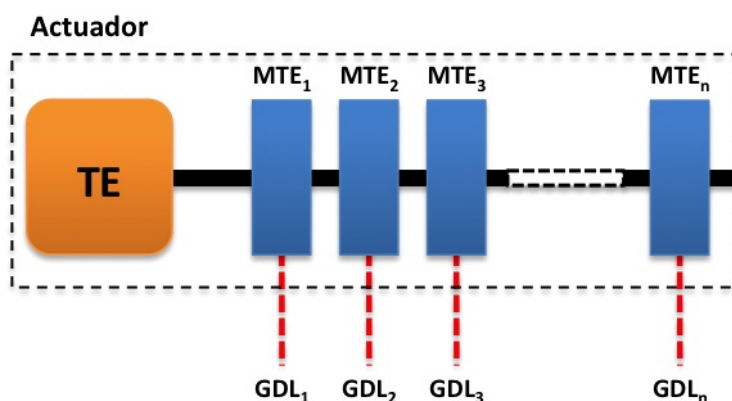


Figura 5.18: Configuración genérica de un AME con n MTEs

Cada MTE actúa dentro del actuador como un transformador de estados del TE. Dependiendo de la posición que adopte el MTE esta transformación será diferente y por lo tanto también lo será el resultado final de dicho estado. En el Cuadro 5.1 se puede observar el tipo de transformación que efectúa el MTE dependiendo de su posición a , b o c .

En un actuador de tres estados convencional que sea capaz de proveer dos estados relativos y uno estático, se puede decir que el mismo ofrece al GDL asociado una funcionalidad completa. En el caso del AME propuesto en la Figura 5.1, los estados de movimiento

Posición del MTE	Transformación resultante
<i>a</i>	Mantiene el estado del TE independientemente de cual sea
<i>b</i>	Otorga un Estado Estático independientemente del estado ofrecido por el TE
<i>c</i>	Estado Discreto gobernado por el sistema de recuperación del GDL al que esta asociado

Cuadro 5.1: Transformación ofrecida por el MTE dependiendo de la posición que adopte

relativo ofrecidos por el TE al actuador, pueden estar compartidos en algún momento por diferentes MTEs que se encuentren en la posición *a*. Esta situación hace que a nivel general dentro del actuador, la funcionalidad del mismo se vea reducida ya que si bien el estado es relativo, éste es compartido de forma dependiente por varios GDLs asociados a dichos MTEs.

Por otro lado, como se comentó en Sección 5.4.2, un estado discreto reduce la funcionalidad del actuador. En el caso de los MTEs, cuando se encuentran en la posición *c*, transforman cualquier estado otorgado por el TE en un estado discreto que depende del sistema de recuperación del GDL. En este sentido, cuantos mas MTEs se encuentren en la posición *c*, menor será la funcionalidad del actuador.

Entre las dos condiciones que reducen la funcionalidad del actuador comentadas, la referida a la transformación del estado del TE en un estado discreto es la que mas la perjudica. Ésto se debe a que el estado discreto no puede ser controlado en cambio, si bien los estados relativos que ofrecen los MTEs son dependientes unos del otro, sí pueden ser controlados. Por lo tanto un actuador compuesto por una cantidad *n* de MTEs tendrá mas situaciones de reducción de su funcionalidad cuanto mayor sea *n*.

Para entender un poco mejor el concepto de grado de funcionalidad, se analizarán el sistema robótico de dos GDLs representado en la Figura 5.19 cuando es accionado por los siguientes sistemas accionadores equivalentes:

- **Caso 1:** Sistema Accionador 1 (SA_1) compuesto por dos actuadores formados cada uno por un Transformador de Energía (TE) y un Transmisor de Movimiento (TM), tal y como lo describe la Figura 5.20(a). Este sistema accionador tiene dos actuadores que ofrecen tres estados independientes cada uno, por lo tanto $x = 3$ y $n = 2$. Según la Ecuación 5.4 se tiene:

$$\vartheta_1 = x^n = 3^2 = 9$$

- **Caso 2:** Sistema Accionador 2 (SA_2) compuesto por un único actuador formado por un Transformador de Energía (TE) y dos Transformadores de Estados denominados Mecanismos de Tres Estados (MTE) tal como lo describe la Figura 5.20(b). Este sistema accionador tiene un actuador que ofrece nueve estados, por lo tanto $x = 9$ y $n = 1$. Según la Ecuación 5.5 se tiene:

$$\vartheta_2 = x^n = 9^1 = 9$$

Por lo tanto $\vartheta_1 = \vartheta_2$ lo que indica que los dos sistemas accionadores son equivalentes y pueden ser comparados.

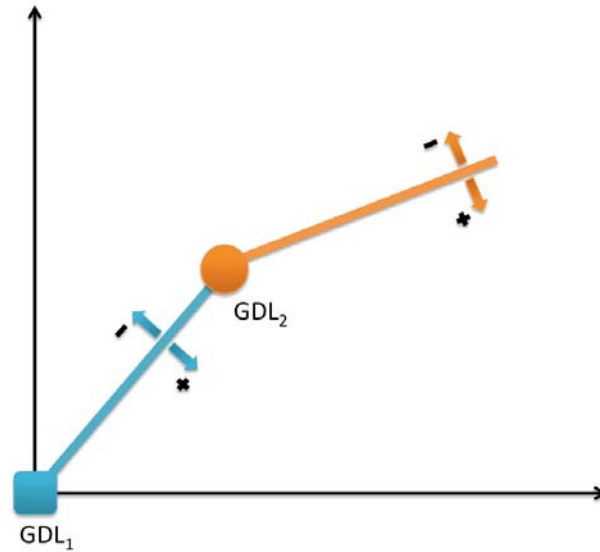


Figura 5.19: Sistema robótico compuesto por dos elementos con dos GDLs

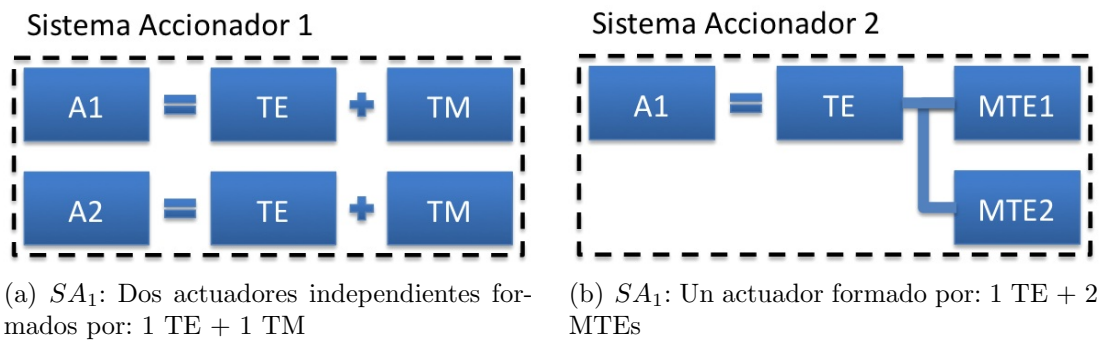


Figura 5.20: Sistemas accionadores analizados

En el Caso 1, se puede decir que el grado de funcionalidad del sistema accionador es máximo debido a que todos los estados ofrecidos por el mismo son completos. Sin embargo, en el Caso 2 se puede dar dos situaciones: que los dos MTEs se encuentren en la posición *a* y que el TE este ofreciendo un estado de movimiento relativo con lo que habría una cierta reducción de la funcionalidad y, que los MTEs se encuentren uno o ambos en la posición *c* y por lo tanto generaría dos disminuciones de funcionalidad diferentes. Se puede decir entonces que el SA_2 tendrá una cierta cantidad de configuraciones de reducción que disminuyen la funcionalidad del mismo y estas dependen de la cantidad de estados relativos que se encuentran activos al mismo tiempo y de la cantidad de estados discretos.

Si en las columnas de un cuadro de forma triangular se coloca de forma incremental la cantidad de estados discretos que puede tener el sistema accionador y, en las filas se coloca de forma incremental la cantidad de estados relativos que puedan estar activos en el mismo sistema accionador, tal y como se aprecia en la Figura 5.21, donde la reducción de la funcionalidad irá aumentando según la dirección de la flecha.

En el Cuadro 5.2 se puede observar el procedimiento para el caso del sistema accionador SA_2 .

Para el caso en que no haya estados discretos activos o, haya solo un estado discreto

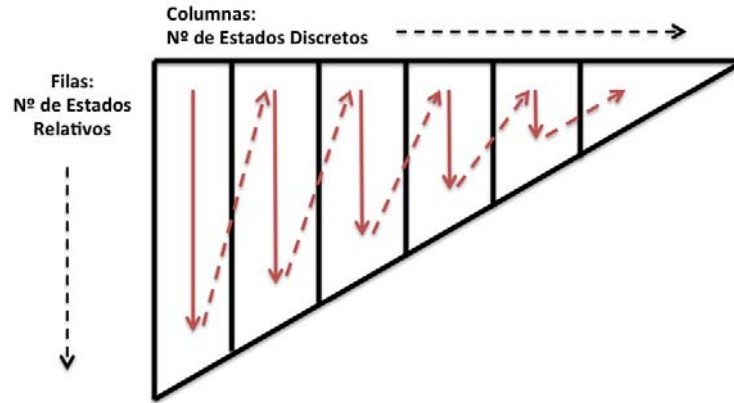


Figura 5.21: Cuadro de reducción de la funcionalidad de un sistema accionador

ED=0		ED=1		ED=2	
Γ	ER	Γ	ER	Γ	ER
0	0 o 1	2	0 o 1	3	0
1	2				

Cuadro 5.2: Configuraciones posibles de reducción del funcionalidad para un AME con 2 MTEs

activo, el estado restante puede ser tanto un estado relativo como un estado estático los cuales ambos tienen funcionalidad completa. Por lo tanto, el grado de reducción solo es afectado por el estado discreto.

Se define el *grado de reducción de la funcionalidad* de un sistema accionador a Γ , donde

$$\Gamma = \frac{n}{2} \cdot (n + 1)$$

y n es la cantidad de MTEs asociados al mismo TE y representa el índice que establece la cantidad de configuraciones de estados que puede tener un sistema accionador que hagan reducir la funcionalidad del mismo. Cuantos más MTEs estén asociados a un único TE, el número de configuraciones de reducción es mayor.

Por lo tanto para el caso del sistema accionador SA_2 que contiene dos MTEs ($n = 2$), el grado de reducción de la funcionalidad estaría representado por:

$$\Gamma = \frac{n}{2} \cdot (n + 1) = \frac{2}{2} \cdot (2 + 1) \implies \Gamma = 3$$

Con estos conceptos se puede definir como *grado de funcionalidad* (ϱ) de un actuador a:

$$\varrho = \frac{1}{\frac{n}{2} \cdot (n + 1)} \implies \varrho = \frac{1}{\Gamma} \quad (5.6)$$

donde n es la cantidad de MTEs que posee el actuador.

Para el caso en que $n = 0$, se lo considera como especial en el que $\varrho = 1$ debido a que corresponde a un actuador convencional en el que la funcionalidad del mismo es completa.

Por lo tanto para los casos del sistema robótico propuesto se tiene:

- **Sistema accionador 1** (SA_1): donde $n = 0$, se tiene según el caso especial mencionado anteriormente:

$$\varrho_1 = 1$$

- **Sistema accionador 2** (SA_2): donde $n = 2$, se tiene según la Ecuación 5.6:

$$\varrho_2 = \frac{1}{\frac{2}{2} \cdot (2 + 1)} = \frac{1}{1 \cdot (3)} = \frac{1}{3}$$

Como es de esperar, el grado de funcionabilidad del SA_1 es mayor que el grado de funcionabilidad del SA_2 .

$$\varrho_1 = 1; \varrho_2 = \frac{1}{3} \implies \varrho_1 > \varrho_2$$

Si ahora se hace el mismo análisis para el caso de un AME compuesto por tres MTEs tendremos entonces:

$$\Gamma = \frac{n}{2} \cdot (n + 1) = \frac{3}{2} \cdot (3 + 1) \implies \Gamma = 6$$

donde

$$\varrho = \frac{1}{\Gamma} = \frac{1}{6}$$

El Cuadro 5.3 muestra las configuraciones de reducción posibles para el caso de un AME compuesto por tres MTEs.

ED=0		ED=1		ED=2		ED=3	
Γ	ER	Γ	ER	Γ	ER	Γ	ER
0	0 o 1	3	0 o 1	5	0 o 1	6	0
1	2	4	2				
2	3						

Cuadro 5.3: Configuraciones posibles de reducción del funcionalidad para un AME con 3 MTEs

Para el caso de un AME compuesto por seis MTEs tendremos:

$$\Gamma = \frac{n}{2} \cdot (n + 1) = \frac{6}{2} \cdot (6 + 1) = 21 \implies \Gamma = 21$$

donde

$$\varrho = \frac{1}{\Gamma} = \frac{1}{21}$$

El Cuadro 5.4 muestra las configuraciones de reducción posibles para el caso de un AME compuesto por seis MTEs.

Para el caso en el que un sistema accionador este compuesto por varios actuadores de los cuales algunos puedan ser AMEs, es necesario definir una función que permita calcular el grado de funcionabilidad del mismo.

Hasta el momento el grado de funcionabilidad esta definido para un sistema accionador compuesto por un único actuador o, para un sistema accionador compuesto por varios actuadores convencionales. Si se considera un sistema robótico con una cantidad g de GDLs, es necesario definir una función que permita calcular el grado de funcionabilidad



ED=0		ED=1		ED=2		ED=3		ED=4		ED=5		ED=6	
Γ	ER	Γ	ER	Γ	ER	Γ	ER	Γ	ER	Γ	ER	Γ	ER
0	0 o 1	6	0 o 1	11	0 o 1	15	0 o 1	18	0 o 1	20	0 o 1	21	0
1	2	7	2	12	2	16	2	19	2				
2	3	8	3	13	3	17	3						
3	4	9	4	14	4								
4	5	10	5										
5	6												

Cuadro 5.4: Configuraciones posibles de reducción del funcionalidad para un AME con 6 MTEs

del sistema accionador independientemente de la cantidad y tipo de actuadores que posee. Esta función se la denomina *Función del Grado de Funcionabilidad* y tiene en cuenta la cantidad de GDL del sistema robótico los cuales el sistema accionador debe proveer movimiento y la configuración de cada uno de los actuadores. Por lo tanto dicha función esta definida como:

$$\varrho_t = \sum_{n=1}^m \frac{K_n}{g} \cdot \varrho_n \quad (5.7)$$

donde m es el número de tipos diferentes de actuadores, K_n es la cantidad de actuadores de cada tipo que forman parte del sistema accionador y ϱ_n es el grado de funcionalidad correspondiente a cada tipo de actuador. Esta función establece el grado de funcionalidad total (ϱ_t) de un sistema accionador genérico.

Si se toma como ejemplo un sistema robótico con seis GDLs a los que hay que proveer de movimiento con un sistema accionador, pueden haber las siguientes configuraciones de sistemas accionadores posibles:

1. SA_1 : compuesto por un único AME de seis MTEs.
2. SA_2 : compuesto por dos AMEs de tres MTEs.
3. SA_3 : compuesto por tres AMEs de dos MTEs.
4. SA_4 : compuesto por dos actuadores convencionales y dos AMEs de dos MTEs.
5. SA_5 : compuesto por tres actuadores convencionales y un AME de tres MTEs.
6. SA_6 : compuesto por seis actuadores convencionales.

Todos estos sistemas accionadores son equivalentes ya que poseen el mismo grado de accionamiento sin embargo, su grado de funcionabilidad es diferentes en cada caso.

Basándose en la Ecuación 5.7 y en los grados de funcionalidad calculados en los casos anteriores, se puede establecer cual de todos los sistemas accionadores propuestos es el que mas funcionalidad dará al sistema robótico. Por lo tanto:

Para SA_1 se tiene:

$$\varrho_1 = \frac{1}{6} \cdot \frac{1}{21} = \frac{1}{126}$$

Para SA_2 se tiene:

$$\varrho_2 = \frac{2}{6} \cdot \frac{1}{6} = \frac{1}{18}$$

Para SA_3 se tiene:

$$\varrho_3 = \frac{3}{6} \cdot \frac{1}{3} = \frac{1}{6}$$

Para SA_4 se tiene:

$$\varrho_4 = \frac{2}{6} \cdot 1 + \frac{2}{6} \cdot \frac{1}{3} = \frac{4}{9}$$

Para SA_5 se tiene:

$$\varrho_5 = \frac{3}{6} \cdot 1 + \frac{1}{6} \cdot \frac{1}{6} = \frac{19}{36}$$

Para SA_6 se tiene:

$$\varrho_6 = \frac{6}{6} \cdot 1 = 1$$

Dando por resultado, tal y como es de esperar que:

$$\varrho_1 > \varrho_2 > \varrho_3 > \varrho_4 > \varrho_5 > \varrho_6$$

5.5. Metodología de diseño propuesta

Una vez analizadas y definidas todas las herramientas necesarias, se propone una metodología de diseño para el desarrollo de las Manos Robóticas Multi-Estados. Como se puede observar en el diagrama de la Figura 5.22, ésta metodología tiene tres fases principales: definición de requisitos y especificaciones de diseño, diseño y desarrollo de subsistemas y finalmente, diseño y desarrollo del prototipo final. Cada una de estas fases representadas por bloques tiene, internamente, subfases que permiten una continua iteración de los subsistemas que van dando forma preliminar a la fase siguiente, con lo que, si bien son fases representadas por separado tienen una cierta integración entre las mismas.

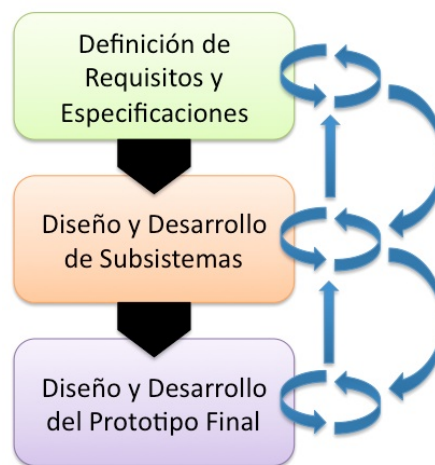


Figura 5.22: Metodología de diseño básica utilizada

A continuación se explicará que incluye cada fase.

5.5.1. Definición de requisitos y especificaciones

La fase de definición de requisitos y especificaciones es una de las más importantes en cualquier metodología, no solo por ser la primera, sino porque la coherencia y el detalle que puede llegar a definirse en la misma es tan importante como el diseño del prototipo final. Es en esta fase en donde se pueden trasladar simples errores por el solo hecho de estar mal especificados o de forma incompleta.

Si bien todas las metodologías contienen esta fase al inicio de la misma, no es el título de la fase lo que la explica sino el contenido de la misma. Por este motivo, cuanto más controlado este el contenido de esta fase y los pasos que se deben seguir, el resultado que se consiga será mucho mejor. Uno de los grandes problemas que puede tener el diseño de un sistema es tener que iterar continuamente con la fase de definición de requisitos y especificaciones.

En esta fase de diseño, se tienen en cuenta los siguientes aspectos:

- **Definición del entorno:** Si bien al momento de definir el diseño de una mano robótica el entorno en la que se va a desempeñar parece ser obvio, ya que muchas veces la necesidad viene primero que la herramienta, en la mayoría de los casos las aplicaciones de un determinado diseño de mano robótica suelen aparecer al final y es ahí cuando se analizan modificaciones al diseño actual para que puedan ser utilizados en otros entornos. Si bien el análisis de este aspecto no asegura que esto último no suceda, el realizarlo puede prevenir o agilizar en el futuro posibles modificaciones que hayan sido analizadas con antelación.
- **Definición de las tareas a realizar:** Un punto importante de este punto es saber definir con cierta precisión cuáles son las tareas deseables y cuáles son las tareas necesarias. Si se compara la funcionalidad de una mano humana en todos los entornos, la capacidad de realización de tareas que la misma puede alcanzar es completa, por lo tanto si lo que se quiere es reemplazar a la mano humana muchas veces es muy complicado decir que tareas son las necesarias. Teniendo en cuenta que el sistema accionador que se escoja o, mejor dicho, el grado de funcionalidad que debe poseer el mismo depende exclusivamente de este punto, es importante hacer un análisis coherente del mismo.
- **Análisis detallado de las características de diseño:** Una vez que se tienen claro los dos puntos anteriores es cuando realmente se hace el análisis detallado de las características de diseño explicadas en el Capítulo 5. En este caso es conveniente abordar cada una de las características con varias iteraciones ya que el cambio de una de ellas puede afectar a una característica analizada anteriormente y posiblemente necesite ser modificada. Cuando se hayan tocado todas las características y se hayan definido de forma que ya no sean necesarias modificaciones, es cuando se puede dar por finalizado este punto.
- **Análisis funcional de la mano robótica:** Este aspecto, en cierta forma, trabaja de forma paralela con el anterior. En algunos casos es necesario recurrir a él para que defina algunas características de diseño, por lo tanto las herramientas de análisis que se posean en este punto son muy importantes, incluso si una de esas herramientas es el diseño y desarrollo de un subsistema.
- **Análisis del sistema accionador óptimo:** Una vez que se han definido todos los estados necesarios y la calidad de los mismos para que la mano robótica a diseñar

tenga plena funcionalidad, es cuando se analiza el sistema accionador óptimo que dé vida a todos los GDLs de la mano robótica. En este análisis se define el sistema robótico óptimo, o sea el ideal. Es importante diferenciarlo del sistema accionador posible ya que en muchos casos una de las grandes limitaciones de funcionalidad de una mano robótica radica en que el sistema accionador posible no alcanza a ser el ideal.

- **Definición del sistema accionador posible:** Una vez definido el sistema accionador ideal, se analizan diferentes configuraciones de actuadores directos, Actuadores Multi-Estados (AME) y mecanismos que permitan diseñar un sistema accionador posible y que alcance con la mayor calidad al ideal. En este punto quizás es donde es imprescindible el desarrollo de un subsistema que valide el sistema accionador.
- **Especificaciones de diseño:** Finalmente cuando todos los puntos anteriores están analizados y definidos es cuando se establecen las especificaciones de diseño y, es la finalización de este punto el que da por finalizada la primera fase de esta metodología.

Una de las ventajas que tiene esta metodología es que el inicio de la siguiente fase puede iniciarse cuando algunas de las especificaciones de algún subsistema este completa. Esto permite que antes de finalizar la fase inicial, se pueda iterar parcialmente sin que esto afecte a la continuidad del proyecto.

5.5.2. Diseño y desarrollo de subsistemas

Una vez establecidas las especificaciones y los requisitos que son necesarios para el diseño de la mano robótica, se pasa a la siguiente fase que es la de diseñar y desarrollar los subsistemas independientes de forma que se pueda probar su correcta funcionalidad y que cumplan con las especificaciones parciales del diseño final.

Se puede tomar como subsistema a los elementos independientes del sistema robótico o mano robótica en este caso, el sistema de control, el sistema sensorial, entorno virtual si procede y el sistema accionador que dotara de movimiento a la mano robótica.

Esta fase, y para el caso de las Manos Robóticas Multi-Estados, se pueden dividir los subsistemas en cuatro grupos que se abordan de forma casi independiente: el diseño de los elementos, el diseño del sistema de control, el sistema sensorial y finalmente el sistema accionador. Este trabajo básicamente se centra en los subsistemas de diseño de elementos y el subsistema del sistema accionador aunque no deja de lado los otros dos ya que para realizar las pruebas correspondientes a la validación de cada uno es necesario tener todos los subsistemas completos, aunque sea de forma básica.

La ventaja de esta fase básicamente es probar nuevos y diferentes mecanismos de cada subsistema sin necesidad de que sean implementados definitivamente y por lo tanto, saber si son viables o no con anterioridad. No todos los sistemas robóticos permiten que esta fase ataque a todos los subsistemas, muchas veces por razones de presupuesto ya que probablemente abordar un subsistema conlleva el mismo gasto que abordarlo sobre el diseño final, con lo cual deja de ser una ventaja.

Muchas veces el subsistema analizado no tiene porque ser absolutamente funcional, simplemente puede que sea necesario solo validar el concepto. En estos casos es cuando mas ventajoso suele ser esta metodología ya que permite, conceptualmente, definir un sistema robótico con presupuestos considerablemente bajos.

En la Figura 5.23 se puede apreciar de forma esquemática como funcionaría esta fase dentro de la metodología propuesta.

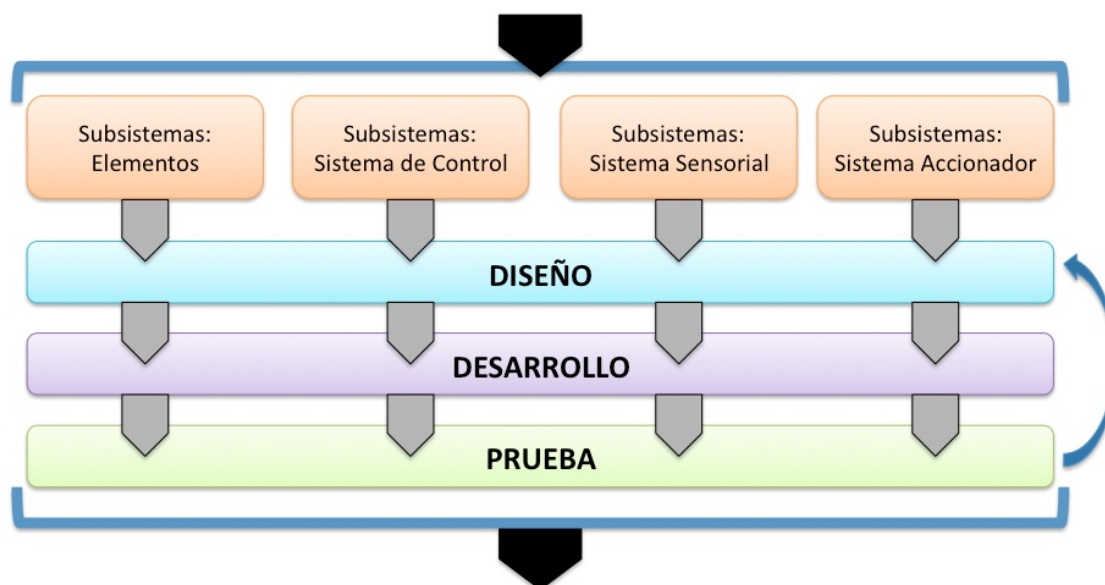


Figura 5.23: Descripción de la fase de diseño y desarrollo de subsistemas

Como se puede observar, cada grupo de subsistemas se puede dividir en diferentes ramas, las cuales pueden o no estar asociadas al mismo elemento con la diferencia de que la variación es el concepto que se quiere validar.

Es importante recalcar que todos los subsistemas deben ser probados. La prueba depende en cierta forma del tipo de subsistema y si la validación se trata de un concepto o del mecanismo. En el primer caso la prueba suele ser menos rigurosa que la segunda. Cuanto mas rigurosa sea la prueba de los subsistemas, mas probabilidades hay de identificar posibles fallos de forma de que se puedan iterar en esta fase y no pasen a la fase siguiente sobre un diseño definitivo.

5.5.3. Diseño y desarrollo del prototipo final

La ultima fase de la metodología puede comenzar cuando alguno de los subsistemas de la fase anterior se haya validado ya que en este caso ya se puede disponer de un concepto o mecanismo que pueda ser implementado bajo las especificaciones de la primera fase.

Esta fase básicamente se centra en adaptar los subsistemas a las especificaciones establecidas y dentro de los limites de peso, dimensiones y exigencias.

El funcionamiento de esta fase dentro de la metodología se puede apreciar en la Figura 5.24.

Básicamente, esta metodología de diseño se diferencia de las tradicionales en la gran importancia que se le da a la fase de diseños conceptuales previos de los diferentes subsistemas. Esto permite identificar fallos y errores con anterioridad a la definición final del diseño.

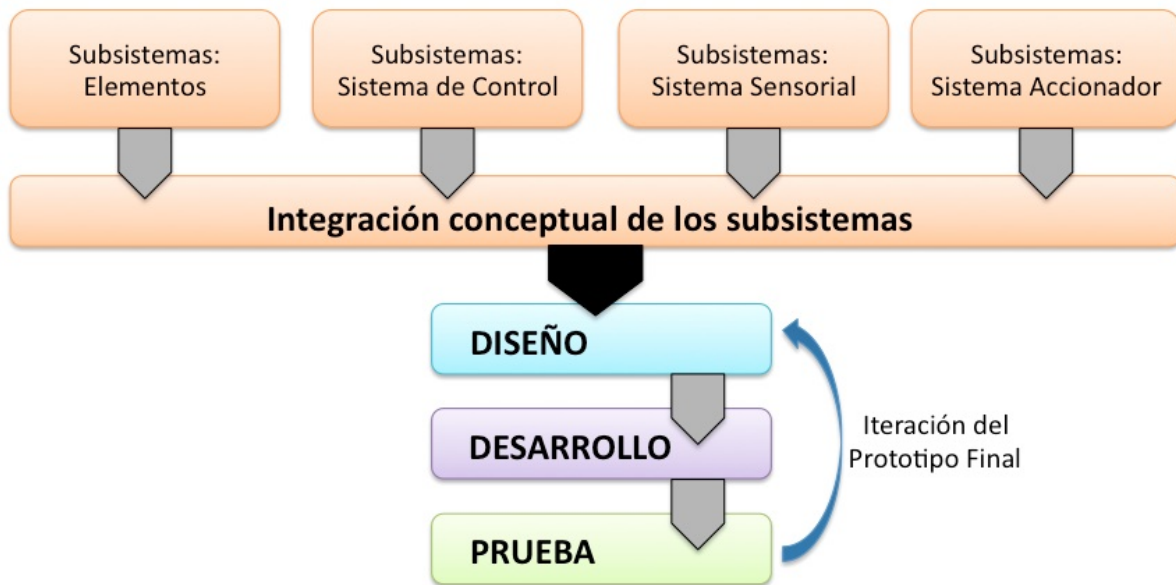


Figura 5.24: Descripción de la fase de diseño y desarrollo del prototipo final

Como se podrá observar en los diseños de las manos robóticas RLx que surgen de este trabajo, antes de abordar un diseño final se ha pasado por varios diseños conceptuales previos que permitieron a bajo coste conseguir buenos resultados ya que muchos de los errores habían sido detectados con antelación.

Aplicación de la metodología de diseño de Manos Robóticas Multi-Estado

6.1. Introducción

En este capítulo se explicará como se ha aplicado la metodología propuesta en este trabajo a las manos robóticas RLx. Si bien la metodología de diseño basada en los estados de su sistema accionador se puede aplicar en cualquier sistema robótico, es en las manos robóticas donde se puede sacar el mayor provecho, ya que es un sistema en el que se necesitan una gran cantidad de GDLs en un espacio reducido, con lo que la optimización del sistema accionador es crítica.

El nombre de las Manos Robóticas RLx provienen de las siglas de *Robotics Lab* y han sido diseñadas y desarrolladas en el Laboratorio de Robótica de la Universidad Carlos III de Madrid [6].

La Mano Robótica RL1, debido a sus requisitos impuestos inicialmente, ha servido de inspiración en la nueva metodología de Manos Robóticas Multi-Estados ya que justamente para poder saltar algunos obstáculos de diseño, referidos a los estados de un sistema accionador y su relación con los estados posibles de la mano, que las metodologías de diseño actuales no solucionaban, surge el primer interrogante de como conseguir que un único transformador de energía consiguiese proveer más estados a un sistema robótico.

La segunda generación de la Mano Robótica RL1, la RL2, tiene dos aspectos importantes que la diferencian de la primera: la optimización de sus mecanismos y la configuración de dedos enfocada a alcanzar más funcionalidad sin modificar el concepto inicial. Esta configuración de dedos se basa en el ensayo de implementar a los dedos articulaciones pasivas que dependiesen de la forma del objeto para adoptar una determinada posición.

Finalmente, la Mano Robótica RL3, es un ensayo de lo que podría surgir aplicando la metodología de Manos Robóticas Multi-Estados a un sistema robótico con una cantidad considerablemente mayor de GDLs. Este ensayo consta de dos partes: la definición del concepto de mano robótica de 20 GDLs y el diseño y desarrollo de dos tipos de AME utilizando dos tecnologías diferentes para poder conseguir dar la suficiente funcionalidad a dicho sistema robótico.

A continuación se pasara a describir cada una de estas manos.

6.2. Mano Robótica RL1

La Mano Robótica RL1, de ahora en adelante solo RL1, es la primera versión de mano robótica diseñada y desarrollada en el Laboratorio de Robótica de la Universidad Carlos III de Madrid [6]. Ésta fue montada en el Brazo Robótico ASIBOT (primera generación) donde su aplicación era concreta y bien definida y que se describirá más adelante en esta sección.

Si bien han habido requisitos que acotaron enormemente la libertad de diseño de este sistema robótico, estas mismas restricciones hicieron que se replanteasen varios parámetros de diseño de las metodologías actuales y obligasen a realizar un análisis más exhaustivo y a más bajo nivel de su sistema accionador y como hacer que el mismo otorgue más funcionalidad.

Antes de entrar dentro de la metodología de diseño y desarrollo aplicada a la RL1, es importante enmarcar en el entorno en la que fue diseñada y cual fue su objetivo principal: el de ser un extremo activo del Brazo Robótico ASIBOT.

6.2.1. Brazo robótico ASIBOT

El Brazo Robótico ASIBOT, de ahora en adelante solo ASIBOT (Figura 6.1) [24, 112, 114, 80, 23, 81], desarrollado en el Laboratorio de Robótica de la Universidad Carlos III de Madrid, surge como una aplicación concreta de brazo robótico simétrico auto contenido del cual el mismo departamento venía desarrollando conocimiento y experiencia hace varios años [223, 25, 21, 113, 22].



Figura 6.1: Brazo Robótico ASIBOT desarrollado por el Laboratorio de Robótica de la Universidad Carlos III de Madrid.

El ASIBOT fue desarrollado en un proyecto europeo denominado *Flexible Mechatronic Assistive Technology System to support persons with special needs in all their living and working environments*, financiado por el programa IST y en el que estaban involucradas instituciones médicas y universidades.

El objetivo del ASIBOT es incorporar una herramienta de alta tecnología al uso diario de personas discapacitadas, ancianos y personas con necesidades especiales en su casa y en otros entornos cotidianos. Éste podría montarse tanto sobre la silla de ruedas del usuario como también desplazarse a través de anclajes dentro de entornos preparados en donde

el usuario se desenvuelve, por ejemplo, dentro de su propia casa o lugar de trabajo. Para que esto sea posible, el ASIBOT es un brazo de cinco GDLs simétrico que le permite, independientemente del extremo en el que este fijado en cada momento, desempeñar todas sus tareas con la misma funcionalidad.

Para que el ASIBOT no necesite de un sistema de control externo, todo el sistema electrónico, de control y sensorial esta dentro del propio brazo, como se puede observar en la Figura 6.2. Ésta ventaja hace que el ASIBOT sea totalmente independiente solo necesitando recibir a través de sus extremos la tensión suficiente para su alimentación.

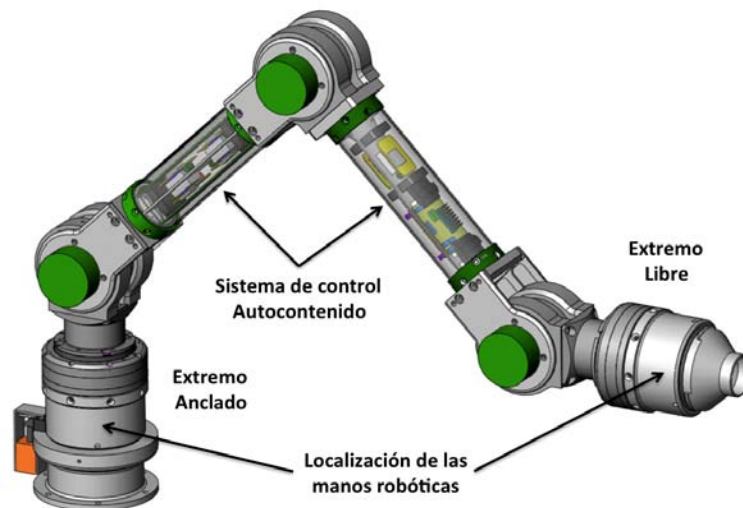


Figura 6.2: ASIBOT: Brazo robótico autocontenido.

Algunos de los resultados obtenidos con el ASIBOT en aplicaciones concretas se pueden observar en la Figura 6.3.

Para que el ASIBOT pueda desplazarse y obtener la alimentación desde sus extremos se tuvo que diseñar unos anclajes que permitiesen no solo cumplir con estas dos funcionalidades, sino también poder alojar una mano robótica en su interior y que pueda ser extraída cada vez que se la necesite para realizar tareas no estructuradas.

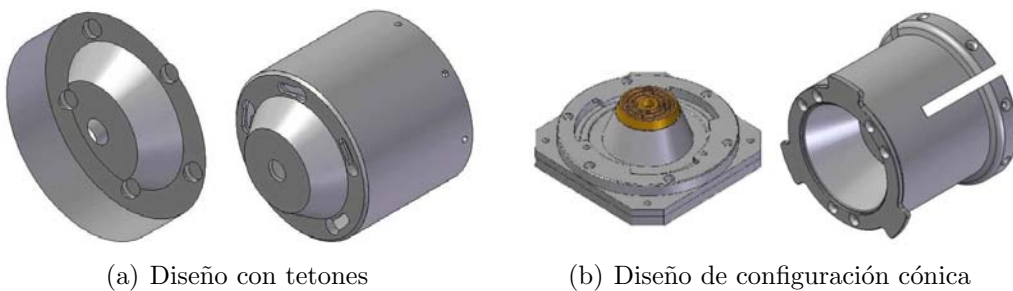
Basándose en un primer momento en las dos funcionalidades principales: anclaje del brazo y obtención de la alimentación para su funcionamiento, se diseñaron una serie de anclajes tanto machos como hembras (Figura 6.4) y en los que se habían analizado aspectos tales como: el proceso y el control de anclaje, propiedad de auto centrado, calidad y precisión de la sujeción, capacidad de auto-alineación, peso y finalmente, el espacio para poder alojar la mano robótica y su electrónica [59].

El modelo que finalmente cumplía mejor dichas especificaciones es el mostrado en la Figura 6.5. Éste diseño no solo tiene mejor capacidad de auto alineación y fijación firme con respecto a los diseños anteriores, sino que también permitía el mayor volumen interno para la incorporación de la mano robótica.

Con respecto al tamaño que debía cumplir este anclaje, estaba totalmente definido y especificado en el proyecto general. Relacionado a su diámetro exterior estaba limitado al mayor diámetro del brazo y con respecto a su longitud venía definida por la longitud del conjunto Anclaje-Mano Robótica del diseño del Universidad de Lund (Suecia), que dentro del proyecto, era el encargado principal de esta tarea. Esto en cierta forma es lo que principalmente define las especificaciones de la Mano Robótica RL1 ya que la misma



Figura 6.3: Brazo Robótico ASIBOT desarrollando tareas



(a) Diseño con tetones

(b) Diseño de configuración cónica



(c) Anclaje diseñado por la Universidad de Lund

Figura 6.4: Diseños de anclajes analizados

se debía adaptar a lo que ya estaba definido desde un principio.

A continuación se definen los requisitos y especificaciones que debía cumplir la Mano



Figura 6.5: Diseño de anclaje implementado en el Brazo Robótico ASIBOT

Robótica RL1.

6.2.2. Definición de requisitos

La definición de los requisitos de la RL1 se pueden dividir en dos fases internas. La primera fase es previa a la que se establece en la metodología propuesta y que enumera las especificaciones de la mano que ya están establecidas o impuestas por el proyecto y en las que no hay posibilidad de cambio. La segunda fase, es la que da inicio a la metodología y que se basa en analizar de forma exhaustiva cada una de las características de diseño.

6.2.2.1. Requisitos pre-establecidos

Como se comentó en la sección anterior, al momento de diseñar la RL1, el ASIBOT estaba desarrollado y ya estaba arrojando sus primeros resultados experimentales, la falta de funcionalidad de la mano robótica desarrollada por la Universidad de Lund y sus problemas de integración con el mismo hacen que se plantee la posibilidad de diseñar una mano robótica nueva que sea perfectamente integrable al brazo y que diese más funcionalidad. Debía realizarse dentro de los parámetros ya establecidos por el desarrollo actual. Estos parámetros se definen a continuación:

- **Integración:** Al haber ya un brazo robótico y un anclaje ya definido y funcionando, la integración de la RL1 debía ser completa. Esto implicaba que la existencia de la RL1 dentro del brazo no debía perturbar la funcionalidad actual del brazo.
- **Peso:** En este aspecto se partía del parámetro de peso de la mano robótica desarrollada por la Universidad de Lund y su peso era considerablemente superior al esperado. Los límites en este aspecto, definidos para el nuevo diseño, fueron más ambiciosos por dos motivos: disminuir el momento de inercia en el extremo del brazo que daría mayor precisión y velocidad cuando este no se encuentre realizando

tareas de manipulación y traslado de objetos; y aumentar la carga en punta ya que el peso que se ahorraría en la RL1 se ganaría en carga.

- **Tamaño:** El tamaño de la RL1 estaba restringido al volumen interior del anclaje, si bien había cierta libertad en practicar aperturas al mismo, éstas no debían poner en peligro la resistencia mecánica de la estructura del anclaje.
- **Autocontenido:** El espacio interior del brazo había sido diseñado para contener solo el sistema de control del mismo. Todo el sistema de control y la electrónica de la RL1 debía compartir el mismo volumen dentro del interior del anclaje.
- **Funcionalidad:** La funcionalidad de la mano robótica diseñada por la Universidad de Lund abría y cerraba los dedos de forma rígida tal y como lo haría un pinza industrial. Se debía mejorar considerablemente esta característica ya que las tareas a las cuales iba a estar sometida la RL1 así lo requerían.
- **Sistema accionador:** El sistema accionador, al igual que el sistema de control, debía estar incluido dentro del volumen interno del anclaje, poniendo de forma indirecta grandes limitaciones de fuerza y número de actuadores que debía poseer.
- **Disponibilidad:** Este requisito básicamente consiste en que la mano robótica debía estar disponible con un simple comando del usuario y cuando este no lo requiera, el brazo debía poder disponer del sistema de anclaje como si la mano robótica no estuviese. Este quizás ha sido uno de los requisitos pre-establecidos clave en el diseño de la RL1.

Una vez enumerado los requisitos pre-establecidos y teniéndolos en cuenta como normas iniciales, se puede pasar a la siguiente fase con el análisis de las características de diseño.

6.2.2.2. Análisis de las características de diseño

Antes de entrar de lleno en las conclusiones alcanzadas en el análisis de cada una de las características de diseño de la RL1, es importante comentar ciertos aspectos que lo han condicionado.

Para los entornos estructurados o preparados en los que el ASIBOT se traslada y para tareas bien definidas e independientes se diseñan herramientas específicas llamadas *toolholders*. Éstas *toolholders*, que tienen incorporados los elementos necesarios para efectuar la tarea concreta, se encontrarán ubicadas en cada uno de los ambientes o puntos de trabajo en los que se las requiera y no acompañan al brazo en su trayecto de un lugar a otro, ya que sólo serán necesarias en dichos ambientes.

La existencia de estas *toolholders* hace que la mano robótica solo sea utilizada en tareas no identificadas o en las que el entorno no está preparado o, que los elementos a manipular si bien son de formas similares, sus tamaños son diferentes con lo cual desarrollar una *toolholders* para cada uno de ellos es poco práctico, es en este aspecto en el que la RL1 debe cumplir con dicha tarea. Otro caso claro es cuando el ASIBOT se encuentra montado en la silla de ruedas y el usuario se traslada de un sitio a otro en el que necesita llevar consigo ciertos objetos que no son cotidianos.

Si bien puede parecer que la RL1 debe tener la capacidad de realizar todo tipo de tarea de manipulación y agarre para aquellas tareas en las que no exista una *toolholders*

definida, los requisitos en este aspecto se han reducido solo a tareas de agarre y dentro de las tareas de agarre, solo de aquellos objetos parcialmente definidos con los que se puede encontrar el usuario dentro de los diferentes entornos. Estas tareas de agarre deben consistir en sujetar un determinado objeto para que el usuario haga uso de él sin que sea necesaria su manipulación (ie. sujetando un vaso de agua mientras el usuario la bebe) o que permita sujetar un determinado objeto para su traslado de un sitio a otro, mientras el mismo este dentro de las especificaciones de peso y volumen.

Un ejemplo claro de esta condición de trabajo es en el entorno laboral, en el que hay un gran cantidad de objetos de diferentes tamaños y formas y en los que se pueden encontrar en cualquier sitio al alcance del brazo, tal y como se puede ver en la Figura 6.6.



Figura 6.6: Entorno laboral típico con objetos que se pueden sujetar

A pesar del volumen interno que posee el anclaje del ASIBOT, la configuración de dicho volumen hace que la disposición de la RL1 dentro del mismo sea un parámetro crítico debido al tamaño medio de los objetos que se desean sujetar. Ésta característica hace inviable el alojar la RL1 dentro del anclaje con los dedos abiertos.

Si la RL1 debe estar alojada dentro del anclaje, esta debe salir desde el interior de la misma a través de unos cajeados que se le practiquen a la misma. Esto tiene una complicación a nivel estructural ya que con esos cajeados no se puede debilitar la resistencia mecánica del anclaje. Si se toma una sección del anclaje (Figura 6.7) se pueden identificar tres sectores dentro del mismo: el tramo verde es el encargado de realizar el auto alineado inicial del brazo en las tareas de aproximación, el tramo amarillo es el encargado de soportar los esfuerzos de sujeción entre los dos elementos del sistema de anclaje y el tramo rojo es el que transmite en ambos sentidos los esfuerzos realizados por el brazo en todos sus movimientos. Teniendo en cuenta esto, el único tramo en el que se pueden practicar cajeados sin que los mismos debiliten el sistema de anclaje y pongan en peligro el brazo robótico, es el verde.

En la misma Figura 6.7 también se puede observar la forma que tiene el volumen interno del anclaje. Este volumen si bien es considerable, no se puede aprovechar en su totalidad para el alojamiento de la mano robótica. Otro punto que deja claro esta característica es que la mano robótica para estar operativa debe pasar por diferentes

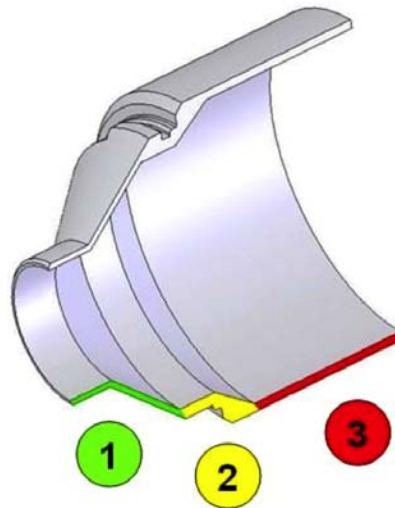


Figura 6.7: Tramos estructurales del anclaje unido al brazo

posiciones que el sistema accionador debe proveer. Estas definen en cierta forma las exigencias de funcionalidad que debe asumir el mismo.

La funcionalidad principal de la RL1 viene dado por las tareas que debe realizar, en este caso son tareas de agarre con firmeza. Para este tipo de tareas, la RL1 exige al sistema accionador tres estados bien definidos, uno de cierre de la mano, otro de relajación o apertura de la misma y uno de sujeción del objeto o parada.

La gran mayoría de las manos robóticas en la actualidad se encuentran montadas en los extremos de los brazos robóticos y se podría decir que se encuentran disponibles en todo momento. Solo es necesario que el propio brazo traslade la mano al lugar correcto y la misma comience a realizar su tarea, o sea, se encuentra en estado operativo por lo tanto no exige a su sistema accionador un movimiento previo. Para el caso de la RL1, esta situación es diferente ya que la misma se encuentra dentro de un anclaje (Figura 6.8) y no solo es necesario que el brazo traslade la mano al lugar correcto sino que también es necesario un movimiento previo que ponga a la mano en un estado operativo.

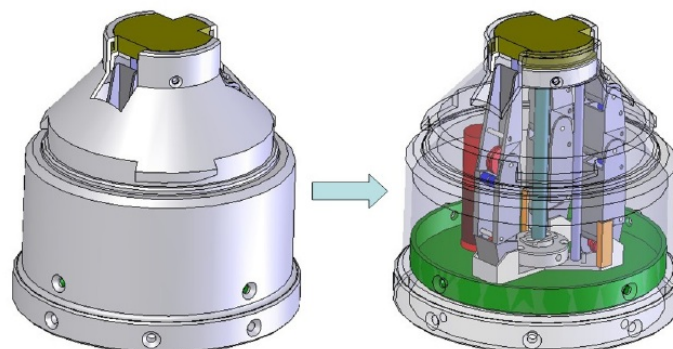


Figura 6.8: Ubicación de la RL1 dentro del anclaje

Para entender mejor el proceso que debe realizar la mano para estar operativa, la Figura 6.9 muestra la secuencia que se debe realizar indicando cada estado del mismo.

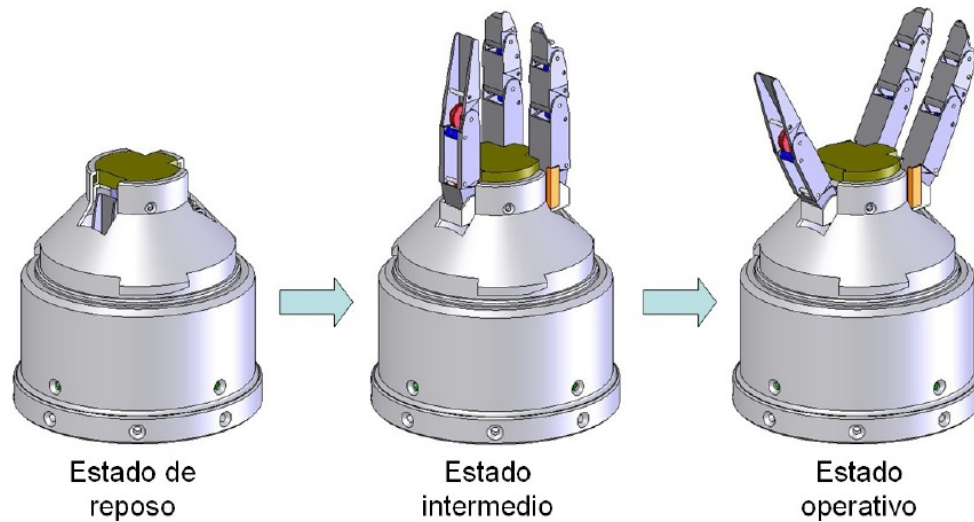


Figura 6.9: Secuencia de estados que debe realizar la RL1 para estar operativa

De forma resumida se puede decir que el sistema accionador debe proveer a la mano robótica movimiento suficiente para que la misma no solo pueda realizar sus tareas de agarre sino que también situarla en su estado de reposo u operativo cuando sea necesario.

El sistema accionador por lo tanto estará compuesto por un único actuador formado por un transformador de energía que dará movimiento a dos mecanismos: el mecanismo accionador MA_1 que es el encargado de extraer la mano y colocarla en el estado operativo y el mecanismo accionador MA_2 encargado de dar movimiento a todos los GLDs de la RL1. En la Figura 6.10 se puede observar un esquema de la configuración del sistema accionador de la RL1.

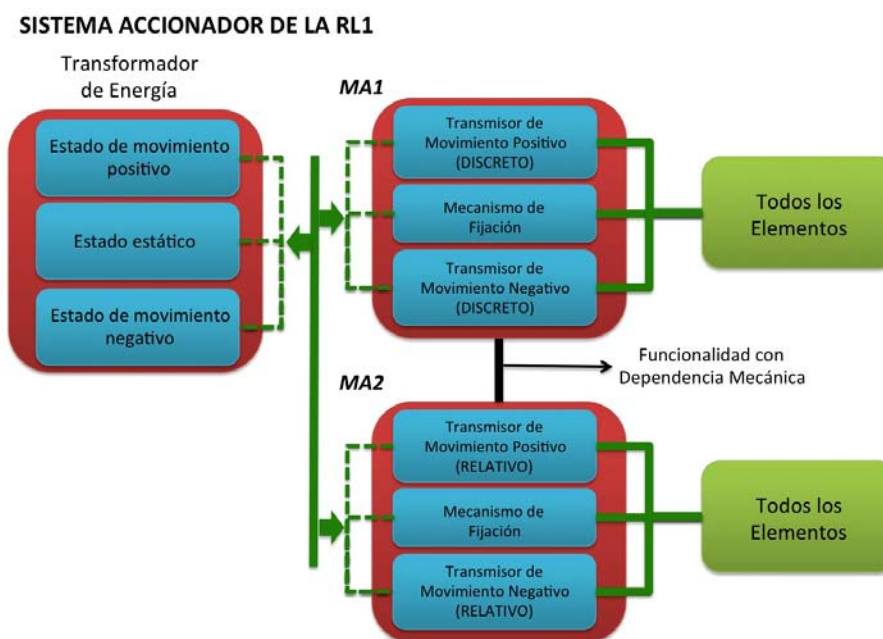


Figura 6.10: Configuración del sistema accionador de la RL1



Como se puede observar también en la Figura 6.10, el MA_1 y el MA_2 deberían tener una dependencia mecánica que impida que ambos mecanismos aporten su funcionalidad al sistema al mismo tiempo, esto permite que ambos puedan ser accionados por el mismo transformador de energía.

Tanto el MA_1 como el MA_2 reproducen de forma proporcional la funcionalidad completa del estado del transformador de energía en todo momento. Para el caso del MA_1 , el estado estático es un estado que puede ser transferido al sistema sin ningún problema pero no ofrece ninguna funcionalidad concreta como así tampoco es necesario un estado relativo, por lo tanto se podría decir que este mecanismo hace una transformación de estados degradada. Esto se debe a que para ofrecer máxima funcionalidad el MA_2 necesita de dos estados de movimiento relativo y un estado estático y como ambos mecanismos reciben la funcionalidad del mismo transformador de energía, para el MA_1 esta sobre dimensionado.

Estos aspectos comentados anteriormente han condicionado o relajado de alguna forma el análisis de las características de diseño en las que se debe definir la configuración final de la RL1. A continuación se comentan las conclusiones a las que se llegó cada una de las mismas.

- **Cantidad de dedos:** La limitación de espacio en el que se va alojar la RL1, hace que esta característica se reduzca a mínimos. El tipo de tareas que realizara la RL1 es claramente de agarre con firmeza. Para este tipo de tareas es imprescindible de que la mano robótica tenga un pulgar y, como mínimo, dos dedos opuestos. Otro punto a tener en cuenta a la hora de definir los GDL que tenga la mano, es que cuantos más puntos de contacto tenga la misma con el objeto, más firme y seguro será su agarre.
- **Palma:** Si bien para tareas de manipulación la palma, en la mayoría de los casos, no es necesaria, en las tareas de agarre con firmeza es un elemento imprescindible ya que gran parte de la acción que los dedos realizan sobre el objeto, encuentran su reacción sobre la palma. En la mano humana, la flexibilidad de la palma también realiza un efecto envolvente al objeto lo que aumenta la superficie de contacto y por lo tanto de la superficie de rozamiento con el mismo lo que da más calidad de firmeza. En este caso, la palma debe compartir ubicación con el sistema de alimentación del ASIBOT, esto hace que haya dos limitaciones críticas para diseñar la palma: la forma y la seguridad. En el caso de la forma, esta no puede ser dinámica, de hecho, debe ser más bien plana para que cuando la mano este alojada dentro del anclaje no haya problemas de contacto. A nivel seguridad, simplemente que al ser la palma un elemento que siempre estará en contacto de alguna forma con el objeto a sujetar, y si éste esta construido de un material conductor, dicho elemento no debe producir un corto circuito en el brazo, por lo tanto la palma debe ser capaz de cubrir estos contactos cuando este la mano operativa.
- **Número de GDLs y GDLs actuados:** Como se comentaba anteriormente, cuando más puntos de contacto tenga la mano con el objeto a sujetar más firme será el agarre. Esta tiene directa relación con la cantidad de falanges que posea cada dedo y el pulgar ya que al ser estos rígidos, cada uno de estos elementos otorgará en el peor de los casos solo un punto de contacto. Sin embargo, cuanto mayor sea el numero de falanges, mayor sera el numero de articulaciones y por lo tanto mayor GDLs que se deban actuar, en caso de que se quiera tener un cierto control sobre los

mismos. En este caso se optó por imitar la configuración de la mano humana o sea, tres falanges para los dedos y dos falanges más grandes para el pulgar. Sumando en total unos ocho GDLs. A nivel de GDL actuados y debido al espacio reducido y a las características pre-establecidas, se implementará un único actuador para todas las articulaciones tratando de que con mecanismos y sistemas de transmisión especiales permitiesen que cada elemento se adaptase a la forma del objeto y así conseguir una mayor cantidad de puntos de contacto sobre el mismo.

- **Tipos de actuadores:** Para abarcar esta característica, y teniendo en cuenta el tipo de configuración que se requiere del sistema accionador para satisfacer las necesidades de los elementos de la mano, se necesita un actuador que permitiese una gran cantidad de energía, en un tamaño reducido y en el que se le pudiese extraer una carrera importante ya que debe trasladar su fuerza de acción a todos los GDLs de la mano. El tipo de actuador seleccionado es el formado por un motor eléctrico de corriente continua como transformador de energía más un sistema de reducción que permitiese adaptar la velocidad y el par a las necesidades de la mano.
- **Tipo de transmisión de fuerza:** Debido al espacio disponible y al tamaño que deben tener los elementos de la mano, un sistema de transmisión a través de mecanismos no es viable, por otro lado la precisión en posición que se le exigiría a cada articulación tampoco es importante debido a que el control independiente de las mismas no es posible con un único actuador para nueve GDLs. Por lo tanto, el tipo de transmisión de fuerza adoptado es el formado por tendones y poleas. Esto permite una configuración estructural flexible y a la vez dinámica con un peso considerablemente bajo. Si bien este tipo de transmisiones es unidireccional o sea, que solo puede ejercer fuerza en una única dirección, es lo que realmente necesita la RL1 para las tareas que debe realizar, dejando para la recuperación de los elementos a su estado de original, mecanismos constantes y pasivos.
- **Mecanismos:** Para que el sistema accionador provea la funcionalidad necesaria para cubrir todos los estados de la mano, es necesario dotarlo de un mecanismo especial. Este mecanismo debe ser parte del actuador y debe satisfacer los múltiples estados de la mano y sus transiciones. Por una cuestión de configuración, aun cuando la mano sea extraída o se encuentre en movimiento, el sistema accionador debe permanecer fijo a la estructura del brazo, por tal motivo, este mecanismo debe permitir que el estado de movimiento del sistema accionador este continuamente disponible.
- **Tipo de sensores:** Al no necesitar control independiente sobre cada articulación o elemento, el sistema sensorial de la RL1 se simplifica considerablemente. Por este motivo, solo se intentará implementar sensores de fuerza en la superficie de contacto de cada falange. Se pretende que estos sensores den una idea aproximada de la magnitud de fuerza que esta realizando cada falange en cada momento en una tarea de agarre. Esto es importante a nivel de seguridad ya que para poder satisfacer a nueve GDLs con un único sistema accionador, la capacidad del mismos es aproximadamente nueve veces la que se necesitaría para cada articulación independiente. Si se tiene en cuenta que no hay control sobre cada falange de forma independiente el sistema accionador, puede hacer que en un determinado momento alguna de las articulaciones este realizando más fuerza de la que es capaz de resistir con el consecuente peligro de rotura de la misma. Como el sistema de control de la mano debe

estar integrado en el mismo volumen que la RL1, toda la información generada en tiempo real de estos sensores debe ser procesada y dependiendo de estos valores, este mismo sistema de control debe tener la capacidad de tomar decisiones de seguridad al margen de la orden principal enviada desde el sistema de control general del ASIBOT.

- **Materiales estructurales:** A nivel de materiales estructurales, y debido a que la tecnología en métodos de fabricación no era la que actualmente se puede disponer, se optó por el material más liviano, resistente y mecanizable: el aluminio aeronáutico. El aluminio aeronáutico tiene prácticamente la misma resistencia de rotura que el acero. Aunque su gráfica de resistencia es diferente, tiene la ventaja de que la densidad es casi 3,5 veces menor que el mismo. Para el sistema de transmisión interno se eligió aluminio para las poleas, acero para los ejes y latón para elementos complementarios.
- **Métodos de fabricación:** El método de fabricación empleado ha sido el tradicional: el mecanizado. Con la complicación del tamaño se debía optar por formas estructurales simples y que permitiesen ser fabricados. Esto impide que se puedan utilizar formas complejas que ayuden a la resistencia del elemento.

6.2.2.3. Análisis funcional del sistema accionador

Tal y como se pudo observar en la Figura 6.10, la configuración del sistema accionador de la RL1 esta compuesto por un transformador de energía y dos mecanismos accionadores, el MA_1 y el MA_2 . Estos dos mecanismos tienen una dependencia mecánica que no solo hace que funcionen de forma independiente sino que da la propiedad al sistema accionador de proveer movimiento a diferentes conjuntos de elementos dentro de la mano. Por lo tanto, el sistema accionador de la RL1 es un único actuador que posee 6 estados y su grado de accionamiento es

$$\vartheta_{RL1} = 6^1 \implies \vartheta_{RL1} = 6$$

En la Figura 6.11 se puede observar el diagrama simplificado del sistema accionador.

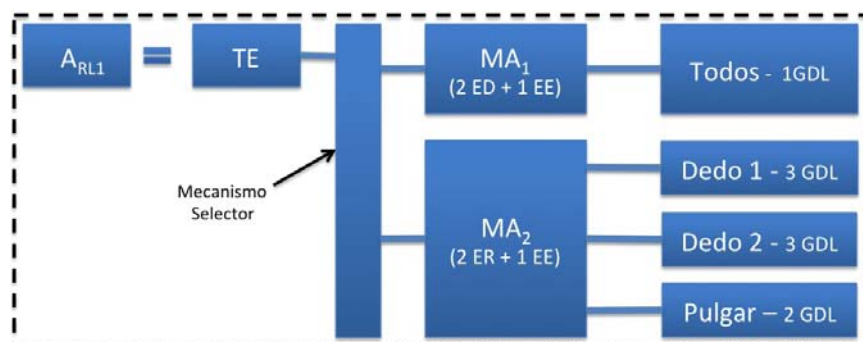


Figura 6.11: Diagrama simplificado del sistema accionador de la RL1

Para este caso, un único transformador de energía provee de movimiento al selector mecánico que es el encargado de trasladar dicho movimiento al MA_1 o al MA_2 dependiendo de la posición en la que se encuentre la mano.

Como se comentaba anteriormente, el MA_1 dota de movimiento a toda la mano y hace que la misma cambie de posición desde dentro del anclaje hasta el exterior de la mano. Por tal motivo, en esta transición, la RL1 solo tiene un GDL y solo se debe trasladar de un sitio a otro con lo que la exigencia de estados consiste en dos de movimiento discreto con una velocidad constante y uno estático. Por lo tanto en este aspecto la RL1 funciona como un mecanismo actuado según la Ecuación 5.1 para el caso especial en el que posee un único GDL y por lo tanto corresponde a una pinza robótica.

$$n_{GDL} = n_{act} \iff n_{GDL} = 1$$

En cambio, el MA_2 es el encargado de posicionar la RL1 en estado operativo y luego realizar las tareas de sujeción de objetos. La configuración de los dedos de la RL1 hacen que en esta etapa, la misma tenga las propiedades de una mano robótica subactuada, ya que posee un único actuador con 8 GDL dividido en tres elementos. Siendo la exigencia en este caso en dos estados de movimiento relativo y un estado estático. Por lo tanto en este aspecto la RL1 funciona como un mecanismo subactuado según la Ecuación 5.2.

$$n_{GDL} > n_{act}$$

Sin embargo, la realidad es que para que el MA_2 disponga de estados relativos, el único TE debe proveer al sistema de los mismos. Esto hace que el MA_1 en vez de funcionar con estados discretos, lo haga con estados relativos haciendo que el grado de funcionalidad teórico ϱ_{RL1_t} para el funcionamiento correcto de la RL1 sea menor que el grado de funcionamiento real ϱ_{RL1_r} desarrollado. Por lo tanto, a pesar de que ambos sistemas accionadores tengan el mismo grado de accionamiento, sus grados de funcionalidad son diferentes.

$$\vartheta_{RL1_t} = \vartheta_{RL1_r} \longrightarrow \varrho_{RL1_t} < \varrho_{RL1_r}$$

6.2.3. Subsistemas

Tal y como se ha definido en la metodología de diseño, antes de entrar de lleno en el diseño final del sistema robótico aun teniendo las especificaciones bien definidas, se realizan diseños de determinados subsistemas para comprobar su concepto, también en algunos casos su viabilidad técnica y funcional.

Para el caso de la RL1 se diseñaron y desarrollaron los siguientes subsistemas:

- **Dedo principal:** Para el caso del dedo se intenta identificar a nivel de concepto el mecanismo que permita a través de un único tendón no solo accionar todas las articulaciones del dedo sino que también hacer que el mismo se adapte al objeto que va a sujetar.
- **Sistema accionador:** En el caso del sistema accionador, se diseño y desarrollo un prototipo funcional que permitiese validar el funcionamiento del mismo. Este sistema accionador debía permitir extraer la mano del anclaje y colocarla en su estado operativo luego, una vez en ese estado, el sistema accionador debía ser capaz de entregar los dos estados relativos de movimiento más el estado estático a las articulaciones de todos los elementos.



- **Sistema de control:** A nivel de sistema de control se diseño y desarrollo un prototipo funcional que permitiese adquirir los datos de una determinada cantidad de sensores y en base a una lista de ordenes predefinidas que serían enviadas por el sistema de control general del ASIBOT, tomar determinadas acciones para efectuar las tareas correspondientes.

A continuación se entrara más en detalle sobre el desarrollo de cada subsistema.

6.2.3.1. Dedo principal

El sistema de transmisión de fuerza empleado para accionar todas las articulaciones de los dedos es el de tendón y polea. Este tipo de transmisión de fuerza tiene la característica de que solo puede realizar esfuerzo en un solo sentido, por lo tanto, si se necesitase realizar un esfuerzo en el sentido contrario se debería implementar otro sistema de transmisión similar. Para el caso de la RL1, como sus tareas son solo de agarre con firmeza, este segundo juego de tendones y poleas puede ser reemplazado por un mecanismo pasivo de recuperación más sencillo como por ejemplo un muelle.

En base a esta configuración de funcionamiento interno del dedo se debe diseñar un mecanismo que permitiese que, con el esfuerzo de un único tendón, el dedo no solo fijase un determinado objeto con todas las falanges del dedo sino que también las mismas se adaptasen a la forma del mismo.

Para alcanzar este objetivo se desarrollaron dos prototipos conceptuales, ambos tomando como base una estructura mecánica que representa los huesos del dedo y sus articulaciones y en el cual se montan las poleas, muelles y tendones necesarios para representar el concepto de funcionamiento.

A continuación se explicará cada uno de estos conceptos.

▪ Estructura A

En la Figura 6.12 se puede observar el concepto de funcionamiento de la Estructura A propuesta.

La Estructura A esta compuesta por 5 poleas, de las cuales sólo la $3a$ es solidaria a su eje, las demás están unidas a las falanges o entre sí por medio de tendones, muelles o elementos de fijación. El motor sólo actúa sobre la polea $1b$ por medio de un tendón, la polea $1b$ esta fija a la polea $1a$ y unida por medio de un muelle a la falange 1. La polea $1a$ actúa sobre la polea $2b$ por medio de un segundo tendón, y dicha polea $2b$ esta unida tanto a la polea $2a$ como a la falange 2 por medio de muelles. Finalmente, la polea $2a$ actúa sobre la polea $3a$, que esta fija a la falange 3, por medio de un tercer tendón. Paralelamente, todos los huesos están unidos entre sí por medio de muelles, lo que va a permitir a la mano, una vez retirada la acción del motor, volver a la posición inicial de reposo.

Este novedoso mecanismo funciona muy bien cuando se trata que el dedo adquiera la forma del objeto a medida que se cierre; pero tiene un gran inconveniente: la fuerza de sujeción efectuada al objeto por cada falange sólo depende de la tensión en la posición del muelle y no del motor, con lo que el dedo efectuará una mayor o menor fuerza, dependiendo del estiramiento del muelle y no de la tensión del tendón. En la Figura 6.13 se puede observar el prototipo fabricado.

▪ Estructura B

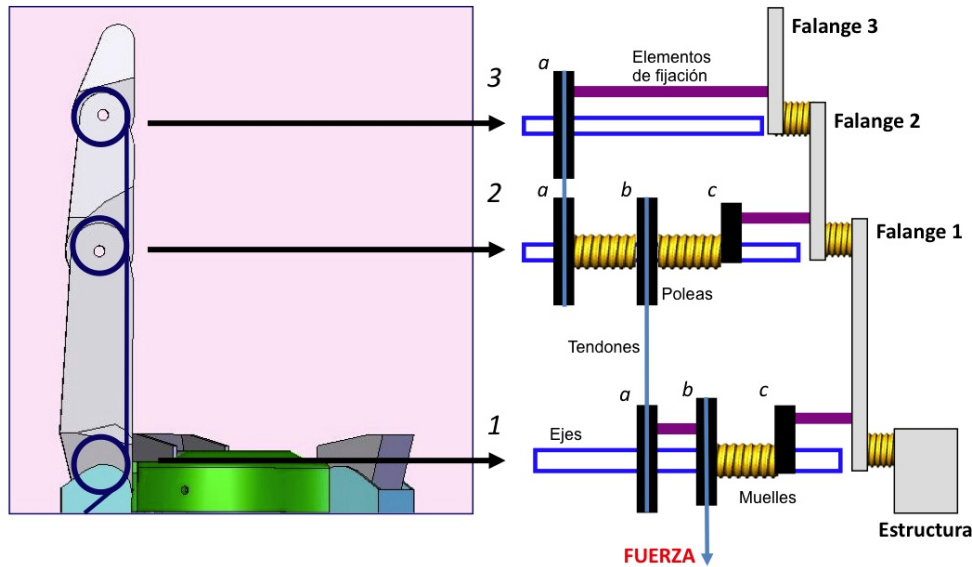


Figura 6.12: Estructura A: Concepto de funcionamiento

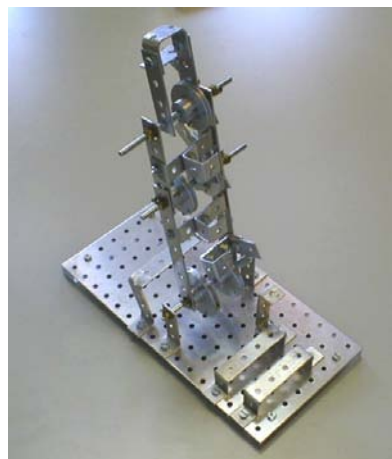


Figura 6.13: Estructura A: Prototipo fabricado

En la Figura 6.12 se puede observar el concepto de funcionamiento de la Estructura A propuesta.

La Estructura B es una variante del diseño hecho para la Graspar Hand [82], la que estaba compuesta por una serie de poleas por donde pasaban dos tendones: uno se usaba para el proceso de agarre y transmitía la fuerza del sistema accionador, mientras que el otro tendón era usado para el proceso contrario.

Como se comentaba anteriormente, para este caso no es necesario usar los dos tendones con lo cual se usa la misma configuración de poleas pero solo un tendón que hará que el dedo se cierre y sujete al objeto. Para efectuar el proceso inverso, se dispone en cada articulación de una serie de muelles que hacen que, cuando el tendón de agarre se relaje, estos muelles lleven al dedo a su posición original.

En este prototipo, en vez de usar tres tendones sólo se usa uno, que recorre todo el

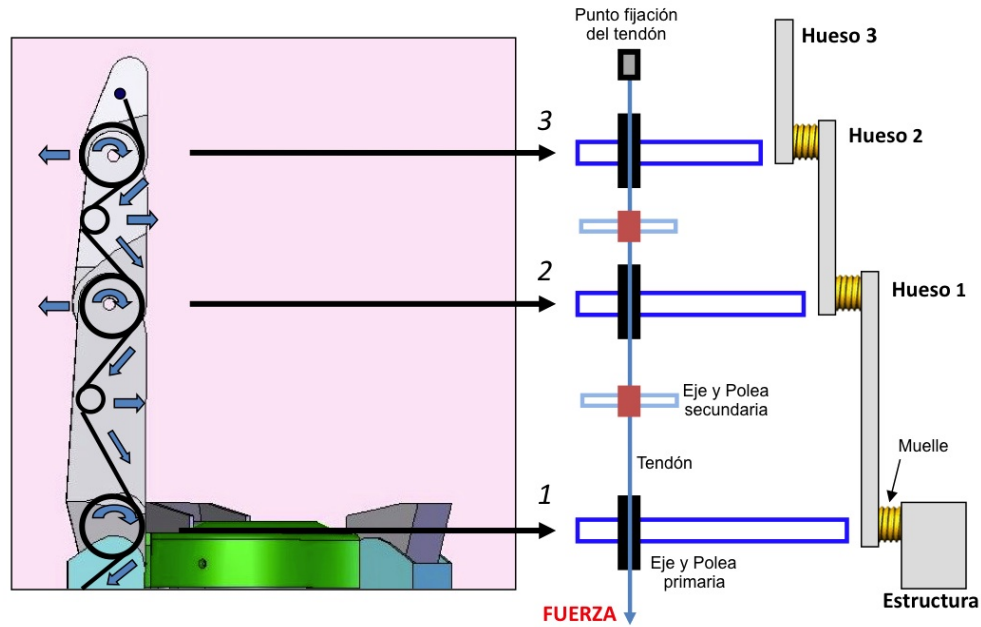


Figura 6.14: Estructura B: Concepto de funcionamiento

dedo pasando por las poleas primarias y las poleas secundarias (las primeras están en el eje de la articulación y las segundas en los ejes secundarios). La función de las poleas secundarias es hacer el recorrido del tendón de tal forma que cuando el sistema accionador actúe sobre el mismo, éste tienda a ponerse recto y así efectuar pares en las articulaciones. Las falanges giran hasta encontrar un tope y, debido a que ninguna polea es solidaria a su eje, es decir giran libremente, el tendón podría seguir actuando sobre las demás articulaciones, una vez que todas las falanges hayan encontrado un tope, momento en el que la acción del sistema accionador efectúa la fuerza correspondiente en todas las falanges para sujetar el objeto. En la Figura 6.15 se puede observar el prototipo fabricado.

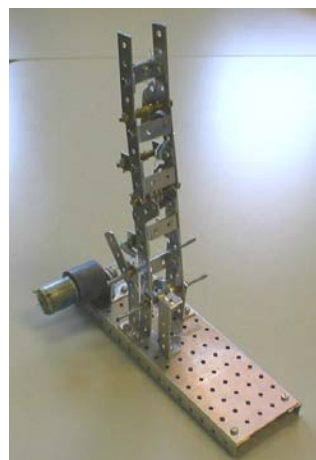


Figura 6.15: Estructura B: Prototipo fabricado

La opción finalmente adoptada es la configuración de la Estructura B, debido a que

ofrece mayor control respecto de la fuerza a realizar sobre el objeto y en cierta forma asegura que una vez que el sistema accionador se fija en su estado estático, la posición de las falanges permanece invariable.

En cualquier caso, el par que realiza cada falange sobre el objeto a sujetar no es controlable y por lo tanto tampoco se realiza de forma óptima aunque el objeto esté sujeto de forma segura. Si bien esta es una característica que no se puede cambiar, sí se puede analizar qué tamaños de poleas son necesarias y la ubicación de las mismas más adecuados para un rango de tareas. Con tal objeto se realizó en un primer momento dos aplicaciones que permitiesen de alguna forma analizar el funcionamiento de cada una de las articulaciones con curvas en función del diámetro de las poleas. En la Figura 6.16 se pueden observar las interfaces de dichas aplicaciones. Estas aplicaciones calculaban tanto la fuerza como el par generado influenciado por la posición y el diámetro de la polea [60].

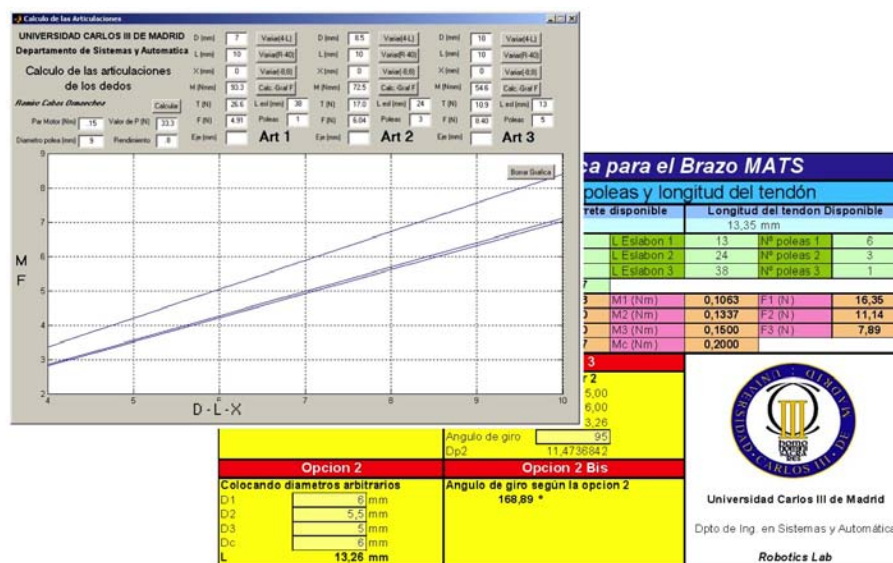


Figura 6.16: Aplicaciones desarrolladas para el dimensionamiento de las poleas del dedo

6.2.3.2. Sistema accionador

El sistema accionador de la RL1 debe dotar a los diferentes mecanismos de funcionamiento de los estados necesarios y con la calidad necesaria para que los mismos realicen su tarea.

En la RL1 existen dos mecanismos bien definidos:

- **Mecanismo de extracción de la mano:** Es el mecanismo que extrae la mano del interior del anclaje en su estado de reposo y lo lleva a su estado operativo fuera del mismo. Este mecanismo básicamente debe permitir un movimiento de traslación desde el interior del anclaje hasta que la mano esté completamente fuera
- **Mecanismo de accionamiento de la mano:** Es el mecanismo que realiza la apertura y cierre de la mano en sus tareas de agarre. Este mecanismo en cambio ofrece un movimiento de rotación, el cual una vez que la mano esté fuera del anclaje, posiciona los dedos en su estado operativo y luego realice la apertura y cierre de la misma.

Como se pudo observar en la Figura 6.10, el sistema accionador de la RL1 debe dar movimiento a ambos mecanismos simultáneamente. Dicho sistema accionador esta compuesto por un único transformador de energía.

Como ambos mecanismos no pueden estar en funcionamiento a la vez, y para que se simplifique la complejidad de los transformadores de estados o transmisores de movimiento, es posible implementar una dependencia mecánica que, dependiendo del estado en el que se encuentre la mano en cada momento, el transformador de energía solo dará movimiento a un mecanismo o a otro. Esta dependencia mecánica esta representada por un fusible mecánico reversible.

En la Figura 6.17 se puede observar los componentes que forman el mecanismo lineal de extracción de la mano. Básicamente formado por un husillo que traslada un plataforma en la que se encuentran fijados los dedos y el pulgar. Esta plataforma se mueve desde una plataforma principal, situada en la parte más baja del anclaje, hasta un soporte superior que hace a la vez de tope y fin de carrera de la plataforma de los dedos. Este husillo es accionado directamente por el transformador de energía que se encuentra fijado a la plataforma principal.

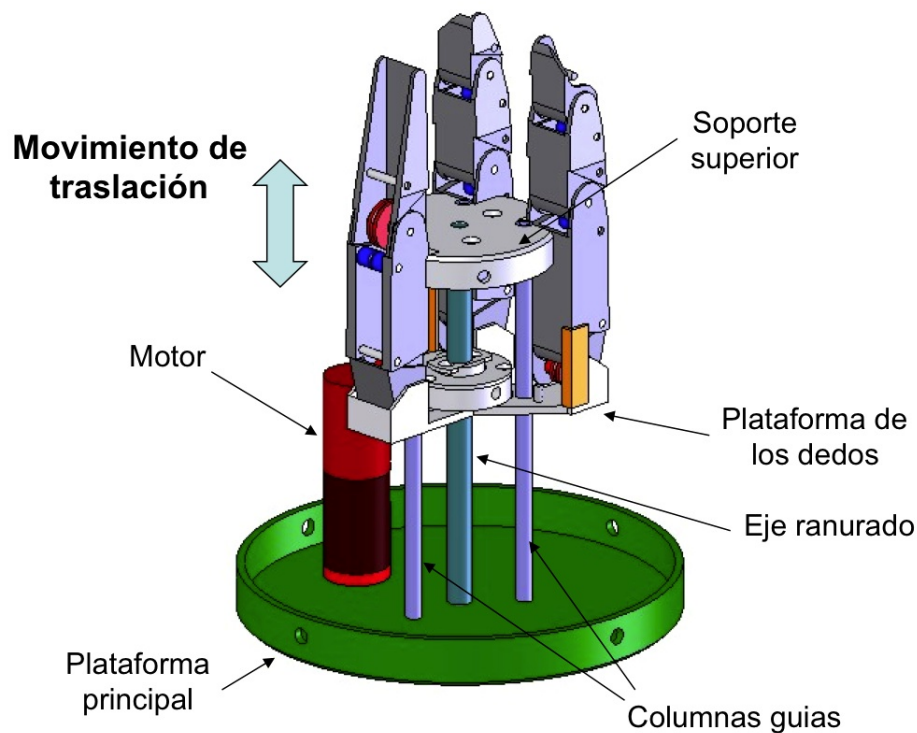


Figura 6.17: Componentes del mecanismo de extracción de la mano: movimiento de traslación

Una vez que la plataforma de los dedos alcanza la posición máxima superior, encontrando como tope al soporte superior, entra en funcionamiento el mecanismo de accionamiento de la mano. Esto sucede haciendo saltar un fusible mecánico reversible alojado sobre la plataforma de los dedos que a su vez aloja a la polea principal que contiene los tendones de los dedos y el pulgar. Una vez que se ha liberado el fusible mecánico, el eje central del husillo transmite el movimiento del transformador de energía directamente a la polea principal. Como en esta posición intermedia, los dedos y el pulgar se encuentran

rectos y paralelos entre si. En la base de cada fijación, se alojan unas cunas que debido a su configuración, realizan un movimiento contrario a cada dedo o pulgar. Por lo tanto el primer movimiento que realiza la polea principal es el de rotar estas cunas para que los dedos se posicionen en su estado operativo. Todo movimiento a partir de este estado, es el de accionar los tendones para realizar las tareas de agarre o relajarlos para liberar los objetos sujetos. En la Figura 6.18 se puede observar los componentes más importantes de este mecanismo.

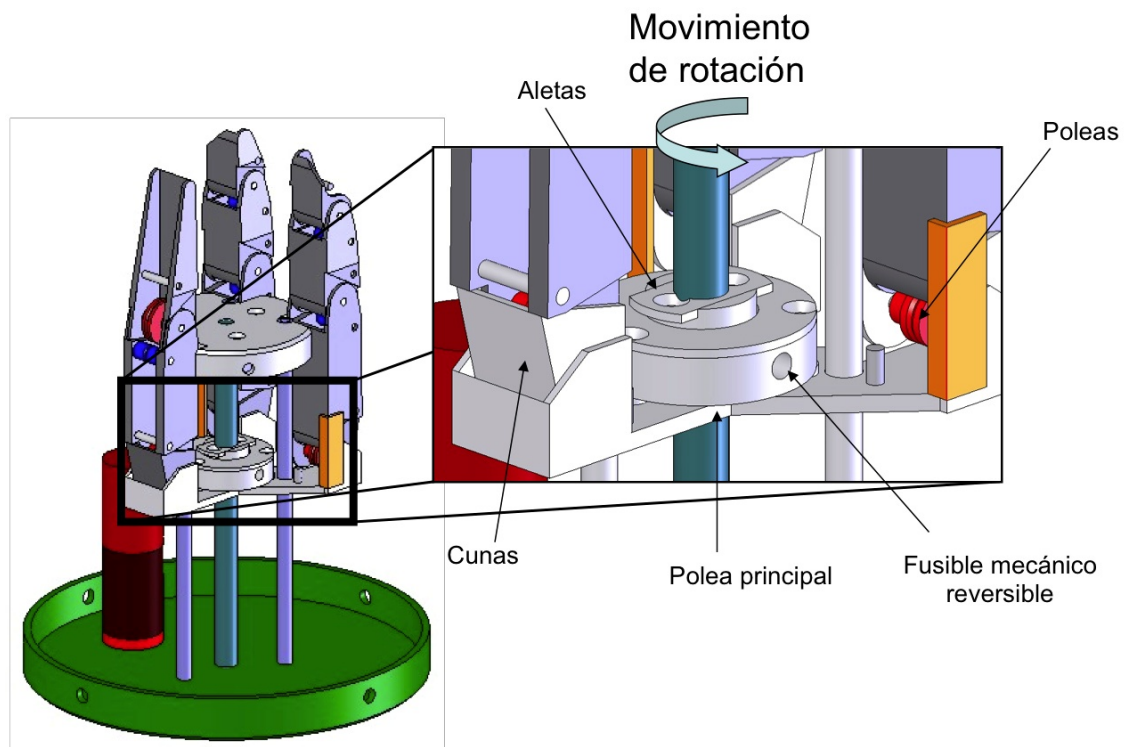


Figura 6.18: Componentes del mecanismo de accionamiento de la mano: movimiento de rotación

Para que puedan ser implementados estos mecanismos, era necesario que su tamaño sea muy pequeño y por lo tanto con un cierto riesgo de que no funcionase. Por tal motivo, se decidió fabricar un prototipo funcionalmente equivalente, pero con un tamaño superior. En la Figura 6.19 se puede observar el diseño 3D realizado para comprobar este subsistema y el prototipo fabricado.

Como el objetivo de este subsistema es el validar ambos mecanismos, sólo se consideró la funcionalidad hasta la primer falange de un dedo incluyendo la cuna del mismo, ya que a partir de este punto, la funcionalidad estaba validada con el prototipo conceptual realizado para los dedos.

6.2.3.3. Sistema de control

Como se comentó en la sección de especificaciones, el sistema de control de la RL1 debía ser independiente del sistema de control general del ASIBOT, dejando que este último solo envíe instrucciones de operación de alto nivel al sistema de control. Por tal motivo, la RL1 debía estar dotada de un microprocesador que permitiese tanto adquirir

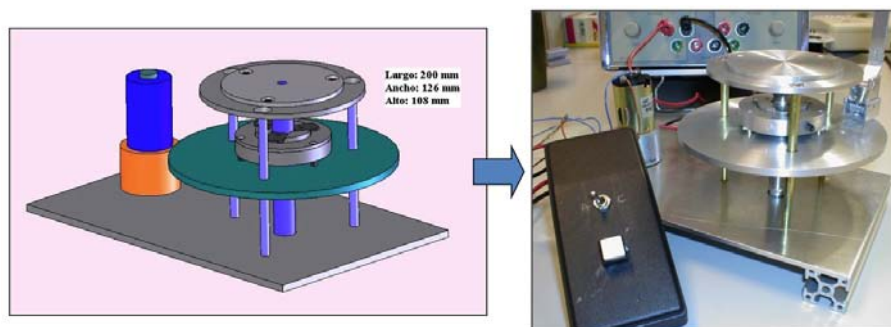


Figura 6.19: Prototipo de validación de los mecanismos

la información proveniente de todo el sistema sensorial de la mano como también ser capaz de recibir e interpretar instrucciones de alto nivel tal y como se puede ver en la Tabla 6.1.

Tabla de Instrucciones	
Instrucción	Acción
man.	Lleva los dedos del estado de reposo al estado operativo
sop.	Lleva los dedos del estado operativo al estado de reposo
aga.	Cierra los dedos para producir el agarre de un objeto
sol.	Abre los dedos después de agarrar un objeto
pau.	Da una pausa al proceso que se esté realizando
con.	Continúa con el proceso
end.	Da fin al proceso
FOR.	Motor gira en sentido positivo
REV.	Motor gira en sentido negativo
STP.	Parada directa del motor
FRE.	Parada libre del motor
MED.	Mide la corriente del motor
POS.	Lee el estado de los tres sensores de posición
CAR.	Solicita las características del programa
FZAxx.	Establece un porcentaje de fuerza y gira en sentido positivo
ain.	Ejecuta la función del agarre automático
ainxx.	Ejecuta la función de agarre automático con control de fuerza

Cuadro 6.1: Instrucciones generales disponibles de la IDC

Para probar el concepto del sistema de control de la RL1 se desarrolló un sistema electrónico a nivel de placa prototipo y una interfaz de usuario que permitiese no sólo programar el microprocesador sino que también pudiese simular todas las condiciones de funcionamiento del sistema, denominada Interfaz Directa de Control o IDC (Figura 6.20).

La IDC esta compuesta por seis partes:

- Transmisión y recepción de instrucciones:** En esta parte se agrupan las funciones elementales de comunicación con la IDC. Es donde se escriben las instrucciones a mano y luego se prueba la respuesta recibida por el sistema. Tiene dos formatos

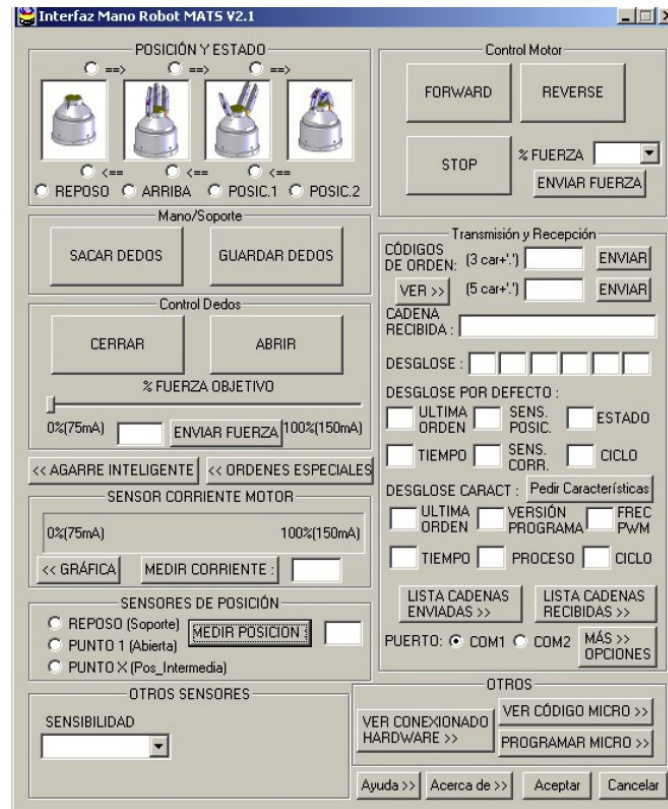


Figura 6.20: Interfaz Directa de Control de la RL1

de instrucciones, uno resumido de tres caracteres para las ordenes directas y otro de cinco caracteres para las ordenes que necesiten un valor de funcionamiento.

- **Control directo del motor:** Controla la dirección y par del motor de forma directa y sin considerar el valor de los sensores.
- **Control de la pinza y sus dedos:** Esta representado por botones que simulan las instrucciones que puede enviar el sistema de control general del ASIBOT. Estas instrucciones están asociadas a un conjunto de ordenes pre-programadas de las cuales es importante conocer los valores que los sensores van tomando en el tiempo.
- **Control del estado de los sensores:** Controla, analiza, gestiona y configura los sensores de la RL1.
- **Posición y estado de la pinza:** Visualiza de forma gráfica el estado en el cual se encuentra la pinza. No sólo visualiza estados concretos sino que también lo hace si la RL1 se encuentra en transición entre dos estados concretos.
- **Otras funciones especiales:** Es la parte de la IDC que permite programar funciones, ordenes o instrucciones concretas para ser analizadas.

6.2.4. Diseño y desarrollo de la Mano Robótica RL1

Una vez desarrollada y probada la viabilidad de todos los subsistemas de la RL1, se procede al diseño final de la mano la cual debería integrar todos los subsistemas

exceptuando el sistema electrónico y de control.

En la Figura 6.21 se puede observar la configuración y diseño final de los dedos. Cada dedo tiene 3 falanges más una cuna exceptuando el pulgar que unifica las falanges dos y tres en una única falange de tamaño superior manteniendo la falange uno idéntica. Como se puede observar, todo el largo del dedo se ha construido como perfil U, esto tiene como objetivo facilitar el montaje de todos los elementos internos y colocar los ejes de todas las poleas con dos apoyos, haciendo más efectiva y sólida su resistencia.

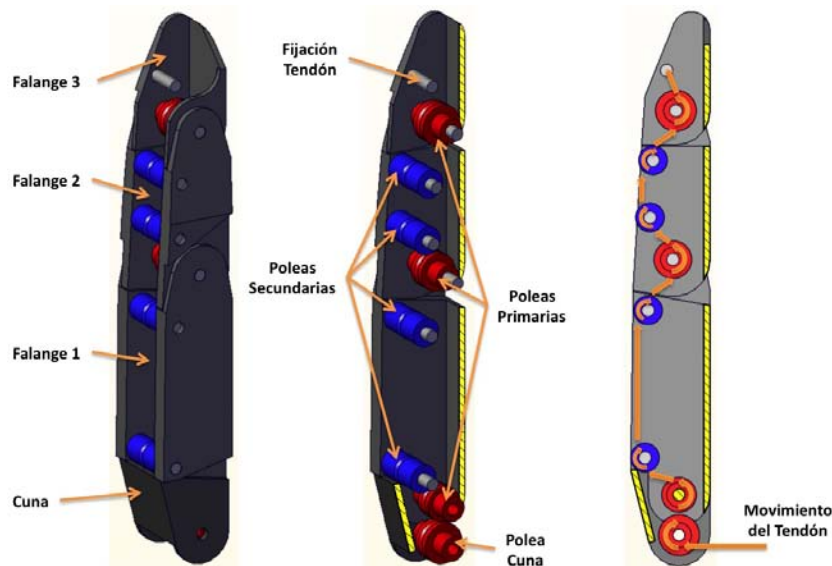


Figura 6.21: Diseño definitivo del dedo de la RL1

La última falange, ha tenido que ser recortada y adaptada a la superficie externa del anclaje. Esto es debido a que el alojamiento de la mano en el interior del anclaje o sea, su posición de reposo, obliga a los dedos a colocarse de forma paralela y recta (Figura 6.22). Por tal motivo y para aprovechar una longitud mayor de los dedos, han tenido que ser adaptado. Esta modificación no ha generado disminución de la eficiencia del agarre.

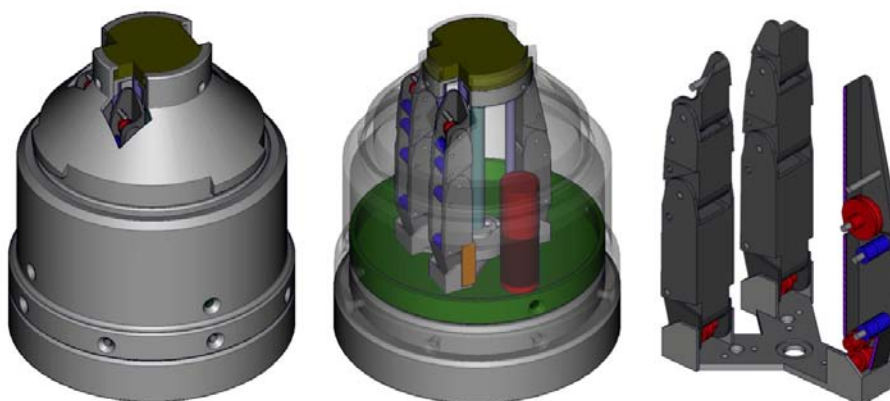


Figura 6.22: La RL1 alojada en el interior del anclaje

Como se comentó en párrafos anteriores, los dedos y el pulgar se encuentran alojados en unas cunas. La función principal de estas cunas es la de permitir a los dedos permanecer

en una posición paralela y recta dentro del anclaje sin necesidad de tener que actuar con ellos. Como se observa en la Figura 6.21, la polea de la cuna hace pasar el tendón en sentido inverso, por tal motivo la articulación correspondiente a la cuna gira en sentido contrario que las demás articulaciones.

Otro objetivo de la cuna es conseguir que el sistema de accionamiento de la RL1 consiga que todas las posiciones y acciones se consigan girando el transformador de energía en un único sentido y permite que la mano pase de una posición de reposo a una posición operativa lista para hacer la acción de agarre a través de diferentes mecanismos de transformación de estados del transformador de energía.

El sistema de extracción definitivo de la mano se puede observar en la Figura 6.23. En dicha figura se aprecian todos los elementos que lo componen que constan de una plataforma móvil denominada plataforma principal que se mueve en una única dirección guiada a través de las columnas guías. Un eje ranurado central que transmite el movimiento del transformador de energía y el mecanismo selector de estados que es solidario a la plataforma principal, hacen que la misma pueda subir y bajar posicionando a los dedos fuera o dentro del anclaje.

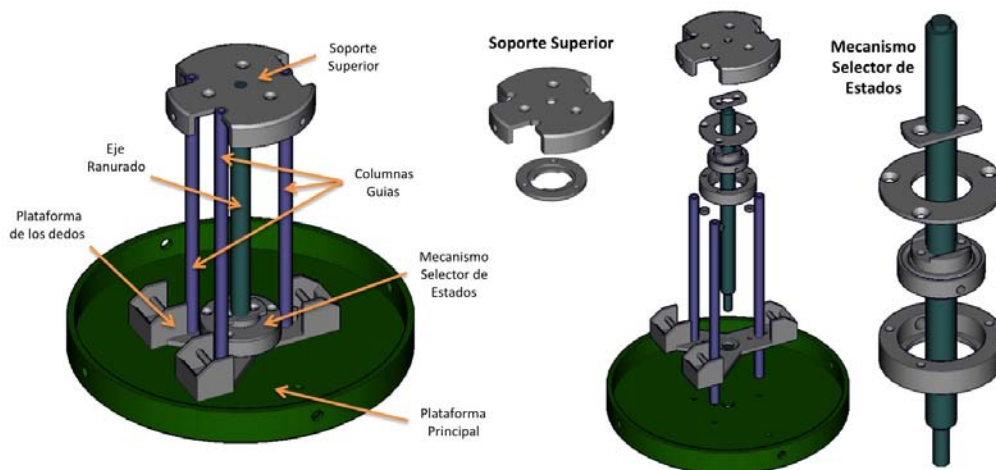


Figura 6.23: Mecanismo de extracción de la RL1

El mecanismo selector de estados, gracias a un fusible mecánico alojado en su interior, hace que el mismo pase de ser el núcleo de un husillo que se deslice sobre el eje ranurado central a una polea que contiene los tendones de los tres dedos y que transmite el momento generado por el transformador de energía, a cada una de las articulaciones de los mismos cuando la plataforma principal encuentra un tope en el soporte superior. En la Figura 6.24 se observa el resultado final de la RL1 desarrollada.

Este conjunto de mecanismos hace que el sistema accionador de la RL1 compuesto por un único AME permita a la misma pasar por diferentes posiciones, desde el alojamiento en reposo dentro del anclaje, hasta el accionamiento de los dedos y el pulgar para sujetar un determinado objeto. La Figura 6.25 muestra dichas posiciones.

Finalmente en la Figura 6.26 muestran a la RL1 realizando tareas de agarre de diferentes tipos de objetos con formas y tamaños de forma óptima.



Figura 6.24: Desarrollo final de la RL1

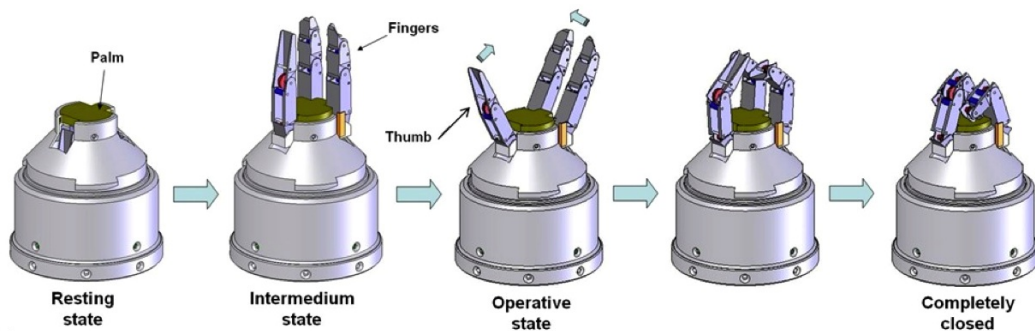


Figura 6.25: Posiciones que adopta la RL1 a través de los diferentes estados ofrecidos por el sistema accionador

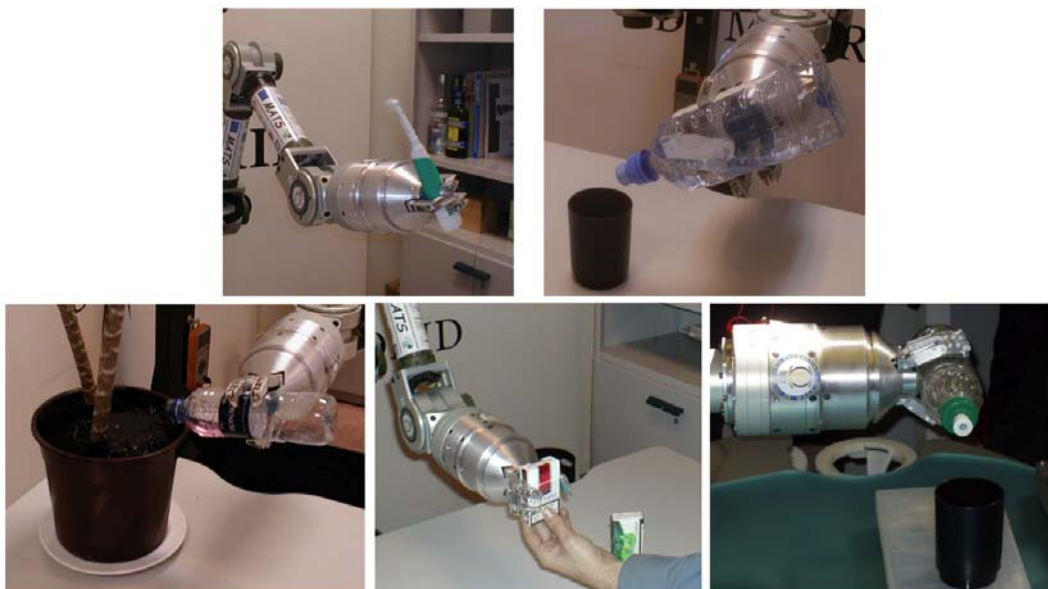


Figura 6.26: La RL1 realizando tareas de agarre de diferentes tipos de objetos

6.3. Mano Robótica RL2

La Mano Robótica RL2, de ahora en adelante RL2, es la segunda versión de la RL1 con ligeras modificaciones a nivel de objetivo funcional, pero con grandes cambios en lo

que se refiere a optimización, estructura y funcionalidad a nivel de tareas de agarre firme.

La RL2 ha sido diseñada para ser montada en la nueva versión del ASIBOT, el cual básicamente difiere del anterior en aspectos de sistema de control, sistemas sensoriales y capacidad de recursos computacionales sin que esto modifique de forma alguna su estructura mecánica. Por tal motivo, los requisitos pre-establecidos para la RL2 son los mismos que para la RL1.

En base a la experiencia obtenida con la RL1, en la RL2, se busca aumentar la funcionalidad de la mano en lo que se refiere a formas y tamaño de objetos a sujetar. La RL1 podía sujetar de forma correcta objetos que puedan ser envueltos o parcialmente envueltos por la misma como objetos cilíndricos, prismas alargados, etc., en cambio cuando se trataba de objetos planos (ie. libros o cajas) o cilíndricos alargados en los que su sección era menor a cierto umbral (ie. un lápiz) la fiabilidad de su sujeción era incierta e inestable. Como estos objetos anteriormente mencionados son de uso cotidiano, uno de los objetivos principales del diseño de la RL2 fue mejorar la fiabilidad de este agarre.

Si bien el aumentar la cantidad de falanges a una mano robótica aumentaba la probabilidad de conseguir mayor cantidad de puntos de contacto entre la mano robótica y el objeto, y por lo tanto, aumentar la firmeza del agarre, si no se tiene control sobre todos los grados de libertad de forma independiente. Esta teoría es solo válida para un determinado rango de formas y tamaños de objetos. En la RL2 se planteó una nueva configuración de los elementos ya que se pueden quitar elementos sin que esto disminuya la fiabilidad del agarre y sin embargo permitir mayor funcionalidad a la mano incorporando nuevos mecanismos pasivos.

Dos fenómenos negativos relacionados con las manos robóticas subactuadas son el *roll back phenomenon* y el *ejection phenomenon* (Figura 6.27) [39].

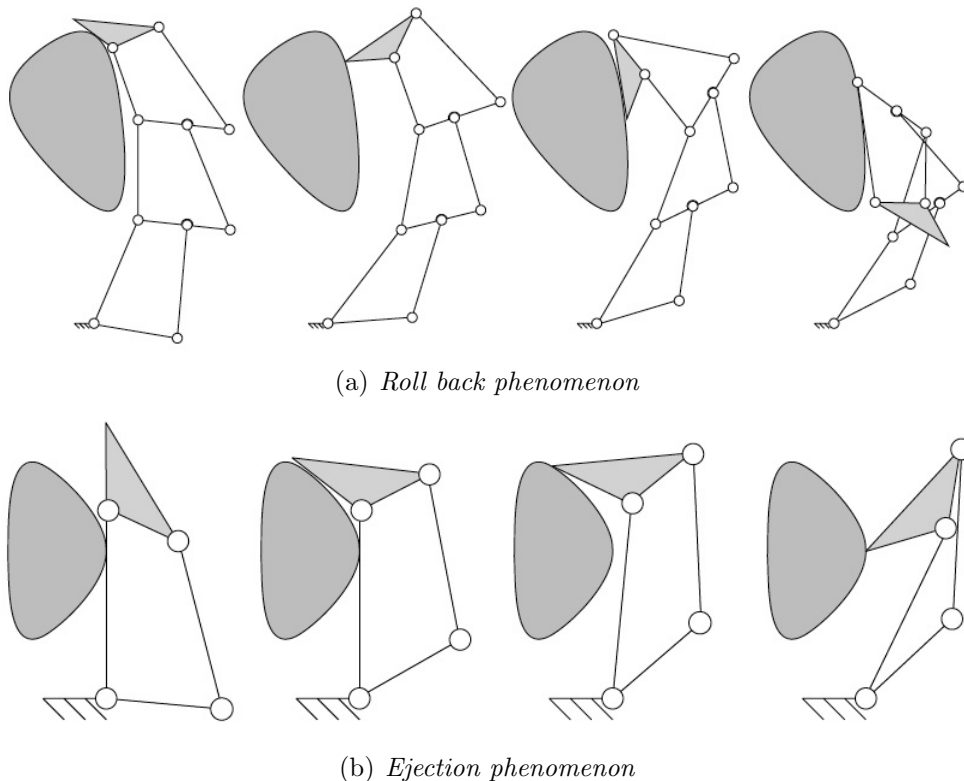


Figura 6.27: Fenómenos negativos en las manos robóticas subactuadas

El *roll back phenomenon* es un fenómeno que aparece en las manos robóticas subac-



tuadas que tienen una gran cantidad de GDL y por cuestiones de diseño la última falange es capaz de realizar un par elevado antes de que el objeto esté sujeto de forma equilibrada con los demás elementos. Por lo tanto la misma se desliza sobre el objeto y comienza a cerrarse sobre sí misma sin producir un punto de contacto y haciendo totalmente ineficaz el agarre del elemento completo.

En cambio el *ejection phenomenon* o efecto de pinchamiento del objeto se produce cuando la última falange no alcanza a realizar un *roll back* porque se detiene en un punto en que el objeto no lo permite pero consigue ejercer un esfuerzo sobre el mismo. El problema radica en que el punto de contacto no es efectivo e inestable por lo tanto dependiendo de la posición del objeto a sujetar este puede desprenderse.

Estos dos fenómenos fueron identificados con ciertos objetos en la RL1 y por lo tanto debían ser corregidos en la RL2. Una de las soluciones podría haber sido aumentar el tamaño de la última falange, pero con la limitación de espacio la única alternativa para conseguir esto era reducir el tamaño de las falanges anteriores con la desventaja de que se podía reducir el tamaño de los objetos a sujetar. La otra opción y, la que finalmente se adopta, es la de eliminar la última falange y equilibrar la longitud de esta en las otras dos.

El sistema de transmisión de fuerza a través de tendones y poleas adoptado en la RL1, dio muy buenos resultados, sin embargo era muy poco eficiente ya que solo una pequeña porción de la fuerza ejercida por el motor llegaba de forma efectiva a cada articulación. Este punto ha sido cuidado en este nuevo diseño mejorando la eficiencia de la transmisión con el consecuente ahorro de energía.

Uno de los puntos más importantes que diferencian la RL1 de la RL2 es la tecnología usada para la fabricación de la estructura. Con la aparición de las impresoras 3D con una gran cantidad de procesos diferentes, con materiales diferentes y calidades diferentes, es donde se ha marcado la diferencia entre los dos diseños, ya que la RL2 aprovecha esta ventaja que permite utilizar materiales aun más livianos, aunque menos resistentes, pero con la propiedad de diseñar formas complejas que rigidizan su estructura con un resultado final equivalente.

A continuación se definirán los requisitos y características de diseño que diferencian la RL2 de la RL1 aprovechando toda la experiencia adquirida con la RL1.

6.3.1. Definición de requisitos

A nivel estructural, el ASIBOT, se mantiene intacto y su funcionalidad a nivel de entornos y tareas en los que se va desempeñar es la misma, por lo tanto los requisitos funcionales que se exigen a la RL2 se mantienen intactos con respecto a los exigidos para la RL1.

Como se comentó anteriormente el objetivo del nuevo diseño de la RL2 básicamente está enfocado a mejorar la eficiencia, las prestaciones y la funcionalidad de la RL1 partiendo como base la experiencia conseguida de esta última. Por lo tanto para definir el camino a seguir para cumplir con las modificaciones propuestas y re definir la configuración estructural de la RL2, se analizaron cada una de las características de diseño y las conclusiones para cada punto se detallan a continuación.

- **Cantidad de dedos:** Con respecto a la cantidad de dedos, se mantiene la misma configuración que en la RL1, un pulgar y dos dedos opuestos, ya que el espacio útil interior del anclaje se mantiene y no hay lugar para un nuevo elemento.



- **Palma:** En el caso de la palma, se mantuvieron las mismas funcionalidades que en la RL1 con leves modificaciones a nivel de diseño.
- **Número de GDLs y GDLs actuados:** A nivel de configuración de los dedos se ha quitado un GDL activo a cada dedo, por lo tanto se obtienen seis GDL activos. Sin embargo, se incorpora un GDL pasivo a cada elemento (dedos y pulgar). Este GDL pasivo permite en determinadas ocasiones y dependiendo del objeto a sujetar, cambiar el sentido de la superficie de contacto de forma que la misma pudiese orientarse a superficies planas paralelas y de esta forma conseguir adaptarse a objetos como libros, cajas o elementos que posean dos de sus superficies, paralelas o casi paralelas. Por otro lado, este GDL pasivo, al final del recorrido de cada una de las articulaciones de cada dedo, puede incluso adaptarse de tal forma que permita sujetar un objeto de diámetro prácticamente cero. En lo que se refiere a GDLs actuados, se mantiene la misma filosofía de un único sistema accionador compuesto por un único actuador que otorgue el movimiento y esfuerzo necesario a todos los GDLs activos de la mano. En resumen, la nueva configuración estará compuesta por seis GDLs activos y tres GDLs pasivos.
- **Tipos de actuadores:** Se mantiene el mismo tipo de actuador ya que las características de funcionamiento en el caso de la RL2 es exactamente el mismo que para la RL1.
- **Tipo de transmisión de fuerza:** Se mantiene el mismo tipo de transmisión de fuerza, la única diferencia es que se ha tomado con mayor cuidado la eficiencia del mismo. En este aspecto se realizaron estudios de optimización de ubicación de las poleas [61].
- **Mecanismos:** La filosofía de los mecanismos se ha mantenido. La única diferencia entre ambas versiones es a nivel de diseño de los componentes y en la optimización de espacio y su funcionalidad.
- **Tipo de sensores:** Con respecto al tipo de sensores a implementar, se ha mantenido la misma tecnología ya que al igual que en el modelo RL1, al no tener control sobre cada articulación, no es necesaria una alta precisión. Sin embargo, se ha duplicado la cantidad a implementar, básicamente para poder de alguna forma no sólo saber la fuerza que está realizando cada falange sobre el objeto sino también la ubicación dentro de la misma.
- **Materiales estructurales:** A nivel de material estructural, exceptuando los ejes de las poleas que se hicieron de acero y algún elemento estructural crítico que se eligió el aluminio y el latón, se optó por la poliamida en todas las piezas componentes de los elementos. Si bien la resistencia mecánica de la poliamida es mucho menor que la del aluminio, ayudados por el método de fabricación se diseñaron piezas más complejas de forma que la rigidez de cada una era equivalente.
- **Métodos de fabricación:** El método de fabricación elegido fue la impresión en 3D, exceptuando los ejes de las poleas que se han elegido barras calibradas, y otros elementos complementarios que se los fabrica a través de mecanizado convencional.

6.3.1.1. Análisis funcional del sistema accionador

El sistema accionador para la RL2, en su principio de funcionamiento, es idéntico que para el caso del de la RL1. Por lo tanto el mismo está compuesto por un transformador de energía y dos mecanismos accionadores, el MA_1 y el MA_2 . Los mecanismos continúan manteniendo su dependencia mecánica y sólo existen diferencias en lo que se refiere a la configuración de los elementos que son movidos y en la incorporación de GDLs pasivos. El grado de accionamiento ϑ del sistema para la RL2 es

$$\vartheta_{RL2} = 6^1 \implies \vartheta_{RL2} = 6$$

En la Figura 6.28 se puede observar el diagrama simplificado del sistema accionador de la RL2.

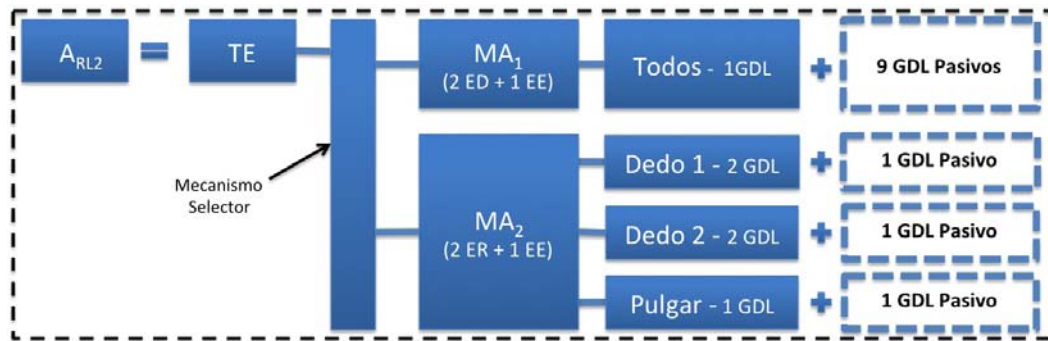


Figura 6.28: Diagrama simplificado del sistema accionador de la RL2

Al igual que para la RL1, el único transformador de energía del sistema provee de movimiento al selector mecánico que traslada dicho movimiento al MA_1 o al MA_2 dependiendo de la posición en la que se encuentre la mano.

El MA_1 dota de movimiento a toda la mano y hace que la misma cambie de posición desde dentro del anclaje hasta el exterior de la mano. Pero en este caso, cuando la mano está completamente fuera del anclaje, la misma se encuentra ya en su posición operativa y esto es gracias a que todos los GDLs de los dedos en esta fase actúan como pasivos adaptándose a medida que se van moviendo. Aún así, la RL2 funciona como un mecanismo actuado según la Ecuación 5.1 para el caso especial en el que posee un único GDL y por lo tanto corresponde a una pinza robótica.

$$n_{GDL} = n_{act} \iff n_{GDL} = 1$$

El MA_2 , en este caso sólo es el encargado de realizar las tareas de sujeción de objetos y a pesar de que la configuración de los dedos haya cambiado sigue manteniendo las propiedades de una mano robótica subactuada, ya que posee un único actuador con 6 GDL dividido en tres elementos. Por lo tanto en este aspecto la RL2 funciona como un mecanismo subactuado según la Ecuación 5.2.

$$n_{GDL} > n_{act}$$

En cada dedo, la RL2 posee un GDL pasivo. Éste GDL como se comentaba en secciones anteriores, dota a la mano robótica de una mayor funcionalidad. Ésto no es a causa

de su sistema accionador con lo cual el grado de funcionalidad teórico ϱ_{RL2_t} para el funcionamiento correcto de la RL1 sigue siendo menor que el grado de funcionamiento real ϱ_{RL2_r} desarrollado. Por lo tanto, a pesar de que ambos sistemas accionadores tengan el mismo grado de accionamiento ϑ , sus grados de funcionalidad se mantienen diferentes.

$$\vartheta_{RL2_t} = \vartheta_{RL2_r} \longrightarrow \varrho_{RL2_t} < \varrho_{RL2_r}$$

6.3.2. Subsistemas

Como la RL2 estaba básicamente enfocada a la optimización de los subsistemas de la RL1, y dentro de los cuales la que ha sufrido cambios radicales es la configuración del dedo principal, sólo se realizó un prototipo previo del mismo cuyo objetivo principal era comprobar la calidad de fabricación de la impresión 3D, su precisión y una viabilidad funcional preliminar.

6.3.2.1. Dedo principal

Como se comentaba en secciones anteriores, para el diseño de la RL2 se cambió radicalmente la configuración de los elementos activos como los dedos y el pulgar. Para esto se quitó la última articulación activa y se la reemplazó por una articulación pasiva de sentido contrario.

En la Figura 6.29, se puede observar el nuevo esquema de funcionamiento de esta configuración.

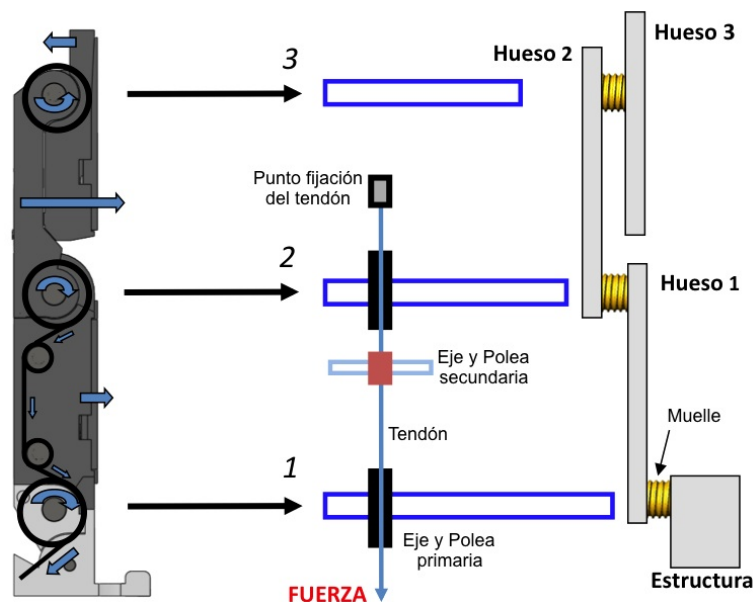


Figura 6.29: Concepto de funcionamiento de un dedo de la RL2

La estructura del dedo de la RL2 está compuesta por sólo 2 poleas activas o primarias ya que se ha quitado la última articulación activa con respecto a la configuración del dedo de la RL1. El funcionamiento sigue siendo el mismo que para el caso de la RL1. La articulación pasiva que se ha agregado corresponde a la falange 3. Esta última falange

pasiva puede funcionar de dos formas diferentes según donde esté ubicado el punto de contacto con el objeto en la tarea de agarre: si está por debajo del eje 3 o si está por encima del mismo.

Para el caso en que el punto de contacto con el objeto esté por debajo del eje 3, y al estar la falange 3 estructuralmente por encima de la falange 2, hace que esta última nunca entre en contacto con el objeto y funcione de forma solidaria a la misma. A nivel funcional esto es equivalente a un dedo con dos falanges y dos articulaciones.

En cambio, cuando el punto de contacto es por encima del eje 3, y al ser la articulación 3 una articulación pasiva que se mantiene en su posición gracias a un muelle, la fuerza realizada en dicho punto de contacto genera un par en la articulación 3 que mueve la última falange en sentido contrario haciendo que se desprenda de la falange 2. Si este efecto es similar en los otros dedos de la mano, al final del recorrido es posible conseguir unas superficies de contacto paralelas entre los mismos. Esta propiedad hace que la mano pueda sujetar objetos planos como por ejemplo libros, cajas, etc.

La RL2 posee un pulgar y dos dedos opuestos, como se comentaba anteriormente los tres dedos son, a nivel configuración, exactamente iguales. La única diferencia que existe entre los dedos, y el pulgar es que este último es un poco más ancho y su falange 3 un poco más larga.

En la Figura 6.30 se puede observar el prototipo construido del dedo para probar la viabilidad de su funcionamiento.

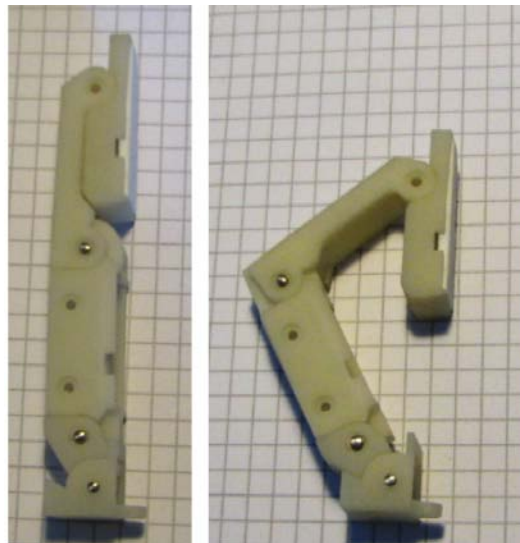


Figura 6.30: Prototipo del dedo de la RL2

6.3.2.2. Sistema accionador

Para el caso del sistema accionador de la RL2, no se realizaron subsistemas pero se modificaron los siguientes aspectos funcionales:

- **Optimización del sistema de transmisión de fuerza:** La optimización de la transmisión de los mecanismos se basó en la reducción al máximo del rozamiento de sus elementos. En el sistema accionador fabricado para la RL1 éste era un punto crítico ya que exigía demasiado al transformador de energía y la fuerza final efectiva

en cada falange era un pequeño porcentaje de la real. Para llevar a cabo esta optimización, se mejoraron los elementos que componían el sistema de movimiento de traslación, los elementos que alojan el fusible mecánico reversible y la polea principal y finalmente se colocaron poleas en toda la trayectoria de los tendones, algo que en la versión de la RL1 no estaba implementado.

- **Movimiento de las cunas de forma automática:** Para que la mano pasase del estado de reposo al estado operativo, en la versión de la RL1 colocó un estado intermedio para que la transición del movimiento entre ambos mecanismos estuviese representada. En base a un análisis se concluyó que este estado podía ser evitado y que la mano, a medida que va saliendo del anclaje, vaya posicionándose en el estado operativo de forma que cuando el movimiento de traslación de la mano llegase a su punto máximo superior, la mano ya se encuentre lista para ser utilizada. Esto por otro lado ahorra tiempo de operación y energía al sistema accionador.

En la siguiente sección se mostrará con más detalle cómo ha sido posible estas mejoras en el sistema accionador de la RL2.

6.3.3. Diseño de la Mano Robótica RL2

El diseño de la RL2, como evolución de la RL1, presenta una gran modificación que hacen que la misma tenga un rendimiento energético mayor y a su vez le aumente la funcionalidad a la mano con la incorporación de una falange con articulación pasiva, entre sus características principales.

Como se puede observar en la Figura 6.31, el dedo de la RL2 posee tres articulaciones: dos activas y una pasiva. Esta última articulación pasiva es la que permite a la RL2 tener una funcionalidad mayor referida al agarre de objetos planos como libros y cajas de forma más eficiente ya que la misma, a medida que se va realizando el cierre de los dedos, se va posicionando de tal forma que la última falange giran en sentido contrario y se colocan con sus superficies de contacto paralelas.

En el interior del dedo, se puede observar cómo en este caso, el tendón sólo llega hasta la segunda articulación para darle movimiento a la segunda falange. Si bien la ubicación de las poleas en interno no corresponde a la posición óptima tal y como se demostró en apartados anteriores, por cuestiones de espacio no ha sido posible agregar o posicionar las mismas de otra forma.

Otra mejora considerable que ha incorporado el dedo de la RL2 es el alojamiento de dos sensores de fuerza en las superficies de contacto, debajo de la misma. Esta configuración no sólo permitirá que se pueda medir la fuerza realizada con dicha superficie sino que a su vez, a través del valor que tome cada uno de los sensores de la misma falange, es posible calcular la posición longitudinal del punto de contacto, un avance importante para el conocimiento y el posible aprendizaje de tareas repetitivas. Para que la señal de los sensores o, mejor dicho, los cables que conducen las mismas hacia el sistemas de control, no corran peligro de deteriorarse o de romperse con el movimiento interno del tendón o de las poleas que lo conducen, el interior de cada falange ha sido dividida longitudinalmente en dos compartimentos, uno de los cuales contiene todos los cables de señal, y el otro todas las poleas y mecanismos necesarios para el accionamiento de las articulaciones.

Al igual que en la RL1, los dedos y el pulgar de la RL2 se encuentran sobre unas cunas que son las que permiten a la mano posicionarse dentro del anclaje con una configuración y luego, cuando es extraída del mismo, poder posicionarse para realizar tareas de agarre.

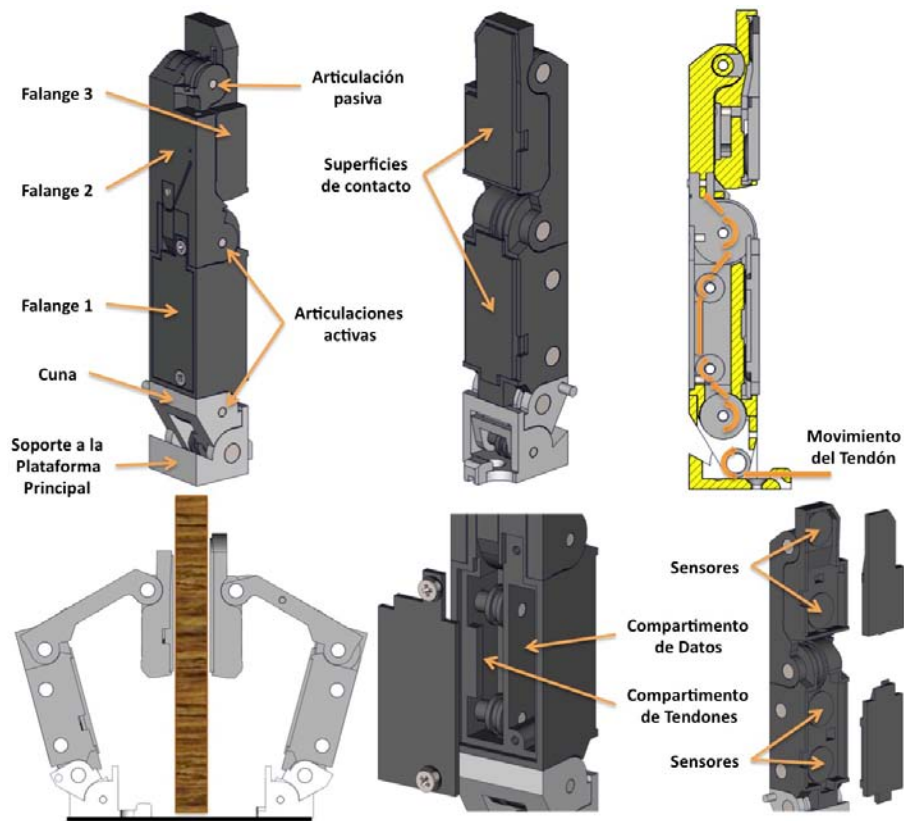


Figura 6.31: Diseño definitivo del dedo de la RL2

En este caso, estas cunas no necesitan ser accionadas, sino que se encuentran libres y van tomando diferentes posiciones a medida que los dedos son extraídos del anclaje (Figura 6.32). Para que esto sea posible, existen unas guías que hacen que cada cuna se vaya deslizando y posicionando al dedo de forma que tomen las diferentes configuraciones en cada momento. Uno de los motivos más importante por el cual se ha optado por este diseño, es que para aprovechar aun más el espacio libre dentro del anclaje, los dedos dentro del mismo se encuentran en una posición particular con sus articulaciones realizando una rotación. Aún así, los dedos mantienen un pequeño chaflán en su última falange para que el mismo no salga de la superficie exterior del anclaje

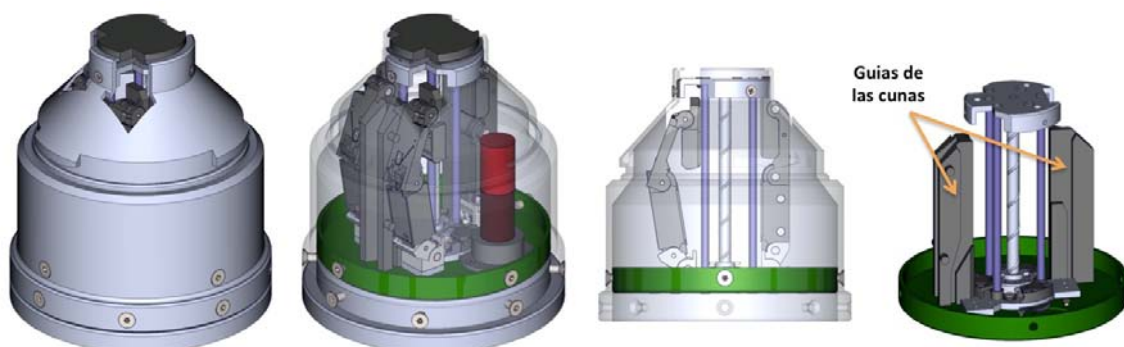


Figura 6.32: Posición de la RL2 dentro del anclaje

El sistema de extracción de los dedos de la RL2, mantiene prácticamente intacto su filosofía de funcionamiento ya que los resultados obtenidos en la RL1 han sido satisfactorios. En este caso el diseño sólo se ha centrado en el rendimiento energético del transformador de energía. Para tal caso, se han colocado poleas en todo el trayecto de los tendones, evitando al máximo que los mismos pasen por superficies que generen rozamientos innecesarios. En la Figura 6.33 se puede observar las modificaciones realizadas para este diseño y un despiece del mismo.

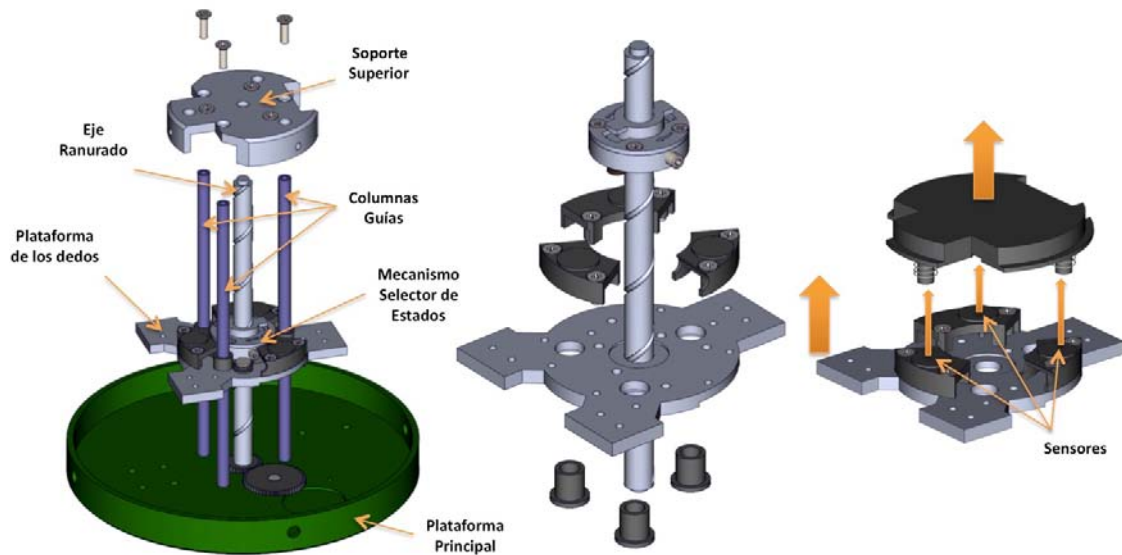


Figura 6.33: Sistema de extracción de la RL2

Otra de las novedades que presenta este diseño es la incorporación de tres sensores de fuerza para la palma de forma tal de que no sólo permita conocer el valor de la fuerza realizada contra la misma, sino que también su posición en el plano dependiendo de la fuerza medida en cada uno de estos tres puntos. Estos tres sensores están posicionados en el mecanismo selector de estados del AME el cual, cuando la Plataforma Principal es extraída, entran en contacto con la palma y a su vez ésta es expulsada para que pueda taponar los contactos del ASIBOT.

Con respecto al sistema accionador, a parte de optimizar todo el mecanismo del selector de estados y hacerlo un poco más pequeño, se ha mejorado la transmisión de movimiento entre el transformador de energía y el eje ranurado central. Para esto se ha colocado una transmisión a través de engranajes dotándolo de más precisión en su posicionamiento y evitando resbalamientos que se producían en la transmisión por correas en la versión del RL1 (Figura 6.34).

Como se ha comentado anteriormente, la implementación de unas cunas libres que vayan tomando determinadas configuraciones desde su posición de reposo hasta su posición operativa hace que la posición intermedia no sea necesaria. Con lo cual la secuencia de extracción de la RL2 hasta la acción de cerrado se puede observar en la Figura 6.35.

Como resultado de todas estas mejoras y modificaciones realizadas en la Figura 6.36 se puede observar el resultado final del diseño.

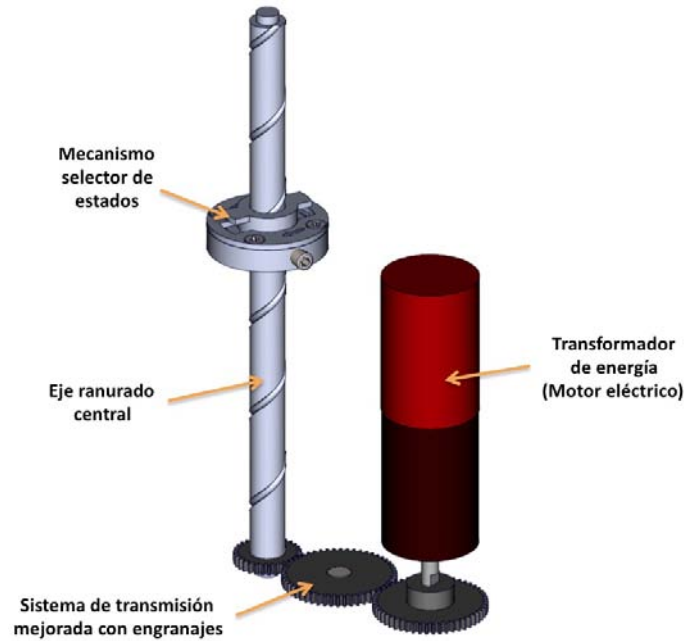


Figura 6.34: Sistema accionador de la RL2

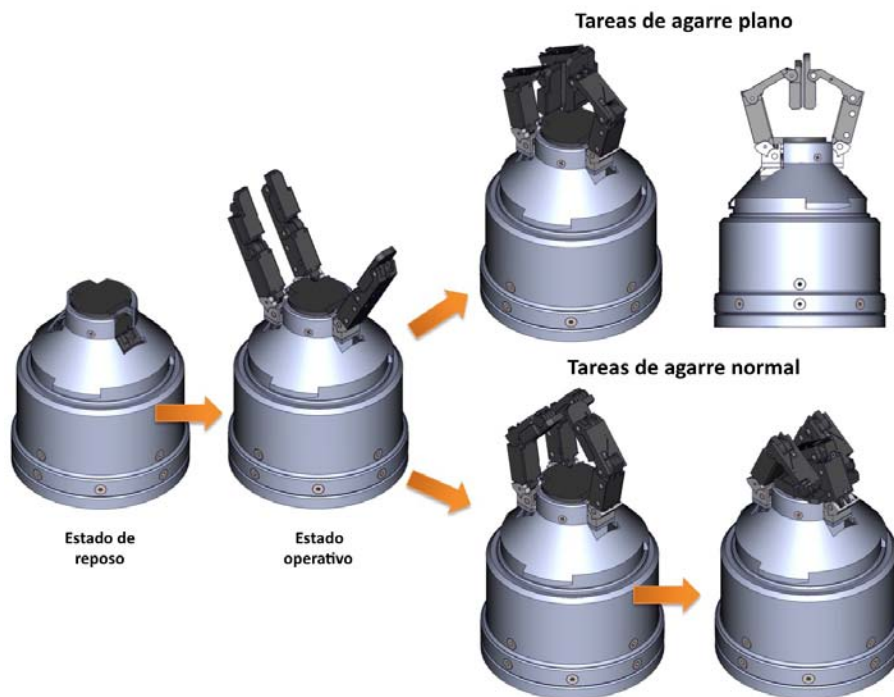


Figura 6.35: Posiciones que adopta la RL2 a través de los diferentes estados ofrecidos por el sistema accionador

6.4. Mano Robótica RL3

El diseño de la Mano Robótica RL3, de ahora en adelante RL3, nace de un concepto totalmente diferente a los dos diseños anteriores, y es ensayo para probar la viabilidad técnica de la metodología de diseño de Manos Robóticas Multi Estado con una mano



Figura 6.36: Diseño final de la RL2

más compleja y con todos sus grados de libertad independientes. Esta mano debería de ser capaz de realizar tareas de manipulación mientras que las dos versiones anteriores estaban concebidas solo para tareas de agarre con firmeza.

El diseño de la RL3 es estructuralmente más complejo ya que intenta imitar, de forma básica, los movimientos de la mano humana no sólo en todas sus articulaciones sino que también en su palma. Para lograr el objetivo deseado, dentro el espacio reducido disponible para alojar el sistema accionador, se recurre al diseño de un nuevo concepto de actuador, el denominado Actuador Multi Estado (AME). Para analizar la viabilidad de dicho actuador se prueban diferentes tecnologías para desarrollar una parte del mismo denominada Mecanismo de Tres Estados (MTE). En las siguientes secciones se analizarán en más detalle sus objetivos y funcionalidades como así también una descripción más detallada tanto de la configuración de la RL3 como de las características del AME y los MTE.

La RL3 está pensada para ser montada en el Robot Humanoide RH0, y por lo tanto debe tener la capacidad de realizar tareas acordes a los objetivos de dicho sistema robótico.

6.4.1. Robot Humanoide RH0

El Robot Humanoide RH0 [56, 268, 57, 55, 54], a partir de ahora RH0, así como su posterior actualización RH1 [17, 19, 18], fueron diseñados y desarrollados íntegramente en el Laboratorio de Robótica de la Universidad Carlos III de Madrid. El RH0 es el primer robot humanoide construido en España (Figura 6.37) mide 1,3m de altura con 21 GDLs y unos 50kg de peso aproximadamente. Esto permite simular tareas de seres humanos en entornos reales sin que los mismos entornos sean simulados o preparados.

Para su sistema de control, el RH0 está equipado con dos CPUs y un sistema de comunicación CANBus con dos baterías que le dan una autonomía de 30 minutos. A su vez dispone de un HMI amigable en un ordenador central y que permite trabajar con comandos verbales a distancia con una comunicación inalámbrica.

Su sistema sensorial está dividido en dos partes:

- *Sistema sensorial para la locomoción:* compuesto por sensores del tipo aceleróme-



Figura 6.37: Robot Humanoide RH0 desarrollado por el Laboratorio de Robótica de la Universidad Carlos III de Madrid

tros e inclinómetros, encoders y sensores de fuerza y son los encargados de dar la retroalimentación al sistema de control para que en todo momento se sepa la posición y configuración de sus GDLs.

- *Sistema sensorial para la interacción:* compuesto por sistemas de cámaras y micrófonos tridimensionales 3D y sensores de proximidad, y son los encargados de interactuar con el entorno.

El objetivo del RH0 era desarrollar un robot capaz de realizar actividades muy parecidas y diversas a las que un ser humano está acostumbrado. Algunas de las aplicaciones para la que está pensado es la construcción, asistencia a personas que posean alguna discapacidad o simplemente como acompañante, como plataforma de experimentación en trabajos físicos o de mantenimiento periódico, trabajos de vigilancia y salvamento en entornos tóxicos o peligrosos o, simplemente como entretenimiento y educación [58].

Luego de varias pruebas de todos los subsistemas del RH-0, se detectan algunos aspectos que requieren actualizaciones permitiendo su depuración y un refinamiento más avanzado. Esas actualizaciones son las que diferencian el RH-0 del RH1 (Figura 6.38). A continuación se detallan estas diferencias:

- Optimización de la estructura: Para el RH-0 se utilizaron coeficientes de seguridad muy elevados, que para aplicaciones en robótica son restrictivos. Por lo tanto para el RH-1 se mejoró este aspecto en aquellas partes críticas o que estaban sobredimensionadas.
- Disminución de la cantidad de piezas: A raíz de que uno de los requisitos iniciales para el RH-0 era que debía ser armado y desarmado para ser transportado de un sitio a otro, generó que en su estructura se incorporasen ciertos elementos que facilitarían esta tarea. Esta idea fue descartada con lo que permitió que el RH-1 disponga de menos elementos que el RH-0.
- Optimización del peso: Como consecuencia de los dos puntos anteriores y con la incorporación de nuevos materiales, se consiguió reducir el peso total del sistema.
- Holguras: El RH-0 presentaba en casi todas las articulaciones una precisión que no era aceptable en sus movimientos. En el RH-1 se ha hecho un adelanto considerable en este tema.

- Robustez: Esto es referido básicamente a su control y su sistema electrónico. Se han hecho importantes avances en este aspecto.

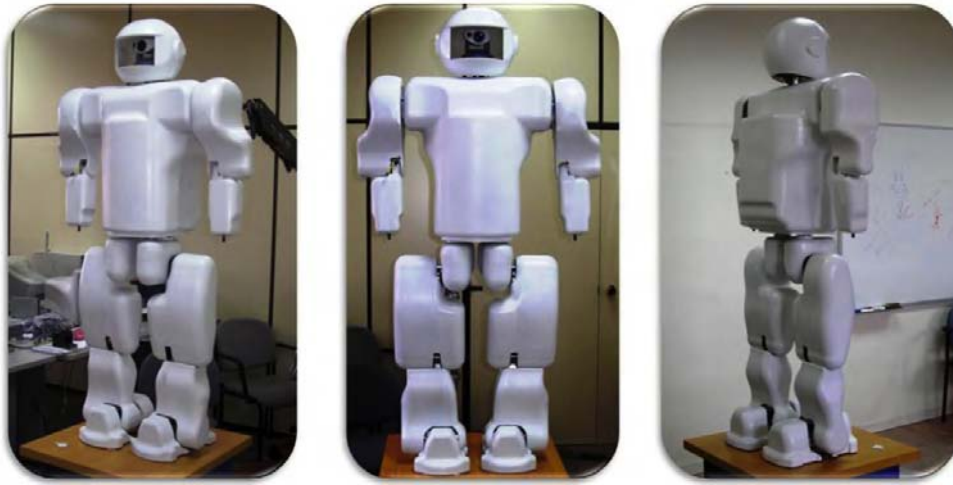


Figura 6.38: Robot Humanoide RH1: Actualización del RH0

Para que el RH-1 interactúe con el medio exterior, a parte de todo su sistema sensorial que le permite interactuar con el entorno, se pretende montar sobre sus muñecas, dos manos robóticas que pudiesen realizar tareas de manipulación y experimentar con controles combinados de manipulación y traslado de objetos de un sitio a otro. Si bien se desea que la mano pueda realizar tareas complejas de manipulación, están acotadas a los entornos en los que se desea experimentar. Por tal motivo, la RL3 debe tener una gran cantidad de GDL y que los mismos puedan ser controlados de forma independiente.

Si bien el RH-1 tiene unas dimensiones que pueden ser equivalentes a las de un ser humano, su estructura es más bien pequeña, con lo cual su mano debe tener un tamaño proporcional de cuerpo. Esta primera especificación es que principalmente complica el diseño y el desarrollo de la manos a través de la metodología tradicional y es donde es más propicio aplicar la metodología propuesta en esta tesis.

Como la RL3, según la metodología de diseño propuesta, no ha llegado a la tercera fase de diseño, lo que se pretende a continuación es cumplir con la primera y segunda donde en la segunda fase básicamente se centra en el sistema accionador aunque se realizaron subsistemas de su sistema de control como también un entorno virtual para poder hacer planificación de tareas de manipulación.

6.4.2. Definición de requisitos

El objetivo de las dos versiones anteriores (la RL1 y la RL2), era la de comprobar que la metodología de diseño propuesta en esta tesis en el aspecto de optimización de estados de un sistema accionador específico era viable. El objetivo que se busca con el diseño de la RL3 es comprobar la viabilidad de dicha metodología pero en el aspecto de sistema accionador para realizar tareas de manipulación con múltiples estados.

Para una primera instancia en la definición de las propiedades que debía tener la RL3, se realizó una lista de las mismas según su orden de importancia:

1. **Finalidad:** La finalidad principal de la RL3 será la de lograr manipular objetos con relativa complejidad, que sea de tamaño y peso tolerables por el RH0. Si bien está destinado a este sistema robótico no se descarta la posibilidad de montarla en robots manipuladores o de asistencia a personas minusválidas o prótesis. Por tal razón, su configuración debería ser modular. Sin embargo, una mano robótica modular tiene ciertas desventajas, como el hecho que el dispositivo al cual sea montada, no ayude de manera directa a la manipulación de objetos teniéndose que desarrollar sistemas de control independientes.
2. **Destreza:** Como se mencionó en capítulos anteriores, el término destreza va asociado a la complejidad de las tareas que pueda realizar una mano robótica, siempre en comparación con la mano humana. La RL3, por la finalidad para la que será diseñada, necesita una maniobrabilidad que le otorgue cierta destreza y un agarre firme de objetos de diversos tamaños que oscilen entre un bolígrafo y una botella o vaso, ya que en estos objetos son los que puede encontrarse en los entornos por los que el RH0 se desplazará. Otra de las tareas que se espera que realice el RH0 es la interacción con otros seres humanos en labores de construcción, por lo tanto, si bien su fuerza y velocidad no son ni mucho menos comparables, se pretende que realice tareas de manipulación con relativa complejidad. También es necesario que posea habilidades para la interacción con seres humanos como por ejemplo saludar, dar la mano, señalar, comunicarse por medio de signos. Como estas habilidades no requieren un contacto físico con algún objeto, no se las puede comparar con las tareas de manipulación y agarre, pero sí forman parte de la destreza de una mano robótica.
3. **Configuración estructural:** Dentro de la configuración estructural, se debe considerar cuán antropomórfica se pretende que la RL3 sea. Preferentemente, se procurará que sea lo más parecida a la estructura de la mano humana. Una potencial configuración se muestra en el esquema de la Figura 6.39.

Como puede observarse en el esquema, cada dedo, incluso el pulgar, tiene 3 articulaciones. Esto hará que los dedos de la Mano UC3M tengan la misma cantidad de articulaciones que una mano humana, a excepción del pulgar. También, esta configuración permitirá que la mano se adapte de mejor manera a los objetos y que el volumen de recorrido de los dedos sea más amplio; la palma de la mano poseerá tres articulaciones más. El pulgar tendrá, además, una articulación ortogonal a las otras articulaciones que lo conformarán. La muñeca poseerá una articulación que le permitirá efectuar uno de los dos movimientos que realiza la muñeca del ser humano.

Se puede concluir que la configuración de la Mano UC3M estará compuesta por 20 GDLs, las que podrán ser independientes (accionadas por 20 tendones). En el caso de los dedos, estos podrán ser accionados por un solo tendón, característica también existente en la RL1 y RL2 y de la cual ya se tiene alta experiencia.

Si fuera necesario reducir la cantidad de articulaciones, sacrificando la destreza de la mano, se podrán quitar articulaciones de la palma y la muñeca, dejando a la configuración con 16 GDLs. Se puede apreciar un esquema de dicho cambio en la Figura 6.40.

Para definir el sistema accionador de la RL3, se pueden analizar dos configuraciones funcionales del mismo teniendo en cuenta la cantidad de articulaciones y la cantidad

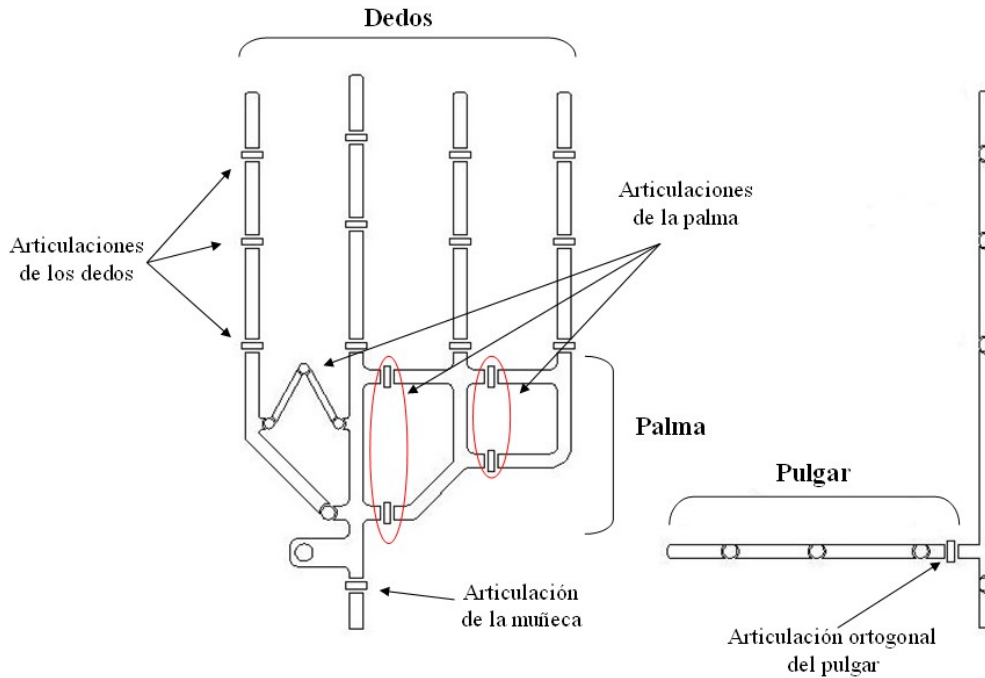


Figura 6.39: Configuración estructural de la Mano UC3M con 20 GDLs

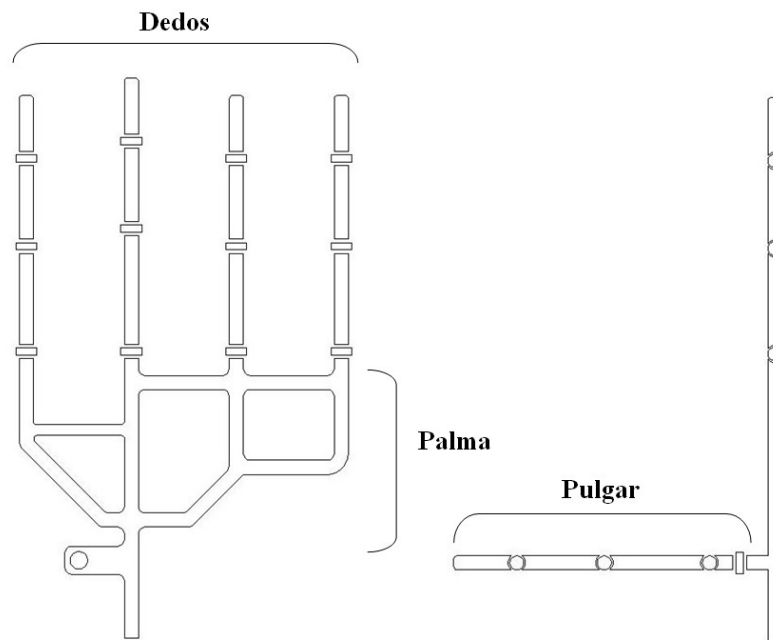


Figura 6.40: Configuración estructural de la Mano UC3M con 16 GDLs

de tendones que lo pueden accionar y que se muestran en la Cuadro 6.2.

6.4.2.1. Análisis de las características de diseño

Una vez analizadas las propiedades de más alto nivel que debía cumplir la RL3, se analizaron las características de diseño y de las cuales a continuación se detallan las



Configuraciones Funcionales		
20 Articulaciones	20 Tendones	Cada articulación es accionada por un tendón
20 Articulaciones	10 Tendones	Cada dedo y el pulgar es accionado por un sólo tendón
16 Articulaciones	16 Tendones	Cada articulación es accionada por un tendón
16 Articulaciones	6 Tendones	Cada dedo y el pulgar es accionado por un sólo tendón

Cuadro 6.2: Cuadro de las configuraciones funcionales posibles de la estructura de la RL3 de 20 GDLs y de 16 GDLs

conclusiones a las que se ha llegado en cada caso:

- **Cantidad de dedos:** El tamaño de la mano deberá ser más pequeña que la de un ser humano medio. Esto trae la complicación de que la configuración de una mano con un pulgar y cuatro dedos opuestos en dicho tamaño es relativamente complejo. Si bien las dos configuraciones funcionales propuestas anteriormente de 20 y 16 GDLs con una estructura idéntica a la de la mano humana son la prioridad, se puede decir que es preferible quitar un dedo a tener que quitar las articulaciones de la palma. Esto se fundamenta en el hecho de que las articulaciones de la palma dan la posibilidad de posicionar la base de los dedos en configuraciones parecidas a las que puede tomar la mano humana, aún teniendo un dedo menos.
- **Palma:** La palma de la RL3 es una de las innovaciones más importantes del diseño, ya que como se comentó en la característica anterior, consigue posicionar las bases de los dedos en función del pulgar que permite una destreza de un grado superior que si se mantienen fijas según la misma. Es un desafío importante conseguir en tan poco espacio una palma articulada como la que se pretende diseñar con 4 o 3 GDLs según sea el caso. Para tal motivo es conveniente dividir la palma en dos planos: un plano que haga de base estructural fija la cual soporta todo el sistema accionador y las poleas principales y un plano *flexible* compuesto o dividido por diferentes elementos que son posicionados de diferentes formas y a los cuales están asociados el pulgar y los dedos.
- **Grados de Libertad:** Los grados de libertad de la mano estarán definidos principalmente por el sistema accionador y el espacio que disponga y por el diseño de sus dedos y pulgar por el mismo motivo de tamaño. Entre estas dos propiedades se debate entre un valor máximo de 20 GDLs y un valor mínimo de 16 GDLs. Lo importante, como se ha comentado en la característica anterior, es mantener en cierta forma una palma *flexible*.
- **Tipos de actuadores:** A nivel de actuadores, y teniendo en cuenta el espacio reducido del que se dispone, es poco viable montar actuadores independientes para cada articulación, por lo que se opta por un único AME compuesto por un motor eléctrico de corriente continua de gran potencia como transformador de energía y un MTE independiente para cada articulación. El tamaño y la tecnología adoptada para el desarrollo de dichos MTEs son los que marcarán la viabilidad de incorporar más o menos GDLs al sistema robótico. Aún así, se han analizado diferentes tecnologías que pudiesen formar parte del sistema accionador propuesto y las conclusiones fueron las siguientes:



- **Mini-motores:** Esta fue la primera opción analizada ya que es la más sencilla de implementar y de la cual se dispone una alta variedad de elementos. Si pueden llegar a cumplir con la especificación de espacio, a nivel de par que puede ofrecer cada elemento en dicho tamaño, no es suficiente.
 - **Alambres musculares:** Si hablamos de relación tamaño-peso-fuerza realizada, los alambres musculares o aleaciones con memoria de forma son los más indicados para esta aplicación, aunque tienen la desventaja de que sólo pueden realizar desplazamientos efectivos que rondan del 3 al 5 % de su longitud y necesitan una gran cantidad de recursos para poder controlarlos en fuerza y posición.
 - **Actuadores neumáticos:** Los actuadores neumáticos se pueden ver montados hoy día en manos robóticas avanzadas y poseen una relación tamaño-peso-fuerza realizada casi superior a los alambres musculares con el inconveniente de que para poder dotarles de energía neumática es necesario un compresor que no puede ser incorporado a la estructura del robot, con lo cual debe ser externo a la misma. Esta desventaja sumada a la problemática de su control de posición hacen que esta tecnología sea prácticamente descartada desde un principio.
 - **Actuadores EAP:** Los Polímeros Electro Activos son lo último en tecnología de músculos artificiales. Estos materiales prometen ser la nueva era de actuadores en robótica, debido a que requieren muy poca tensión para funcionar. Pueden lograr fuerzas de hasta 10 veces su propio peso y también funcionan como sensores. Todas estas ventajas hacen que sea posible montar cada músculo EAP sobre la mano, sin comprometer el tamaño o el peso de la misma. Sin embargo, actualmente se encuentran en fase de experimentación y prueba, por lo que aún no se comercializan.
-
- **Tipo de transmisión de fuerzas:** El tipo de transmisión de fuerza a adoptar es el mismo que para las versiones RL2 y RL3. Si bien este tipo de transmisión de fuerza unidireccional quita cierta funcionalidad al sistema accionador, es la transmisión óptima para este tipo de sistema robótico ya que ocupa muy poco espacio y es relativamente eficiente. El sistema de recuperación de cada articulación o GDL será a través de mecanismos constantes y pasivos configurados de forma independiente dependiendo de la articulación.
 - **Mecanismos:** Hay dos tipos de mecanismos claves en la RL3: uno formado por la palma *flexible* donde su complejidad radica más bien por el tamaño que tendrá para que cumpla con la funcionalidad esperada y el formado por los MTEs individuales que permitan una transformación de estado del transformador de energía de forma que haga posible desarrollar un único AME que provea de los estados suficientes para todas las articulaciones de la RL3. Para el primer mecanismo será necesario diseñar y desarrollar un subsistema a nivel conceptual que haga viable su funcionalidad. Sin embargo para el segundo mecanismo, y como se verá en secciones posteriores, se desarrollaron dos prototipos conceptuales que prueban dos tipos de tecnologías diferentes.
 - **Tipo de sensores:** Como uno de los objetivos de la RL3 es el de realizar tareas de manipulación con cierta destreza, sus sistema sensorial, a diferencia de las versiones

RL1 y RL2, debe permitir medir con precisión la posición y configuración de todos sus GDLs en todo momento. Para esto se necesitan sensores de posición en cada GDL y sensores de fuerza en cada falange y elemento de la palma. Este sistema sensorial debería ser ayudado y complementado por el sistema de visión 3D incorporado en la cabeza del RH0 el que, como se ha visto en implementación de manos robóticas actuales, ayuda de forma considerable en la planificación de agarre.

- **Materiales estructurales:** Como el tamaño de la RL3 será reducido, la implementación de materiales plásticos como en la RL1 y RL2 no será posible debido a que implica que hay que reducir las secciones de todos sus elementos para que puedan caber. Como variante a estos materiales y en perjuicio relativo de su peso, se proponen materiales como el aluminio aeronáutico, el acero inoxidable y el titanio, manteniendo para algunos elementos no estructurales los materiales plásticos.
- **Métodos de fabricación:** Para todos aquellos elementos que son estructurales y en los que es necesaria una alta precisión se propone como método de fabricación el mecanizado convencional. En cambio, para los elementos estético-estructurales y de formas complejas, se utilizará la nueva tecnología de impresión 3D de metales.

6.4.2.2. Análisis funcional del sistema accionador

Para hacer el análisis funcional del sistema accionador para la RL3, se tendrán en cuenta la configuración de 20 GDLs y la de 16 GDLs. Para estos casos, cada GDL esta asociado a un actuador o a un MTE dentro del sistema accionador. Para conseguir el movimiento de todas las articulaciones se analizarán diferentes configuraciones de sistemas accionadores y se calculará en cada caso el grado de funcionalidad de los mismos para que puedan ser comparados.

Para cada caso se analizarán las diferentes configuraciones de sistema accionador en las que podrían haber actuadores convencionales (AC) y AMEs con diferentes cantidades de MTEs (AME-x) y se los comparará según su grado de funcionalidad a través de las Ecuaciones 5.7 y 5.7:

$$\varrho_n = \frac{1}{\frac{n}{2} \cdot (n + 1)};$$
$$\varrho_t = \sum_{n=1}^m \frac{K_n}{g} \cdot \varrho_n$$

- **Caso A: RL3 con 20 GDLs:**

El grado de accionamiento del sistema accionador correspondería a 20 actuadores convencionales con 3 estados cada uno, por lo tanto:

$$\vartheta_A = x^n = 3^{20} = 3,486,784,401$$

y donde el número de GDLs es $g = 20$. Por otro lado, se necesitarán para el cálculo del grado de funcionalidad total, los siguientes grados de funcionalidad parciales:

$$\varrho_3 = \frac{1}{\frac{3}{2} \cdot (3 + 1)} = \frac{1}{6}$$
$$\varrho_5 = \frac{1}{\frac{5}{2} \cdot (5 + 1)} = \frac{1}{15}$$



$$\varrho_{15} = \frac{1}{\frac{15}{2} \cdot (15 + 1)} = \frac{1}{120}$$

$$\varrho_{20} = \frac{1}{\frac{20}{2} \cdot (20 + 1)} = \frac{1}{210}$$

Las configuraciones analizadas se enumeran a continuación:

1. **20 AC:** Un actuador convencional para cada articulación. El grado de funcionalidad de este sistema accionador será:

$$\vartheta_{A1} = \frac{20}{20} \cdot 1 = 1$$

2. **5 AC + 5 AME-3:** Un actuador convencional para cada articulación de la palma, la articulación ortogonal del pulgar y la articulaciones de la muñeca y un AME de tres MTEs para cada dedo y pulgar. El grado de funcionalidad de este sistema accionador será:

$$\vartheta_{A2} = \frac{5}{20} \cdot 1 + \frac{5}{20} \cdot \frac{1}{6} = \frac{7}{24}$$

3. **5 AC + 1 AME-15:** Un actuador convencional para cada articulación de la palma y la articulación ortogonal del pulgar y un único AME de 15 MTEs para todos los dedos y el pulgar. El grado de funcionalidad de este sistema accionador será:

$$\vartheta_{A3} = \frac{5}{20} \cdot 1 + \frac{1}{20} \cdot \frac{1}{120} = \frac{601}{2400}$$

4. **1 AME-5 + 5 AME-3:** Un AME de cinco MTEs para cada articulación de la palma, la articulación ortogonal del pulgar y la articulaciones de la muñeca y un AME de tres MTEs para cada dedo y pulgar. El grado de funcionalidad de este sistema accionador será:

$$\vartheta_{A4} = \frac{1}{20} \cdot \frac{1}{15} + \frac{5}{20} \cdot \frac{1}{6} = \frac{4}{75}$$

5. **1 AME-5 + 1 AME-15:** Un AME de cinco MTEs para cada articulación de la palma, la articulación ortogonal del pulgar y la articulaciones de la muñeca y un único AME de 15 MTEs para todos los dedos y el pulgar. El grado de funcionalidad de este sistema accionador será:

$$\vartheta_{A5} = \frac{1}{20} \cdot \frac{1}{15} + \frac{1}{20} \cdot \frac{1}{120} = \frac{3}{800}$$

6. **1 AME-20:** Un único AME de 20 MTEs para todas las articulaciones de la mano. El grado de funcionalidad de este sistema accionador será:

$$\vartheta_{A6} = \frac{1}{20} \cdot \frac{1}{210} = \frac{1}{4200}$$

■ **Caso B: RL3 con 16 GDLs:**

El grado de accionamiento del sistema accionador correspondería a 16 actuadores convencionales con 3 estados cada uno, por lo tanto:

$$\vartheta_A = x^n = 3^{26} = 43,046,721$$



y donde el número de GDLs es $g = 20$. Por otro lado, se necesitarán para el cálculo del grado de funcionalidad total, los siguientes grados de funcionalidad parciales:

$$\varrho_3 = \frac{1}{\frac{3}{2} \cdot (3 + 1)} = \frac{1}{6}$$
$$\varrho_4 = \frac{1}{\frac{4}{2} \cdot (4 + 1)} = \frac{1}{10}$$
$$\varrho_{16} = \frac{1}{\frac{16}{2} \cdot (16 + 1)} = \frac{1}{136}$$

Las configuraciones analizadas se enumeran a continuación:

1. **16 AC:** Un actuador convencional para cada articulación. El grado de funcionalidad de este sistema accionador será:

$$\vartheta_{B1} = \frac{16}{16} \cdot 1 = 1$$

2. **1 AC + 5 AME-3:** Un actuador convencional para la articulación ortogonal del pulgar y cinco AMEs de 3 MTEs para los dedos y el pulgar. El grado de funcionalidad de este sistema accionador será:

$$\vartheta_{B2} = \frac{1}{16} \cdot 1 + \frac{5}{16} \cdot \frac{1}{6} = \frac{11}{96}$$

3. **1 AME-4 + 4 AME-3:** Un AME de 4 MTEs para todas las articulaciones del pulgar y 4 AMEs de 3 MTEs para los dedos. El grado de funcionalidad de este sistema accionador será:

$$\vartheta_{B3} = \frac{1}{16} \cdot \frac{1}{10} + \frac{4}{16} \cdot \frac{1}{6} = \frac{23}{480}$$

4. **1 AME-16:** Un único AME de 16 MTEs para todas las articulaciones de la mano. El grado de funcionalidad de este sistema accionador será:

$$\vartheta_{B4} = \frac{1}{16} \cdot \frac{1}{136} = \frac{1}{2176}$$

6.4.3. Actuador Multi Estado - AME

Para comprobar la viabilidad de un AME que forme parte del sistema accionador de la RL3 era necesario diseñar y desarrollar un prototipo conceptual que permitiese validarlo. Esta AME debía estar compuesto por un transformador de energía y una cantidad finita de transformadores de estados (MTEs) de tal forma de poder proveer de movimiento a todos los GDLs de la RL3. Un diagrama de la estructura del AME propuesto se puede observar en la Figura 6.41.

Para comprobar la viabilidad técnica del AME, se realizó un análisis funcional a nivel de concepto de como debían ser los diferentes MTEs dentro del mismo. Una vez definido el funcionamiento interno de cada MTE, se diseñaron y desarrollaron dos versiones similares que utilizaban el mismo transformador de energía pero con diferente tecnología para el selector interno del MTE. A continuación se describen tanto el análisis conceptual del MTE como el diseño y desarrollo de los dos prototipos.

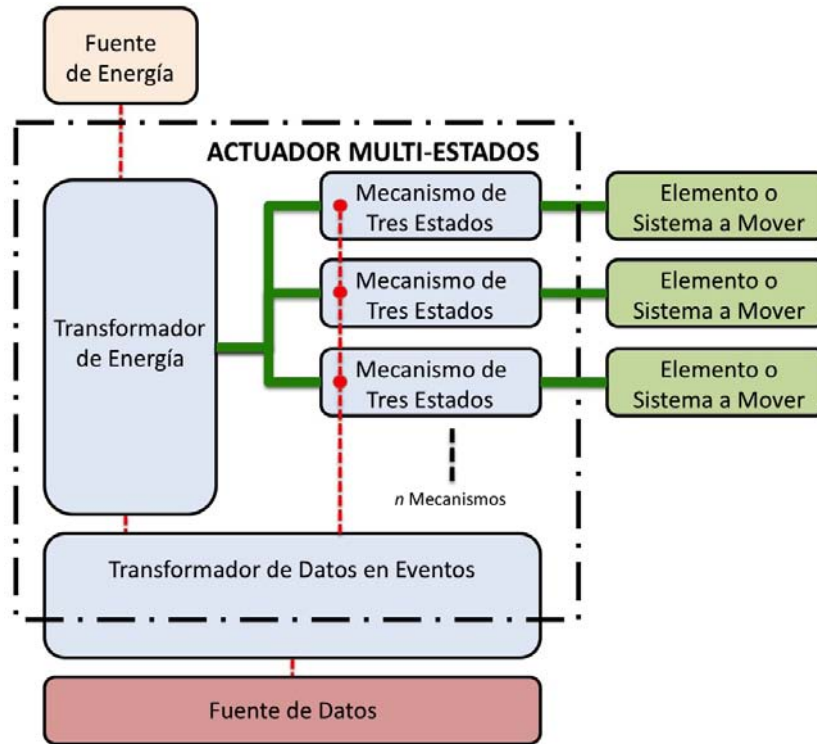


Figura 6.41: Diagrama de configuración propuesto para el AME de la RL3

6.4.3.1. Funcionamiento conceptual del MTE

El análisis conceptual del funcionamiento del MTE propuesto se basó en las especificaciones fundamentales:

1. Debe proveer los tres estados que necesita cada GDL.
2. Debe ser un transformador de estados y no un transformador de energía.
3. No debe ser capaz de dotar de movimiento a una articulación de forma activa.
4. El estado ofrecido por el MTE al GDL debe depender del estado del transformador de energía.
5. Debe ser capaz de acoplarse a un transformador de energía u otro MTE de forma que se puedan colocar en batería.
6. El MTE debe funcionar con señales simples enviadas desde el sistema de control

Como se puede observar, algunas de estas especificaciones son indispensables para que el MTE no se confunda con un transformador de energía. Para que el concepto de AME sea de un único actuador que sea capaz de ofrecer una cantidad finita de estados, los mecanismos internos del mismo no deberían de ser capaces de ofrecer un estado activo a los GDLs, de lo contrario serían actuadores independientes y no transformadores de estado.

Si bien la última especificación define que su funcionamiento debe ser sencillo, esto viene establecido por una cuestión de recursos computacionales, de hecho, en caso de



que la tecnología lo permita, el poder graduar el funcionamiento de cada estado dentro del MTE, puede ser una ventaja importante ya que el estado final ofrecido por el MTE dejaría de ser un estado proporcional constante del estado del transformador de energía para poder ser a su vez una variación del mismo.

El MTE propuesto, según la Figura C6-F36, esta compuesto por los siguientes elementos:

- **Eje accionador:** es el eje que está solidario al transformador de energía y transmite su estado a todos los MTEs asociados a él.
- **Carcasa:** es la estructura que soporta a todo el MTE y a su vez está fija a la estructura del sistema robótico.
- **Polea principal:** es la que fija y da movimiento al tendón asociado a un GDL.
- **Estructura solidaria al eje:** es la estructura que forma parte del MTE y, como su nombre lo indica, está solidaria al eje y se mueve con él.
- **Estructura solidaria a la carcasa:** es la estructura que forma parte del MTE y, como su nombre lo indica, está solidaria a la carcasa.
- **Tecnología selectora de transformación:** es el dispositivo desarrollado con una tecnología específica y que a través de una señal proveniente del sistema de control hace que el sistema robótico actúe o no.

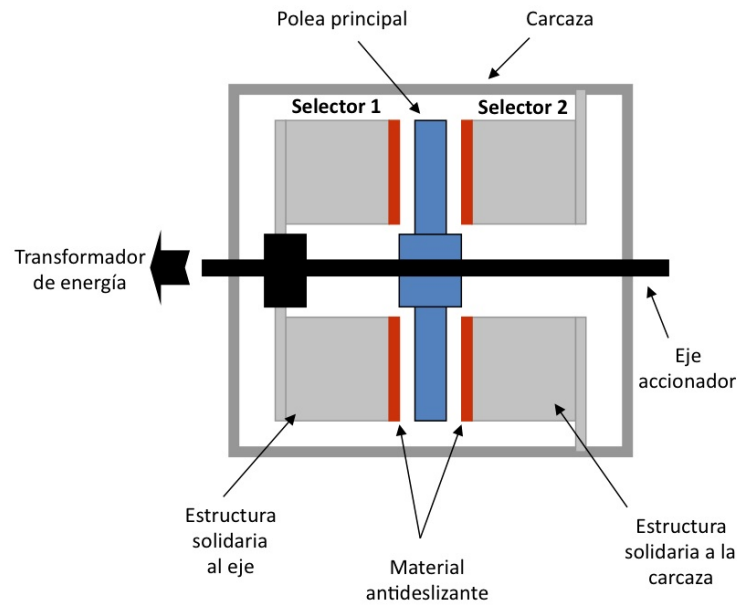
La polea principal dentro del MTE no está fija a ningún elemento por lo tanto es capaz de girar libremente sobre el eje accionador aunque éste se encuentre en movimiento. Sobre cada estructura solidaria, tanto al eje como a la carcasa, se montan los dos selectores que a través de una determinada tecnología y mecanismos especiales, son capaces de fijar la polea principal a sí misma cuando el sistema de control les da la señal. Por lo tanto la polea principal, dependiendo de la señal seleccionada por el sistema de control, puede estar girando libremente, estar fija al eje accionador o estar fija a la carcasa.

A continuación se enumeran los modos de funcionamiento del MTE propuesto:

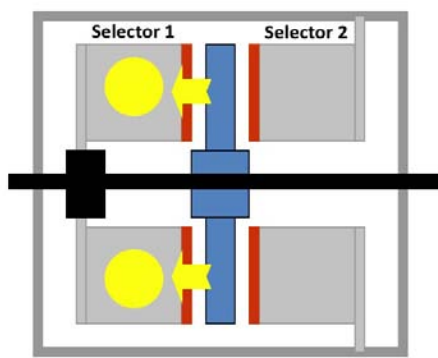
1. **Si no se da señal a ninguno de los dos puntos:** La polea no se fija a ninguno de los dos selectores por lo tanto queda liberada de cualquier movimiento.
2. **Si se le da señal al selector 1:** la polea principal se fija a la estructura solidaria al eje accionador.
3. **Si se le da señal al selector 2:** la polea principal se fija a la estructura solidaria a la carcasa.

Si este modo de funcionamiento lo trasladamos al GDL que esta asociado, en el Cuadro 6.3 se puede observar el comportamiento que genera en cada caso sobre el mismo.

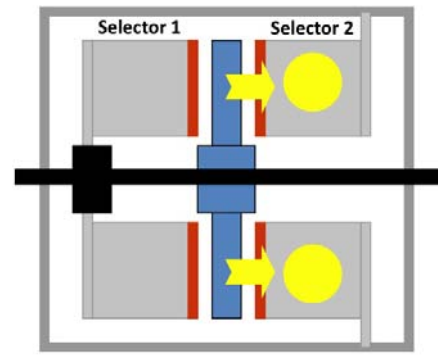
Si a su vez este MTE puede ser montado en batería y su tamaño es lo considerablemente pequeño como para ahorrar el espacio de un actuador, el AME en su conjunto es el actuador idóneo para este tipo de aplicaciones.



(a) MTE sin señal



(b) MTE con señal en el selector 1



(c) MTE con señal en el selector 2

Figura 6.42: Principio de funcionamiento del MTE

Modo de funcionamiento	Comportamiento del GDL
1	La polea principal estaría libre por lo tanto el mecanismo pasivo de recuperación generaría el movimiento sobre la articulación
2	La polea principal queda solidaria al eje, por lo tanto ésta depende del estado que esté siendo generado por el transformador de energía
3	La polea principal queda solidaria a la carcasa por lo tanto el estado que se transmite es un estado estático

Cuadro 6.3: Comportamiento de un GDL según el modo de funcionamiento del MTE

6.4.3.2. MTE Basado en fuerzas electromagnéticas

El primer prototipo de MTE diseñado y desarrollado fue utilizando fuerzas electromagnéticas o sea, dos electroimanes que atrajesen a la polea principal hacia cada uno de

los selectores. La clave de diseño de este prototipo era conseguir la mayor fuerza electromagnética posible en un espacio reducido de forma que mereciese la pena implementar este tipo de tecnología en vez de un motor convencional.

Los selectores deben ser elementos que ejerzan una fuerza relativamente grande en pequeñas distancias y de forma prácticamente instantánea par que el tiempo de reacción del selector una vez recibida la señal sea inmediato. El diseño de una bobina que funcionase como electroimán para que atrajese a la polea principal construida con un material ferromagnético es la alternativa adoptada. Para conseguir ésto, se adaptó el diagrama propuesto en la sección anterior para que pudiese funcionar de esta manera, aumentando el bloque central de la polea principal para que funcionase como núcleo de hierro e incorporando material antideslizante a uno de los lados de cada selector para que hiciese más eficiente la fijación de la polea al mismo. La resultante de esta modificación se puede observar en la Figura 6.43.

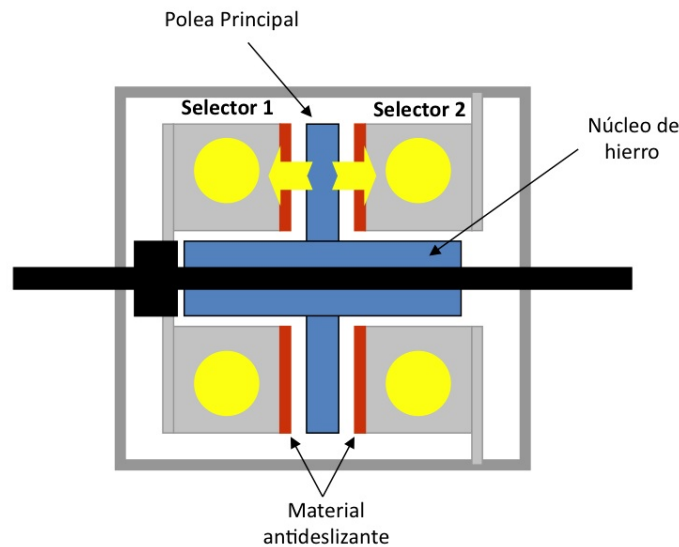


Figura 6.43: Diagrama modificado para el MTE propuesto usando fuerzas electromagnéticas

Como la alimentación de los selectores será corriente continua y para garantizar un determinado consumo de corriente, el tamaño de la bobina o el carrete que la contuviese dependía prácticamente de la longitud del hilo de cobre que la forma parte, ya que es la única resistencia que posee el circuito cuando estuviese cerrado. Por tal motivo, la longitud del hilo de cobre será el que definirá la corriente que pase, por lo tanto todas las demás variables del cálculo de la bobina estarán directa o indirectamente dependiendo del mismo.

Si observamos al Figura 6.44, se puede apreciar que la longitud de una vuelta del hilo que contiene el carrete será $\pi \cdot D$, donde D es el diámetro de la espira. Por lo tanto la longitud del hilo de una capa completa que cubra el carrete será $\pi \cdot D \cdot n$, donde n es el número de vueltas necesarias para cubrir una capa. Finalmente si b es el ancho del carrete y d_h es el diámetro del hilo, podemos decir que la longitud total del hilo en una capa de diámetro D y ancho d es:

$$l_n = \pi \cdot D \cdot \frac{b}{d_h}$$

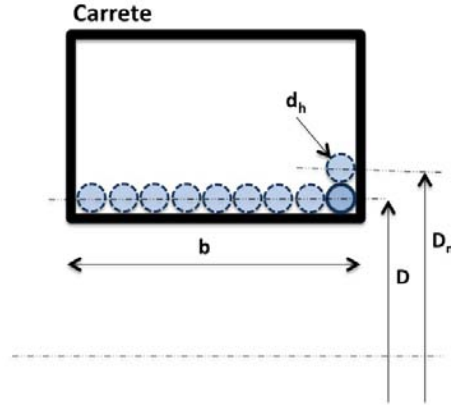


Figura 6.44: Diagrama para el cálculo de la longitud real de un hilo dentro de un carrete

Si ahora se tiene en cuenta que la siguiente capa de la bobina es de un diámetro del hilo mayor que la capa anterior, y suponiendo que n es el número de capas que se pueden meter dentro del carrete, se concluye que:

$$l_{total} = \frac{\pi \cdot b}{d_h} \cdot \sum_{i=0}^{n-1} (D + i \cdot d_h)$$

$$\Rightarrow l_{total} = \frac{\pi \cdot b \cdot n \cdot D}{d_h} + \frac{\pi \cdot b \cdot d_h}{d_h} \cdot \sum_{i=0}^{n-1} i$$

Sabiendo que $\sum_{i=0}^{n-1} i = \frac{n^2}{2}$ y realizando operaciones, se puede concluir con la ecuación siguiente:

$$n^2 + \frac{2 \cdot D}{d_h} \cdot n - \frac{2 \cdot l_{total}}{\pi \cdot b} = 0 \quad (6.1)$$

Con esto se puede calcular la longitud del hilo para determinar su resistencia y con este valor configurar el carrete óptimo necesario para conseguir la mayor fuerza magneto-motriz posible en un espacio reducido. Por lo tanto si se tiene en cuenta que $R = \rho \cdot \frac{l}{s}$, que $s = \frac{\pi \cdot d_h^2}{4}$ y finalmente que $R = \frac{V}{I}$, se obtiene:

$$l_{total} = \frac{V}{I} \cdot \frac{\pi \cdot d_h^2}{\rho} \quad (6.2)$$

Si se reemplaza la Ecuación 6.2 en la Ecuación 6.1 y definiendo las variables K_1 y K_2 de la siguiente manera:

$$K_1 = \frac{2 \cdot D}{d_h}$$

$$K_2 = -\frac{2 \cdot V \cdot d_h^2}{d \cdot I \cdot \rho}$$

se obtiene la siguiente ecuación en función del número de capas:

$$n^2 + K_1 \cdot n + K_2 = 0 \quad (6.3)$$

Si en cambio se considera que $n = \frac{N \cdot d_h}{b}$ se obtiene las ecuaciones en función del numero de vueltas totales:

$$K'_1 = \frac{2 \cdot D \cdot b}{d_h^2}$$

$$K'_2 = -\frac{2 \cdot V \cdot b}{I \cdot \rho}$$

$$N^2 + K'_1 \cdot N + K'_2 = 0 \quad (6.4)$$

Si la fuerza magneto-motriz de una bobina es $F = N \cdot I$, se puede finalmente concluir que:

$$K''_1 = \frac{2 \cdot D \cdot b \cdot I}{d_h^2}$$

$$K''_2 = -\frac{2 \cdot V \cdot b \cdot I}{\rho}$$

$$F^2 + K''_1 \cdot F + K''_2 = 0 \quad (6.5)$$

Una vez obtenidas todas las ecuaciones necesarias, se desarrolló una herramienta que permitiese no sólo calcular el valor de todos los parámetros de la bobina sino que también permitiese realizar gráficas de los mismos en función de uno de los parámetros que se escoja como variable. En este caso los parámetros interesantes fueron D , b , I y d_h . En las Figuras 6.45 y 6.46 se puede observar la herramienta desarrollada con las curvas obtenidas para dichas variables.

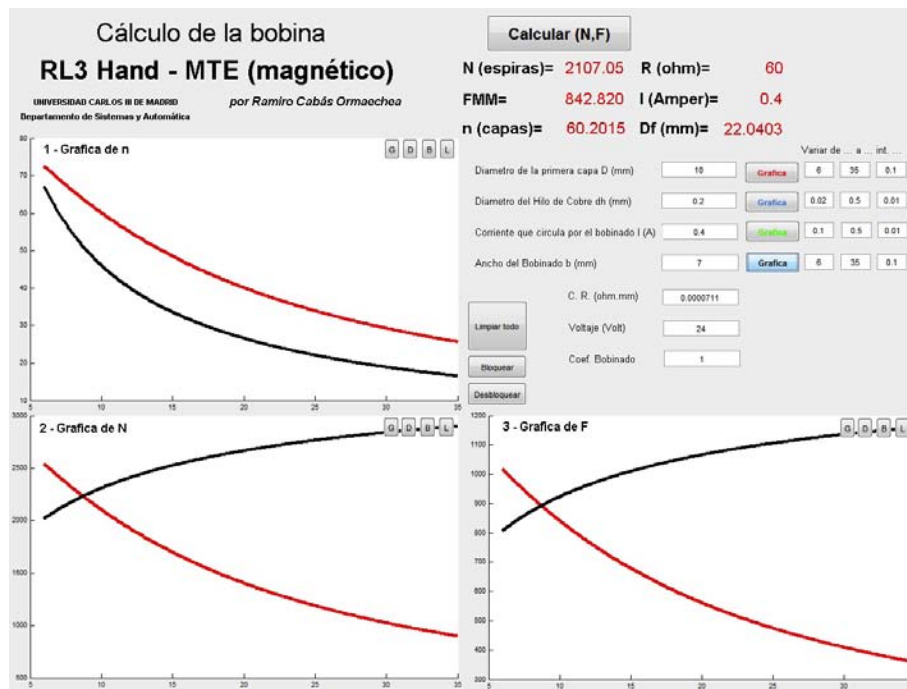


Figura 6.45: Curvas obtenidas de n , N y F_{mm} en función de D (rojo) y b (negro)

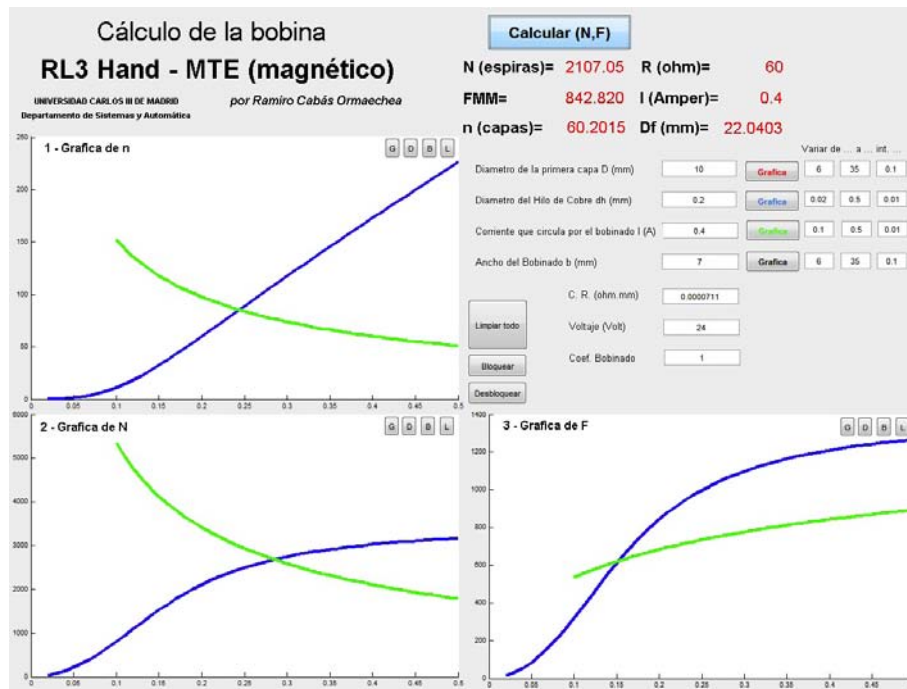


Figura 6.46: Curvas obtenidas de n , N y F_{mm} en función de I (verde) y d_h (azul)

Una vez analizados estos gráficos y obtenidos los parámetros óptimos que definían la configuración más apropiada para el MTE, se desarrolló un prototipo funcional para validar dichos resultados. En la Figura 6.47 se puede observar dicho prototipo.

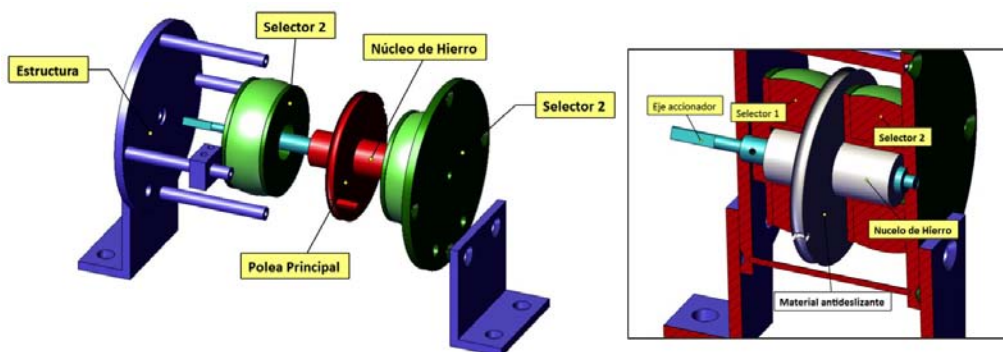


Figura 6.47: Diseño del prototipo MTE basado en fuerzas electromagnéticas

Con este diseño se ha conseguido cumplir con las seis especificaciones fundamentales para el MTE y se ha verificado su funcionamiento tal y como se lo esperaba. Como conclusión para este desarrollo, se resumen las ventajas y desventajas que ha tenido este prototipo y que, al fin y al cabo, son las causas por las que se lo ha descartado.

■ **Ventajas:**

- Se consiguen fuerzas elevadas con carreras cortas y de forma prácticamente instantánea.

- Es posible integrarlo en un MTE.

■ **Desventajas:**

- Si se controla el consumo a través de la longitud del hilo, se consiguen valores óptimos en este aspecto. Sin embargo la fuerza magneto-motriz es pequeña.
- No se puede mantener la señal por mucho tiempo debido a que la bobina se calienta y al cabo de un tiempo se quema.
- Para conseguir una fuerza magneto-motriz aceptable, se necesita agrandar la bobina y como consecuencia de esto aumenta el peso y el tamaño, siendo este último cercano al tamaño de un motor normal.

Por estos motivos, este prototipo ha tenido un estudio técnico importante. Se ha comprobado este estudio con la experimentación pero la tecnología aplicada no es la correcta para esta aplicación.

6.4.3.3. MTE Basado en aleaciones con memoria de forma

El segundo prototipo que se ha diseñado y desarrollado se basa en selectores con tecnología de aleaciones con memoria de forma (SMA - *Shape Memory Alloys*), en vez de usar electroimanes. Lo que se busca en este caso es disminuir el tamaño de los MTE junto con su peso pero sin perder prestaciones y cumpliendo con todas las especificaciones fundamentales.

Como se pudo observar en el Capítulo 3, los materiales SMA cuando se les hace pasar una corriente a través de su estructura, esta actúa como una resistencia y comienza a calentarse. Una vez alcanzada su temperatura de transformación, cambia su estructura cristalina produciendo una contracción en su longitud. Esta contracción es la utilizada para realizar un determinado esfuerzo en una determinada dirección.

La idea de este prototipo es hacer funcionar los selectores de la misma forma que con el prototipo anterior pero utilizando esta tecnología. Por lo tanto el diagrama de la estructura del MTE es la misma que para el prototipo anterior con la diferencia que en este caso no hay núcleos de hierro. En la Figura 6.48 se puede observar el diagrama que corresponde a este prototipo.

Para poder realizar la fuerza necesaria para que la polea principal quede fija a los selectores es necesario dimensionar la fibra de SMA para que la fuerza que estas realicen sea la suficiente.

Por cuestiones de configuración, cada selector tiene que tener por lo menos 3 fibras de SMA distribuidas uniformemente alrededor de la misma. Estas fibras pueden ser conectadas eléctricamente de dos formas: en paralelo o en serie. Dependiendo de la fuerza que se necesite y la energía que dicha configuración consuma, es mejor conectarlo de una forma o de otra.

Para dimensionar las fibras de SMA, es necesario tener en cuenta los siguientes aspectos:

- **Diámetro de la fibra:** el accionamiento de la fibra actúa de forma similar a si estuviera formando una estructura estática, cuando mayor es la sección, mayor es el esfuerzo que puede realizar y mayor será el consumo ya que la resistencia del material disminuye, por lo tanto se necesita mayor corriente para calentarlo.

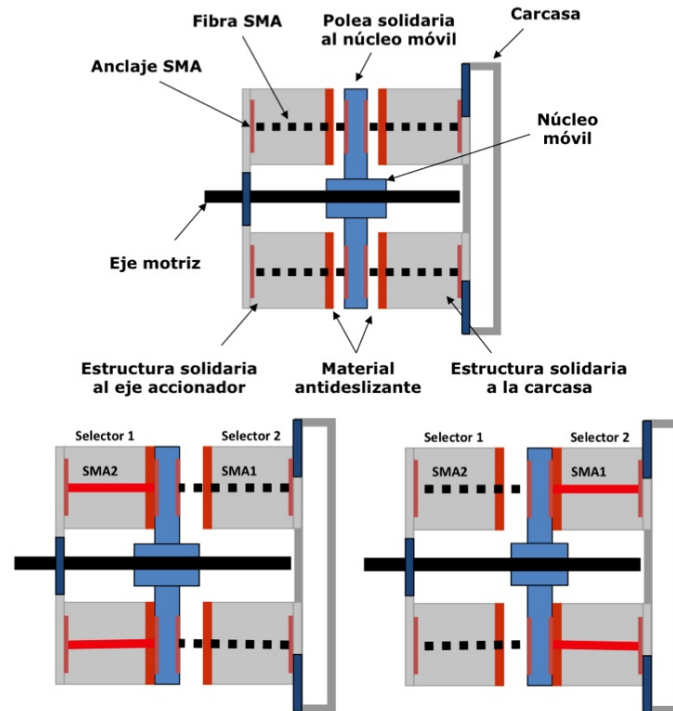


Figura 6.48: Diagrama del MTE propuesto con tecnología SMA

- **Longitud de la fibra:** la longitud de la fibra tiene directa relación con la carrera que se necesite realizar en su accionamiento, la misma se realizará a un valor porcentual fijo con respecto a la longitud total.
- **Cantidad de fibras necesarias:** como se comentó anteriormente deben montarse por lo menos tres fibras, aunque pueden ser más de tres con lo cual habría que definir la cantidad óptima para esta aplicación.

El calentamiento de la fibra es una cuestión energética o sea, cuanto más energía, mayor será el rendimiento del sistema. El problema radica en que en este caso, la energía está limitada y se necesita una determinada fuerza para poder fijar la polea a los selectores por lo tanto hay que encontrar una relación de compromiso entre la velocidad de calentamiento de la fibra y la fuerza que es aceptable. Colocar una fibra más gruesa produce mayor esfuerzo pero, a la misma cantidad de energía, lo hace más lentamente que otra más fina.

Por lo tanto, como parámetros de definición de diseño hay que tener en cuenta los siguientes aspectos:

- **Velocidad de accionamiento:** teniendo en cuenta que la velocidad que se defina será la que el MTE demore en cambiar de un estado a otro es importante que la misma sea prácticamente inmediata.
- **Carrera necesaria para bloquear la polea principal:** como la energía que se necesita para calentar la fibra es limitada, si se reduce la longitud de la fibra, se puede aspirar a una fibra más gruesa, por lo tanto la carrera que ofrecerá será menor pero con un mayor esfuerzo realizado.

- **Consumo aceptable:** teniendo en cuenta de que la RL3 tendrá entre 16 y 20 GDLs, es importante saber que puede que en algún momento estén siendo accionados como máximo 20 MTE con lo que si multiplicamos esto por su consumo se pueden encontrar valores inviables para esta aplicación.
- **Tiempo de mantenimiento de la señal:** al igual que la tecnología de solenoide, el SMA puede quemarse si se mantiene algunos segundos actuado, con lo cual puede que el diseño sea demasiado complejo para evitar este problema.
- **Ciclos necesarios:** el cambiar la estructura cristalina de un material de forma repetitiva ocasiona que, con el tiempo, ésta se vaya degradando.

Como se puede observar, la tecnología SMA ofrece una posibilidad importante para poder garantizar la viabilidad del MTE aunque su comportamiento a día de hoy no este controlado ni modelado. Lo que se buscará en una primera instancia es comprobar la viabilidad conceptual del funcionamiento del dispositivo para que luego en el futuro se realicen tareas de control y optimización para conseguir un mayor rendimiento y duración del mismo.

En la Figura 6.49 se puede observar el diseño resultante de este prototipo con el despiece de todos los elementos que lo componen y en la Figura 6.50 una sección del mismo en donde se pueden observar sus elementos internamente.

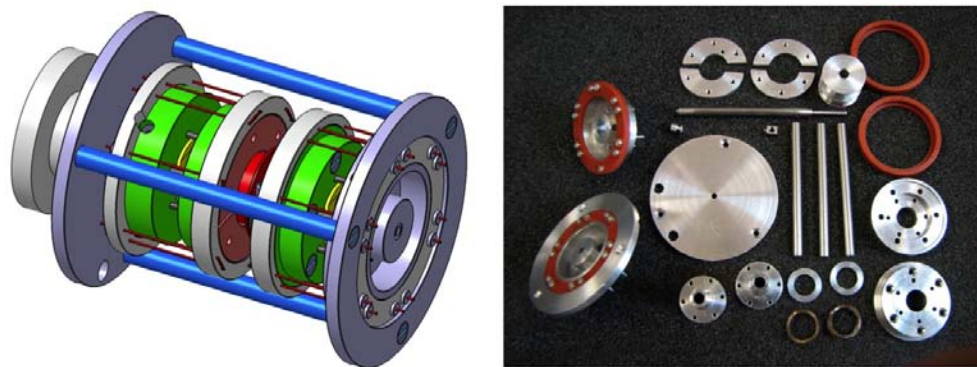


Figura 6.49: Diseño del MTE basado en SMA con el despiece correspondiente

A continuación se resumen las ventajas y desventajas que ha tenido este prototipo:

- **Ventajas:**

- Si bien el prototipo fabricado es considerablemente mayor al que se pueda implementar, es posible conseguir reducir su tamaño de forma considerable tanto en su diámetro como en su longitud. Esto se puede hacer con un rediseño de los mecanismos selectores y utilizando el ángulo de pennation.
- Las fibras de SMA si bien presentan poco rendimiento energético, su relación peso-esfuerzo realizado sigue siendo mucho más beneficioso que los motores convencionales para este tipo de aplicaciones en los que es necesario: carreras pequeñas, grandes esfuerzos, tiempo de reacción elevado y tamaños reducidos.

-

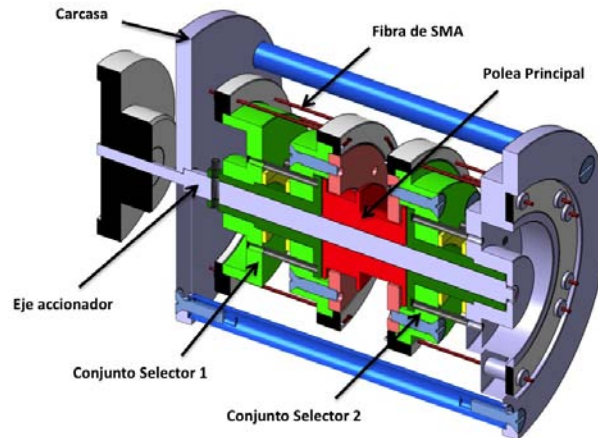


Figura 6.50: Sección transversal del prototipo MTE basado en SMA

- **Desventajas:**

- El tiempo de mantenimiento del esfuerzo debe ser pequeño si no existe algún tipo de control.
- Control No-Lineal del dispositivo sumado a un modelado de la fibra considerablemente complejo.
- Para simplificar el control es necesario sensorizar el dispositivo adicionando peso y complejidad mecánica.

Tal y como se puede apreciar, esta tecnología si bien mantiene una buena visión a futuro de una implementación con éxito, a día de hoy no es posible debido a su complejidad mecánica o de control.

Las dos tecnologías utilizadas para probar la viabilidad técnica del MTE no han sido satisfactorias, una descartada por no ser más eficiente que un motor convencional y no presentar ninguna ventaja con respecto a éste; y la segunda si bien su futuro es optimista actualmente no dispone de la fiabilidad lo suficientemente madura como para poder ser implementada.

Si bien la tecnología de SMA es una opción en la que hay que seguir confiando, día a día surgen nuevos materiales que pueden reemplazarla para esta aplicación en concreto. Estos pueden ser materiales piezo-eléctricos o elementos que funcionen con propiedades electro-reológicas. Tienen la ventaja a su vez, de hacer que la polea principal quede totalmente fija a una de las estructuras o, que también que esta fijación sea parcial y conseguir de esta forma aumentar la funcionalidad del AME un nivel por encima de lo que hasta ahora se esta considerando.

Por lo tanto, el futuro de los sistemas de accionamiento en robótica, sobre todo en lo que a manos robóticas se refiere, puede estar en la mejora continua de esta filosofía de actuadores que permitan proveer una gran cantidad de estados a un sistema robótico en espacios reducidos y con una funcionalidad elevada.

6.4.4. Entorno virtual

Una vez creado el sistema de control específico para el AME y validado su funcionamiento, era necesario una herramienta que permitiese probar diferentes configuraciones de movimientos de la RL3 para tareas de agarre y manipulación de objetos sin la necesidad de utilizar la propia mano.

La herramienta escogida fue el diseño de un un simulador virtual compuesto por un entorno determinado. Esto tiene la versatilidad de que se puede probar las tareas de agarre y manipulación de dichos objetos analizando cual de las configuraciones es la más efectiva. Por otro lado, este simulador virtual puede adaptarse a cualquier objeto y cualquier entorno, mientras estos puedan ser representados gráficamente.

Si bien la RL3 será montada sobre el RH0, el entorno no simula el comportamiento del mismo, deja abierto a que el sistema robótico que transporte la mano pueda ser cualquiera de hecho, uno de los objetivos del entorno es imitar la interacción de la mano con el sistema robótico a nivel de ordenes bidireccionales en donde la mano dice la posición que necesita tener por parte del sistema robótico al que esta montada y, el sistema robótico programa las configuraciones de las articulaciones de la mano para realizar las tareas. Esto tiene la ventaja de que se puede tomar a la RL3 como un sistema robótico independiente que interactua con el exterior, pero tiene la desventaja de que para realizar una tarea específica se utilizan recursos computacionales que pueden ser evitados en caso de que este todo integrado.

Para tal motivo, es imprescindible que la RL3 estuviese perfectamente representada en lo que se refiere a configuración estructural y tamaño dentro del simulador, aunque estéticamente no sea la misma. Como el diseño de la RL3 no esta finalizado, se utilizó un diseño preliminar para validar el simulador y que permitiese en un futuro incorporar el diseño definitivo sin ninguna complicación.

En la Figura 6.51 se puede observar el diseño preliminar que se utilizó para validar el simulador y en la Figura 6.52 se muestra el entorno diseñado para el mismo motivo con algunos objetos y el panel de control que permite mover cada uno de los elementos de forma manual.

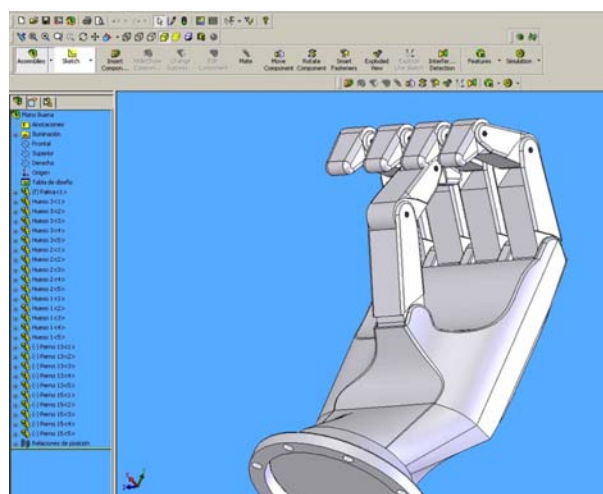


Figura 6.51: Diseño preliminar de la mano utilizada para validar el simulador virtual

El esquema de relaciones entre cada elemento se puede ver en al Figura 6.53. En la misma se puede apreciar que en este caso la configuración estructural es la de una palma

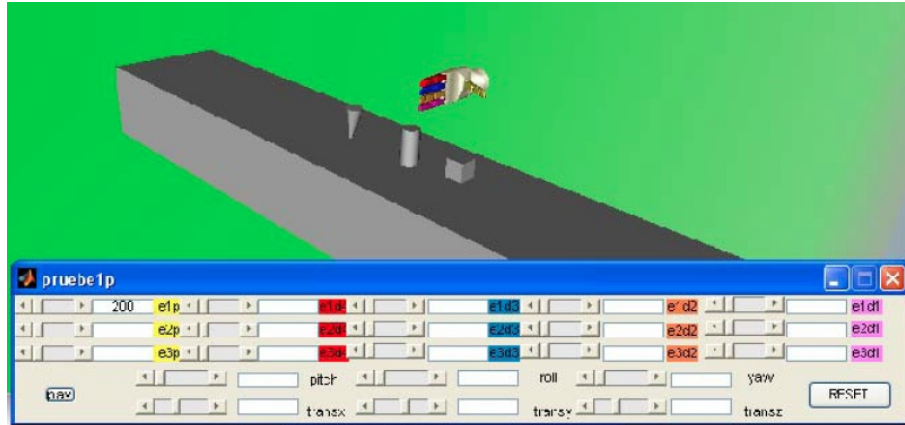


Figura 6.52: Simulador virtual con la mano y algunos objetos simulados

que hace de estructura base y la cual está fijada al sistema robótico que lo transporta, a su vez, se encuentran unidos el pulgar y los cuatro dedos.

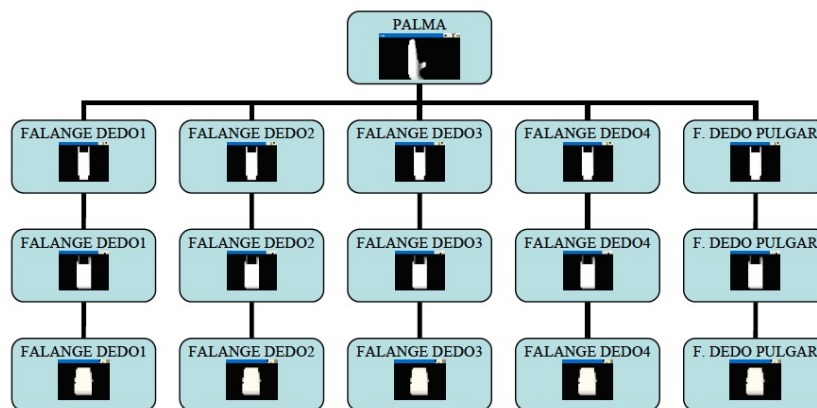


Figura 6.53: Esquema de relaciones de los elementos de la mano utilizada en el simulador

El simulador virtual es una herramienta muy potente no sólo para la realización de análisis teórico de planificación de tareas de agarre, sino que también puede ser útil para la validación de diferentes tipos de configuraciones de diseño de la mano en una etapa previa a la fabricación: identificando limitaciones estructurales y funcionales de la mano. Si bien se ha comprobado su funcionamiento y la gran utilidad de esta herramienta, al no tener un diseño definitivo de la RL3, no se ha podido validar de forma definitiva.

6.5. Cuadros comparativos

A modo de comparación de las manos robóticas se confeccionan tres cuadros. En el Cuadro 6.4 se hace una comparación entre los sistemas accionadores de las manos robóticas RL1 y RL2. En el Cuadro 6.5 y en el Cuadro 6.6 se muestran los valores de grado de funcionalidad obtenidos con las diferentes configuraciones de los sistemas accionadores propuestos para la RL3.



RL1			RL2		
ϑ	ϱ	Observaciones	ϑ	ϱ	Observaciones
6	$\varrho_t < \varrho_r$	El grado de funcionalidad del sistema accionador que necesita la RL1 podría ser menor que el grado de funcionalidad que realmente tiene.	6	$\varrho_t < \varrho_r$	El grado de funcionalidad del sistema accionador que necesita la RL2 podría ser menor que el grado de funcionalidad que realmente tiene. Por otro lado la RL2 tiene mayor funcionalidad que la RL1 debido a mecanismos externos al sistema accionador.

Cuadro 6.4: Comparación entre los sistemas accionadores de la RL1 y la RL2

RL3 con 20 GDLs						
$\vartheta = 3,486,784,401$ y $g = 20$						
Configuración	A1	A2	A3	A4	A5	A6
ϱ	1	$\frac{7}{24}$	$\frac{601}{2400}$	$\frac{4}{75}$	$\frac{3}{800}$	$\frac{1}{4200}$

Cuadro 6.5: Comparación entre las diferentes configuraciones de los sistemas accionadores para la RL3 con 20 GDLs

RL3 con 16 GDLs				
$\vartheta = 43,046,721$ y $g = 16$				
Configuración	B1	B2	B3	B4
ϱ	1	$\frac{11}{96}$	$\frac{23}{480}$	$\frac{1}{2176}$

Cuadro 6.6: Comparación entre las diferentes configuraciones de los sistemas accionadores para la RL3 con 16 GDLs

Conclusión

El desarrollo de manos robóticas, con restricciones bien marcadas en el diseño, en muchos casos suelen coartar la libertad para experimentar e investigar, sin embargo, también dan paso a la innovación en materia de materiales, mecanismos y estructuras especiales. En el transcurso de este trabajo el autor se ha encontrado en este segundo caso, lo cual le ha permitido meterse, de forma casi obligatoria, en nuevos caminos no convencionales para poder saltar los obstáculos presentados. Esto dió lugar al principio de una nueva metodología de diseño.

Por otro lado, la cantidad de manos robóticas diseñadas hasta la actualidad hacen que el margen de innovación en materia de mecanismos y estructuras sea cada vez más estrecho por dos motivos: uno gracias a la tecnología que hoy en día facilita el diseño y la fabricación de estructura más complejas; y segundo porque el esfuerzo en investigación en este sector de la robótica se focaliza más en el desarrollo de nuevas técnicas de control y planificación de tareas de agarre o sistemas sensoriales. Esto da la sensación de que la parte mecánica ya esta prácticamente definida y estudiada. El planteamiento del autor en abrir un nuevo enfoque de análisis basado en la configuración del sistema accionador como un generador de estado puede ser un desafío para investigar nuevos mecanismos que transformen o multipliquen los estados de un transformador de energía para alimentar de movimientos a un sistema robótico.

La presente tesis aporta por lo tanto, desde el punto de vista de la innovación, una nueva metodología de diseño focalizada en la capacidad del sistema accionador, pero no en base a su tecnología ni a la complejidad en cantidad de actuadores que contenga, sino por el contrario, basándose en la sencillez de los estados que el mismo puede ofrecer. Por otro lado, ésta metodología también aporta una forma de comparar diferentes sistemas accionadores equivalentes que permiten optimizar el comportamiento de una mano robótica sin necesidad de centrarse en la cantidad de actuadores que posea.

Es importante aclarar que ésta metodología, si bien puede ser escalada a cualquier sistema robótico, solo pudo haber surgido en base al análisis aplicado al diseño de manos robóticas, ya que es en éste tipo de sistemas robóticos en el que se pueden concentran una gran cantidad de actuadores en un espacio realmente reducido y, en el que hay una necesidad de optimizar la capacidad de dicho sistema accionador.

En un aspecto más general, la experiencia del autor en este ámbito ha sido fundamental, no bajo el punto de vista individual sino a nivel del entorno, el cual ha desempeñado su trabajo en una atmósfera de creatividad. En el tema relacionado con las manos robóticas, el autor ha iniciado una nueva vía de investigación dentro del Laboratorio de Robótica de la Universidad Carlos III de Madrid. Anteriormente no se había diseñado ningún prototipo. Por lo tanto como es de esperar, que los primeros pasos estén acompañados de

errores que se han materializado en el bajo rendimiento de la RL1 a nivel energético y de vida útil. Sin embargo, dicha mano robótica, a nivel de concepto ha sido representativa permitiendo que la segunda versión, la RL2, diese un gran salto de diseño agregando aún más funcionalidad con menos recursos.

En las siguientes secciones se recogerán las aportaciones principales de los logros obtenidos con este trabajo y, por otro lado, se propondrán futuros trabajos que puedan mejorar los conceptos obtenidos o, permitan terminar de comprobar de forma práctica los mismos.

7.1. Aportaciones de esta tesis doctoral

Como elementos de la propia metodología de diseño presentada en este trabajo, a continuación se detallan las principales aportaciones del mismo:

1. **Grado de accionamiento:** Es el índice que establece la cantidad de combinaciones de estados posibles que puede ofrecer un sistema accionador. Para poder comparar dos sistemas accionadores equivalentes, la única condición que deben cumplir es que el grado de accionamiento de ambos sea el mismo. El grado de accionamiento de un sistema accionador es:

$$\vartheta = \prod_{j=1}^m x_j^{n_j}$$

donde x es el número de estados que puede ofrecer un determinado actuador, n el número de actuadores y m el número de diferentes tipos de actuadores.

2. **Tipos de Estados:** Se propone una clasificación de tipos de estados como estados de movimiento discreto y relativo y como estado estático. Dependiendo del tipo de estado que requiera el sistema robótico, estos pueden ser completos o reducidos asignando de esta forma una condición mayor o menor al grado de funcionalidad del sistema accionador.
3. **Grado de reducción de la funcionalidad:** Es el índice que establece la cantidad de configuraciones de estados que puede tener un sistema accionador que hagan reducir la funcionalidad del mismo. Cuantos más MTEs estén asociados a un único TE, el número de configuraciones de reducción es mayor. El grado de reducción de la funcionalidad está representado por Γ donde

$$\Gamma = \frac{n}{2} \cdot (n + 1)$$

y n es la cantidad de MTEs asociados al mismo TE.

4. **Grado de funcionalidad:** Se establece en función de la cantidad de grados de reducciones que posee un determinado sistema accionador. Es un índice de comparación entre dos sistemas accionadores equivalentes y su objetivo es el de identificar aquel que tenga la capacidad óptima de ofrecer estados específicos a un determinado sistema robótico. La ecuación que definen el grado de funcionalidad de un sistema accionador es:

$$\varrho = \frac{1}{\frac{n}{2} \cdot (n + 1)} \implies \varrho = \frac{1}{\Gamma}$$

donde n es la cantidad de MTEs que posee el actuador.

5. **Función del grado de funcionalidad:** Se propone una función que defina el grado de funcionalidad de un sistema accionador independientemente de su configuración. Con esta función es posible comparar diferentes sistemas accionadores que posean diferentes configuraciones y determinar cual de todos es el óptimo para un determinado sistema robótico. La función del grado de funcionalidad esta definida por:

$$\varrho_t = \sum_{n=1}^m \frac{K_n}{g} \cdot \varrho_n$$

donde m es el número de tipos diferentes de actuadores, K_n es la cantidad de actuadores de cada tipo que forman parte del sistema accionador y ϱ_n es el grado de funcionalidad correspondiente a cada tipo de actuador. Esta función establece el grado de funcionalidad total (ϱ_t) de un sistema accionador genérico.

6. **Metodología de diseño:** La metodología propuesta enfoca el diseño desde el punto de vista de la funcionalidad del sistema accionador, intentándolo optimizar. Esto se hace buscando en un primer momento los requisitos de estados de un sistema robótico y dotando al análisis de herramientas que permiten comparar diferentes sistemas accionadores para tener una visión más clara de cual es el mejor para dicha aplicación. De esta forma, este análisis intenta minimizar los recursos computacionales que necesite un sistema de control para poder efectuar tareas. Por otro lado, las fases de la metodología basada en la identificación de subsistemas parciales de diseño permiten realizar iteraciones intermedias que optimizan y concretan los conceptos del diseño general, previamente al desarrollo final del prototipo. La metodología de diseño modular demuestra ser efectiva cuando se quiere abordar cierta cantidad de conceptos en un único prototipo. Finalmente esta capacidad de rápida iteración permite trasladar esta metodología tanto a nivel de investigación como a desarrollos comerciales más maduros.
7. **Mano Robótica Multi-Estado:** Como concepto general de diseño de manos robótica se propone la denominada Mano Robótica Multi-Estado que engloba a todos los grupos de manos robóticas actuales (pinzas robóticas, manos robóticas subactuadas y manos robóticas actuadas) ya que las generaliza en función de los estados que posee su sistema accionador con las necesidades para la que fue diseñada.
8. **Mano Robótica RL1:** La RL1 es la primer mano robótica desarrollada siguiendo la metodología de diseño propuesta en este trabajo. Si bien su optimización energética y como consecuencia de esto, su vida útil no han sido buenas, ha permitido consolidar el diseño a nivel conceptual de forma correcta.
9. **Mano Robótica RL2:** El desarrollo de la segunda versión de la RL1, la RL2, focaliza su diseño en la optimización del rendimiento y aumentando la funcionalidad implementando el concepto de articulaciones pasivas. La mano humana, sobretodo en la palma, tiene una gran cantidad de articulaciones pasivas que permiten a la misma adaptarse a los objetos en función de los esfuerzos que realizan los músculos que actúan sobre los dedos. La unión de los conceptos de Mano Robótica Multi-Estados y de articulaciones pasivas, ha demostrado a través de la RL2, que es una vía realmente interesante para aumentar la funcionalidad de manos robóticas sin necesidad de hacer más complejo su sistema de control o su sistema accionador.

10. **Actuador Multi-Estado (AME):** Se propone un nuevo concepto de actuador llamado Actuador Multi-Estado basándose en la definición de los mismos. Con este tipo de actuador se descarta la idea de que un actuador solo puede ofrecer los tres estados naturales de su transformador de energía.
11. **Mecanismos de Tres Estados (MTE):** Se propone un mecanismo transformador de estado que da la capacidad a un actuador de modificar o multiplicar los estados de un transformador de energía convencional. Se han diseñado dos MTEs utilizando dos tecnologías diferentes, electromagnetismo y alambres musculares. Se han realizado experimentaciones que han permitido analizar ambas tecnologías concluyendo que ambas tienen desventajas que hacen que el MTE no sea viable con las mismas pero que su concepto es perfectamente abordable.
12. **Mano Robótica RL3:** Se ha propuesto una configuración de una Mano Robótica Multi-Estado con una cantidad considerable de GDLs. Esta propuesta abarca tanto articulaciones activas como articulaciones pasivas en la palma. A su vez, se propone el desarrollo de un único AME que sea capaz de ofrecer todos los estados necesarios para que la misma efectúe no solo tareas de agarre sino que pueda manipular objetos con cierta destreza. Esto supone un gran avance a nivel de concepto ya que una mano robótica accionada por un único actuador es capaz de realizar tareas de manipulación, algo que hasta el momento se consideraba conceptualmente incompatible.
13. **Lenguaje de Programación HCCE:** Para poder comprobar el alcance de la complejidad de las tareas de agarre que puede realizar la RL3, se desarrolló un lenguaje de programación único e innovador que permite generar algoritmos específicos para ciertas acciones internas. Estas acciones pueden ser tan sencillas o tan complejas como se desee, consiguiendo de esta forma hacer que la RL3 pueda ser tan versátil como se quisiese. Si bien esta tarea no está directamente relacionada con el objetivo de la tesis, para una posterior comprobación de la funcionalidad de la RL3 era imprescindible su desarrollo, como así también un sistema de control y un sistema electrónico compatible.
14. **Entorno virtual de la Mano Robótica RL3:** El lenguaje de programación se pensó también para que pudiese ser integrado dentro de un entorno virtual. El objetivo de este entorno virtual es el de poder comprobar tanto algoritmos de control como también una posible optimización de la estructura mecánica o de los mecanismos que pueda llegar a hacer a la RL3 más eficaz en determinadas tareas de agarre y manipulación.

7.2. Futuros desarrollos y temas abiertos

El presente trabajo establece el inicio de una línea de investigación más amplia, por lo tanto, a continuación se resumen algunos desarrollos que han quedado pendientes o algunos temas abiertos aún por explorar.

1. **Grado de funcionalidad:** El grado de funcionalidad está definido en función de la cantidad de configuraciones posibles que generan reducción dentro del sistema accionador. Sería interesante poder definir el mismo penalizando cada configuración

con la cantidad de veces que la misma puede aparecer dependiendo de las posiciones que adopten sus MTEs. Esto puede mejorar el concepto del grado de funcionalidad haciendo que su valor deje de ser tan abstracto.

2. **Grado de destreza:** Es uno de los índices más importantes que quedarían pendientes de realizar ya que sería el que definiese la calidad de la funcionalidad de un sistema accionador. Este grado de destreza por otro lado debería de ser analizado desde el punto de vista de la estructura mecánica, aplicación o tareas que realizará una determinada mano robótica. Esto puede permitir definir cual es la configuración ideal o, cual sería la configuración ideal de un sistema accionador para una determinada aplicación. Analizándolo de forma teórica y tomando como ejemplo a la manos humana, si se pudiese de alguna forma definir la cantidad y tipos de GDLs, los estados necesarios, el sistema de control y sistema sensorial que posee la misma y representarlo a través de un grado de destreza, debería de ser posible definir por el otro lado cual es el sistema accionador que represente al 100 % la configuración muscular de una mano humana. Aplicado a manos robóticas convencionales, sería una herramienta muy potente para optimizar la configuración del sistema accionador.
3. **Mano Robótica RL2:** Si bien la RL2 ha demostrado de forma teórica la aplicabilidad de la metodología propuesta en este trabajo, solo se ha construido un dedo y se ha comprobado su comportamiento a nivel práctico. Quedaría pendiente la construcción de la mano completa e integrarle tanto su sistema sensorial como su sistema de control. De esta forma quedarían comprobadas sus prestaciones finales.
4. **Sistema sensorial de la RL2:** Si bien el sistema sensorial de la RL2 es completo, tiene la dificultad del paso de cables tanto de datos como de potencia debido al reducido tamaño de sus dedos. Si se plantea de que una mano humana posee cerca de 15.000 células sensitivas, la cantidad de cables que una mano robótica pueda llegar a necesitar para poder imitar esta funcionalidad puede ser una gran complicación práctica. Por lo tanto, si se piensa incrementar la capacidad sensorial de las manos robóticas, sería interesante probar un sistema sensorial inalámbrico, el cual envíe toda la información de datos a través de tecnologías inalámbricas y solo sea necesaria la alimentación de los mismos. Esto gracias a la tecnología que se posee hoy día es totalmente viable.
5. **Mecanismo de Tres Estados MTE:** Se debería buscar alternativas tecnológicas que permitiesen el desarrollo del MTE como mecanismo fundamental del AME. Para que un AME pueda aspirar a reemplazar a una cantidad equivalente de actuadores convencionales, la tecnología en la que deben estar basados sus MTEs deben hacerlo de tamaño reducido y manteniendo tanto la sencillez mecánica como la de su sistema de control. Estas tecnologías pueden estar basadas en materiales piezoeléctricos o músculos artificiales que si bien su madurez hoy día es baja, se están realizando investigaciones y desarrollos que apuntan a una rápida incorporación al sector comercial.
6. **Actuador Multi-Estado:** Una vez comprobado el funcionamiento correcto de los MTEs, se debería desarrollar un AME con una cantidad finita de los mismos y comprobar a nivel práctico su grado de funcionalidad con respecto a una cantidad



de actuadores equivalentes como así también que el sistema de control es realmente sencillo.

7. **Mano Robótica RL3:** El diseño propuesto para la RL3 es realmente innovador no solo por la incorporación de un AME, sino también por su configuración y por la utilización de articulaciones pasivas dentro de su estructura. Para comprobar si la combinación de estas propiedades, que ha dado un muy buen resultado en la RL2, es escalable a manos robóticas más complejas con destrezas considerablemente superiores, se debería encaminar el diseño de dicha manos basada en la metodología propuesta en este trabajo.
8. **Entorno Virtual-Lenguaje de Programación HCCE:** Si bien tanto el entorno virtual como el lenguaje de programación han sido probados de forma independiente, quedaría por desarrollar una interfaz que una estas dos herramientas logrando de esta forma una entorno virtual que será un banco de pruebas de la RL3. Estas herramientas por su parte pueden ser perfectamente extrapolables a otros diseños con lo que la versatilidad añadida es considerable.

Sistema de control de la Mano Robótica RL3

Para que la implementación del AME propuesto en este trabajo sea posible, era necesario diseñar y desarrollar un sistema de control que permitiese no solo controlar el par y la velocidad del transformador de energía sino que también pudiese configurar continuamente los selectores de cada MTE para poder otorgar los estados necesarios a cada articulación. Básicamente lo que se quiere desarrollar es el driver específico para controlar el AME que será montado en la RL3 y analizar su viabilidad.

En la Figura A.1 se puede observar el esquema electrónico propuesto para el sistema de control y del cual se hará un prototipo funcional para comprobar su viabilidad.

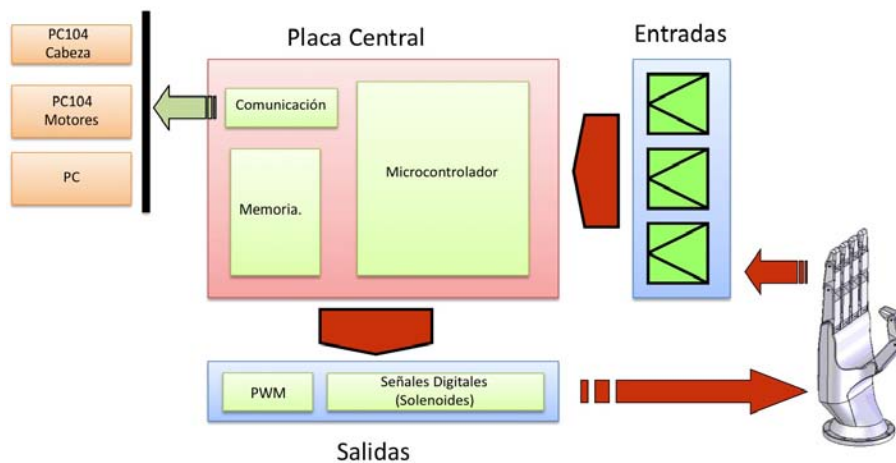


Figura A.1: Esquema electrónico completo del sistema de control de la RL3

El desarrollo del sistema de control del AME para la RL3 se dividió en tres partes:

1. Diseño de la electrónica de control y comunicación
2. Diseño de la electrónica de potencia y de adquisición de datos
3. Diseño del *firmware* y lenguaje de programación

A continuación se explorará cada uno de ellos.

A.1. Electrónica de control y comunicación

Esta parte del sistema de control engloba el diseño hardware que pertenece al microprocesador y a la memoria de programa para el manejo de la RL3, incluyendo el circuito de comunicación con el PC y un circuito programador para poder cargar lenguaje y los algoritmos experimentales sin tener que sacar el microcontrolador del zócalo ya que al tratarse de un prototipo de validación era conveniente tener la posibilidad de programar el sistema tantas veces como sea necesario. Esta parte corresponde al bloque de color rojo de la Figura A.1.

El objetivo es el desarrollo de la arquitectura hardware encargada del control y programación de la RL3. Al momento del diseño del sistema de control, la RL3 no estaba definida a nivel de elementos externos con lo que se optó por especificarla con una cantidad máxima estimada para que una vez terminada la definición de la misma, las modificaciones que sufriera el sistema de control sean mínimas o en cualquier caso a la baja. Por otro lado hay que tener en cuenta de que lo que se piensa validar es una placa prototipo y que al final habrá que hacer el desarrollo acorde a las especificaciones de tamaño, peso y funcionalidad. Por tal motivo esta parte de la placa debía soportar el manejo de 20 MTEs, 64 sensores, alojar y ejecutar el lenguaje de programación de la RL3 como también guardar en memoria todos los algoritmos de prueba de funcionamiento de diferentes tareas.

En la Figura A.2 se puede observar el diagrama de la etapa de control y de comunicación propuesta.

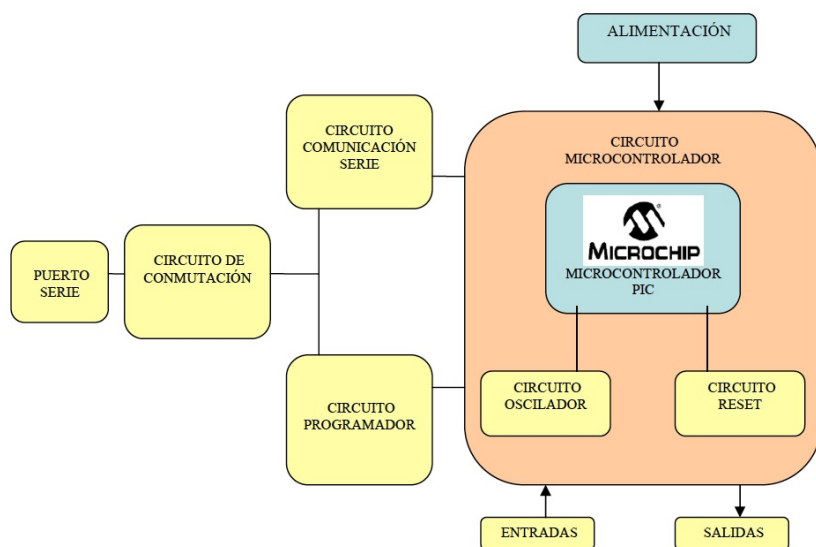


Figura A.2: Diagrama de la etapa de control y de comunicación

En esta parte hay circuitos bien definidos:

1. Circuito microcontrolador
2. Circuito programador
3. Circuito de comunicación

Para poder probar la placa sin necesidad de disponer de la etapa de potencia y de adquisición de datos, se desarrolló una placa entrenadora (Figura A.3) que permitía ver de forma visual dichas salidas y a través de potenciómetros revisar los valores de entrada.

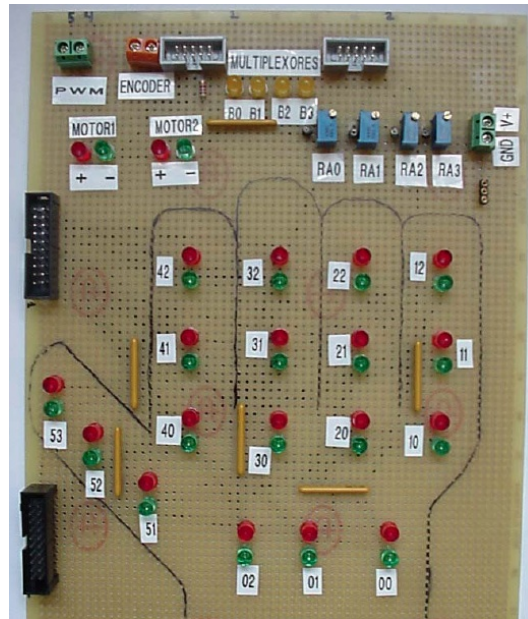


Figura A.3: Placa entrenadora de la etapa de control y de comunicación

La placa prototipo final del sistema de control, memoria, programación y comunicación de la RL3 se puede observar en la Figura A.4.

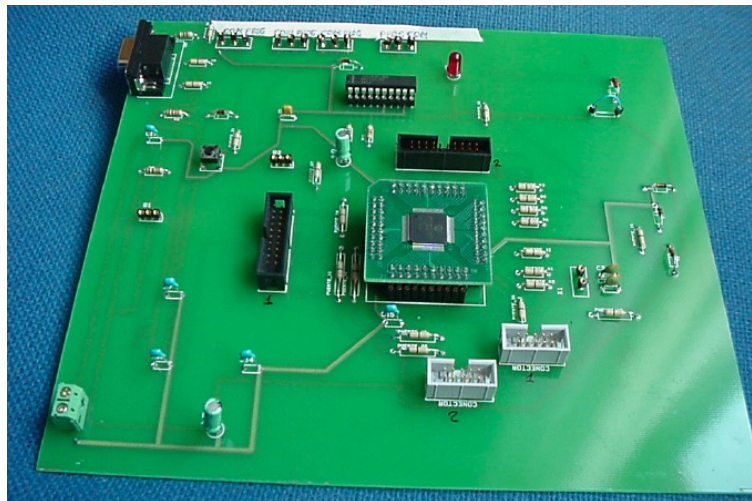


Figura A.4: Placa prototipo de la etapa de control y de comunicación de la RL3

A.2. Electrónica de potencia

Una vez desarrollado la arquitectura *hardware* de control era necesario conectarlo con el mundo exterior con un sistema electrónico de adquisición de datos y la electrónica de

potencia que se encarga de tomar las señales recibidas del sistema de control y hacer funcionar a los selectores a los que están asociadas. Esta parte corresponde a los bloques de color azul de la Figura A.1.

El sistema de potencia fue diseñado para poder conectarse con los siguientes elementos externos:

- 20 MTEs, por lo tanto 40 salidas de potencia para todos los selectores.
- 64 sensores como máximo repartidos por la mano.
- 2 motores de corriente continua
- 2 encoders encargados de dar la posición de los motores

En la Figura A.5 se puede observar el diagrama de la etapa de adquisición de datos adoptada, la cual corresponde a cuatro multiplexores que leen de forma continua 16 entradas cada uno, sumando al final las entradas de los 64 sensores distribuidos en toda la mano.

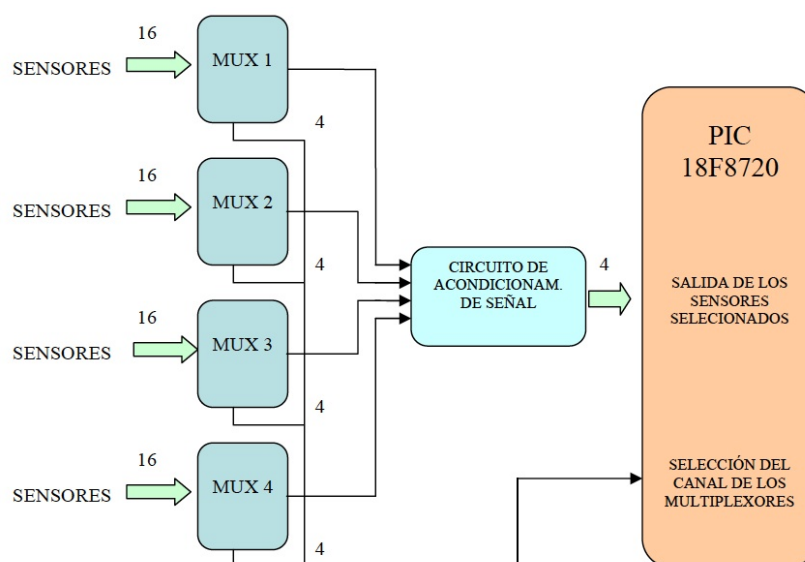


Figura A.5: Diagrama de la etapa de control y de adquisición de datos

En la Figura A.6 en cambio se puede observar el diagrama de la etapa de potencia que alimenta a los 40 posibles selectores, más los dos motores y a su vez adquiere los valores de los encoders asociados a cada motor.

Finalmente en la Figura A.7 se puede observar la placa prototipo que engloba esta parte del sistema de control y en la Figura A.8, el prototipo de la electrónica de control completa.

A.3. *Firmware* y lenguaje de programación

Esta parte del sistema se encarga de diseñar un programa que sea capaz de recibir las instrucciones enviadas desde el PC, de guardarlas en la memoria del microcontrolador,

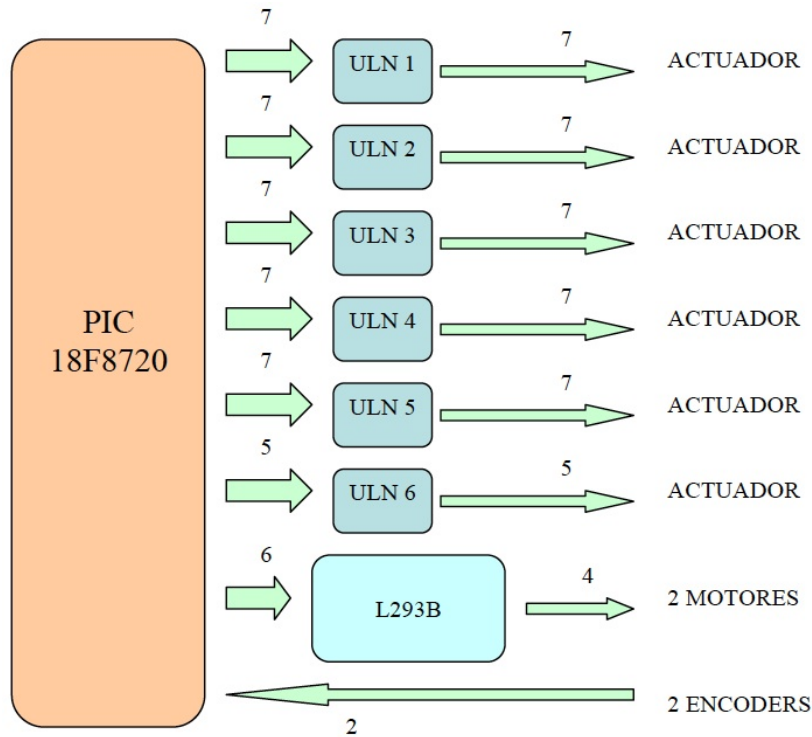


Figura A.6: Diagrama de la etapa de potencia

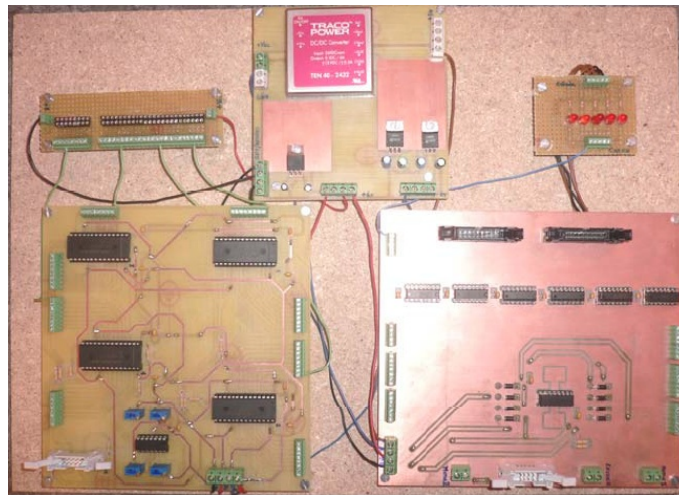


Figura A.7: Placa prototipo de la electrónica de potencia del sistema de control de la RL3

de procesarlas y de interpretarlas para mandar la información deseada a los selectores y dentro de una secuencia ordenada y programable, de modo que la mano haga lo que el usuario o el sistema de control general desee en cada momento.

La tarea a realizar no solo se focalizaba en la programación del microcontrolador para que sea capaz de procesar los comandos recibidos sino que también se debía definir instrucciones básicas dentro de dicho algoritmo que pudiesen ser parte de instrucciones más complejas y a su vez que tengan cierta estructura lógica para que puedan ser interpretadas y ejecutadas. En el Cuadro A.1 se listan estas instrucciones básicas.

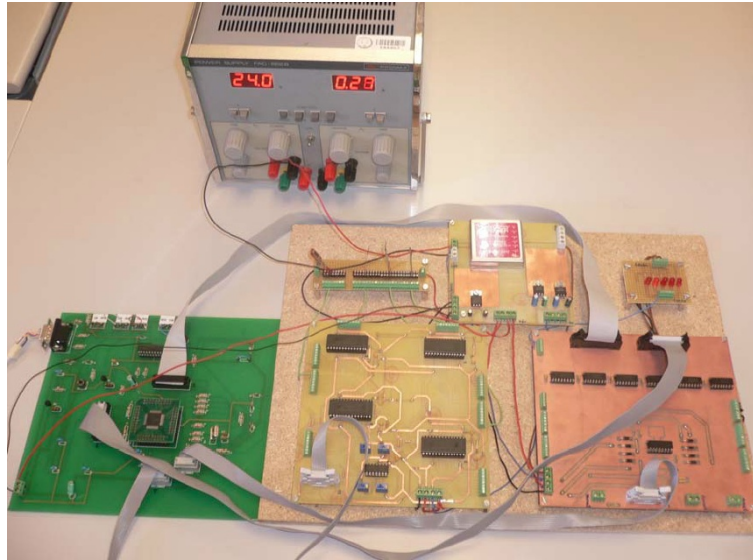


Figura A.8: Prototipo completo de la electrónica de control de la RL3

Instrucción	Aplicación
<i>CAxx</i>	Cierra la articulación <i>xx</i> de la mano
<i>RESxx</i>	Resetea la articulación <i>xx</i> de la mano
<i>BUCLE</i>	Repite las instrucciones internas hasta que se cumplan las condiciones de todas ellas
<i>SOLTAR</i>	Lleva todas las articulaciones de la mano a su posición inicial
<i>PARAR</i>	Para el motor principal
<i>GP</i>	Giro positivo del motor principal
<i>GN</i>	Giro negativo del motor principal
<i>VMyy-z</i>	Giro del motor <i>z</i> a una velocidad en tanto por ciento igual a <i>yy</i>
<i>PUL-xxx</i>	Gira el motor 2 hasta alcanzar los grados introducidos por el usuario en <i>xxx</i>
<i>SINCR</i>	Gira el motor 2 hasta alcanzar su sincronización
<i>TM-ssss</i>	Activa el motor 1 durante un tiempo en milisegundos igual a <i>ssss</i>

Cuadro A.1: Instrucciones básicas del interprete principal

Estas instrucciones son leídas por el *Intérprete Principal* cuya función es recorrer todas las instrucciones recibidas por el puerto de comunicación y almacenarla en la variable *dato* para que se ejerza la acción ligada a la misma.

Dentro de la función *BUCLE*, que tiene como tarea leer una a una las instrucciones que hay dentro de su entorno, también se comprueba el estado de todos los sensores y en función de como estén en ese momento, realizar la tarea correspondiente dependiendo de la instrucción asociada a la misma. En el Cuadro A.2 se listan todas las instrucciones que se aceptan dentro de este entorno.

Así como las instrucciones básicas en el programa general son leídas por el *Intérprete*



Función	Condición
<i>PA</i>	Si los sensores de la articulación deseada detectan contacto o fin de ángulo se parará
<i>SA</i>	Si los sensores de la articulación deseada detectan contacto o fin de ángulo irá a la posición inicial
<i>FU</i>	Si los sensores de fuerza de la articulación detectan una fuerza igual o mayor a la enviada en la instrucción se parará
<i>ANG</i>	Si el sensor de ángulo de la articulación detecta un ángulo igual o mayor a la enviada en la instrucción se parará
<i>FA</i>	Si algún sensor de fuerza de la mano detecta una fuerza igual o mayor a la enviada en la instrucción por el usuario se parará el motor

Cuadro A.2: Funciones básicas dentro del entorno *BUCLE*

Principal, para el caso del entorno de *BUCLE*, las funciones de dicho entorno son leídas por un *Intérprete de Bucle*.

La configuración de ambos intérpretes ayudados a un diseño de flujogramas específicos para cada función hacen que la programación de la RL3 sea relativamente sencilla y en alto nivel, sin tener que entrar en algoritmos complicados dentro del mismo sistema de control. La idea es justamente que el sistema de control general del sistema robótico al que será montada la RL3 desarrolle esos algoritmos de control para que las tareas del mismo se correspondan con las de la mano y a su vez dotarse de instrucciones básicas que puedan ser programadas de forma secuencial y ordenada.

Otra de las ventajas que tiene tanto el diseño del *hardware* como del *software*, es que ambos permiten la adaptación de nuevas instrucciones o grupos de instrucciones que definan tareas básicas repetitivas o simplemente nuevas funciones e instrucciones básicas que puedan ser incorporadas a la programación.

En la Figura A.9 se puede observar lo sencilla que es la estructura de programación dentro del lenguaje diseñado.

Para comprobar la viabilidad del lenguaje de programación y de la estructura interna del mismo, se diseñó un interfaz denominada *Hand Control Code Editor* (HCCE) de forma que sea intuitivo y de fácil utilización. Su objetivo principal es el de comprobar determinados paquetes de instrucciones o generar nuevas instrucciones y comprobar su funcionamiento. En el futuro se piensa conectar esta aplicación al simulador virtual de la RL3 para que se pueda verificar nuevas tareas programadas en dicho entorno antes de ser incorporados al sistema de control de la RL3 de forma definitiva. En la Figura A.10 se puede observar varias ventanas del HCCE diseñado.

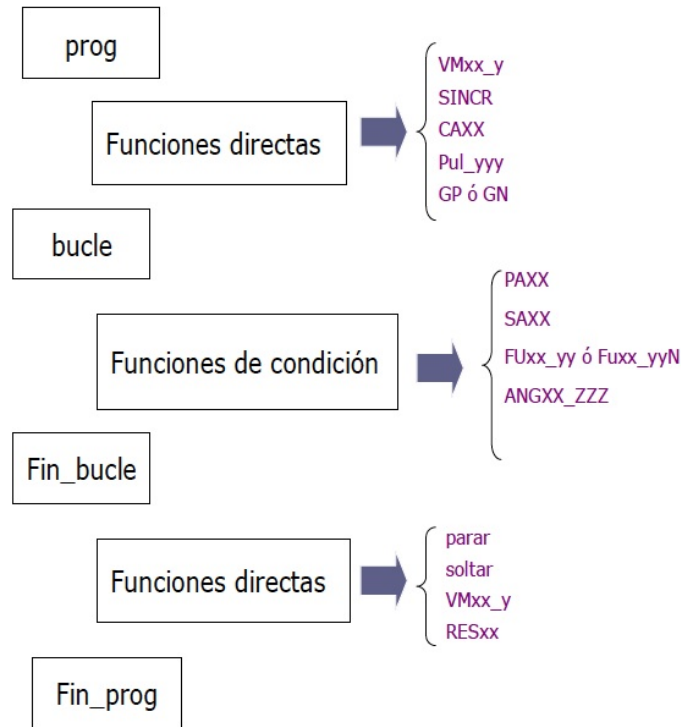


Figura A.9: Estructura de un paquete de instrucciones y funciones en el lenguaje de programación diseñado

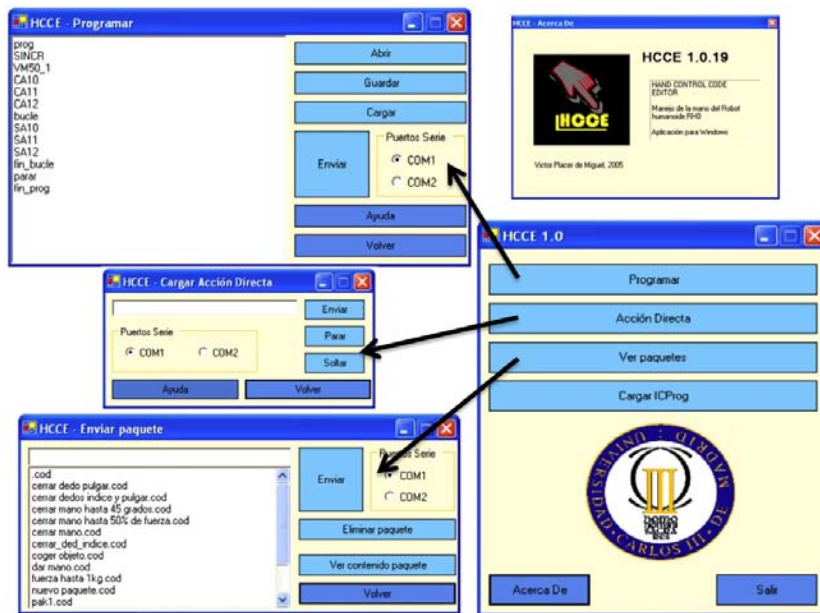


Figura A.10: Entorno de programación del HCCE de la RL3

Bibliografía

- [1] *Barret Hand Webpage*. <http://www.barrett.com>.
- [2] *CEDRAT Technologies (Grupo CEDRAT)*. <http://www.cedrat.com/>.
- [3] *DLR - Institute of Robotics and Mechatronics*. <http://www.robotic.dlr.de>.
- [4] *Human Grasping Database* - <http://web.student.tuwien.ac.at/e0227312/> (Agosto del 2010).
- [5] *Laboratoire de Robotique de l'Université Laval*. <http://robot.gmc.ulaval.ca/>.
- [6] *Laboratorio de Robótica de la Universidad Carlos III de Madrid*. <http://roboticslab.uc3m.es>.
- [7] *New Focus Inc.* <http://www.newfocus.com>.
- [8] *Physik Instrumente GmbH & Co.* <http://www.physikinstrumente.com>.
- [9] *Proyecto GRASP*. <http://www.csc.kth.se/grasp/>.
- [10] *Shadow Robot Company Ltd.* <http://www.shadowrobot.com>.
- [11] *Piezoelectric Ceramics, Data Book for Designers*. Morgan Matroc Ltd., 1996.
- [12] Chapter 5 multi-fingered hands: A survey. In P. Chiacchio and S. Chiaverini, editors, *Complex Robotic Systems*, volume 233, pages 129–160. Springer Berlin / Heidelberg, 1998.
- [13] Shadow dextrous hand c5: Technical specification. Technical report, Shadow Robot Company, Ltd., 2007.
- [14] Data sheet of the barrett hand. Technical report, Barrett Technology Inc., 2008.
- [15] D. Alba, M. Armada, and R. Ponticelli. An introductory revision to humanoid robot hands. *Climbing and Walking Robots: Proceedings of the 7th International Conference CLAWAR 2004*, Parte IV:701–712, 2005.
- [16] R.O. Ambrose, H. Aldridge, R.S. Askew, R.R. Burrige, W. Bluethmann, M. Diftler, C. Lovchik, D. Magruder, and F. Rehnmark. Robonaut: Nasa's space humanoid. *IEEE Intelligent Systems and Their Applications*, 15, 2000.

- [17] M. Arbulú, L.M. Cabás, D. Kaynov, P. Staroverov, and C. Balaguer. Trends of new robotics platform, designing humanoid robot rh-1. *ISPE International Conference on CAD/CAM Robotics and Factories of the Future*, 2007.
- [18] M. Arbulú, D. Kaynov, L.M. Cabas, and C. Balaguer. The rh-1 full-size humanoid robot: design, walking pattern generation and control. *Journal of Applied Bionics and Biomechanics*, 6:301–344, 2009.
- [19] M. Arbulú, D. Kaynov, L.M. Cabás, P. Staroverov, and C. Balaguer. Nuevas tendencias en plataformas de robótica, caso robot humanoide rh-1. *Congreso Internacional de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Sistemas*, 2007.
- [20] b. Vanderborght, B. Verrelst, R. Van Ham, and D. Lefeber. Controlling a bipedal walking robot actuated by pleated pneumatic artificial muscles. *Robotica*, 24:401 – 410, 2006.
- [21] C. Balaguer, A. Giménez, and M. Abderrahim. Climbing robots for inspection of steel based infrastructures. *Industrial Robot*, 29:246–251, 2002.
- [22] C. Balaguer, A. Giménez, and A. Jardón. Climbing robots’ mobility for inspection and maintenance of 3d complex environments. *Autonomous Robots*, 18:157–169, 2005.
- [23] C. Balaguer, A. Giménez, A. Jardón, R. Cabas, and R. Correal. Live experimentation of the service robot applications elderly people care in home environments. *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2005.
- [24] C. Balaguer, A. Giménez, A. Jardón, R. Correal, R. Cabas, and P. Staroverov. Light weight autonomous robot for elderly and disabled persons’ service. *International Conference on Field and Service Robotics*, 2003.
- [25] C. Balaguer, A. Giménez, and V. M. Padrón. Roma: Multifunctional autonomous climbing robot for inspection applications. *CLAWAR News*, 2:16–16, 1999.
- [26] Yoseph Bar-Cohen. *Electroactive Polymer (EAP) Actuators as Artificial Muscles: Reality, Potential, and Challenges*. SPIE Press, 2001.
- [27] B. Barkat, G. Bessonnet, and J.P. Lallemand. Hyperstatic grasping optimization with finger deformability and sliding constraints. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 3:1923 – 1930, 1994.
- [28] O. Becker, I. Pietsch, and J. Hesselbach. Robust task-space control of hydraulic robots. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 3:4360 – 4365, 2003.
- [29] L. Biagiotti, F. Lott, C. Melchiorri, G. Vassura, and P. Tiezzi. Ubh 3: an anthropomorphic hand with simplified endo-skeletal structure and soft continuous fingerpads. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 5:4736– 4741, 2004.
- [30] L. Biagiotti, F. Lotti, C. Melchiorri, and G. Vassura. How far is the human hand? a review on anthropomorphic robotic end-effectors. *DIES Internal Report, University of Bologna*, 2002.

- [31] L. Biagiotti, F. Lotti, C. Melchiorri, and G. Vassura. How far is the human hand? a review on anthropomorphic robotic end-effectors (anexo). *DIES Internal Report, University of Bologna*, 2002.
- [32] L. Biagiotti, F. Lotti, C. Melchiorri, and G. Vassura. An integrated approach to the design of complex robotic end-effectors. *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, 1:70–75, 2003.
- [33] L. Biagiotti, F. Lotti, C. Melchiorri, and G. Vassura. Mechatronic design of innovative fingers for anthropomorphic robot hands. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 3:3187–3192, 2003.
- [34] A. Bicchi. On the closure properties of robotic grasping. *International Journal of Robotics Research*, 1994.
- [35] A. Bicchi. Hands for dexterous manipulation and robust grasping: a difficult road toward simplicity. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 16:652 – 662, 2000.
- [36] A. Bicchi and R. Sorrentino. Dexterous manipulation through rolling. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1:452 – 457, 1995.
- [37] A. Bicchi and V.Kumar. Robotic grasping and contact: A review. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2000.
- [38] M.C. Birch, R.D. Quinn, G. Hahm, S.M. Phillips, B. Drennan, A. Fife, H. Verma, and R.D. Beer. Design of a cricket microrobot. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2:1109 – 1114, 2000.
- [39] L. Birglen, T. Laliberté, and C. Gosselin. *Underactuated Robotic Hand*. Springer Tracts in Advanced Robotics (STAR), 2008.
- [40] A. Blake. A symmetry theory of planar grasp. *The International Journal of Robotics Research*, 14:425–444, 1995.
- [41] W. Bluethmann, R. Ambrose, M. Diftler, S. Askew, E. Huber, M. Goza, F. Rhenmark, C. Lovchik, and d. Magruder. Robonaut: A robot designed to work with humans in space. *Autonomous Robots*, 14:179–197, 2003.
- [42] L. Bologni, S. Caselli, and C. Melchiorri. Design issues for the u.b. robotic hand. *Advanced Research Workshop ARW: Robots with Redundancy: Design, Sensing and Control*, 1988.
- [43] C. Bonivento, E. Faldella, and G. Vassura. The university of bologna robotic hand project: current state and future developments. *IEEE Fifth International Conference Advanced Robotics*, 1:349–356, 1991.
- [44] C. Borst, Fischer, S. Haidacher, H. Liu, and G. Hirzinger. Dlr hand ii: experiments and experience with an anthropomorphic hand. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1:702–707, 2003.

- [45] Ch. Borst, M. Fischer, and G. Hirzinger. Calculating hand configurations for precision and pinch grasps. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2:1553 – 1559, 2002.
- [46] Ch. Borst, M. Fischer, and G. Hirzinger. 6 efficient and precise grasp planning for real world objects. In Federico Barbagli, Domenico Prattichizzo, and Kenneth Salisbury, editors, *Multi-point Interaction with Real and Virtual Objects*, volume 18, pages 91–111. Springer Berlin / Heidelberg, 2005.
- [47] D.L. Brock. Enhancing the dexterity of a robot hand using controlled slip. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1:249 – 251, 1988.
- [48] R. Brost. Automatic grasp planning in the presence of uncertainty. *IEEE International Conference on Robotics and Automation. Proceedings*, 3:1575 – 1581, 1986.
- [49] Fanping Bu and Bin Yao. Observer based coordinated adaptive robust control of robot manipulators driven by single-rod hydraulic actuators. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 3:3034 – 3039, 2000.
- [50] Fanping Bu and Bin Yao. Nonlinear model based coordinated adaptive robust control of electro-hydraulic robotic arms via overparametrizing method. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 4:3459 – 3464, 2001.
- [51] J. Butterfass, M. Fischer, M. Grebenstein, S. Haidacher, and G. Hirzinger. Design and experiences with dlr hand ii. *World Automation Congress*, 15:105–110, 2004.
- [52] J. Butterfass, M. Grebenstein, H. Liu, and G. Hirzinger. Dlr-hand ii: next generation of a dextrous robot hand. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1:109– 114, 2001.
- [53] J. Butterfass, G. Hirzinger, S. Knoch, and H. Liu. Dlr’s multisensory articulated hand part i: Hard and software architecture. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 3:2081–2086, 1998.
- [54] L.M. Cabas, R. Cabas, P. Staroverov, M. Arbulú, D. Kaynov, C. Pérez, and C. Balaguer. Challenges in the design of the humanoid robot rh-1. *Internacional Conference on Climbing and Walking Robots*, 2006.
- [55] L.M. Cabas, R. Cabas, P. Staroverov, M. Arbulú, D. Kaynov, C. Pérez, and C. Balaguer. Mechanical calculations on a humanoid robot. *Internacional Conference on Climbing and Walking Robots*, 2006.
- [56] L.M. Cabas, S. Torre, M. Arbulú, and C. Balaguer. Development of the light-weight human size humanoid robot rh-0. *International Conference on Climbing and Walking Robots*, 2004.
- [57] L.M. Cabas, S. Torre, R. Cabas, D. Kaynov, M. Arbulú, P. Staroverov, and C. Balaguer. Mechanical design and dynamic analysis of the humanoid robot rh-0. *International Conference on Climbing and Walking Robots*, 2005.
- [58] Luis María Cabás. *Mecatrónica Bioinspirada de Robots Humanoides de Tamaño Natural*. PhD thesis, Universidad Carlos III de Madrid, 2009.

- [59] R. Cabás. Diseño de un dispositivo de anclaje para el brazo robótico mats. Technical report, Universidad Carlos III de Madrid. Laboratorio de Robótica, 2004.
- [60] R. Cabás and C. Balaguer. Design and development of a light weight embodied robotic hand activated with only one actuator. *IEEE International Conference on Intelligent Robots and System*, 2005.
- [61] R. Cabás, L.M. Cabás, and C. Balaguer. Optimized design of the underactuated robotic hand. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2006.
- [62] A. Caffaz, S. Bernieri, G. Cannata, and G. Casalino. The dist-hand robot. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 3:V25–V26, 1997.
- [63] A. Caffaz and G. Cannata. The design and development of the dist-hand dextrous gripper. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 3:2075–2080, 1998.
- [64] M.E. Cambron, S.G. Northup, and R.A. Peters. Grasping with pneuhand ii. *IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication*, pages 97 – 102, 2005.
- [65] Kuo-Tsai Chang and M. Ouyang. Rotary ultrasonic motor driven by a disk-shaped ultrasonic actuator. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 53:831–837, 2006.
- [66] T.A. Chase and R.C. Luo. A capacitive tri-axial tactile force sensor design. *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, page 58, 1997.
- [67] Y.C. Chen, I.D. Walker, and J.B. Cheatham. A new approach to force distribution and planning for multifingered grasps of solid objects. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1:890 – 896, 1991.
- [68] Y.C. Chen, I.D. Walker, and J.B. Cheatham. Visualization of force-closure grasps for objects through contact force decomposition. *International Journal of Robotics Research*, 1:37–75, 1995.
- [69] S. Chillari, S. Guccione, and G. Muscato. An experimental comparison between several pneumatic position control methods. *IEEE Conference on Decision and Control*, 2:1168 – 1173, 2001.
- [70] Kyu-Jin Cho and H. Asada. Multi-axis sma actuator array for driving anthropomorphic robot hand. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 1356 – 1361, 2005.
- [71] Kyu-Jin Cho, J. Rosmarin, and H. Asada. Sbc hand: A lightweight robotic hand with an sma actuator array implementing c-segmentatio. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 921–926, 2007.
- [72] Nak Young Chong, Dong-Hoon Choi, and II Hong Suh. Dextrous manipulation planning of multifingered hands with soft finger contact model. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 4:3389 – 3396, 1994.

- [73] N.Y. Chong, D. Choi, and I.H. Suh. A finite motion planning strategy for multi-fingered robotic hands considering sliding and rolling contacts. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 3:180 – 187, 1993.
- [74] et al C.M. Light. Critical review of functionality assessment of natural and prosthetic hands. *British journal of occupational therapy*, 62:7–12, 1999.
- [75] et al C.M. Light. Establishing a standardized clinical assessment tool of pathologic and prosthetic hand function: normative data, reliability, and validity. *Archives of physical medicine and rehabilitation*, 83:776–783, 2002.
- [76] J.A. Coelho and R.A. Grupen. Online grasp synthesis. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 3:2137 – 2142, 1996.
- [77] A.A. Cole, P. Hsu, and S. Sastry. Dynamic regrasping by coordinated control of sliding for a multifingered hand. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2:781 – 786, 1989.
- [78] A.C. Cole, J.E. Hauser, and S. Sastry. Kinematics and control of multifingered hands with rolling contact. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 34:398 – 404, 1984.
- [79] W.P. Cooney and E.Y. Chao. Biomechanical analysis of static forces in the thumb during hand function. *J. Bone Joint Surg Am*, 59:27–36, 1977.
- [80] R. Correal, A. Jardón, R. Cabas, A. Giménez, and C. Balaguer. Asibot, robot de asistencia a discapacitados y personas mayores. *Congreso Internacional sobre Domótica, Robótica y Teleasistencia*, 2005.
- [81] R. Correal, A. Jardón, S. Martínez, R. Cabas, A. Giménez, and C. Balaguer. Human-robot coexistence in robot-aided apartment. *International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, 2006.
- [82] J.D. Crisman, C. Kanojia, and I. Zeid. Graspar: A flexible, easily controllable robotic hand. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 3:32–38, 1996.
- [83] Jian Cui, Fan Ding, and Qipeng Li. Novel bidirectional rotary proportional actuator for electrohydraulic rotary valves. *IEEE Transactions on Magnetics*, 43:3254–3258, 2007.
- [84] M. Cutkosky. On grasp choice, grasp models, and the design of hand for manufacturing tasks. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 5:269 – 279, 1989.
- [85] M. Cutkosky and P. Wright. Modeling manufacturing grips and correlations with the design of robotic hands. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 3:1533 – 1539, 1986.
- [86] F. Daerden. *Conception and realization of Pleated Pneumatic Artificial Muscles and their use as compliant actuation elements*. PhD thesis, Vrije Universiteit Brussel, 1999.

- [87] F. Daerden and D. Lefeber. The concept and design of pleated pneumatic artificial muscles. *International Journal of Fluid Power*, 2:41–50, 2001.
- [88] F. Daerden and D. Lefeber. Pneumatic artificial muscles: actuators for robotics and automation. *European Journal of Mechanical and Environmental Engineering*, 1:10–21, 2002.
- [89] C. Dawson and H.R. Bolton. Design of a class of wide-angle limited-rotation rotary actuators. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 126:345–350, 1979.
- [90] C. Dawson and H.R. Bolton. Limited motion rotary actuators of the toroidal-stator, permanent-magnet rotor type. *IEEE Proceedings Electric Power Applications*, 129:190–198, 1982.
- [91] S. de la Flor López. *Simulación numérica y correlación experimental de las propiedades mecánicas en las aleaciones con memoria de forma*. PhD thesis, Universidad Politècnica de Catalunya - Departamento de Resistencia de Materiales y Estructuras en Ingeniería, 2005.
- [92] A.S. Deo and I.D. Walker. Dynamics and control methods for cooperating manipulators with rolling contacts. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2:1509 – 1516, 1995.
- [93] T. Doersam and P. Duerrschmied. Compensation of friction in mechanical drives for a three fingered robot gripper. *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 3:1060–1067, 1996.
- [94] Z. Doulergi and N. Fahantidis. Picking up flexible pieces out of a bundle. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2:9 – 19, 2002.
- [95] D. Shiokata, A. Namiki, and M. Ishikawa. Robot dribbling using a high-speed multi-fingered hand and a high-speed vision system. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 2097–2102, 2005.
- [96] Jayatilake Dushyantha and Suzuki Kenji. A multiple sma hybrid actuator to generate expressions on the face. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 2203–2208, 2010.
- [97] J.M. Elliott and K.J. Connolly. A classification of manipulative hand movements. *Developmental medicine and child neurology*, 26:283–296, 1984.
- [98] S.J. Edwards et al. Developmental and functional hand grasps. *Slack Incorporated*, 1, 2002.
- [99] A. Eusebi, C. Fantuzzi, C. Melchiorri, M. Sandri, and A. Tonielli. The ub hand ii control system: design features and experimental results. *IEEE 20th International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation*, 2:782–787, 1994.
- [100] R. Fearing. Simplified grasping and manipulation with dextrous robot hands. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 2:188 – 195, 1986.

- [101] R. Fearing. Some experiments with tactile sensing during grasping. *IEEE International Conference on Robotics and Automation. Proceedings*, 4:1637–1643, 1987.
- [102] T. Feix, R. Pawlik, H. Schmiedmayer, J. Romero, and D. Kragic. A comprehensive grasp taxonomy. *Robotics, Science and Systems Conference: Workshop on Understanding the Human Hand for Advancing Robotic Manipulation*, Poster Presentation, 2009.
- [103] D. Fernandez, L. Moreno, and J. Baselga. A bio-inspired eap actuator design methodology. *Proceedings of SPIE*, 5759, 2005.
- [104] Diego Fernandez. *Metodología de caracterización de polímeros electroactivos y diseño de músculos artificiales*. Tesis Doctoral, 2007.
- [105] D. Fernández, L. Moreno, and J. Baselga. Actuator design using electroactive materials. smart sensors actuators and mems ii. *Microtechnologies for the New Millennium*, 2005.
- [106] C. Ferrari and J. Canny. Planning optimal grasps. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 3:2290 – 2295, 1992.
- [107] L. Flemming and S. Mascaró. Control of scalable wet sma actuator arrays. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 1338–1343, 2005.
- [108] O. Fuentes and R.C. Nelson. A robotic hand mechanism with rotating fingertips and motor-tendon actuation. *Autonomous Robots*, 5:395–405, 1998.
- [109] N. Fukaya, S. Toyama, T. Asfour, and R. Dillman. Design of the tuat/karlsruhe humanoid hand. *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 3:1754–1759, 2000.
- [110] C. Gans and W.J. Bock. The functional significance of muscle architecture. *Ergeb. Anat. Entwicklungsgesch.*, 38:115–142, 1965.
- [111] X.H. Gao, M.H. Jin, L. Jiang, Z.W. Xie, P. He, L. Yang, Y.W. Liu, R. Wei, H.G. Cai, H. Liu, J. Butterfass, M. Grebenstein, N. Seitz, and G. Hirzinger. The hit/dlr dexterous hand: work in progress. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 3:3164–3168, 2003.
- [112] A. Giménez and C. Balaguer. The mats robotic system to assist disabled people in their home environments. *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2003.
- [113] A. Giménez, A. Jardón, and C. Balaguer. Analysis of the direct and inverse kinematics of roma ii robot. *CLAWAR International Conference on Climbing and Walking Robots*, 2005.
- [114] A. Giménez, A. Jardón, R. Correal, R. Cabas, and C. Balaguer. Service robot applications for elderly people care in home environments. *International workshop on advances in service robotics*, 2004.
- [115] F. Giorgi, A. Caffaz, G. Casalino, and A. Turetta. Modular control technology for antropomorphic robotic hands. *World Automation Congress*, 15:503–510, 2004.



- [116] X.Y. Zhang Y. Nakamura K. Goda and K. Yoshimoto. Robustness of power grasp. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 4:2828 – 2835, 1994.
- [117] M. Gogola, E.J. Barth, and M. Goldfarb. Monopropellant powered actuators for use in autonomous human-scaled robotics. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 3:2357 – 2362, 2002.
- [118] C. Goldfeder, P.K. Allen, C. Lackner, and R. Pelossof. Grasp planning via decomposition trees. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 4679 – 4684, 2007.
- [119] C. Gosselin and T. Laliberté. Underactuated mechanical finger with return actuation. Technical report, US Patent N° 5 762 390 and CA Patent N° 2 209 863 AA, 1996.
- [120] R.A. Grupen. Planning grasp strategies for multifingered robot hands. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1:646 – 651, 1991.
- [121] Yisheng Guan and Hong Zhang. Kinematic feasibility analysis of 3-d multifingered grasps. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 19:507 – 513, 2003.
- [122] G. Guo, W. A. Gruver, and X. Qian. A robotic hand mechanism with rotating fingertips and motor-tendon actuation. *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, 2:1023–1028, 1991.
- [123] G. Guo, W.A. Gruver, and K. Jin. Grasp planning for multifingered robot hands. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 3:2284 – 2289, 1992.
- [124] T. Hack. Experiments with a new piezoelectric rotary actuator. *IEEE International Frequency Control Symposium*, pages 724–732, 1998.
- [125] H. Hai, L. Jiang, L. Yiwei, H. Linqi, C. Hegao, and L. Hong. The mechanical design and experiments of hit/dlr prosthetic hand. *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, pages 896–901, 2006.
- [126] W.X. Han, Q. Zhang, Y.T. Ma, C.L. Pan, and Z.H. Feng. An impact rotary motor based on a fiber torsional piezoelectric actuator. *Review of Scientific Instruments*, 80:014701 – 014701–5, 2009.
- [127] T. Hashimoto, S. Hiramatsu, and H. Kobayashi. Development of face robot for emotional communication between human and robot. *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, pages 25 – 30, 2006.
- [128] T. Hiruta, S. Sugamoto, and K. Kosuge. Robustness of power grasp with human skin characteristics. *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, pages 881 – 886, 2005.
- [129] G. Hirzinger, B. Brunner, J. Dietrich, and J. Heindi. Rotex: The first remotely controlled robot in space. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 3:2604–2611, 1994.



- [130] M. Honegger and P. Corke. Model-based control of hydraulically actuated manipulators. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 3:2553 – 2559, 2001.
- [131] W. Stamps Howard and V. Kumar. Stability of planar grasps. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 4:2822 – 2827, 1994.
- [132] W.S. Howard and V. Kumar. Modeling and analysis of the compliance and stability of enveloping grasps. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2:1367 – 1372, 1995.
- [133] W.S. Howard and V. Kumar. On the stability of grasped objects. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 12:904 – 917, 1996.
- [134] R. Howe, I. Kay, and M.R. Cutkosky. The sliding of robot fingers under combined torsion and shear loading. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1:103 – 105, 1988.
- [135] R.D. Howe and M.R. Cutkosky. Practical force-motion models for sliding manipulation. *International Journal of Robotics Research*, 15:557 – 572, 1996.
- [136] Shiuh-Jer Huang and Hsin-Wei Shieh. Motion control of a nonlinear pneumatic actuating table by using self-adaptation fuzzy controller. *IEEE International Conference on Industrial Technology*, pages 1 – 6, 2009.
- [137] Gao Xiao Hui, Shi Shi Cai, and Zhao Da Wei. Hit anthropomorphic robotic hand and finger motion control. *Journal of Harbin Institute of Technology*, pages 49–51, 2006.
- [138] T. Iberall. The nature of human prehension: Three dextrous hands in one. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 4:396 – 401, 1987.
- [139] T. Iberall. Human prehension and dexterous robot hands. *The International Journal of Robotics Research*, 16:285–299, 1997.
- [140] K. Ikuta, H. Ichikawa, K. Suzuki, and T. Yamamoto. Micro hydrodynamic actuated multiple segments catheter for safety minimally invasive therapy. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2:2640 – 2645, 2003.
- [141] Diego Fernandez Infante. *Metodología de Caracterización de Polímeros Electroativos y Diseño de Músculos Artificiales*. PhD thesis, Universidad Carlos III de Madrid, 2007.
- [142] O.M. Ismaeil and R.E. Ellis. Grasping using the whole finger. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 4:3111 – 3116, 1994.
- [143] S. Jacobsen, E. Iversen, D. Knutti, R. Johnson, and K. Biggers. Design of the utah-mit dextrous hand. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 3:1520– 1532, 1986.
- [144] S.C. Jacobsen, J.E. Wood, D.F. Knutti, K.B. Biggers, and E.K. Iversen. The utah/mit dextrous hand: Work in progress. *International Journal of Robotics Research*, 4:21–50, 1984.



- [145] B. Jaffe, W.R. Cook, and H. Jaffe. Piezoelectric ceramics. *Academic Press*, 3, 1971.
- [146] R.A. Jarvis. Automatic grip site detection for robotics manipulators. *Australian Computer Science Communications*, 10:346–356, 1988.
- [147] B.M. Jau. Feasibility analysis of performing eva tasks with dextrous robots. Technical report, JPL IOM Nr. 3474-94-007, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, CA, Feb. 25, 1994.
- [148] B.M. Jau. Dexterous telemanipulation with four fingered hand system. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1:338 – 343, 1995.
- [149] L. Jiang, M.H. Jin, X.H. Gao, Z.W. Xie, L. Yang, P. He, Y.W. Liu, R. Wei, H.G. Cai, H. Liu, N. Seitz, M. Grebenstein, and G. Hirzinger. Multisensory hit/dlr dextrous robot hand. *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, 1:76–81, 2003.
- [150] I. Kamon, T. Flash, and S. Edelman. Learning to grasp using visual information. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 3:2470 – 2476, 1996.
- [151] S.B. Kang and K. Ikeuchi. A framework for recognizing grasps. Technical report, CMU Tech Report. CMU-RI-TR-91-2, 1991.
- [152] S.B. Kang and K. Ikeuchi. Grasp recognition using the contact web. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 1:194 – 201, 1992.
- [153] I. Kao and M.R. Cutkosky. Quasistatic manipulation with compliance and sliding. *International Journal of Robotics Research*, 11:20–40, 1992.
- [154] I. Kao and M.R. Cutkosky. Comparison of theoretical and experimental force/motion trajectories for dextrous manipulation with sliding. *International Journal of Robotics Research*, 12:529–534, 1993.
- [155] I.A. Kapandji. *Physiology of the joints: Upper extremities, Volume 1*. Churchill Livingstone, 1982.
- [156] I.A. Kapandji. *Cuadernos de fisiología articular*. 1996.
- [157] I.A. Kapandji. *Cuadernos de Fisiología Articular*. 1996.
- [158] H. Kawasaki and T. Komatsu. Development of an anthropomorphic robot hand driven by built-in servo-motors. *Proceedings of the 3rd International Conference On ICAM*, 1:215–220, 1998.
- [159] H. Kawasaki and T. Komatsu. Mechanism design of antropomorphic robot hand: Gifu hand i. *Journal of Robot and Mechatronics*, 11:269–273, 1999.
- [160] H. Kawasaky, T. Komatsu, and K.Uchiyama. Dexterous anthropomorphic robot hand with distributed tactile sensor - gifu hand ii. *IEEE-ASME Transactions on Mechatronics*, 7:296– 303, 2002.
- [161] J. Kerr and B. Roth. Analysis of multifingered hands. *International Journal of Robotics Research*, 4:3–17, 1986.

- [162] Byoung-Ho Kim, Sang-Rok Oh, Byung-Ju Yi, and Il Hong Suh. Optimal grasping based on non-dimensionalized performance indices. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2:949 – 956, 2001.
- [163] M. Kitamasu and M. Yoshida. Basic study for new type actuator using shape memory alloy. *International Conference on Engineering in Medicine and Biology Society*, 3:3135 – 3137, 2001.
- [164] H. Kobayashi and K. Hiramatsu. Development of muscle suit for upper limb. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 3:2480 – 2485, 2004.
- [165] V.R.C. Kode, M.C. Cavusoglu, and M.T. Azar. Design and characterization of a novel hybrid actuator using shape memory alloy and dc motor for minimally invasive surgery applications. *IEEE International Conference Mechatronics and Automation*, 1:416 – 420, 2005.
- [166] Je-Sung Koh and Kyu-Jin Cho. Omegabot : Biomimetic inchworm robot using sma coil actuator and smart composite microstructures (scm). *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, pages 1154 – 1159, 2009.
- [167] R. Kratz, S. Klug, M. Stelzer, and O. von Stryk. Biologically inspired reflex based stabilization control of a humanoid robot with artificial sma muscles. *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, pages 1089 – 1094, 2006.
- [168] K.H.E. Kroemer. Coupling the hand with the handle: an improved notation for touch grip and grasp. *Human Factors*, 28:337 – 339, 1986.
- [169] V. Kumar and K.J. Waldron. Suboptimal algorithms for force distribution in multifingered grippers. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 5:491 – 498, 1989.
- [170] V. Kumar, X. Yun, E. Paljug, and N. Sarkar. Control of contact conditions for manipulation with multiple robotic systems. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1:170 – 175, 1991.
- [171] V.M. Kvrjic. Computing of the sub-optimal grasping forces for manipulation of a rough object by multifingered robot hand. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2:1801 – 1806, 1996.
- [172] T. Laliberté and C. Gosselin. Underactuation in space robotic hands. *International Symposium on Artificial Intelligence and Robotics & Automation in Space*, 2001.
- [173] K. De Laurentis and C. Mavroidis. Mechanical design of a shape memory alloy actuated prosthetic hand. *Technology and Health Care*, 10:91–106, 2002.
- [174] Sung-Uk Lee and Pyung Hun Chang. Control of a heavy-duty robotic excavator using time delay control with switching action with integral sliding surface. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 4:3955 – 3960, 2001.
- [175] Y.K. Lee and I. Shimoyama. A skeletal framework artificial hand actuated by pneumatic artificial muscles. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2:926–931, 1999.



- [176] R. Le Letty, F. Claeysen, F. Barillot, and G. Thomin. Amplified piezoelectric actuators. *Preparing for the Future. ESA Publications*, 8:1, 1998.
- [177] Z. Li and J. Canny. Motion of two rigid bodies with rolling constraint. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 6:62 – 72, 1990.
- [178] Z. Li and S. Sastry. Task-oriented optimal grasping by multifingered robot hands. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 4:32–44, 1987.
- [179] T.K. Lien and P.G.G. Davis. A novel gripper for limp materials based on lateral coanda ejectors. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 57:33–36, 2008.
- [180] G. Lippman. Principe de la conservation de l'électricité. *Annales de chimie et de physique*, 24:145, 1881.
- [181] G. Lister. The hand: Diagnosis and surgical indications. *Churchill Livingstone*, 1984.
- [182] C.Y. Liu and W.H Liao. A snake robot using shape memory alloys. *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, pages 601 – 605, 2004.
- [183] H. Liu, J. Butterfass, S. Knoch, P. Meusel, and G. Hirzinger. A new control strategy for dlr's multisensory articulated hand. *IEEE Control Systems Magazine*, Volume 19, Issue 2:47–54, 1999.
- [184] H. Liu, P. Meusel, and G. Hirzinger. A tactile sensing system for the dlr three-finger robot hand. *IMEKO Technical Committee on Robotics*, pages 91–96, 1995.
- [185] H. Liu, p. Meusel, J. Butterfass, and G. Hirzinger. Dlr's multisensory articulated hand part ii: The parallel torque/position control system. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 3:2087–2093, 1998.
- [186] F. Lotti, P. Tiezzi, and G. Vassura. Ubh 3: investigating alternative design concepts for robotic hands. *IEEE World Automation Congress*, 15:135–140, 2004.
- [187] F. Lotti, P. Tiezzi, G. Vassura, L. Biagiotti, G. Palli, and C. Melchiorri. Development of ub hand 3: Early results. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 4488–4493, 2005.
- [188] F. Lotti and G. Vassura. A novel approach to mechanical design of articulated fingers for robotic hands. *IEEE International Conference on Intelligent Robots and System*, 2:1687–1692, 2002.
- [189] C.S. Lovchik and M.A. Diftler. The robonaut hand: A dextrous robot hand for space. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2:907–912, 1999.
- [190] G. Lundstrom, B. Glemme, and B.W. Rooks. Industrial robot: Gripper review. Technical report, International Fluidics Services Ltd., 1979.
- [191] D. Lyons. A simple set of grasps for a dextrous hand. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2:588 – 593, 1985.

- [192] H. Maekawa, K. Tanie, and K. Komoriya. Dynamic grasping force control using tactile feedback for grasp of multifingered hand. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 3:2462 – 2469, 1996.
- [193] X. Markenscoff, L. Ni, and CH. Papadimitriou. The geometry of grasping. *The International Journal of Robotics Research*, 9:61–74, 1990.
- [194] M.T. Mason and J.K. Salisbury. Robot hands and the mechanics of manipulation. *The MIT Press Series in Artificial Intelligence*, 1985.
- [195] Y. Matsuoka. The mechanisms in a humanoid robot hand. *Autonomous Robot*, 4:199–209, 1997.
- [196] I. McCammon and S. Jacobsen. Tactile sensing and control for the utah/mit hand. *Dextrous Robot Hand (eds) Springer-Verlag*, pages 238–266, 1990.
- [197] C. Melchiorri and G. Vassura. Mechanical and control features of the university of bologna hand version 2. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 187–193, 1992.
- [198] E. Melgoza and D. Rodger. Comparison of table models of electromagnetic actuators. *IEEE Transactions on Magnetics*, 38:953–956, 2002.
- [199] A.T. Miller, S. Knoop, H.I. Christensen, and P.K. Allen. Automatic grasp planning using shape primitives. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2:1824 – 1829, 2003.
- [200] B. Mirtich and J. Canny. Easily computable optimum grasps in 2-d and 3-d. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1:739 – 747, 1994.
- [201] K. Mirza and D.E. Orin. General formulation for force distribution in power grasp. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1:880 – 887, 1994.
- [202] M. Moallem and J. Lu. Experimental results for nonlinear flexure control using shape memory alloy actuators. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 4:3653 – 3658, 2004.
- [203] D.J. Montana. The kinematics of contact and grasp. *The International Journal of Robotics Research*, 7, 1988.
- [204] D.J. Montana. The kinematics of contact with compliance. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2:770 – 774, 1989.
- [205] D.J. Montana. The condition for contact grasp stability. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1:412 – 417, 1991.
- [206] D.J. Montana. The kinematics of multi-fingered manipulation. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 11:491 – 503, 1995.
- [207] S.B. Moon and S. Ahmad. Sub-time-optimal trajectory planning for cooperative multi-manipulator systems using the load distribution scheme. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1:1037 – 1042, 1993.

- [208] T. Mouri, H. Kawasaki, and K. Umebayashi. Developments of new anthropomorphic robot hand and its master slave system. *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 3225–3230, 2005.
- [209] T. Mouri, H. Kawasaki, K. Yoshikawa, J. Takai, and S. Ito. Anthropomorphic robot hand: Gifu hand iii. *Proceedings of International Conference on Control, Automation and System*, pages 1288–1293, 2002.
- [210] et al N. Kamakura. Patterns of static prehension in normal hands. *The American journal of occupational therapy: official publication of the American Occupational Therapy Association*, 34:437–445, 1980.
- [211] K. Nagai and T. Yoshikawa. Dynamic manipulation/grasping control of multifingered robot hands. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 3:1027 – 1033, 1993.
- [212] A. Namiki, Y. Imai, M. Ishikawa, and M. Kanek. Development of a high-speed multifingered hand system and its application to catching. *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 2666–2671, 2003.
- [213] M.M.S. Farias Nascimento, C.J. Araújo, J.S. da Rocha Neto, and A.M. Nogueira de Lima. Electro-thermomechanical characterization of ti-ni shape memory alloy thin wires. *Materials Research*, 9:15–19, 2006.
- [214] N.Furukawa, A.Namiki, S.Taku, and M.Ishikawa. Dynamic regrasping using a high-speed multifingered hand and a high-speed vision system. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 181–187, 2006.
- [215] V. Nguyen. Constructing force-closure grasps. *International Journal of Robotics Research*, 1:26–37, 1989.
- [216] T. Noritsugu, D. Sasaki, and M. Takaiwa. Application of artificial pneumatic rubber muscles to a human friendly robot. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2:2188 – 2193, 2003.
- [217] A.M. Okamura, N. Smaby, and M.R. Cutkosky. An overview of dexterous manipulation. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1:255 – 262, 2000.
- [218] T. Omata and M.A. Farooqi. Regrasps by a multifingered hand based on primitives. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 3:2774 – 2780, 1996.
- [219] T. Omata and K. Nagata. Rigid body analysis of the indeterminate grasp force in power grasps. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 16:46 – 54, 2000.
- [220] D. Osswald and H. Worn. Mechanical system and control system of a dextrous robot hand. *International Conference on Humanoid Robots*, 2001.
- [221] A. Pai and R. Gorbet. Memory alloy actuator. *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, pages 1–7, 2007.



- [222] Y.C. Park and G.C. Starr. Finger force computation for manipulation of an object by a multifingered robot hand. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2:930 – 935, 1989.
- [223] J. M. Pastor, C. Balaguer, A. Giménez, V. M. Padrón, and M. Abderrahim. Diseño y desarrollo de un robot escalador capaz de moverse por estructuras metálicas tridimensionales. *XIII Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica*, 1998.
- [224] A.M. Pawlak. Magnets in modern rotary actuators. *IEEE Industry Applications Conference*, 1:498–504, 1995.
- [225] A.M. Pawlak, S. Schultz, and V. Gangla. Rotary actuators. *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, pages 361–367, 1994.
- [226] A.M. Pawlak, S. Schultz, and V. Gangla. Rotary actuators with multipole ring magnets. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 31:1306–1314, 1995.
- [227] C. Pfeiffer, K. DeLaurentis, and C. Mavroidis. Shape memory alloy actuated robot prostheses: Initial experiments. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 3:2385 – 2391, 1999.
- [228] F. Pfeiffer and K. Richter. Optimal path planning including forces at the gripper. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 3:251–258, 1990.
- [229] N.S. Pollard. Synthesizing grasps from generalized prototypes. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 3:2124 – 2130, 1996.
- [230] J. Ponce, D. Stam, and B. Faverjon. On computing two-finger force-closure grasps of curved 2-d objects. *International Journal of Robotics Research*, 3:263–273, 1993.
- [231] J.L. Pons, E. Recon, R. Ceres, D. Reynaerts, B. Saro, S. Levin, and W. Van Moorleghem. The manus-hand dextrous robotics upper limb prosthesis - mechanical and manipulation aspects. *Autonomous Robots*, 16:143–163, 2004.
- [232] J.L. Pons, H. Rodríguez, I. Luyckx, D. Reynaerts, R. Ceres, and H. Van Brussel. High torque ultrasonic motors for hand prosthetics: Current status and trends. *Technology and Health Care. IOS Press*, 10:121 – 133, 2002.
- [233] M. Reichel and The Shadow Robot Company. Transformation of shadow dextrous hand and shadow finger test unit from prototype to product for intelligent manipulation and grasping. *International Conference on Intelligent Manipulation and Grasping*, 2004.
- [234] D. Reznik and V. Lumelsky. Multi-finger hugging: a robust approach to sensor-based grasp planning. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1:754 – 759, 1994.
- [235] M. Riley and C.G. Atkeson. Robot catching: Towards engaging human-humanoid interaction. *Autonomous Robots*, 12:119–128, 2002.
- [236] E. Rimon and J. Burdick. On force and form closure for multiple finger grasps. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2:1795 – 1800, 1996.



- [237] E. Rimon and J.W. Burdick. New bounds on the number of frictionless fingers required to immobilize 2d objects. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1:751 – 757, 1995.
- [238] D.W. Robinson and G.A. Pratt. Force controllable hydro-elastic actuator. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2:1321 – 1327, 2000.
- [239] L. Romdhane and J. Duffy. Kinestatic analysis of multifingered hands. *International Journal of Robotics Research*, 9:3–18, 1990.
- [240] J.B. Rosmarin and H.H. Asada. Synergistic design of a humanoid hand with hybrid dc motor - sma array actuators embedded in the palm. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 773 – 778, 2008.
- [241] F. Rothling, R. Haschke, J.J. Steil, and H. Ritter. Platform portable anthropomorphic grasping with the bielefeld 20-dof shadow and 9-dof tum hand. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 2951–2956, 2007.
- [242] J.K. Salisbury. *Kinematics and force analysis of articulated hands*. PhD thesis, Stanford University, 1982.
- [243] J.K. Salisbury and J.J. Craig. Articulated hands: Force control and kinematics issues. *International Journal of Robotics Research*, 1:1, 1982.
- [244] J.K. Salisbury and J.J. Craig. Force control and kinematic issues. *The International Journal of Robotics Research*, 1:4 – 17, 1982.
- [245] J.K. Salisbury and B. Roth. Kinematics and force analysis of articulated mechanical hands. *Journal of Mechanisms, Transmissions and Actuation in Design*, 105, 1983.
- [246] Kim Sang-Chae and Kim Soo Hyun. Precise rotary motor by inchworm motion using dual wrap belts. *Review of Scientific Instruments*, 70:2546 – 255, 1999.
- [247] P.J. Sanz. *Razonamiento geométrico basado en visión para la determinación y ejecución del agarre en robots manipuladores*. PhD thesis, Universitat Jaume I, 1996.
- [248] P.J. Sanz, A.P. Del Pobil, J.M. Inesta, and G. Recatala. Vision-guided grasping of unknown objects for service robots. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 4:3018 – 3025, 1998.
- [249] P.J. Sanz, A. Requena, J.M. Inesta, and A.P. Del Pobil. Grasping the not-so-obvious: vision-based object handling for industrial applications. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 12:44 – 52, 2005.
- [250] N. Sarkar, X. Yun, and V. Kumar. Dynamic control of 3-d rolling contacts in two-arm manipulation. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 13:364 – 376, 1997.
- [251] S. Schultz, C. Pylatiuk, and G. Bretthauer. A new class of flexible fluidic actuators and their applications in medical engineering. *Automatisierungstechnik*, 47:390–395, 1999.

- [252] S. Schultz, C. Pylatiuk, and G. Bretthauer. A new ultralight anthropomorphic hand. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 3:2437–2441, 2001.
- [253] B. Selden, Kyu-Jin Cho, and H.H. Asada. Segmented binary control of shape memory alloy actuator systems using the peltier effect. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 5:4931 – 4936, 2004.
- [254] B. Selden, Kyu-Jin Cho, and H.H. Asada. Multi-segment state coordination for reducing latency time of shape memory alloy actuator systems. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 1350 – 1355, 2005.
- [255] D.B. Slocum and D.R. Pratt. Disability evaluation of the hand. *J. Bone Joint Surg*, 28:491–495, 1946.
- [256] Qiang Song and Fang Liu. Improved control of a pneumatic actuator pulsed with pwm. *IEEE/ASME International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications*, pages 1 – 4, 2006.
- [257] S.A. Stansfield. Robotic grasping of unknown objects: A knowledge-based approach. *The International Journal of Robotics Research*, 10:314–326, 1991.
- [258] J. Steffen, R. Haschke, and H. Ritter. Experience-based and tactile-driven dynamic grasp control. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 2938 – 2943, 2007.
- [259] R. Suarez and P. Grosch. Mano mecánica ma-i. *XXIV Jornadas de Automática, CEA-IFAC, Leon, España*, 2003.
- [260] R. Suarez and P. Grosch. Dexterous robotic hand ma-i: Software and hardware architecture. *International Conferences on Intelligent Manipulation and Grasping*, pages 91–96, 2004.
- [261] Y. Tanaka and A. Yamada. A rotary actuator using shape memory alloy for a robot -analysis of the response with load. *IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems*, 2:1163–1168, 1991.
- [262] C.L. Taylor and R.J. Schwarz. The anatomy and mechanics of the human hand. *Artificial limbs*, 2:22–35, 1955.
- [263] Yee Harn Teh and R. Featherstone. Accurate force control and motion disturbance rejection for shape memory alloy actuators. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 4454 – 4459, 2007.
- [264] M. Teichmann. A grasp metric invariant under rigid motions. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 3, 1996.
- [265] T.Fischer and H.Woern. Structure of a robot system: Karlsruhe dextrous hand ii. *IEEE Mediterranean Conference on Control and Systems*, 1998.
- [266] T.Ishihara, A.Namiki, M.Ishikawa, and M.Shimojo. Dynamic pen spinning using a high-speed multifingered hand with high-speed tactile sensor. *IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, pages 258–263, 2006.

- [267] R. Tomovic, G. Bekey, and W. Karplus. A strategy for grasp synthesis with multi-fingered robot hands. *IEEE International Conference on Robotics and Automation. Proceedings*, 4:83 – 89, 1987.
- [268] S. Torre, L.M. Cabas, M. Arbulú, and C. Balaguer. Inverse dynamics of humanoid robot by balanced mass distribution method. *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2004.
- [269] J.C. Trinkle and R.P. Paul. Planning for dexterous manipulation with sliding contacts. *International Journal of Robotics Research*, 9:24–48, 1990.
- [270] N. Troisfontaine, P. Bidaud, and G. Morel. A new inter-phalangeal actuator for dexterous micro-grippers. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2:1773 – 1778, 1997.
- [271] M. Umeda, T. Nakazawa, K. Ohnishi, K. Nakamura, M. Kurosawa, and S. Ueha. Positioning characteristics of ultrasonic rotary actuator with two mode operation. *IEEE Proceedings of Ultrasonics Symposium*, 3:1201–1204, 1990.
- [272] F.J. Valero-Cuevas. Applying principles of robotics to understand the biomechanics, neuromuscular control and clinical rehabilitation of human digits. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1:270 – 275, 2000.
- [273] B. Vanderborght, B. Verrelst, R. Van Ham, M. Van Damme, R. Versluys, and D. Lefeber. *International Applied Mechanics*, chapter Treadmill walking of the pneumatic biped Lucy: Walking at different speeds and step-lengths, pages 830–837. Springer New York, 2008.
- [274] D.R. Walker, R.B. Gorbet, L.M. Toews, M. Whitney, and S. Corbin. Hybrid monolithic sma actuators. *IEEE/ASME International Conference on Advanced intelligent mechatronics*, pages 1–6, 2007.
- [275] R. Walker. Design of a dextrous hand for advanced clawar applications. *CLAWAR International Conference on Climbing and Walking Robots*, 2003.
- [276] W.T. Townsend. Mcb - industrial robot feature article - barrett hand grasper. *Industrial Robot: An International Journal*, v.27-n.3:181–188, 2000.
- [277] G. Wöhlke. The karlsruhe dextrous hand: grasp planning, programming and real-time control. *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 1:352–359, 1994.
- [278] G. Wöhlke. Object manipulation with dextrous multi-finger hand: Improved computational method. *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2:1469–1476, 1994.
- [279] Jijie Xu, Yunjiang Lou, and Zexiang Li. Grasping force optimization for whole hand grasp. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 1582 – 1587, 2006.
- [280] Jijie Xu, M.Y. Wang, Hong Wang, and Zexiang Li. Force analysis of whole hand grasp by multifingered robotic hand. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 211 – 216, 2007.

- [281] Y. Xue and I. Kao. Dexterous sliding manipulating using soft fingertips. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 4:3397 – 3402, 1994.
- [282] N. Xydas and I. Kao. Modeling of contact mechanics and friction limit surface for soft fingers in robotics with experimental results. *International Journal of Robotics Research*, 18:941 – 950, 1999.
- [283] K. Yaegashi, N. Saga, and T. Satoh. Control of robot arm using pneumatic artificial muscle with spherical joint. *IEEE International Conference Mechatronics and Automation*, 2:1093 – 1098, 2005.
- [284] Y. Yamakawa, A. Namiki, M. Ishikawa, and M. Shimojo. Knotting manipulation of a flexible rope by a multifingered hand system based on skill synthesis. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 2691 – 2696, 2008.
- [285] Qinghua Yang, Libin Zhang, Guanjun Bao, Sheng Xu, and Jian Ruan. Research on novel flexible pneumatic actuator fpa. *IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics*, 1:385 – 389, 2004.
- [286] Yousheng Yang, C. Semini, E. Guglielmino, N.G. Tsagarakis, and D.G. Caldwell. Water vs. oil hydraulic actuation for a robot leg. *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, pages 1940 – 1946, 2009.
- [287] Y.Imai, A.Namiki, K.Hashimoto, and M.Ishikawa. Dynamic active catching using a high-speed multifingered hand and a high-speed vision system. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2:1849–1854, 2004.
- [288] Li Ying, J.L. Fu, and N.S. Pollard. Data-driven grasp synthesis using shape matching and task-based pruning. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 13:732 – 747, 2007.
- [289] Y.Nakabo, M.Ishikawa, H.Toyoda, and S.Mizuno. 1 ms column parallel vision system and its application of high speed target tracking. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1:650–655, 2000.
- [290] T. Yoshikawa. Passive and active closures by constraining mechanisms. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2:1477 – 1484, 1996.
- [291] T. Yoshikawa and K. Nagai. Manipulating and grasping forces in manipulation by multifingered robot hands. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 7:67 – 77, 1991.
- [292] X. Yun, V. Kumar, N. Sarkar, and E. Paljug. Control of multiple arms with rolling constraints. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 3:2193 – 2198, 1992.
- [293] Y.Yamakawa, A.Namiki, M.Ishikawa, and M.Shimojo. One-handed knotting of a flexible rope with a high-speed multifingered hand having tactile sensors. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 703–708, 2007.

- [294] C. Zhang, R.H. Zee, and P.E. Thoma. Development of ni-ti based shape memory alloys for actuation and control. *Energy Conversion Engineering Conference*, 1:239–244, 1996.
- [295] H. Zhang, Y. Bellouard, E. Burdet, R. Clavel, A.N. Poo, and D.W. Hutamacher. Shape memory alloy microgripper for robotic microassembly of tissue engineering scaffolds. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 5:4918 – 4924, 2004.
- [296] H. Zhang, K. Tanie, and H. Maekawa. Dextrous manipulation planning by grasp transformation. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 4:3055 – 3060, 1996.
- [297] Libin Zhang, Zhiheng Wang, Qinghua Yang, Guanjun Bao, and Shaoming Qian. Development and simulation of zjut hand based on flexible pneumatic actuator fpa. *International Conference on Mechatronics and Automation*, pages 1634 – 1639, 2009.
- [298] Y. Zhang and W.A. Gruver. Definition and force distribution of power grasps. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2:1373 – 1378, 1995.
- [299] Y. Zhang and W.A. Gruver. Classification of grasp by multifingered robot hand. *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 1996.
- [300] Y. Zhang, W.A. Gruver, J. Li, and Q. Zhang. Classification of grasp by robotic hands. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 31, 2001.
- [301] Y. Zhang, W.J. Zhang, J. Hesselbach, and H. Kerle. Development of a two-degree-of-freedom piezoelectric rotary-linear actuator with high driving force and unlimited linear movement. *Review of Scientific Instruments*, 77:035112 – 035112–9, 2006.
- [302] D.W. Zhao, L. Jiang, H. Huang, M.H. Jin, H.G. Cai, and H. Liu. Development of a multi-dof anthropomorphic prosthetic hand. *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, pages 878–883, 2006.
- [303] Yong Zhu and E.J. Barth. Impedance control of a pneumatic actuator for contact tasks. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 987 – 992, 2005.