



Universidad Carlos III de Madrid
Escuela Politécnica Superior

TESIS DOCTORAL

**Metodología para el Desarrollo de un Manipulador
Móvil Autónomo con Características Antropométricas**

Autor:

D. SALAH HASSAN KADHIM AL ANSARI

Directores:

Dr. LUIS ENRIQUE MORENO LORENTE

Dra. M^a DOLORES BLANCO ROJAS

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática

Madrid, Julio 2011

TESIS DOCTORAL

Metodología para el Desarrollo de un Manipulador Móvil Autónomo con Características Antropométricas

Autor: Salah Hassan Kadhim Al Ansari

Directores: Prof. Dr. Luis Enrique Moreno Lorente

Profra. Dra. M^a Dolores Blanco Rojas

Firma del Tribunal Calificador:

Firma

Presidente:

Vocal:

Vocal:

Vocal:

Secretario:

Calificación:

Madrid, de de 2011

Universidad Carlos III de Madrid

Data de Publicación:

Salah Hassan Kadhim Al Ansari

“Metodología para el Desarrollo de un Manipulador Móvil Autónomo con Características Antropométricas”

Universidad Carlos III de Madrid

Copyright © 2011 Salah Al Ansari



DEDICATORIA

EN MEMORIA DE MI MADRE Y MIS HERMANOS
FALAH Y JAMAL



AGRADECIMIENTOS

Me gustaría mostrar mi más profundo y sincero agradecimiento al Director de ésta Tesis, el Profesor D. Luis Enrique Moreno Lorente, por darme la oportunidad de llevar a cabo el desarrollo de la misma bajo su dirección y supervisión. Asimismo, me gustaría agradecerle la paciencia y dedicación que ha mostrado conmigo a lo largo de estos años de Doctorado.

A la Profesora Dolores Blanco Rojas por el tiempo dedicado en la revisión tan detallada y profesional de esta tesis que sin duda alguna ha contribuido a su mejora.

A todas aquellas personas que durante los años de mi estancia en la Universidad Carlos III me han ayudado a crecer tanto personalmente como profesionalmente.

A todos los miembros del Área de Ingeniería de Sistemas y Automática (ISA), por brindarme su apoyo, ayuda y comprensión durante todo este tiempo. En especial, a mis profesores y colegas: Carlos Balaguer, Miguel Ángel Salichs, Santiago Garrido Bullón, Francisco José Rodríguez Urbano, José María Armingol Moreno, Arturo de la Escalera Hueso, Mohamed Abderrahim, Antonio Giménez Fernández, Ramón Barber Castaño, Ignacio Casillas, Juan Pablo, Alberto Jardón Huete, Santiago Martínez de la Casa Díaz, Ramiro Diez Zaera, Víctor M. Padrón, Verónica Egido García, Mario Ricardo Arbulú Saavedra, los hermanos Luis M. Cabás Ormaechea y Ramiro Cabás Ormaechea, Javier F. Gorostiza Luengo, Raúl Correal, José M. Pardos Gotor, María Romero Muñoz, José Miguel Barcala Riveira y Carlos Pérez Martínez.

También he de agradecer el trabajo de los ingenieros a los que he tenido el placer de dirigir el proyecto fin de carrera: Jorge Alonso Pardo, Daniel Mariscal Aranda, Blanca Isabel Arias Serrano, Jorge Pérez Mínguez, José Antonio Esteban Macarrón, Javier García Agüero y Sergio Moreno Gado.

A todas las personas de otros departamentos de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid por su colaboración, ya que de una u otra forma han hecho posible esta tesis, a Juan Carlos García Parda, Vicente Díaz López, José Luis San Román García, las gemelas María Jesús López Boada y Beatriz López Boada, Cristina Castejón Sisamon (Departamento de Ingeniería de Mecánica), a Néstor García Hernando (Departamento de Ingeniería de Térmica y Fluidos), a José Luis Pérez Castellanos, Ramón Zaera Polo, José Fernández Sáez y Ángel Arias Hernández (Departamento de Ingeniería de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras) y a Juan Baselga Llidó (Departamento de Ingeniería de Materiales).

A todos aquellos que pudiera haber omitido por despiste pero que sin duda debo dar las gracias.

De manera especial quiero dar las gracias a los Profesores Ángel Llamas Cascón y Emilio Olías Ruiz por su gran ayuda y empeño para que pudiera llevar a cabo mi tarea investigadora en la universidad.



Agradecimientos

A mis amigos Gema Serrano Alcol y José Antonio Paredes por haberme recibido como un amigo y no haberme hecho sentir extranjero. Por su inestimable ayuda en el aprendizaje del idioma y de la sociedad española así como por su dedicación y colaboración en todas las gestiones que he necesitado realizar.

Muy especialmente a mi familia, mi esposa Yousra y mis hijos Mohammed y Linah, por estar a mi lado y darme su apoyo y consuelo en los momentos de desaliento. A mis padres, hermanos y hermanas en Iraq, que pese a la distancia los tengo muy presentes en mis recuerdos y sin ningún lugar a dudas, por haberme ayudado a llegar hasta aquí.

RESUMEN

El desarrollo de esta tesis se enmarca en el proyecto **MANFRED (MAN FRiEnDly mobile manipulator)** desarrollado por el Grupo de Manipuladores Móviles del Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática en la Universidad Carlos III de Madrid. El objetivo de este proyecto es la construcción de un robot manipulador móvil antropomórfico de servicios avanzado capaz de operar en entornos típicamente diseñados para humanos. Para lograr este objetivo la robustez, fiabilidad y seguridad, han sido requisitos fundamentales para que el robot pueda desarrollar su tarea de forma adecuada en entornos compartidos con seres humanos, sin necesidad de modificar el espacio de trabajo.

En esta tesis se tratan especialmente los aspectos relacionados con el diseño mecánico de un brazo manipulador robótico de 6 grados de libertad conocido como UC3M-LWR-1, imprescindible para llevar a cabo las tareas de manipulación y colaboración con personas. Para ello, se ha llevado a cabo el diseño y construcción de un brazo manipulador de baja inercia, pero con una capacidad de carga y alcance lo más parecido posible a los de un brazo humano. En la etapa de diseño ha sido necesario realizar un estudio antropométrico que permitiera establecer los parámetros de alcance así como los rangos articulares del brazo humano, de manera que pudieran ser imitados, en la medida de lo posible, por el diseño del manipulador objeto de esta tesis. Por otra parte, también se presenta el estudio realizado de los distintos materiales constructivos, así como de los componentes comerciales que se habrían de emplear en la construcción del brazo manipulador. De esta manera se pretendía lograr la mayor ligereza posible de la estructura, ya que este aspecto repercute directamente en la seguridad para los seres humanos que pudieran compartir el espacio de trabajo con el manipulador, disminuyendo la inercia en situaciones de choques accidentales. Además, un diseño ligero confiere al brazo manipulador una mayor versatilidad ya que le permite manipular objetos más pesados y por tanto amplía el número de tareas que puede realizar.

Por otra parte, en la fase de diseño previa a la construcción del brazo manipulador, se han tenido en cuenta otros aspectos de gran relevancia cuando hablamos de diseñar un prototipo, cuyo último fin es que pueda llegar a ser algún día comercializado, como son el aspecto económico, en cuanto al coste de los elementos constitutivos del mismo, los procesos de mecanizado necesarios para la construcción de la estructura, así como el aspecto estético del diseño tratando en todo momento de que no resultase agresivo visualmente.

Finalmente, se presentan los análisis, tanto cinemático como dinámico, junto con las simulaciones realizadas para una tarea concreta como es la apertura de una puerta. Estos análisis han permitido validar el diseño mecánico del brazo manipulador y al mismo tiempo detectar y corregir aquellos defectos del diseño, previamente a su construcción.



ABSTRACT

This thesis was developed within the framework of the MANFRED (**MAN FRiEnDly** mobile manipulator) Project by the Mobiles Manipulators Group of the Systems Engineering and Automation Department, in Carlos III of Madrid University. The aim of the project was to construct an advanced anthropomorphic mobile manipulator robot capable of operating within typical human environments. In order to achieve this goal; robustness, reliability and safety were the fundamental requirements in order that the robot could adequately develop the task in shared environments with human beings without the need to modify the work space.

The thesis addresses specifically the points related to the mechanical design of a robotic manipulator arm that has 6 degrees of freedom known as LWR-UC3M-1, indispensable to carry out tasks of manipulation and collaboration with people. For this, the design and construction of a manipulator arm of low inertia has been carried out, but with a load capacity and reach resemble that of the human arm. During the design phase, it was necessary to perform an anthropomorphic study that allowed establishing the reach parameters likewise the articular ranges of the human arm joints. This was done in order that the human arm could be imitated, in so far as possible, for the manipulator design object of this thesis. A further study was performed on the different construction materials required, as well as of the commercial components that would be implemented and used during the construction of the arm manipulator. In this manner, the intention was to achieve maximum possible lightness of the structure, since this aspect results directly in the security of the human beings that could share and interact in the work space with the manipulator, diminishing the inertia of potential situations of accidental collisions. Besides, a light weight design will give the manipulator arm greater versatility allowing it to manipulate heavier objects and therefore increase the number of tasks that can be performed.

On the other hand, during the prototype design phase prior to the manipulator arm construction, other key aspects of great relevance like economic issue (the constitutive component costs), machining process needs for structure construction and aesthetically pleasing design were considered with the end goal that one day it would be commercially viable to make and available.

Finally, the cinematic and dynamic analysis, along with the simulations performed for a specific task (The opening of a door) will be presented. These analyses have in turn allowed the approval of the arm manipulator mechanical design and at the same time to detect and to correct those defects of the design, prior to its construction.



Índice General

DEDICATORIA	9
AGRADECIMIENTOS	11
RESUMEN.....	13
ABSTRACT	15
ÍNDICE GENERAL.....	17
ÍNDICE DE FIGURAS.....	21
ÍNDICE DE TABLAS.....	31
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....	35
1.1. INTRODUCCIÓN.....	37
1.2. DEFINICIÓN DE UN MANIPULADOR.....	37
1.3. MOTIVACIÓN	38
1.4. OBJETIVOS DE LA TESIS.....	39
1.5. ESTRUCTURA DE LA MEMORIA.....	40
CAPÍTULO II: ANTECEDENTES HISTÓRICOS DE LOS MANIPULADORES MÓVILES	45
2.1. INTRODUCCIÓN.....	47
2.1.1. Robots móviles con capacidad de manipulación.....	47
2.1.2. Manipuladores móviles.....	49
2.1.3. Robots humanoides	49
2.2. ANTECEDENTES Y ESTADO ACTUAL DE LOS MANIPULADORES MÓVILES.....	50
2.2.1. Aplicaciones de los manipuladores móviles.....	51
2.2.2. Aplicaciones especiales	59
2.2.3. Manipuladores móviles experimentales	60
2.3. ROBOTS DE SERVICIO: CONSIDERACIONES SOBRE LA INTERACCIÓN ROBOT- HUMANO.....	66
2.4. EXPERIENCIA ACUMULADA EN EL DESARROLLO DEL MANIPULADOR MÓVIL OTILIO.....	68



CAPÍTULO III: ARQUITECTURA Y CARACTERÍSTICAS DEL MANIPULADOR MÓVIL PROPUESTO	75
3.1. INTRODUCCIÓN.....	77
3.2. ESTRUCTURA GENERAL DEL MANIPULADOR MÓVIL PROPUESTO	78
3.3. SISTEMAS INTEGRANTES	82
3.3.1. Sistema sensorial	82
3.3.2. Sistema locomotor	90
3.3.3. Sistema de alimentación	91
3.3.4. Sistema manipulador UC3M-LWR-1.....	91
3.3.5. Sistema de procesamiento	93
3.3.6. Sistema de comunicaciones	96
4. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL MANIPULADOR.....	96
CAPÍTULO IV: DISEÑO DEL BRAZO MANIPULADOR LIGERO: PROTOTIPO EXPERIMENTAL	101
4.1. OBJETIVOS DEL DISEÑO	103
4.2. FILOSOFÍA DEL DISEÑO	104
4.3. CONCEPTOS PRELIMINARES: ESTUDIO DE ANTROPOMETRÍA Y MOVILIDAD	106
4.3.1. Datos Antropomórficos	107
4.3.2. Modelo propuesto para el manipulador.....	114
4.4. CRITERIOS DEL DISEÑO	114
4.4.1. Definición de las tareas.....	114
4.4.2. Definición de las características generales del brazo manipulador	115
4.4.3. Preselección de los materiales	116
4.4.4. Preselección de los componentes	119
4.5. DESCRIPCIÓN DE LOS COMPONENTES FINALMENTE SELECCIONADOS	132
4.5.1. Materiales	132
4.5.2. Reductores	133
4.5.3. Motores.....	133
4.5.4. Eliminación de frenos.....	136
4.5.5. Sensores	136
4.6. LA HERRAMIENTA DEL DISEÑO: SOLIDWORKS.....	137



4.7. FASES DEL DISEÑO	137
4.7.1. Elección de la sección transversal de los elementos del brazo manipulador	137
4.7.2. Etapas del diseño del brazo manipulador robótico	140
4.8. ESTRUCTURA MECÁNICA DEL DISEÑO: DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN	145
4.8.1. Montajes de las articulaciones	146
4.8.2. Ensamblaje completo	156
4.8.3. Diseño del actuador final	158
CAPÍTULO V: CINEMÁTICA DEL BRAZO MANIPULADOR LIGERO	163
5.1. INTRODUCCIÓN	165
5.1.1. Parámetros Denavit-Hartenberg del UC3M-LWR-1	165
5.1.2. Matrices de transformaciones	167
5.2. LA HERRAMIENTA DE ANÁLISIS: COSMOWORKS	169
5.3. MODELO CINEMÁTICO DEL BRAZO	170
5.4. EL SISTEMA DE COORDENADAS	171
5.4.1. Espacio de trabajo	173
5.4.2. Simulaciones: Trayectorias velocidades y aceleraciones	179
5.4.3. Análisis comparativo por simulación	197
5.4.4. Análisis comparativo por articulación	202
5.4.5. Estudio del alcance máximo del brazo en la apertura	207
CAPÍTULO VI: ANÁLISIS DINÁMICO DEL BRAZO MANIPULADOR LIGERO	211
6.1. INTRODUCCIÓN	213
6.2. LA HERRAMIENTA DE ANÁLISIS DINÁMICO: COSMOMOTION	214
6.3. ANÁLISIS ESTÁTICO	214
6.3.1. Criterio de von Mises	215
6.3.2. Curvas de tensión deformación	215
6.3.3. Resultados experimentales	216
6.4. ANÁLISIS DINÁMICO	229
6.4.1. Planteamiento de los análisis	229
6.4.2. Trayectorias genéricas	230



6.4.3. Trayectoria determinada: Apertura de una puerta	241
CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES FINALES, NUEVA GENERACIÓN Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	259
7.1. INTRODUCCIÓN.....	261
7.2. CONCLUSIONES FINALES DEL MANIPULADOR DESARROLLADO	261
7.2.1. Sobre el peso.....	261
7.2.2. Sobre la carga y los cálculos.....	262
7.2.3. Sobre la estructura	262
7.2.4. Sobre la construcción del modelo con SolidWorks.....	263
7.2.5. Sobre el análisis estático.....	263
7.2.6. Sobre el análisis dinámico	264
7.2.7. Sobre las simulaciones con CosmosMotion	264
7.2.8. Sobre el planteamiento del análisis	265
7.2.9. Sobre los resultados obtenidos	265
7.2.10. Sobre los objetivos cumplimentados	266
7.3. LA NUEVA GENERACIÓN	268
7.4. LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN	271
ANEXOS.....	273
ANEXO I.....	275
ANEXO III.....	285
<u>Nota:</u> El resto de los anexos (II, IV, V & VI) están incluidos en el CD adjunto.	
BIBLIOGRAFÍA	303

Índice de Figuras

Figura 1.1.- Manipulador móvil OTILIO.....	38
Figura 2.1.- Robot móvil.....	48
Figura 2.2.- Prototipo de un manipulador móvil con dos brazos ligeros de diseño y disposición antropomórfica.....	48
Figura 2.3.- Manipulador móvil (Base: Nomadic XR4000 and Manipulator Arm: PUMA 560).....	49
Figura 2.4.- Robot humanoide “HONDA”.....	50
Figura 2.5.- Manipulador móvil URMAD.....	51
Figura 2.6.- Manipulador móvil MOVAID (prototipo con tamaño real).....	52
Figura 2.7.- Manipulador móvil IMMEDIATE, para asistir a pacientes discapacitados.....	52
Figura 2.8.- El manipulador móvil ROMAN intenta abrir la puerta.....	53
Figura 2.9.- El manipulador móvil ROMAN recibe una orden en lenguaje natural.....	53
Figura 2.10.- Vehículos robotizados utilizados desde el accidente de la central nuclear “Chernobyl”,.....	54
Figura 2.11.- El robot “PIONEER”.....	54
Figura 2.12.- Manipulador móvil HERMIES-III.....	55
Figura 2.13.- El robot HAZBOT-III, es un robot tele-operado.....	56
Figura 2.14.- Manipulador móvil “Rover – ROCKY 7”.....	56
Figura 2.15.- El robot NANOROVER, en la Luna.....	57
Figura 2.16.- El robot LUNOKHOD-1, el primer rover que fue a la Luna.....	57
Figura 2.17.- El robot SOJOURNER, en Marte.....	58
Figura 2.18.- Manipulador móvil MARSOKHOD-96.....	58
Figura 2.19.- Manipulador móvil KAMRO.....	59
Figura 2.20.- El robot TESSELATOR, a) Estructura general, b) Realizando una tarea de mantenimiento.....	60
Figura 2.21.- ARMAR I-III Robot humanoides de la Universidad Karlsruhe (Alemania).....	60
Figura 2.22.- Brazo manipulador MANUS.....	61
Figura 2.23.- Manipuladores DLR (Light Weight Robot) I, II y III.....	62
Figura 2.24.- El manipulador móvil LIAS, se utiliza el brazo CRS-A465.....	63



Figura 2.25.- El manipulador móvil AMADEUS, se utiliza el brazo MITSUBISHI PA10.	63
Figura 2.26.- El manipulador móvil ARNOLD, con rasgos antropomórficos.	64
Figura 2.27.- El manipulador móvil HERMES, a) Estructura general, b) El robot realiza la tarea de recoger una pieza.....	65
Figura 2.28.- Humanoid Robot SAIKA 2, 3, 4.	65
Figura 2.29.- Robot Wendy.	66
Figura 2.30.- El Robot Human Friendly.....	67
Figura 2.31.- Manipulador móvil OTILIO con base móvil RWI-B21 y un manipulador CRS-A465.	68
Figura 2.32.- Base móvil RWI-B21.	69
Figura 2.33.- Manipulador CRS-A465 con controlador C500.	70
Figura 2.34.- AccuRange Line Scanner.	71
Figura 2.35.- Izq. Manipulador móvil MANFRED y Dcha. su brazo UC3M-LWR-1. 72	
Figura 3.1.- Estructura y disposición de los elementos integrantes del manipulador móvil MANFRED.	77
Figura 3.2.- Esquema de planta de la Base Móvil de MANFRED.	79
Figura 3.3.- Esquema de disposición de equipos en la Base Móvil.	79
Figura 3.4.- Diferentes vistas del bastidor del Robot MANFRED.....	80
Figura 3.5.- Diferentes vistas de la base móvil del Robot MANFRED.	81
Figura 3.6.- Diseño del brazo manipulador UC3M-LWR-1 con seis grados de libertad (6 GDL).	82
Figura 3.7.- Diagrama del sistema sensorial de MANFRED.	83
Figura 3.8.- Telemetría láser 3D (PLS de SICK).	84
Figura 3.9.- Telemetría láser con cabeceo de 45°.	84
Figura 3.10.- Micro-motor de Faulhaber 2642-024CR.	85
Figura 3.11.- Cámara monitorizada SONY EVI-D100.	86
Figura 3.12.- Cámara monitorizada SONY B/N XC-ES50CE.	86
Figura 3.13.- Sensor fuerza-par JR3 modelo 67M25A-U560: (a) Vista del dispositivo sensor.	88
Figura 3.14.- Encoder HEDS-550.	89
Figura 3.15.- Encoder HEDS-9040.	90
Figura 3.16.- Sistema locomotor (base móvil).	90
Figura 3.17.- Batería de Panasonic LC-X1242P.	91

Figura 3.18.- Brazo Manipulador UC3M-LWR-1.	92
Figura 3.19.- Sistema de procesamiento - PCs a bordo.....	93
Figura 3.20.- Arquitectura funcional del proyecto MANFRED.....	94
Figura 3.21.- Diagrama de Voronoi local.....	96
Figura 4.1.- Grados de libertad del UC3M-LWR-1.	105
Figura 4.2.- Detalle de diseño en SolidWorks.....	106
Figura 4.3.- Áreas de trabajo de Farley. (Cortesía de Farley [69])	109
Figura 4.4.- Áreas de trabajo frontales para Pheasant. (Cortesía de Farley [69])	110
Figura 4.5.- Cortes del volumen de trabajo en el plano horizontal - 95 % hombres -. (Cortesía de Farley [69])	111
Figura 4.6.- Cortes en el sagital - 95 % hombres -. (Cortesía de Farley [69])	112
Figura 4.7.- Formas 3-D del volumen de trabajo del brazo humano. (Cortesía de Lenarcic [64])	113
Figura 4.8.- Cortes del volumen 3-D. Visiones frontal, sagital. (Cortesía de Lenarcic [64])	113
Figura 4.9.- Esquema del funcionamiento de un motor DC con escobillas.	120
Figura 4.10.- Esquema de montaje de un motor de corriente continua sin escobillas.	121
Figura 4.11.- Despiece de motores Direct Drive DC.	122
Figura 4.12.- Motor ultrasónico. Izqda. despiece sobre montaje físico. Dcha. detalle de transmisión de par mediante contacto.	122
Figura 4.13.- Componentes de un montaje Harmonic Drive AG, CSD.	130
Figura 4.14.- Reductores convencionales. Izda., modelo planetario. Dcha., discos dentados.	130
Figura 4.15.- Montajes físicos de reductores de tecnología cyclo.	131
Figura 4.16.- Casa comercial Harmonic Drive AG. (a) Modelo HFUC-2UH (b) Modelo de la familia CSD.	132
Figura 4.17.- Modelos SOLIDWORKS de piezas de la estructura. Izda., tubo de fibra de carbono. Dcha., unión articulación y tubo.	133
Figura 4.18.- Reductor Harmonic Drive HFUC. Izda. modelo real. Dcha. modelo SOLIDWORKS.	133
Figura 4.19.- Motor Kollmorgen. Izda., modelo SOLIDWORKS. Dcha., modelo real.	135
Figura 4.20.- Motores que forman parte del brazo manipulador.....	135
Figura 4.21.- Vista sub-ensamblaje sección cuadrada y piezas de la misma sección.	139
Figura 4.22.- Vista sub-ensamblaje sección triangular y piezas de la misma sección.	139



Figura 4.23.- Vista sub-ensamblaje sección elíptica y piezas de la misma sección....	139
Figura 4.24.- Plano de diseño en la primera etapa.	141
Figura 4.25.- Plano de diseño en la segunda etapa.....	142
Figura 4.26.- Plano de diseño en la tercera etapa.	142
Figura 4.27.- Plano de diseño en la cuarta etapa.	143
Figura 4.28.- Plano de diseño en la quinta etapa.	144
Figura 4.29.- Plano de diseño de la quinta etapa más en detalle para la primera articulación.	144
Figura 4.30.- Vistas de la articulación 1. Izda., posición relativa en ensamblaje. Dcha., proyecciones en solitario.	146
Figura 4.31.- Vista 3-D de cazoleta.....	147
Figura 4.32.- Izqda. vista 3-D del distanciador. Dcha. ubicación del distanciador dentro del ensamblaje de la articulación.....	147
Figura 4.33.- Izqda. vista 3-D del acoplamiento. Dcha. Corte transversal de la articulación 1 donde se muestra la ubicación de la pieza dentro del ensamblaje de la articulación.	148
Figura 4.34.- Vistas de la articulación 2. Izda., posición relativa en ensamblaje. Dcha., algunas vistas en solitario.	148
Figura 4.35.- Izqda. vista 3-D de base en U. Dcha. ubicación de la pieza en la articulación.	149
Figura 4.36.- Izqda. vista 3-D de cazoleta motor. Dcha. ubicación de la pieza en la articulación.	149
Figura 4.37.- Vista 3-D de pieza de giro a tubo.	150
Figura 4.38.- Vista 3-D de pieza de la Corona.....	150
Figura 4.39.- Izqda. y centro vista 3-D del centrador tipo 1. Dcha. Posición en la articulación.	151
Figura 4.40.- Izqda. y centro vista 3-D del centrador tipo 2. Dcha. Su posición en el ensamblaje.	151
Figura 4.41.- Izqda. Vista 3-D cazoleta protectora. Dcha. ubicación en el ensamblaje de la articulación.	151
Figura 4.42.- Arriba Izda., tubo de fibra. Arriba Dcha., unión a la articulación 3 en brida. Centro, contra-brida.....	152
Figura 4.43.- Vistas de la articulación 3. Izda., posición relativa en ensamblaje. Dcha., algunas vistas en solitario.	152
Figura 4.44.- Vistas de la articulación 4. Izda., posición relativa en ensamblaje. Dcha., algunas vistas en solitario.	153



Figura 4.45.- Izqda. vista 3-D de soporte de rodamiento. Dcha. Colocación en el ensamblaje.	154
Figura 4.46.- Izqda. vista 3-D de acoplamiento. Dcha. colocación en el ensamblaje de la articulación.	154
Figura 4.47.- Vistas de la articulación 5. Izda., posición relativa en ensamblaje. Dcha., vista en solitario.....	155
Figura 4.48.- Vistas de la articulación 6. Izda., posición relativa en ensamblaje. Dcha., vista en solitario.....	155
Figura 4.49.- Vistas del ensamblaje completo en color real.	156
Figura 4.50.- Estructura del brazo manipulador.....	157
Figura 4.51.- Aspecto externo en color real del modelo de actuador final.	159
Figura 4.52.- Arriba, vista isométrica en colores ficticios. Abajo, vista de sección. ..	159
Figura 4.53.- (a) Modelo de la base del ensamblaje. (b) Contenedor de la pieza de caucho, y.....	160
Figura 4.54.- (a) Tapa de fijación para la pieza de caucho. (b) Adaptador para el sensor.	160
Figura 4.55.- Arriba, vistas de la base y del dedo inferior. Abajo, vistas del dedo superior.	161
Figura 5.1.- Esquema comparativo de la cinemática directa e inversa.	165
Figura 5.2.- Situación de los sistemas de coordenadas en el manipulador UC3M-LWR-1.	166
Figura 5.3.- Posición de reposo del manipulador UC3M-LWR-1.	167
Figura 5.4.- Modelo del manipulador UC3M-LWR-1 construido con SolidWorks. ..	170
Figura 5.5.- Sistemas de referencia utilizados.....	171
Figura 5.6.- Variables para posicionamiento de la base.....	173
Figura 5.7.- Sistemas de referencia articulares.....	173
Figura 5.8.- Rangos articulares de las dos primeras articulaciones del manipulador UC3M-LWR-1.	174
Figura 5.9.- Radio del casquete esférico que definiría el espacio de trabajo.	174
Figura 5.10.- Distribución de las posiciones iniciales de la base.	175
Figura 5.11.- Movimientos necesarios para apertura de la puerta.....	176
Figura 5.12.- Movimiento de giro y apertura de la puerta a velocidad constante.	177
Figura 5.13.- Movimiento de giro a velocidad decreciente y apertura de la puerta velocidad creciente.	178
Figura 5.14.- Posición inicial de la base en la simulación 1 para alcanzar el pomo. ..	180



Figura 5.15.- Evolución de los ángulos proyectados en z de cada articulación en la simulación 1.....	181
Figura 5.16.- Velocidades y aceleraciones angulares de las articulaciones en la simulación 1.....	183
Figura 5.17.- Posición inicial de la base en la simulación 2 para alcanzar el pomo. ..	183
Figura 5.18.- Evolución de los ángulos proyectados en z de cada articulación en la simulación 2.....	184
Figura 5.19.- Velocidades y aceleraciones angulares de las articulaciones en la simulación 2.....	186
Figura 5.20.- Posición inicial de la base en la simulación 3 para alcanzar el pomo. ..	186
Figura 5.21.- Evolución de los ángulos proyectados en z de cada articulación en la simulación 3.....	187
Figura 5.22.- Velocidades y aceleraciones angulares de las articulaciones en la simulación 3.....	189
Figura 5.23.- Posición inicial de la base en la simulación 4 para alcanzar el pomo. ..	189
Figura 5.24.- Evolución de los ángulos proyectados en z de cada articulación en la simulación 4.....	190
Figura 5.25.- Velocidades y aceleraciones angulares de las articulaciones en el simulación 4.....	192
Figura 5.26.- Posición inicial de la base en la simulación 5 para alcanzar el pomo. ..	192
Figura 5.27.- Evolución de los ángulos proyectados en z de cada articulación en la simulación 5.....	193
Figura 5.28.- Velocidades y aceleraciones angulares de las articulaciones en la simulación 5.....	195
Figura 5.29.- Evolución de los ángulos proyectados en z de cada articulación en la simulación 6.....	196
Figura 5.30.- Velocidades y aceleraciones angulares de las articulaciones en la simulación 6.....	197
Figura 5.31.- Evolución del desplazamiento angular de cada articulación en la simulación 1.....	198
Figura 5.32.- Evolución del desplazamiento angular de cada articulación en la simulación 2.....	199
Figura 5.33.- Evolución del desplazamiento angular de cada articulación en la simulación 3.....	199
Figura 5.34.- Evolución del desplazamiento angular de cada articulación en la simulación 4.....	200



Figura 5.35.- Evolución del desplazamiento angular de cada articulación en la simulación 5.....	201
Figura 5.36.- Evolución del desplazamiento angular de cada articulación en la simulación 6.....	201
Figura 5.37.- Gráfico comparativo del desplazamiento angular de la articulación 1 en las diferentes simulaciones.	202
Figura 5.38.- Gráfico comparativo del desplazamiento angular de la articulación 2 en las diferentes simulaciones.	203
Figura 5.39.- Gráfico comparativo del desplazamiento angular de la articulación 3 en las diferentes simulaciones.	204
Figura 5.40.- Gráfico comparativo del desplazamiento angular de la articulación 4 en las diferentes simulaciones.	206
Figura 5.41.- Gráfico comparativo del desplazamiento angular de la articulación 5 en las diferentes simulaciones.	206
Figura 5.42.- Gráfico comparativo del desplazamiento angular de la articulación 6 en las diferentes simulaciones.	207
Figura 5.43.- Representación del momento en el que el brazo manipulador impacta con el marco de la puerta durante la trayectoria descrita.	210
Figura 6.1.- Curva tensión-deformación del aluminio 7075 T6.....	216
Figura 6.2.- Modelo cinemático del manipulador UC3M-LWR-1, Numeración de las articulaciones.....	217
Figura 6.3.- Diagrama de tensiones de la articulación 1 para caso 100N.	218
Figura 6.4.- Diagrama de deformaciones de la articulación 1 para caso 100N.....	218
Figura 6.5.- Diagrama de desplazamientos de la articulación 1 para caso 100N.....	219
Figura 6.6.- Diagrama de tensiones de articulación 1 para caso 80N +15N·m.	219
Figura 6.7.- Diagrama de deformaciones de la articulación 1 para caso 80N+15N·m.220	
Figura 6.8.- Diagrama de tensiones de la articulación 2 para caso 75N.	221
Figura 6.9.- Diagrama de deformaciones de la articulación 2 para caso 75N.....	221
Figura 6.10.- Diagrama de tensiones de la articulación 2 para caso 75N+45N·m.	222
Figura 6.11.- Diagrama de deformaciones de la articulación 2 para caso 75N+45N·m.	222
Figura 6.12.- Diagrama de Factor de Seguridad (FOS - Factor Of Security).....	223
Figura 6.13.- Carga de 6 kg. Vista isométrica (a) y de perfil (b) del estado tensional que muestra la deformación resultante, esta última, con un factor de escala de 14.	224
Figura 6.14.- Carga de 3 kg. Vista isométrica (a) y de perfil (b) del estado tensional que muestra la deformación resultante, esta última, con un factor de escala de 14.	225



Figura 6.15.- Carga de 1 kg. Vista isométrica (a) y de perfil (b) del estado tensional que muestra la deformación resultante, esta última, con un factor de escala de 14.	226
Figura 6.16.- Carga de 6 kg. Vista de sección en plano derecho del estado tensional que muestra la deformación real sin factor de escala.	226
Figura 6.17.- Carga de 20 Nm. Vista isométrica (a) y cenital (b) del estado tensional que muestra la deformación resultante, esta última, con un factor de escala de 1.5. ...	227
Figura 6.18.- Carga de 10 Nm. Vista isométrica (a) y cenital (b) del estado tensional que muestra la deformación resultante, esta última, con un factor de escala de 1.5. ...	228
Figura 6.19.- Carga de 5 Nm. Vista isométrica (a) y cenital (b) del estado tensional que muestra la deformación resultante, esta última, con un factor de escala de 1.5.	228
Figura 6.20.- Carga de 20 Nm. Vista en sección del estado tensional que muestra la deformación real sin factor de escala.	229
Figura 6.21.- Representación de la trayectoria 1 de elevación lateral del brazo.	230
Figura 6.22.- Representación de la trayectoria 2 de elevación frontal del brazo.	230
Figura 6.23.- Fuerza de reacción en la articulación 2 sin carga y a velocidad constante de 15°/seg.	231
Figura 6.24.- Par de reacción en articulación 2 sin carga y a velocidad constante de 15°/seg.	232
Figura 6.25.- Variación del par de reacción en la articulación 2 sin carga para diferentes velocidades de movimiento.	232
Figura 6.26.- Fuerza de reacción en la articulación 2 con carga de 55N y a velocidad constante de 15°/seg.	233
Figura 6.27.- Par de reacción en la articulación 2 con carga de 55N y velocidad constante de 15°/seg.	233
Figura 6.28.- Variación del par de reacción en la articulación 2 con carga de 55N para diferentes velocidades de movimiento.	234
Figura 6.29.- Fuerzas de reacción en la articulación 2 para diferentes valores de carga.	235
Figura 6.30.- Momento de reacción en la articulación 2 para diferentes valores de carga.	235
Figura 6.31.- Fuerza de reacción en la articulación 1 sin carga y velocidad constante de 10°/seg.	237
Figura 6.32.- Par de reacción en la articulación 1 sin carga y velocidad constante de 10°/seg.	237
Figura 6.33.- Fuerza de reacción en la articulación 1 con carga de 55N y velocidad constante de 10°/seg.	238



Figura 6.34.- Par de reacción en la articulación 1 con carga de 55N y velocidad constante de 10°/seg.....	238
Figura 6.35.- Variación del par de reacción en la articulación 1 para diferentes velocidades de movimiento.	239
Figura 6.36.- Fuerzas de reacción en la articulación 1 para diferentes valores de carga.	240
Figura 6.37.- Momento de reacción en la articulación 2 para diferentes valores de carga.	240
Figura 6.38.- Perfiles de velocidades del giro del pomo y de la apertura en la simulación 1.....	243
Figura 6.39.- Secuencias del movimiento simulado en la simulación 1.	244
Figura 6.40.- Fuerzas de reacción que se originan en las articulaciones durante la simulación 1.....	245
Figura 6.41.- Esquema sencillo de los cortantes sobre una barra.....	246
Figura 6.42.- Momentos de reacción que se originan en las articulaciones durante la simulación 1.....	248
Figura 6.43.- Representación esquemática de la transmisión de fuerza en cada articulación.	249
Figura 6.44.- Evolución del par motor necesario en cada articulación para realizar el movimiento en la simulación 1.....	249
Figura 6.45.- Potencia consumida por los motores en la simulación 1.	250
Figura 6.46.- Variable articular de la primera articulación.	253
Figura 7.1.- Diseño de la nueva generación del manipulador móvil MANFRED (MANFRED-II).....	268
Figura 7.2.- Base del manipulador móvil MANFRED.....	269
Figura 7.3.- Base de la nueva generación del manipulador móvil MANFRED (MANFRED-II).....	269
Figura 7.4.- Carcasas extraíbles (en azul) para la mejora de acceso a los elementos del sistema de la nueva generación del manipulador móvil MANFRED (MANFRED-II).	270
Figura A-I.1.- Ejes y planos de movimiento del hombro: A –plano sagital-, B –plano frontal-, C –plano horizontal-. Los ejes se encuentran en las intersecciones: AB –eje vertical-, BC –eje transversal-, AC –eje anteroposterior-.	277
Figura A-I.2.- Movimientos en torno al eje transversal. Izquierda, extensión. Derecha, flexión.....	278
Figura A-I.3.- Movimientos de abducción. Aducción y extensión, izquierda.	278
Figura A-I.4.- Secuencia del movimiento de abducción.....	279



Figura A-I.5.- Rotaciones longitudinales. Izquierda, rotación externa. Derecha y arriba, rotaciones internas.	279
Figura A-I.6.- Rotaciones horizontales. Flexión horizontal, arriba. Posición de referencia, centro. Extensión horizontal, abajo.	280
Figura A-I.7.- Movimientos de flexión y extensión. Izquierda, flexión. Derecha, extensión en posición de referencia.	281
Figura A-I.8.- Movimientos de pronosupinación. Izquierda, supinación. Centro, posición de referencia. Derecha, pronación.	282
Figura A-I.9.- Ejes y planos de movimiento de la muñeca. Eje AA', transversal. Eje BB' anteroposterior.	282
Figura A-I.10.- Movimientos en torno al eje transversal. Izquierda, flexión. Centro, posición de referencia. Derecha, extensión.	283
Figura A-I.11.- Movimientos en torno al eje anteroposterior. Izquierda, abducción. Dentro, posición de referencia. Derecha aducción.	283
Figura A-III.1.- Esquema de la configuración del brazo manipulador UC3M-LWR-1.	287
Figura A-III.2.- Vista explosionada de la articulación 1.	288
Figura A-III.3.- Vista explosionada de la articulación 2.	290
Figura A-III.4.- Vista explosionada del sub-ensamblaje 1.	292
Figura A-III.5.- Vista explosionada del sub-ensamblaje 2.	294
Figura A-III.6.- Vista explosionada del sub-ensamblaje 3.	296
Figura A-III.7.- Vista explosionada del sub-ensamblaje 4.	298
Figura A-III.8.- Vista explosionada del actuador final.	300

Índice de Tablas

Tabla 2.1.- Características técnicas de la base móvil RWI-B21.	69
Tabla 3.1.- Características técnicas del laser SICK.	85
Tabla 3.2.- Características técnicas de la cámara SONY EVI-D100.	87
Tabla 3.3.- Características principales de encoders HEDS 550.	89
Tabla 3.4.- Características técnicas del brazo manipulador UC3M-LWR-1.	97
Tabla 3.5.- Características técnicas de manipuladores ligeros actuales.	98
Tabla 4.1.- Tabla de rangos articulares para el brazo humano.	108
Tabla 4.2.- Características del prototipo experimental del robot manipulador.	115
Tabla 4.3.- Materiales estudiados para la fabricación de la estructura del manipulador.	117
Tabla 4.4.- Características del aluminio 7075 con el que se va a fabricar las articulaciones.	118
Tabla 4.5.- Características de la fibra de carbono con la que se va a fabricar el antebrazo y el brazo.	118
Tabla 4.6.- Características generales de la resina epoxi que se utiliza con la fibra de carbono.	118
Tabla 4.7.- Propiedades de la aleación de aluminio 7075 y de la fibra de carbono en matriz de epoxy.	119
Tabla 4.8.- Comparación normalizada de los motores seleccionados para las articulaciones 1 y 2.	124
Tabla 4.9.- Comparación normalizada de los motores seleccionados para la articulación 3.	125
Tabla 4.10.- Comparación normalizada de los motores seleccionados para las articulaciones 4 y 5.	126
Tabla 4.11.- Comparación normalizada de los motores seleccionados para la articulación 6.	127
Tabla 4.12.- Modelos comerciales de actuadores para cada articulación y parámetros.	129
Tabla 4.13.- Características de los equipos de transmisión.	134
Tabla 4.14.- Parámetros articulares.	135
Tabla 4.15.- Características de los sensores de posición.	136



Tabla 4.16.- Peso de los componentes del ensamblaje.....	161
Tabla 5.1.- Parámetros D-H del manipulador UC3M-LWR-1.....	166
Tabla 5.2.- Variables para el posicionamiento inicial de la base del robot MANFRED.	176
Tabla 5.3.- Variables articulares en la simulación 1 para alcanzar el pomo.	180
Tabla 5.4.- Variables articulares en la simulación 2 para alcanzar el pomo.	183
Tabla 5.5.- Variables articulares en la simulación 3 para alcanzar el pomo.	186
Tabla 5.6.- Variables articulares en la simulación 4 para alcanzar el pomo.	189
Tabla 5.7.- Variables articulares en la simulación 5 para alcanzar el pomo.	192
Tabla 5.8.- Alcance máximo en la apertura de la puerta desde la posición 1.....	208
Tabla 5.9.- Grado de apertura máximo que alcanzamos en la posición 1 antes del choque.....	208
Tabla 5.10.- Alcance máximo en la apertura desde la posición 2.	208
Tabla 5.11.- Grado de apertura máximo que alcanzamos en la posición 2 antes del choque.....	208
Tabla 5.12.- Alcance máximo en la apertura desde la posición 3.	209
Tabla 5.13.- Alcance máximo en la apertura desde la posición 4.	209
Tabla 5.14.- Alcance máximo en la apertura desde la posición 5.	209
Tabla 5.15.- Grado de apertura máximo que alcanzamos en la posición 5 antes del choque.....	209
Tabla 6.1.- Características mecánicas de los materiales utilizados en el actuador final.	223
Tabla 6.2.- Valores máximos de fuerza y par de reacción registrado en la articulación 2 en función de la carga.....	234
Tabla 6.3.- Valores máximos de fuerza y par de reacción registrado en la articulación 1 en función de la carga.....	241
Tabla 6.4.- Parámetros principales de las simulaciones. Dependencia con la posición.	252
Tabla 6.5.- Parámetros principales de las simulaciones. Dependencia con la forma de realizar la tarea.....	255
Tabla 6.6.- Factores de reducción de los Harmonic en cada articulación.	257
Tabla A-III.1.- Materiales y pesos de los componentes de la primera articulación....	289
Tabla A-III.2.- Materiales y pesos de los componentes de la segunda articulación...	291
Tabla A-III.3.- Materiales y pesos de los componentes del sub-ensamblaje 1.....	293



Tabla A-III.4.- Materiales de los componentes del sub-ensamblaje 2.....	295
Tabla A-III.5.- Materiales y pesos de los componentes del sub-ensamblaje 3.....	297
Tabla A-III.6.- Materiales y pesos de los componentes del sub-ensamblaje 4.....	299
Tabla A-III.7.- Materiales y pesos de los componentes de la pinza.	301
Tabla A-III.8.- Pesos totales de los componentes del manipulador UC3M-LWR-1..	302

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción

La tesis que aquí se presenta se desarrolla en el marco de un proyecto denominado *Robot de Servicio Antropomórfico Fiable y Seguro para Operar en Entornos Humanos*. Este proyecto tiene como finalidad la construcción de un robot manipulador móvil antropomórfico de servicios avanzado conocido como MANFRED (**MAN FRIEnDly mobile manipulator**). En consecuencia, el objetivo de la presente tesis consiste en diseñar y desarrollar dicho manipulador móvil para que pueda desenvolverse y desarrollar tareas eficazmente en entornos de operación donde son necesarias capacidades de manipulación típicamente humanas. Todo ello requiere una combinación de capacidades de coordinación del desplazamiento, manipulación y sensoriales que permitan el desarrollo de sus tareas.

Teniendo en cuenta el campo de aplicación para el que ha sido concebido, el manipulador móvil objeto de esta tesis está dotado de rasgos antropomórficos, así como toda la electrónica de control que le permite controlar de forma coordinada todos los grados de libertad del sistema para conseguir una buena calidad de movimiento que le permita abordar de forma eficiente y robusta diversas tareas. Este manipulador móvil cuenta con un sistema sensorial avanzado basado en subsistema de visión y telemetría láser 3D capaz de modelar y percibir en entornos 3D. Además, la necesaria coordinación de su sistema sensorial con el sistema de control permite manipular objetos de su entorno. El manipulador móvil diseñado ha sido concebido para desplazarse por el entorno para lo cual integra todas las capacidades necesarias para navegar y localizarse de forma segura por el mismo.

Por otra parte, en muchas de las posibles aplicaciones, un manipulador móvil trabaja en un entorno donde existen personas por lo que la **seguridad**, especialmente en lo que concierne a este manipulador, ha sido un factor relevante, no sólo en lo que a la parte sensorial se refiere sino en el propio diseño del manipulador (poco peso, velocidades articulares moderadas, características de los materiales empleados en su construcción etc.).

El manipulador móvil que aquí se presenta ha sido desarrollado a partir de la experiencia previa acumulada a lo largo del desarrollo de otro manipulador móvil conocido como OTILIO, que se muestra en la Figura 1.1, así como diferentes proyectos relacionados con robots móviles.

1.2. Definición de un manipulador

Un manipulador móvil consta de un brazo manipulador y de una base móvil sobre la que éste se asienta. Un manipulador móvil autónomo es aquel que es capaz de realizar tareas sin la intervención directa de un operador humano. Para que un dispositivo así conformado pueda aprovechar toda su potencialidad, debe coordinar los movimientos de todos sus grados de libertad. De ahí que la **coordinación entre movilidad y manipulación** sea crucial si se trata de que un manipulador móvil pueda realizar tareas complejas.

En cualquier aplicación práctica que se pueda pensar, el manipulador móvil, al entrar en contacto con un objeto fijo, forma una cadena cinemática cerrada que produce fuerzas de reacción en el extremo. Así, el control de fuerza es indispensable.



Figura 1.1.- Manipulador móvil OTILIO.

Por otro lado, no se puede obviar el entorno de trabajo. Los entornos reales contienen obstáculos y son dinámicos, de modo que el manipulador móvil debe comportarse reactivamente respecto al entorno mientras lleva a cabo la tarea.

En ausencia de obstáculos, el estudio de manipuladores móviles concierne principalmente al problema de coordinar locomoción y manipulación. Sin embargo, en presencia de obstáculos, deben considerarse simultáneamente los problemas de evitar los obstáculos y la coordinación del movimiento. Aunque hay muchos trabajos relacionados con la forma de evitar los obstáculos tanto para manipuladores fijos como para plataformas móviles, hay todavía muy pocos que se hayan ocupado de este tema en manipuladores móviles.

1.3. Motivación

Los primeros robots manipuladores móviles, aunque respondían al concepto general previamente definido, no lo eran estrictamente. En realidad, inicialmente estos robots se comportaban como un robot móvil durante la fase de la misión en la que se estaba desplazando y, tras detenerse, pasaba a ser un brazo manipulador mientras realizaba alguna tarea de manipulación. En otras palabras, no era solo un robot, sino dos, cada uno según el momento. Esto era debido por una parte, a que se requería la máxima fiabilidad en el control del robot, dadas las características de las tareas que se pretendían resolver y por otra parte, a que no se encontraban lo suficientemente desarrolladas las técnicas de control como para dotar al robot de comportamiento autónomo.

Tradicionalmente, los robots móviles y los brazos manipuladores han seguido caminos distintos, aunque ambos han sido catalogados genéricamente como robots. Los brazos manipuladores han utilizado ciertas técnicas, mientras que los robots móviles se han decantado por otras con pocos puntos de coincidencia. Finalmente han sido necesidades del mundo actual las que han hecho confluir los dos caminos y se puede decir que un

manipulador móvil es un robot móvil al que se le ha fijado un robot manipulador para operar preferentemente en interiores.

En la actualidad se ha avanzado significativamente en muchas facetas. Se pueden mencionar los avances en las técnicas de tele-operación, tele-asistencia y navegación autónoma. Además se han consolidado las líneas de investigación básicas tales como la coordinación de movilidad y manipulación, planificación de movimiento o control de fuerza-par. De esta manera se trata de permitir que el conjunto aúne movilidad y manipulación con control.

Algunas empresas comercializan en la actualidad robots tele-operados especialmente diseñados para la intervención en situaciones de emergencia, lo cual demuestra que se trata de una tecnología consolidada. Sin embargo, este tipo de robots presentan ciertas limitaciones. El operador controla totalmente el comportamiento del robot, pero esto, aunque implica mayor fiabilidad, también conlleva un manejo muy complicado. En este sentido se trata de avanzar en el alcance de cierta autonomía.

La capacidad de manipulación es otro aspecto importante. Un solo brazo, frecuentemente con menos de seis grados de libertad, no puede abordar tareas demasiado complejas. Así observamos que los robots pueden intervenir en situaciones diversas como catástrofes, trabajar en entornos hostiles...etc., aunque evidentemente existen aún muchas limitaciones. Con líneas de trabajo como las que se pretende desarrollar en esta tesis, se aspira a ahondar en la tecnología que permita una utilización de los robots más fiable en las situaciones y entornos mencionados.

Han sido los distintos acontecimientos a lo largo de la historia y las necesidades que se han ido planteando, las que han dado lugar al desarrollo de los manipuladores móviles, encuadrándose dentro de unos marcos de actividad más o menos diferenciados. Así podríamos destacar un conjunto de actividades principales entorno a las cuales gira el trabajo de los grupos de investigación.

En la mayoría de los trabajos que se describirán posteriormente en el capítulo II, la tarea del manipulador móvil se especifica por medio de una trayectoria a seguir sin considerar la presencia de obstáculos en el camino del robot. Si realmente queremos que los manipuladores móviles realicen tareas de asistencia en entornos reales (oficinas, industrias, en tareas domésticas, etc.), debemos tener en cuenta la presencia de obstáculos no previstos y nuestro sistema debe ser capaz de responder a ella de forma autónoma.

1.4. Objetivos de la tesis

El objetivo de la tesis es desarrollar un manipulador móvil de servicios avanzado capaz de operar eficazmente en entornos típicamente diseñados para humanos. La *robustez*, *fiabilidad* y *seguridad*, son requisitos fundamentales para que el robot pueda desarrollar su tarea de forma adecuada en entornos compartidos con seres humanos, sin necesidad de modificar el espacio de trabajo. Esto requiere la coordinación de capacidades de:

- Desplazamiento.
- Manipulación.
- Sensoriales.



En consecuencia, para lograr la coordinación de dichas capacidades se hizo necesario plantear los siguientes objetivos:

1. Diseño y construcción de un manipulador móvil:

El sistema debía incluir una base móvil de dimensiones adecuadas a entornos humanos, con una cintura fija y un manipulador ligero capaz de realizar diferentes operaciones en entornos humanos.

2. Diseño y realización de un sistema de control coordinado:

Para que el robot móvil pudiera realizar tareas de forma eficaz en entornos humanos era necesario disponer de un control coordinado de los movimientos de la base y del manipulador.

3. Percepción y modelado 2D-3D:

Se pretende que el sistema sea capaz de manipular objetos situados en un entorno 3D por lo que era necesario conocer la posición y orientación relativa del objeto con respecto al manipulador móvil, así como determinar el punto y orientación adecuado para su manipulación y calcular caminos que eviten los obstáculos. Para ello el sistema tendría que disponer de diferentes módulos de percepción y mapas tridimensionales del entorno cuando fuese necesario. También tendría que utilizar métodos bidimensionales cuando la situación lo requiera.

4. Planificación y coordinación de la percepción:

Además de percibir y modelar el entorno, es necesario determinar en cada momento del desarrollo de una misión qué tarea sensorial es necesaria en dicho momento y cómo debe coordinarse con los movimientos de la base y del manipulador.

5. Navegación:

El manipulador móvil debe ser capaz de moverse autónomamente por el entorno, por lo que tendrá que incluir todas las funciones típicas para el movimiento autónomo:

- Planificación del camino.
- Navegación.
- Localización.
- Pilotaje.

Como se mencionó anteriormente, esta tesis se centrará en la fase de diseño y construcción del manipulador móvil así como la integración con el resto de elementos que conforman el robot MANFRED.

1.5. Estructura de la memoria

En este apartado se presenta la organización de la memoria, enumerando los capítulos en los que ha sido estructurada esta tesis. El principio de cada capítulo viene acompañado de una breve descripción del contenido del mismo y a continuación los apartados que se desarrollan en el capítulo. La memoria ha sido estructurada en los siguientes capítulos:

➤ *Capítulo I: Introducción*

En este capítulo se introduce el concepto de manipulador móvil y los puntos a tener en cuenta cuando se aborda el desarrollo de este tipo de robots. Así mismo, se expone la motivación que ha llevado a la realización de esta tesis, junto con los objetivos que se persiguen en el desarrollo de la misma.

También se presenta la estructura por capítulos de la tesis junto con una breve descripción de los aspectos tratados en cada uno de ellos.

➤ *Capítulo II: Antecedentes históricos de los manipuladores móviles*

En él se presenta el estudio previo del estado del arte de los manipuladores móviles aplicados a entornos humanos, ubicados en el campo de la denominada robótica de servicios. En este capítulo se analizan sus antecedentes históricos y su evolución desde los inicios de este campo de la robótica hasta su situación actual. Se presta especial atención a los aspectos que condicionan su desarrollo en este tipo de entornos como son la **seguridad física** y la **robustez operacional**. Así mismo se presenta distintos proyectos de manipuladores desarrollados donde se pone de manifiesto la dificultad que entraña el desarrollo de este tipo de tecnología.

Por otra parte, se abordan aspectos tan relevantes en el diseño de un manipulador móvil como son el problema de la **redundancia** y el **control coordinado** de sus grados de libertad. Se plantean distintos tipos de sistemas de control de un manipulador móvil que tratan de subsanar la problemática que se deriva de la redundancia cinemática.

Finalmente, se presenta el proyecto del manipulador móvil OTILIO, cuyo desarrollo previo ha permitido extraer conclusiones que se han aplicado en el desarrollo del robot MANFRED.

➤ *Capítulo III: Arquitectura y características del manipulador móvil propuesto*

Se presenta, en primer, lugar la estructura general del manipulador móvil donde se describen los elementos constituyentes del mismo. A continuación se presentan cada uno de los sistemas que componen el diseño: El sistema sensorial, que permite obtener la información del entorno de trabajo. El sistema locomotor, que le confiere capacidad de desplazamiento por los entornos donde cohabita con humanos. El sistema manipulador, de especial relevancia por ser el objeto central de esta tesis, le proporciona capacidad de manipulación. En último lugar se describen los sistemas de procesamiento y de comunicaciones. Finalmente se definen las características generales de este tipo de manipuladores tales como morfología, carga, espacio de trabajo, velocidad...etc., que nos permiten caracterizar nuestro diseño y en consecuencia poder cuantificar su corrección en relación a los objetivos inicialmente planteados.

➤ *Capítulo IV: Diseño del brazo manipulador ligero: prototipo experimental*

En este capítulo se presenta la fase de diseño del manipulador donde se describen cada una de sus etapas. En primer lugar, se presentan los **objetivos** perseguidos en su diseño tales como la **robustez**, la **fiabilidad**, la **seguridad física** para los seres humanos, la **estética del diseño**, apariencia **humaniforme** y un largo etcétera de objetivos que serán justificados. El planteamiento de dichos objetivos servirá para fijar las especificaciones

del diseño mecánico que permitan cumplirlos. En este sentido, se dedica especial atención al **estudio antropométrico** que se presenta en este capítulo por ser de especial relevancia a la hora de fijar las dimensiones del manipulador UC3M-LWR-1.

En segundo lugar, se introduce brevemente la herramienta de diseño **SolidWorks** que se ha empleado en la fase de diseño del prototipo experimental.

Una vez establecidos los objetivos del diseño, en tercer lugar, se abordan aspectos tan relevantes como la **elección de los materiales de la estructura** de acuerdo a un minucioso análisis de las características de cada tipo de componente, donde se han valorado diferentes alternativas. En este sentido se ha elaborado una lista de los parámetros que tenían especial relevancia a la hora de decantarse por una u otra alternativa. De esta manera se procede para la selección de componentes tales como **motores, reductores, sensores** etc. donde se presentan las conclusiones de dichos estudios que justifican la elección final.

En cuarto lugar se describe en detalle cada una de las piezas que componen el diseño. Para cada articulación se describe las piezas que la componen y su función, acompañado de figuras detalladas de las mismas. También se presenta el diseño del actuador final o elemento terminal del manipulador. Finalmente se presenta la etapa del diseño mecánico donde se comenta las decisiones de rediseño de las piezas en base a unos criterios de optimización como son la reducción de peso, o la mejora de la estética y la seguridad entre otros.

➤ *Capítulo V: Cinemática del brazo manipulador ligero*

Este capítulo se aborda la cinemática del manipulador. En primer lugar se presenta una breve introducción a la cinemática de manipuladores donde se describen los dos tipos de análisis que se pueden plantear cuando hablamos de resolver un problema de cinemática de manipuladores móviles: la **cinemática directa** y la **cinemática inversa**. Se calculan los parámetros de Denavit-Hartenberg, importantes cuando se aborda el estudio cinemático de un manipulador. En segundo lugar se introduce brevemente la herramienta informática utilizada para este análisis: **CosmoWorks**. Finalmente se presenta el modelo cinemático del manipulador donde se plantea el análisis desde un punto de vista de la cinemática inversa. Se plantean distintas simulaciones para la obtención de las trayectorias que deben generarse de acuerdo a la tarea que se pretende realizar: la de **apertura de una puerta**. Se presentan resultados de velocidades y aceleraciones para cada simulación y se realiza una comparativa de los resultados por simulación y otra por articulación.

➤ *Capítulo VI: Análisis dinámico del brazo manipulador ligero*

En este capítulo se presenta el análisis dinámico del brazo manipulador donde se justifica el **modelo dinámico** empleado y los factores de influencia en dicho análisis. También se introduce muy brevemente la herramienta de análisis dinámico utilizada: **CosmosMotion**. En este capítulo se estudia el comportamiento dinámico del manipulador UC3M-LWR-1 mediante la realización de distintas simulaciones. El presente capítulo se encuentra dividido en una serie de secciones que se expondrán en orden y que tratan los siguientes temas: en primer lugar, una introducción a la dinámica de manipuladores. En segundo lugar, se plantea el análisis dinámico del manipulador,

donde primero se analizará el comportamiento dinámico en la realización de dos trayectorias que se consideran genéricas por estar involucradas en la mayoría de tareas (elevación frontal y elevación lateral del brazo manipulador) y que a la vez resultan críticas para el correcto funcionamiento del manipulador; y segundo se realiza el estudio dinámico de la tarea concreta de apertura de una puerta. En tercer lugar se lleva a cabo un estudio de las variaciones registradas en los esfuerzos de reacción en función de unos determinados parámetros: posición de la base móvil del manipulador, velocidad de **giro del pomo** y de **apertura de la puerta** y rigidez del muelle de torsión en la apertura del pomo. Finalmente se analizan los **pares** necesarios y la **potencia consumida** por los motores en cada una de las articulaciones para conseguir realizar las trayectorias simuladas en cada simulación.

➤ *Capítulo VII: Conclusiones finales, nueva generación y futuras líneas de investigación*

Finalmente se presentan las conclusiones alcanzadas en el desarrollo tanto en su vertiente mecánica como dinámica. Así mismo se repasan los objetivos iniciales de diseño y se discute su cumplimiento con la justificación de los resultados obtenidos. En segundo lugar se plantean las futuras líneas de investigación que se abren para el desarrollo de este manipulador en generaciones futuras.

➤ *Anexos*

Se adjunta toda la información relevante relacionada con esta tesis y que por su volumen o formato no se incluye en las páginas centrales de esta memoria, tales como:

- *Anexo I:* Ergonomía del brazo humano.
- *Anexo II:* Justificación de la elección de los actuadores. (En el CD adjunto)
- *Anexo III:* Configuración del brazo manipulador ligero UC3M-LWR-1.
- *Anexo IV:* Planos del diseño mecánico del brazo manipulador ligero UC3M-LWR-1. (En el CD adjunto)
- *Anexo V:* Análisis cinemático del brazo manipulador ligero UC3M-LWR-1. (En el CD adjunto)
- *Anexo VI:* Análisis dinámico del brazo manipulador ligero UC3M-LWR-1. (En el CD adjunto)

➤ *Bibliografía*

Se presentan las referencias bibliográficas que han sido utilizadas para realizar y documentar esta tesis.

CAPÍTULO II

ANTECEDENTES HISTÓRICOS DE LOS MANIPULADORES MÓVILES



2.1. Introducción

A lo largo de las dos últimas décadas se ha venido realizando un importante esfuerzo por desarrollar robots capaces de cooperar y compartir el espacio de trabajo con seres humanos, ya que los robots convencionales realizan tareas en su propio espacio de trabajo que está separado del entorno humano.

Entre los robots que están siendo desarrollados en esta línea nos encontramos los que se han denominado **robots de servicio**. Una de las características más significativas de estos robots es que deben ser capaces de operar en entornos en los que se requieren capacidades de manipulación altamente desarrolladas y que en bastantes ocasiones están cohabitados por personas, que en una mayoría de ocasiones no van a estar entrenadas para cooperar con el robot. Como consecuencia, los futuros robots de servicio requerirán un alto grado de autonomía, de robustez, de adaptabilidad y una serie de habilidades que le permitan enfrentarse a situaciones imprevistas.

Existen diversas razones para tomar a una persona como ejemplo a seguir en el diseño y desarrollo de estos robots de servicio. Quizás el mejor argumento es que estos robots de servicio deberán realizar tareas en entornos donde los seres humanos desarrollamos nuestras actividades, es decir en apartamentos, oficinas, laboratorios, hospitales, etc. Estos entornos han sido diseñados para personas, y por ello están adaptados a las características y necesidades que estas tienen, por ejemplo: para moverse (la anchura de los corredores y de las puertas se diseñan según estas características), o la altura a la que se ha de trabajar (la altura de las mesas o de los pomos de las puertas), o la altura para situar carteles de aviso (la altura de los letreros de las puertas) o la fuerza que es necesaria para manipular objetos. Parece por tanto natural el que si un robot de servicio va a operar en estos tipos de entornos estos se diseñen y desarrollen considerando un modelo antropomórfico.

Por ello, este tipo de robots deben estar dotados de una gran capacidad para moverse y trabajar en espacios 3D. Normalmente combinan en su estructura elementos de robots móviles y de robots manipuladores, así como sistemas sensoriales altamente desarrollados.

Entre los robots que responden a este esquema podríamos distinguir:

1. Robots móviles con capacidad de manipulación.
2. Manipuladores móviles.
3. Robots humanoides.

2.1.1. Robots móviles con capacidad de manipulación

Los robots móviles con capacidad de manipulación responden a una evolución natural de los robots móviles, en la que una vez que se ha conseguido la autonomía de desplazamiento por el entorno se le dota de capacidad de intervención en el mismo añadiéndole un robot manipulador, Figura 2.1. La diferencia con un manipulador móvil, estriba en que no controlan de forma conjunta los grados de libertad de la plataforma móvil y del manipulador. Es decir la integración de los sistemas motor y de manipulación es baja, lo que limita la potencialidad de tareas a desarrollar.

Como ejemplos de esta tendencia se pueden citar los trabajos de investigación del Prof. O. Khatib desarrollados en el laboratorio de robótica de la Universidad de Stanford, U.S.A., que han ido evolucionando desde los manipuladores móviles constituidos por



Figura 2.1.- Robot móvil.

una base móvil y un manipulador convencional, pasando por un manipulador móvil con dos brazos convencionales [1] al robot de servicio manipulador móvil con dos brazos ligeros de diseño y disposición antropomórfica [2], Figura 2.2. La tendencia al diseño antropomórfico se debe a las ventajas que aporta este tipo de morfología en tareas de colaboración con personas o de manipulación de objetos (por ejemplo: si son voluminosos o si no están fijos, en cuyo caso con una mano lo sujetamos y con la otra manipulamos o agarramos) y en la coordinación entre percepción y manipulación [3].

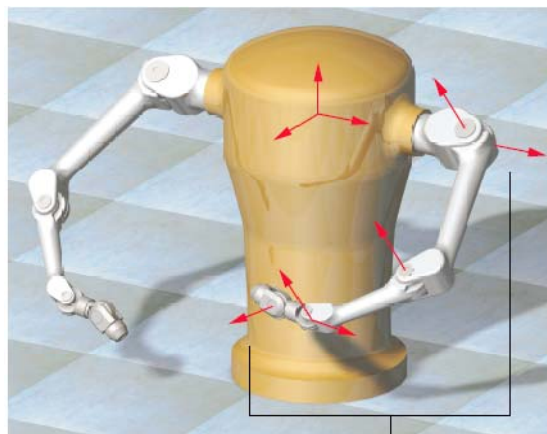


Figura 2.2.- Prototipo de un manipulador móvil con dos brazos ligeros de diseño y disposición antropomórfica.

Los manipuladores móviles son un campo de integración de numerosas tecnologías, y por tanto sería muy extenso enumerar el estado del arte de todas ellas. Por ello se ha preferido reducir este estado del arte a una breve revisión de los principales proyectos de manipuladores móviles aplicados a entornos humanos, junto con algunos comentarios sobre los avances en los aspectos más relacionados con esta tesis que se refieren a las técnicas de coordinación base-manipulador.

2.1.2. Manipuladores móviles

Los manipuladores móviles tienen una estructura que combina un robot móvil y un robot manipulador, Figura 2.3.

Dichos manipuladores suelen permitir una mayor capacidad de carga, lo que permite mucha mayor autonomía de operación, así como el disponer sistemas manipuladores y sensoriales más sofisticados. Estos robots controlan de forma conjunta los grados de libertad de la base móvil y del manipulador para actuar sobre el entorno [4] y [5].

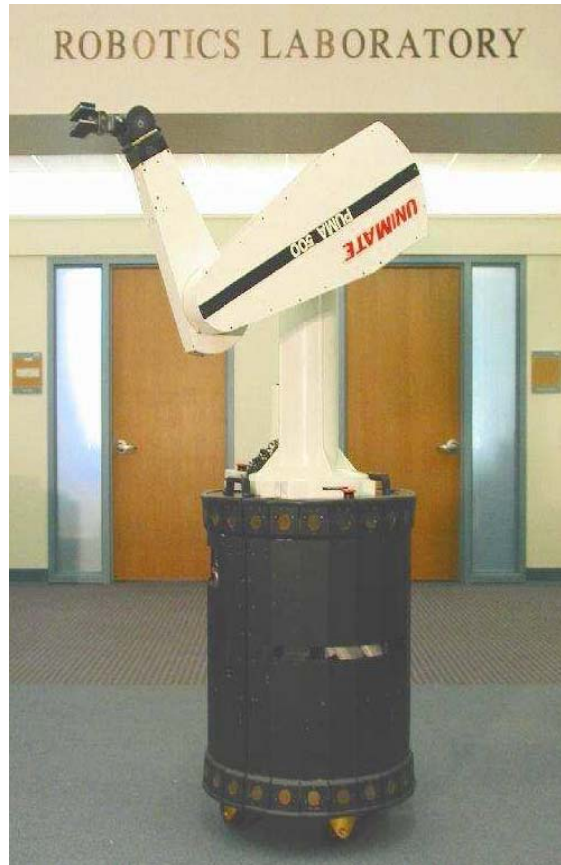


Figura 2.3.- Manipulador móvil (Base: Nomadic XR4000 and Manipulator Arm: PUMA 560).

2.1.3. Robots humanoides

En los robots humanoides se busca una morfología similar a la humana en la disposición de los elementos motores y manipuladores. Estos robots humanoides son bípedos y tienen un número muy grande de grados de libertad, Figura 2.4. La capacidad para moverse por entornos humanos es máxima ya que son capaces no sólo de moverse por sitios estrechos sino además de subir y bajar escaleras [6].

La investigación en estos robots está hasta el momento centrada en conseguir un buen control de la locomoción, especialmente del andar dinámico (cuando el centro de gravedad está fuera del área base de soporte de las piernas). Presentan un problema muy importante en lo que se refiere a la autonomía energética, por lo que algunos de ellos utilizan cables para el suministro energético.



Figura 2.4.- Robot humanoide “HONDA”.

2.2. Antecedentes y estado actual de los manipuladores móviles

Tradicionalmente, los robots móviles y los brazos manipuladores han seguido caminos distintos por el laberinto de la investigación. Los brazos manipuladores han utilizado ciertas técnicas, mientras que los robots móviles se han decantado por otras sin apenas puntos de coincidencia. El encuentro de las dos líneas señala el inicio de la historia de los manipuladores móviles.

En las décadas de los setenta y los ochenta, dos sucesos fueron determinantes para el comienzo de la historia de los manipuladores móviles. Se trata de los accidentes en las centrales nucleares de Three Mile Island, en 1979, y de Chernobyl, en 1986. En aquella época ya se poseía experiencia en el manejo de materiales radiactivos peligrosos empleando manipuladores tele-operados, pero siempre en entornos controlados y estáticos. Ahora el problema tenía características radicalmente distintas. Era necesario realizar operaciones de manipulación, ocasionalmente complejas, en entornos muy contaminados y sólo parcialmente conocidos. Así que se diseñaron vehículos especiales equipados con tele-operadores controlados desde una estación remota. Eran los primeros tele-operadores móviles de intervención en catástrofes.

Los primeros robots de intervención en catástrofes (Apartado 2.2.1.2) respondían al concepto general de robot móvil con capacidad de manipulación, aunque no eran autónomos ni mucho menos. En realidad, uno de estos robots era un robot móvil durante la fase de la misión en la que se estaba desplazando y, tras detenerse, pasaba a ser tele-operado mientras realizaba alguna tarea de manipulación. En otras palabras, no eran un sólo robot, sino dos, cada uno según el momento. El problema de la coordinación del movimiento aún no había sido ni tan siquiera planteado.

Los primeros manipuladores móviles eran robots tele-operados. Y esto era así porque, por una parte, se requería la máxima fiabilidad en el control del robot dadas las características de las tareas que se pretendían resolver, y por otra parte no se encontraban suficientemente desarrolladas las técnicas de control para dotar al robot de comportamiento autónomo.

En la actualidad se ha avanzado ya significativamente en muchos aspectos. Se pueden mencionar los avances en las técnicas de tele-operación, tele-robótica y navegación autónoma. Además se han consolidado las líneas de investigación básicas tales como la coordinación de movilidad y manipulación, planificación del movimiento o control de fuerza.

2.2.1. Aplicaciones de los manipuladores móviles

Aunque las aplicaciones potenciales de los manipuladores móviles son innumerables, los esfuerzos de los grupos de investigación se están concentrando sobre algunas de ellas. Se pueden destacar las siguientes:

1. Asistencia a personas discapacitadas.
2. Intervención en entornos hostiles.
3. Exploración planetaria.
4. Transporte flexible en factorías automatizadas.

2.2.1.1. Asistencia a personas discapacitadas

En los últimos años se comienza a plantear la posibilidad de robots que trabajen directamente al servicio de las personas, en su mismo entorno. Se conocen con el nombre de *robots asistentes*. Sin duda son verdaderos manipuladores móviles, pero su diseño conlleva múltiples consideraciones acerca de la interacción robot-humano.

En Europa se han desarrollado varios proyectos en este campo. El proyecto URMAD [7] y [8], Figura 2.5, promovido por la administración italiana en 1991, tenía el objetivo de poner en marcha un robot capaz de asistir a pacientes discapacitados en hospitales. El resultado fue la construcción de un primer prototipo de manipulador móvil.

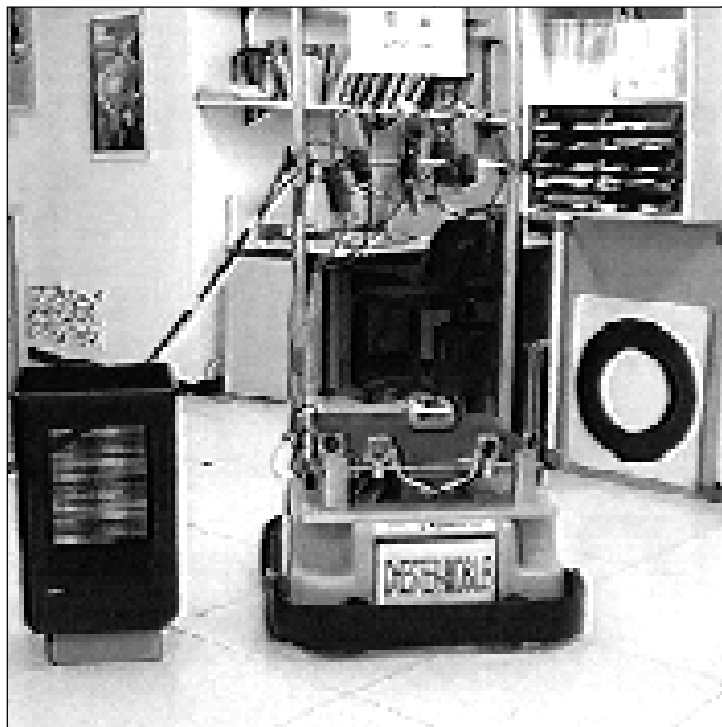


Figura 2.5.- Manipulador móvil URMAD.

La investigación continuó con el proyecto MOVAID, Figura 2.6, que ya contó con el apoyo de la Unión Europea dentro del marco TIDE [9] y [10]. Persiguió el desarrollo de un sistema robotizado modular semi-autónomo de asistencia doméstica en general. Al final del proyecto, en 1997, se había construido un demostrador y probado en una instalación sanitaria real. Su movimiento está controlado por estaciones fijas (PC's) en puntos de la casa, dotando al robot de una capacidad de navegación que le permite ir sorteando obstáculos. Su principal inconveniente es que quizás es poco robusto ante incertidumbre y fallos de localización global. Destaca por su versatilidad a la hora de realizar distintas tareas, ya que además del brazo de 8 g.d.l posee una pinza en el extremo con otros 2 g.d.l. Entre las tareas más típicas que suele realizar están: calentar la comida en el microondas y servírsela en la cama, limpiar la cocina, quitar sábanas, etc. En paralelo coexistió el proyecto IMMEDIATE, financiado por el programa SPRINT de la Unión Europea, Figura 2.7., Su objetivo era integrar una silla de ruedas con un brazo manipulador [11].



Figura 2.6.- Manipulador móvil MOVAID (prototipo con tamaño real).

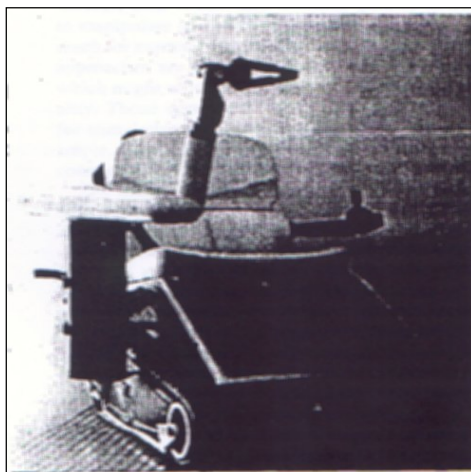


Figura 2.7.- Manipulador móvil IMMEDIATE, para asistir a pacientes discapacitados.

Otro robot asistente de interés es el robot ROMAN, Figura 2.8, diseñado en “Institute of Automatic Control Engineering (LSR)”, de la Universidad Técnica de Munich (Technische Universität München) en Alemania [12]. El manipulador móvil ROMAN utiliza el brazo ligero MANUS, especialmente diseñado para aplicaciones que impliquen interacción con personas, y suma un total de diez grados de libertad. Un componente muy importante de su sistema de control es un interfaz hombre-máquina

que puede recibir comandos hablados en lenguaje natural, Figura 2.9. Igualmente es relevante la estrategia bilateral de coordinación del movimiento que será comentada posteriormente.



Figura 2.8.- El manipulador móvil ROMAN intenta abrir la puerta.

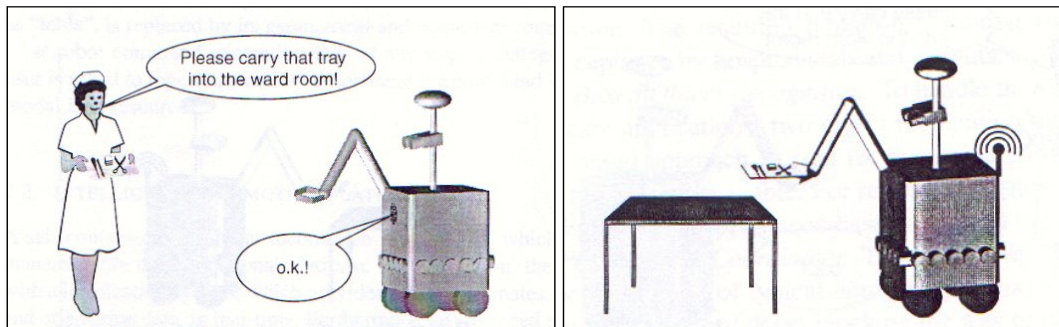


Figura 2.9.- El manipulador móvil ROMAN recibe una orden en lenguaje natural.

2.2.1.2. Intervención en entornos hostiles

Entre las instituciones que han abordado o están abordando el desarrollo de robots de intervención en entornos hostiles están tradicionalmente relacionadas con las actividades generadoras de estos entornos. Algunas de las más relevantes son:

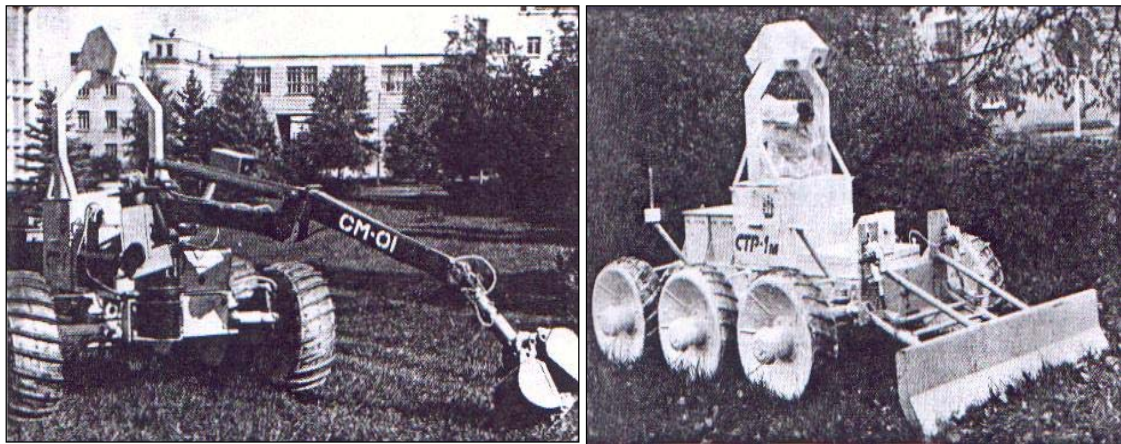
El Centro de Robótica (*Field Robotics Center - FRC*) de la Carnegie Mellon University [13] es uno de los centros de investigación que más experiencia ha aportado en el diseño de robots para entornos hostiles. En 1979, tras el accidente de la central nuclear de Three Mile Island, en Harrisburgh, Pennsylvania, el FRC llevó a cabo diversas tareas de recuperación en el reactor de la central con su vehículo remoto de reconocimiento (*Remote Reconnaissance Vehicle*).

Por su especial relevancia, no se puede dejar de mencionar el Instituto de Ingeniería de Vehículos de Rusia (VNII TRANSMASH) [14]. Este instituto es el responsable del diseño de los vehículos robotizados que desmantelaron parte de la estructura de la central nuclear de Chernobyl en 1986, después del accidente. Se utilizaron dos tipos de vehículos:

- vehículos pesados (KLIN) para tareas de reconocimiento y movimiento de obstáculos y materiales contaminados, Figura 2.10 (a).

- vehículos ligeros (STR-1) para aplicación de productos descontaminantes, Figura 2.10 (b).

Todas las posibilidades de manipulación de estos vehículos estaban en sus planchas frontales tipo "bulldozer", aunque por otra parte mostraron ser tremendamente efectivos. Un desarrollo más reciente del vehículo STR ya portaba un manipulador. El tipo de control, en cualquier caso, era remoto con realimentación visual a través de cámaras de televisión.



(a)

(b)

Figura 2.10.- Vehículos robotizados utilizados desde el accidente de la central nuclear "Chernobyl", a) El vehículo pesado "KLIN", b) El vehículo ligero "STR-1".

Diez años después del accidente nuclear de Chernóbil, se inició un proyecto liderado por el Departamento de Energía (DOE) de Estados Unidos para desarrollar un nuevo robot de reconocimiento remoto y análisis estructural de la Unidad 4 de dicha central. El resultado es el robot PIONEER [15], Figura 2.11, que está operativo desde el verano de 1999. Se trata de un tele-operador móvil controlado a través de un cordón umbilical y equipado para desplegar sensores de radiación, recoger muestras estructurales y crear mapas tridimensionales foto-realísticos del interior del edificio.



Figura 2.11.- El robot "PIONEER".

En 1984 nació el Centro de Investigación avanzada de Ingeniería de Sistemas (*Center for Engineering Systems Advanced Research*) (CESAR) en el seno del Laboratorio Oak Ridge Nacional (*Oak Ridge National Laboratory*), que depende del Departamento de Energía (DOE) de la administración norteamericana. Uno de los primeros programas de I+D lanzados en el centro fue los experimentos realizados con robots inteligentes en entornos hostiles (*Hostile Environment Robotic Machine Intelligence Experiment Series - HERMIES*) [16].

Inicialmente se desarrollaron o adquirieron varios robots móviles que pudiesen servir de demostradores en el camino hacia el objetivo de investigación a largo plazo: el control inteligente de manipuladores móviles en entornos hostiles. Uno de los últimos productos del programa fue el robot HERMIES-III, Figura 2.12. Comenzó a ser operativo en 1989 y estaba constituido por un chasis móvil omnidireccional con ruedas y un brazo manipulador de 7 grados de libertad. Además portaba sensores de visión, táctiles y de fuerza-par.

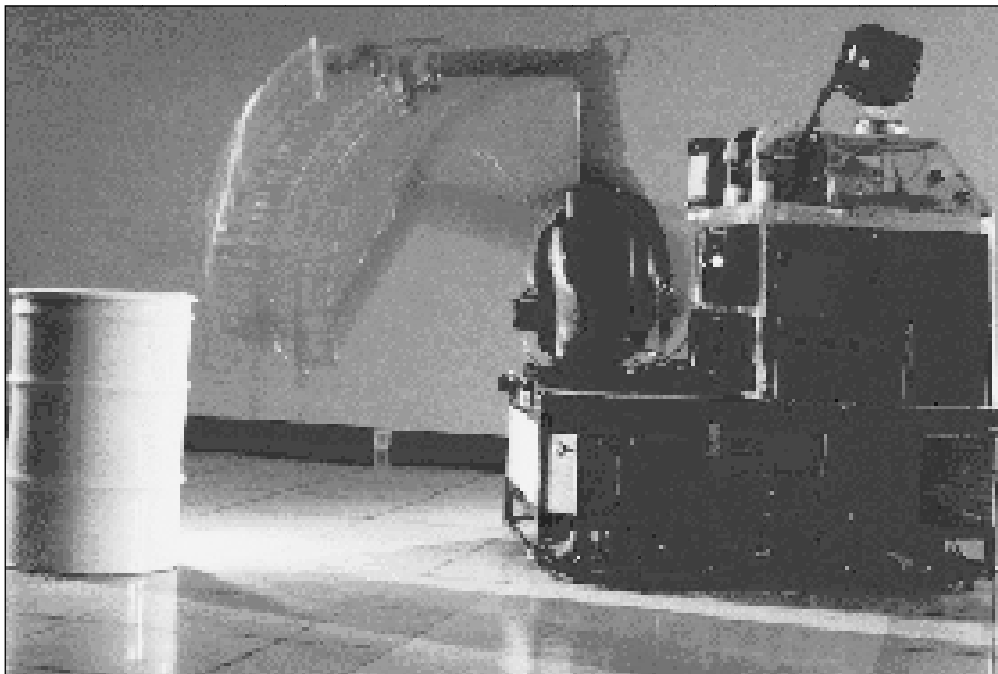


Figura 2.12.- Manipulador móvil HERMIES-III.

La agencia espacial estadounidense (NASA) también asumió la necesidad de contar con un equipo tele-operado para afrontar situaciones de emergencia en sus instalaciones. En 1990, el *Jet Propulsion Laboratory* (JPL) de la NASA, en colaboración con el Instituto de Tecnología de California (*Caltech*), inició el proyecto del vehículo terrestre para situaciones de emergencia (*Ground Emergency Response Vehicle Project*), que ha resultado en el diseño del robot HAZBOT.

La versión de HAZBOT-III [17] y [18], utiliza el vehículo REMOTEC ANDROS MARK V-A propulsado por orugas articuladas, Figura 2.13. El vehículo se ha equipado con un manipulador de 6 grados de libertad y plataforma *pan-tilt* que porta una cámara. En cuanto al modo de control, el robot es tele-operado desde una estación remota, a la cual transmite datos y señales de vídeo y audio a través de un cable.

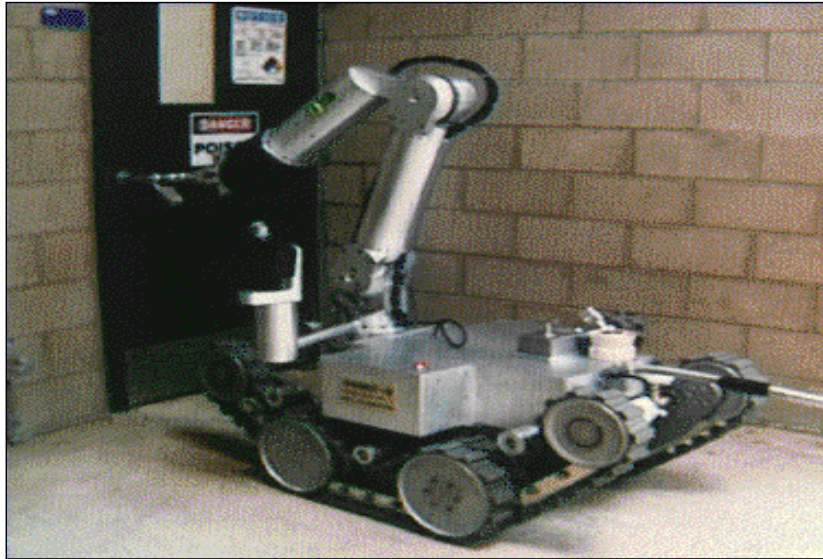


Figura 2.13.- El robot HAZBOT-III, es un robot tele-operado.

2.2.1.3. Exploración planetaria

La exploración planetaria es un campo que se ha abierto recientemente a las posibilidades de los manipuladores móviles. Un brazo manipulador añade funcionalidades muy valiosas a las de un *Rover* planetario convencional, Figura 2.14 [19] y [20]. Pero, por el momento, esta idea no ha sobrepasado la fase de experimentación. Los robots espaciales y los robots submarinos también constituyen ejemplos de manipuladores móviles.

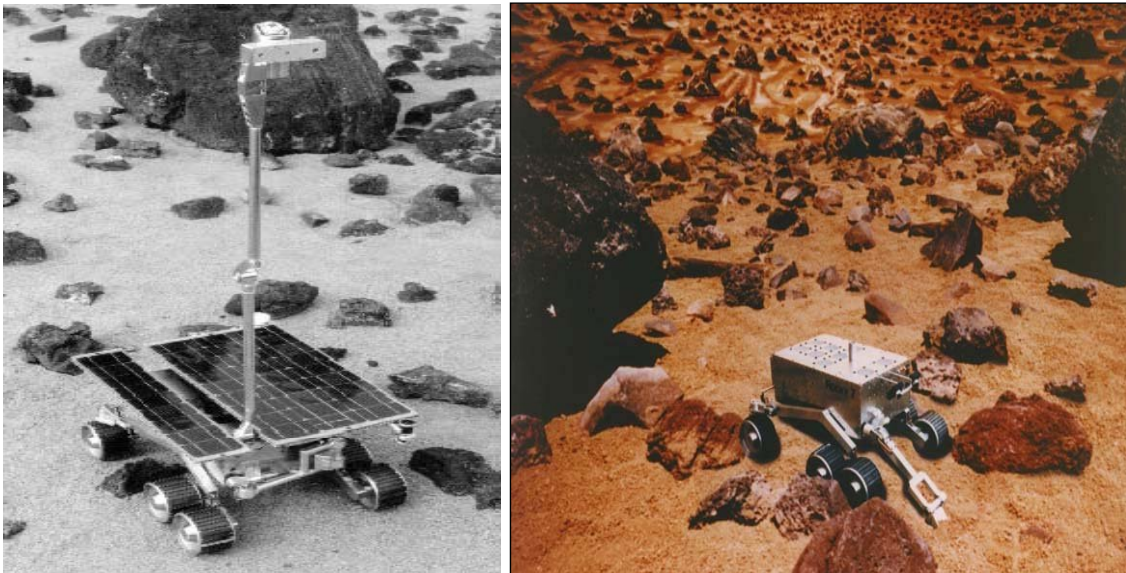


Figura 2.14.- Manipulador móvil "Rover – ROCKY 7".

La exploración planetaria es una fuente de importantes retos para la robótica. Un planeta exterior es, quizás, el entorno hostil por excelencia. Por el momento, solamente la Luna ha recibido visitantes humanos, y dadas las dificultades que las misiones tripuladas implican, no parece que la huella del hombre vaya a ser impresa en otro planeta durante mucho tiempo. Obviamente, es menos arriesgado enviar un robot, un "rover". En la Figura 2.15 se puede ver el robot Nanorover que es un proyecto de cooperación entre

agencia espacial de Japón y la NASA [21]. Este rover interplanetario tiene un peso de 1.3 Kg. y su función es enviar información sobre las muestras encontradas en el asteroide Nerus 1998 SF36.

Una misión de exploración planetaria típica consiste en navegar hasta un lugar, probablemente pasando por ciertos puntos de paso, realizar allí algún tipo de medición o recogida de muestras, y regresar al punto de partida. Para la operación de recogida, el *rover* precisa de un dispositivo manipulador, eso si, muy sencillo, tal vez con dos grados de libertad tan solo. Una dificultad añadida es que la posibilidad de que el *rover* sea tele-operado durante la misión desde una estación terrestre es prácticamente inviable, dado el ínfimo ancho de banda disponible; piénsese en el orden de magnitud de las distancias interplanetarias. Por lo tanto, los *rovers* planetarios requieren un cierto grado de autonomía y este factor los diferencia de los robots para entornos hostiles.

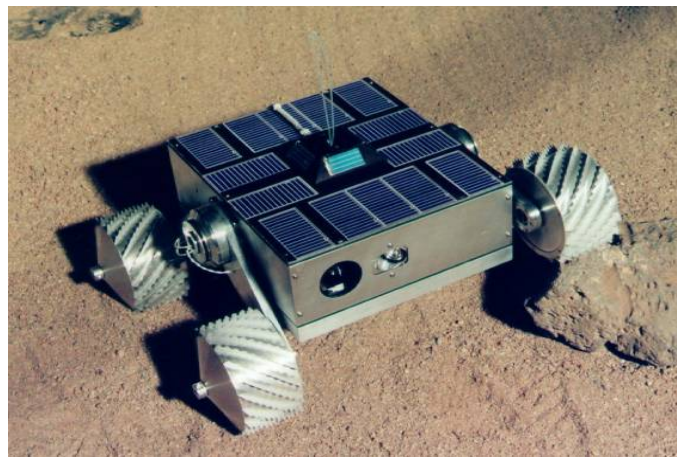


Figura 2.15.- El robot NANOROVER, en la Luna.

El primer *rover* en cumplir una misión de exploración planetaria fue el LUNOKHOD-1 [22], diseñado en el VNII TRANSMASH de Rusia, Figura 2.16. El 10 de Noviembre de 1970 tocó por primera vez la superficie de la Luna y durante once meses recorrió un área de 80.000 metros cuadrados. En este caso, la distancia a la Luna permitió la tele-operación.

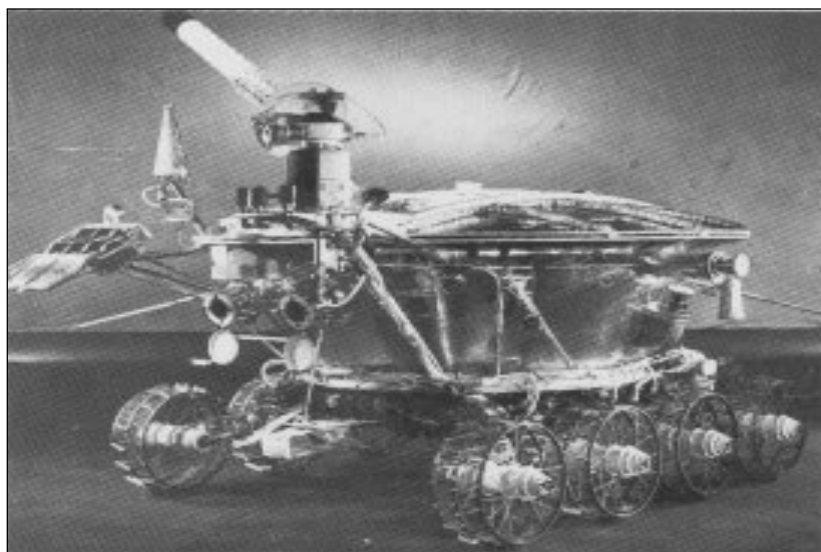


Figura 2.16.- El robot LUNOKHOD-1, el primer rover que fue a la Luna.

El SOJOURNER [23] y [24] llegó a Marte el 4 de Julio de 1997 en la misión *Microrover Flight Experiment* (MFEX) de la NASA, Figura 2.17. Era un pequeño rover de 11,5 kilogramos de peso. Su misión era la de desarrollar una plataforma para el estudio de la viabilidad de los *microrovers* en misiones de exploración sobre superficies poco conocidas, como lo es la de Marte.

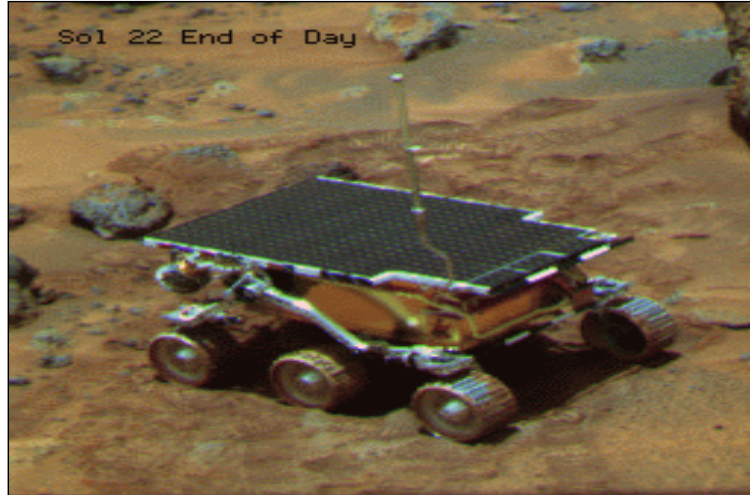


Figura 2.17.- El robot SOJOURNER, en Marte.

El último diseño de la NASA es el MARSOKHOD-96 [25]. Este nuevo *rover* porta, en su versión definitiva, un manipulador. Y quizás algún día sea enviado a Marte para realizar alguna compleja misión de exploración, Figura 2.18. En los últimos diseños de *rovers* planetarios aparecen brazos manipuladores de hasta cuatro grados de libertad.

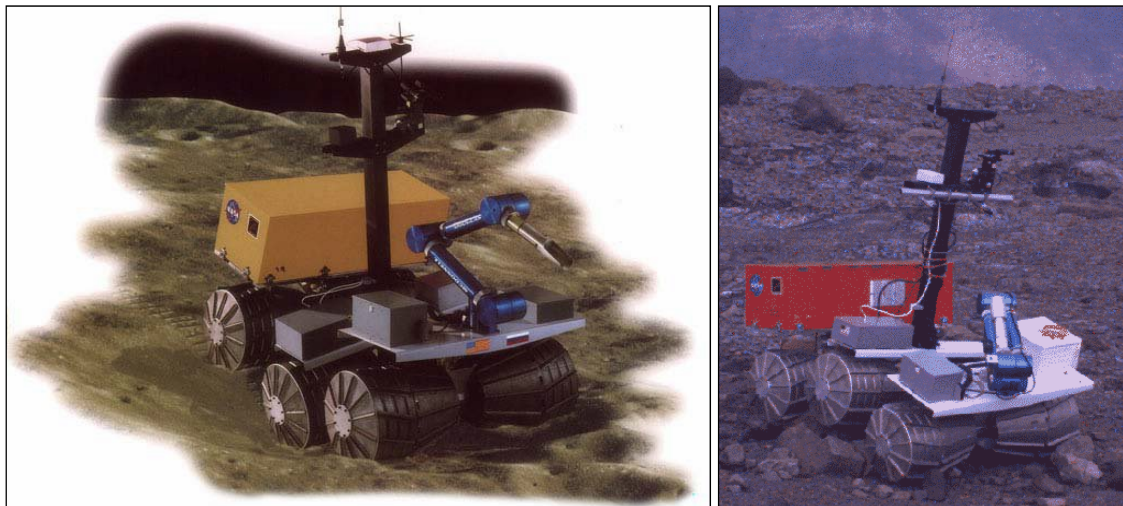


Figura 2.18.- Manipulador móvil MARSOKHOD-96.

2.2.1.4. Transporte flexible en factorías automatizadas

Esta es la aplicación más inmediata de los manipuladores móviles al entorno industrial. Sin embargo, aún se encuentra en una fase de desarrollo relativamente precaria. Se pueden destacar los trabajos de la Universidad de Karlsruhe con su robot móvil autónomo de ensamblado **KAMRO** (*Karlsru Autonomous Mobile Assembly Robot*) [26], que porta dos brazos manipuladores sobre una plataforma móvil con ruedas omnidireccionales, Figura 2.19. Está concebido como una estación móvil de ensamblaje

que aporta fundamentalmente flexibilidad al entorno de la factoría automatizada. Un módulo de navegación planifica y ejecuta los desplazamientos de la base móvil, empleando un mapa del entorno. El robot dispone además de un módulo de "docking" y de un planificador de ensamblaje. Las operaciones de manipulación no comienzan hasta que el robot se ha situado correctamente y detenido, por lo tanto, no hay coordinación de movimientos entre la base y los manipuladores.

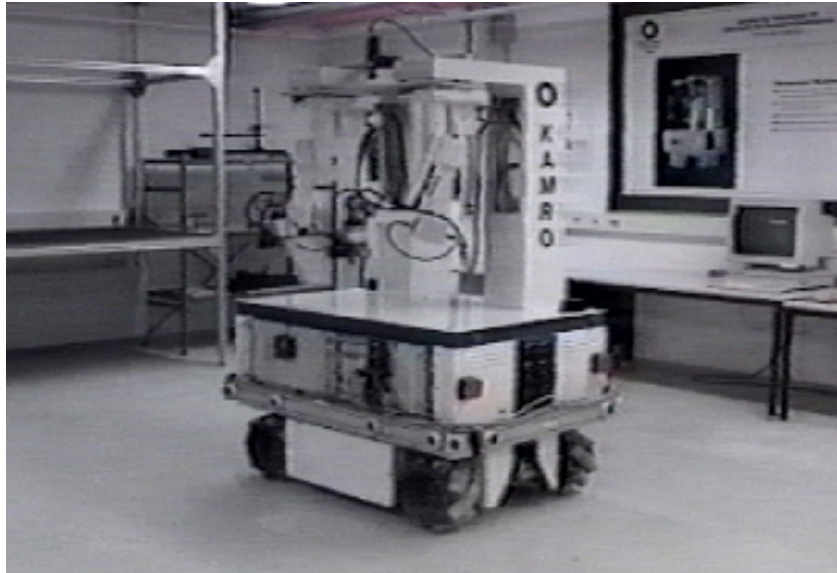


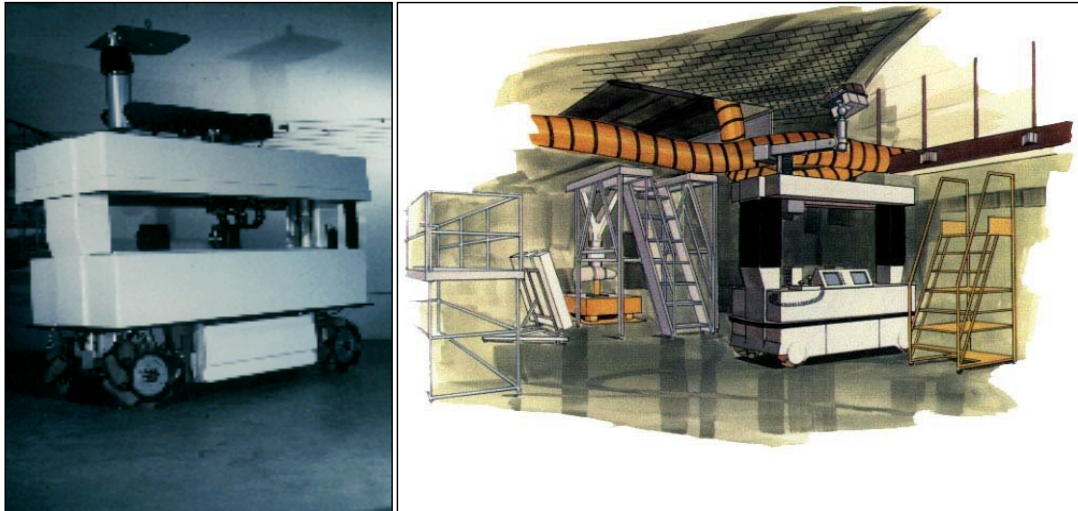
Figura 2.19.- Manipulador móvil KAMRO.

Recientemente, *DENSO Corp.*, ha presentado un manipulador móvil industrial que funciona en producción en una de las líneas automatizadas de ensamblaje de la compañía [27]. El robot consta de una plataforma vehículo automatizado autónomo (AGV) y un manipulador de seis grados de libertad con realimentación visual. Se ha diseñado para poner en práctica el concepto de sistema de producción adaptativo (*Adaptive Production System*), formando una flota de estaciones de trabajo móviles que trabajan cooperativamente en la línea. El sistema regula automáticamente el número necesario de manipuladores móviles en la línea, en función del volumen instantáneo de producción. De este modo consigue un mejor compromiso entre flexibilidad y productividad.

2.2.2. Aplicaciones especiales

También han sido diseñados manipuladores móviles para resolver problemas específicos. Un ejemplo ilustrativo es el TESSELATOR [28], Figura 2.20. El Instituto de Robótica de la Universidad Carnegie Mellon, en cooperación con la NASA, ha desarrollado un manipulador móvil que realiza tareas de mantenimiento y servicio sobre el transbordador espacial. Se ha llamado TESSELATOR y está en servicio desde 1994.

En particular, se ocupa de la inspección y reparación del sistema de protección térmica del transbordador. La base móvil tiene tres grados de libertad, lo cual supone disponer de una gran maniobrabilidad, y el manipulador fue diseñado para ajustarse a las necesidades de la tarea. En cuanto a su modo de funcionamiento, no hace movimientos coordinados, es decir, el manipulador actúa solamente después de que la base móvil haya alcanzado una cierta localización y se haya detenido.



(a)

(b)

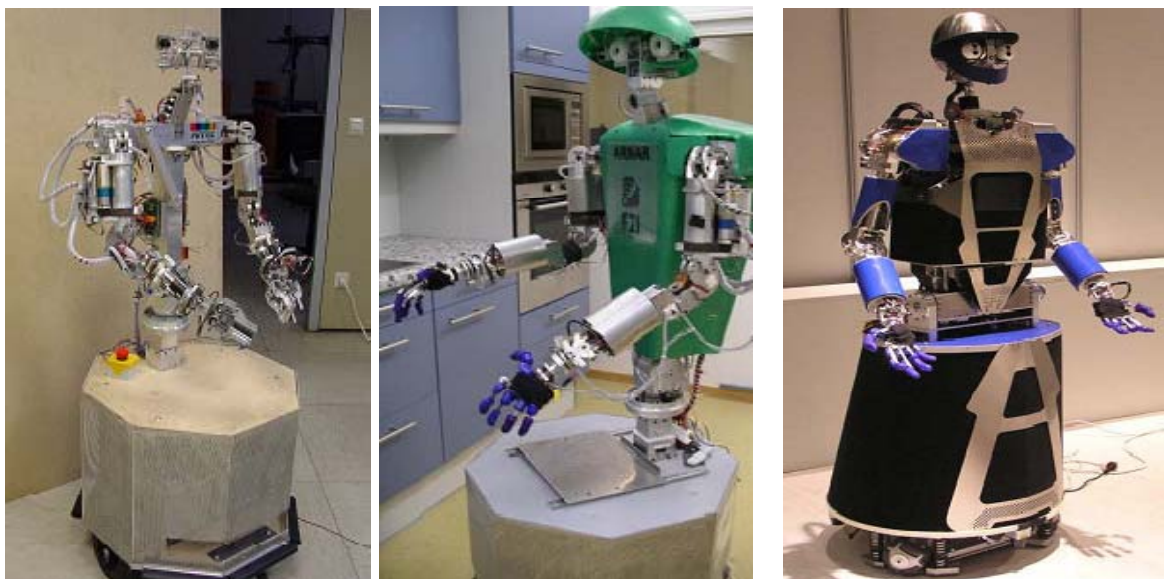
Figura 2.20.- El robot TESSELATOR, a) Estructura general, b) Realizando una tarea de mantenimiento.

2.2.3. Manipuladores móviles experimentales

Varios centros en todo el mundo están actualmente desarrollando plataformas experimentales de propósito general como base de sus investigaciones en el campo de los manipuladores móviles. Las últimas tendencias observadas en la literatura señalan la incorporación de rasgos humanoides en el diseño y a la adopción de tareas de cooperación con humanos.

2.2.3.1. PROYECTO ARMAR

El proyecto ARMAR, Figura 2.21, se desarrolló en la década de los 90 en la universidad de Karlsruhe (Alemania) [29] y [30]. Se trata de un robot humanoide de servicios capaz de desarrollar con plena autonomía actividades de colaboración con humanos.



(a) ARMAR I

(b) ARMAR II

(c) ARMAR III

Figura 2.21.- ARMAR I-III Robot humanoides de la Universidad Karlsruhe (Alemania).

A diferencia de muchos de los proyectos que se describen más adelante, no se trata de un brazo manipulador sobre una plataforma móvil, sino que posee distintos elementos antropomórficos que lo convierten en uno de los robots más útiles para moverse en entornos humanos. Se compone de dos brazos manipuladores de 7 g.d.l. cada uno, un tronco de 4 g.d.l., una cabeza de 3 g.d.l. y una plataforma móvil. Los brazos son ligeros y versátiles y de manera parecida a nuestro proyecto, están contruidos en aluminio. Sin embargo, no tienen una capacidad de carga de trabajo elevada, y debido a su tecnología de motores no presentan alta velocidad en sus movimientos. En conjunto se pueden desarrollar hasta 25 g.d.l. con lo que puede adaptarse a multitud de tareas diferentes.

Está realizado principalmente de aluminio, alcanzando un peso aproximado de 45 Kg. Sus brazos manipuladores pueden manejar cargas de hasta 4 Kg.

2.2.3.2. PROYECTO MANUS

Construido en Holanda en el centro de investigación TNO-TPD, MANUS [31] y [32] se trata de un brazo manipulador (7g.d.l.) montado una silla de ruedas, Figura 2.22. Es un robot de los denominados de tipo asistencial, que confiere al usuario la capacidad de manipular los objetos de su entorno. Es controlado por una palanca de mando (Joystick), manejada por el usuario. Su uso tan específico le confiere unas características muy particulares; por una parte su capacidad de ser compacto ya que el robot es plegable para no dificultar la movilidad del usuario mientras no lo usa, y por otra, su alcance. Su estructura con la base cilíndrica y telescópica le permitirá alcanzar objetos del suelo, además de realizar diferentes tipos de manipulación en su entorno. MANUS es también un producto comercial y entre sus usuarios se ha demostrado ampliamente su utilidad; tanto para operar en un entorno laboral, como doméstico para el cuidado personal.

Su alcance es más limitado que en otros robots, tan solo de 800 mm, su peso se sitúa en torno a 16 Kg y posee una capacidad de carga de 1.5 Kg.



Figura 2.22.- Brazo manipulador MANUS.

2.2.3.3. PROYECTO DRL

El proyecto DRL [33], [34] y [35] es un proyecto que se desarrolla en el instituto aeroespacial alemán, donde se han construido varios modelos de brazos robóticos ligeros, Figura 2.23. Existe una amplia gama de estos manipuladores que constituyen diferentes generaciones; aunque todas comparten ciertas características comunes: bajo peso total, altas velocidades angulares de sus articulaciones, alta capacidad de carga, bajo consumo eléctrico, flexibilidad y manipulabilidad.



Figura 2.23.- Manipuladores DLR (Light Weight Robot) I, II y III.

Las últimas generaciones de brazos son muy semejantes al brazo humano, tienen 7 g.d.l., poseen una alta capacidad de control del movimiento de sus articulaciones y tienen una longitud total en torno a 1 metro. Su peso es de 18 kg (realizados de fibra de carbono y aluminio) y su capacidad de carga máxima es de hasta 7 kg.

2.2.3.4. PROYECTO LIAS

El robot Leuven Sistema Autónomo Inteligente (**Leuven Intelligent Autonomous System - LIAS**) [36], ha sido diseñado en la Universidad Católica de Lovaina. Sus principales componentes constructivos son una base móvil Robosoft Robuter y un brazo manipulador CRS-A465, Figura 2.24. La estrategia de control del movimiento de este manipulador móvil está basada en los métodos de resolución de la redundancia cinemática que serán descritos posteriormente.

2.2.3.5. PROYECTO AMADEUS

La firma austriaca Profactor ha construido el manipulador móvil AMADEUS [37], (Brazo Móvil Autónomo para Servicios Diestros y Universales) (*Autonomous Mobile Arm for Dexterous and Universal Services*). La plataforma móvil del robot AMADEUS es la base NOMAD XR4000, y su elemento manipulador es el brazo MITSUBISHI PA10, del que hay que resaltar que posee un controlador abierto, Figura 2.25. El desarrollo del robot está circunscrito al proyecto de investigación propio FARAC (*Fuzzy Algorithms for Robot Actuator Coordination*).

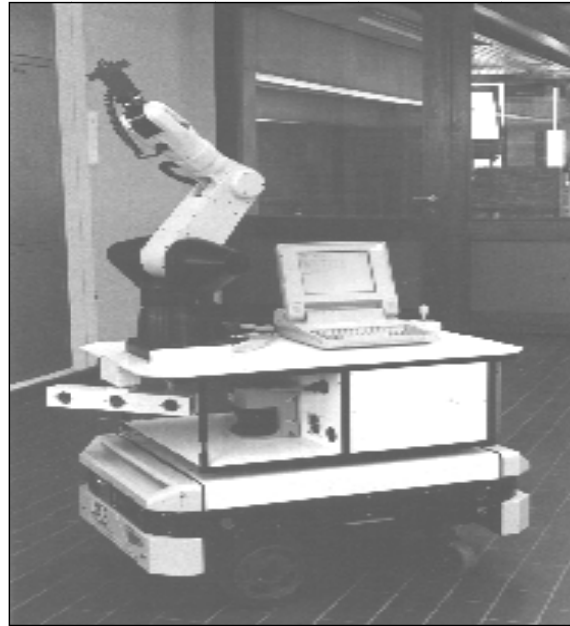


Figura 2.24.- El manipulador móvil LIAS, se utiliza el brazo CRS-A465.

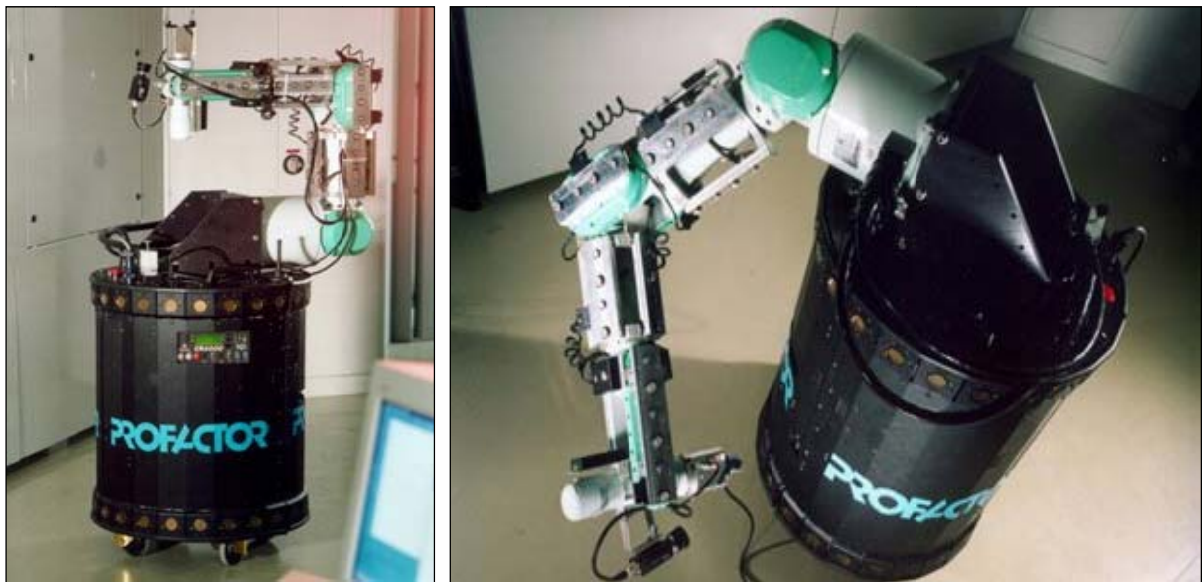


Figura 2.25.- El manipulador móvil AMADEUS, se utiliza el brazo MITSUBISHI PA10.

2.2.3.6. PROYECTO ARNOLD

Uno de los primeros pasos hacia la **humanización** de los manipuladores móviles tuvo lugar en el Instituto Alemán de Neuro-informática de la *Rhur-Universität Bochum* con el robot ARNOLD [38], Figura 2.26. Desde 1995, primero en el proyecto NEUROS (*Neural Robot Skills*) y a partir de 1999 en el proyecto MORPHA, el objetivo es la construcción de un sistema asistente antropomórfico inteligente capaz de funcionar en entornos de trabajo con operarios humanos. El robot ARNOLD tiene un solo brazo antropomórfico en posición lateral, además de una cabeza *pan-tilt* con visión estéreo, todo ello transportado por una base móvil no holónoma.

La plataforma móvil está diseñada para dotar al robot de una capacidad de navegación básica; que le permita moverse y manejar objetos en entornos humanos, y de un brazo

manipulador MORSE de 7 g.d.l.; cuya principal característica es su flexibilidad a la hora de configurar el brazo para diferentes tareas.

Su capacidad de carga máxima está limitada a 1.5 Kg, y el brazo manipulador le permite alcanzar objetos situados a un metro de distancia como máximo.



Figura 2.26.- El manipulador móvil ARNOLD, con rasgos antropomórficos.

2.2.3.7. PROYECTO HERMES

El robot Hermes es un manipulador móvil con rasgos humanoides, desarrollado en la Universidad Bundeswehr de Munich [39] y [40]. Aunque mantiene el sistema de locomoción de base móvil con ruedas, el robot Hermes dispone de dos brazos antropomórficos de siete grados de libertad, capacidad de flexión en el torso y una cabeza *pan-tilt* con visión estéreo, Figura 2.27.

2.2.3.8. PROYECTO SAIKA

Se trata de un robot humanoide desarrollado por la Universidad de Tokio [41] Destaca por su forma antropomórfica, Figura 2.28, su bajo peso, su modularidad y sobre todo su capacidad para desempeñar tareas por su “cuenta”.

Sus brazos manipuladores presentan la particularidad de poder cambiar el módulo del antebrazo según las tareas que se pretendan realizar. De este modo, los grados de libertad del brazo van a ser muy variables en función del antebrazo implantado.

Se trata de un robot a una escala menor al resto de los expuestos; su peso es de 4 kg, la capacidad de carga máxima es de 1 kg, y su alcance no supera 580 mm.

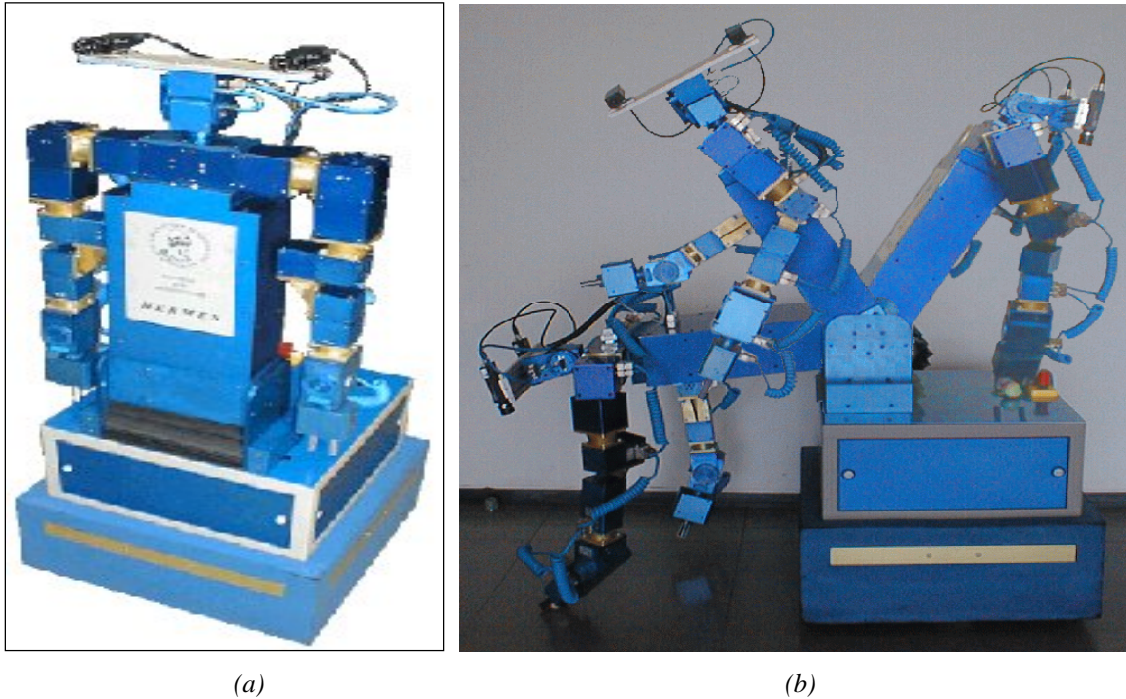


Figura 2.27.- El manipulador móvil HERMES, a) Estructura general, b) El robot realiza la tarea de recoger una pieza.

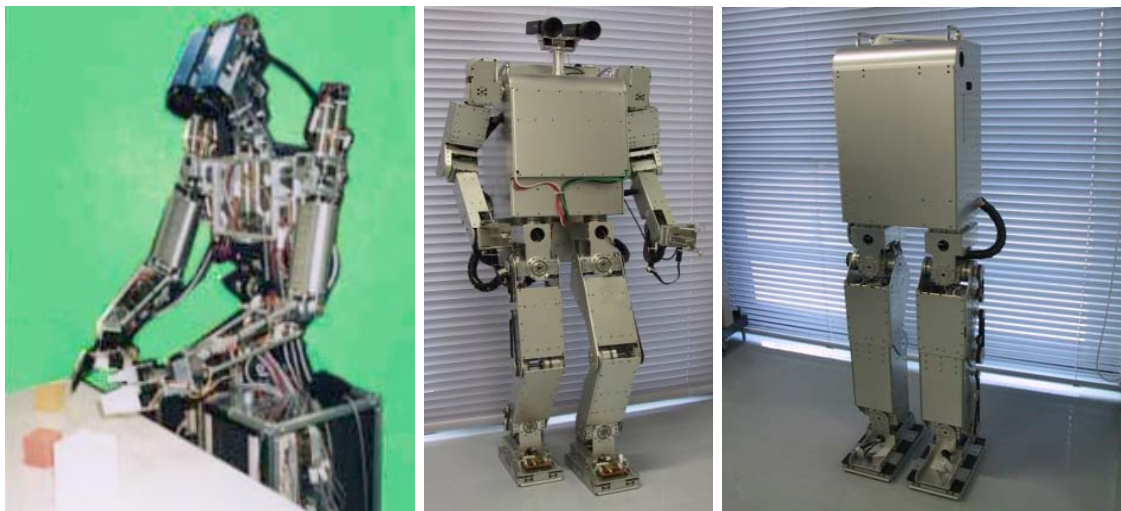


Figura 2.28.- Humanoid Robot SAIKA 2, 3, 4.

2.2.3.9. PROYECTO WENDY

WENDY (Waseda Engineering Designeds Ymbiont) [42] y [43] es un robot antropomórfico creado en Japón a finales de los años 90, Figura 2.29. Se trata de un robot de servicios destinado a realizar multitud de tareas humanas, por ello su característica fundamental es su alta flexibilidad para adaptarse a todo tipo de tareas. Para dotar al prototipo de esta cualidad posee en total hasta 52 g.d.l. entre plataforma móvil, brazos, cabeza y manos.

Centrándonos en los brazos manipuladores, éstos se caracterizan por su reducido tamaño; lo que conlleva un bajo alcance. El peso de cada uno de los manipuladores es de 25 kg y aportan 7 g.d.l. cada uno. El material del que están fabricados es duraluminio; principal causante de su elevada relación peso-tamaño.

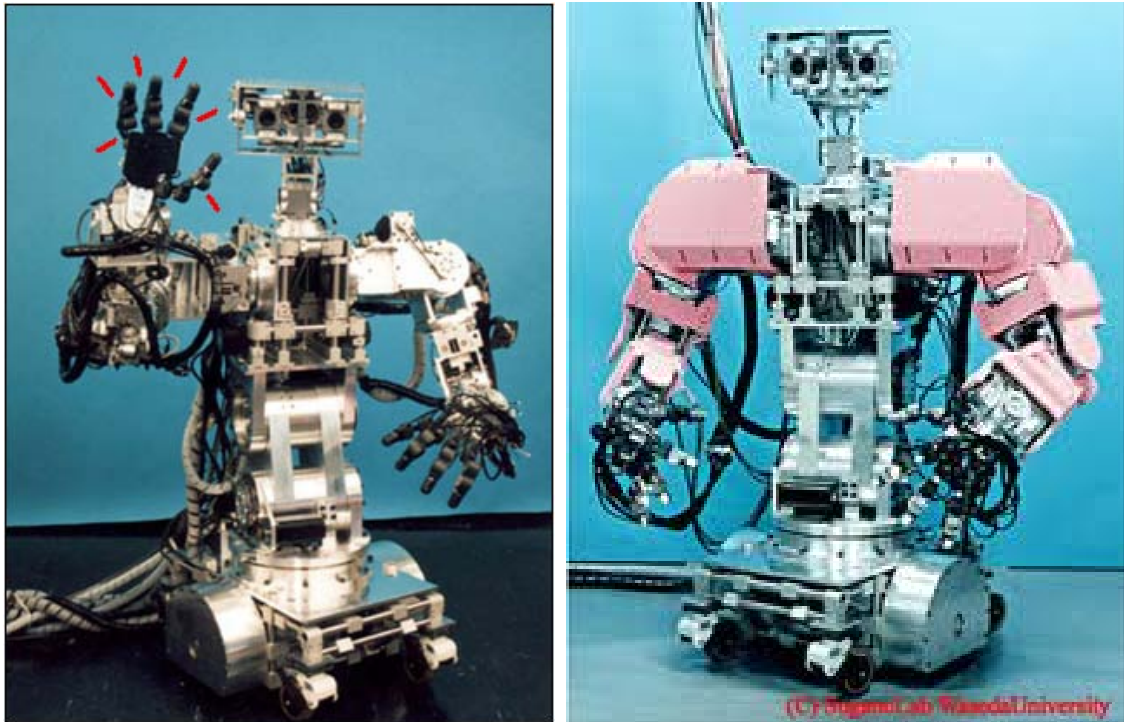


Figura 2.29.- Robot Wendy.

2.3. Robots de servicio: consideraciones sobre la interacción robot-humano

El diseño de los robots asistentes, como el que se presenta en esta tesis, conlleva múltiples consideraciones acerca de la interacción robot-humano. Entre ellas cabe destacar las referidas a la **seguridad física** y la **robustez operacional**.

Ambos requisitos se integran en un concepto más general, que en inglés se denomina **dependability** [44], cuya importancia es creciente como se puso de manifiesto en el 1º y 2º IARP/IEEE-RAS Joint Workshop on Technical Challenge for Dependable Robots in Human Environments, Toulouse, France, October 7-8 2002 [45], donde diversos grupos de investigación: LAAS-CNRS (Francia) [46], IPA (Alemania), INRIA (Francia), AIST-MITI (Japón), KAIST (Corea), la Universidad de Stanford (USA), entre otros, han puesto de manifiesto su creciente interés en esta línea de investigación.

En lo que se refiere a la **seguridad física**, para los humanos que cohabitan en el mismo entorno con ellos, los robots de servicio presentan unas necesidades específicas diferentes de las exigidas por los robots de aplicación en la industria. Las más importantes se deben a que al ser una robótica orientada a personas, va a interactuar y cohabitar con seres humanos y en el mismo entorno que éstos, lo que en ocasiones incluye contacto o cuando menos una gran proximidad. Esto obliga a que se deban considerar como requisitos de diseño del sistema los de seguridad física para los humanos que están próximos al robot, además de otros requisitos más tradicionales (espacio alcanzable, fuerza máxima, par máximo, repetitibilidad, precisión, velocidad, etc). En el caso de los manipuladores móviles que operan en entornos humanos, la necesidad de seguridad, para ser alcanzada, requiere de la utilización de todos los aspectos de diseño del manipulador: mecánicos, eléctricos, sensoriales y de arquitectura de control.

Desde un punto de vista de peligrosidad, el mayor peligro para una persona de uno de estos robots de servicio es el peligro potencial por riesgo de impacto del brazo manipulador contra la persona, y especialmente en la cabeza. La disminución de la peligrosidad del manipulador puede enfocarse desde tres puntos de vista: pasivo, activo y estructural o de diseño:

1. Pasivo: Mediante la adición de un recubrimiento flexible que amortigüe los impactos, se pueden reducir estos en un orden de magnitud o más. Sin embargo, para reducir los impactos hasta un nivel de seguridad aceptable, la cantidad de material flexible a añadir puede ser sustancial. Khatib ha estimado que para un robot PUMA 560 [47] y [48], y considerando una velocidad de impacto de 1m/s, para reducir el índice de daño a un valor aceptable se necesitaría una cubierta flexible de caucho de unos 12 cm de espesor. Este enfoque no presenta por lo tanto una solución viable al problema, salvo como un factor de mejora de lo ya existente. El problema básico es el alto valor de la inercia efectiva del manipulador en el momento del impacto.

2. Activo: Una segunda posibilidad, basada en el uso de una arquitectura de control y sensorial avanzada, consiste en que el sistema de control monitorice los valores de los pares de referencia y reales a lo largo del movimiento del manipulador. De forma que, cuando se detecten anomalías o desviaciones, el sistema de control tratará de reducir la velocidad de impacto, con lo que los propios motores actuarán como amortiguadores activos. Este enfoque ha sido utilizado por Kosuge y Morinaga [49]. Aunque estas técnicas pueden reducir las posibilidades de un impacto no controlado, sin embargo existe un riesgo potencial debido a fallos en los sensores, eléctricos o de software que no es eliminable completamente.

3. Estructural: Una tercera posibilidad consiste en diseñar y construir manipuladores ligeros de baja inercia. Esta solución pasa por el diseño de robots manipuladores diseñados en base a motores y reductores de altas prestaciones y estructuras mecánicas de soporte basadas en materiales compuestos. Esta solución ha sido utilizada en los robots ligeros desarrollados por Hirzinger [34], así como en el robot ligero UC3M-LWR-1 desarrollado por la Universidad Carlos III y está siendo desarrollada por Khatib en los manipuladores que están diseñando para el robot “Human Friendly Robot” de la Universidad de Stanford, Figura 2.30.

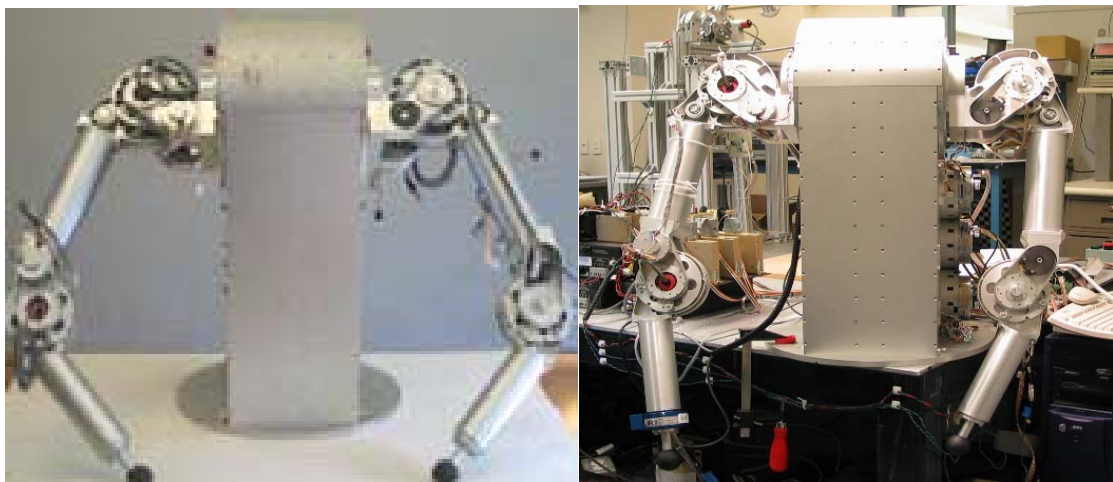


Figura 2.30.- El Robot Human Friendly

El segundo de los aspectos críticos considerados dentro del concepto genérico de “dependability”, es la **robustez operacional**. Este segundo aspecto es posiblemente un objetivo más difícil de alcanzar, y desde luego clave para el desarrollo de robots de servicio “autónomos”. Bajo el nombre genérico de robustez operacional se consideran aspectos tales como:

- Fiabilidad en la percepción.
- Fiabilidad en el control.
- Comportamiento tolerante a fallos.
- Localización de fallos y aislamiento de los mismos.
- Autonomía de decisión y manejo de situaciones excepcionales.

2.4. Experiencia acumulada en el desarrollo del manipulador móvil OTILIO

El grupo de investigación del Laboratorio de Robótica de la Universidad Carlos III de Madrid [50] ha desarrollado un amplio trabajo en el campo de la robótica móvil y, más recientemente, en la línea de los manipuladores móviles. Es fundamentalmente en éste área dónde la experiencia acumulada en proyectos previos, ha permitido extraer conclusiones que se han aplicado en el desarrollo del manipulador móvil MANFRED y que a continuación presentamos.

Entre estos proyectos cabe destacar el desarrollo del manipulador móvil OTILIO [51], Figura 2.31, cuya plataforma experimental estaba formada por una base móvil RWI-B21 y un brazo manipulador CRS-A465 con seis grados de libertad. Los subsistemas básicos del manipulador móvil son la base móvil, el manipulador, el sistema de control y supervisión soportado por el computador de a bordo, el subsistema sensorial y el subsistema de comunicación remota.

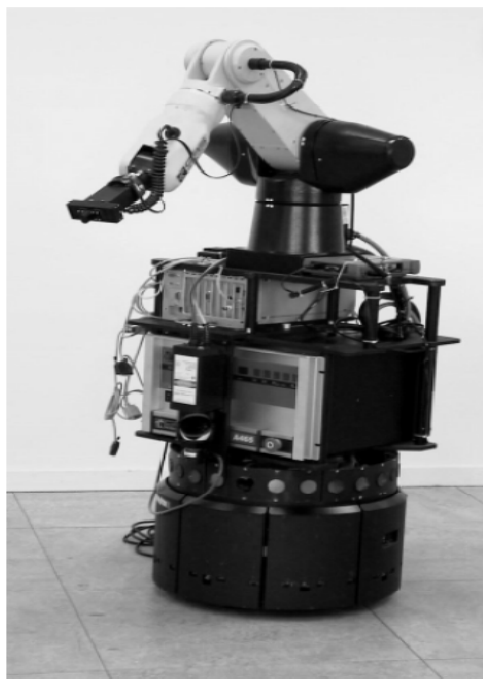


Figura 2.31.- Manipulador móvil OTILIO con base móvil RWI-B21 y un manipulador CRS-A465.

La movilidad de Otilio reside en la base móvil RWI-B21. Sobre la base va montada una estructura que aloja un controlador C500 del manipulador CRS-A465 y un computador Pentium conectado a una red Ethernet. El computador de abordaje va enlazado a una estación remota a través de un bridge sin hilos Aironet ARLAN 640-2400. Sobre esta estructura va situado el manipulador CRS-A465 de seis grados de libertad. La base aporta el sistema básico de percepción que consta de un anillo de sensores de infrarrojos y otro de sensores de ultrasonido, además lleva instalado un telémetro láser AccuRange Line Scanner. Para realizar las tareas complejas de manipulación, habitualmente en modo semi-autónomo, el brazo de Otilio porta en su extremo un sensor fuerza-par JR3 y una garra servocontrolada. La autonomía, desde un punto de vista energético, depende de las baterías de a bordo que aseguran un tiempo de operación sin hilos de 1 hora aproximadamente.

Las características técnicas de sus subsistemas son:

- **Base móvil RWI-B21:** La base móvil dota de movilidad al sistema. El modelo utilizado es B21 de **RWI (Real World Interface)** diseñada para entornos interiores, Figura 2.32. Esta base tiene un sistema motriz de tipo *synchro-drive*, esto es, las cuatro ruedas motrices se encuentran mecánicamente acopladas de forma que todas giran en la misma dirección y a la misma velocidad. Sus dos grados de libertad corresponden a las velocidades lineal y angular, Tabla 2.1. La interfaz de comunicación entre la base y el computador de a bordo es un puerto serie RS-232.



Figura 2.32.- Base móvil RWI-B21.

Base móvil RWI-B21	
Capacidad de Carga	91 Kg
Velocidad lineal máxima	0.9 m/seg.
Velocidad angular máxima	2.9 rad/seg.
Diámetro	52 cm

Tabla 2.1.- Características técnicas de la base móvil RWI-B21.

- **Brazo manipulador CRS-A465:** Es un robot industrial modelo A465 de CRS Robotics Corporation, constituido por un brazo articulado con 6 g.d.l. de tipo angular equipado con una garra eléctrica servocontrolada, y el controlador multitarea C500, Figura 2.33. Sus características principales son (ver Tabla 3.5):

1. **Configuración del brazo:**

- a) Brazo articulado con 6 g.d.l.
- b) Servo motores DC con encoders ópticos.
- c) Reductores armónicos.

2. **Controlador C500:**

- a) Microprocesador 80286/80287.
- b) Red configurable de transputers.
- c) Lenguaje de programación RAPL-II.

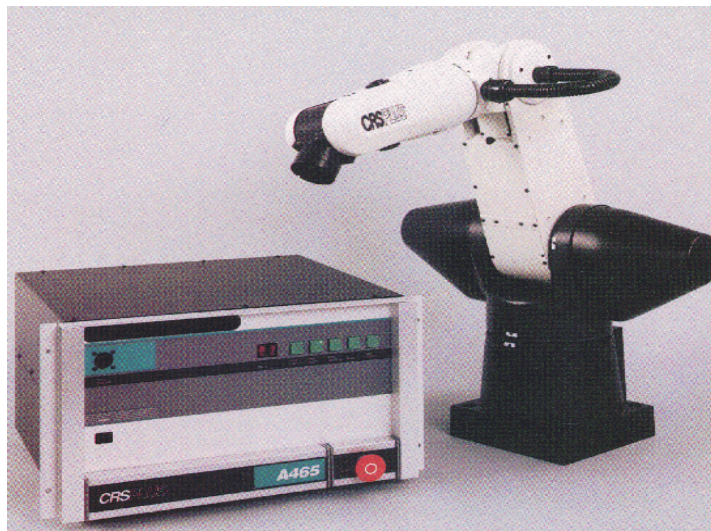


Figura 2.33.- Manipulador CRS-A465 con controlador C500.

El manipulador está equipado con una garra servocontrolada de dos dedos con movimiento paralelo. Puede ser operada mediante comando tanto en distancia de apertura como en fuerza de agarre. La apertura entre los dedos puede ir de 0 a 50.8 mm.

- **Sistema sensorial**

1. **Sensores de la base B21:** El sistema sensorial aportado por la base móvil B21 está compuesto por:

- a) Anillo de 24 sensores de alcance por ultrasonidos (alcance 9 metros).
- b) Anillo de 32 sensores de alcance por infrarrojos.
- c) Sensores táctiles alojados en los paneles exteriores.

2. **Telómetro láser:** Es el elemento principal del subsistema sensorial de la plataforma. El sensor usado es el AccuRange Line Scanner de Acuity Research Inc., Figura 2.34. El telómetro va instalado en la parte frontal del manipulador móvil, a unos 50 cm del suelo. De esta forma el laser barre

360° en un plano paralelo al suelo proporcionando medidas de distancia a los objetos del entorno.



Figura 2.34.- AccuRange Line Scanner.

3. **Sensor de fuerza par JR3 67M25A-U560:** Acoplado a la garra servocontrolada, es necesario para el control de fuerza.

En el desarrollo de este proyecto se pusieron de manifiesto varias dificultades que limitaron de forma significativa las capacidades del mismo:

1. Peso excesivo del brazo manipulador y de su armario de control. Esto limita la autonomía del sistema, dado el fuerte consumo energético necesario.
2. Dificultad para la coordinación entre base móvil y brazo, debido a la existencia de sistemas de control independientes para ambos subsistemas.
3. El peso del brazo manipulador más el armario de control, limita también el número de sensores y el sistema de procesamiento sensorial que puede instalarse a bordo del robot.
4. El peso del brazo manipulador dificulta que el brazo se pueda disponer lateralmente, como sería deseable desde el punto de vista de la coordinación sensorial-motora.

Partiendo de las limitaciones que se observaron en el desarrollo de OTILIO, la fase de diseño del manipulador móvil MANFRED y su brazo UC3M-LWR-1, Figura 2.35, se inició con la definición de las características esenciales que se requerían para crear un diseño capaz de desempeñar las funciones eficazmente y a su vez salvar dichas limitaciones:

1. En cuanto a la arquitectura hardware es imprescindible dotar al nuevo manipulador móvil de la mayor **estabilidad** posible. En el robot OTILIO se apreciaba cierta inestabilidad en el sistema, especialmente importante al someterse a aceleraciones, que en ocasiones podría dar lugar a la pérdida de equilibrio. Dicha inestabilidad estaba causada por el peso excesivo del brazo y la inadecuada distribución general de pesos en el sistema que situaban el centro de gravedad excesivamente alto.
2. Las restricciones derivadas de los controladores cerrados de base y manipulador limitan las prestaciones del sistema. El acoplamiento de dos sistemas industriales

con sus respectivos controladores, cada uno de los cuales presenta características completamente distintas, no permite acceder a un control directo a bajo nivel y presenta problemas en cuanto a los retrasos y tiempos de ciclo de cada subsistema. De ahí la necesidad de un diseño completamente abierto del manipulador móvil con la integración en un **sistema de control único para todos los grados de libertad**.

3. Las necesarias conversiones entre los diferentes modelos del entorno utilizados en los diversos módulos funcionales resta **robustez** al sistema, aumentando la incertidumbre y el error acumulado en las transformaciones. De ahí la decisión de utilizar un único modelo del entorno para las diferentes tareas sin necesidad de conversiones.
4. La arquitectura funcional planteada adolece, en el actual punto de desarrollo, de la necesaria robustez para el funcionamiento seguro y continuo del sistema. Se plantea por tanto, diseñar cada módulo funcional (percepción, modelado del entorno, localización, navegación y planificación) con capacidad para manejar la incertidumbre de forma uniforme y con **posibilidad de recuperarse de fallos** de funcionamiento.



Figura 2.35.- Izq. Manipulador móvil MANFRED y Dcha. su brazo UC3M-LWR-1.

Por tanto, se asume desde el inicio del diseño mecánico el objetivo de aumentar la estabilidad del sistema y disminuir los riesgos derivados de una posible colisión con personas. Varios grupos están investigando en el desarrollo de brazos manipuladores de baja inercia, con peso reducido, que limiten el posible daño a las personas en un choque accidental con el robot y que permitan un control más eficaz del movimiento de los brazos. Una de las tareas principales que se han afrontado en la parte mecánica del manipulador móvil MANFRED, es el diseño de un brazo manipulador ligero de forma que al disminuir la inercia consigamos un aumento considerable de la seguridad. Por otro lado, se busca una distribución adecuada del peso de los diferentes componentes del manipulador móvil para mejorar su estabilidad, funcionalidad y estética.



La utilización de brazos manipuladores industriales para la construcción de manipuladores móviles, como se ha hecho en muchos casos, ha demostrado presentar varias desventajas. Por un lado, la dificultad para situar el brazo lateralmente con disposición antropomórfica. Además, el controlador que acompaña al brazo industrial restringe la capacidad de control, aumentando el peso total del sistema y, por tanto, el consumo de potencia lo que reduce su autonomía.

Para solventar estos problemas se ha optado por el diseño de un brazo ligero que incorpore en su estructura la electrónica de control. Uno de los objetivos buscados con la disminución de peso en el brazo, es hacer posible su disposición lateral, manteniendo la estabilidad del sistema. Por otro lado, se elimina el armario de control de los manipuladores industriales típicos, permitiendo el control de todas las articulaciones a través de una controladora de ejes y del computador de a bordo.

Como consecuencia de estos análisis, desde el punto de vista de la arquitectura física del sistema, se han planteado como objetivos básicos de diseño:

- Diseño antropomórfico.
- Aumento de la estabilidad.
- Aumento de la autonomía.
- Control a bajo nivel, controladores abiertos.
- Desarrollo de brazos ligeros.

CAPÍTULO III

ARQUITECTURA Y CARACTERÍSTICAS DEL MANIPULADOR MÓVIL PROPUESTO

3.1. Introducción

El primer paso en el desarrollo de este complejo proyecto es el diseño mecánico y físico del manipulador móvil. Desde la etapa inicial de diseño han de tenerse presentes los requerimientos de **robustez, fiabilidad y seguridad** del sistema, buscando mejoras en el diseño mecánico. Éste ha de estar orientado a conseguir aumentar la seguridad física del manipulador móvil (poco peso, forma de diseño antropomórfica y velocidades articulares moderadas) y la robustez de funcionamiento, a la vez que se diseña un sistema capaz de moverse y desarrollar tareas complejas en un entorno típicamente humano. Esto requiere una combinación de capacidades de coordinación del desplazamiento, manipulación y sensoriales conjuntamente.

El resultado de imponer estos requerimientos de diseño ha dado lugar al proyecto de manipulador móvil MANFRED que se presenta en la Figura 3.1. Se trata de un manipulador móvil con 8 grados de libertad que consta de una base móvil de tipo diferencial y 2 grados de libertad junto con un brazo ligero de 6 grados de libertad y diseño antropomórfico.

El diseño actual del robot MANFRED permitirá la incorporación de un segundo brazo en etapas posteriores de desarrollo para completar el diseño antropomórfico deseado.

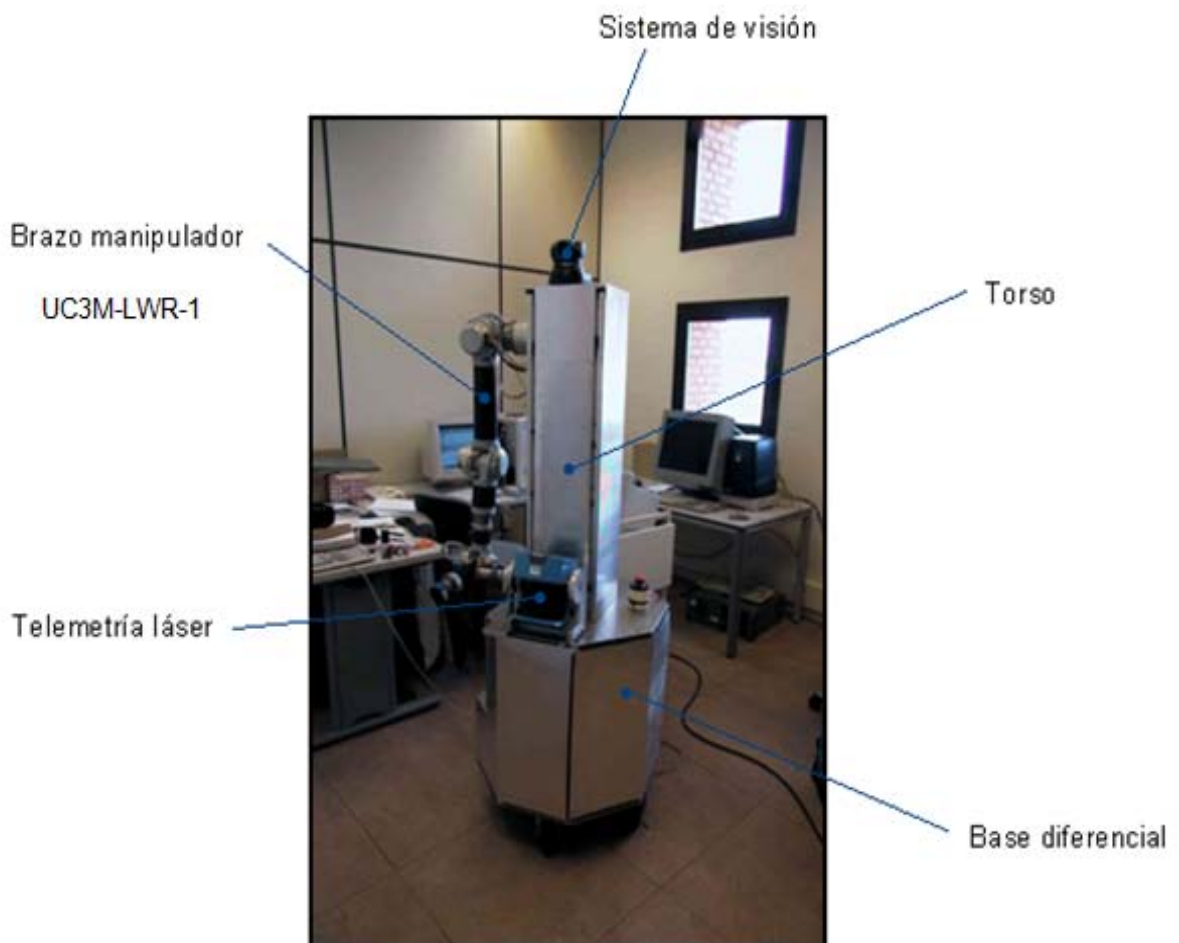


Figura 3.1.- Estructura y disposición de los elementos integrantes del manipulador móvil MANFRED.

3.2. Estructura General del manipulador móvil propuesto

Teniendo en cuenta los requisitos antes mencionados (bajo peso y control coordinado para todos los grados de libertad), el manipulador móvil avanzado que se propone Figura 3.1, se estructura en los siguientes elementos:

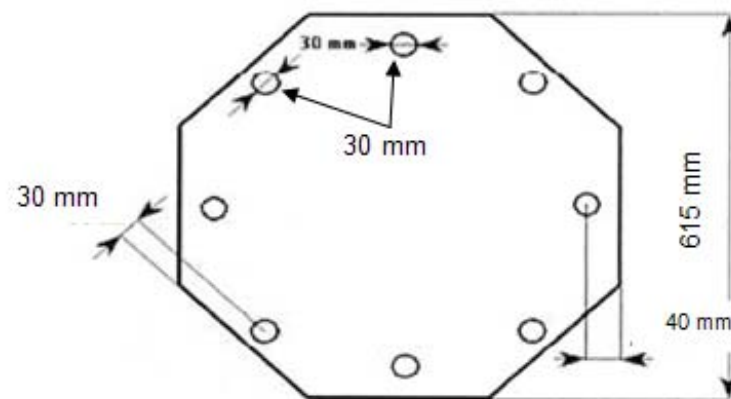
1. Una base móvil

Esta base está constituida por dos plataformas de acero de base octogonal con 2 g.d.l y una estructura de movimiento de tipo diferencial. Tiene un diámetro de unos 61 cm y una altura en torno a 65 cm, Figura 3.2 (a). Lleva integrada una tarjeta controladora de 8 ejes PMAC-2 insertada en el PC de a bordo, que permite controlar conjuntamente los grados de libertad correspondientes a la base y al brazo manipulador. Además, está equipada con 4 ruedas dispuestas en rombo. Dos son ruedas de apoyo y las otras dos son ruedas motrices asociadas a dos motores tipo Brushless de la casa Bayside, con referencia DXA44KP0, y sus correspondientes servoamplificadores. Las dos ruedas motrices dan lugar al movimiento tipo diferencial, que permite al robot girar sobre sí mismo. La cinemática de la base móvil responde a la siguiente expresión [3.1]:

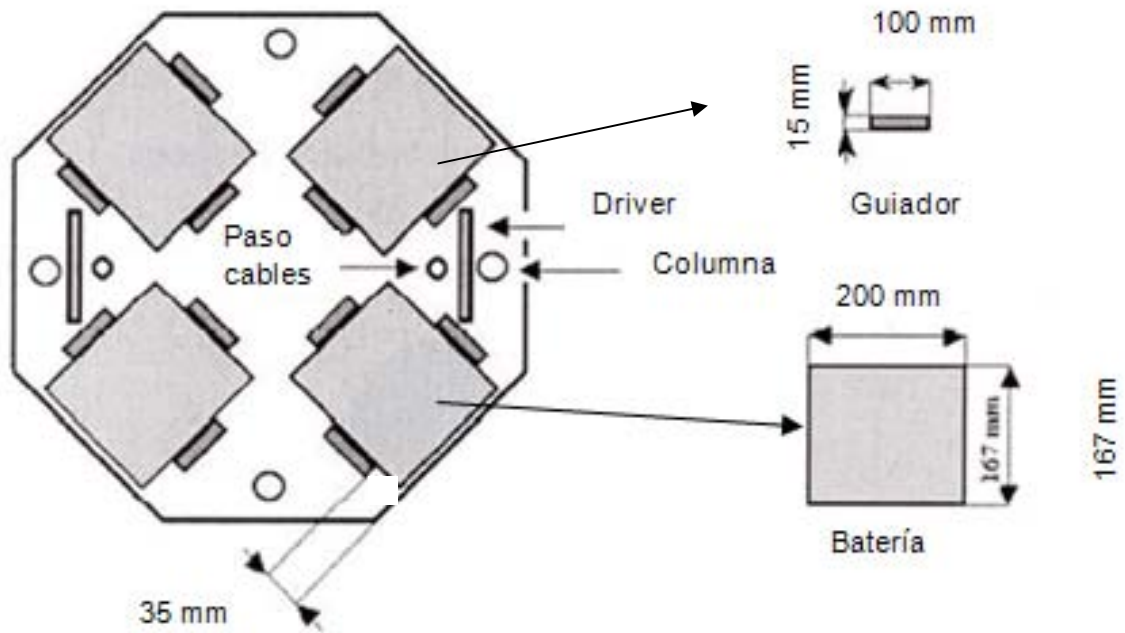
$$\begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{d} & -\frac{1}{d} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_r \\ v_l \end{bmatrix} \quad [3.1]$$

Donde v y ω son las velocidades lineal y angular de la base, respectivamente, v_r y v_l las velocidades de las ruedas derecha e izquierda (r : right & l : left), y d la distancia entre los ejes de ambas ruedas ($d = 54$ cm).

Sobre la base móvil, Figura 3.2 (b), se ha montado una estructura (bastidor) que aloja todo el cableado para la conexión del brazo manipulador con los computadores situados en la base, Figura 3.3, el cableado para la transmisión de potencia desde la base a los motores del brazo, los servoamplificadores asociados con los motores del manipulador y todo el cableado correspondiente a los sensores externos, Figura 3.4 (a) (b) (c) (d). Esta estructura sirve también como soporte para el anclaje del brazo, el sensor láser y de las cámaras para el sistema de visión.



(a)



(b)

Figura 3.2.- Esquema de planta de la Base Móvil de MANFRED.

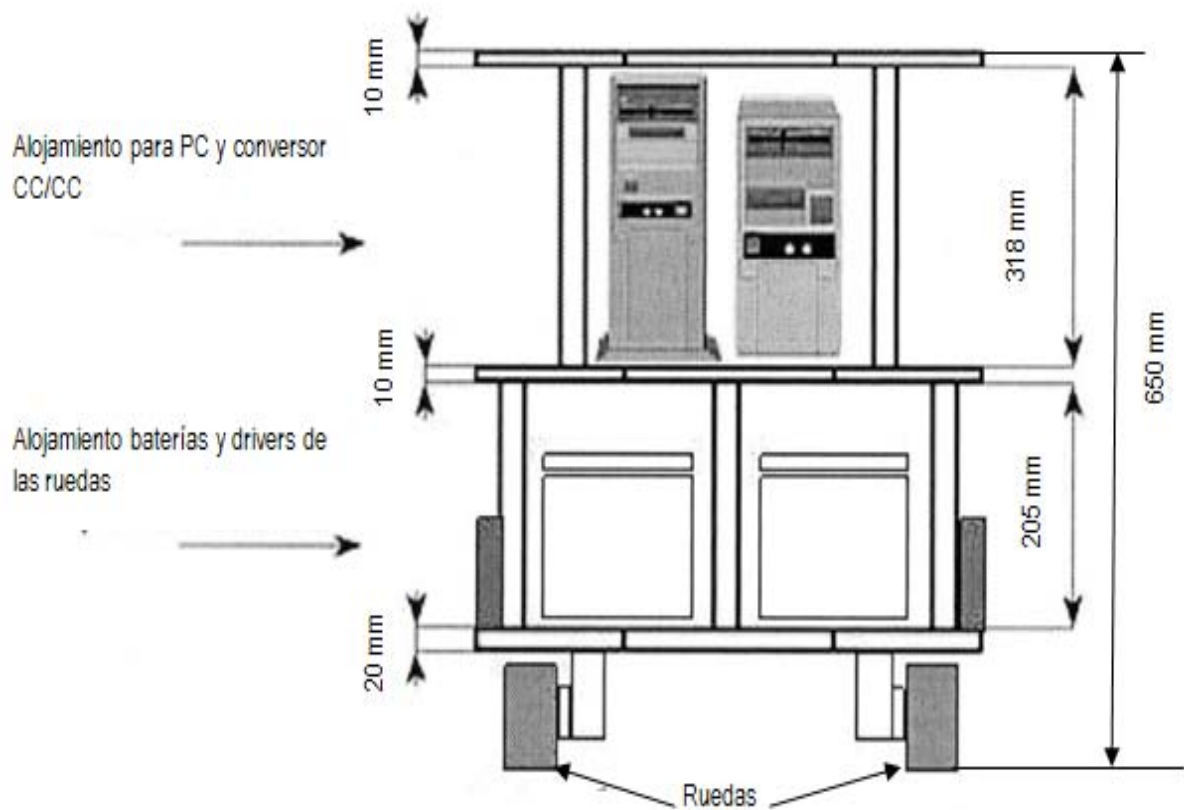
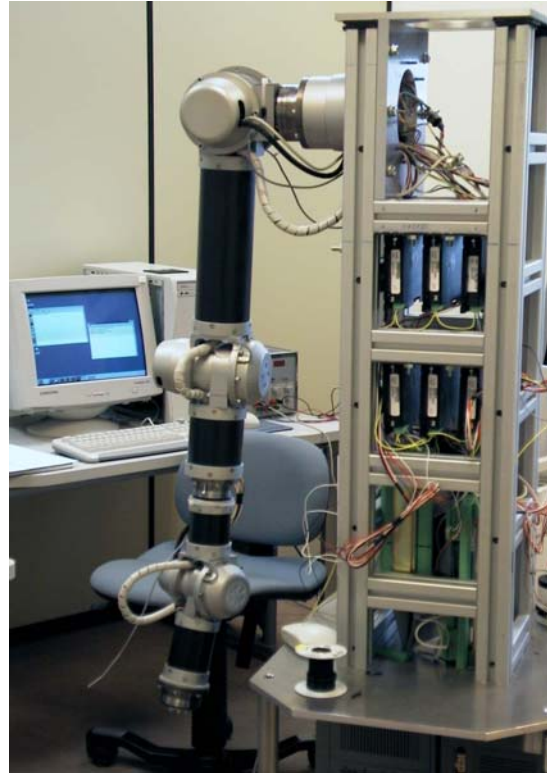


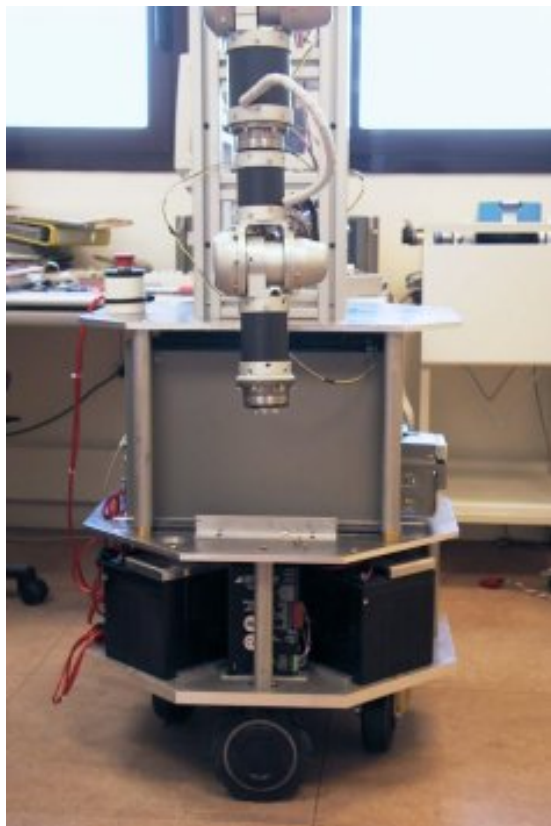
Figura 3.3.- Esquema de disposición de equipos en la Base Móvil.



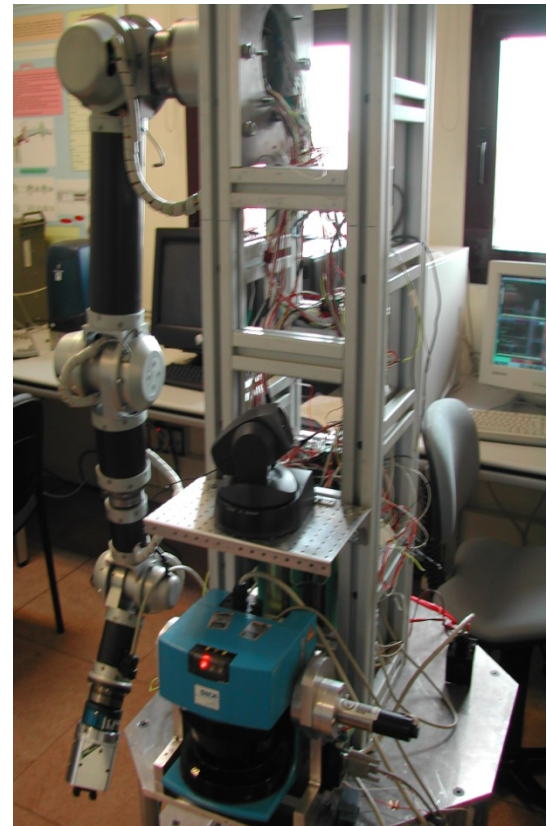
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3.4.- Diferentes vistas del bastidor del Robot MANFRED.

En la Figura 3.5, se muestra el diseño final de la base móvil y la disposición de los elementos en la misma.

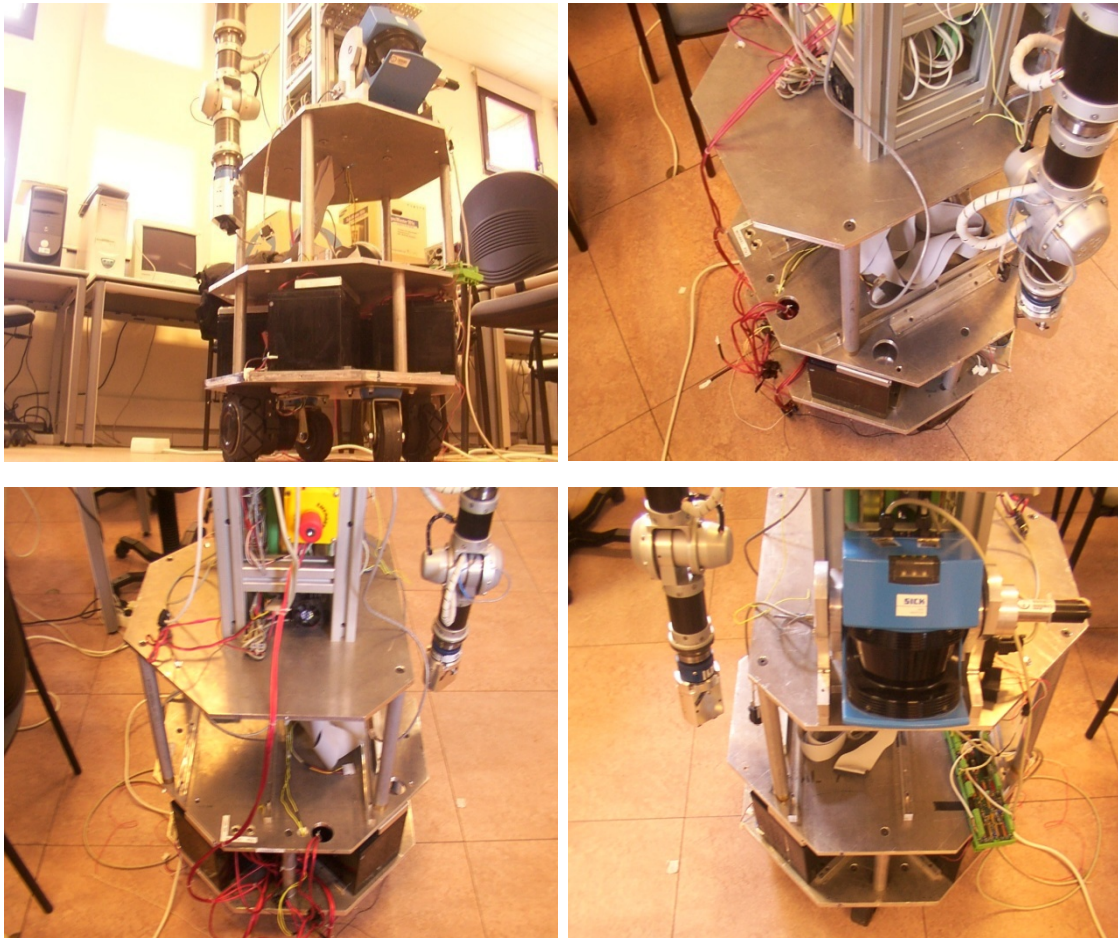


Figura 3.5.- Diferentes vistas de la base móvil del Robot MANFRED.

2. Un brazo manipulador ligero

El brazo manipulador UC3M-LWR-1 constituye el elemento fundamental del robot manipulador MANFRED. Está compuesto por elementos rígidos conectados por medio de articulaciones de revolución, Figura 3.6. Cada articulación conforma un grado de libertad (g.d.l), hasta alcanzar un total de **6 g.d.l**. Está diseñado para dotar a MANFRED de una notable flexibilidad para realizar tareas de agarre y desplazamiento de objetos, combinando los diversos grados de libertad de los que dispone.

3. Un torso, Figura 3.4 [b, d], en el que van situados:

- El brazo manipulador UC3M-LWR-1.
- La plataforma de visión.
- La telemetría láser 3D.

4. Un sistema sensorial.

Permite obtener información del entorno de trabajo que es utilizada para generar los datos que permitan dotar de capacidad de movimiento, tanto al brazo manipulador como a la base móvil.

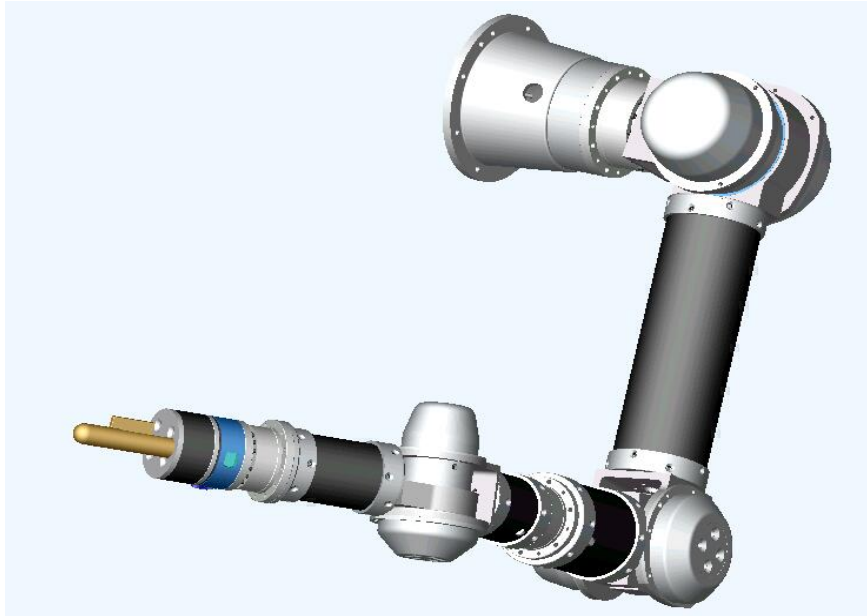


Figura 3.6.- Diseño del brazo manipulador UC3M-LWR-1 con seis grados de libertad (6 GDL).

Otro aspecto a tener en cuenta es que el manipulador móvil MANFRED está capacitado para desenvolverse de forma autónoma por entornos diseñados para personas, es decir entornos como pasillos, salas, despachos y en donde en ocasiones hay puertas que hay que abrir y atravesar, obstáculos que hay que evitar, objetos que hay que recoger y manipular, etc. Todo esto ha requerido que el manipulador móvil integre los siguientes aspectos:

- Todas las capacidades básicas de un robot móvil para desplazarse de forma segura y autónoma por el entorno.
- La coordinación motora entre base y manipulador.
- La coordinación sensorial necesaria para poder manipular objetos.

3.3. Sistemas integrantes

A continuación se describen con más detalle los principales componentes de los sistemas que constituyen el manipulador móvil propuesto, que son:

1. Sistema sensorial.
2. Sistema locomotor.
3. Sistema de alimentación.
4. Sistema manipulador UC3M-LWR-1.
5. Sistema de procesamiento.
6. Sistema de comunicaciones.

3.3.1. Sistema sensorial

Cualquier sistema robótico, está formado por una serie de subsistemas que posibilitan, mediante una interrelación el cumplimiento de los objetivos para los cuales ha sido diseñado el robot. Esta serie de módulos utilizan la información del entorno de trabajo

para generar una serie de datos que son utilizados en su punto final para dotar de capacidad de movimiento, tanto del brazo manipulador como de la base móvil.

Podemos decir que la información suministrada por el sistema sensorial, Figura 3.7, sirve de entrada a distintos módulos, como pueden ser por ejemplo los encargados de la localización, del sistema de seguridad, el piloto, etc.

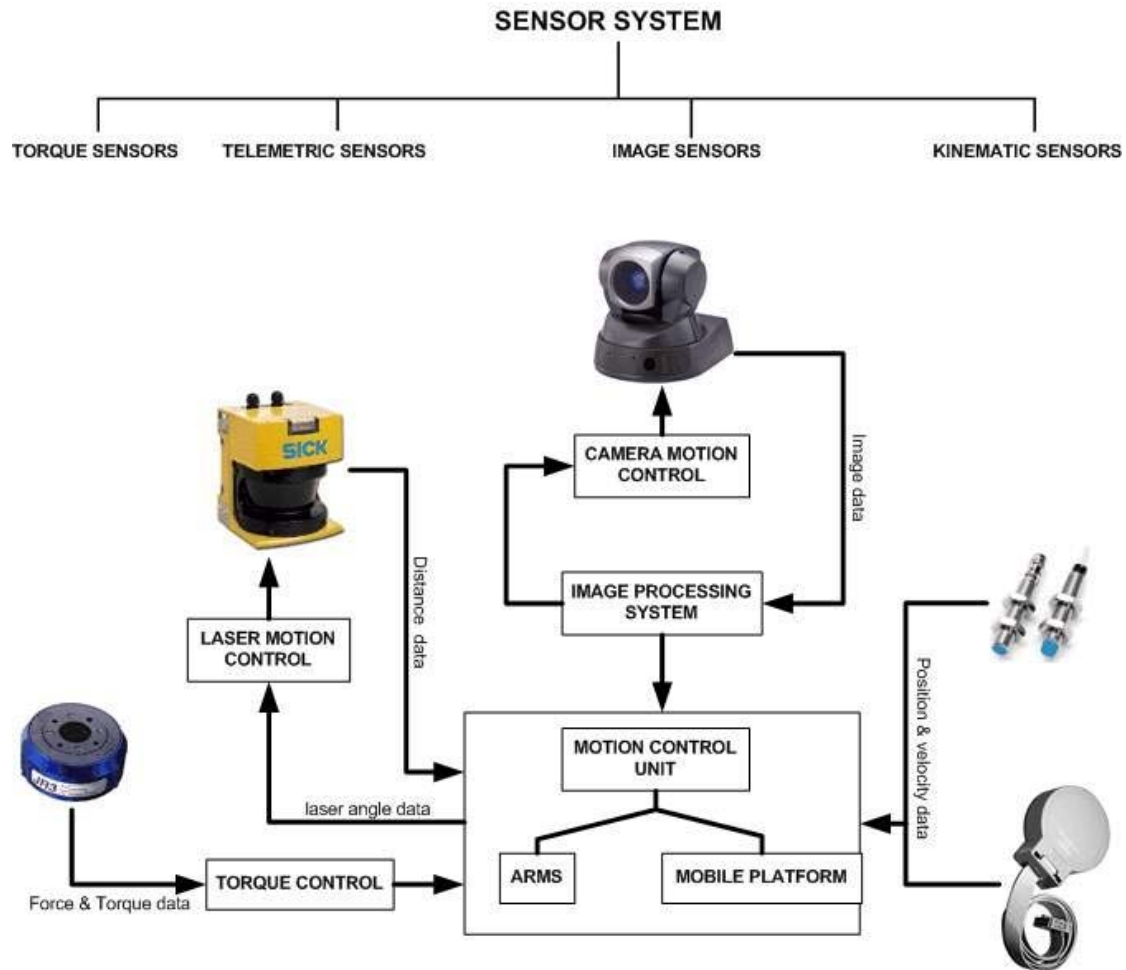


Figura 3.7.- Diagrama del sistema sensorial de MANFRED.

De este hecho, se deduce la importancia de un conjunto de elementos que permitan la transformación de las variables físicas del entorno en su conjunto de datos procesables por los módulos de control pertinentes. Esta información será suministrada por el sistema sensorial del robot, que consta de dos partes principales, que son:

1. Sistema sensorial externo.
2. Sistema sensorial interno.

3.3.1.1. Sistema sensorial externo

El sistema sensorial externo está formado por los siguientes elementos:

3.3.1.1.1. Subsistema de telemetría láser

El objetivo del sistema de telemetría láser es proporcionar al robot la información necesaria sobre la distancia a los objetos del entorno para realizar un *modelado del*

espacio de trabajo que rodea al manipulador móvil. Esta información se utiliza principalmente en las tareas de navegación y localización del robot durante sus desplazamientos en un espacio de trabajo amplio, en estos casos se pueden utilizar datos de telemetría 2D o 3D según la complejidad y el grado de ocupación del espacio de trabajo.

Este subsistema consta a su vez de los siguientes elementos:

- (1) Telémetro láser bidimensional PLS de SICK de 180° grados de apertura [52], y con cabeceo controlado para poder obtener telemetría 3D en la parte frontal del manipulador móvil, Figura 3.8.

La utilización de este láser telemétrico básico posibilita la adquisición de rangos de medida en dos dimensiones.

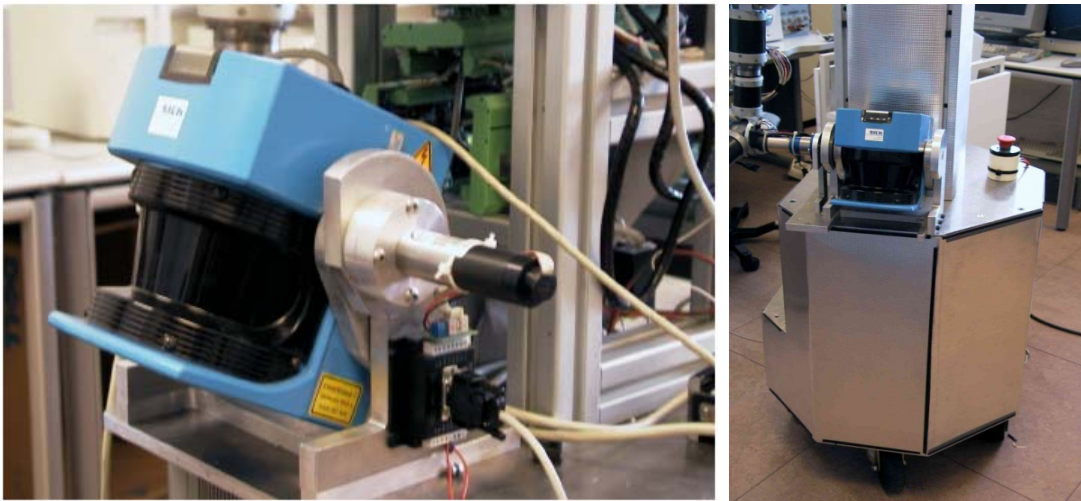


Figura 3.8.- Telemetría láser 3D (PLS de SICK).

- Para lograr la portabilidad a tres dimensiones se implementó un chasis motorizado donde se ancló el armazón externo del láser permitiendo así su movimiento vertical dentro de un rango de 45 grados, Figura 3.9. De esta forma, al estar situado sobre un eje motorizado, puede utilizarse para modelar 3D o para hacer barridos en 2D en función de las necesidades sensoriales del sistema.

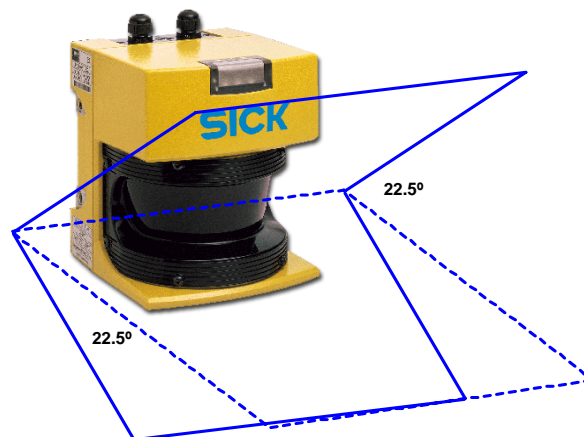


Figura 3.9.- Telemetría láser con cabeceo de 45°.

Durante la fase de navegación en entornos poco ocupados, como pueden ser pasillos, se utiliza telemetría 2D manteniendo parado el motor del sistema láser de forma que el escáner realice un barrido en un plano paralelo al suelo. Las características técnicas de este láser se resumen en la Tabla 3.1:

Telemetría láser 2D (PLS de SICK)	
Maximum range	80 meters
Angular resolution	0.25/0.5/1 (Selectable)
Response time	26 ms
Resolution of measure	10 mm
Transfer ratio	500 k baud
Power supply	24V / 6A

Tabla 3.1.- Características técnicas del laser SICK.

Este sensor frontal está preparado para capturar 361 medidas en un barrido horizontal de 180 grados (se toman medidas cada 0.5°) y un motor de corriente continua más una reductora que se encarga de realizar el barrido vertical.

El PLS garantiza unos errores en la medida de profundidad que no superan los 20 mm. Este error se ve influenciado por dos parámetros, la distancia a medir y el ángulo de disparo del haz láser (de 0° a 180°).

En cuanto al conjunto motor y reductor, se ha elegido un sistema que no supusiera un aumento considerable de peso y que por sus dimensiones quedase integrado en la estructura del robot sin que ninguno de sus elementos sobresalgan del contorno de la base. Basándonos en estas consideraciones de tamaño y peso, se ha seleccionado un micro-motor de Faulhaber 2642-024CR [53], Figura 3.10, con reductor 26/1 (66:1). El conjunto se controla por medio del controlador MCDC2805 también de Faulhaber que se ha situado en uno de los laterales de la propia estructura de montaje del sistema de telemetría láser 3D.



Figura 3.10.- Micro-motor de Faulhaber 2642-024CR.

3.3.1.1.2. Subsistema de visión

Se pretende que el sistema sea capaz de manipular objetos situados en un entorno 3D por lo que es necesario reconocer el objeto a manipular, determinar su posición y

orientación relativa con respecto al manipulador móvil, así como determinar el punto y orientación adecuado para su manipulación. Las **tareas** de manipulación previstas consisten en la **apertura de puertas y paso a través de las mismas, pulsar interruptores o coger objetos** simples de una mesa.

Para llevar a cabo estas tareas el subsistema de visión consta de los siguientes elementos:

- (1) Cámara de color. El sistema incorpora para reconocer los objetos y estimar su posición respecto al robot una cámara SONY EVI-D100 [54], Figura 3.11, cuyas características principales se resumen en la Tabla 3.2. Esta cámara dispone de zoom óptico de 10x. Se sitúa en la parte frontal del cuerpo del manipulador móvil, sobre una plataforma orientable con movimientos pan-tilt, y control de divergencia, con un total de 4 grados de libertad. Además se incorpora un sistema de control coordinado de la plataforma. Por otra parte, se incorporan para esta cámara:
 - (2) Ópticas (f 8-80 mm).
 - (1) Tarjeta de adquisición de imágenes.



Figura 3.11.- Cámara monitorizada SONY EVI-D100.



Figura 3.12.- Cámara monitorizada SONY B/N XC-ES50CE.

- También se incorpora una mini-cámara SONY B/N XC-ES50CE [55], Figura 3.12, situada sobre la muñeca del manipulador. Esta cámara se utiliza en las tareas de manipulación cuando el brazo se encuentra situado delante del objeto a manipular de forma que interfiere en el campo de visión de la cámara SONY EVI-D100.

Cámara SONY EVI-D100	
Camera Specifications	Details
Image sensor	61/4 type Super HAD CCD
Effective pixels	768 (H) x 494 (V)
Lens	10x Optical zoom, X40 with digital Zoom f = 3.1 to 31 F = 1.8 to 2.9
Lens Value	10x
Minimum Object Distance	100 mm (Wide end) 600 mm (Tele end)
Shutter Speed	1/4 to 1/10000 s
Pan Angle/Speed	Pan: ± 100 degrees Max speed: 300 degrees/sec
Tilt Angle/Speed	Tilt: ± 25 degrees Max speed: 125 degrees/sec
Horizontal Viewing Angle	6.6 to 65 degrees
Resolution Value	470 TV Lines
Video Output Specifications	Details
Horizontal Resolution	470 TV lines (Wide end)
Minimum Illumination	3.5 lx (F1.8)
S/N Ratio	More than 50 dB
Signal System	NTSC (PAL available)
General Specifications	Details
Dimensions (W x H x D)	4 1/2 x 4 3/4 x 5 1/4 inches (113 x 120 x 132 mm)
Weight	1 lb 14 oz (860 g)
Power Requirements	DC 10.8 to 13.0 V
Power Consumption	Max. 13.2 W (at 12V DC)
Operating Temperature	0 to 40°C (32 to 40°F)
Storage Temperature	-20 to 60°C (-4 to 140°F)

Tabla 3.2.- Características técnicas de la cámara SONY EVI-D100.

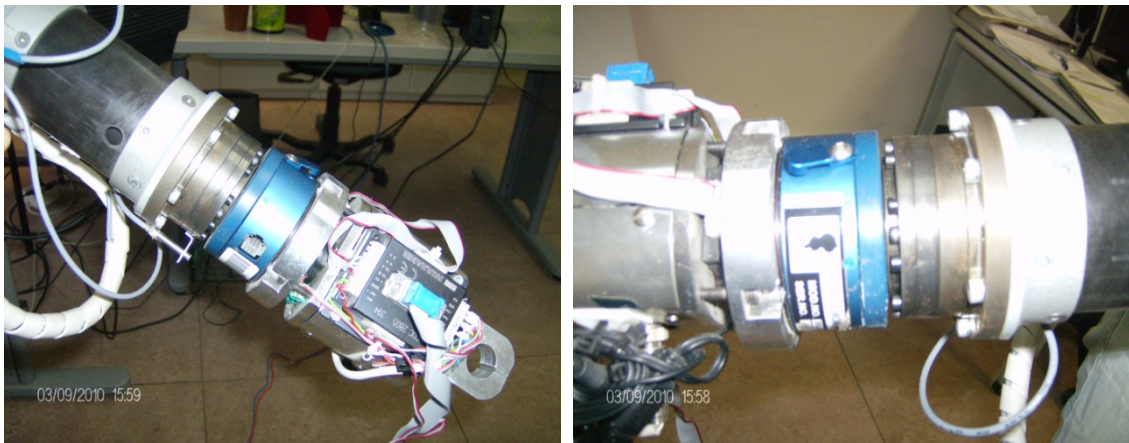
3.3.1.1.3. Sensor fuerza/par

Para la interacción con el entorno en las tareas de manipulación el robot MANFRED porta en el extremo del brazo un sensor fuerza-par JR3 modelo 67M25A-U560 [56], Figura 3.13. El sensor se sitúa entre el extremo del brazo y la pinza o elemento terminal. Este dispositivo tiene como características relevantes una capacidad de carga de hasta 11Kg, un peso de 175gr, una frecuencia de funcionamiento en torno a 8KHz y proporciona medidas de fuerza y par en 6 ejes que se utilizan en el lazo de control de fuerza del manipulador móvil.

El sensor se basa en un sistema de galgas extensiométricas y un sistema de adquisición mediante **DSP (Digital Signal Processor)** que permite obtener medidas de un elevado ancho de banda, con una relación de señal a ruido elevada.



(a)



(b)

Figura 3.13.- Sensor fuerza-par JR3 modelo 67M25A-U560: (a) Vista del dispositivo sensor.

(b) Ubicación en el brazo.

El sistema de adquisición de datos se encuentra distribuido en una tarjeta bus PCI y soportable bajo los sistemas operativos más comunes como pueden ser Linux o Windows.

El objeto principal de la utilización de este sensor, es poder realizar tareas de manipulación basadas en control de fuerza o par, como por ejemplo apertura de puertas, pulsar interruptores, recogida de objetos, etc.

3.3.1.1.4. Sensores cinemáticos

La principal función de los sensores cinemáticos [57] es aportar información sobre la posición, pudiendo obtener en el sistema de control las variables derivadas (velocidad y aceleración). Estos sensores se encuentran principalmente acoplados a los ejes de los motores proporcionando información del giro de éstos en forma de cuentas de encoder. Esta información puede ser interpretada de dos formas, obteniéndose la posición relativa o absoluta del sistema acoplado a dicho motor así como sus variables derivadas. Con el objeto de complementar los sensores cinemáticos se incorporan unos sensores de detección de home que permiten en una rutina de arranque inicial establecer las posiciones absolutas de cada sistema motriz. En este proyecto, los sensores cinemáticos utilizados son encoders ópticos de alta resolución de la casa HP con referencia HEDS 550, Figura 3.14, cuyas características principales se detallan en la Tabla 3.3. En cuanto a los sensores de homing se han utilizado sensores inductivos de 3 milímetros de diámetro y una distancia de detección de 1 milímetro, alojados en cada elemento del sistema motriz. El principio básico de estos sensores inductivos se basa en la detección de materiales ferro-magnéticos mediante la variación de flujo que provoca su presencia cerca del área de detección del sensor.

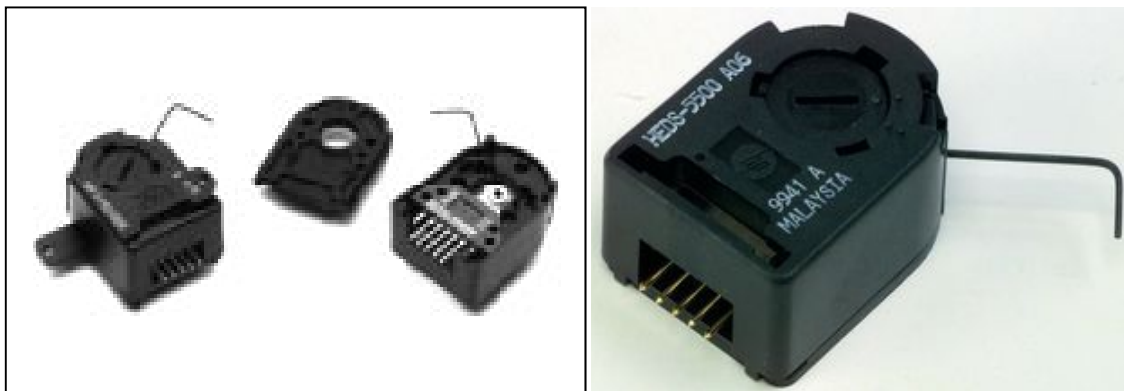


Figura 3.14.- Encoder HEDS-550.

Encoder HEDS 550	
Resolución	1024 cent. / Rev.
Alimentación	5V
Marca de índice	SI

Tabla 3.3.- Características principales de encoders HEDS 550.

3.3.1.2. Sistema sensorial interno

El sistema sensorial interno consiste en un sistema sensorial odométrico [58]. Este sistema está formado por un conjunto de elementos que nos proporcionan información en tiempo real de la posición y sus magnitudes derivadas del robot.

En nuestro caso, la odometría del robot es suministrada mediante los encoders localizados en los motores de la base, proporcionando así información de la velocidad y posiciones de éstos en un instante de tiempo. Hay que tener en cuenta que los encoders presentes en el manipulador móvil MANFRED, son de tipo incremental. Este hecho obliga a establecer cuál es el punto inicial de la base en el momento de su arranque.

Se utilizaron para nuestro sistema unos encoders de la casa Hewlett Packard con referencia HEDS-9040, Figura 3.15, con una resolución de 1024 cuentas de encoder.

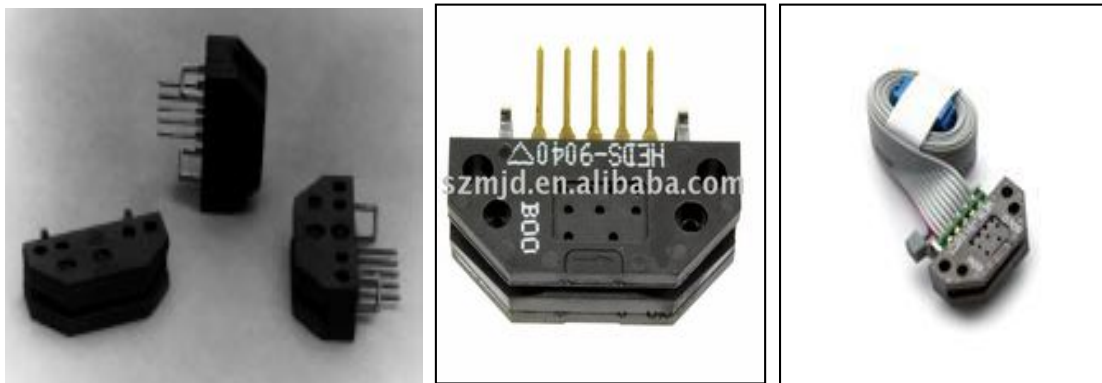


Figura 3.15.- Encoder HEDS-9040.

3.3.2. Sistema locomotor

El sistema locomotor del manipulador móvil está constituido por la base móvil previamente descrita, Figura 3.16. En la base se ubican los siguientes elementos:



Figura 3.16.- Sistema locomotor (base móvil).

- Las baterías.
- El sistema de control base-manipulador.
- El sistema de control de las plataformas sensoriales.
- El sistema de procesamiento sensorial.
- Las etapas de potencia para los accionadores.

3.3.3. Sistema de alimentación

La base móvil alberga el sistema de alimentación compuesto por las baterías que dotan de autonomía a todo el robot. Se ha optado por la conexión serie de 4 baterías de 12V para proporcionar una tensión de alimentación de 48V en continua. Ya que deben proporcionar toda la potencia necesaria para el funcionamiento del sistema robótico, uno de los requisitos en su elección ha sido la necesidad de utilizar baterías de gran capacidad.

En concreto, las baterías seleccionadas son el modelo LC-X1242P de PANASONIC, Figura 3.17, que proporcionan una tensión de salida de 12V y una capacidad de 42A/h. Asimismo, como sistema de seguridad, se ha diseñado un sistema de monitorización de las baterías a través de un micro-controlador PIC16F818, que permite medir en todo instante la tensión proporcionada por las baterías y la corriente que circula por ellas. Este sistema de seguridad permite comunicar continuamente el estado de la alimentación al computador de control, así como realizar una parada automática controlada de los motores del robot en caso de baja tensión de alimentación o de superar una corriente umbral.



Figura 3.17.- Batería de Panasonic LC-X1242P.

3.3.4. Sistema manipulador UC3M-LWR-1

Con objeto de realizar las tareas de manipulación, se equipó al manipulador móvil MANFRED de un brazo robótico ligero de seis grados de libertad (UC3M-LWR-1), Figura 3.18, el cual ha sido íntegramente diseñado en la Universidad Carlos III de Madrid. Las características principales de este brazo manipulador son:

- Redundancia cinemática similar al brazo humano.
- Masa del conjunto de 18 kilogramos.
- Capacidad de carga máxima de (4.5) kilogramos en el extremo del brazo.
- Relación carga/peso entre 1:3 y 1:4.
- Alcance en torno a 955 milímetros.

Dicho brazo se monta lateralmente de forma que el sistema de visión y la telemetría láser 3D puedan percibir lo que se desea manipular sin ser obstaculizados por el brazo.



Figura 3.18.- Brazo Manipulador UC3M-LWR-1.

El objetivo en lo que al brazo manipulador se refiere ha sido desarrollar un brazo ligero, basado en el uso de nuevos componentes electromecánicos de altas prestaciones que permitan **disminuir el peso** y por lo tanto reducir el par necesario para mover las articulaciones, lo que a su vez permitirá disminuir también el peso de los accionamientos y aligerar la estructura. Como se ha mencionado anteriormente, un requisito indispensable era la ligereza del brazo por lo que se planteó que el peso del brazo no superase los 18 Kg para 6 g.d.l, y que el peso total incluyendo las etapas de potencia y control no excediese de los 30 Kg. Para ello y como elementos constructivos se utilizaron:

- **Motores sin escobillas “Brushless” de CC (Corriente Continua)**, con materiales magnéticos de tierras raras, que tienen la ventaja de dar mayor par, para peso equivalente, que los motores de continua convencionales. Se utilizaron además motores brushless que permiten alimentar directamente en continua a los accionadores.
- Se utilizaron como equipos de reducción de velocidad y aumento de par de tipo **Harmonic Drive**, más concretamente de la compañía alemana Harmonic Drive AG en su categoría **HFUC-2UH**. Debido a la especial elección de estos reductores con unos rodamientos de salida ya integrados, no fue necesario incluir rodamientos externos.
- La estructura se realizó en aleación de aluminio 7075 T6 para las uniones, ya que ofrece unas características mecánicas que permiten su utilización en aplicaciones reservadas hasta hace muy poco a los aceros, con la ventaja de tener un peso específico bajo $2,80 \text{ Kg/dm}^3$. Además, se utilizó fibra de carbono para los eslabones del brazo. Estos elementos se explicarán en más detalle en el capítulo IV.

3.3.5. Sistema de procesamiento

Un aspecto crítico en el diseño de un robot de servicios es la **robustez operacional**. Para conseguir este objetivo genérico, en el diseño de la arquitectura software del sistema se han tenido en cuenta los siguientes aspectos:

- Fiabilidad en la percepción.
- Fiabilidad en el control.
- Comportamiento tolerante a fallos.
- Localización de fallos y aislamiento de los mismos.
- Autonomía de decisión y manejo de situaciones excepcionales.

En el diseño de la arquitectura software del robot manipulador MANFRED se ha considerado que la mejora de la robustez operacional podía afrontarse mejorando entre otros aspectos los siguientes:

- Algoritmos de percepción, modelado, navegación, localización y planificación capaces de tratar con la incertidumbre de forma homogénea.
- Modelos del entorno utilizables en diferentes tareas sin necesidad de conversiones entre modelos.
- Arquitectura modular que permita la supervisión y recuperación de fallos en cada módulo funcional.
- Flexibilidad en la arquitectura funcional para aumentar la eficacia y robustez del software incorporando para cada tarea concreta los módulos funcionales necesarios de forma dinámica.

En consecuencia, se diseñó una arquitectura funcional que integrara la percepción, el control y la planificación local y global de forma que el robot pudiese responder a un conjunto amplio de tareas típicas de un robot de servicios operando en un entorno humano (desplazamiento en entornos con pocos obstáculos, movimiento en zonas densamente ocupadas, manipulación de puertas y colaboración en el transporte de una pieza simple con una persona). Esta arquitectura está basada en la realimentación sensorial externa, tanto a nivel del control de interacciones como a nivel de la planificación local, para conseguir un nivel adecuado de reactividad al entorno y de suavidad en el control de las interacciones. Para llevar a cabo todas estas tareas, el sistema de procesamiento dispone de dos PCs a bordo, Figura 3.19, encargados de las siguientes funciones:



Figura 3.19.- Sistema de procesamiento - PCs a bordo.

3.3.5.1. Subsistema de control coordinado

Un manipulador móvil es un sistema de enorme complejidad que debe ser capaz de procesar e interpretar una gran cantidad de información sensorial y cerrar varios lazos de control simultáneamente. Esta complejidad se traduce directamente en el crecimiento y complejidad del software que se desarrolla. Una de las características principales sobre la que se ha estructurado la arquitectura software del sistema es la **modularidad**. Para favorecer el desarrollo y mantenimiento del sistema software del robot se ha optado por una arquitectura completamente modular que traduce cada función a realizar por el sistema en un módulo software independiente. La interacción entre los módulos se basa en el intercambio de datos. Para ello, se han desarrollado módulos funcionales que puedan trabajar conjuntamente mediante el intercambio de datos pero que se ejecuten como procesos completamente independientes. La sincronización entre los procesos, cuando es necesaria, se realiza por medio de mensajes o eventos.

Con esta estructura modular se facilita el desarrollo, comprobación y actualización de los diferentes algoritmos. Cada uno de los módulos funcionales se diseña con capacidad para el auto-diagnóstico, de esta forma se dispone de un primer control de fallos en cada uno de los módulos.

La Figura 3.20, muestra un esquema de la arquitectura de control diseñada para el manipulador robótico MANFRED. Al tratarse de módulos de ejecución completamente independiente, cada tarea o cada fase de una tarea definirán el conjunto de módulos necesarios para su desarrollo.

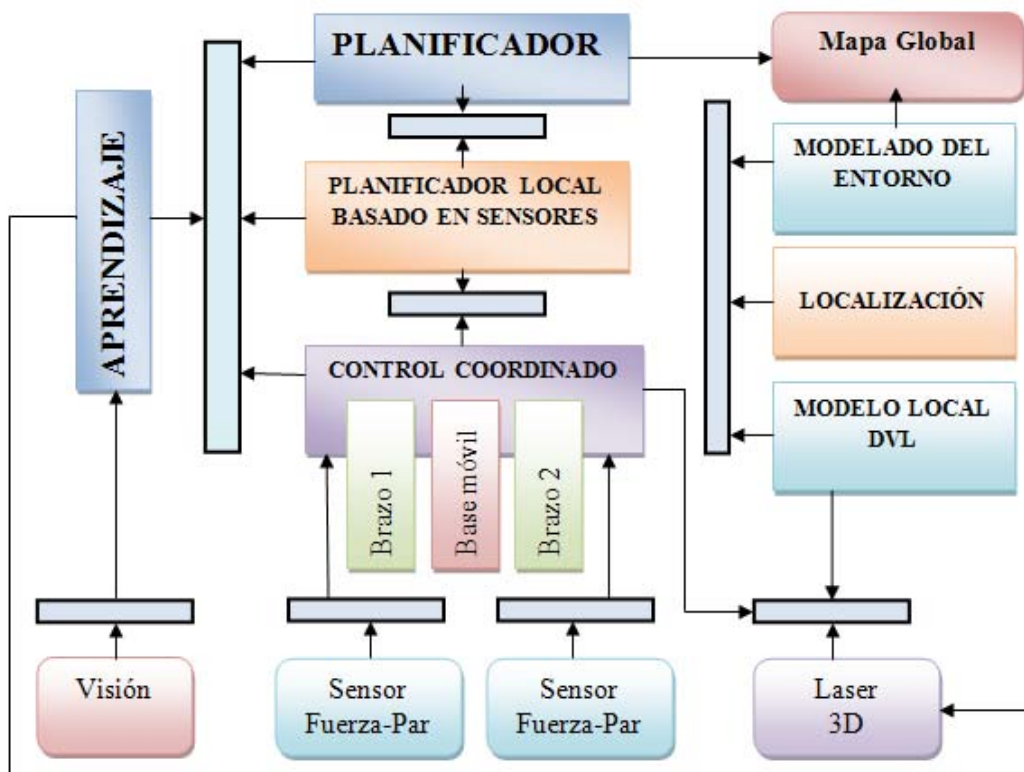


Figura 3.20.- Arquitectura funcional del proyecto MANFRED.

El computador asignado al sistema de control coordinado se encarga de las funciones básicas de control del sistema y en su bus va situada una tarjeta controladora de ejes, con capacidad para 8 ejes coordinados. Esta tarjeta se comunica, vía memoria de doble puerto, con la CPU de control. Además, permite cambiar dinámicamente los parámetros y el programa de control que se ejecuta en la misma para disponer de un sistema flexible que implemente técnicas avanzadas de control. Este subsistema realiza el control de la base (2 g.d.l), del brazo (6 g.d.l), y el movimiento del láser (1 g.d.l).

3.3.5.2. Subsistema de percepción

Uno de los problemas clave que se plantean en robótica móvil en general y, más concretamente, en la robótica de servicio es el tratamiento de los datos que proporcionan los sensores para obtener un modelo o modelos del entorno como representación útil del mismo. En los últimos años se han producido avances muy significativos en este campo. Aún así, la elección de un modelo u otro del entorno es una tarea compleja que depende de factores como el tipo de entorno en que evoluciona el robot, la tarea a realizar y las limitaciones computacionales del sistema.

La cantidad de información y datos procedentes de los sensores que deben tratarse en este tipo de sistemas es mucho mayor que en un robot convencional y mucho más diversa. De ahí que la homogeneidad de los datos, su tratamiento uniforme y la fiabilidad de los mismos sean problemas decisivos para conseguir la capacitación del sistema para colaborar eficazmente con los seres humanos.

En este proyecto es especialmente importante ser capaces de construir mapas del entorno en el que se mueve el robot de forma rápida y eficaz, evitando los problemas de incertidumbre, y homogeneizando, en lo posible, los modelos utilizados por los diferentes módulos funcionales del sistema para reducir la necesidad de conversiones que conllevan un aumento de la incertidumbre y un retraso en la transmisión de la información.

Teniendo todo lo anterior en cuenta, se ha optado por una arquitectura de control basada en el uso de Diagramas de Voronoi (locales y globales) como modelos topogeométricos del entorno, que podrán ser utilizados por los diferentes módulos funcionales del sistema: *planificación, navegación, modelado y localización*.

El diagrama de Voronoi representa el camino o serie de puntos que equidistan de al menos dos objetos del entorno [59]. Los puntos equidistantes a dos objetos del entorno forman las ramas del diagrama de Voronoi, y los puntos equidistantes a tres o más objetos son los nodos. De esta forma, se pueden ver las ramas del Diagrama de Voronoi como los caminos por los cuales el robot puede moverse de la forma más segura, alejándose cuanto puede de los obstáculos.

En el proyecto MANFRED se utiliza el **Diagrama de Voronoi Local (DVL)** construido a partir de las medidas proporcionadas por el telémetro láser como representación del entorno. El algoritmo utilizado para la extracción del DVL se describe con detalle en [60] y [61]. En la Figura 3.21, se puede ver un ejemplo del DVL obtenido con este algoritmo. El algoritmo permite la obtención del modelo en tiempo real de los DVL de un área en torno al manipulador móvil que se ha establecido en 6 m. Esta representación se usa directamente en las tareas de navegación o planificación local [62].

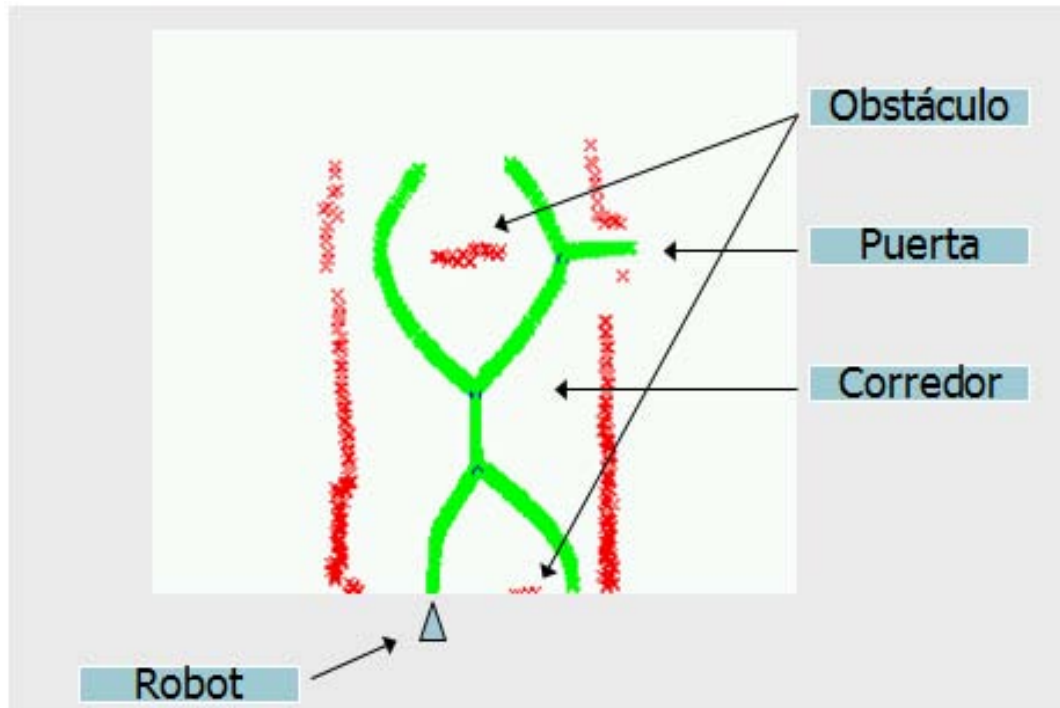


Figura 3.21.- Diagrama de Voronoi local.

Para llevar a cabo las funciones de percepción se asignó un computador encargado de las funciones básicas de percepción y modelado del entorno basándose en visión a partir de los datos suministrados por las cámaras CCD, y de los datos suministrados por la telemetría láser. El sistema también puede manejar las dos cámaras independientemente y procesarlas convencionalmente. En su bus va situada la tarjeta controladora de la plataforma de visión (4 g.d.l) y las tarjetas de adquisición de imagen.

3.3.5.3. Subsistema de navegación y planificación

Este subsistema (PC embarcado con dos procesadores) se encarga de las funciones básicas de pilotaje, navegación y planificación.

3.3.6. Sistema de comunicaciones

La arquitectura de comunicaciones se basa en una *Fast-Ethernet* (100 Mbit) para la comunicación interna entre los distintos computadores que constituyen el sistema y un enlace Ethernet radio a través del cual se conecta con la estación de supervisión y visualización del sistema.

4. Características técnicas del manipulador

El brazo manipulador UC3M-LWR-1 que es objetivo de esta tesis presenta unas características técnicas, resumidas en la Tabla 3.4, que responden a los siguientes requerimientos impuestos en el diseño:

➤ Bajo peso del brazo robótico.

La disminución de la masa del brazo robótico trae consigo la mejora de tres aspectos muy importantes que se desarrollan a continuación.



No.	Término	Descripción
1	Grados de Libertad	6 GDL
2	Materiales	Aluminio 7075 T6, fibra de carbono y PPS.
3	Peso total del manipulador	18 Kg
4	Carga máxima	4.5 Kg
5	Velocidad máxima de la articulación	180 °/s
6	Peso de los actuadores	4.233 Kg
7	Longitud total	1205 mm (sin elemento final)
8	Alcance	955 mm (sin elemento final)
9	Control	PMAC 8 ejes (2 base + 6 brazo)
10	Motores	D.C. Brushless de modelo RBEH (Sin escobillas)
11	Reductores	Harmonic drive de categoría HFUC-2UH
12	Sensores	(1) Sensor de posición del motor + Sensor de posición de la articulación. (2) Sensor de fuerza-par en la muñeca.

Tabla 3.4.- Características técnicas del brazo manipulador UC3M-LWR-1.

En primer lugar, se consigue una mejora en la *disminución de la inercia* que presenta el manipulador, ya que la inercia que genera el brazo robótico en su movimiento es proporcional a la masa del mismo. Este aspecto es muy importante que sea de menor magnitud posible, ya que este manipulador está diseñado para trabajar en un entorno con seres humanos, y en el supuesto que al realizar algún movimiento golpee a alguien el daño será menor cuanto menor sea la fuerza con la que se mueva [3].

El segundo aspecto está relacionado con el *consumo eléctrico*, ya que al disminuir la masa del brazo, los motores que producen el movimiento del mismo necesitarán consumir menos potencia eléctrica para poder producir el mismo movimiento, con lo que también conseguiremos un aumento en la autonomía del brazo robótico.

El tercer y último aspecto hace referencia *al aumento en la capacidad de manejar cargas más grandes*. Esto es debido a que la masa que podamos disminuir del propio material que compone el brazo robótico la podemos tener en cuenta a la hora de realizar estudios para aumentar la capacidad de manipular cargas más pesadas.

El peso final del manipulador está en torno a 18Kg, lo que supone una reducción considerable comparado con los manipuladores industriales convencionales e incluso menor que algunos brazos manipuladores ligeros actuales, Tabla 3.5.

➤ **Conseguir zonas del brazo robótico que puedan soportar temperaturas en torno a los 100°C.**

El brazo robótico está diseñado para trabajar en un entorno humano por lo que el rango de temperaturas a las que está sometido no es grande. Sin embargo, hay zonas dentro



Manipulador Ligero		Características generales							
Nombre	Modelo	Origen	Grados de libertad (GDL)	Peso (Kg)	Alcance (mm)	Capacidad máxima de carga (Kg)	Peso del armario de control (Kg)	Transmisión	Repetibilidad (mm)
(A465) of CRS Robotics	-	Canadá	6	31	711	2	31	Harmonic drive & Timing belts	± 0.05
Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.	PA10-6C	Japón	6	38	930	10	25	Harmonic drive	± 0.1
	PA10-7C		7	40			18		
MOVEMASTER of Mitsubishi Electric	RV-E3NLM	Japón	6	58	933	3	27	Harmonic drive	± 0.04
	RV-E4NC-SB			50	734	4			± 0.03
(DLR) Light Weight Robot	DLR-I	Alemania	7	14.5	1338*	7	-	DLR Planetary gear	-
	DLR-II		7	18	1024*	7		Harmonic drive	
	DLR-III		7	14	936	14			
MANUS of EXACT Dynamics BV	-	Holanda	6	20	850	2	-	Harmonic drive	-
ASIBOT	-	España	5	10	1.3	2	-	Harmonic drive	-
Universal Robot	-	España	6	18	850	5	-	Harmonic drive	± 0.1
CYTON Humanoid Manipulator	Light Arm 7D-1G	USA	7	-	480	0.35	-	Harmonic drive	± 0.3
	Standard Arm 7D-2V			-	434	1.2			
WAM Arm	4-Dof	USA	4	25	1000*	4	-	Harmonic drive	± 0.1
	4-Dof		7	27		3			± 0.2
PANDI-2	-	Suecia	6	10	595	1	-	Gear box	-

Tabla 3.5.- Características técnicas de manipuladores ligeros actuales.

* La cifra no se refiere al alcance del manipulador ligero, sino a su longitud total del brazo.

del brazo robótico sometidas a temperaturas mucho mayores, del orden de los 100°C, debido al calor generado por los motores en su movimiento.

Este problema debe ser tenido en cuenta ya que hay materiales que a temperatura ambiente poseen unas propiedades muy favorables para nuestro estudio, pero en cambio cuando aumenta la temperatura estas propiedades empeoran haciendo que el material no resulte apropiado para nuestro diseño.

➤ **Disminuir la influencia de la dilatación del material.**

El material, al producirse variaciones de temperatura en su superficie, lleva consigo un cambio de dimensiones en su estructura. Este cambio de dimensiones repercute negativamente en el posicionamiento del brazo por lo que debe reducirse cuanto sea posible.

➤ **Aumentar la resistencia mecánica.**

El brazo robótico va a estar sometido a esfuerzos a lo largo de su estructura debidos a la manipulación de cargas o como consecuencia de la realización de tareas tales como abrir puertas o pulsar interruptores.

➤ **Ergonomía del brazo robótico.**

Anteriormente hemos comentado que el brazo robótico va a estar en contacto con el hombre, ya que uno de sus propósitos es conseguir plena interacción con el hombre.

Por ello se pretende que el diseño del manipulador no resulte agresivo hacia el hombre, eliminando elementos que lo pudiesen dañar en caso de colisión como esquinas de su diseño o aristas pronunciadas.

➤ **Inflamabilidad.**

El brazo robótico va a estar en contacto constante con el hombre o en su entorno por lo tanto se ha tenido en cuenta a la hora de buscar un material, que en caso de que se produjese la combustión del mismo, los vapores generados en la deflagración no sean altamente nocivos para las personas que están en el entorno.

➤ **Peligrosidad para el hombre.**

Los materiales constructivos no deben de contener en su composición ningún elemento tóxico que pueda ser perjudicial para el hombre.

➤ **Bajo coste.**

Por último y no por ello menos importante, se ha contemplado durante el desarrollo del proyecto la elección de elementos que cumpliendo todos los aspectos anteriormente mencionados supongan el menor coste.

El diseño final ha tratado de satisfacer todos los requerimientos impuestos, pero teniendo en cuenta que el cumplimiento excelente de todos ellos es una utopía, por lo que la solución adoptada pasa por la búsqueda de un compromiso que satisfaga en mayor medida todos los objetivos de diseño.



En conclusión, el manipulador diseñado, en su actual forma, presenta una capacidad de carga muy aceptable para las tareas de manipulación previstas, a la vez que un peso muy reducido en comparación con otros brazos manipuladores actuales (La Tabla 3.5 muestra las características generales de algunos de los manipuladores actuales más ligeros).

Las características de tamaño y alcance son similares a las de un brazo humano, consiguiéndose una alta flexibilidad en las tareas de manipulación gracias a la disposición de las 6 articulaciones. En el capítulo siguiente se presenta el diseño del manipulador robótico donde se explicará en detalle la filosofía del diseño y los elementos seleccionados para poder conseguir las características técnicas previamente mencionadas.

CAPÍTULO IV

DISEÑO DEL BRAZO MANIPULADOR LIGERO: PROTOTIPO EXPERIMENTAL



4.1. Objetivos del diseño

El prototipo diseñado pretendió satisfacer los siguientes objetivos:

1. **Seguridad:** Dado que el entorno de trabajo de este robot manipulador es un entorno humano, el diseño debe velar por la seguridad de los seres humanos que cohabitan con dicho robot. Para ello hay que tener en cuenta diversas consideraciones en cuanto a los materiales empleados, así como sus formas de manera que el diseño final resulte lo menos agresivo posible. Como se explicará posteriormente, este requerimiento condiciona aspectos como la elección de los materiales de fabricación del brazo manipulador o incluso la sección de los elementos constitutivos del mismo.
2. **Diseño antropomórfico:** Como se ha mencionado, el robot desenvolverá sus tareas en un entorno humano y por tanto cabe pensar que la morfología del diseño que mejor se adapta al entorno sea de carácter antropomórfico. Para ello se tendrá que realizar un estudio de las características que definen a esta morfología y tratar así de imitar las mismas con el diseño propuesto. Se opta por un diseño del brazo de **6 g.d.l** (pese a que el brazo humano tiene 7 [63] y [64]) que junto con los otros **2 g.d.l** de la base permiten aproximar muy bien la mayoría de movimientos humanos.
3. **Robustez:** El diseño debe ser robusto y capaz de recuperarse frente a errores. Para ello se requiere de un conjunto de sistemas mecánicos, eléctricos y sensoriales integrados que permitan el correcto funcionamiento del sistema.
4. **Estabilidad:** El prototipo experimental que se pretendió construir en una primera fase comprendía, por limitaciones económicas, un solo brazo manipulador. Esta estructura de un único brazo compromete la estabilidad del robot por lo que es requisito que el diseño sea estable pese a contar con un solo brazo manipulador y además contemple la incorporación de un segundo brazo, que le confiera los rasgos antropomórficos, anteriormente mencionados, en una segunda fase.
5. **Modularidad:** Permitir en su ensamblaje una política de modularidad en orden a poder ser desmontado y sustituido por otros actuadores para poder cubrir así distintas necesidades de manipulación.
6. **Bajo peso:** Uno de los requisitos indispensables del diseño pasa por obtener un manipulador lo más ligero posible ya que este requerimiento guarda una relación directa con otros aspectos como la *seguridad* (debido a la disminución del momento de inercia), con la *estabilidad* y con el aumento del *ratio carga/peso*, a menor peso del brazo manipulador mayor podrá ser el peso de los objetos a manipular sin comprometer la estabilidad del robot. Además existen otros efectos como el impacto que tiene en un *consumo energético* menor así como el *aumento de la velocidad* del movimiento del brazo manipulador. El peso del manipulador diseñado se redujo a 18 kg.
7. **Capacidad de carga:** Esta característica es deseable que sea elevada para así poder manipular un mayor número de objetos. En este diseño se logró una capacidad máxima de carga entorno a 4,5 kg.
8. **Control coordinado:** De todos los grados de libertad. Para el correcto desarrollo de las tareas es indispensable la coordinación de los g.d.l del robot. Este control se

ha estructurado en tres niveles: *controladores de articulación* que cierran los lazos de cada articulación, *control cinemático* coordinado encargado de cerrar el bucle de control de posición del elemento terminal coordinando todos los grados de libertad del sistema y el *control de fuerza* que cierra el bucle de control de esfuerzos en el extremo del robot.

9. **Económico:** El factor económico es un hecho que ha acompañado al proyecto en todo su desarrollo y que como se comenta a lo largo de este capítulo ha sido en algún caso determinante a la hora de elegir entre varias alternativas planteadas en el diseño.
10. **Preciso:** Es importante que el manipulador diseñado sea preciso, recordemos que se considera que un manipulador robótico es más preciso cuanto menor es el error de posicionamiento del elemento terminal respecto de un punto objetivo en el cual queremos posicionarlo. Se entiende por tanto, que este factor condiciona la capacidad de realizar las tareas para las que ha sido diseñado y por tanto es deseable que su error de precisión sea lo menor posible.
11. **Simplicidad de diseño:** Un aspecto importante que se persiguió en el diseño del manipulador es la simplicidad del mismo. Para ello se realizó un diseño basado en módulos de fácil ensamblaje de manera que en caso de ser necesario la sustitución de una de las piezas se pudiera realizar de manera sencilla.
12. **Estética:** Es importante que el diseño del manipulador sea estético manteniendo cierta armonía en su apariencia. Para ello se realizó una la elección de los materiales de manera que los colores no resultasen agresivos a la vista y las formas de las piezas resultasen armoniosas en su conjunto respetando al mismo tiempo el resto de aspectos de diseño previamente mencionados.

Todas las características previamente descritas se han tenido en cuenta en todo el proceso de diseño del robot manipulador resultando complicado satisfacer al cien por cien todas ellas pues, algunas entraban en conflicto con otras. No obstante el diseño propuesto es el resultado de la búsqueda de un compromiso equilibrado dando como resultado un diseño eficiente.

4.2. Filosofía del diseño

La filosofía de diseño mecánico de este brazo manipulador ligero ha tenido como objetivo conseguir características de movilidad (número de grados de libertad, alcance y disposición de los elementos) similares a las de un brazo humano. A la vez se ha buscado disminuir el peso, que en los manipuladores industriales comerciales es excesivo para nuestros propósitos, sin alterar por ello la robustez y rigidez del sistema. Asegurar que el robot pueda realizar tareas de manipulación con suficiente destreza de forma eficaz obliga a su disposición antropomórfica y a mantener suficiente rigidez para facilitar el control del movimiento. A la vez para mejorar la seguridad de las personas con las que colabore, se ha impuesto disminuir la inercia del sistema en movimiento y en consecuencia la peligrosidad del impacto ante una posible colisión.

El diseño mecánico de este nuevo manipulador ha tenido dos fases diferenciadas muy importantes: la **elección de los materiales** de construcción y el **diseño mecánico del sistema**. El diseño mecánico se ha realizado con ayuda de software SolidWorks que ha

permitido optimizar la integración de los elementos mecánicos y electrónicos [65]. El análisis de todos los componentes críticos con SolidWorks ha permitido la construcción de esta estructura extremadamente ligera. La Figura 4.1 muestra el modelo del brazo UC3M-LWR-1 detallando la disposición de sus grados de libertad.

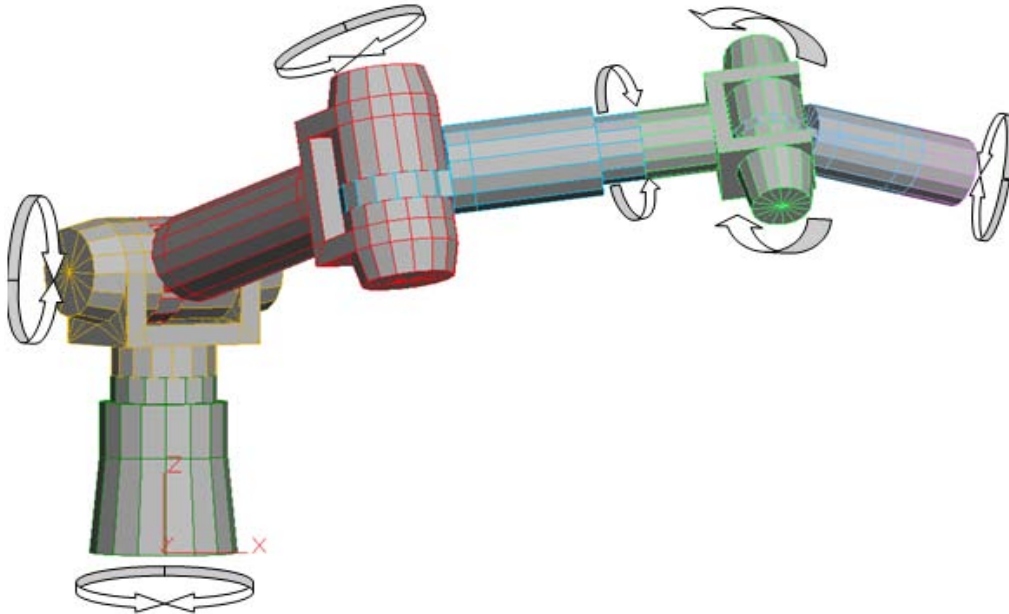


Figura 4.1.- Grados de libertad del UC3M-LWR-1.

Aunque el objetivo inicial propuesto era reproducir la movilidad de un brazo humano, ha sido necesario limitar a 6 los g.d.l. del manipulador por restricciones económicas. En comparación con un modelo cinemático simplificado del brazo humano, en el que se consideran tres grados de libertad en el hombro, el manipulador diseñado dispone únicamente de dos. De esta forma se ha reducido la redundancia que presenta el brazo humano. Sin embargo, todas las simulaciones realizadas sobre el modelo, así como las pruebas realizadas con el manipulador construido, nos permiten asegurar que la configuración de articulaciones adoptada otorga al manipulador UC3M-LWR-1 suficiente flexibilidad de movimientos para realizar tareas de manipulación complejas.

Como se observa en la Figura 4.2, en la etapa de diseño se ha puesto especial atención en eliminar cualquier arista en la estructura mecánica externa del manipulador UC3M-LWR-1, se han redondeado todas las terminaciones de los elementos que cubren las articulaciones y se han ocultado los tornillos en la propia estructura mecánica. El objetivo es eliminar en lo posible cualquier elemento que pudiese dañar a un ser humano y al mismo tiempo lograr un aspecto estético en el diseño. Por la misma razón tanto el cableado como toda la electrónica incorporada, se integran internamente en la estructura eliminando cualquier elemento fuera de los eslabones o las estructuras que cubren las articulaciones. Al presentar una estructura cerrada y tubular con un hueco en su interior de diámetro adecuado, los eslabones de fibra de carbono, puede contener todos los cables dedicados a control y alimentación de manera segura y limpia. Esta estructura cerrada disminuye, también, en alto grado los peligros de vibraciones e inexactitudes de posición en la estructura dándole una robustez considerable. En el Anexo IV de la presente tesis se adjuntan los planos detallados del diseño mecánico del brazo manipulador ligero UC3M-LWR-1.

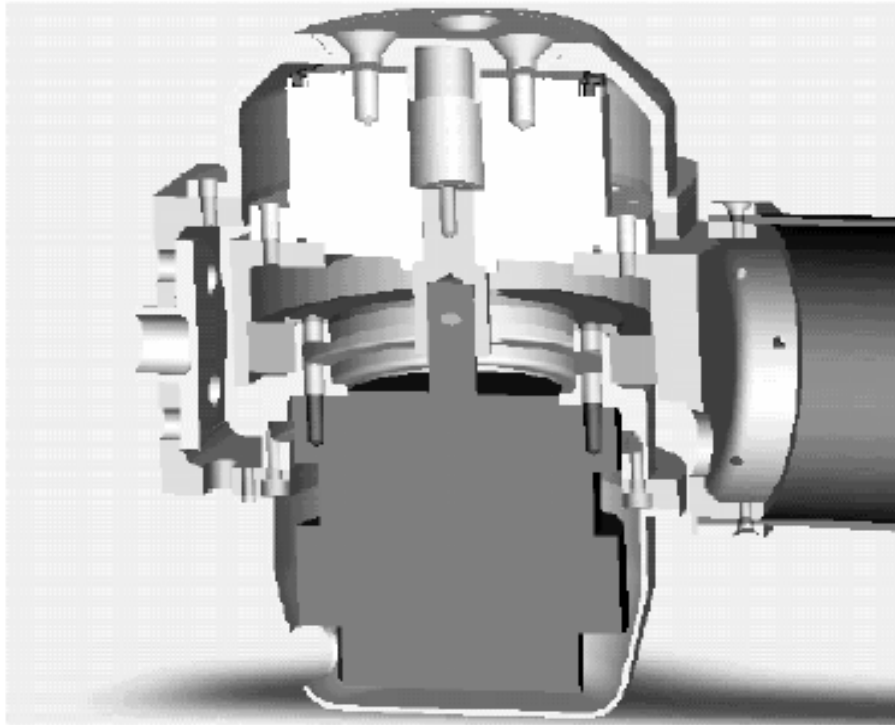


Figura 4.2.- Detalle de diseño en SolidWorks.

4.3. Conceptos preliminares: Estudio de antropometría y movilidad

El robot MANFRED nace con la meta fundamental de la robótica de servicios. Este concepto justifica el diseño del robot en base a principios antropomórficos por dos razones fundamentales ya introducidas:

- 1) La robótica de servicio pretende dotar a la sociedad de herramientas capaces de ejecutar tareas antes desarrolladas por humanos. Este concepto, justifica la construcción de herramientas antropomórficas; pues son las proporciones humanas para las que se conocen las mejores maneras de desempeño de la tarea, que en su mayoría, por su especificidad cinemática o dinámica, no dejan opciones en cuanto al diseño de las herramientas, que deben ser obligatoriamente, humaniformes.
- 2) Los ambientes, espacios de trabajo y condicionantes arquitectónicos a los que debe enfrentarse un robot de servicio son claramente antropomórficos ya que lo anteriormente mencionado ha sido diseñado para personas. Por ello, un robot de servicios debe ser humaniforme: los espacios de trabajo y las configuraciones de objetos y situaciones están íntimamente ligadas a las formas humanas.

¿Basta por tanto con diseñar un robot idéntico al ser humano? Sin duda esta sería la manera óptima de solución al problema, pero los condicionantes técnicos actuales lo impiden.

En el caso de MANFRED, a pesar de su diseño humaniforme, hay condiciones técnicas que no se han resuelto de manera íntegramente humaniforme, lo cual compromete al resto de componentes. Un claro ejemplo de esto, es la base móvil del robot y su relación con el manipulador.

Siendo técnicamente fieles a las proporciones humanas, bastaría con respetar todos los aspectos del brazo humano, tales como alcances, dimensiones y carga, para crear un manipulador humaniforme. Esto no es factible por dos razones:

- a) En primer lugar, la tecnología actual no está en condiciones de diseñar un manipulador que responda de manera exacta a las especificaciones dadas por el brazo humano.
- b) En segundo lugar, respetar estas especificaciones no solucionaría el problema real que es lograr un espacio de trabajo idéntico al humano, o al menos, lo más parecido posible. Efectivamente, el diseño de la plataforma móvil de MANFRED obliga a reacondicionar el diseño de su manipulador para que a través de medidas no antropomórficas *a priori*, pueda alcanzar zonas de trabajo y alcances de desempeño completamente humaniformes.

4.3.1. Datos Antropomórficos

Para analizar en profundidad la naturaleza del brazo humano, se abordó su estudio desde tres variantes diferentes: sus grados de libertad, sus alcances y sus rangos articulares.

a) Grados de libertad

El miembro superior del cuerpo humano, el brazo, tiene un total de 7 GDL hasta llegar a la muñeca [66]. Tres de ellos se sitúan en el hombro, otro más en el codo y tres más en la muñeca. Los tipos de movimientos asociados a estos grados de libertad se pueden encontrar en detalle en el Anexo I.

b) Rangos articulares

Los rangos articulares de cada una de las articulaciones del brazo humano se recogen en la Tabla 4.1. Nótese que para la comprensión de los datos expuestos en la Tabla 4.1, será preciso acudir a las descripciones de movimientos así como a las posiciones de referencia del Anexo I.

Para la elaboración de esta tabla se han incluido tres fuentes de comparación de datos, si bien, el resto de bibliografía consultada ratifica los resultados. Se aclara asimismo que se ha optado por la definición de movimientos dada por [63] al ser la más completa ya que otras fuentes no daban datos al respecto.

Nótese que aunque hay una relativa diferencia de rangos según cuál sea la fuente consultada ([63], [66] y [67]), todos los valores oscilan en torno a los mismos límites. Dándose en [68] una desviación típica sobre el valor medio, se ha optado por incluir los más elevados de la muestra ya que en el estudio interesan los máximos valores para diseñar el manipulador en las condiciones más desfavorables, en este caso, para que iguale o supere los rangos articulares humanos.

c) Zonas y áreas de trabajo

Como se introdujo en el capítulo anterior, el área de trabajo es, en resumen, aquella zona del espacio en la que es posible la realización de un trabajo por el brazo, más allá del mero alcance.



RANGOS ARTICULARES DEL BRAZO HUMANO						
ARTICULACIÓN	GRADO DE LIBERTAD	MOVIMIENTO		RANGOS ARTICULARES SEGÚN [63]*	RANGOS ARTICULARES SEGÚN [67]*	RANGOS ARTICULARES SEGÚN [66]*
HOMBRO	GDL 1.- eje transversal ¹	Extensión ⁴		45° a 50°	40°	60°
		Flexión ⁵		180°	150° a 170°	180°
	GDL 2.- eje antero-posterior ²	Aducción ⁶	con extensión	0° a 5° -aproximación -	N/D	N/D
			con flexión	30° a 45°	20° a 40°	N/D
		Abducción ⁷		180°	180°	180°
	GDL 3.- eje vertical ³	Rotación ⁸ longitudinal	externa	80°	N/D	73°
			interna	95°	N/D	104°
		Rotación ⁹ horizontal	flexión	140°	N/D	N/D
extensión	30°		N/D	N/D		
CODO	GDL 4	Extensión		145°	130°	150°
		Flexión		0° - según laxitud 5° a 10° -	10°	- según laxitud de 2° a 10° -
MUÑECA	GDL 5	Supinación ¹⁰		90°	80° a 90°	85°
		Pronación ¹¹		85°	80° a 90°	80°
	GDL 6.- eje transversal	Flexión		85°	N/D	81°
		Extensión		85°	N/D	80°
	GDL 7.- eje antero-posterior	Aducción		40° a 45° - desde eje muñeca a eje dedo medio -	N/D	38°
		Abducción		15°	N/D	21°

Tabla 4.1.- Tabla de rangos articulares para el brazo humano.

N/D = No Disponible.

* Ver bibliografía.

★ Para los superíndices de 1 a 11, será preciso acudir al Anexo I.

Este aspecto nos remite directamente al concepto de antropometría [64], en dónde las zonas de trabajo en humanos, a diferencia de los rangos articulares y los grados de libertad, varían en gran medida debido a que estas zonas dependen de las dimensiones de los brazos, lo que varía por edades, razas y sexos.

La antropometría se enfrenta a este problema, estableciendo distribuciones normales de medidas. De esta manera, tras una toma de datos, se puede afirmar que en lo referente a una sola medida, p. ej, el alcance lateral del brazo desde el hombro a la muñeca, habrá un porcentaje de la muestra que esté por encima o por debajo de esta medida. A este método se le llama método de los percentiles.

¿Cómo funciona? Para este estudio interesaba averiguar cuáles son las máximas áreas de trabajo para humanos para que el manipulador las cumpla e incluso rebase en orden a tener la máxima movilidad siempre dentro de un diseño racional. Lo anterior es, traducido al método de los percentiles, cuál es la medida de área de trabajo que deja detrás al 95 % de las medidas de áreas de trabajo para humanos. Visto de otra manera, estamos asegurando que el 95 % de personas tienen un alcance menor o igual a estas medidas.

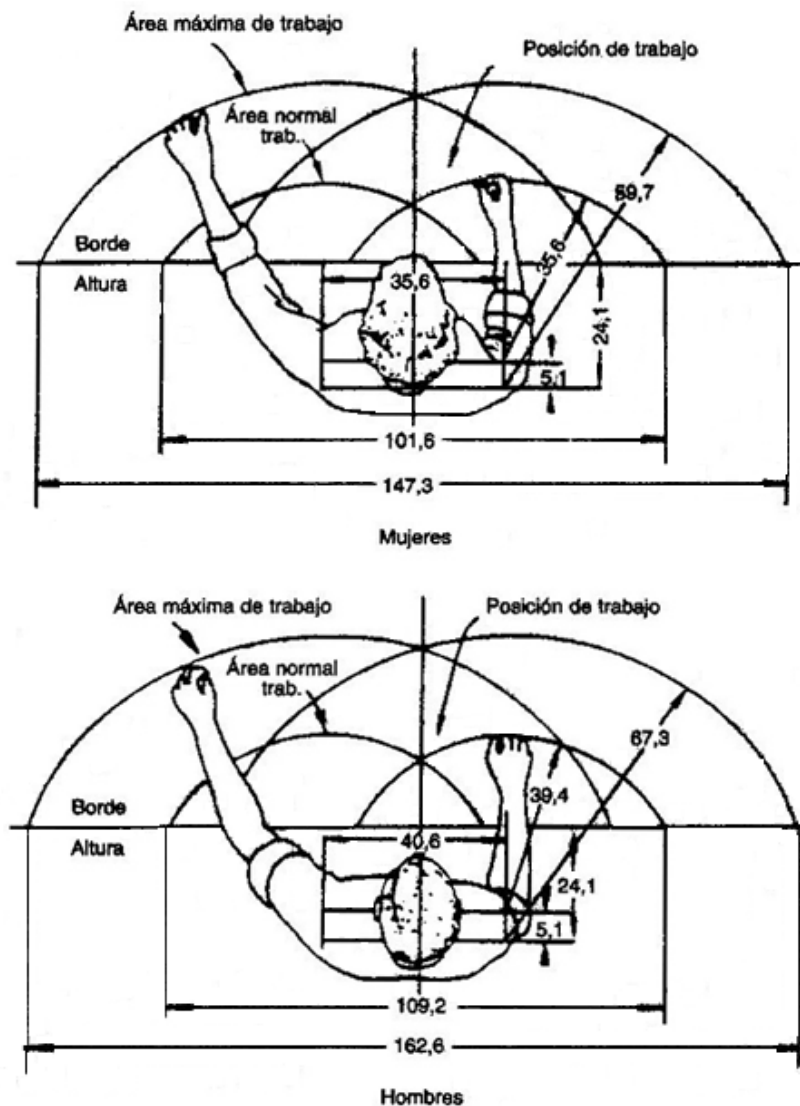


Figura 4.3.- Áreas de trabajo de Farley. (Cortesía de Farley [69])

Lamentablemente no es tan sencillo aislar el área de trabajo, pues no es una medida simple. Depende de las dimensiones del brazo humano, de la movilidad articular y en general de otros aspectos secundarios. Farley aborda el problema de manera geométrica y aísla estas zonas en el plano horizontal, Figura 4.3 [69].

Se observa que en general, la anatomía masculina adulta es la que ofrece mayores capacidades de desempeño. Mayor alcance a costa claro de un mayor tamaño. Se suele tomar el percentil 95 en hombres como cotas de máximo alcance, mientras que se toma el percentil 5 en mujeres como cotas de mínimo. Otros autores han trabajado en el aspecto frontal de esta área de trabajo, Figura 4.4.

Rápidamente se puede observar que el alcance máximo para humanos está en torno a los 2.200 mm desde el suelo. Interesa observar además que de manera lateral ese alcance está a 800 mm desde el eje central del cuerpo y que el alcance al suelo sin flexión corporal está en torno a los 900 mm desde el propio suelo.

Las formas redondeadas indican la presencia de movimientos de rotación en las articulaciones. Todos los autores coinciden en que haciendo asumibles simplificaciones de variación del centro instantáneo de rotación, todas las articulaciones realizan movimientos circulares en torno a un eje **lo que justifica articulaciones giratorias en el manipulador objeto de esta tesis.**

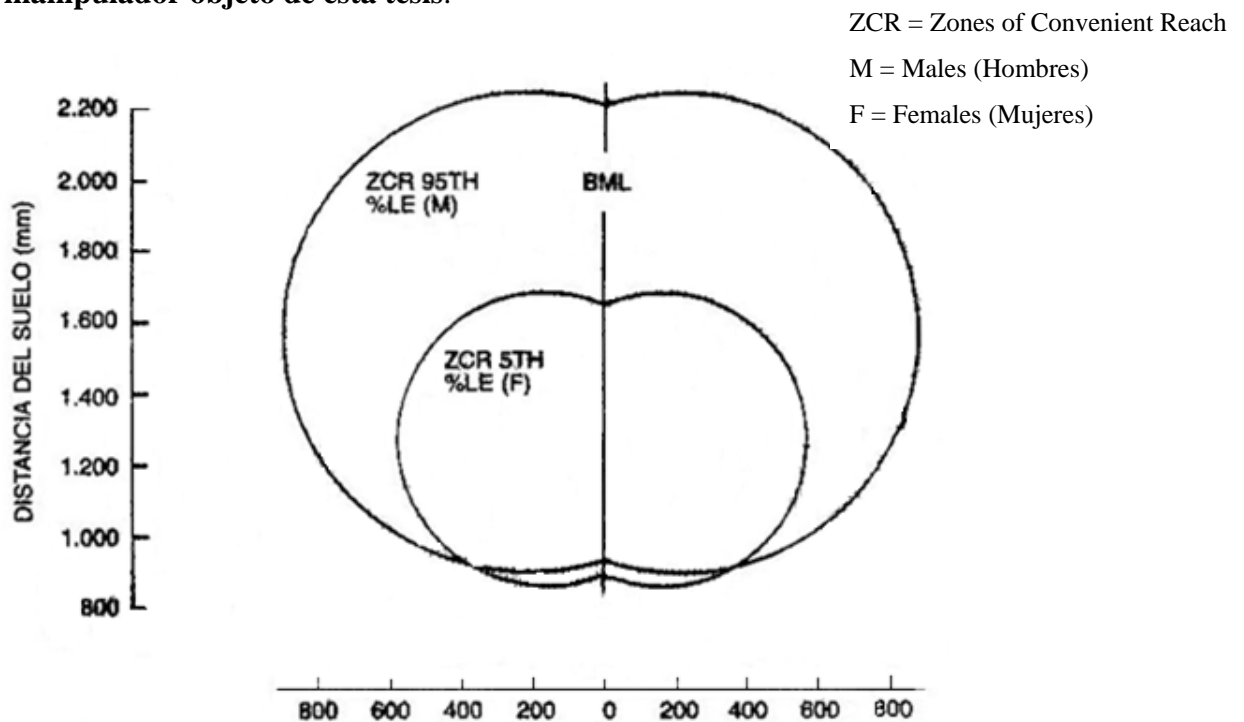


Figura 4.4.- Áreas de trabajo frontales para Pheasant. (Cortesía de Farley [69])

Volviendo a las zonas de trabajo, se hace necesario explicar el concepto de volumen de trabajo. Realmente una zona de trabajo es una sección parcial de un volumen mayor que es por definición, un espacio tridimensional donde el alcance y la manipulación se hacen posibles. Interesa para este estudio, el análisis pormenorizado de los alcances más que el volumen o la forma del área. Continuando con los cortes bidimensionales nos queda por analizar aquellos situados en el plano horizontal, Figura 4.5, para completar las áreas dadas por Farley y aquellos referidos al plano sagital. Se coincide con Farley en que el alcance máximo está en torno a los 600 mm [69].

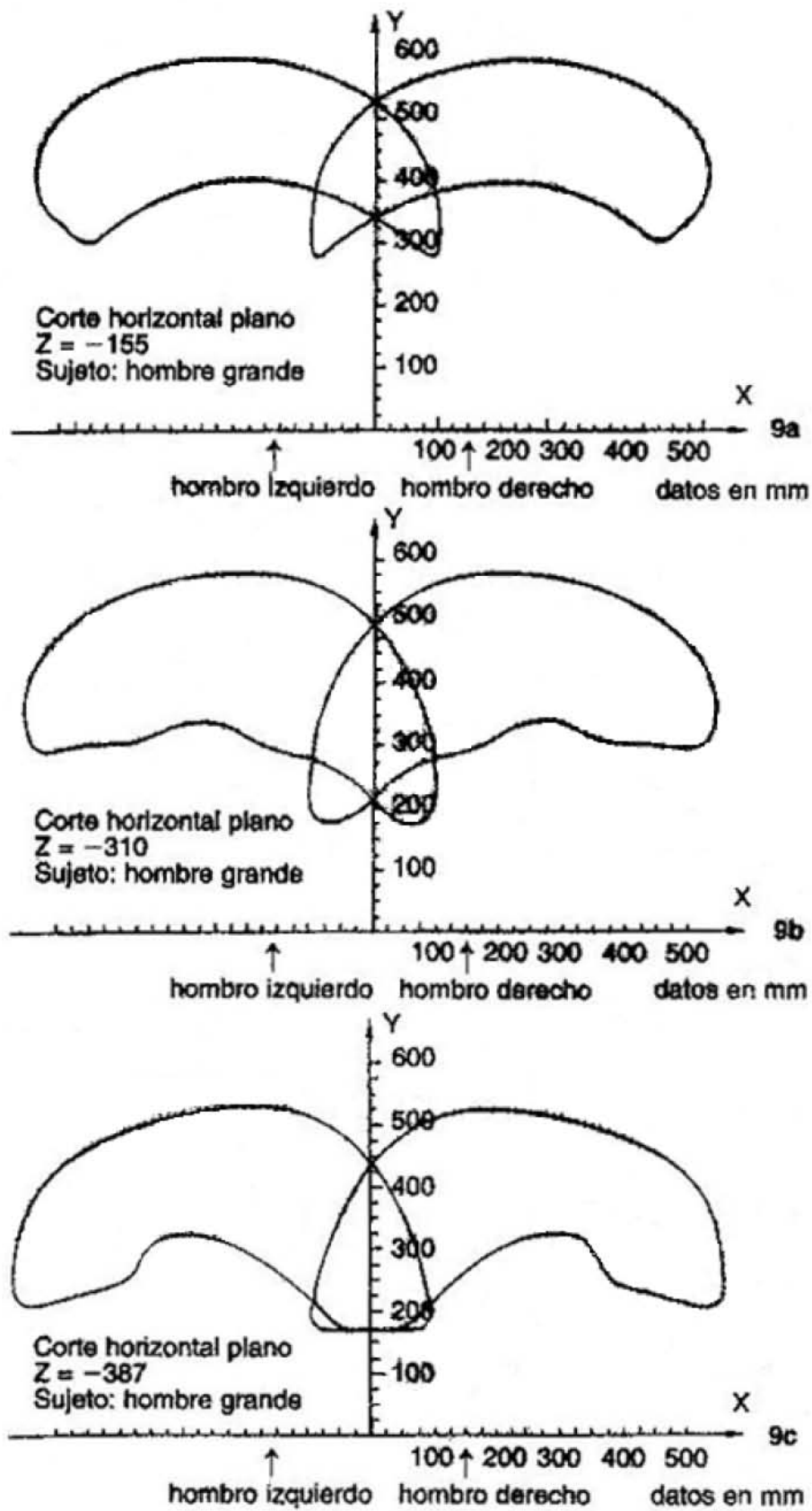


Figura 4.5.- Cortes del volumen de trabajo en el plano horizontal - 95 % hombres -. (Cortesía de Farley [69])

Por último podemos ver el área de trabajo en el plano sagital, Figura 4.6.

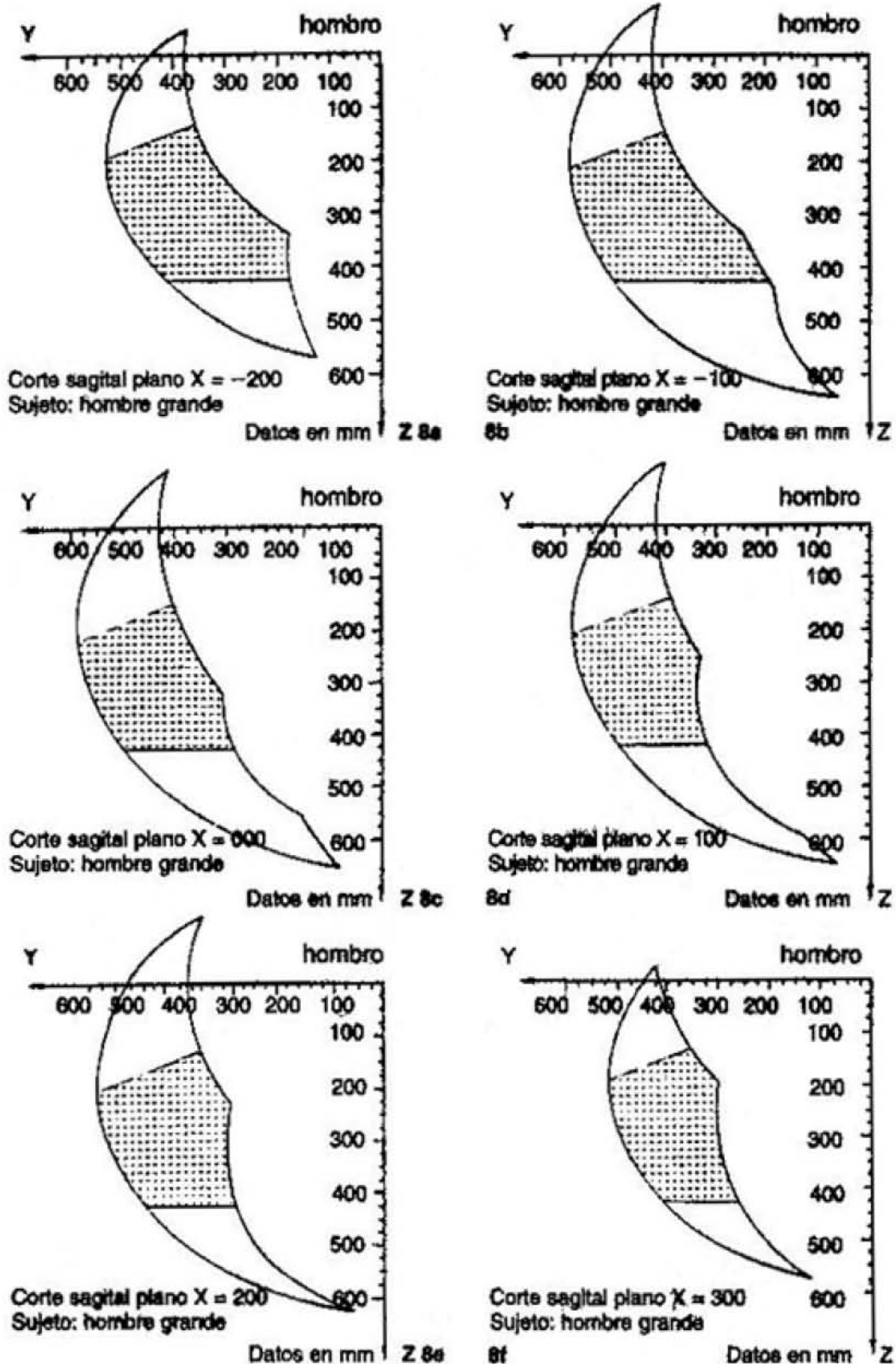


Figura 4.6.- Cortes en el sagital - 95 % hombres -. (Cortesía de Farley [69])

La unión de todos los cortes en un espacio tridimensional daría lugar a una figura como la que se muestra en la Figura 4.7.

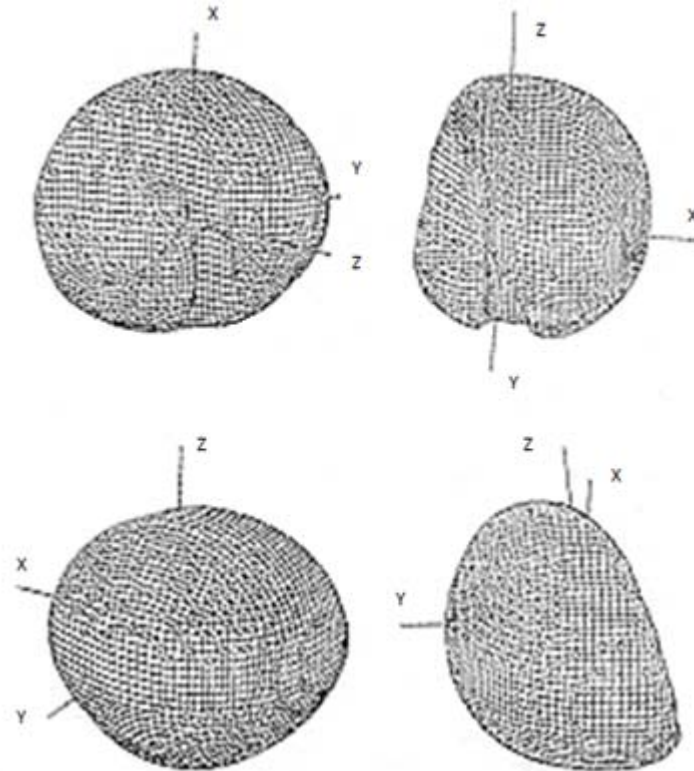


Figura 4.7.- Formas 3-D del volumen de trabajo del brazo humano. (Cortesía de Lenarcic [64])

En la Figura 4.8, el hombro está en la intersección de los tres ejes.

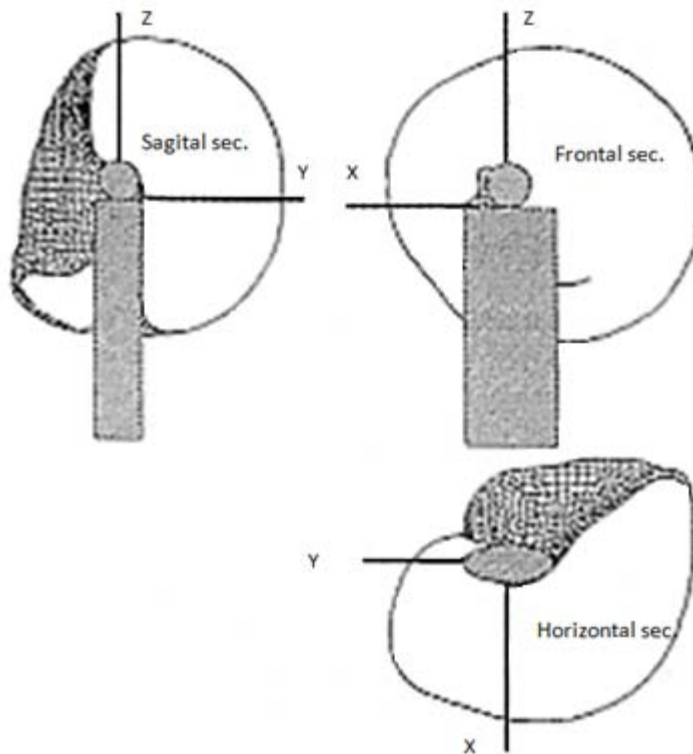


Figura 4.8.- Cortes del volumen 3-D. Visiones frontal, sagital. (Cortesía de Lenarcic [64])

4.3.2. Modelo propuesto para el manipulador

Como resultado del estudio antropométrico realizado, el diseño del brazo manipulador UC3M-LWR-1 que aquí se presenta consta de un total de 6 GDL, distribuidos como siguen:

1. **Hombro:** Dispone de 2 g.d.l que posibilitan giros en el eje antero-posterior y transversal.
2. **Codo:** Con 1 g.d.l que posibilita un movimiento idéntico al humano.
3. **Muñeca:** Con 3 g.d.l que van del codo a la muñeca repartidos en 1 g.d.l que sea asimilable a la pronosupinación¹, 1 g.d.l comparable a la aducción-abducción y flexión-extensión según la posición relativa con el anterior g.d.l y 1 g.d.l extra de rotación en el mismo eje que la pronosupinación para lograr redundancia de orientación.

Este ha sido el modelo cinemático usado en el UC3M-LWR-1 y se mantiene a pesar de que la distribución de grados de libertad no tiene una correspondencia directa con el modelo humano porque:

- a) En el caso de tercer g.d.l del hombro, la **plataforma móvil ya lo supe** con movimientos de giro. Añadir un motor más no supondría una ventaja por el exceso de peso y la relativa baja utilidad de este grado de libertad en el conjunto. Además esto complicaría el modelo cinemático del prototipo sin aportar ventajas significativas.
- b) Para la mayoría de movimientos humanos, no se combinan los g.d.l de la muñeca referente a la flexión-extensión y aducción-abducción, por lo que la elección de esta distribución de g.d.l no desvirtúa el diseño antropomórfico. Además, ofrece un óptimo método de control por la posibilidad de incluir desacoplo cinemático y añade la posibilidad de posicionamiento redundante en el actuador.

4.4. Criterios del diseño

A continuación se describen las distintas etapas involucradas en el diseño del prototipo experimental. Desde la definición de las tareas para las que va a ser aplicado el robot, las características que se derivan de su aplicación pasando por las fases de selección de los materiales de fabricación, la estructura y los componentes. A lo largo de estas secciones se plantearán las distintas alternativas que surgieron en cada caso, así como una justificación de la elección final en base a los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas utilizando el software previamente descrito. Además se comentarán otro tipo de consideraciones que influenciaron en muchos casos las decisiones de diseño.

4.4.1. Definición de las tareas

El diseño del manipulador móvil objeto de esta tesis debía estar capacitado para realizar las siguientes tareas:

¹ La pronosupinación es el movimiento de rotación del antebrazo en torno a su eje longitudinal. Ese movimiento precisa la intervención de la asociación mecánica de dos articulaciones: la radio-cubital superior y la inferior. Al intervenir la inferior es tomado como un grado de libertad de la muñeca.

1. **Desplazamiento** de forma segura por entornos típicamente humanos. Hay que tener en cuenta la presencia de obstáculos tanto estáticos como dinámicos en el entorno y en consecuencia la planificación debe ser capaz de afrontarlo exitosamente. En esta tarea el robot manipulador usa solo los grados de libertad de la base en el control coordinado.
2. **Colaboración con una persona:** Entre estas tareas se encuentra la apertura de puertas y paso a través o el encendido/apagado de un interruptor. Para el desempeño de este tipo de tarea se requiere el control coordinado de todos los grados de libertad.
3. **Manipulación autónoma:** Ésta comprende la manipulación de objetos simples como pueden ser un vaso o cualquier otro objeto de forma sencilla y cuyo peso no exceda la máxima capacidad de carga del manipulador. Este tipo de tareas también requieren el control coordinado de todos los grados de libertad.

4.4.2. Definición de las características generales del brazo manipulador

La capacidad para poder realizar todas las tareas anteriormente descritas requiere de ciertas características que condicionan el diseño del manipulador. Las características finales que se proponen para afrontar estas tareas, se recogen en la Tabla 4.2:

Características	Datos
Peso total aproximado	18 Kg
Carga máxima	4.5 Kg
Velocidad máxima de la articulación	180 °/s
Número de ejes (GDL)	6 g.d.l.
Longitud total	1205 mm (Sin actuador final)
Alcance	955 mm (Sin actuador final)
Motores	Sin escobillas
Transmisiones	Harmonic drive
Sensores	Encoder en cada articulación y 1 sensor de fuerza-par en la muñeca
Frenos	No existe
Potencia	48V & 96V DC
Materiales	Aluminio 7075 y fibra de Carbono

Tabla 4.2.- Características del prototipo experimental del robot manipulador.

Estas características se justifican en las siguientes secciones donde se abordan aspectos relacionados con la elección del material, selección de los componentes, etc.

4.4.3. Preselección de los materiales

La selección de los materiales constructivos ha sido uno de los aspectos del diseño mecánico de gran relevancia. Hemos de tener en cuenta que al objetivo primordial de *disminución del peso* del manipulador, hay que añadir la necesidad de mantener la rigidez y resistencia de la estructura así como la eficiencia del funcionamiento. Además ha sido necesario estudiar las posibilidades de mecanizado de los materiales dada la necesidad de fabricar diferentes piezas con formas, en muchos casos, complejas. Por ello se han fijado unos parámetros de estudio de los materiales sobre los cuales poder elaborar la elección de los mismos. Estos parámetros se explican a continuación:

- a) **Parámetros físicos:** El primer parámetro que se pretende disminuir es la masa del brazo robótico, para ello se debe estudiar la *densidad* de los materiales empleados.
- b) **Parámetros térmicos:** El segundo parámetro que se desea aumentar es la temperatura a la que puede trabajar el material sin que se produzca una alteración en sus propiedades, por lo que tenemos que estudiar su *temperatura máxima de utilización*.

El tercer parámetro que interesa disminuir es la capacidad que posee el material de dilatarse y de contraerse con los cambios de temperatura, en este caso lo que vamos a estudiar es la variación que se produce en su coeficiente de expansión térmico.

El cuarto parámetro que interesó estudiar fue el coeficiente de disipación de calor del material ya que esto repercute en el correcto funcionamiento de la estructura, pues los componentes constitutivos del brazo pueden trabajar en un rango de temperatura determinado y es deseable que este no se sobrepase.

- c) **Parámetros mecánicos:** El quinto parámetro que se quiere aumentar es la resistencia del material, por este motivo se analizó la *resistencia a la tracción*.
- d) **Parámetros químicos:** Otro parámetro que interesaba estudiar es la facilidad que tiene el material para incendiarse es decir, su inflamabilidad. Para poder tener una idea sobre esta característica, se estudió la composición química del mismo.

Dentro de los parámetros químicos también hay que tener en cuenta la *toxicidad* que puede presentar el material para el hombre, con lo que igualmente este parámetro se analizó atendiendo a la composición química del material.

- e) **Precio:** Por último se pretende que el material tenga un *coste* lo menor posible, por lo que se realizó un sondeo en distintas empresas que ofrecían un mismo material.

Atendiendo a los parámetros previamente descritos se han analizado varios materiales compuestos tanto metálicos como polímeros [70], cuyas características se recogen en la Tabla 4.3. Entre los compuestos metálicos se estudiaron aleaciones de magnesio (desechadas debido a la dificultad de su mecanizado); aleaciones de litio (presentan como principal inconveniente la peligrosidad del contacto directo); aleaciones de titanio (tienen una densidad elevada y un elevado coste para nuestro objetivo) y, por último, las aleaciones de aluminio, que ha sido una de las opciones seleccionadas.

No.	Material	Densidad (g/cm ³)	Resistencia a la tracción (MPa)	Temperatura máxima de utilización (K)	Mecanización	
1	Aleaciones	de Titanio	4.5	345 - 1172	1273	Muy Buena
2		de Aluminio	2.8	434 - 580	350 - 450	Muy Buena
3		de Magnesio	1.74	45	430 - 530	Mala
4		de Litio	0.534	-	453	-
5	Polímeros	Poliéster termoplástico extruido (PETP)	1.39	90	373 - 433	Regular
6		Poliéster termoplástico autolubricado (PETP)	1.44	78	373 - 433	Regular
7		Sulfuro de polifenileno (PPS)	1.43	75	493 - 533	Regular
8		Polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE)	0.94	40	352	Regular
9		Poliamida extruida (PA6)	1.14	80	343 - 433	Regular
10		Poliamida colada natural (PA6 G)	1.15	85	363 - 443	Regular
11		Resina acetalica virgen (POM - C)	1.41	70	373 - 413	Regular
12		Poliéterétercetona (PEEK)	1.32	90 - 100	416 - 523	Regular
13	Fibras	Fibra de carbono	1.6	3400	413 - 493	Regular

Tabla 4.3.- Materiales estudiados para la fabricación de la estructura del manipulador.

La aleación de aluminio seleccionada, aunque presenta una densidad superior a la de otros compuestos metálicos analizados, 2,8 g/cm³, no presenta sus inconvenientes. Es un material de fácil mecanizado, sin inconvenientes en cuanto a su peligrosidad o toxicidad [70], Tabla 4.4.

También se llevó a cabo un exhaustivo estudio de varios polímeros [70]. En general estos compuestos presentan muy buenas características en cuanto a su densidad y resistencia. Concretamente el poliéster termoplástico extruido (PETP; 1,39 g/cm³), el sulfuro de polifenileno (PPS; 1,43 g/cm³) y la polieteretercetona (PEEK; 1,32 g/cm³), se pueden considerar compuestos muy adecuados para nuestra aplicación. Sin embargo, los costes y la dificultad de mecanizado han hecho desestimar su utilización para este primer prototipo. Por otra parte, consideró la utilización de fibra de carbono cuyas características físicas se recogen en la Tabla 4.5 y cuya densidad es 1,77 g/cm³.

Finalmente, los materiales seleccionados fueron el aluminio 7075 y la fibra de carbono cuyas características físicas se presentan en las Tablas 4.4 y 4.5 respectivamente.



Material	Propiedades Mecánicas				Propiedades Físicas						
	Características a la tracción		Resistencia a la cizalladura	Módulo elástico	Densidad	Coeficiente de dilatación lineal a 100 °C	Conductividad		Intervalo de fusión °C	Coeficiente de Poisson	Calor específico a 100 °C
	Rm.	Rp					Térmica	Eléctrica			
N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	g/cm ³	10 ⁶ /K	W/m°C	%IACS	°C	/	J/Kg °C	
Aluminio (7075)	540	480	330	72.000	2.80	23.5	130	34	475-630	0.33	915

Tabla 4.4.- Características del aluminio 7075 con el que se va a fabricar las articulaciones.

Material	Densidad	Resistencia a la Tracción (0°)	Resistencia a la Compresión (0°)	Módulo Tensor (0°)	Módulo Tensor (90°)	Resistencia a la ruptura Interlaminar (0°)	Módulo de esfuerzo Cortante (0°)
	g/cm ³	Mpa	MPa	GPa	GPa	MPa	MPa
Fibra de Carbono Tipo HT²	1.77	3400	1200	130	10	80	5500

Tabla 4.5.- Características de la fibra de carbono con la que se va a fabricar el antebrazo y el brazo.

Material	Densidad	Dureza Superficial	Resistencia a la Tracción	Elongación a rotura	Módulo Elástico (tracción)
	g/cm ³	/	MPa	%	MPa
Resina Epoxi Tipo TRIEPOX L, M	1.14 ±3%	305 ±5	50 ±5	3.8 ±0.1%	1700 ±120

Tabla 4.6.- Características generales de la resina epoxi que se utiliza con la fibra de carbono.

² HT = High Tensile (Alta resistencia)

Rm = Carga de rotura N/mm².

Rp = Límite elástico N/mm².

Pa = Pascales Unidad de presión del Sistema Internacional de Unidades (1N/m²).

N = Newton. Unidad de fuerza del Sistema Internacional de Unidades (Kg·m·s⁻²).
(-273,15 °C).

K = Kelvin. Unidad de temperatura del Sistema Internacional de Unidades, equivale a

W = Watts. Unidad de potencia del Sistema Internacional de Unidades (J/s).

J = Julios. Unidad de energía del Sistema Internacional de Unidades (N·m).

IACS = es la abreviatura utilizada para International Annealed Copper Standard y el número que precede a "IACS" es el porcentaje de conductividad del material relativo al cobre, que se considera del 100% de conductividad.

Por su parte la Tabla 4.7 recoge los parámetros que fueron determinantes en la elección final de estos materiales para la fabricación de la estructura. Además se valoró también la utilización de una resina epoxi en combinación con la fibra de carbono y cuyas características físicas se presentan en la Tabla 4.6. Cabe señalar que la mayoría de las partes estructurales se han fabricado con aluminio 7075 mientras que los eslabones 3, 4, 5 y 6 se han construido con fibra de carbono.

Parámetro	Aluminio 7075	Fibra de carbono en matriz de epoxy
Densidad (gr/cm ³)	2.77 - 2.83	1.55 - 1.77
Resistencia a la tracción (MPa)	434 - 580	3400
Temperatura máxima de utilización (K)	350 - 450	413 - 493
Coefficiente de dilatación térmica (μmm/K)	22.9 - 24.1	0.36 - 4.02
Toxicidad	No tóxico	No tóxico
Inflamabilidad	Buena	Buena
Respuesta ante procesos de mecanizado	Muy Buena	Regular
Precio (€Kg)	1.15 - 1.88	47.86 - 58.97

Tabla 4.7.- Propiedades de la aleación de aluminio 7075 y de la fibra de carbono en matriz de epoxy.

4.4.4. Preselección de los componentes

En esta sección se aborda y resuelve la elección de los componentes críticos del diseño, esto es: motores y reductores. Para ello se llevaron a cabo comparaciones entre las distintas tecnologías disponibles en el mercado para cada tipo de componente. En todos ellos se buscó minimizar el peso a la vez que maximizar las capacidades mecánicas como son par, par admisible y carga admisible.

4.4.4.1. Elección de los motores

La elección de los motores se llevó a cabo mediante el análisis de las ventajas y desventajas de las distintas tecnologías de motores aptas para este tipo de aplicación. Finalmente, se valoraron las diferentes alternativas entre las familias comerciales para elaborar la elección final.

A continuación se presenta una breve descripción de cada una de las tecnologías de motores que se consideraron donde se valoran las ventajas y desventajas que cada una de ellas presenta bajo la perspectiva de su aplicación en esta tesis.

1. DC Brushed:

Este motor de corriente continua con escobillas es un sistema rotor-estator que genera un par al serle aplicada una corriente continua [71]. El mecanismo de funcionamiento es expuesto en la Figura 4.9.

Al aplicar corriente, se genera en el bobinado del rotor un campo magnético que hace que el mismo rotor se mueva alineándose con los polos del campo magnético permanente del estator. La corriente llega al rotor a través de las escobillas, que son placas de material conductor que están conectadas al bobinado a través del conmutador de dicho rotor.

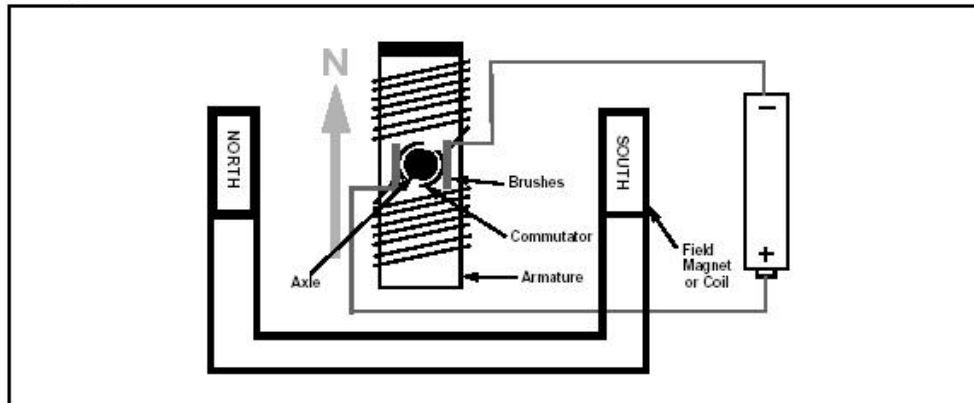


Figura 4.9.- Esquema del funcionamiento de un motor DC con escobillas.

Al girar para alinearse, el rotor conmuta la corriente, ya que las conexiones de las escobillas se invierten. De esta manera la corriente cambia de dirección y por tanto de polaridad, lo que a su vez origina un nuevo alineamiento del rotor debido a la repulsión del campo magnético invertido. Este nuevo alineamiento provoca una nueva conmutación y así sucesivamente.

Entre las principales **ventajas** que presenta esta tecnología de motores están la fácil conmutación electrónica necesaria para hacerlo funcionar lo que junto con su principio de funcionamiento hace que el control del sistema sea muy simple. Además, aunque el par generado no es muy elevado, la alta velocidad alcanzable hace que una reducción sea posible, con el aumento consiguiente de par.

Entre sus **desventajas** destacan las escobillas que, al tener un contacto continuo con el rotor, se acaban desgastando, por lo que hay que reponerlas y suponen un mantenimiento extra. A esto hay que añadir el hecho de que se dispone de bajo par generado y además la disipación de calor en el bobinado es más complicada al estar en el interior del cuerpo del motor, lo que la dificulta, reduciendo el rendimiento mecánico.

2. DC Brushless:

Los motores DC Brushless son motores de corriente continua sin escobillas. Dichos elementos, que caracterizaban la conmutación en la tecnología anterior, se sustituyen por una conmutación electrónica [71].

Tal y como se ve en la Figura 4.10, el material magnético es ahora el rotor, mientras que en el exterior, el estator es el bobinado. La generación de par se produce al ser atraído el polo de material magnético del rotor, por el campo generado por la corriente en el respectivo polo del estator, produciéndose así una fracción de giro. Detectado este giro por un sistema sensor, se produce la conmutación electrónica que activa la corriente en el polo contiguo del estator. Esto continúa el movimiento giratorio al repetirse el

proceso una y otra vez. El número de polos y la forma exacta de conmutación, determinará el par de giro del sistema y sus características dinámicas.

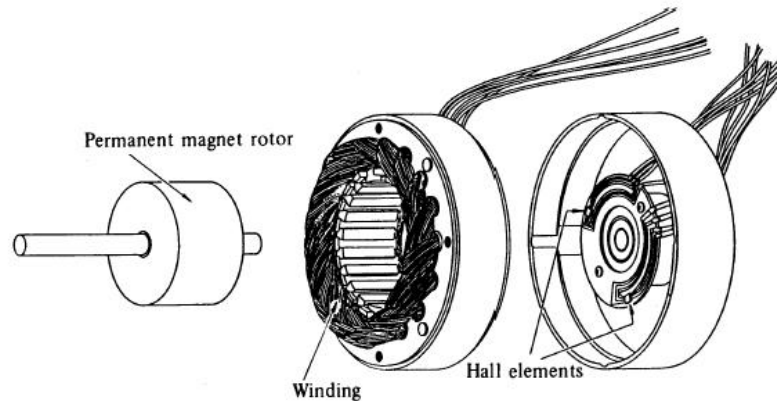


Figura 4.10.- Esquema de montaje de un motor de corriente continua sin escobillas.

Como **ventajas** de esta tecnología podemos citar su larga vida de operación debido a que no es necesario reponer escobillas y su alta capacidad de respuesta debido al alto ratio par/inercia. Además posee una baja resistencia térmica al estar el bobinado en el estator, situado en el exterior, lo que aumenta el rendimiento por aumento de disipación calorífica.

Respecto a sus desventajas cabe mencionar el bajo par generado, sobre todo en motores con materiales magnéticos convencionales y la complicación extra en el sistema debido a la necesidad de añadir una conmutación electrónica, dependiente de sensores de posición.

3. Direct Drive DC Torque motors:

Un motor DC Direct Drive es en realidad una variación de un motor DC con escobillas. Su procedimiento de funcionamiento y conmutación es idéntico. Lo que lo diferencia es que el tamaño de su estator y rotor aumenta en la dirección radial, permitiendo elevar el número de polos del sistema, Figura 4.11. Esto, aumenta considerablemente el par, reduciendo la posibilidad de alcanzar grandes velocidades. El aumento de tamaño radial, suele venir acompañado de una disminución de anchura del sistema, lo que produce motores en forma prácticamente de anillo [71].

En lo referente a esta aplicación fueron descartados ya que tienen un problema parecido al que se verá posteriormente en los motores ultrasónicos y es que a pesar de su elevada capacidad de generación de fuerza, no son capaces de dar el suficiente par, para el manipulador sin una reducción intermedia. Esta reducción, debido a la escasa velocidad que pueden desarrollar, no es suficiente, por lo que ni cumplen las especificaciones de velocidad ni par necesario.

4. Motores piezoeléctricos:

Los motores piezoeléctricos o ultrasónicos, Figura 4.12, son motores basados en el principio de generación de par a través de la transmisión de una onda de flexión (flexural wave, en inglés) a través de una capa de material.

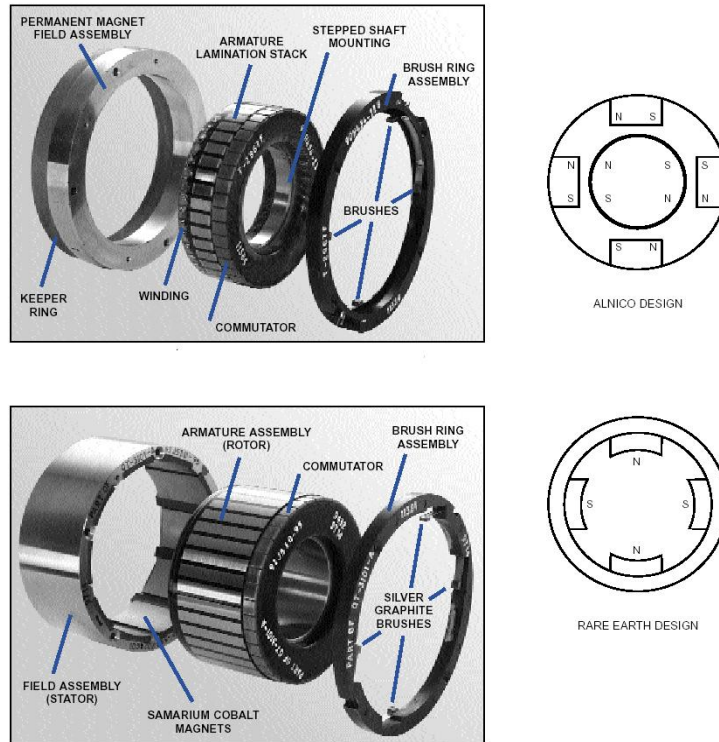


Figura 4.11.- Despiece de motores Direct Drive DC.

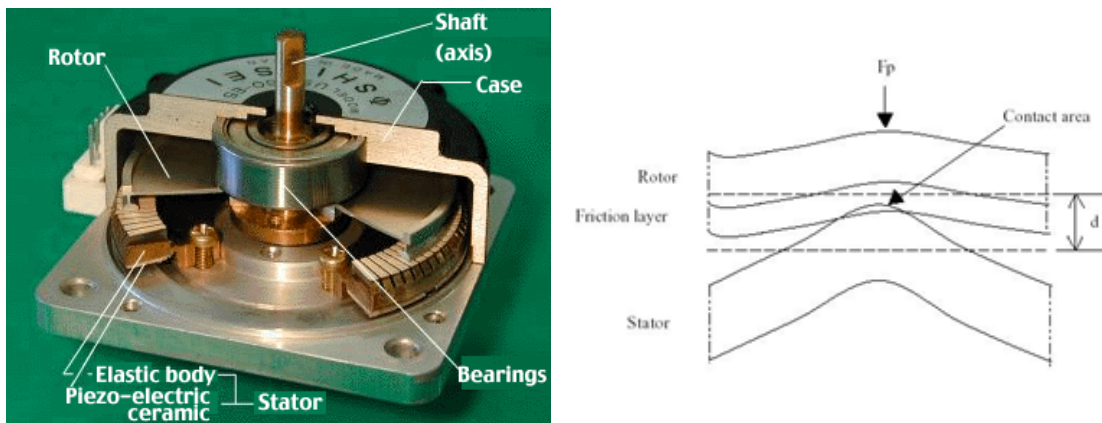


Figura 4.12.- Motor ultrasónico. Izqda. despiece sobre montaje físico. Dcha. detalle de transmisión de par mediante contacto.

Esta onda es producida por el fenómeno piezoeléctrico de dilatación de un material cerámico al serle aplicada una tensión variable. Este material cerámico, cuya naturaleza varía, típicamente es montado en anillo, formándolo diferentes sectores independientes entre sí [72]. Este material piezoeléctrico es el que forma el estator. Son las dilataciones sucesivas de estos sectores junto con la transmisión de la fuerza a partir de la fricción con la capa de material intermedio, lo que genera el par en el rotor.

Entre sus **ventajas** destacan la capacidad de proporcionar un par elevado para su tamaño y características si lo comparamos con los motores convencionales, pero de una muy baja velocidad. Además su consumo de energía es mínimo lo que junto a su bajo peso, lo hace ideal para sistemas portátiles. A esto hay que añadir su capacidad de respuesta para un fácil control y su bajo precio de adquisición.

Sin embargo, aunque esta capacidad de generación de par es elevada, no lo es suficiente para proporcionar la fuerza necesaria para esta aplicación sin reductores. Al necesitar por tanto un aumento del par con la consiguiente reducción de la velocidad, el mecanismo se hace inservible, debido a que su máxima velocidad es de 100 r.p.m. y sólo permite una reducción máxima de 3 o 4 veces en la velocidad, lo que ni cumpliría con los requerimientos de velocidad ni de par del manipulador.

A este respecto en [73], se han llegado a montar varios motores ultrasónicos en una misma articulación, lo que aumenta la capacidad de generación de par o en algunos casos, permite un control de tres ejes en una articulación de rótula. Ambas disposiciones se rechazaron en este proyecto por no dar el par suficiente y vulnerar en el segundo caso, además, el modelo cinemático del manipulador.

Conclusiones:

Analizadas las distintas tecnologías se llevo a cabo un análisis exhaustivo de diferentes familias comerciales de actuadores aptos para este tipo de aplicación. Este análisis tuvo en cuenta parámetros tales como máximo ratio par/peso, velocidad que posibilite reducción adecuada y mínimo consumo. La correcta adecuación de estos parámetros son requisitos indispensables para la elección de uno u otro tipo de motor.

Por citar algunas de las familias comparadas tenemos del fabricante Kollmorgen (motores Brushless DC Housed, Direct Drive DC Torque motors y Brushless Frameless), del fabricante ELMEQ (Motores Brushless y Motores CC compatibles) así como modelos de los fabricantes MACCON y SHIN-SEI.

Las Tablas 4.8 a 4.11 muestran una comparación por articulación de las distintas familias comerciales estudiadas junto con los valores de los parámetros mecánicos, eléctricos y los ratios que se han analizado para llevar a cabo la elección de los motores. En cada tabla se realiza un balance de 0 a 100. El valor máximo 100 se asigna al mejor valor de la característica analizada en los diferentes motores. Este número marca el mejor valor de esta característica, independientemente si interesa lo más bajo posible (consumo) o lo más alto (ratio par/peso). Por tanto los valores de las tablas se obtienen de la forma siguiente: en parámetros cuyo valor deseable es alto se aplica la fórmula [4.1] y en aquellos parámetros cuyo valor deseable es el menor se aplica la fórmula [4.2]:

$$NOTA = \frac{caracteristica \cdot 100}{caracteristica_techo} \quad [4.1]$$

$$NOTA = \frac{caracteristica_techo \cdot 100}{caracteristica} \quad [4.2]$$

La nota reflejada en cada tabla es relativa a las características de los demás motores, sin importar si esa característica es de mayor o menor importancia para la elección. Como se comentó previamente, priman el **mínimo peso** y el **máximo par nominal desarrollable** después de la reducción. Las características que reciben la nota numérica de cero en algunos casos, es debido a que un motor o familia están muy por encima de los demás, llegándose a desvirtuar en cierta medida la comparación. Esto sucede en características poco relevantes para la comparación, por lo tanto no se profundiza.



ARTICULACIÓN 1 y 2									
MODELO	KOLLMORGEN			SHIN-SEI	PACIFIC SCIENTIFIC	CATÁLOGO ELMEQ		MAXON MOTOR	MACCON
	HOUSED	FRAMELESS	DIRECT DRIVE DC TORQUE	USR60-E3	PMB-23	BRUSHLESS	MOTORES CC	MOTORES CC	DC BRUSHLESS HOUSED TIPO QUANTUM
RBEH-01812	RBEF-01812	QT-3801	BG83X90S			M644	RE75-118839	QB02303 B	
MECÁNICAS									
Par máximo	34	34	24	7	34	70	100	46	76
Par nominal	75	75	100	31	94	74	62	57	79
Peso	21	36	47	100	9	5	7	10	19
Velocidad Nominal	100	100	6	2	94	64	70	39	46
Velocidad Máxima	100	100	4	1	N/D	23	24	29	22
Reducción posible	100	100	6	2	94	64	70	39	46
Par nominal final	85	85	7	1	100	53	49	25	40
Par máximo final	48	48	2	0	45	63	100	26	49
ELÉCTRICAS									
Potencia (Watts)	1	1	5	100	0	1	1	2	1
Alimentación	12	12	100	11	4	34	28	28	34
Corriente nominal (Amps)	1	1	1	100	1	0	1	1	0
Corriente máxima (Amps)	48	48	74	N/D	100	15	10	48	13
RATIOS									
Ratio Par/Peso	34	57	100	66	19	8	9	12	33
Ratio Par final/Peso	59	100	11	3	31	9	11	8	26
Ratio Par Máximo/Peso	49	82	76	50	22	24	48	31	100
Ratio Par Máximo final/Peso	59	100	6	1	25	19	41	15	55

Tabla 4.8.- Comparación normalizada de los motores seleccionados para las articulaciones 1 y 2.

N/D = No Disponible.



ARTICULACIÓN 3									
	KOLLMORGEN			SHIN-SEI	PACIFIC SCIENTIFIC	CATÁLOGO ELMEQ		MAXON MOTOR	MACCON
	HOUSED	FRAMELESS	DIRECT DRIVE DC TORQUE	USR60-E3	PMB-13	BRUSHLESS	MOTORES CC	BRUSHLESS	DC BRUSHLESS HOUSED TIPO QUANTUM
MODELO	RBEH-01214	RBE-1214	QT-4602			BG83X90S	M543	EC60-167132	QB02301 B
MECÁNICAS									
Par máximo	17	17	10	8	14	81	22	100	51
Par nominal	39	39	46	42	46	100	27	55	57
Peso	43	64	75	100	21	5	17	11	30
Velocidad Nominal	94	94	8	1	100	24	29	41	26
Velocidad Máxima	100	100	9	1	N/D	16	24	35	20
Reducción posible	225	225	18	2	240	58	69	98	63
Par nominal final	36	36	8	1	100	53	17	49	32
Par máximo final	17	17	2	0	34	47	16	100	32
ELÉCTRICAS									
Potencia	2	2	5	100	0	1	4	1	2
Alimentación	10	10	100	13	5	38	32	32	38
Corriente nominal	1	1	1	100	1	0	2	0	1
Corriente máxima	100	100	93	N/D	97	19	64	10	22
RATIOS									
Ratio Par/Peso	40	60	82	100	23	12	11	15	41
Ratio Par final/Peso	67	100	25	3	93	12	13	24	42
Ratio Par Máximo/Peso	48	71	48	56	19	27	25	74	100
Ratio Par Máximo final/Peso	66	98	12	2	64	22	24	100	86

Tabla 4.9.- Comparación normalizada de los motores seleccionados para la articulación 3.

N/D = No Disponible.



Capítulo IV: Diseño del manipulador robot ligero: prototipo experimental

ARTICULACIÓN 4 y 5									
	KOLLMORGEN			SHIN-SEI	PACIFIC SCIENTIFIC	CATÁLOGO ELMEQ		MAXON MOTOR	MACCON
	HOUSED	FRAMELESS	DIRECT DRIVE DC TORQUE	USR30-E3A	PMB-11	BRUSHLESS	MOTORES CC	BRUSHLESS	DC BRUSHLESS HOUSED TIPO QUANTUM
MODELO	RBEH-00713	RBE-00713	T-1911			4490HB-K312	3863HC	RE40-148877	QB01702 B
MECÁNICAS									
Par máximo	22	22	15	4	24	100	45	91	68
Par nominal	85	85	92	22	96	83	48	87	100
Peso	19	32	24	100	11	9	16	14	14
Velocidad Nominal	100	100	6	2	6	95	57	65	56
Velocidad Máxima	100	100	7	1	N/D	80	40	41	56
Reducción posible	225	225	14	4	15	213	127	145	125
Par nominal final	68	68	10	1	11	66	38	70	100
Par máximo final	22	22	2	0	3	100	45	91	85
ELÉCTRICAS									
Potencia	1	1	4	100	1	1	2	1	1
Alimentación	11	11	100	7	16	16	32	32	19
Corriente nominal	0	0	0	100	0	0	0	0	0
Corriente máxima	77	77	100	N/D	56	12	20	19	19
RATIOS									
Ratio Par/Peso	59	100	82	80	38	27	29	44	51
Ratio Par final/Peso	59	100	12	3	6	27	29	44	64
Ratio Par Máximo/Peso	33	56	30	30	21	71	60	100	76
Ratio Par Máximo final/Peso	33	56	4	1	3	71	60	100	95

Tabla 4.10.- Comparación normalizada de los motores seleccionados para las articulaciones 4 y 5.

N/D = No Disponible.



Capítulo IV: Diseño del manipulador robot ligero: prototipo experimental

ARTICULACIÓN 6									
	KOLLMORGEN			SHIN-SEI	PACIFIC SCIENTIFIC	CATÁLOGO ELMEQ		MAXON MOTOR	MACCON
	HOUSED	FRAMELESS	DIRECT DRIVE DC TORQUE	USR30-E3A	PMB-11	BRUSHLESS	MOTORES CC	MOTORES CC	DC BRUSHLESS HOUSED TIPO QUANTUM
MODELO	RBEH-00712	RBE-00712	QT-1401			4490HB-K312	3863HC	RE35-118782	QB01701 B
MECÁNICAS									
Par máximo	16	16	14	4	24	100	45	22	43
Par nominal	69	69	88	23	100	87	50	50	68
Peso	21	40	52	100	11	9	16	19	19
Velocidad Nominal	100	100	6	2	6	85	51	32	32
Velocidad Máxima	100	100	7	1	N/D	80	40	41	56
Reducción posible	250	250	15	4	15	213	127	81	79
Par nominal final	80	80	15	1	17	100	58	47	62
Par máximo final	16	16	2	0	3	100	45	18	34
ELÉCTRICAS									
Potencia	1	1	1	100	1	1	2	1	1
Alimentación	25	25	100	13	30	30	61	30	36
Corriente nominal	0	0	0	100	0	0	0	1	0
Corriente máxima	64	64	43	N/D	47	10	17	100	18
RATIOS									
Ratio Par/Peso	32	60	100	50	24	16	18	21	28
Ratio Par final/Peso	54	100	25	3	6	27	30	28	38
Ratio Par Máximo/Peso	40	74	84	42	30	100	85	49	95
Ratio Par Máximo final/Peso	40	74	13	2	4	100	85	40	75

Tabla 4.11.- Comparación normalizada de los motores seleccionados para la articulación 6.

N/D = No Disponible.

En caso de requerir una información comparativa más detallada, se remite al Anexo II, en donde además de las tablas normalizadas, se presentan las tablas originales de comparación, con todos los valores reales de las características.

Por otro lado la característica de **reducción posible** recibe notas mayores de 100. Esto es así debido a que la máxima reducción que pueden otorgar los reductores seleccionados es de 160. Cualquier valor por encima de éste, es considerado superfluo y por tanto se ha preferido remarcarlo de esta manera para una mejor comparación.

Como conclusión del análisis, la familia comercial más apropiada para la aplicación considerada fue la Kollmorgen Brushless Frameless ya que es la que maximizaba en todas las ocasiones el ratio par nominal final/peso, por delante de sus competidoras. Sin embargo, se encontró un impedimento en la elección de esta tecnología de índole práctico: los Kollmorgen Brushless Frameless son motores Kollmorgen sin carcasa.

Esto es, consiguen su bajo peso debido a que el fabricante sólo proporciona el rotor y el estator, así como los cables necesarios para su alimentación. Esto comprometería seriamente el diseño, pues era necesario diseñar una carcasa para el sistema que protegiera a la articulación, así como integrar rodamientos internos, eje y tapa final en el conjunto. Esto, sin lugar a dudas, aumenta más el peso de lo que implica el reducirlo por quitar la carcasa. Además, aún en el caso de que se aceptara diseñar las articulaciones para contener a los motores sin carcasa, esto sólo tendría sentido hacerlo en las dos primeras, ya que el ahorro de peso en los motores posteriores es más que despreciable. Por todo ello, la elección final en cuanto a actuadores fueron los motores sin escobillas (**Brushless**) con carcasa de categoría (**RBEH**) **DC de KOLLMORGEN**. En la Tabla 4.12 se muestra la elección del modelo para cada articulación junto con sus parámetros.

4.4.4.2. Elección de los reductores

Para la elección de los reductores, al igual que con los actuadores, se llevó a cabo un estudio comparativo de las diferentes tecnologías de acuerdo a una serie de parámetros determinados por los requisitos del diseño. Posteriormente se valoraron las alternativas, entre las distintas familias comerciales de la tecnología elegida, para finalmente seleccionar la más idónea.

A continuación se presenta una breve descripción de cada una de las tecnologías de reductores consideradas en la elección junto con las ventajas e inconvenientes que presentan y que justifican la elección final de los mismos.

1. Reductores Harmonic Drive:

El principio Harmonic Drive [74] se basa en una pequeña diferencia de diámetro entre dos elementos de un engranaje parecido a un sistema planetario, Figura 4.13. El engranaje interior - llamado *flexspline* -, de tamaño levemente elipsoidal debido al mecanismo de introducción de giro que lleva acoplado - llamado *wave generator* - tiene dos dientes menos que la corona circular exterior - llamada *circular spline* -.

El *flexspline* se acopla entonces a la corona circular haciendo coincidir los dientes externos del eje mayor de la elipse. Al introducir un giro en el elemento interior, éste gira, produciéndose contacto solamente entre los dientes cercanos al eje mayor de la

citada elipse. Debido al desfase de dientes, por cada vuelta, la corona interior se “retrasa” con respecto a la exterior, dos dientes, con lo que se produce el efecto de reducción en el otro extremo del *flexspline*. Dependiendo de qué elemento esté fijo y cuál móvil se producirá un tipo de reducción u otro.

Parámetros de los Motores	Símbolos	Unidades	Grados de Libertad (GDL)						
			1	2	3	4	5	6	
			Tipo de Motor						
			01812-A	01812-A	01214-A	00713-B	00713-B	00712-B	
Máxima Potencia Continua a la Salida a 25°C	P Rated	Watts	364	364	216	141	141	124	
Velocidad en el Rango de Potencia	N Rated	RPM	4350	4350	6230	10800	10800	12000	
Velocidad Mecánica Máxima	N Max.	RPM	14000	14000	18000	20000	20000	20000	
Par Mantenido Continuo a 25°C	Tc	N-m	1.22	1.22	0.467	0.195	0.195	0.152	
Par Máximo	Tp	N-m	4.62	4.62	1.99	0.597	0.597	0.447	
Par Máximo para KT Lineal	Tsl	N-m	2.92	2.92	1.99	0.597	0.597	0.447	
Motor	Inercia	Jmh	Kg-m ²	8.76E-05	8.76E-05	1.98E-05	2.54E-06	2.54E-06	1.98E-06
	Peso	Wth	Kg	1.30E+00	1.30E+00	6.41E-01	3.44E-01	3.44E-01	3.04E-01
Corriente en Par Continuo	Ic	Amps	4.91	4.91	6.15	3.51	3.51	3.65	
Corriente en Par Máximo	Ip	Amps	21.3	21.3	25.3	10.0	10.0	10.0	
Constante de Par	Kt	N-m/Amp	0.257	0.257	0.0799	0.0611	0.0611	0.0458	
Constante de EMF	Kb	V/KRPM	26.9	26.9	8.36	6.40	6.40	1.80	
Resistencia del Motor	Rm	Ohms	1.88	1.88	0.666	1.70	1.70	1.47	
Inductancia del Motor	Lm	MH	2.5	2.5	0.48	1.1	1.1	0.84	
Alimentación	V	Volts	96	96	48 , 96	48	48	48	

Tabla 4.12.- Modelos comerciales de actuadores para cada articulación y parámetros.

Como principales **ventajas** de esta tecnología están su gran precisión de posicionamiento y repetibilidad, un alto par admisible de entrada y alto par otorgado a la salida así como su alta eficiencia y alta rigidez torsional. Además, debido a la precarga en el mecanismo hay prácticamente nulo backlash³ [75].

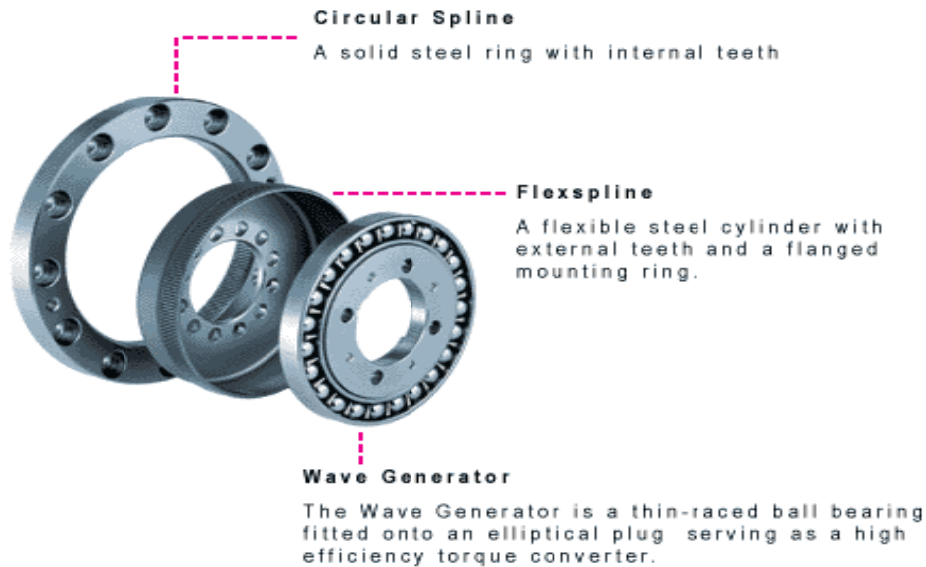


Figura 4.13.- Componentes de un montaje Harmonic Drive AG, CSD.

En cuanto a las principales **desventajas** que encontramos es que no presenta una rigidez mecánica comparable a los mecanismos convencionales si no se le acoplan elementos que se encarguen de ello, como reductores o acoplamientos en carcasa. Otro aspecto importante es que su precio, debido a sus altas prestaciones, es ciertamente elevado.

2. Reductores convencionales de engranajes planetarios:

Los reductores de engranajes planetarios basan su principio de reducción en la diferencia de tamaño entre dos ruedas dentadas con una distinta relación de dientes [75], Figura 4.14. Dicha relación marca de manera unívoca la relación de reducción. De esta manera, la reducción de velocidad se producirá si el eje de alta velocidad es la rueda dentada con menos dientes, y la salida, la mayor.

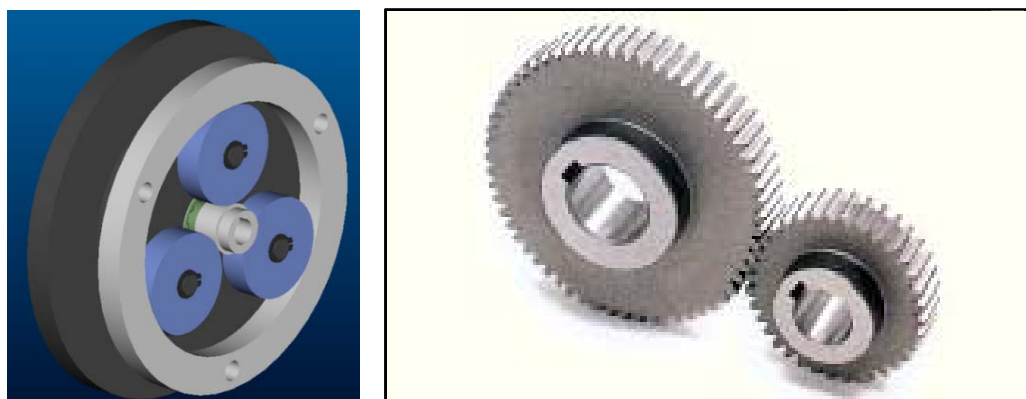


Figura 4.14.- Reductores convencionales. Izda., modelo planetario. Dcha., discos dentados.

³ Backlash: Es el error de movimiento que ocurre cuando el engranaje cambia su dirección de giro.

Esta tecnología tiene las **ventajas** de poder dar unos ratios de reducción elevados puesto que el proceso de reducción antes expuesto puede multiplicarse en un mismo espacio con la adición de distintas etapas de reducción. Además se pueden conseguir buenos ratios de exactitud, en general es robusta y su rigidez es mayor que la de los Harmonic Drive. Sin embargo presenta importantes **desventajas** como el excesivo peso de los conjuntos de engranajes planetarios así como su exactitud y repetibilidad que no puede competir con los Harmonic Drive o los reductores de tecnología cyclo. Además, el error de backlash es siempre importante.

3. Reductores de tecnología cyclo:

Estos reductores se basan en un principio tecnológico parecido al Harmonic Drive. A través de un movimiento cicloidal de una corona dentada rígida, se obtiene la reducción, no tan exacta en movimiento como la Harmonic Drive, pero sí más competitiva que la de reductores planetarios convencionales [71], Figura 4.15.

Entre sus **ventajas** destacan su mayor robustez al incorporar carcasa con elementos de absorción de impactos y cargas elevadas así como la poca vibración durante el desempeño y su gran eficiencia a bajas velocidades.

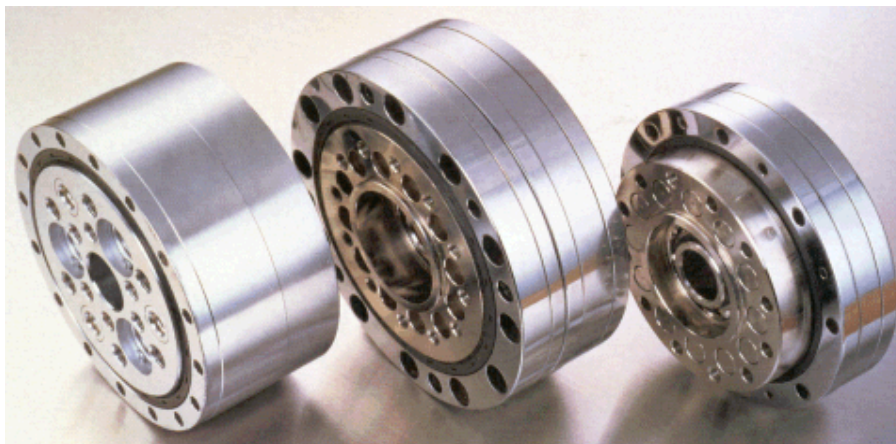


Figura 4.15.- Montajes físicos de reductores de tecnología cyclo.

En cuanto a sus **desventajas** se encuentran su elevado peso y las características de exactitud que presenta que no son tan competitivas como en los modelos Harmonic Drive.

Después de analizar las características de cada tecnología, la elección de los reductores se inclinaba hacia la tecnología Harmonic Drive, pues sus características de exactitud y repetibilidad eran idóneas para la aplicación robótica de esta tesis. No obstante cabía la pequeña posibilidad de encontrar datos en tecnología cyclo y convencional que mejoraran los ratios de los Harmonic Drive. Después de un estudio exhaustivo se desechó rápidamente esa posibilidad y se trabajó en encontrar una nueva familia Harmonic Drive que mejorara las capacidades de la HFUC, utilizada en prototipos anteriores. A tal efecto se buscó información de compañías que trabajaban con la patente y se eligieron dos. Finalmente, la misma casa que fabricaba los HFUC, disponía de otra familia mucho más competitiva en peso, por lo que se optó por ella. Se trataba de la familia CSD. La familia HFUC de la casa comercial Harmonic Drive AG, Figura 4.16 (a), es la usada en la versión anterior del presente proyecto. Sus características

principales son su robustez, rigidez y precisión a costa de un elevado peso por componente.

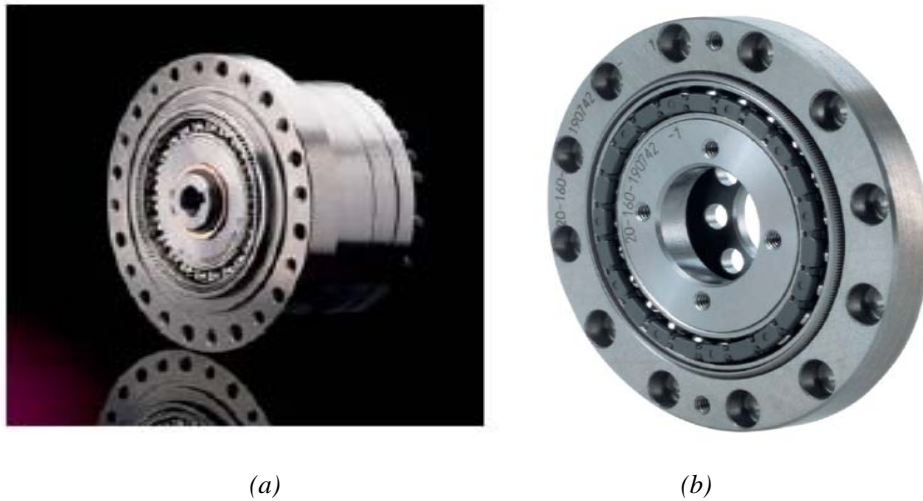


Figura 4.16.- Casa comercial Harmonic Drive AG. (a) Modelo HFUC-2UH (b) Modelo de la familia CSD.

La familia CSD también del fabricante Harmonic Drive AG, Figura 4.16 (b), presenta importantes **ventajas** respecto a su predecesora. No sólo en una enorme disminución de las dimensiones sino también en el peso y una mejora considerable en las propiedades mecánicas respecto a par admisible y otorgado. Sin embargo hay que destacar que la reducción de peso acarrea consigo una importantísima deficiencia: la falta de rodamientos de salida. Esto obligaba a una elección de dichos rodamientos en cada articulación lo que junto a un coste más elevado hizo descartar esta opción.

4.5. Descripción de los componentes finalmente seleccionados

En este apartado se presenta una descripción de los componentes finalmente seleccionados así como los materiales y demás elementos involucrados en el diseño del prototipo final.

4.5.1. Materiales

La estructura del brazo ligero fue construida en aluminio 7075 y fibra de carbono de tipo HT en matriz de resina epoxi tipo “TRIEPOX L, M”. El aluminio se usó para la construcción de las carcasas de las articulaciones, sometidas a cargas, mientras que los tubos de fibra de carbono se dedicaron a los eslabones que unían dichas articulaciones. Se consiguió así una muy buena relación resistencia-peso en toda la estructura. Las características de estos dos materiales han contribuido en gran medida a conseguir cumplir las especificaciones de diseño mencionadas al comienzo del presente capítulo.

En primer lugar, la construcción de las carcasas de las articulaciones, Figura 4.17, se fabricó utilizando la aleación de aluminio 7075, previa aplicación sobre el material de un tratamiento térmico conocido como T6. Entre sus principales características podemos mencionar su alta resistencia a la fatiga y su baja masa [76].

En segundo lugar, se utilizó la fibra de carbono de tipo HT en matriz de resina epoxy tipo “TRIEPOX L, M” para la fabricación de los eslabones que unen las articulaciones del manipulador, cuya utilización fue limitada debido a su elevada dificultad de mecanizado y conformado.

Por último cabe mencionar la utilización, en menor medida, de acero para la realización de adaptadores de los ejes de los motores y de polímero de baja densidad para las tapas de los motores.

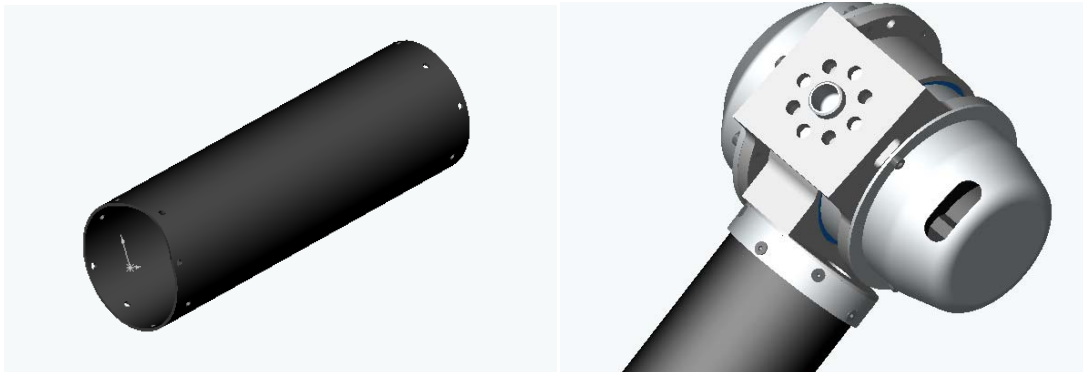


Figura 4.17.- Modelos SOLIDWORKS de piezas de la estructura. Izda., tubo de fibra de carbono. Dcha., unión articulación y tubo.

4.5.2. Reductores

Los equipos de reducción de velocidad y aumento de par que se utilizaron en dicho brazo ligero, cuya elección ha sido justificada en secciones anteriores, fueron de tipo **Harmonic Drive**, más concretamente de la compañía alemana Harmonic Drive AG en su categoría **HFUC-2UH/ shortened flexspline units with integrated output bearings**, Figura 4.18. La Tabla 4.13 muestra sus características.

Debido a la especial elección de estos reductores con unos rodamientos de salida ya integrados, no fue necesario incluir rodamientos externos.

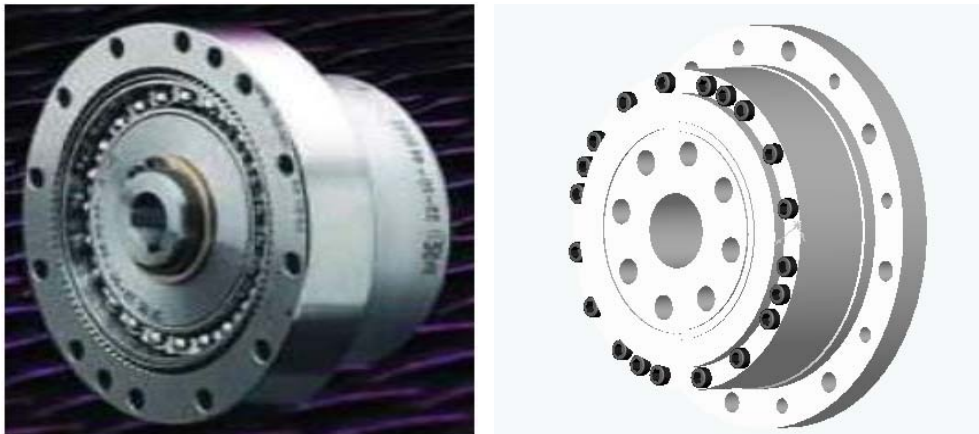


Figura 4.18.- Reductor Harmonic Drive HFUC. Izda. modelo real. Dcha. modelo SOLIDWORKS.

4.5.3. Motores

Como se justificó previamente, los motores utilizados fueron motores Kollmorgen DC Brushless de la categoría RBEH, Figura 4.19. Estos motores proporcionan el par de giro necesario así como la velocidad adecuada para soportar el aumento de dicho par.

Las principales **ventajas** de estos motores que los hacen apropiados para este tipo de aplicación son: su **elevado par suministrado**, **elevada precisión** y **elevada relación peso-par** suministrado.

Grados de Libertad (GDL)	Tipo HFUC-2UH	Relación	Par Medio a 2000 rpm T_N (Nm)	Límite para el Par Promedio T_A (Nm)	Límite para un Pico de Par Repetitivo T_R (Nm)	Límite para un Pico de Par Momentáneo	Máxima Velocidad de Entrada (rpm)		Límite para la Velocidad Media de Entrada (rpm)		Momento de Inercia (Kgm ²)	Peso (Kg)	Velocidad Angular (° / S)	Carga Estática Máxima (calculada aproximadamente) (N)
							Lubricante		Lubricante					
							Aceite Lub.	Grasa Lub.	Aceite Lub.	Grasa Lub.				
6	17	100	20	39	54	110					0.079 x10 ⁻⁴	0.64	210	3.5
4,5		120	20	39	54	86	10000	4000	6500	3500			180	10
3	20	160	40	49	92	147	10000	4000	6500	3500	0.193 x10 ⁻⁴	0.98	131	35
1,2	25	160	67	108	176	314	7500	4000	5600	3500	0.413 x10 ⁻⁴	1.5	131	90

Tabla 4.13.- Características de los equipos de transmisión.

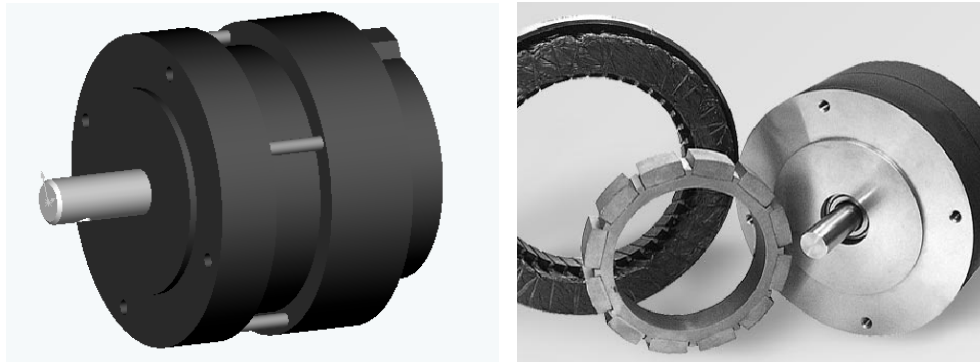


Figura 4.19.- Motor Kollmorgen. Izda., modelo SOLIDWORKS. Dcha., modelo real.

El uso de estos motores compactos y reductores armónicos libres de backlash ha permitido conseguir un movimiento muy preciso y una alta relación peso/capacidad de carga cercana a 1:3. Los parámetros de las articulaciones se muestran en la Tabla 4.14. La Figura 4.20 muestra la numeración de los motores para cada articulación.

	Articulaciones 1,2 y 3	Articulaciones 4 y 5	Articulación 6
Reducción	160	120	100
Velocidad angular máxima	131°/s	180°/s	210°/s

Tabla 4.14.- Parámetros articulares.

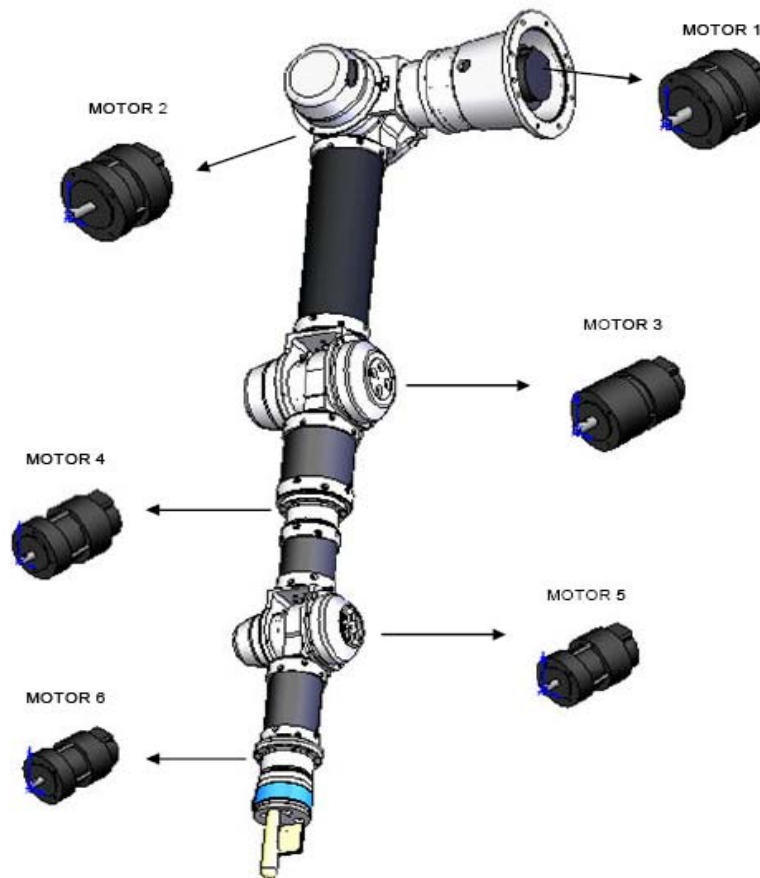


Figura 4.20.- Motores que forman parte del brazo manipulador.

4.5.4. Eliminación de frenos

Una de las características del diseño del brazo UC3M-LWR-1 es la eliminación de los frenos. Esta es una característica que no presentan el resto de los manipuladores ligeros desarrollados por otros grupos de investigación. Los reductores incorporados en cada articulación junto con la disposición antropomórfica y las configuraciones previstas para el manipulador en el desarrollo de sus tareas, permiten prescindir de la incorporación de sistemas de frenado en las articulaciones con la consiguiente reducción de coste y peso global. Este hecho es importante, ya que implica que el brazo manipulador no puede mantener una posición salvo de forma activa, al igual que ocurre con los seres humanos.

4.5.5. Sensores

Los **sensores de posición (encoders)** utilizados en cada articulación del brazo eran los incluidos por los propios motores Kollmorgen. Se trata de **encoders ópticos** de 1024 líneas de resolución, con una alimentación de 4.5 voltios y una frecuencia de conteo de 100KHz. La Tabla 4.15 muestra sus características principales.

El sensor de fuerza-par es de tipo [JR.67M25A-U560]; se sitúa entre el extremo del brazo y la pinza o elemento terminal. Este dispositivo proporciona medidas de fuerza y par en 6 ejes que se utilizan en el lazo de control de fuerza del manipulador móvil. Tiene una capacidad de carga de hasta 11 Kilogramos y una frecuencia de funcionamiento en torno a 8 KHz. Además su peso es de aproximadamente 175 gramos. El sensor se ha conectado a un receptor basado en DSP, con formato de tarjeta para bus PCI, de esta forma la corriente de medidas de fuerza y par accesibles por el software de control tiene un gran ancho de banda. La información sobre este componente se expone en mayor detalle en su hoja de catálogo [56].

Parámetros de los Encoders	Unidades		Grados de Libertad (GDL)					
			1	2	3	4	5	6
			Tipo de Encoder					
			01812-Encoder	01812-Encoder	01214-Encoder	00713-Encoder	00713-Encoder	00712-Encoder
Temperatura	°C	Max.	100	100	100	100	100	100
		Min.	-40	-40	-40	-40	-40	-40
Tensión	Volts	Max.	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5
		Min.	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
Corriente	MA	Max.	85	85	85	85	85	85
		Min.	30	30	30	30	30	30
Frecuencia	KHz		100	100	100	100	100	100
Velocidad	RPM		10K	10K	10K	30K	30K	30K

Tabla 4.15.- Características de los sensores de posición.

4.6. La herramienta del diseño: SolidWorks

SolidWorks [77] es un software de diseño mecánico automatizado para construir modelos paramétricos de piezas y ensamblajes y crear los planos dibujados de ellas. Esta herramienta de diseño, *basada en operaciones*, se utiliza para el *modelado paramétrico de sólidos* y aprovecha la facilidad de uso de la interfaz gráfica de usuario de Windows. Puede crear modelos *sólidos completamente asociativos* en 3-D con o sin *restricciones* utilizando relaciones capturadas automáticamente o definidas por el usuario para mantener la *intención de diseño*.

Además, SolidWorks ofrece la posibilidad de utilizar como complementos otras dos aplicaciones: CosmosMotion, para construir, simular y animar un ensamblaje; y CosmosWorks, para realizar análisis estáticos haciendo uso de los resultados dinámicos arrojados por Cosmos.

Ambos programas se integran completamente dentro de SolidWorks lo que nos permite trabajar sobre un mismo modelo, desde diferentes puntos de vista, sin necesidad de transferir la geometría. En cualquiera de los casos, se introducen pequeños cambios en la ventana principal, añadiéndose por ejemplo, nuevos menús que contienen todas las herramientas necesarias para realizar el tipo de análisis que consideremos oportuno.

Para una mejor comprensión de los mecanismos de diseño y funcionamiento general de la herramienta, se remite a la documentación y los manuales en línea de SOLIDWORKS, así como a los imprescindibles y útiles tutoriales.

4.7. Fases del diseño

4.7.1. Elección de la sección transversal de los elementos del brazo manipulador

En la elección de la sección transversal de los acoplamientos del brazo se buscó en términos generales, un diseño que contase con una estructura rígida y ligera para conseguir una alta exactitud de movimientos y bajas inercias, y que además satisficiera los siguientes objetivos:

1. Alta **rigidez** para garantizar exactitud en el extremo del brazo.

La exactitud es importante tanto para una operación de punto a punto como para una operación que incluya generar una trayectoria. Como concepto asociado, la repetibilidad mide la capacidad de tras varias operaciones situarse en el mismo punto. Ambos, exactitud y repetibilidad están influenciados por el diseño y la cinemática del mecanismo.

2. **Bajo peso** para minimizar las cargas gravitacionales e inerciales sobre el brazo. Dicha reducción del peso permitiría además mejorar las posibilidades de nuestro diseño. En primer lugar, si se logra una menor masa en la estructura básica del robot, mayor será la capacidad de carga del diseño, siempre que se consiga mantener la resistencia de la estructura. En segundo lugar, una menor masa conlleva una menor energía cinética y potencial con la consiguiente reducción de consumo de los elementos motores así como la posibilidad de elección de servos y mecanismos motores más sencillos y baratos. Grandes inercias conducen a

necesitar motores capaces de dar altas fuerzas y elevados pares para producir movimientos.

Además si las fuerzas de inercia son altas, se incrementan el tiempo que transcurre hasta que se atenúan las vibraciones que se producen al frenar la velocidad del brazo en movimiento hasta una posición determinada, especialmente si la rigidez es baja.

La reducción de inercias, anteriormente comentadas, disminuye el impacto en caso de producirse con otros elementos o incluso con el ser humano. Con una menor masa el brazo es menos ‘peligroso’ en un entorno próximo a los humanos.

3. **Alta resistencia** que permitirá evitar fallos del brazo bajo cargas internas o externas aplicadas estática o dinámicamente.

Los objetivos anteriormente mencionados son los más destacables en la elección de la sección transversal de los acoplamientos del brazo manipulador, pero no nos podemos olvidar de otros como la “estética”, entendiéndolo como tal la búsqueda de un diseño que no sea “agresivo” al ser humano y que, como ya se ha mencionado en numerosas ocasiones, cobra gran importancia cuando trabajamos con diseños concebidos para ser aplicados en entornos humanos. Además existen otras consideraciones de índole práctico como que los acoplamientos del brazo deben tener un área interna hueca por donde puedan extenderse cables de transmisión eléctrica, de comunicación, barras de control, etc.

Por todo ello, la forma de la sección transversal es un parámetro crítico ya que de ella va a depender el momento de inercia y su área. La rigidez a la flexión de una viga está caracterizada por su momento de inercia, mientras que su peso viene determinado por el volumen creado a partir del área de su sección transversal.

Así mismo, en el estudio del mecanismo en movimiento, encontramos que las fuerzas de inercia que aparecen debidas al movimiento dependen tanto del momento de inercia como de la masa (donde entraría directamente la influencia de la sección) del elemento escogido. En consecuencia para la elección de la sección, el primer paso fue desarrollar un análisis del diseño en base a formas distintas para las secciones del brazo, ateniéndonos siempre a los objetivos de diseño anteriormente expuestos. Para ello se realizaron distintas simulaciones con la herramienta SolidWorks donde se analizaron cada una de las siguientes secciones: **circular, cuadrada, triangular y elíptica**. Para cada tipo de sección se llevaron a cabo simulaciones, tanto en estático como en dinámico, que nos permitieron obtener resultados para valorar cada una de las opciones alternativas, Figuras 4.21, 4.22 y 4.23, a la sección circular valorada como primera opción.

De esta forma en las simulaciones en estático se midieron parámetros como la tensión máxima soportada por la estructura y la rigidez de la misma. Se observó que las tensiones alcanzaban sus valores máximos en las zonas angulosas, en los extremos de las piezas, en las zonas atornilladas, y donde se ubican huecos o agujeros. A tenor de esto, la forma determina la distribución de las tensiones, de manera que especialmente la forma triangular localizaba sus tensiones en la unión de las caras, mientras que en el lado opuesto la simetría de la forma circular deslocalizaba las zonas de tensiones máximas. En consecuencia la forma de sección que mejor respondía en cuanto a distribución de las tensiones, por el cuerpo de la estructura estudiada, era la circular.

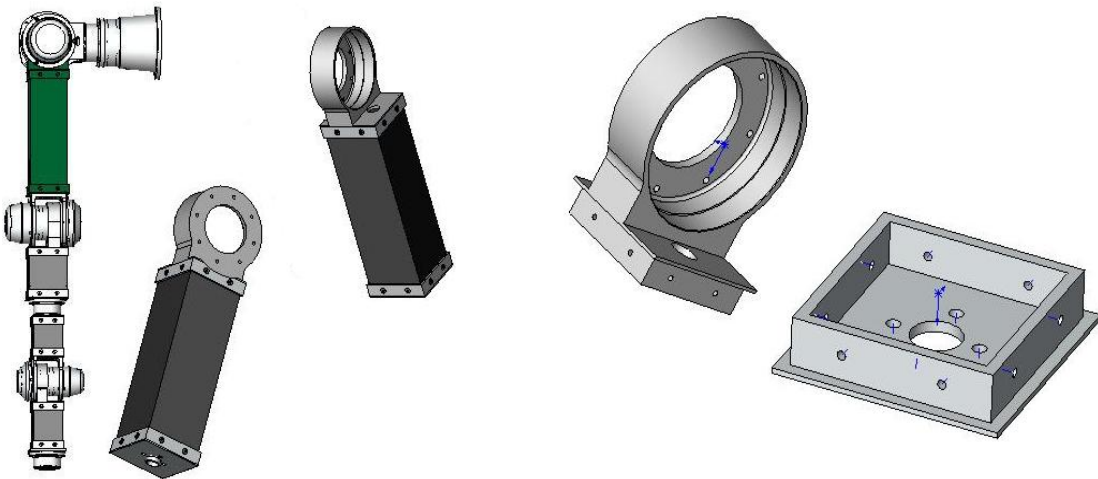


Figura 4.21.- Vista sub-ensamblaje sección cuadrada y piezas de la misma sección.

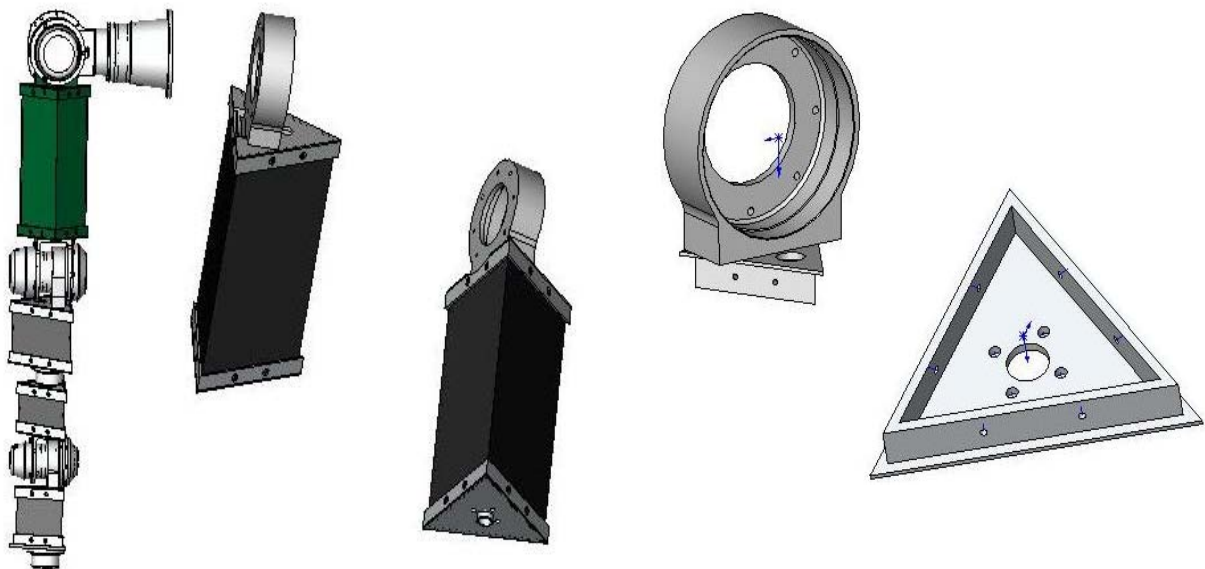


Figura 4.22.- Vista sub-ensamblaje sección triangular y piezas de la misma sección.

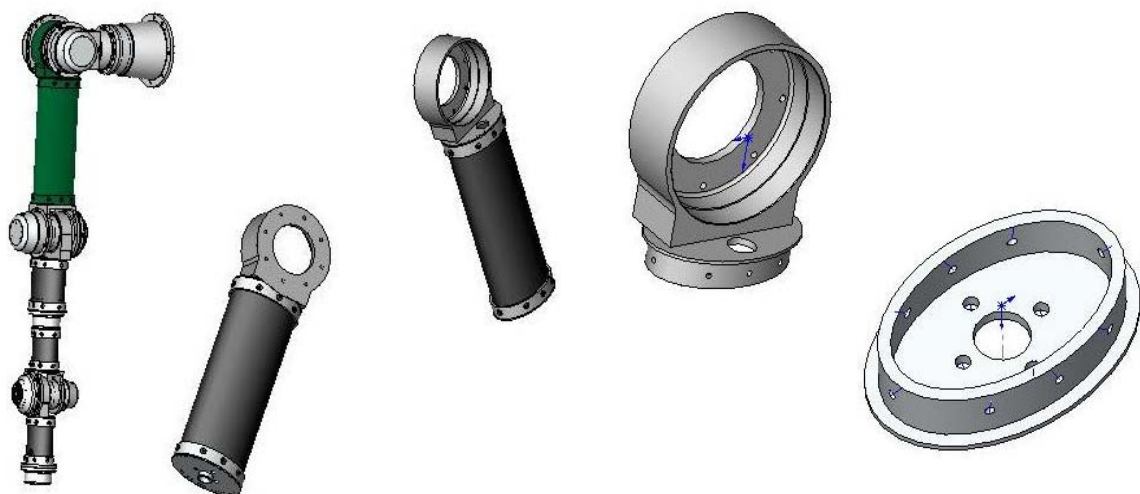


Figura 4.23.- Vista sub-ensamblaje sección elíptica y piezas de la misma sección.



La valoración de la rigidez de cada una de las estructuras se llevó a cabo mediante el parámetro de desplazamiento. Así se observó que para las secciones cuadrada y triangular se obtenía mayor rigidez pero con un ligero incremento de peso respecto a la estructura circular, mientras que la elíptica era también más rígida para igual peso que la circular.

Respecto a la simulación dinámica, en los pares y los consumos generados como consecuencia de la trayectoria descrita por el brazo, se observó una importante dependencia de los pesos de las estructuras. Aquí era destacable el comportamiento de la sección elíptica, que con el mismo peso reducía ligeramente el par y el consumo. En cualquier caso, para todas las estructuras los valores de par y consumo eran muy similares.

A la vista de los resultados que se obtuvieron en las simulaciones, se realizó la elección final de la sección teniendo en cuenta otro tipo de condicionantes como:

- a. Pese a que todas las estructuras analizadas eran de relativa fácil fabricación, dado que no tenían geometrías difíciles que imposibilitasen su manufactura, lo cierto es que la circular se perfiló como la de más sencilla fabricación, y por tanto como la más económica.
- b. Dado que el brazo estará en entornos humanos, los diseños cuadrado y especialmente el triangular, podían resultar ‘más peligrosos’. Especialmente la sección de tipo triangular.
- c. La forma cuadrada y la triangular de dimensiones similares a la circular, mejoraron la rigidez de la estructura circular en todas las simulaciones realizadas en términos de quietud. Estáticamente a tracción y flexión eran más rígidos, mientras que el comportamiento dinámico era muy similar. Sin embargo esto se conseguía con un ligero aumento del peso en la estructura total del brazo. Sólo la sección elíptica mejoraba la circular, sin modificación del peso.
- d. Es importante señalar que el brazo manipulador a lo largo de su longitud desarrolla movimientos de rotación en sus articulaciones, esto provoca que mientras para la sección circular los movimientos relativos de rotación entre sus articulaciones no provocan modificaciones del comportamiento a lo largo de la longitud del brazo, el resto de formas va a modificar su comportamiento según estos movimientos relativos. En consecuencia, las posiciones se vuelven infinitas según las posibilidades de rotación.

A modo de conclusión, se observó que existían otras secciones distintas de la circular que se mostraban más rígidas en su estructura, lo que resulta importante en operaciones donde se desee una gran exactitud en la realización de las trayectorias. Sin embargo, por razones de simetría la sección circular frente a las otras no va a depender en su comportamiento de rotaciones relativas de los eslabones y junto al resto de valoraciones hizo decantar la elección final por este tipo de sección.

4.7.2. Etapas del diseño del brazo manipulador robótico

El diseño del brazo manipulador móvil estuvo dividido en las siguientes etapas:

4.7.2.1. Primera etapa

La primera etapa del diseño se muestra en la Figura 4.24. Como se puede observar en los planos, el diseño inicial presentaba ciertos inconvenientes que fueron corregidos en sucesivas etapas de diseño. Los motores de cada una de las articulaciones se encontraban demasiado alejados del centro de gravedad de brazo comprometiendo su estabilidad. Además éste diseño no respeta el concepto de seguridad para el ser humano, de gran importancia en este proyecto, ya que cohabitará en espacios típicamente humanos. Finalmente tampoco resulta armonioso desde un punto de vista estético, ya que al sobresalir los componentes no resulta un diseño compacto semejante, en la medida de lo posible, al brazo humano.

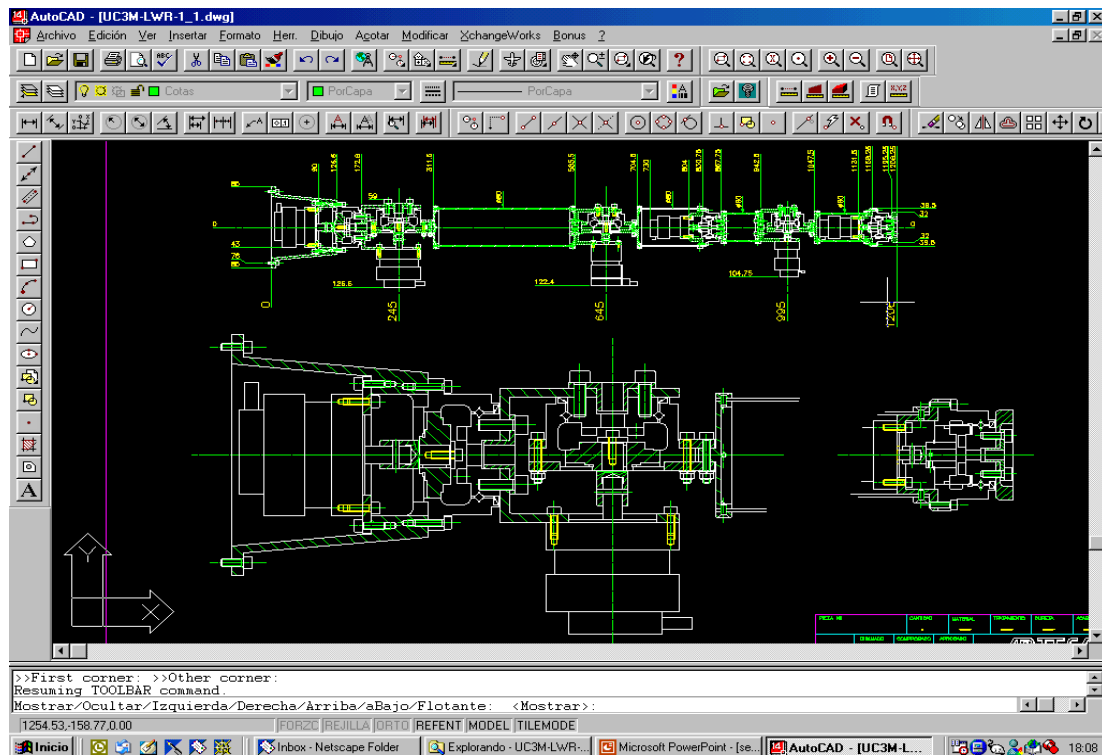


Figura 4.24.- Plano de diseño en la primera etapa.

4.7.2.2. Segunda etapa

La segunda etapa del diseño se muestra en la Figura 4.25. En ella se observa como los motores de cada una de las articulaciones se han alojado dentro de cada articulación próximos al centro de gravedad de manera que se consigue mejorar la estabilidad y la estética consiguiendo un diseño compacto. Además con estos cambios introducidos se mejora la respuesta del brazo ante vibraciones indeseadas de la estructura ya que es más rígida y compacta.

4.7.2.3. Tercera etapa

La tercera etapa del diseño, Figura 4.26, estuvo orientada a mejorar aspectos del diseño principalmente relacionados con la seguridad para los seres humanos a la vez que se mejoraba el aspecto estético. Para ello se redondearon las piezas de las carcasas en las articulaciones de manera que se redondearon las aristas que podían representar un

peligro en situaciones de impacto contra el ser humano. Además se eliminó la tornillería saliente mediante rebanado en la estructura para incrustar las cabezas de los tornillos al mismo nivel que las carcasas y por tanto dejando superficies planas.

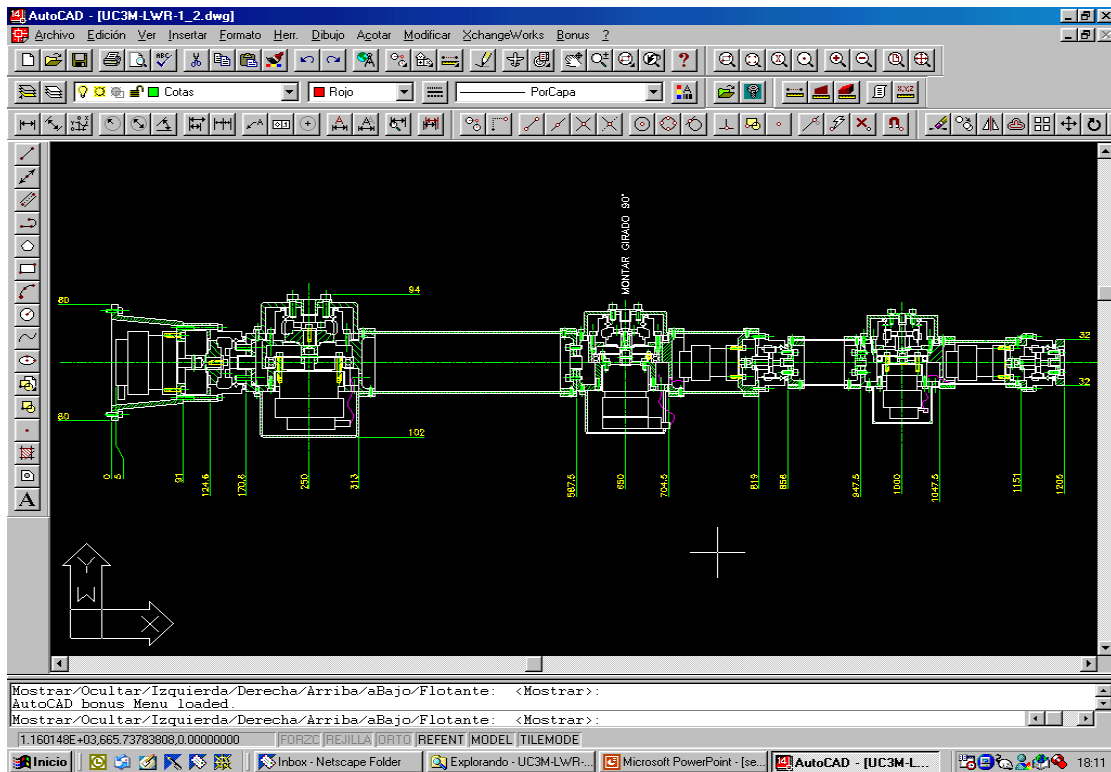


Figura 4.25.- Plano de diseño en la segunda etapa.

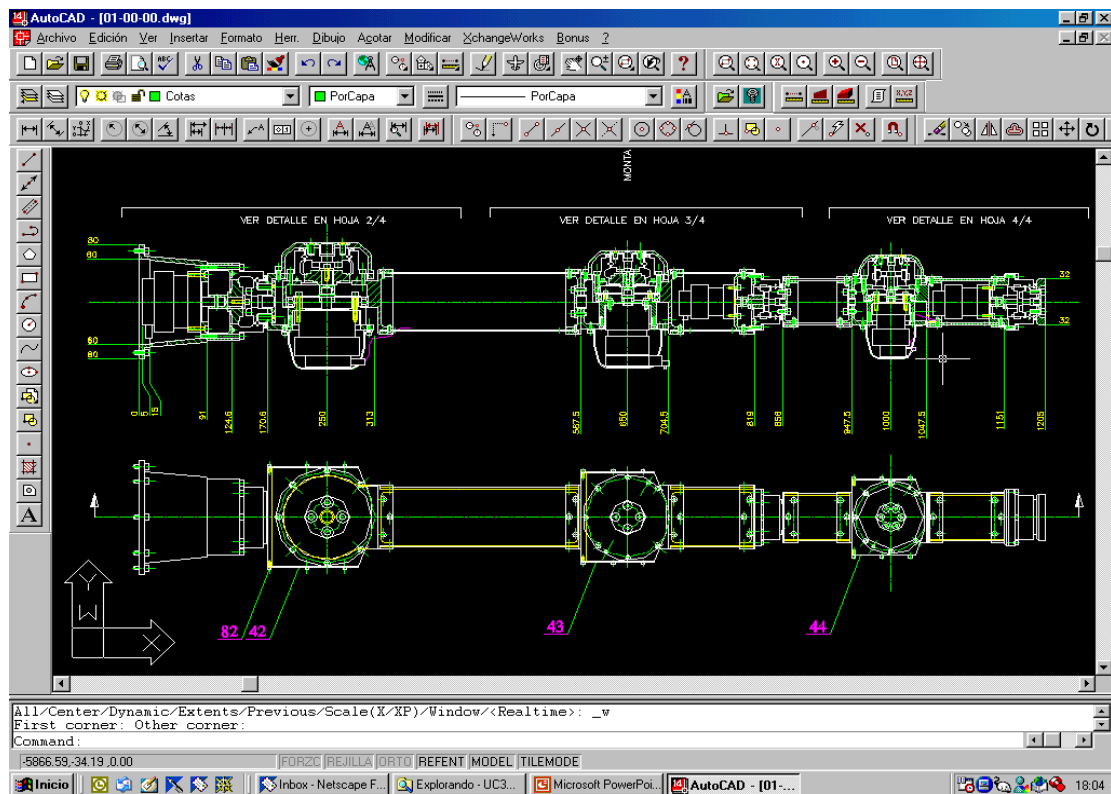


Figura 4.26.- Plano de diseño en la tercera etapa.

4.7.2.4. Cuarta etapa

La cuarta etapa del diseño, Figura 4.27, estuvo orientada a la optimización del diseño tratando de reducir el peso de la estructura al mínimo. Para ello se redujeron al máximo las dimensiones de las piezas de las carcasas aligerando su carga y logrando un diseño más compacto que el anterior.

Esta nueva versión aligerada tendría importantes ventajas relacionadas con un menor consumo de motores, mejora en la capacidad de carga, reducción de la inercia ante impactos así como mejor respuesta ante vibraciones de la estructura ya que se reducen los tiempos de parada cuando el brazo se encuentra en movimiento.

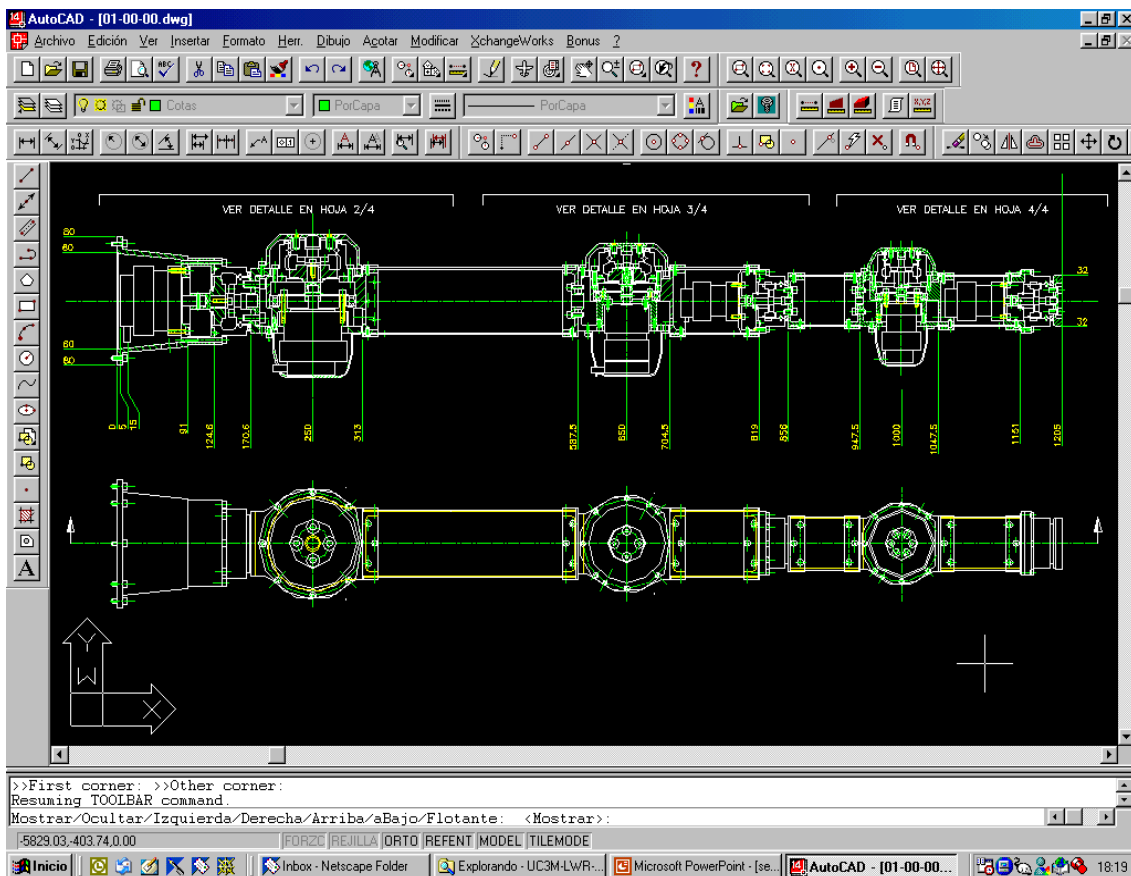


Figura 4.27.- Plano de diseño en la cuarta etapa.

4.7.2.5. Quinta etapa

Finalmente la quinta etapa de diseño se muestra en la Figura 4.28, dónde se logró el diseño final optimizado de la estructura. Para ello se hicieron leves correcciones de tal manera que se pudiera alojar toda la circuitería asociada a los componentes, así como cualquier tipo de cable, en el interior de las carcasas de manera que la seguridad fuese máxima y al mismo tiempo se incrementase la estética del diseño.

Finalmente la Figura 4.29, muestra más en detalle la disposición de las piezas para la articulación 1. Se puede observar que la disposición de las mismas ha sido estudiada al detalle para lograr los objetivos de diseño inicialmente propuestos que se introdujeron al inicio del presente capítulo.

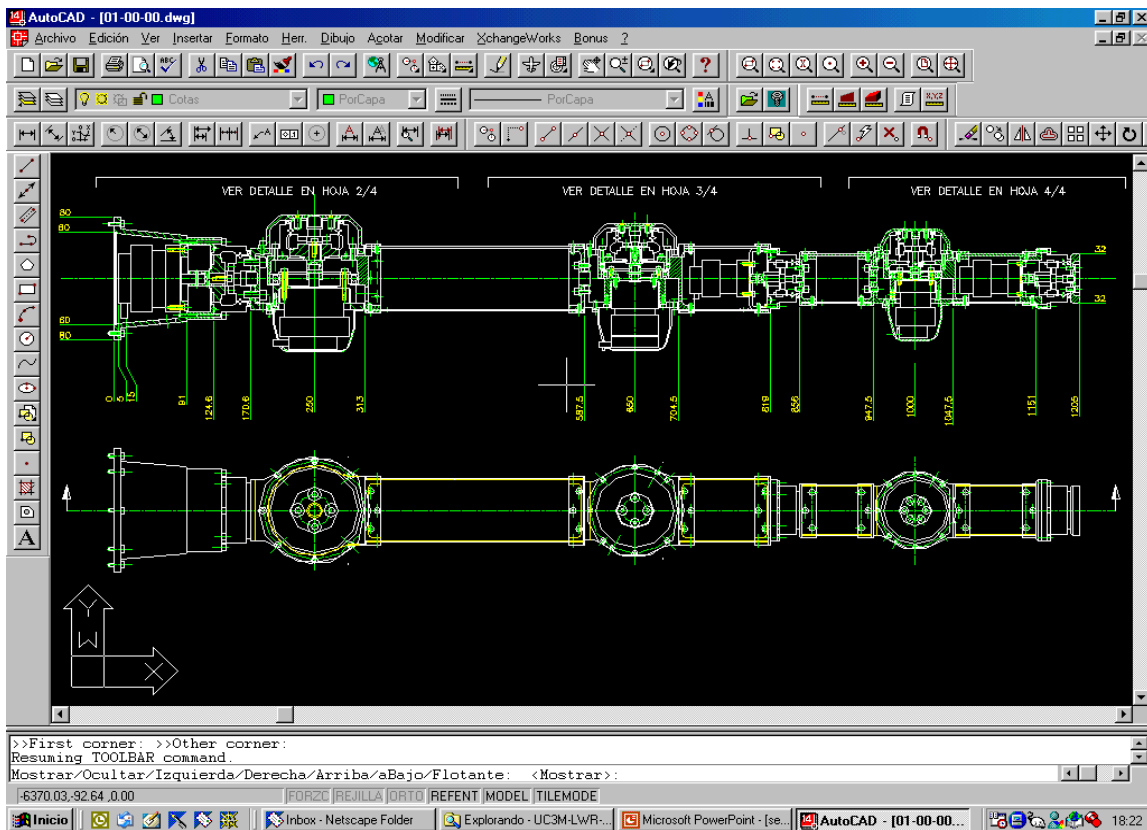


Figura 4.28.- Plano de diseño en la quinta etapa.

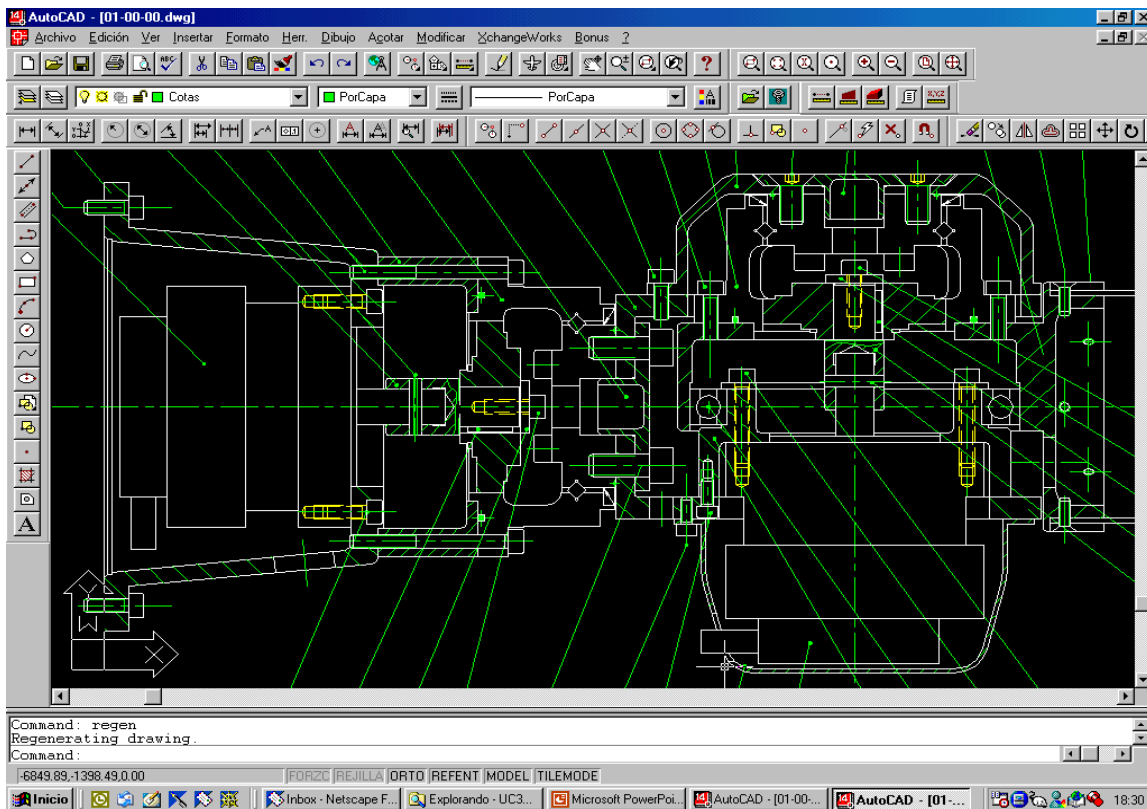


Figura 4.29.- Plano de diseño de la quinta etapa más en detalle para la primera articulación.

4.8. Estructura mecánica del diseño: Diseño y optimización

En el diseño de la estructura mecánica se llevó a cabo un proceso de optimización que consistía, articulación por articulación, en los siguientes pasos:

1. Diseño inicial.

Este paso consiste en la adecuación de la pieza a los componentes (reductores, motores y sensores) en unas dimensiones y consideraciones conservadoras respecto a su rigidez y por tanto a su peso.

2. Primer ensamblaje.

Tras llevar a cabo el diseño virtual de todas las piezas de la articulación, se lleva a cabo el montaje provisional y la correspondiente detección mediante simulación de aspectos de diseño no previstos.

3. Primera corrección.

En base a lo detectado en el paso anterior - incompatibilidades, aspectos estéticos no previstos - se realizan correcciones (de dimensión y/o de forma) en el diseño donde sea necesario para adecuar las piezas al ensamblaje.

4. Primera simulación de cargas.

En este paso se procede a simular, pieza a pieza, las sollicitaciones y la respuesta del diseño a estas. Esta simulación está supeditada a la de cargas globales que se realizará a posteriori (Capítulo VI).

5. Primera optimización.

En base a aligerar peso, se procede a rediseñar las partes de la pieza que presentan menos requerimiento de las sollicitaciones. Esto se hace teniendo en cuenta el límite de deformación elástica, de tal manera, que en cada articulación, se obtiene un factor de seguridad en torno a este valor.

6. Segundo ensamblaje.

Una vez aligeradas las piezas se ensamblan en el montaje de la articulación y se detectan los posibles errores que hayan surgido durante la optimización.

7. Corrección de errores.

En el segundo ensamblaje se comprueban los posibles errores de compatibilidad que hayan surgido entre las piezas modificadas y se corrigen. Si se trata de un error de importancia, se vuelve a rediseñar la pieza desde el principio, volviendo de nuevo al paso 1.

8. Simulación y corrección en el ensamblaje.

Se procede a comprobar ante las cargas globales la respuesta del ensamblaje. En caso de haber algún fallo en alguna pieza no detectado se vuelve al paso 3 y se corrige dicha pieza antes de su primera optimización.

9. Unión de las articulaciones.

Una vez comprobadas todas las articulaciones se procede al ensamblaje final del modelo.

4.8.1. Montajes de las articulaciones

En este apartado se presentan y explican los montajes de las articulaciones. Sólo se hace en detalle en la articulación 1, 2 y 4, mientras que en el resto, se presentan dibujos isométricos de cada pieza con ánimo puramente descriptivo. Esto es así puesto que las articulaciones 3 y 5 son idénticas en naturaleza de funcionamiento a la 2, mientras que la 6 es idéntica a la número 4. Al final del apartado se presenta un ensamblaje completo del brazo.

4.8.1.1. Articulación 1

La articulación 1, Figura 4.30, presentó las mayores complicaciones de diseño en un principio, al tratar de encontrar la forma óptima que sin descuidar la estética, soportara las cargas y las reacciones en la estructura provocadas por las mismas.

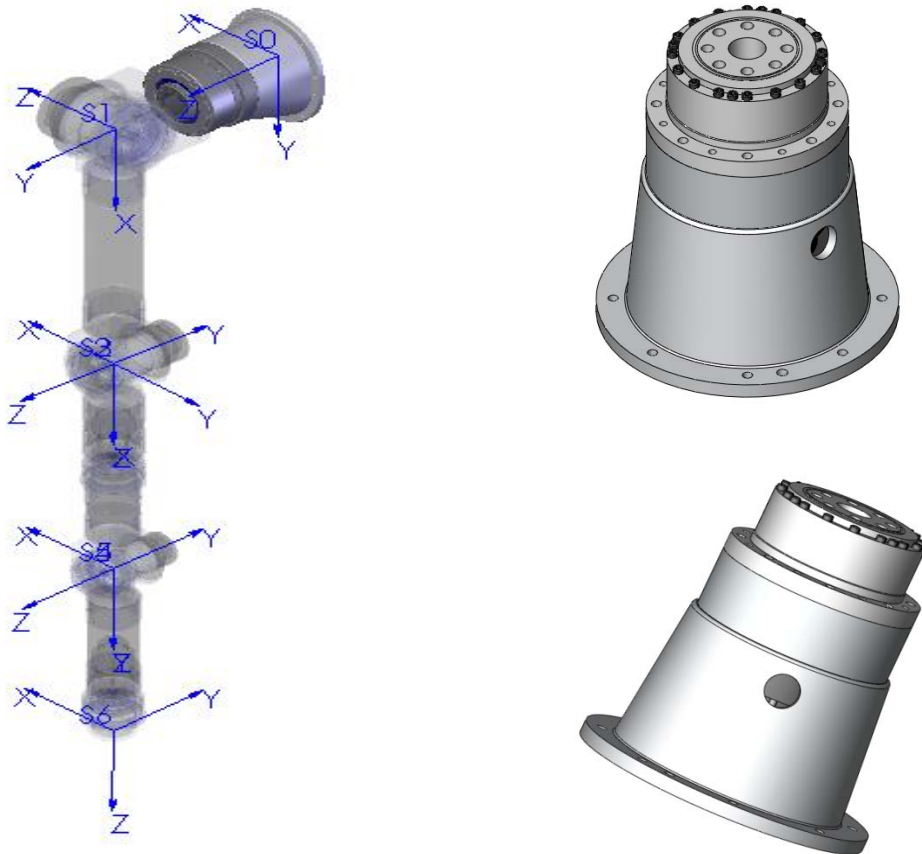


Figura 4.30.- Vistas de la articulación 1. Izda., posición relativa en ensamblaje. Decha., proyecciones en solitario.

4.8.1.1.1. Cazoleta soporte

Se trata de un semi-cono, Figura 4.31, con un perfil en la base alargado que mejora la resistencia ante cargas en el extremo, así como a momentos flectores en el mismo. Su espesor ronda los 4 mm en todas sus partes. Su misión principal es unir el conjunto al torso de MANFRED mediante su base y soportar el motor en su extremo. También su extremo tiene la misión de transmitir los esfuerzos que le lleguen desde la unión con la segunda articulación.

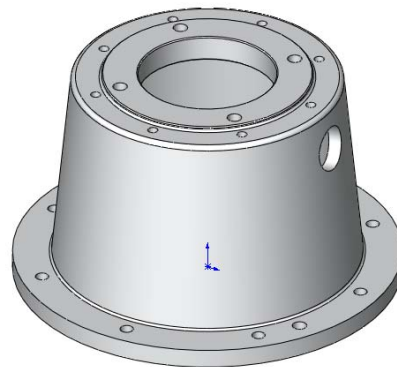


Figura 4.31.- Vista 3-D de cazoleta.

4.8.1.1.2. Distanciador

Con un espesor medio de 2 mm, se trata de una estructura en anillo con perfil en U que permite separar el reductor para poder acoplarlo al motor, Figura 4.32. Permite también que el conjunto alcance la longitud indicada por el modelo cinemático, transmitiendo las cargas. A pesar de su bajo espesor, será capaz de transmitir las tensiones sin ayuda de tornillería. Con ella acoplada y por lo tanto con el consiguiente efecto de armado, aumentará su coeficiente de seguridad.

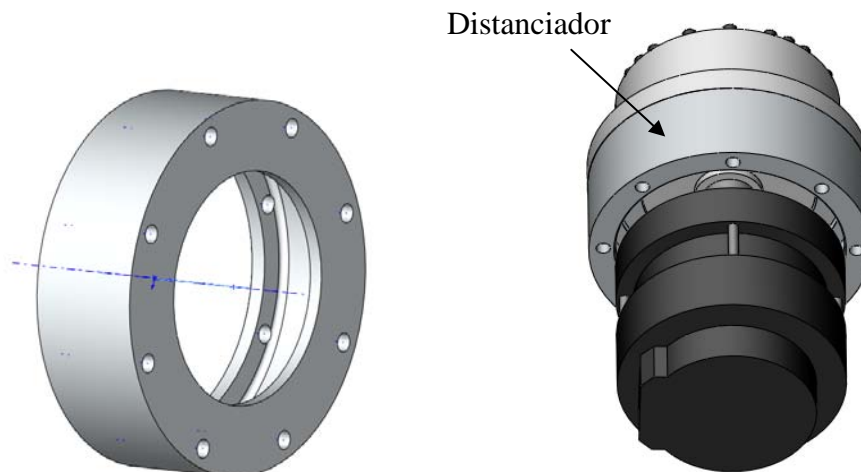


Figura 4.32.- Izqda. vista 3-D del distanciador. Dcha. ubicación del distanciador dentro del ensamblaje de la articulación.

4.8.1.1.3. Acoplamiento

Esta estructura ha sido diseñada como su nombre indica para acoplar el movimiento del eje del motor transmitiéndolo al reductor, Figura 4.33.

4.8.1.2. Articulación 2

La articulación 2, Figura 4.34, convierte el giro proporcionado por la articulación 1 en uno perpendicular al anterior. Esto se realiza insertando en una base en U, el motor y el reductor configurando así el eje de giro. Es de especial importancia resaltar que un diseño demasiado ajustado al peso aumentará con gran probabilidad las vibraciones. Se presenta el ensamblaje completo incluyendo tubo y bridas de unión a la articulación 3.

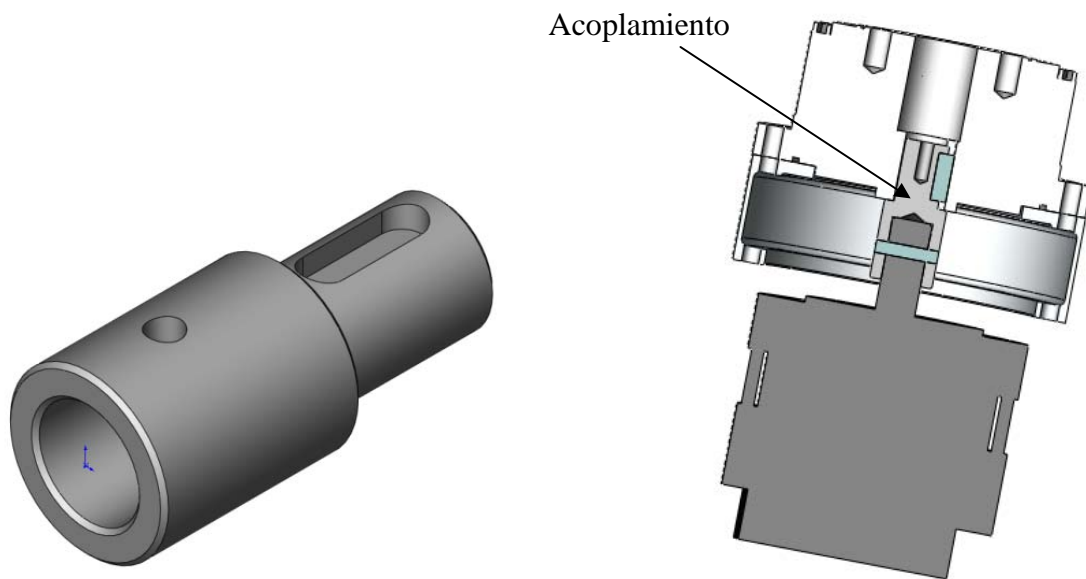


Figura 4.33.- Izqda. vista 3-D del acoplamiento. Dcha. Corte transversal de la articulación 1 donde se muestra la ubicación de la pieza dentro del ensamblaje de la articulación.

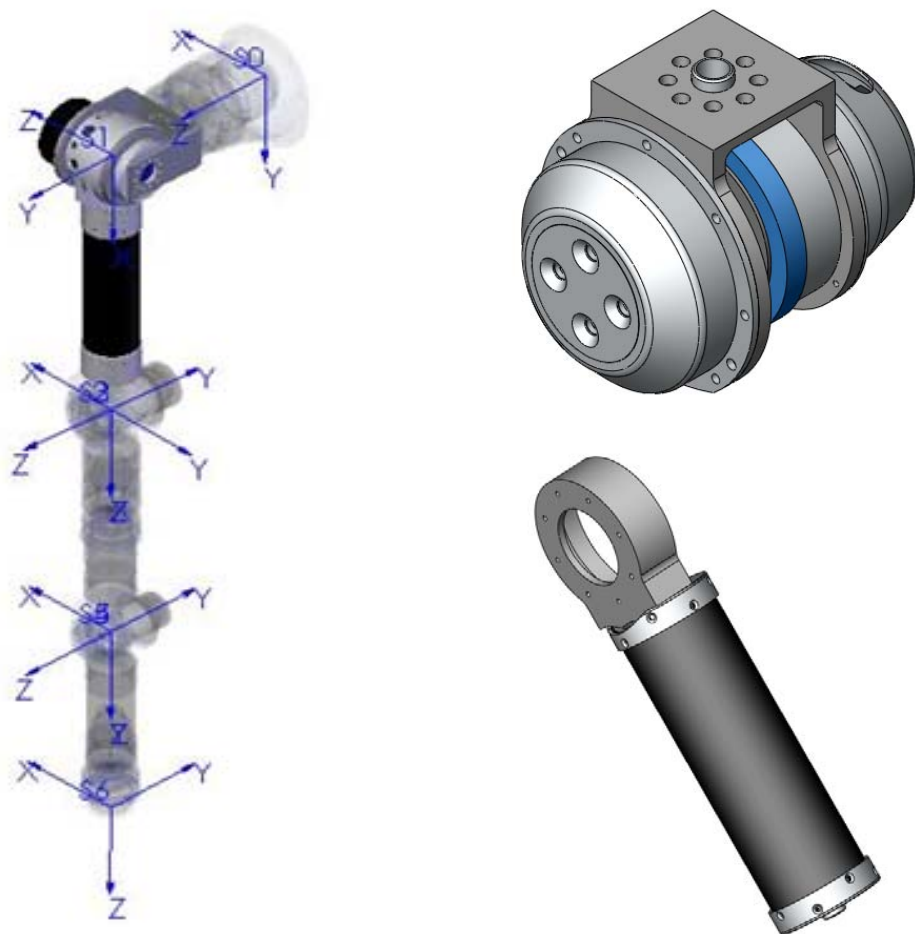


Figura 4.34.- Vistas de la articulación 2. Izda., posición relativa en ensamblaje. Dcha., algunas vistas en solitario.

4.8.1.2.1. Base en U

Esta estructura, Figura 4.35, presenta en su base un anclaje compatible con la unión de la primera articulación y dos arandelas circulares que soportan al motor y al reductor respectivamente. Puesto que el soporte del reductor va a soportar únicamente las deflexiones del *flexspline*, se ha minimizado su espesor conforme se ha aumentado el espesor del motor.

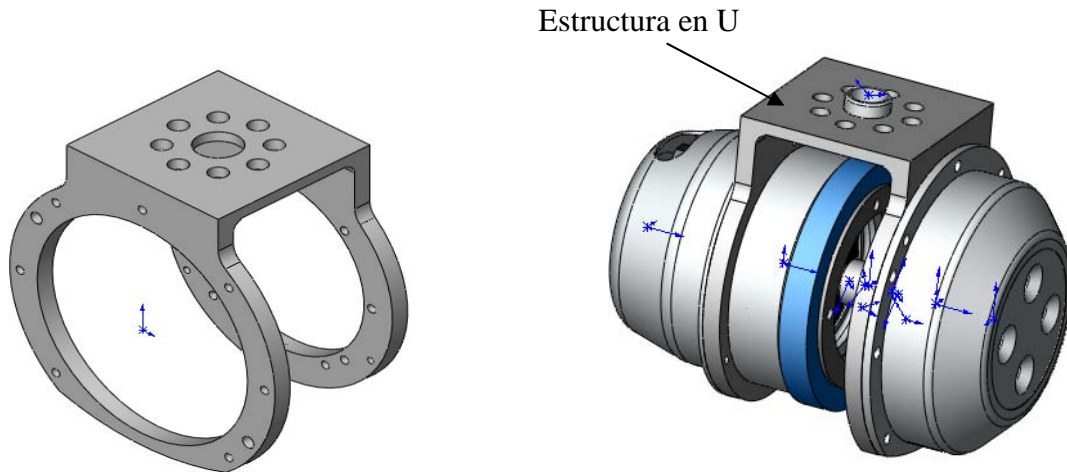


Figura 4.35.- Izqda. vista 3-D de base en U. Dcha. ubicación de la pieza en la articulación.

4.8.1.2.2. Cazoleta motor

La cazoleta en las articulaciones de flexión se diseñó para dar soporte al motor y unir a la base las solicitaciones de la estructura, Figura 4.36, ya que es sobre la cazoleta, a través de la intervención del rodamiento, donde reposa el peso de los siguientes eslabones.

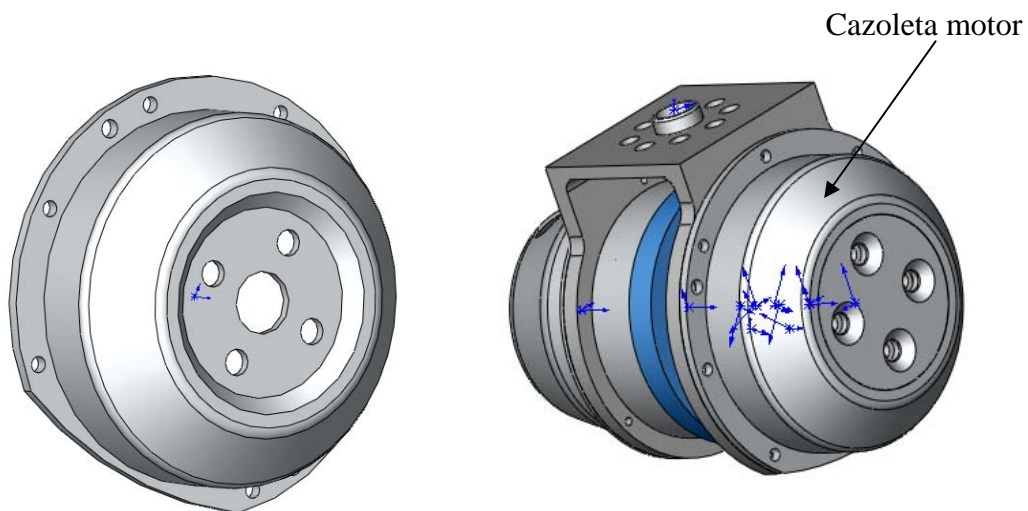


Figura 4.36.- Izqda. vista 3-D de cazoleta motor. Dcha. ubicación de la pieza en la articulación.

4.8.1.2.3. Pieza de giro a tubo

Esta pieza, Figura 4.37, es la encargada de transmitir el giro a los siguientes eslabones. Unida al anillo exterior del HFU, recibe de este el giro reducido en velocidad y utilizando como soporte el rodamiento permite la consecución del movimiento. Para el

correcto ensamblaje con el rodamiento se ha incluido un reborde de freno y otro de apoyo.

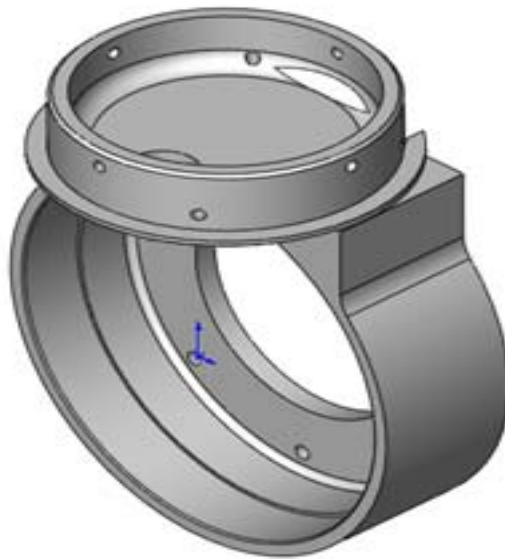


Figura 4.37.- Vista 3-D de pieza de giro a tubo.

4.8.1.2.4. Corona

La corona tiene la misión fundamental de soportar el motor, Figura 4.38. Acopla el HFU en su extremo y también posee un reborde de freno para el tubo de acople.

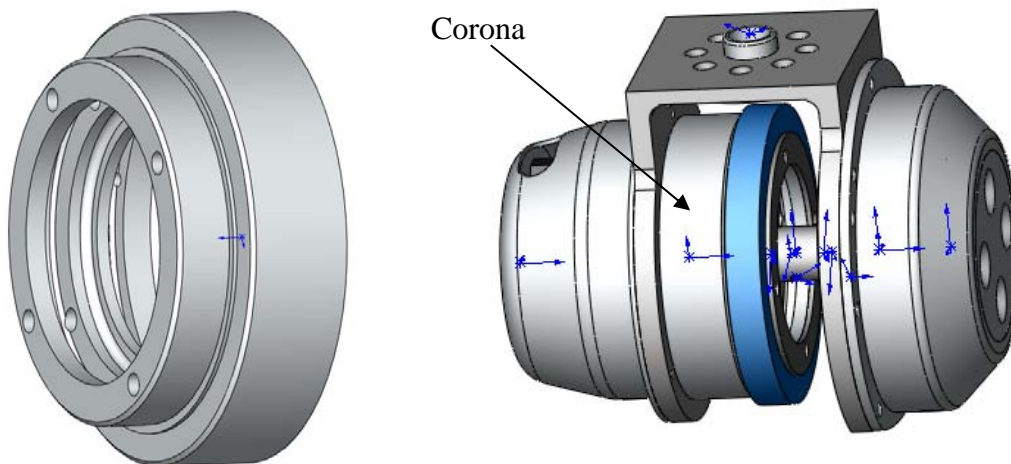


Figura 4.38.- Vista 3-D de pieza de la Corona.

4.8.1.2.5. Centrador tipo 1

Esta pieza como su nombre indica sirve para centrar el eje del reductor y evitar así holguras en los acoplamientos de las piezas que pudieran dar lugar a vibraciones y desajustes en el ensamblaje de las articulaciones. Como se puede observar en la, Figura 4.39, esta pieza va encajada en la cazoleta de soporte del reductor de manera que aporta seguridad al diseño al tapar cualquier componente del reductor que pudiera asomar al exterior a la vez que le confiere a la articulación una apariencia más compacta.



Figura 4.39.- Izqda. y centro vista 3-D del centrador tipo 1. Dcha. Posición en la articulación.

4.8.1.2.6. Centrador tipo 2

Este otro tipo de centrador, Figura 4.40, tiene una función similar al anterior y es la de centrar evitando holguras en la unión del acoplamiento entre la estructura en U y la pieza de unión al eslabón llamada contra-brida.

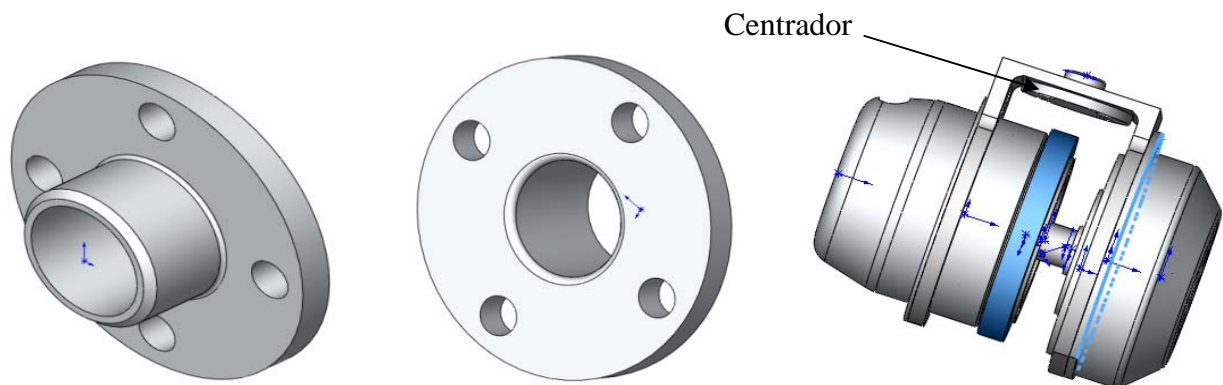


Figura 4.40.- Izqda. y centro vista 3-D del centrador tipo 2. Dcha. Su posición en el ensamblaje.

4.8.1.2.7. Cazoleta protectora

Su misión es tapar la parte anterior del motor así como posibles acoples del mismo a la cazoleta mediante arandelas amortiguadoras. Su anclaje se realiza aprovechando la tornillería usada para unir a la base la cazoleta del motor, Figura 4.41.

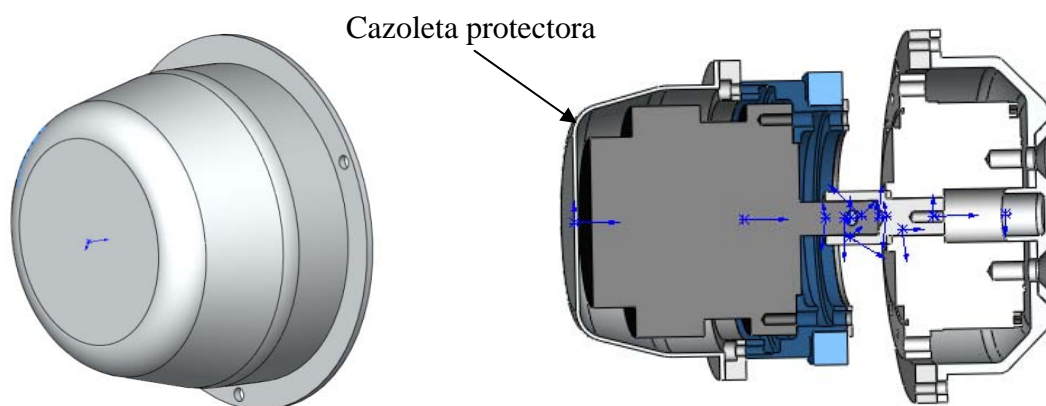


Figura 4.41.- Izqda. Vista 3-D cazoleta protectora. Dcha. ubicación en el ensamblaje de la articulación.

4.8.1.2.8. Tubo, contra-bridas y remate

Mediante un sistema de ensamblaje de brida y contra-brida se llevaron a cabo las uniones metal-material compuesto, Figura 4.42. El tubo de fibra de carbono presenta rebordes interiores en las zonas de unión que minimizan la concentración de tensiones en los taladros. Las contra-bridas, en colaboración con la parte final de la pieza móvil y con el propio acoplador a la siguiente articulación, sirven para ayudar a minimizar esas tensiones al distribuirlas de manera más uniforme. Todas las contra-bridas tienen las mismas dimensiones en el diseño.

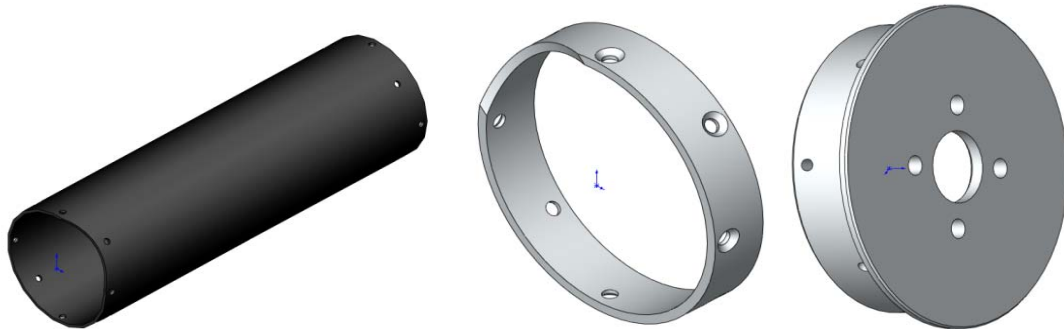


Figura 4.42.- Arriba Izda., tubo de fibra. Arriba Dcha., unión a la articulación 3 en brida. Centro, contra-brida.

4.8.1.3. Articulación 3

La articulación 3 es idéntica en diseño a la articulación 2, por ello solo se añaden vistas del ensamblaje completo, Figura 4.43.

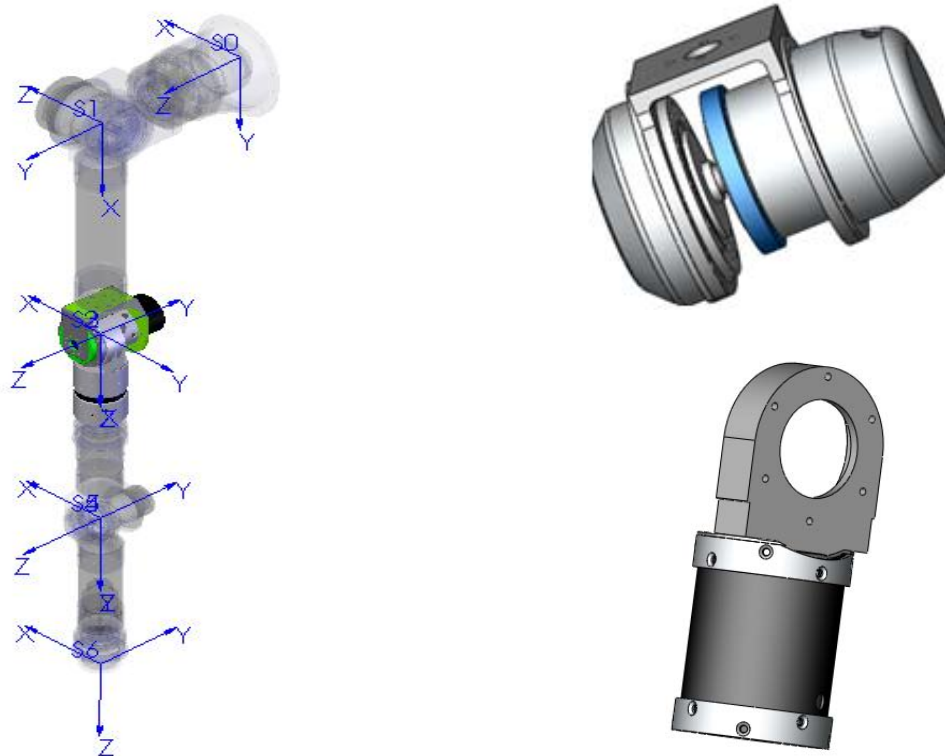


Figura 4.43.- Vistas de la articulación 3. Izda., posición relativa en ensamblaje. Dcha., algunas vistas en solitario.

4.8.1.4. Articulación 4

La articulación 4, Figura 4.44, representa el tercer tipo de articulación del diseño. Va unida a la articulación 3 mediante una corona que ajusta también el motor.

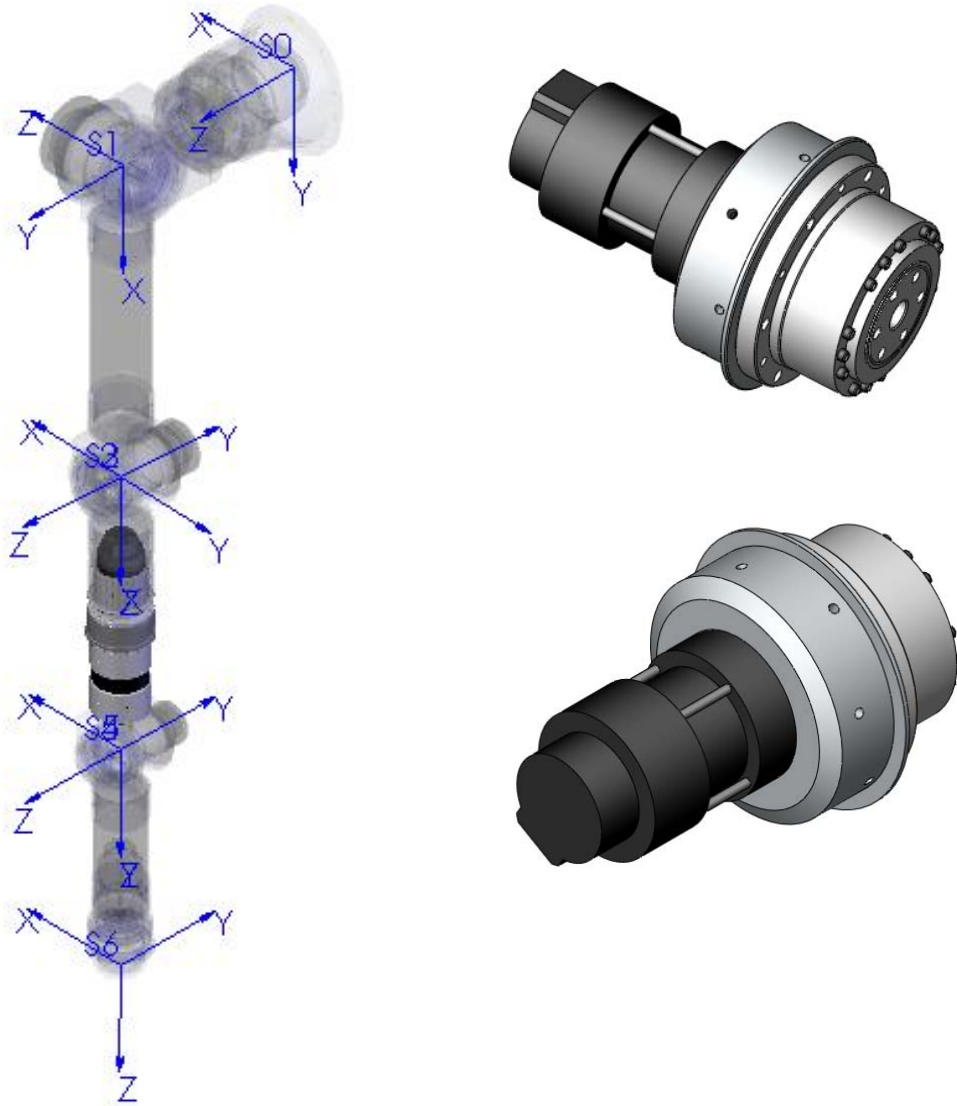


Figura 4.44.- Vistas de la articulación 4. Izda., posición relativa en ensamblaje. Dcha., algunas vistas en solitario.

4.8.1.4.1. Soporte

El soporte cubre al reductor protegiéndolo y aislándolo del exterior, además le proporciona un freno y soporte al rodamiento. Su montaje, Figura 4.45, es muy similar al descrito en la articulación 1.

4.8.1.4.2. Acoplamiento

Fabricada en aluminio, esta pieza transmite el movimiento del *flexspline* del HFU a la siguiente articulación, a través del tubo de fibra de carbono correspondiente, Ver Figura 4.46.

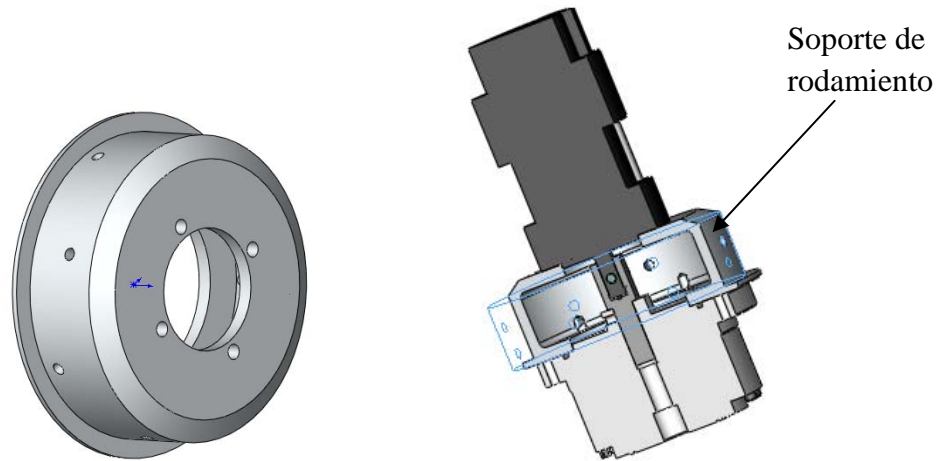


Figura 4.45.- Izqda. vista 3-D de soporte de rodamiento. Dcha. Colocación en el ensamblaje.

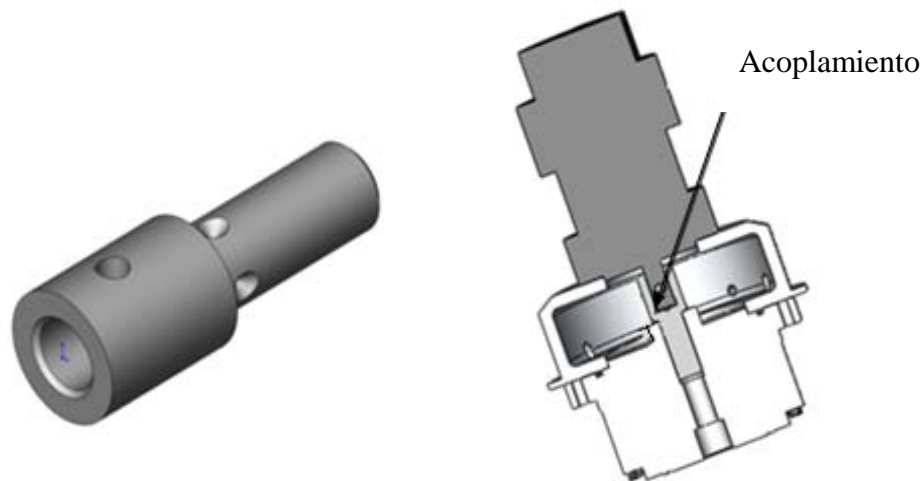


Figura 4.46.- Izqda. vista 3-D de acoplamiento. Dcha. colocación en el ensamblaje de la articulación.

4.8.1.4.3. Tubo y contra-bridas

Como en articulaciones anteriores, se sigue el esquema de ensamblaje de bridas y contra-bridas. Varían las dimensiones generales del tubo y de las contra-bridas, haciéndose más pequeñas. No se incluyen figuras al respecto por no añadir información relevante.

4.8.1.5. Articulación 5

Puesto que la articulación 5, Figura 4.47, presenta un diseño idéntico a la articulación 2 y 3 no se añaden figuras que expliquen en detalle cada pieza. Se añade que aunque funciona bajo el mismo principio, debido a que las dimensiones del motor y el rodamiento no permitían una distribución idéntica, se modificó levemente la cazoleta para solventar este particular.

4.8.1.6. Articulación 6

Por lo mismo que se ha expuesto en el apartado anterior, no se añaden vistas en detalle de esta articulación: su diseño es idéntico a la articulación 4, Figura 4.48, si exceptuamos el cambio a la baja en las dimensiones de las piezas.

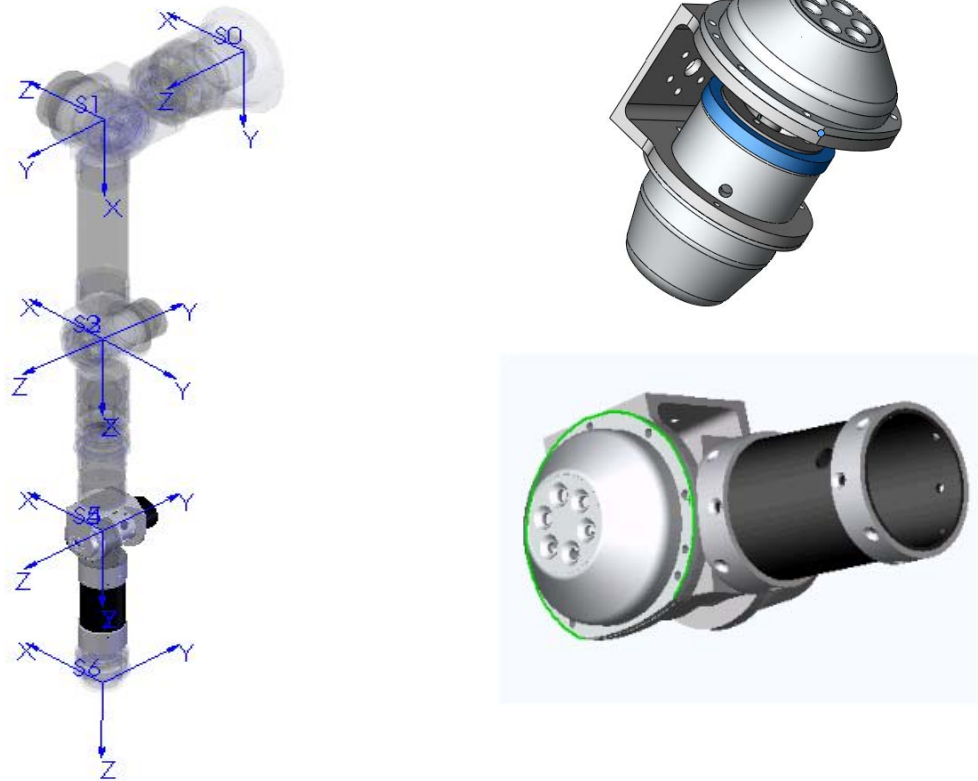


Figura 4.47.- Vistas de la articulación 5. Izda., posición relativa en ensamblaje. Dcha., vista en solitario.

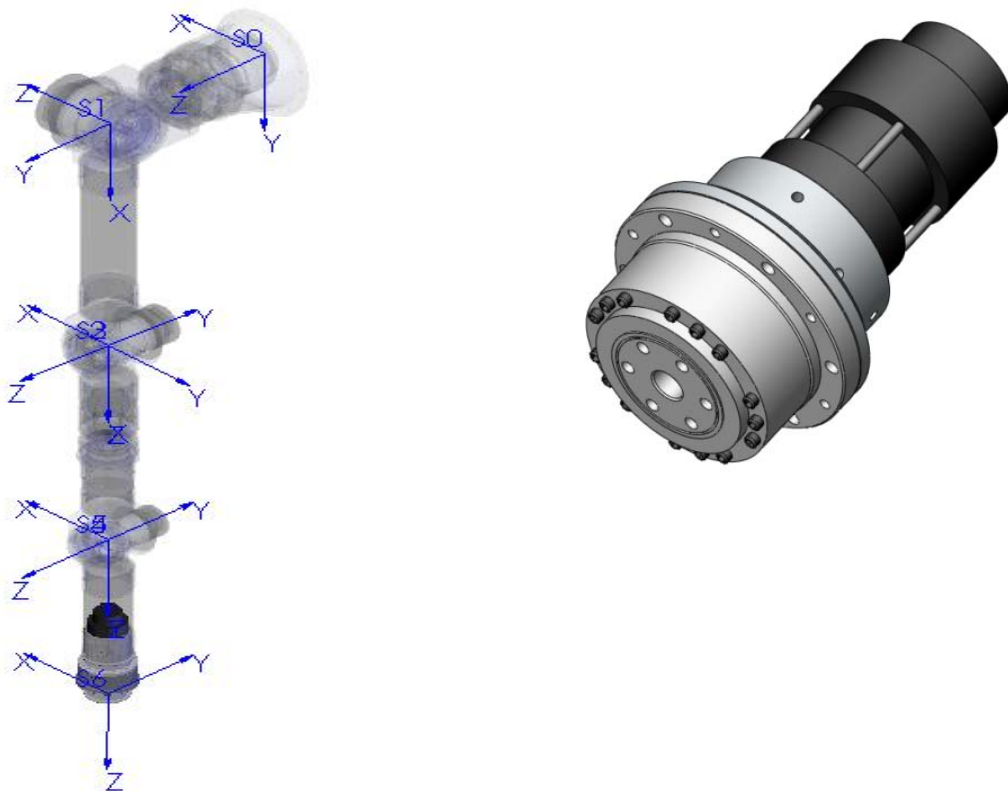


Figura 4.48.- Vistas de la articulación 6. Izda., posición relativa en ensamblaje. Dcha., vista en solitario.

4.8.2. Ensamblaje completo

Por último se presentan vistas del ensamblaje completo del brazo manipulador robótico, Figura 4.49, y del despiece, Figura 4.50.

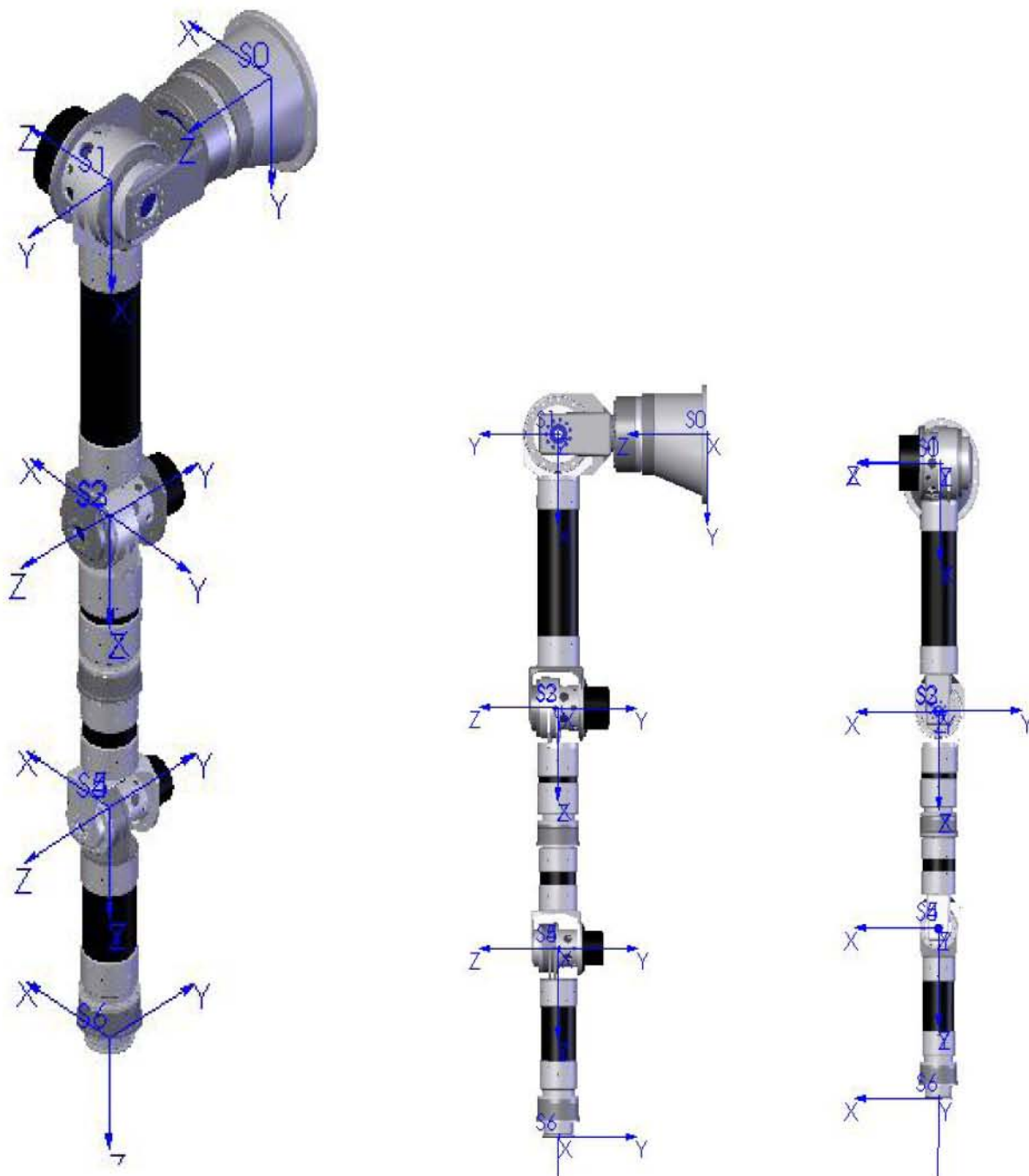


Figura 4.49.- Vistas del ensamblaje completo en color real.



Figura 4.50.- Estructura del brazo manipulador.

4.8.3. Diseño del actuador final

El diseño de un actuador final para el manipulador UC3M-LWR-1, va a condicionar las capacidades de manipulación del robot y en consecuencia el desempeño de las tareas para las que ha sido concebido. En su diseño se impusieron las siguientes especificaciones:

1. Ser lo más ligero posible dentro de una lógica de rigidez que lo permitiera ser utilizable.
2. Permitir en su ensamblaje una política de modularidad en orden a poder ser desmontado y sustituido por otros actuadores para poder cubrir así distintas necesidades de manipulación.
3. Incluir en su diseño un acoplamiento del sensor fuerza-par disponible.
4. Posibilitar un mecanismo de seguridad último que salvaguardara la estructura del manipulador en caso de colisiones o de generación de sobreesfuerzos no deseados.

A tal efecto se tomaron las siguientes decisiones de diseño:

En primer lugar, para minimizar el peso, se eligió como material para la mayoría de las piezas el sulfuro de polifenileno (PPS) [70]. Este polímero ofrecía unas inmejorables prestaciones de peso, resistencia y mecanización. El hecho de que las últimas piezas se diseñaran en aluminio 7075 garantiza una rigidez extra necesaria dentro de la política de ahorro de peso.

En segundo lugar se diseñó el ensamblaje para posibilitar un montaje y desmontaje sencillo con el último reductor HFUC de la muñeca del manipulador. Este montaje, realizado con tornillería convencional, ofrecía también baja complicación en el proceso de ensamblado.

En tercer lugar se acoplaron etapas intermedias entre el ensamblaje y el sensor para dar cobertura a las particularidades estructurales del componente. Se diseñó una base que lo uniera a las piezas anteriores así como otra base que uniera las posteriores a dicho sensor. La necesaria colocación del elemento de medida por delante del dispositivo de seguridad estructural, hacía necesaria estas asunciones.

En cuarto lugar se diseñó un mecanismo de seguridad basado en montar en el ensamblaje una pieza elástica semi-rígida de caucho como material. El principio de funcionamiento y el por qué de esta decisión es muy simple y se describe a continuación.

La etapa de caucho va unida al manipulador mediante una aprensión con tornillería convencional. Esta etapa de seguridad permite un contacto con su cubierta de material no flexible (PPS) a la cual van ensamblados el sensor y las piezas finales del actuador. Una fuerza o momento en el actuador, se transmitiría así a la cubierta rígida quien la transmitirá a su vez al caucho. Por sus cualidades semi-rígidas el caucho permite cierta deformación antes de que el momento o la fuerza fueran transmitidas al manipulador debido al fin de la deformación del material y a la consiguiente transmisión del esfuerzo mediante la tornillería. En caso de superar el límite determinado para el manipulador, el caucho sería escogido para que se rompiera antes de transmitir este esfuerzo, con lo que la estructura del manipulador quedaría indemne. Al suponer este aspecto y el

funcionamiento del caucho el punto más crítico del diseño, ha sido el aspecto más tenido en cuenta a la hora de realizar las simulaciones de verificación sobre el ensamblaje. A continuación se exponen diferentes vistas del modelo de actuador final, Figura 4.51.

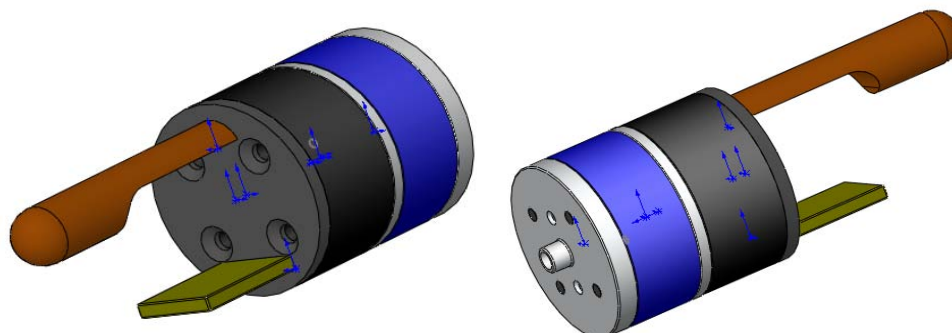


Figura 4.51.- Aspecto externo en color real del modelo de actuador final.

Para una identificación práctica de los componentes del ensamblaje se expone la Figura 4.52 en donde se han coloreado en distintos tonos para definirlos con mayor claridad. En las siguientes secciones, dichos componentes serán analizados.

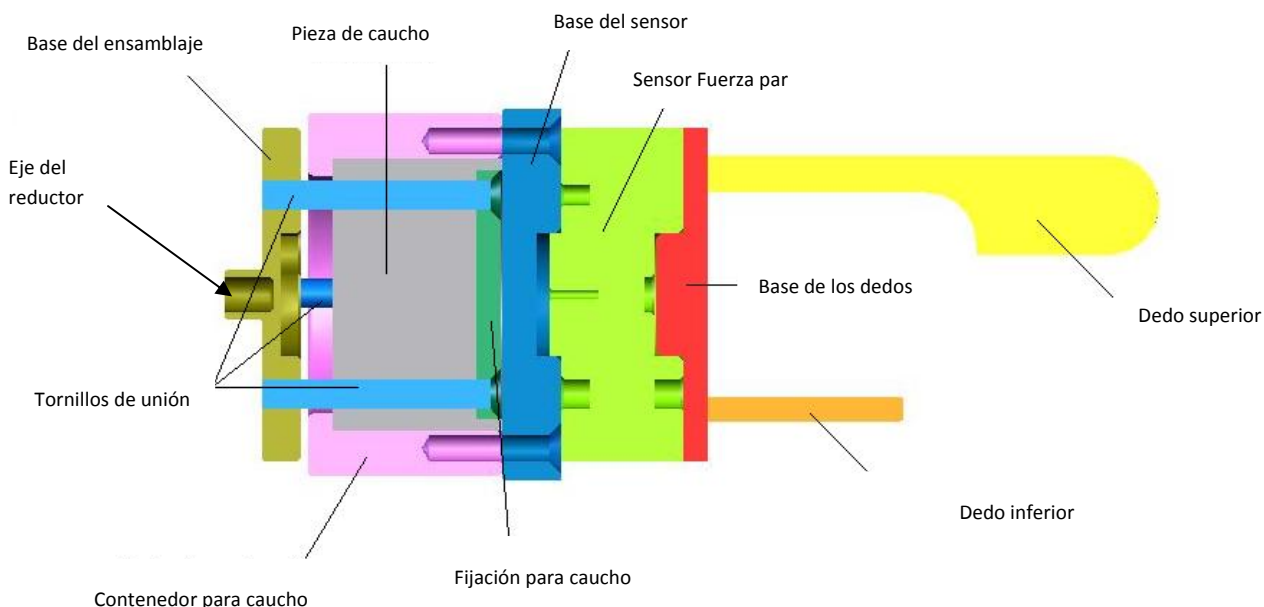


Figura 4.52.- Arriba, vista isométrica en colores ficticios. Abajo, vista de sección.

4.8.3.1. Base del ensamblaje

Esta pieza es la encargada de unir el extremo de la muñeca del manipulador con el caucho mediante tornillería, Figura 4.53 (a). Entre este componente y el contenedor del caucho existe contacto superficial. Para la simulación, debido a las particulares condiciones del software, se optó por simular este particular separando dicho contenedor y este componente; las conclusiones revelaron que esta separación o alguna

modificación, se hace necesaria para un comportamiento predecible. La pieza está fabricada en PPS.

4.8.3.2. Contenedor para el caucho

También fabricado en PPS, este componente envuelve y da cubierta al caucho, Figura 4.53 (b). La unión entre ambos se hizo mediante moleteado⁴ del contenedor o tratamiento superficial similar que permita un fácil desmontaje, así como una unión que permite cierta rigidez e intraslacionalidad⁵.

4.8.3.3. Pieza de caucho

Los cuatro taladros de la pieza de caucho, Figura 4.53 (c), permiten que los tornillos unan su fijación con la base del ensamblaje. Una buena elección de material, permitirá una controlada deformación del actuador, así como una rotura controlada de seguridad.

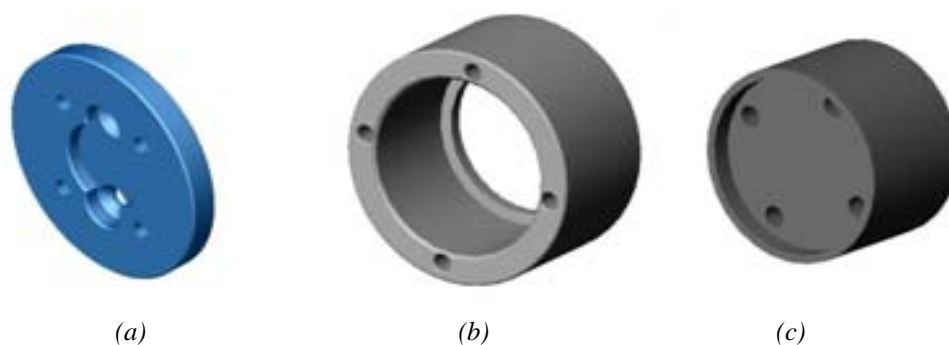


Figura 4.53.- (a) Modelo de la base del ensamblaje. (b) Contenedor de la pieza de caucho, y (c) pieza de caucho.

4.8.3.4. Fijación para el caucho

El objeto de esta pieza de PPS es ser, mediante presión, la sujeción final del caucho a la base del actuador. Sus taladros no van roscados, Figura 4.54 (a).

4.8.3.5. Base del sensor

La base del sensor, Figura 4.54 (b), permite la sujeción del mismo al contenedor del caucho a través de sus taladros exteriores. Son los taladros interiores los que determinan la unión con dicho sensor fuerza-par.

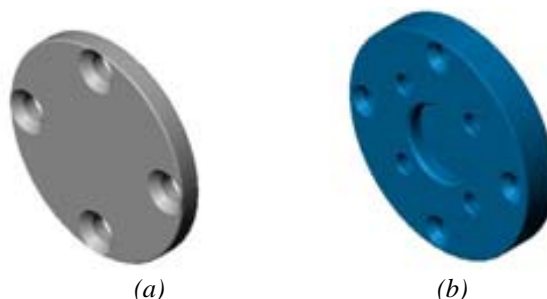


Figura 4.54.- (a) Tapa de fijación para la pieza de caucho. (b) Adaptador para el sensor.

⁴ Moleteado de una superficie es la terminación que se le da a la misma para facilitar el agarre.

⁵ Estructuras intraslacionales aquellas cuyos nudos, bajo solicitaciones de cálculo, presentan desplazamientos transversales cuyos efectos pueden ser despreciados desde el punto de vista de la estabilidad del conjunto.

4.8.3.6. Base de dedos. Dedo superior y dedo inferior

Estos últimos componentes suponen el final del actuador, Figura 4.55. Fabricados en aluminio 7075, presentan un montaje que les hace especialmente eficaces para la tarea para la que han sido desarrollados: la apertura de un pomo de puerta convencional y la manipulación de un interruptor, de ahí su forma.

Por último y como complemento a todo lo anterior, se presenta la Tabla 4.16 desglosada con los pesos correspondientes a cada pieza del actuador. Nótese como el uso del PPS minimiza las masas del conjunto.

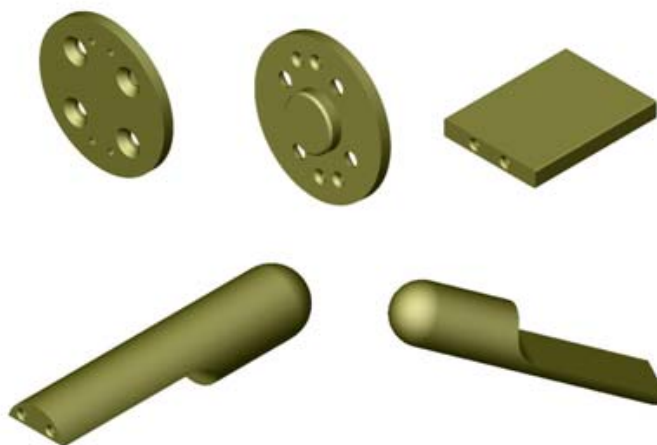


Figura 4.55.- Arriba, vistas de la base y del dedo inferior. Abajo, vistas del dedo superior.

ACTUADOR FINAL						
Piezas del ensamblaje						
No.	Cantidad	Designación	Material	Densidad	Volumen	Masa
				$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	cm^3	g
1	1	Arm-Gripper base	PPS	1.350	24.800	33.480
2	1	Rubber	Caucho	1.000	80.893	80.893
3	1	Rubber container	PPS	1.350	73.617	99.383
4	1	Rubber fixture	PPS	1.350	9.058	12.228
5	1	Sensor base	PPS	1.350	47.605	64.266
6	1	Force-Torque Sensor	N/A*	N/A*	84.572	175.000
7	1	Fingers base	Aluminio 7075	2.800	18.899	52.916
8	1	Upper finger	Aluminio 7075	2.800	16.990	47.573
9	1	Lower finger	Aluminio 7075	2.800	5.905	16.533
TOTAL (g)						582.272

Tabla 4.16.- Peso de los componentes del ensamblaje.

* N/A = No Aplica.

CAPÍTULO V

CINEMÁTICA DEL BRAZO MANIPULADOR LIGERO

5.1. Introducción

La cinemática es la ciencia que estudia el movimiento sin considerar los pesos ni las inercias, en general, cualquier fuerza que lo pudiera originar. Por tanto, se trata de estudiar tanto las propiedades geométricas como las temporales del movimiento. En estos términos, se considera, además del problema puramente geométrico involucrado en el posicionamiento estático, las variaciones en el tiempo de las posiciones y orientaciones; es decir, las velocidades y aceleraciones. La cinemática de manipuladores se aborda desde dos perspectivas diferentes: la *cinemática directa* y la *cinemática inversa*.

El modelo directo permite obtener la posición y orientación del actuador final del robot en función de las variables de las articulaciones. Por su parte, el modelo inverso, permite obtener las variables articulares que hacen que la posición y orientación del actuador final sea la deseada.

En la cinemática inversa, las ecuaciones obtenidas no son lineales por lo que se cuenta con soluciones complicadas o incluso imposibles en una forma cerrada. Así mismo, surge la existencia de una o más soluciones; significando la ausencia de solución que el robot no puede alcanzar la posición y orientación deseada. Por su parte, la ausencia de solución se debería, bien a que el robot se encuentra fuera de su espacio de trabajo, bien a que se encuentra fuera de los rangos permisibles de cada una de sus articulaciones. En la Figura 5.1 se presenta un esquema comparativo entre la cinemática directa e inversa.

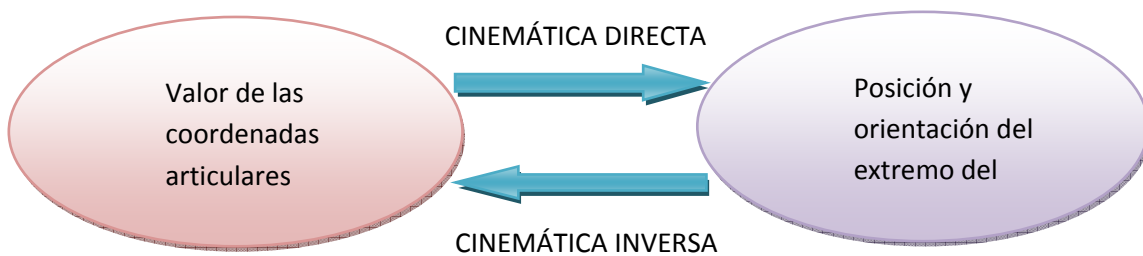


Figura 5.1.- Esquema comparativo de la cinemática directa e inversa.

Denavit y Hartenberg propusieron un método sistemático para describir y representar la geometría espacial de los elementos de una cadena cinemática, y en particular de un robot, con respecto a un sistema de referencia fijo. Este método utiliza matrices de transformación homogéneas que relacionan la localización espacial del extremo del robot con respecto al sistema de coordenadas de su base [78].

En el presente trabajo, interesa definir los movimientos del robot en el espacio cartesiano con relación a la tarea que pretendemos desarrollar. Por consiguiente, el control del robot hace necesario obtener los valores de las variables articulares para que la posición y orientación del robot, o en particular de su actuador final, sea la deseada. Nuestro análisis se enfrentará, por lo tanto, con un problema a resolver de cinemática inversa.

5.1.1. Parámetros Denavit-Hartenberg del UC3M-LWR-1

El método propuesto por Denavit-Hartenberg (D-H) establece que, para poder realizar los cálculos de la cinemática directa e inversa, y poder así realizar las mediciones

necesarias de las trayectorias, necesitamos hallar la matriz de transformación homogénea. Para esto es necesario hallar los parámetros Denavit-Hartenberg del manipulador UC3M-LWR-1.

En el caso del manipulador UC3M-LWR-1 tendríamos el siguiente esquema, Figura 5.2:

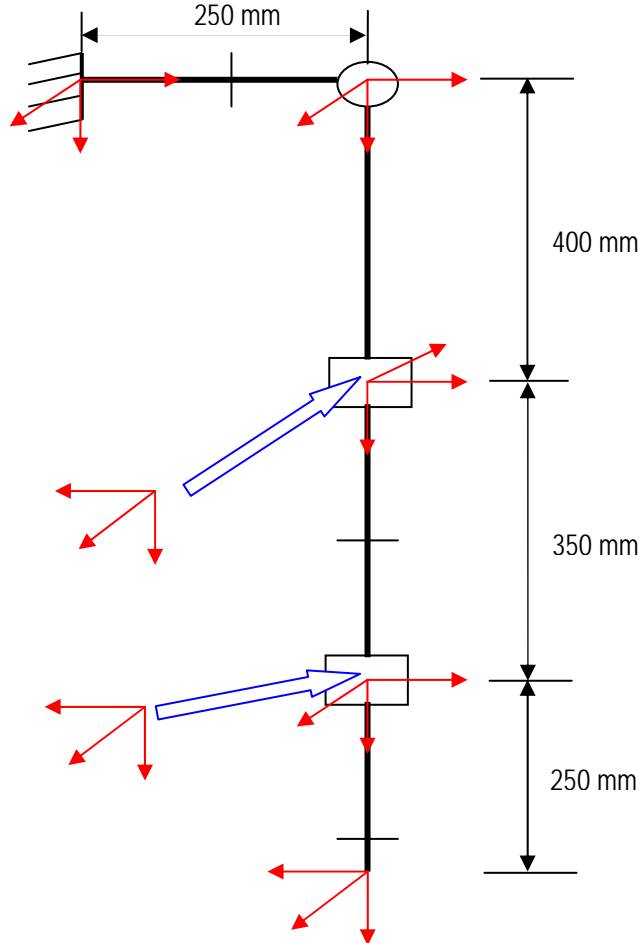


Figura 5.2.- Situación de los sistemas de coordenadas en el manipulador UC3M-LWR-1.

De este esquema se obtienen los parámetros de Denavit-Hartenberg (D-H) que se recogen en la siguiente tabla, Tabla 5.1:

PARÁMETROS D-H					
Articulación	α_i (rad)	a_i (mm)	θ_i (rad)	d_i (mm)	Tipo
1	$\pi/2$	0	0	250	Revolución
2	$-\pi/2$	400	0	0	Revolución
3	$-\pi/2$	0	0	0	Revolución
4	$\pi/2$	0	0	350	Revolución
5	$-\pi/2$	0	0	0	Revolución
6	0	0	0	250	Revolución

Tabla 5.1.- Parámetros D-H del manipulador UC3M-LWR-1.

Con la información recogida en la Tabla 5.1 podemos dibujar el robot en la posición inicial de Denavit-Hartenberg. Se define un vector de posición inicial dado por la forma [5.1], con el cual podemos colocar el brazo en su posición inicial, Figura 5.3:

$$q_r = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{-\pi}{2} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad [5.1]$$

Con este vector podemos dibujar el brazo en la siguiente posición:

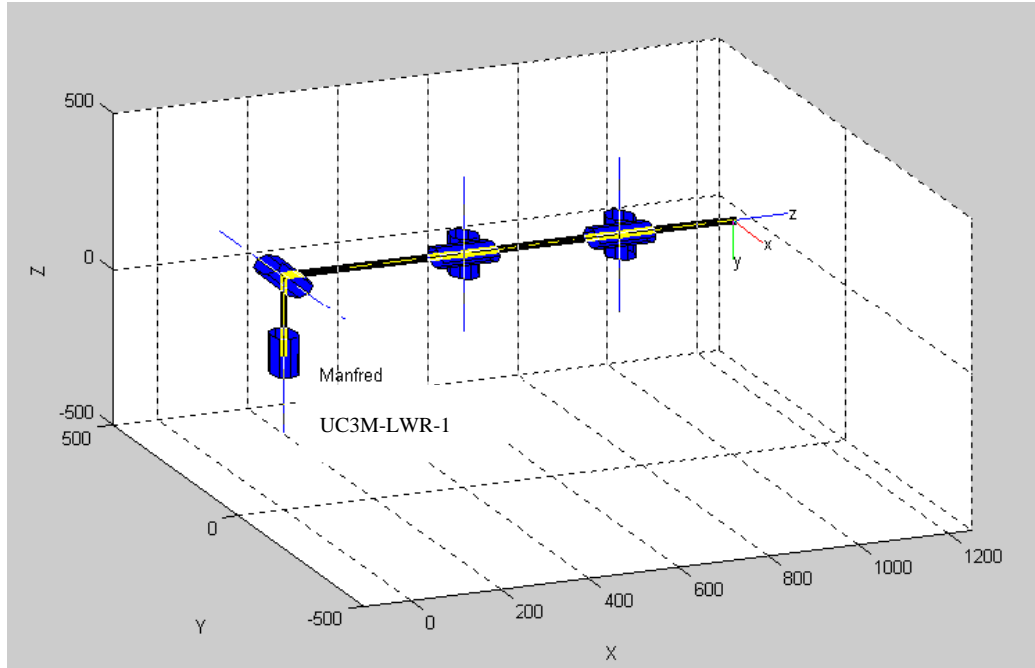


Figura 5.3.- Posición de reposo del manipulador UC3M-LWR-1.

5.1.2. Matrices de transformaciones homogéneas

Como se comentó anteriormente para poder realizar los cálculos de la cinemática directa e inversa necesitamos hallar la matriz de transformación homogénea.

La Ecuación [5.2] que nos permite obtener cada una de las matrices de transformación homogéneas asociadas a cada una de las articulaciones del brazo es la siguiente:

$${}^{i-1}A_i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\cos\alpha_i \sin\theta_i & \sin\alpha_i \sin\theta_i & a_i \cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\alpha_i \cos\theta_i & -\sin\alpha_i \cos\theta_i & a_i \sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad [5.2]$$

Particularizando para cada articulación obtenemos las siguientes matrices homogéneas del manipulador UC3M-LWR-1:

$${}^0A_1 = \begin{bmatrix} \cos q_1 & 0 & \sin q_1 & 0 \\ \sin q_1 & 0 & -\cos q_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 250 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad {}^1A_2 = \begin{bmatrix} \cos q_2 & 0 & -\sin q_2 & 400 \cos q_2 \\ \sin q_2 & 0 & \cos q_2 & 400 \sin q_2 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^2A_3 = \begin{bmatrix} \cos q_3 & 0 & -\sin q_3 & 0 \\ \sin q_3 & 0 & \cos q_3 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad {}^3A_4 = \begin{bmatrix} \cos q_4 & 0 & \sin q_4 & 0 \\ \sin q_4 & 0 & -\cos q_4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 350 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^4A_5 = \begin{bmatrix} \cos q_5 & 0 & -\sin q_5 & 0 \\ \sin q_5 & 0 & \cos q_5 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad {}^5A_6 = \begin{bmatrix} \cos q_6 & -\sin q_6 & 0 & 0 \\ \sin q_6 & \cos q_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 250 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

A partir de estos datos se calcula la matriz T que es la que nos va a indicar la localización final del extremo del brazo, respecto de una referencia dada que es la base del robot. La forma de calcular esta matriz T es aplicando la ecuación [5.3]:

$$T = {}^0A_6 = {}^0A_1 {}^1A_2 {}^2A_3 {}^3A_4 {}^4A_5 {}^5A_6 \quad [5.3]$$

Particularizando en la expresión anterior se obtiene [5.4] cuya expresión es:

$$T = {}^0A_6 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & P_x \\ n_y & o_y & a_y & P_y \\ n_z & o_z & a_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad [5.4]$$

Donde cada uno de los elementos de esta matriz viene dado de la siguiente manera:

$$n_x = \left[\left((\cos(q_1) \cos(q_2) \cos(q_3) - \sin(q_1) \sin(q_3)) \cdot \cos(q_4) + \cos(q_1) \cos(q_2) \sin(q_4)) \cdot \cos(q_5) \right) + \left(\cos(q_1) \sin(q_2) \sin(q_3) - \sin(q_1) \cos(q_3) \right) \cdot \cos(q_6) \right] + \left[(\cos(q_1) \cos(q_2) \cos(q_3) - \sin(q_1) \sin(q_3)) \cdot \sin(q_4) - \cos(q_4) \cos(q_1) \sin(q_2)) \right] \cdot \sin(q_6)$$

$$o_x = -\sin(q_6) \cdot \left[\left((\cos(q_1) \cos(q_2) \cos(q_3) - \sin(q_1) \sin(q_3)) \cdot \cos(q_4) + \cos(q_1) \cos(q_2) \sin(q_4)) \cdot \cos(q_5) \right) + \left(\cos(q_1) \sin(q_2) \sin(q_3) - \sin(q_1) \cos(q_3) \right) \cdot \sin(q_5) \right] + \left[(\cos(q_1) \cos(q_2) \cos(q_3) - \sin(q_1) \sin(q_3)) \cdot \sin(q_4) - \cos(q_4) \cos(q_1) \sin(q_2)) \right] \cdot \cos(q_6)$$

$$a_x = \left[(\cos(q_1) \cos(q_2) \cos(q_3) - \sin(q_1) \sin(q_3)) \cdot \cos(q_4) + \cos(q_1) \sin(q_2) \sin(q_4)) \right] \cdot \sin(q_5) + \left[\cos(q_1) \sin(q_2) \sin(q_3) - \sin(q_1) \cos(q_3) \right] \cdot \cos(q_5)$$

$$P_x = \left[\left((\cos(q_1) \cos(q_2) \cos(q_3) - \sin(q_1) \sin(q_3)) \cdot \cos(q_4) + \cos(q_1) \sin(q_2) \sin(q_4)) \cdot \sin(q_5) \right) + \left(\cos(q_1) \sin(q_2) \sin(q_3) - \sin(q_1) \cos(q_3) \right) \cdot \cos(q_5) \right] \cdot 250 + \left[\cos(q_1) \sin(q_2) \sin(q_3) - \sin(q_1) \cos(q_3) \right] \cdot 350 + 400 \cdot \cos(q_1) \cos(q_2)$$

$$n_y = \left[\left((\sin(q_1) \cos(q_2) \cos(q_3) + \cos(q_1) \sin(q_3)) \cdot \cos(q_4) + \sin(q_1) \sin(q_2) \sin(q_4)) \cdot \cos(q_5) \right) + \left(-\sin(q_1) \cos(q_2) \sin(q_3) + \cos(q_1) \cos(q_3) \right) \cdot \sin(q_5) \cos(q_6) \right] + \left[(\sin(q_1) \cos(q_2) \cos(q_3) + \cos(q_1) \sin(q_3)) \cdot \sin(q_4) - \cos(q_4) \sin(q_1) \sin(q_2)) \right] \cdot \sin(q_6)$$

$$o_y = \left[\left((\sin(q_1) \cos(q_2) \cos(q_3) + \cos(q_1) \sin(q_3)) \cdot \cos(q_4) + \sin(q_1) \sin(q_2) \sin(q_4)) \cdot \cos(q_5) \right) + \left(-\sin(q_1) \cos(q_2) \sin(q_3) + \cos(q_1) \cos(q_3) \right) \cdot \sin(q_5) \right] \cdot \sin(q_6) + \left[(\sin(q_1) \cos(q_2) \cos(q_3) + \cos(q_1) \sin(q_3)) \cdot \sin(q_4) - \cos(q_4) \sin(q_1) \sin(q_2)) \right] \cdot \cos(q_6)$$



$$\begin{aligned}
 \mathbf{a}_y &= -\text{sen}(q_5) \cdot [(\text{sen}(q_1) \cos(q_2) \cos(q_3) + \cos(q_1) \text{sen}(q_3)) \cdot \cos(q_4) + \text{sen}(q_1) \text{sen}(q_2) \text{sen}(q_4)] + \\
 &\quad \cos(q_5) \cdot [-\text{sen}(q_1) \cos(q_2) \text{sen}(q_3) + \cos(q_1) \cos(q_3)] \\
 \mathbf{P}_y &= \left[\begin{aligned} &-\text{sen}(q_5) \cdot [(\text{sen}(q_1) \cos(q_2) \cos(q_3) + \cos(q_1) \text{sen}(q_3)) \cdot \cos(q_4) + \text{sen}(q_1) \text{sen}(q_2) \text{sen}(q_4)] + \\ &[-\text{sen}(q_1) \cos(q_2) \text{sen}(q_3) + \cos(q_1) \cos(q_3)] \cdot \cos(q_5) \\ &(-\text{sen}(q_1) \cos(q_2) \text{sen}(q_3) + \cos(q_1) \cos(q_3)) \cdot 350 + 400 \cdot \text{sen}(q_1) \cos(q_2) \end{aligned} \right] \cdot 250 + \\
 \mathbf{n}_z &= [(\text{sen}(q_2) \cos(q_3) \cos(q_4) - \cos(q_2) \text{sen}(q_4)) \cdot \cos(q_5) + (-\text{sen}(q_3) \text{sen}(q_2)) \cdot \text{sen}(q_5)] \cdot \cos(q_6) + \\
 &\quad [\text{sen}(q_4) \text{sen}(q_2) \cos(q_3) + \cos(q_2) \cos(q_4)] \cdot \text{sen}(q_6) \\
 \mathbf{o}_z &= -\text{sen}(q_6) \cdot [(\text{sen}(q_2) \cos(q_3) \cos(q_4) - \cos(q_2) \text{sen}(q_4)) \cdot \cos(q_5) + (-\text{sen}(q_3) \text{sen}(q_2)) \cdot \text{sen}(q_5)] + \\
 &\quad \cos(q_6) \cdot [\text{sen}(q_4) \text{sen}(q_2) \cos(q_3) + \cos(q_2) \cos(q_4)] \\
 \mathbf{a}_z &= -\text{sen}(q_5) \cdot [\text{sen}(q_2) \cos(q_3) \cos(q_4) - \cos(q_2) \text{sen}(q_4)] + [-\text{sen}(q_3) \text{sen}(q_2)] \cdot \cos(q_5) \\
 \mathbf{P}_z &= [-\text{sen}(q_5) \cdot (\text{sen}(q_2) \cos(q_3) \cos(q_4) - \cos(q_2) \text{sen}(q_4)) + (-\text{sen}(q_3) \text{sen}(q_2)) \cdot \cos(q_5)] \cdot 250 - \\
 &\quad 350 \cdot \text{sen}(q_3) \text{sen}(q_2) + 400 \cdot \cos(q_2) + 250
 \end{aligned}$$

El problema cinemático inverso, explicado anteriormente, será el que centre nuestro interés en este capítulo. Dicho análisis requiere de unos cálculos más complicados que los que se derivan del problema cinemático directo. De ahí que sea necesaria la utilización de medios informáticos concretos para resolver este problema. En el apartado siguiente se introduce la herramienta informática que se ha utilizado para el análisis de la cinemática del manipulador.

5.2. La herramienta de análisis: CosmoWorks

CosmosWorks es un software de análisis y optimización totalmente integrado dentro de SolidWorks. CosmosWorks realiza análisis formales por el método de elementos finitos (FEM) aprovechando la total asociatividad con la aplicación de diseño. Esto se realiza mediante el mallado de la pieza 3D y la aplicación por medio de técnicas computacionales de la resolución de ecuaciones tensoriales sobre los nodos de la estructura. Entre sus funcionalidades, permite obtener resultados de: esfuerzos lineales, térmicos, no-lineales, deformaciones, desplazamientos, transferencia de calor, optimización, caída, etc.

De esta manera, definidas unas condiciones de simulación, tales como restricciones, materiales de la estructura, fuerzas aplicadas y relaciones entre las piezas del ensamblaje, se puede predecir el comportamiento del diseño respecto a deformaciones, desplazamientos y tensiones así como factores de seguridad respecto a límites tensionales definidos por el usuario. Este último cobra especial relevancia en este trabajo debido a que interesa conocer en qué orden el diseño responderá a la carga máxima, antes de alcanzar los límites de deformación elástica.

Todo proceso de simulación depende de muchos factores: modelo a simular, condiciones, mallado, potencia de cálculo del ordenador etc. Para una correcta simulación y ejecución se recomienda acceder a las páginas de ayuda en línea de COSMOSWORKS [79], que aclararán el uso y los diferentes controles de todas las opciones.

5.3. Modelo cinemático del brazo

Una vez que contamos con las herramientas necesarias para llevar a cabo el estudio de la cinemática del manipulador, se pasará a precisar cada uno de los modelos que fue necesario construir y definir adecuadamente en SolidWorks.

La tarea que se trata de analizar en este trabajo es la apertura de una puerta. Como tal, se hace necesario modelarla, junto con el brazo, para poder simular cada uno de los movimientos que serán posteriormente analizados. Así mismo, en esta sección se presentan los modelos construidos con SolidWorks y que fueron probados en CosmosWorks.

En la Figura 5.4 podemos observar el prototipo del manipulador UC3M-LWR-1 junto a su Gestor de Operaciones. El gestor de operaciones proporciona un acceso directo a todas las características del brazo (dimensiones, propiedades físicas, etc.), componentes y relaciones de posición que se establecen entre las distintas partes. En dicha figura, los símbolos que preceden a cada uno de los componentes indican el estado en el que se encuentran. La notación (f) advierte que el elemento está fijo, que no se puede mover. Por el contrario, la notación (-) advierte que aún tienen un grado de libertad de movimiento. Igualmente, en el margen inferior izquierdo de la Figura 5.4 se muestra el sistema de coordenadas global que se utilizará como referencia fija en todos los cálculos.

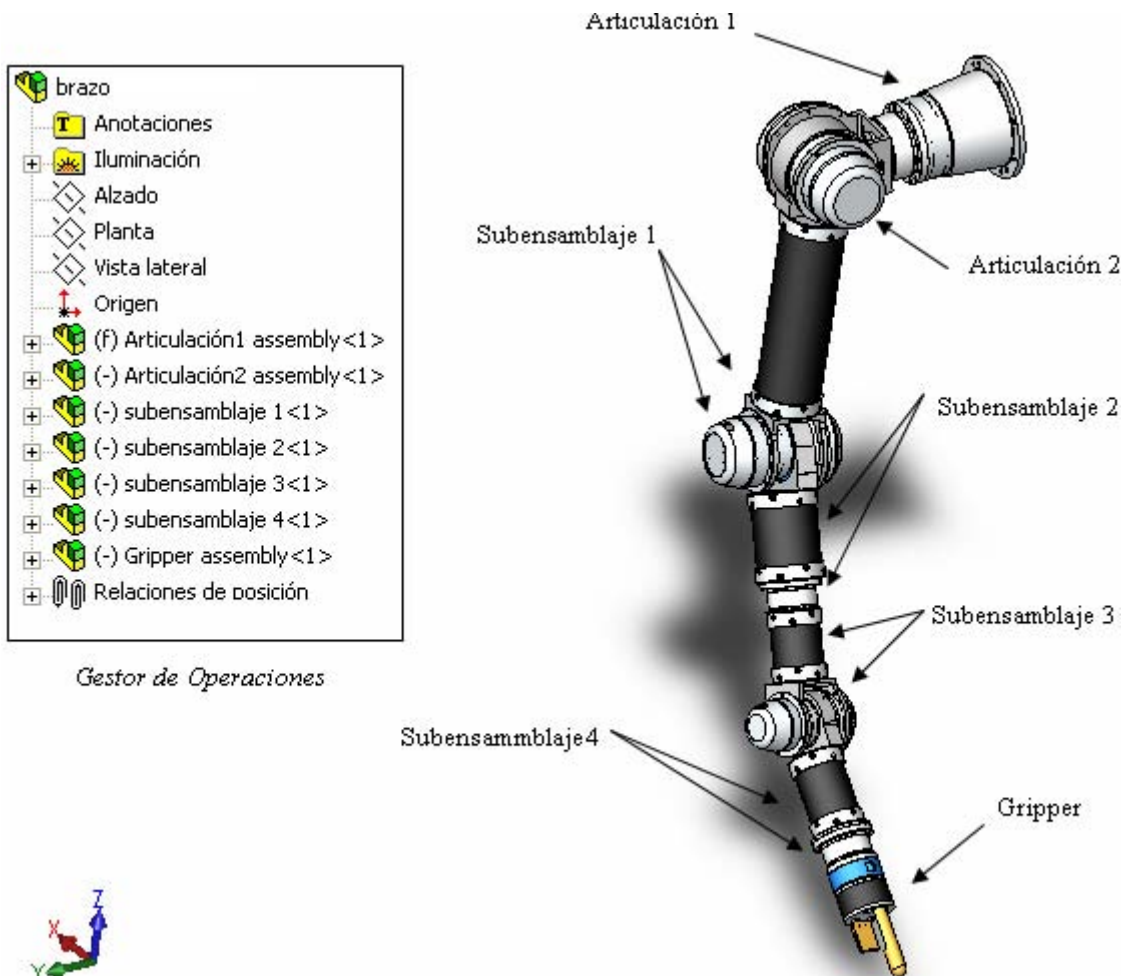


Figura 5.4.- Modelo del manipulador UC3M-LWR-1 construido con SolidWorks.

En el Anexo III se muestran diversas tablas en las que se puede encontrar información referente a los materiales, así como de la masa y el volumen de cada elemento calculado con SolidWorks que se utilizaron en las simulaciones.

5.4. El sistema de coordenadas

En el presente trabajo, interesa definir los movimientos del robot en el espacio cartesiano con relación a la tarea que se pretende desarrollar. Por consiguiente, el control del robot hace necesario obtener los valores de las variables articulares para que la posición y orientación del robot, o en particular de su actuador final, sea la deseada. Nuestro análisis se enfrentará, por lo tanto, con un problema a resolver de cinemática inversa.

Como se mencionó en la introducción de este capítulo, el problema cinemático inverso consiste en dado un punto final del extremo del manipulador determinado por unas coordenadas $(x,y,z,\alpha,\beta,\gamma)$, conocer la configuración alcanzada por el manipulador, definido por los ángulos que deben tomar las articulaciones necesarios para alcanzar dicho punto $(x,y,z,\alpha,\beta,\gamma)$.

Como se ha explicado previamente, el problema cinemático inverso requiere de unos cálculos más complicados que los que se derivan del problema cinemático directo. De ahí que sea necesaria la utilización de la herramienta informática descrita previamente para resolver este problema.

Por tanto, para llevar a cabo este análisis, es necesario definir convenientemente las posiciones y orientaciones de los “objetos” en el espacio. Este apartado está destinado a introducir los conceptos básicos que se emplearán en los análisis cinemático y dinámico tratados en este capítulo y el próximo respectivamente.

Se entiende por modelo geométrico del robot la relación entre los valores de las variables asociadas a las articulaciones y la situación (posición y orientación) de un sistema de referencia, solidario al robot, que se define teniendo en cuenta la tarea que se pretende desarrollar.

En la Figura 5.5 se ilustran los diferentes sistemas de referencia implicados en el análisis y a los que nos referiremos en distintas ocasiones. La notación utilizada en la figura es la utilizada en [78].

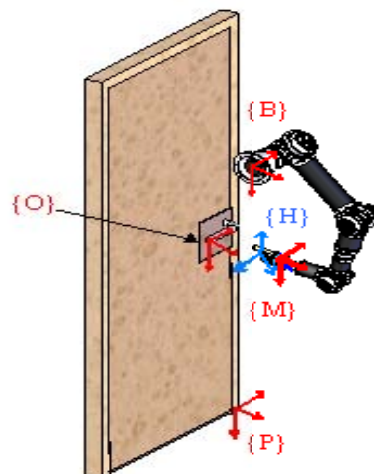


Figura 5.5.- Sistemas de referencia utilizados.



Sea $\{B\}$ el sistema de referencia asociado a la base del manipulador. El manipulador, está definido por una cadena cinemática en cuyo extremo existe una muñeca de sistema de referencia $\{M\}$. Otro sistema asociado al manipulador es el $\{H\}$, solidario a la herramienta que soporta la muñeca, en nuestro caso una pinza. Este último se define con origen en el centro del espacio entre los dedos.

Por otro lado, tenemos los sistemas asociados a la tarea que se pretende realizar. Así, tenemos un sistema objetivo $\{O\}$ que permite definir dónde se debe posicionar la herramienta para realizar la tarea en cuestión. Este sistema es solidario en todo momento al objeto a manipular. El sistema $\{P\}$ es característico del marco de la tarea que se quiere realizar. Al final del movimiento, $\{H\}$ debe coincidir con $\{O\}$.

Una vez situados los sistemas de referencia utilizados, el siguiente paso que daremos en nuestro análisis inverso será obtener los valores de las variables articulares, conocida la situación definida por $\{M\}$. En este punto, conviene poner de manifiesto que, debido a la redundancia existente en el número de grados de libertad, una vez que el objetivo esté suficientemente cerca es posible planificar diferentes movimientos alternativos combinando los de la base y los del manipulador. Sin embargo, el problema suele simplificarse resolviéndolo en dos pasos. Resolveremos el problema secuencialmente: obtendremos primero la posición de la base, tal que nos permita alcanzar $\{M\}$, y a continuación se obtendrían las variables articulares del manipulador.

En la Figura 5.6 se muestran las variables con las que jugaremos a la hora de situar la base del robot en una determinada posición.

En el caso general, el espacio de las variables articulares tendrá n dimensiones, con lo que se empleará un vector de dimensión n para especificar la posición y orientación del robot. El espacio de trabajo de un manipulador tendrá seis dimensiones, necesitándose seis valores para especificar la posición y orientación. En manipuladores móviles planeares, bastaría con un espacio de dimensión tres; es decir, necesitamos tres variables para definir completamente su situación. En la Figura 5.6, se denotan cada una de ellas: distancia normal, distancia tangencial y orientación. La distancia al suelo se considera fija, no variable, ya que refiere el punto donde se ancla el manipulador a la base, que se desplaza sobre una superficie plana. Nótese que todas en su conjunto definen las coordenadas relativas del sistema $\{B\}$ con respecto al $\{P\}$.

Para poder definir las seis variables articulares, una vez desplazada la base a una posición determinada, necesitamos definir nuevos sistemas de referencia solidarios a cada una de las articulaciones. Dichos sistemas, centrados en el origen de la articulación, se colocan de forma que se hace coincidir el eje de giro de la misma, con el eje z' del nuevo sistema, ver Figura 5.7. Para establecer los sentidos de giros se sigue la ley de la mano derecha.

Sobre estos conceptos se definirá el análisis cinemático que podremos desarrollar en apartados posteriores. Partimos de un manipulador móvil, enfrentado a una puerta que ha de manipular, con unos sistemas de referencia debidamente definidos para la tarea que ha de realizar. En primer lugar, desplazaremos la base móvil hasta situarla en una posición adecuada desde la que poder alcanzar la posición deseada. Para realizar este movimiento nos desplazaremos normal y tangencialmente a la puerta. Posteriormente, se definirán los seis ángulos articulares. Dentro del conjunto de ángulos posibles bajo los que alcanzaríamos $\{M\}$, buscaremos aquellos que requieran un menor desplazamiento articular.

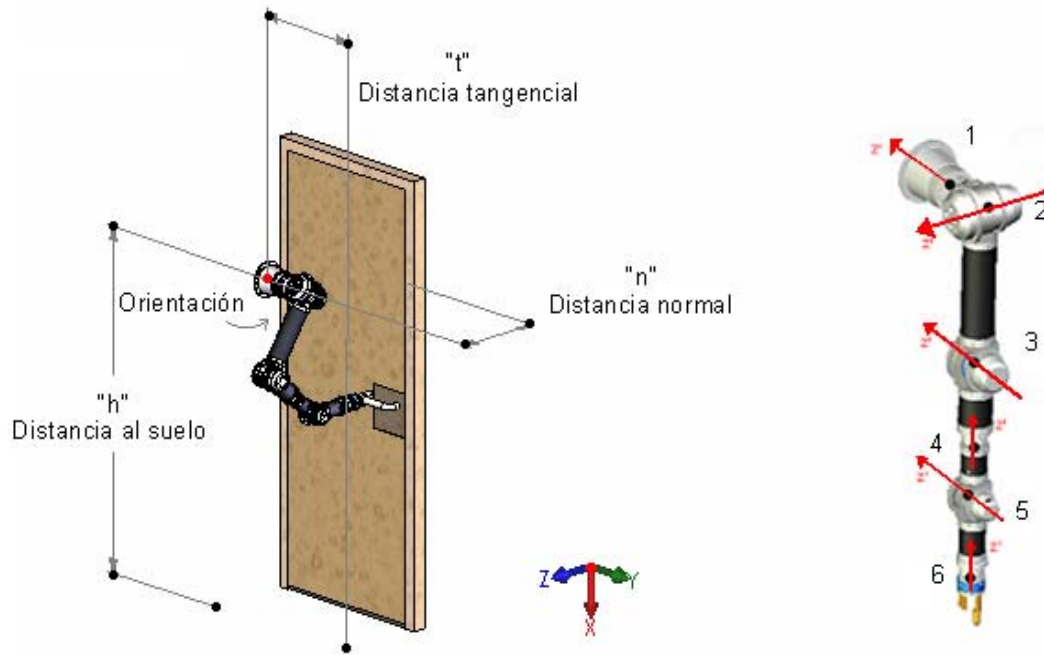


Figura 5.6.- Variables para posicionamiento de la base. Figura 5.7.- Sistemas de referencia articulares.

5.4.1. Espacio de trabajo

La resolución del problema del posicionamiento inicial de la base hace necesario considerar, en primer lugar la existencia de soluciones. En efecto, se trata de asegurar que la posición y orientación $\{M\}$ pueda ser alcanzada por la muñeca del manipulador, es decir, si está dentro de lo que se denomina *espacio de trabajo alcanzable*. La existencia o no de soluciones depende del número de articulaciones del manipulador. En general, un manipulador con menos de seis grados de libertad no puede situar y orientar el actuador final en una posición cualquiera del espacio 3D. En nuestro caso, el manipulador instalado en MANFRED cuenta con los seis grados de libertad suficientes y necesarios para posicionar el actuador final en cualquier situación del espacio.

De forma más precisa, Craig John [80] se distingue entre espacio de trabajo alcanzable o volumen que puede ser alcanzado con el órgano terminal en al menos una orientación, y el *espacio de trabajo de manipulación con destreza* o volumen que puede ser alcanzado con el actuador final en cualquier orientación. Es habitual que muchas de las articulaciones en robótica no puedan girar 360°. En la práctica, se establecen restricciones adicionales que limitan el espacio de trabajo.

En general, el sub-espacio de trabajo alcanzable por un manipulador de n grados de libertad es un subconjunto del espacio de trabajo que puede expresarse como función de las n variables de las articulaciones. De esta forma, dando valores a estas variables articulares en todo su rango se determinaría, mediante el modelo directo, el sub-espacio alcanzable del manipulador. En la Figura 5.8 comprobamos los rangos articulares de las dos primeras articulaciones del manipulador UC3M-LWR-1.

Podemos comprobar que la articulación 1 gira 360° en el eje transversal (eje que dirige los movimientos en el plano sagital, familiarmente, plano de perfil). La articulación 2 permite giros en el eje antero-posterior (eje de giro en el plano de frente) y más concretamente el movimiento de separación con respecto al tronco en el plano frontal. A

diferencia de la articulación 1, la 2 no permite un giro completo, tenemos restringido el movimiento en la forma en la que se aprecia en la Figura 5.8. Teniendo en cuenta lo comentado, además el alcance total del brazo que sabemos es 955 mm, contamos con toda la información necesaria para conocer el sub-espacio de trabajo donde maniobrá nuestro manipulador para esta tarea. Este quedaría definido por una esfera de radio 955 mm a la que se secciona un casquete esférico de dimensiones tales que cumplan la restricción impuesta por la articulación 2. En la Figura 5.9 vemos una construcción sencilla que ilustra la relación de radios entre los dos volúmenes.

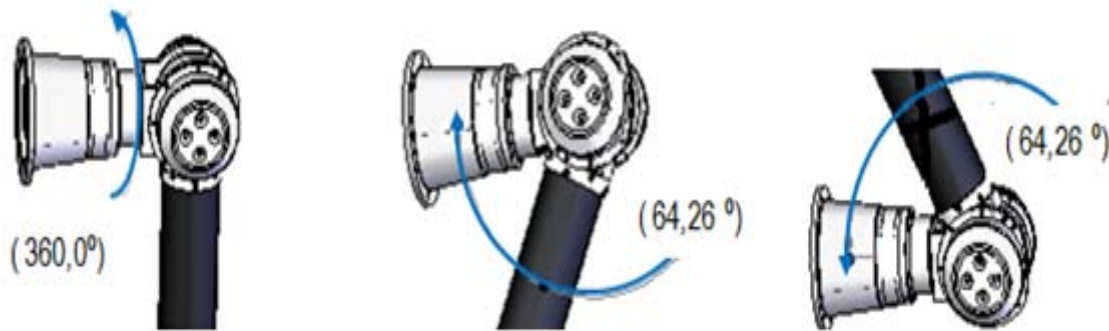


Figura 5.8.- Rangos articulares de las dos primeras articulaciones del manipulador UC3M-LWR-I.

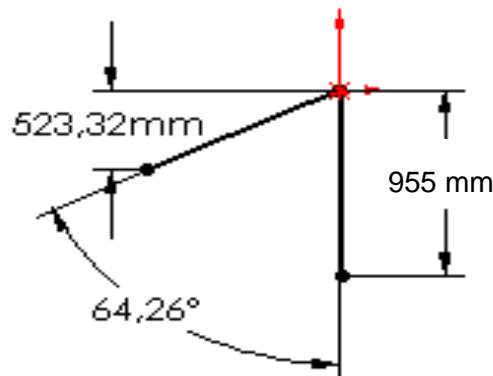


Figura 5.9.- Radio del casquete esférico que definiría el espacio de trabajo.

El sub-espacio de trabajo del robot que interesa conocer para la tarea que estamos analizando, sería por lo tanto, el volumen encerrado por una esfera de radio 955 mm a la que restamos un casquete esférico de radio 523.32 mm. El resto de articulaciones se suponen completamente estiradas de forma que el brazo tenga el mayor alcance en la frontal a la puerta.

Las dimensiones de la base móvil en la que se instala el brazo manipulador, imponen una serie de nuevas restricciones en cuanto al posicionamiento del vehículo al comienzo de la tarea. La base es octogonal de 615 mm de ancho. Ello involucra una limitación en la dirección normal, debido a esto, lo más cerca que el robot se podrá posicionar respecto a la puerta es 307.5 mm (con una rotación de la base igual a cero). En la dirección tangencial se podrá mover igualmente condicionado por el alcance y por el rango articular de la rotación 2.

Llegados a este punto, se propone la siguiente distribución para estudiar la influencia del posicionamiento inicial del vehículo y el consiguiente posicionamiento articular del brazo, Figura 5.10.

Se ha buscado una región desde la que poder abrir como mínimo 20° la puerta, una vez girado el pomo, sin necesidad de mover la base. Para ello, se ha jugado con desplazamientos en las direcciones normal y tangencial a la puerta, mientras que se impone una rotación de la base sobre su propio eje igual a cero.

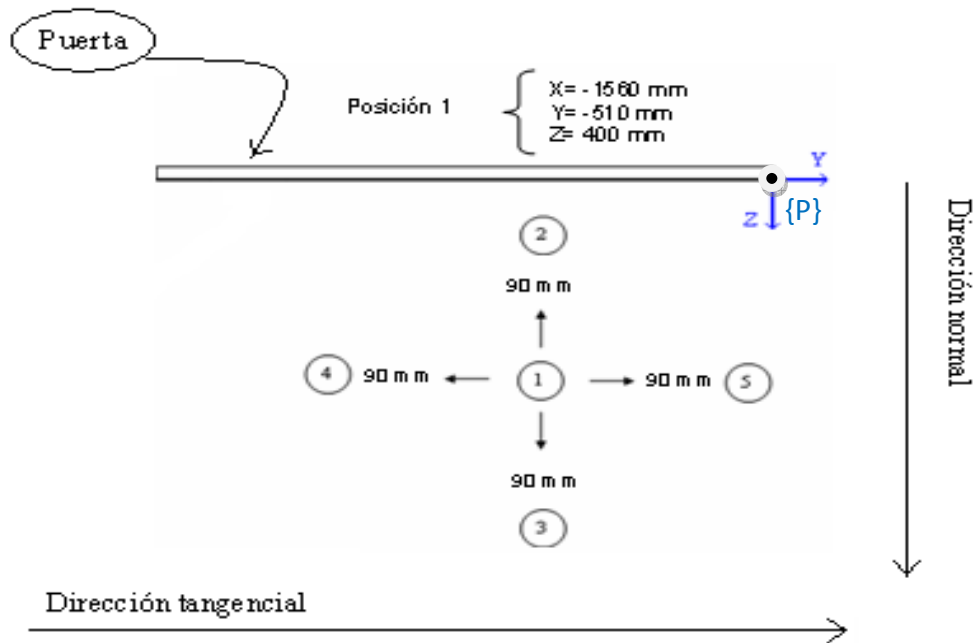


Figura 5.10.- Distribución de las posiciones iniciales de la base.

En el apartado 5.4.5 comprobaremos que desde la posición más alejada en la dirección normal (posición 3) conseguimos abrir 20,070°. Desde el resto de posiciones, la apertura supera ampliamente estos 20° aproximados. En este mismo apartado (5.4.5) al final de este capítulo se realizará un estudio del alcance máximo del brazo desde cada posición.

Veamos cómo nos moveremos a la largo de estas dos direcciones (dirección normal según eje Z y dirección tangencial según eje Y) para definir cada una de las posiciones que estudiaremos (Respecto al sistema de referencia $\{P\}$ en las Figuras 5.5 y 5.10):

- Las posiciones 1, 2, y 3 se han definido tal que se consigue alinear el centro de rotación de la articulación 2 (hombro) con el punto a manipular en el pomo.
- La posición 2 está situada a 310 mm en la normal a la puerta, rozando valores cercanos a los admisibles dados por las dimensiones de la base.
- La posición 3 es la más alejada en la dirección normal que consigue abrir 20° como mínimo.
- Partiendo de la posición intermedia en la normal a la puerta, posición 1, se definen otras dos posiciones (4 y 5) para ver el efecto que produce desplazarnos a la izquierda y a la derecha respectivamente en la dirección tangencial.

Se concluye que los parámetros que definirían la situación de la base del robot al inicio de la tarea, serán en cada caso los mostrados en la Tabla 5.2:

Posiciones	Variables para el Posicionamiento Inicial de la Base			
	Coordenada X (mm)	Coordenada Y (mm)	Coordenada Z (mm)	Orientación (°)
Posición 1	- 1560	- 510	+ 400	0
Posición 2	- 1560	- 510	+ 310	0
Posición 3	- 1560	- 510	+ 490	0
Posición 4	- 1560	- 600	+ 400	0
Posición 5	- 1560	- 420	+ 400	0

Tabla 5.2.- Variables para el posicionamiento inicial de la base del robot MANFRED.

La tarea que analizaremos es, como ya se mencionó, la apertura de una puerta. De momento contamos con un modelo perfectamente definido, en una situación inicial completamente delimitada. Cada uno de las simulaciones programadas se probó con la herramienta de simulación dinámica CosmosMotion, completamente integrada dentro de SolidWorks.

La tarea de apertura de la puerta la podemos dividir en dos movimientos básicos, tal y como se puede apreciar en la Figura 5.11. El primer movimiento consiste en el giro del pomo un valor de 30°. Este valor se ha determinado experimentalmente comprobándose que el resbalón se oculta permitiendo de este modo comenzar la apertura de la puerta. El segundo movimiento consiste en abrir la puerta mediante un desplazamiento angular sobre su eje de 20°.

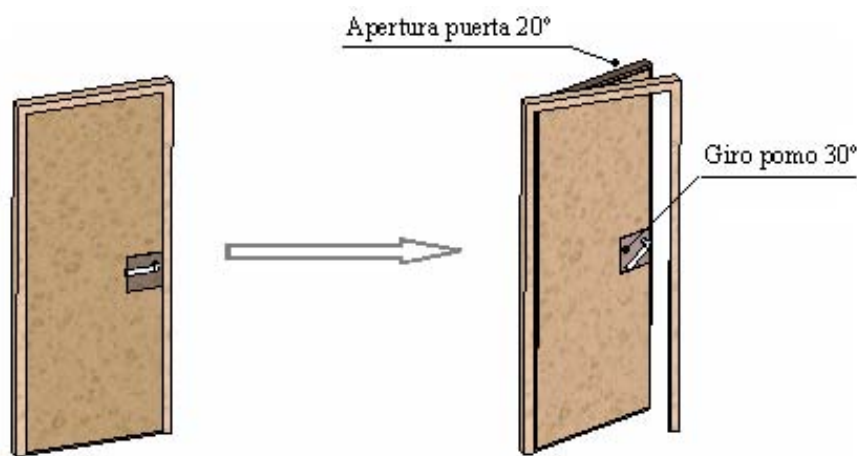


Figura 5.11.- Movimientos necesarios para apertura de la puerta.

Resulta sencillo, a la vez que un método bastante preciso, obtener las trayectorias que describirá el manipulador simulando estos dos desplazamientos simples. Esto se conseguirá definiendo adecuadamente relaciones que obliguen al extremo del brazo a seguir este movimiento. En otras palabras, consiguiendo que el manipulador sea “arrastrado” por la puerta y dejando a Cosmos generar automáticamente las trayectorias más óptimas bajo la hipótesis de menores desplazamientos.

La puerta modelo está diseñada de tal forma que se necesita un giro de pomo igual a 30° para que pueda ser desplazada en el sentido de apertura. El espacio de trabajo de nuestro brazo es un espacio de trabajo típicamente humano, por lo que las velocidades deben ser moderadas por lógicas razones de seguridad. Bajo esta premisa, se considera un límite adecuado entre 20-25°/segundo aproximadamente como techo para las velocidades.

Tomaremos como velocidad para el giro del pomo y para la apertura de la puerta el valor máximo posible, siempre que mantenga las velocidades articulares del manipulador por debajo de este tope. Serán valores máximos a fin de considerar los casos más críticos para el brazo a nivel estructural.

Probando con una serie de valores, se determina que el valor máximo de velocidad que podemos tomar en el giro del pomo es de 20 °/seg, mientras que para la apertura de la puerta el valor de velocidad disminuye hasta 10 °/seg para de esta forma, mantener las velocidades articulares por debajo de los topes considerados como adecuados para preservar la seguridad en entornos humanos. Por tanto, si debemos girar 30° para conseguir iniciar la apertura, el tiempo que tardaremos en realizar esta tarea será de 1.5 segundos a velocidad constante. En el caso de la apertura, el desplazamiento angular se ha establecido para todas las simulaciones en 20°. Se deduce que tardaría 2 segundos en conseguir esta posición girando a una velocidad constante de 10°/seg. Luego el tiempo total de simulación es de 3.5 segundos. En la Figura 5.12 se presentan los ángulos desplazados, velocidades y aceleraciones, obtenidos en Cosmos, para cada uno de los movimientos descritos. Como se comentó anteriormente, la combinación de estos movimientos sencillos y su posterior simulación, servirá para generar las trayectorias seguidas por nuestro brazo.

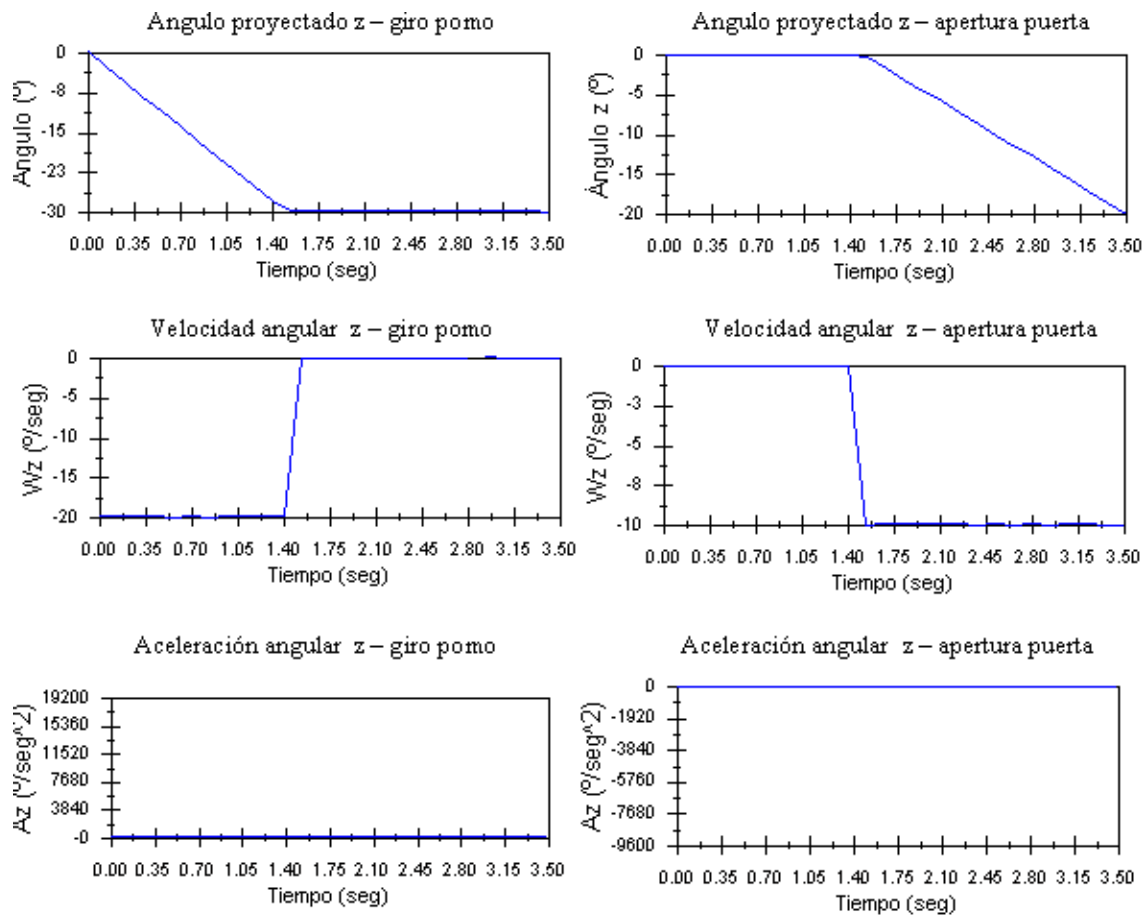


Figura 5.12.- Movimiento de giro y apertura de la puerta a velocidad constante.

Los datos en cuanto a las trayectorias; desplazamientos, velocidades y aceleraciones que se presentan en cada articulación para el movimiento representado en la Figura 5.11, se exponen más adelante. El mantenimiento de velocidades constantes (constante durante un determinado tiempo y la inmediata caída hasta hacerse cero) presenta distintos

problemas. El principal es a efectos de simulación, por la imposibilidad de definir para el mismo tiempo dos valores diferentes de velocidad. Este hecho nos obliga a definir un paso que por muy pequeño que sea, físicamente sería inviable. Otro inconveniente a tener en cuenta es el hecho de que este movimiento así definido resulta brusco para el entorno humano, no se observa continuidad en el movimiento. Además, contamos con un pico considerable en la aceleración angular como resultado de pasar de -20 °/seg a 0 , en el caso del giro del pomo, y de 0 a -10 °/seg en el caso de la apertura de la puerta.

Llegados a este punto, se pensó definir velocidad decreciente en el giro del pomo y creciente para la apertura de la puerta, salvando, de este modo, la imprecisión que nos ocasionaba definir velocidades constantes. Por otro lado, conseguimos dar una mayor continuidad al movimiento enlazando la parada del giro con el inicio de la apertura. En la Figura 5.13 observamos los desplazamientos, velocidades y aceleraciones para estos movimientos.

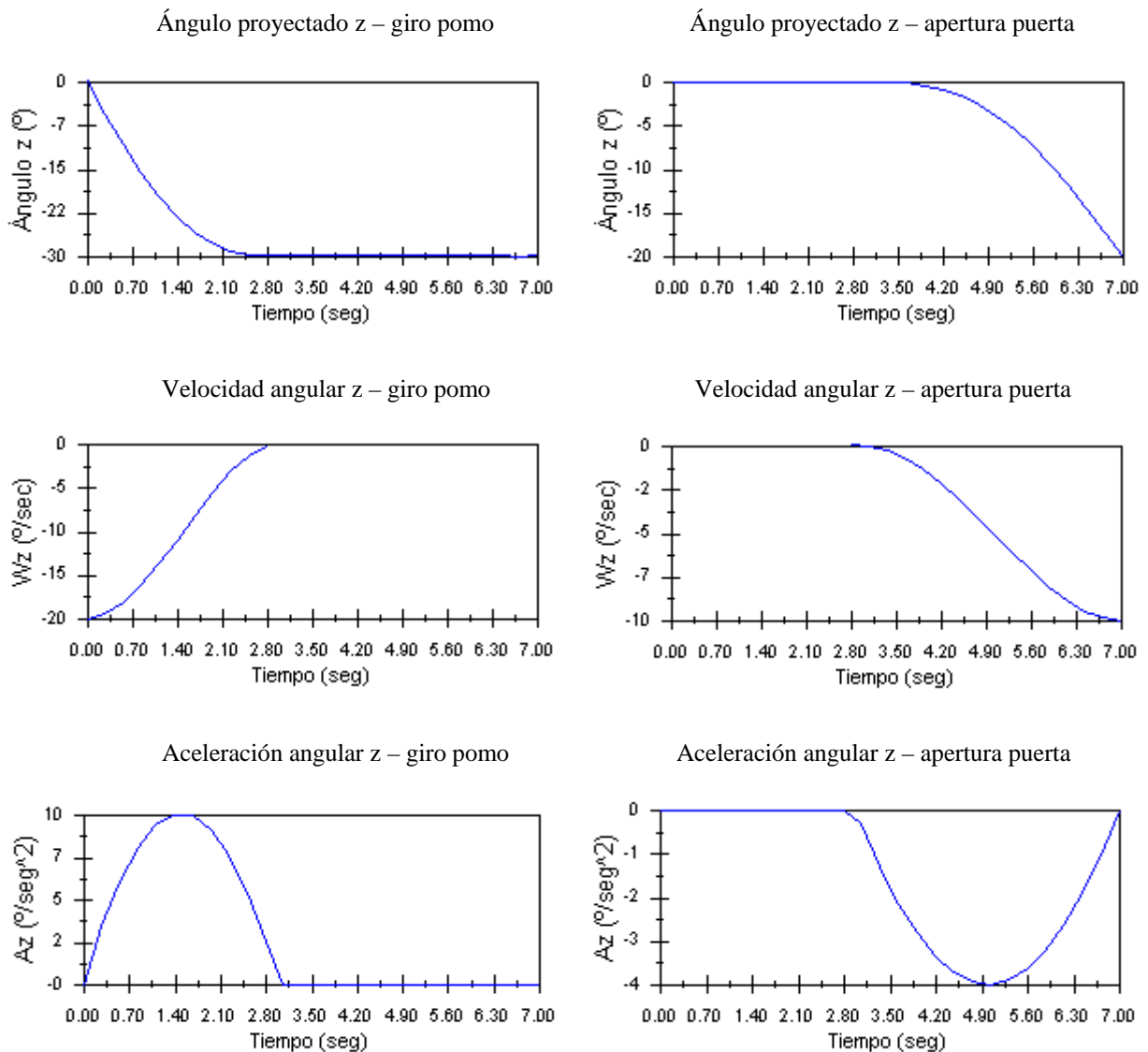


Figura 5.13.- Movimiento de giro a velocidad decreciente y apertura de la puerta velocidad creciente.

En este caso, es lógico que la duración total de la tarea sea el doble que en el caso anterior, manteniéndose, de cualquier forma, dentro de unos valores aceptables (7 segundos de duración). En contraste, disponemos de un movimiento continuo y sin



saltos bruscos en las velocidades, ni picos excesivos en las aceleraciones. Notar que para suavizar más el movimiento, en los cambios de velocidades se ha redondeado el paso, aproximando el tramo descendente en la velocidad (caso del giro) a una forma cuadrática en lugar de lineal. Se aplica el mismo redondeo en el caso de la apertura. Las trayectorias obtenidas en el brazo mediante la simulación de este movimiento, se presentan igualmente en posteriores apartados.

Las dos formas diferentes de realizar la tarea serán tratadas tanto en el análisis cinemático, como en el análisis dinámico. No obstante, la forma que programa velocidades constantes será probada para observar sus resultados, solamente desde una posición porque, a priori, no resulta tan interesante estudiarla. La segunda forma propuesta, sin embargo, se simulará desde todas las posiciones.

5.4.2. Simulaciones: Trayectorias velocidades y aceleraciones

En las secciones anteriores se han sentado las bases sobre las que se argumenta el presente análisis cinemático. En las páginas siguientes, se desarrolla cada uno de las simulaciones propuestos a estudio. En definitiva, se realizará un análisis cinemático del manipulador en seis situaciones diferentes. Cada una será tratada por separado realizando seis simulaciones diferentes que veremos a continuación.

Vimos que consideraríamos dos formas diferentes de abordar la apertura de la puerta; la primera manteniendo velocidades constantes y la segunda que conseguía un movimiento más continuo mediante la combinación de velocidad decreciente y creciente. El segundo caso será estudiado desde las cinco posiciones en las simulaciones 1, 2, 3, 4, y 5 respectivamente. Por su parte, la primera opción la probaremos solamente desde la posición 1 en la simulación 6.

La metodología seguida para presentar los resultados en cada simulación será la que se expone a continuación. Dados unos sistemas de coordenadas, definidos todos los ejes de giro de las articulaciones y supuestas unas variables que determinan el posicionamiento inicial:

- Daremos valores a estas variables que muevan la base a una determinada posición que permita alcanzar la tarea (recordar distribución de posiciones de la Figura 5.10 y Tabla 5.2).
- Dada la posición y orientación del actuador final, condicionadas por la tarea a realizar, determinar todas las variables articulares. Necesitaremos, por tanto, resolver el modelo inverso. Notar que en todos los casos partimos del brazo completamente estirado.
- Dentro del conjunto de todos los posibles ángulos articulares que permiten alcanzar el objeto a manipular, buscaremos aquellos en los que el desplazamiento sea mínimo. De la misma forma, elegiremos aquellos que definan una posición más humaniforme.
- Definir los dos movimientos sencillos de giro y apertura de la puerta.
- Relacionar adecuadamente la herramienta instalada en el manipulador (en nuestro caso una pinza) con el objeto que ha de manipular (pomo de la puerta). De esta forma se consigue que sea la puerta la que guíe el movimiento del brazo, facilitando la obtención de trayectorias bastante precisas.

- Simular el movimiento. Las seis simulaciones se realizan obligando a la pinza a permanecer en todo momento perpendicular a la puerta es decir, nunca podrá existir movimiento relativo entre el pomo y dicha pinza.
- Obtener resultados durante el tiempo de simulación. Se obtendrán datos acerca de desplazamientos, velocidades y aceleraciones de cada articulación.

• **SIMULACIÓN 1**

Las variables para el posicionamiento inicial de la base tendrán asignados en esta simulación los siguientes valores, Figura 5.14:

Rotación base = 0° (perpendicular a la puerta)

n = 400 mm.

t = 510 mm.

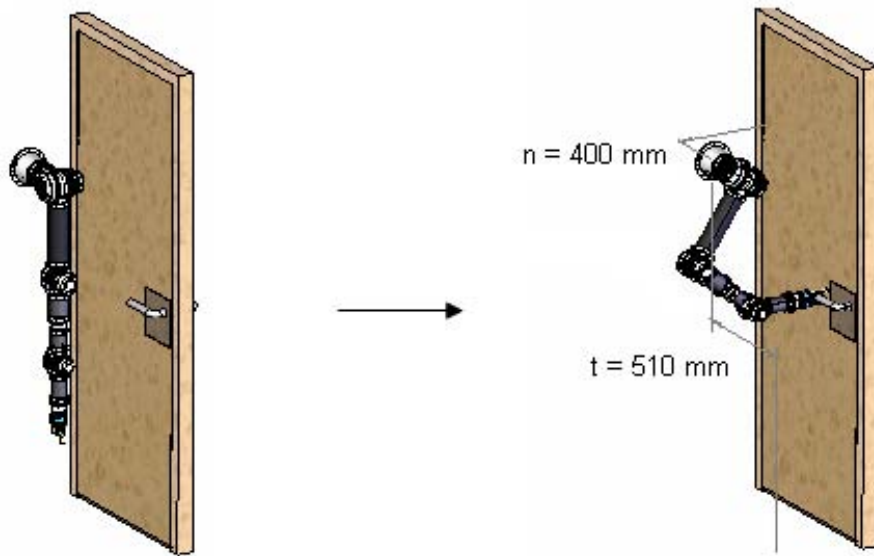


Figura 5.14.- Posición inicial de la base en la simulación 1 para alcanzar el pomo.

En esta situación, las variables articulares necesarias para alcanzar {M} (sistema que se define en la muñeca) y pasar de la posición inicial completamente estirada al agarre del pomo, se listan en la Tabla 5.3:

Revolute 1	+ 33.75° *
Revolute 2	- 0.33° *
Revolute 3	- 83.15° *
Revolute 4	+ 0.28° *
Revolute 5	- 40.60° *
Revolute 6	+ 0.06° *

Tabla 5.3.- Variables articulares en la simulación 1 para alcanzar el pomo.

*medidas con respecto a la posición de partida del brazo completamente estirado.

Los sentidos positivos o negativos de los ángulos desplazados se ajustan al criterio de la mano derecha según la Figura 5.7. Para calcularlos se ha seguido el criterio de mínimo

desplazamiento. De la misma forma, se ha buscado una postura en la que los ángulos desplazados queden dentro de unos rangos humanos articulares normales.

En teoría, la articulación 2 no debería haber sufrido ningún desplazamiento respecto del brazo completamente estirado, ya que, su centro de rotación se encuentra alineado con el punto que manipula en el pomo. Esto no se cumple debido a que los ejes del brazo y de los antebrazos sufren pequeñas desviaciones constructivas y no tienen alineados sus centros de gravedad. Aún así vemos que el desplazamiento es prácticamente imperceptible (-0.33° respecto a la vertical). De la misma forma, los pequeños ángulos movidos por las revolutes 4 y 6 juegan el mismo papel para compensar dicho efecto.

Una vez que tenemos situado el brazo según los ángulos que se muestran en la Tabla 5.3, estaríamos en condiciones de poder simular el movimiento según la trayectoria de giro con velocidad decreciente y apertura con velocidad creciente (caso 2). Los resultados obtenidos en cuanto a desplazamientos, velocidades y aceleraciones los podemos visualizar en las Figuras 5.15 y 5.16 que serán comentadas posteriormente en el apartado 5.4.3 de Análisis comparativo de las simulaciones. Para consultar datos precisos a cerca de las simulaciones realizadas recurrir al Anexo V de análisis cinemático.

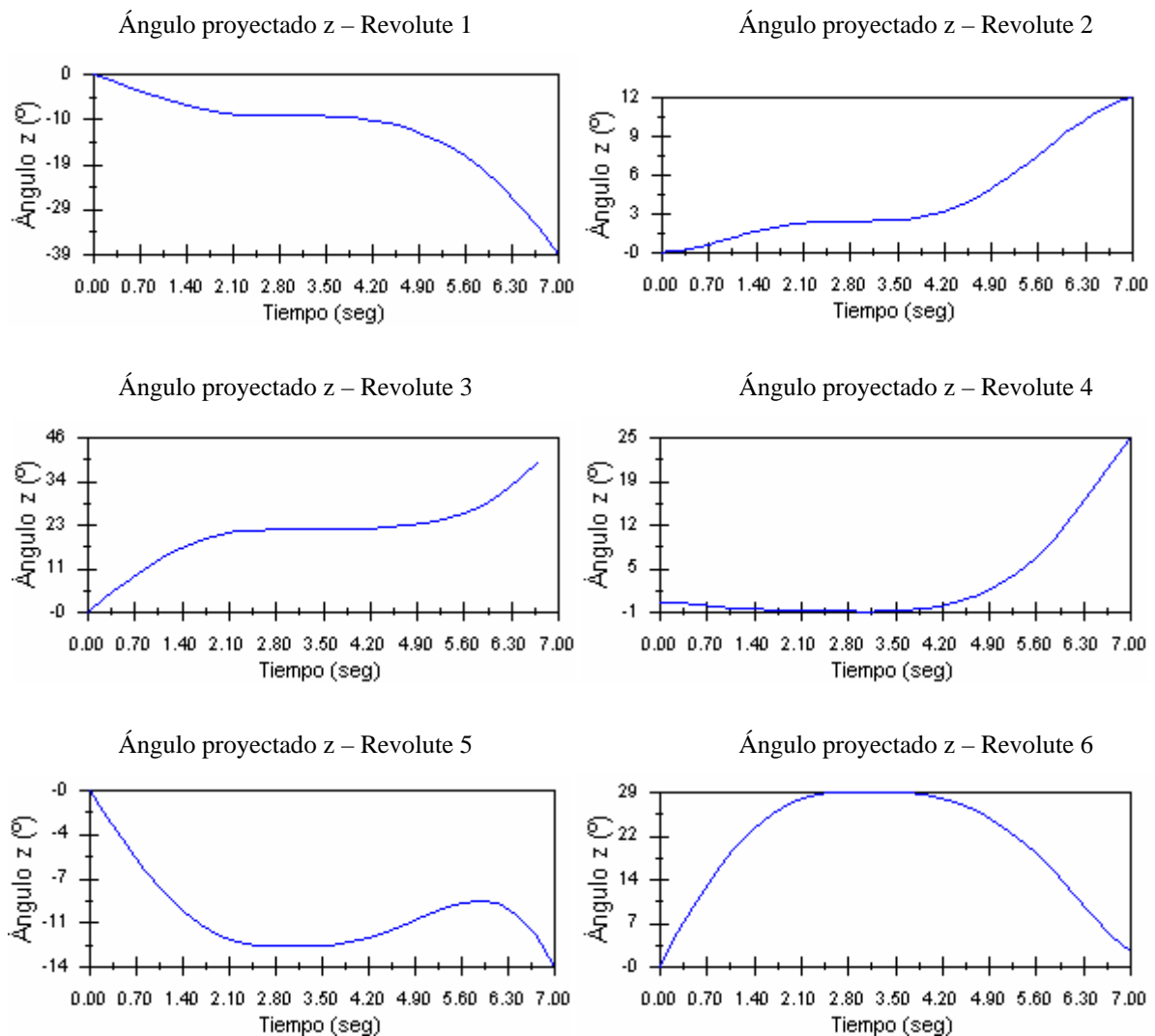
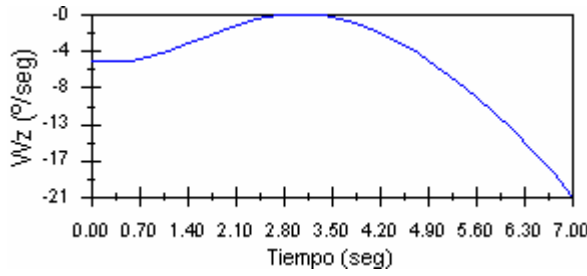
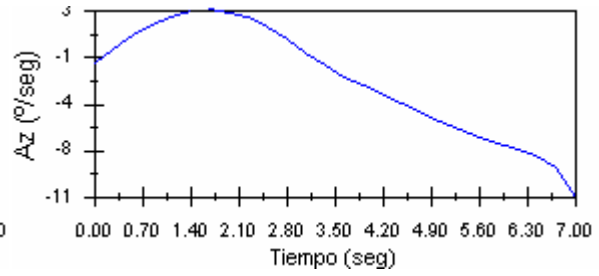


Figura 5.15.- Evolución de los ángulos proyectados en z de cada articulación en la simulación 1.

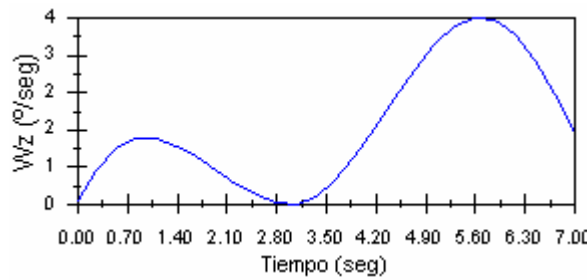
Velocidad angular – Revolute 1



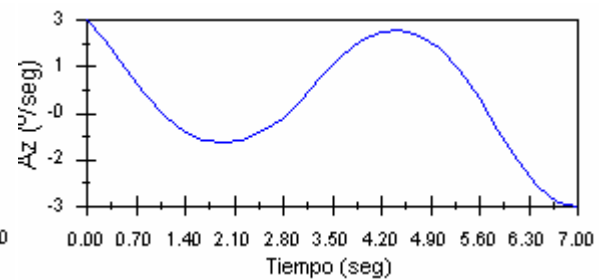
Aceleración angular – Revolute 1



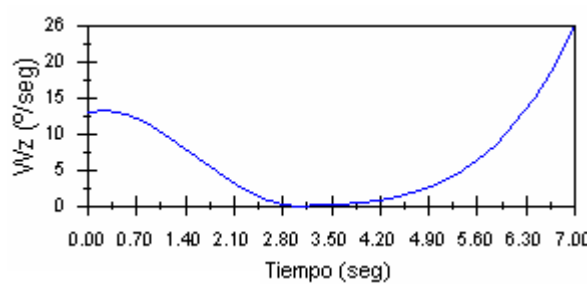
Velocidad angular – Revolute 2



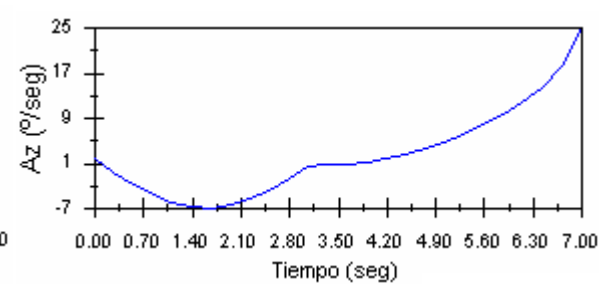
Aceleración angular – Revolute 2



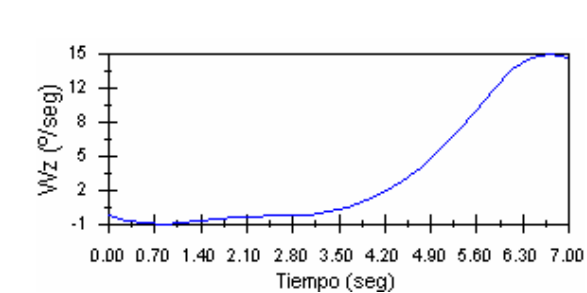
Velocidad angular – Revolute 3



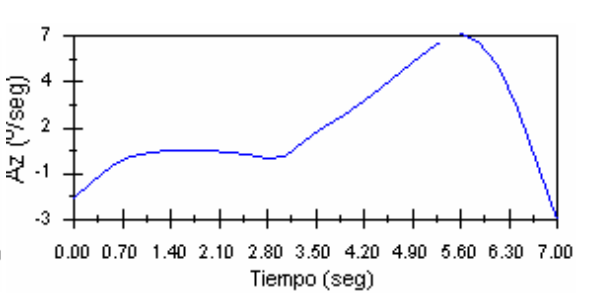
Aceleración angular – Revolute 3



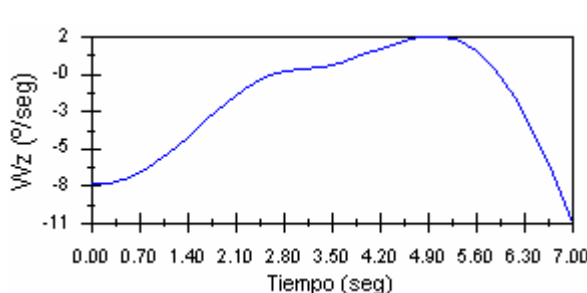
Velocidad angular – Revolute 4



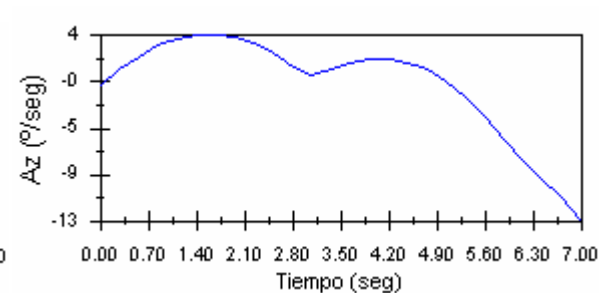
Aceleración angular – Revolute 4



Velocidad angular – Revolute 5



Aceleración angular – Revolute 5



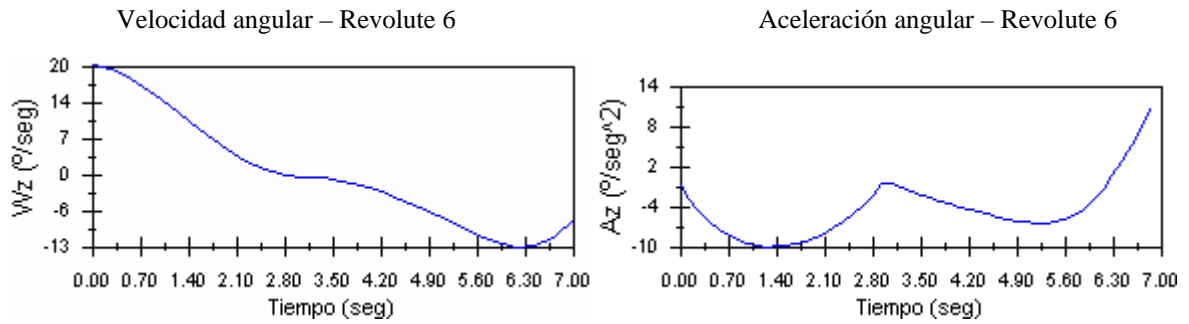


Figura 5.16.- Velocidades y aceleraciones angulares de las articulaciones en la simulación 1.

• SIMULACIÓN 2

Las variables para el posicionamiento inicial de la base tendrán asignados en esta simulación los siguientes valores, Figura 5.17:

Rotación base = 0° (perpendicular a la puerta).

n = 310 mm.

t = 510 mm.

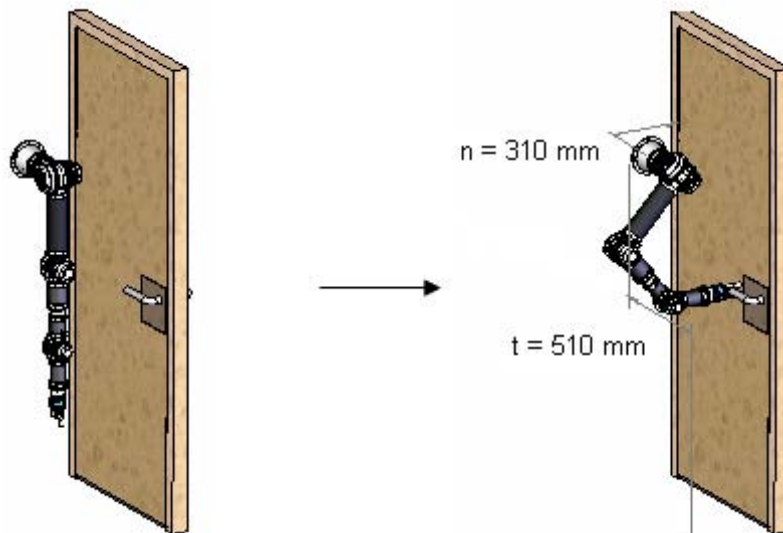


Figura 5.17.- Posición inicial de la base en la simulación 2 para alcanzar el pomo.

En esta situación, las variables articulares necesarias para alcanzar {M} (sistema que se define en la muñeca) y pasar de la posición inicial completamente estirada al agarre del pomo, se listan en la Tabla 5.4:

Revolute 1	+ 42.91° *
Revolute 2	- 0.33° *
Revolute 3	- 83.1° *
Revolute 4	+ 0.28° *
Revolute 5	- 49.81° *
Revolute 6	+ 0.06° *

Tabla 5.4.- Variables articulares en la simulación 2 para alcanzar el pomo.

*medidas con respecto a la posición de partida del brazo completamente estirado.

Si comparamos la tabla anterior con la Tabla 5.3, con un simple golpe de vista, comprobamos que los ángulos desplazados por las articulaciones (revolutes) 2, 4 y 6 son los mismos. El pequeño desplazamiento registrado por la articulación 2 se debe a que los ejes de los eslabones no se encuentran perfectamente alineados.

Los giros 4 y 6 son los encargados de corregir la orientación de la pinza a fin de que tenga la deseada. El afrontar la tarea desde una posición más cercana a la puerta en la dirección normal implica, como cabía esperar, desplazar un ángulo mayor en las articulaciones 1 y 5, pudiendo así mantener también constante el ángulo en la articulación 3.

Una vez que tenemos situado el brazo según los ángulos que clasificamos en la Tabla 5.4, simulamos nuevamente el movimiento según la trayectoria de giro con velocidad decreciente y apertura con velocidad creciente (caso 2). Los resultados obtenidos en cuanto a desplazamientos, velocidades y aceleraciones los podemos visualizar en las Figuras 5.18 y 5.19 y serán comentados posteriormente en el apartado de comparativas. Los datos de la simulación completa los encontramos en el Anexo V de análisis cinemático.

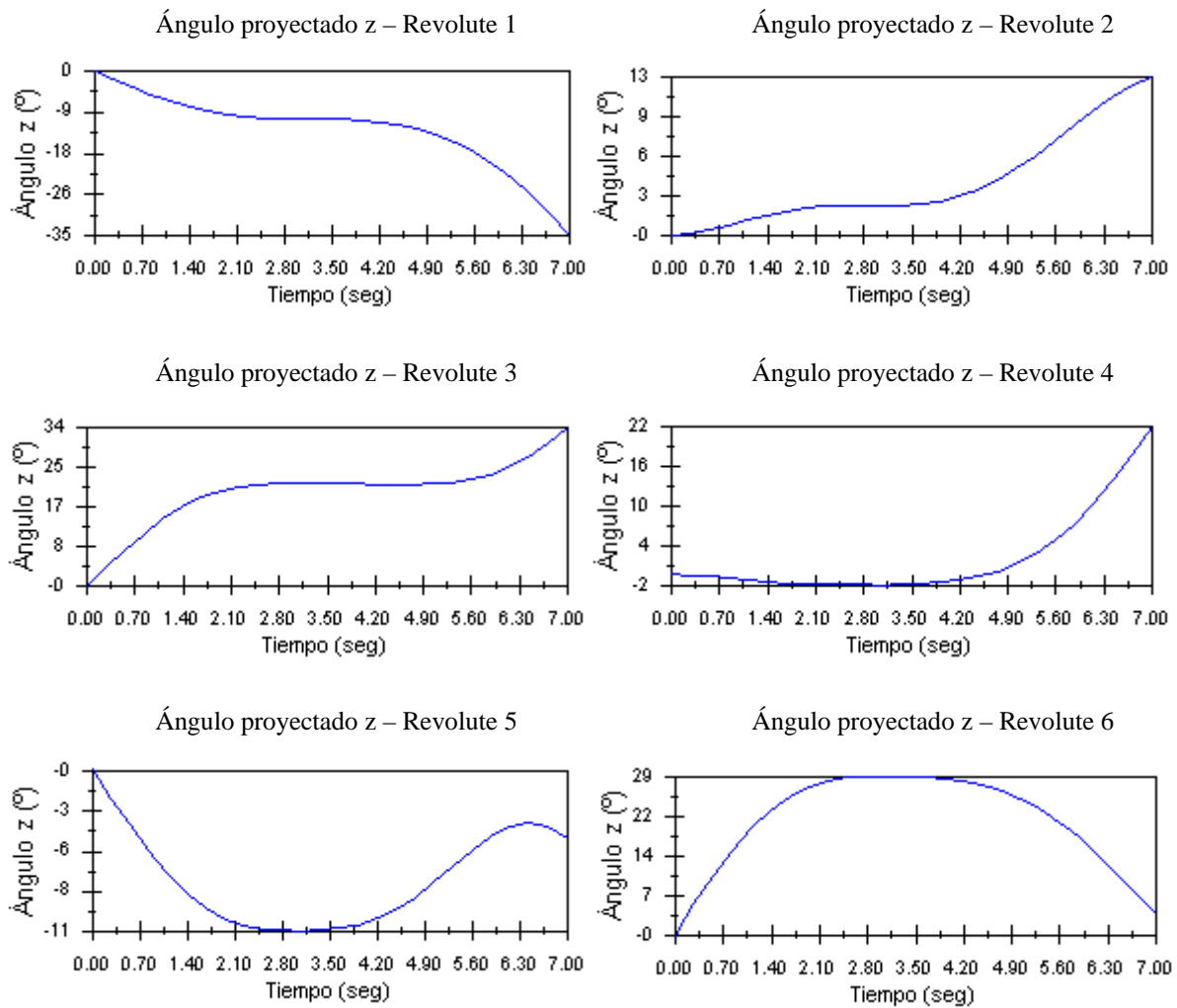
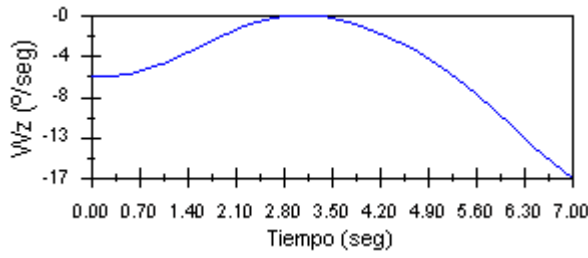
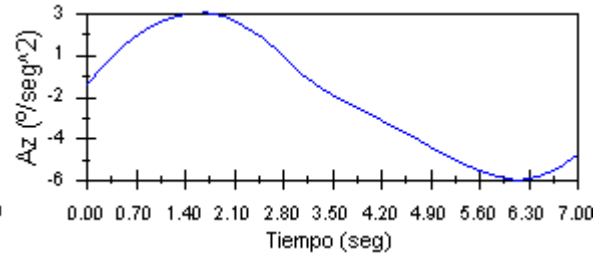


Figura 5.18.- Evolución de los ángulos proyectados en z de cada articulación en la simulación 2.

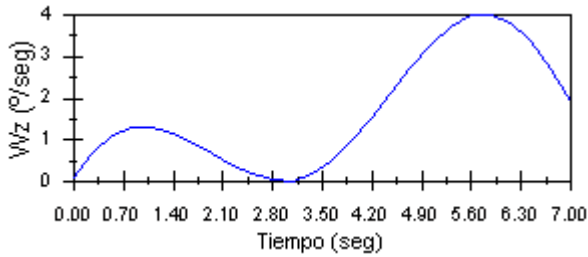
Velocidad angular – Revolute 1



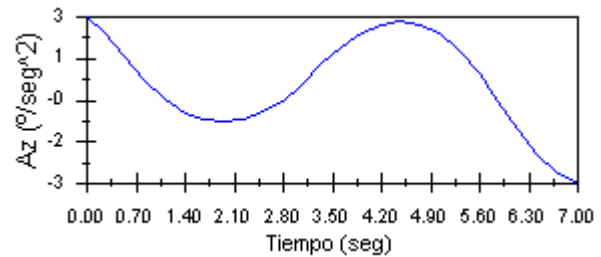
Aceleración angular – Revolute 1



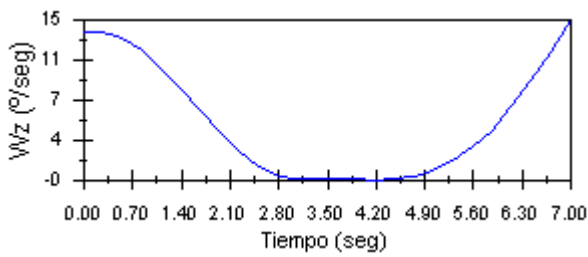
Velocidad angular – Revolute 2



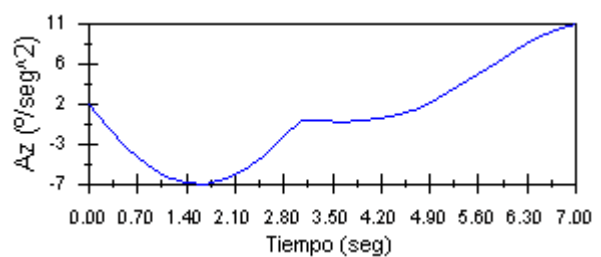
Aceleración angular – Revolute 2



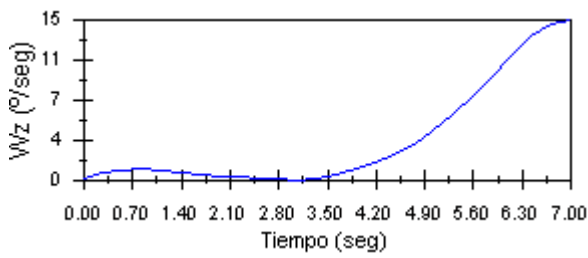
Velocidad angular – Revolute 3



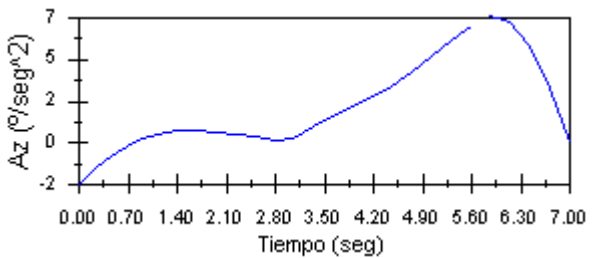
Aceleración angular – Revolute 3



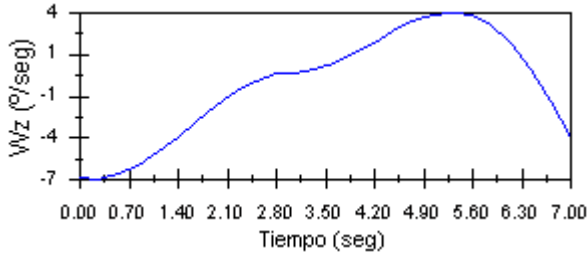
Velocidad angular – Revolute 4



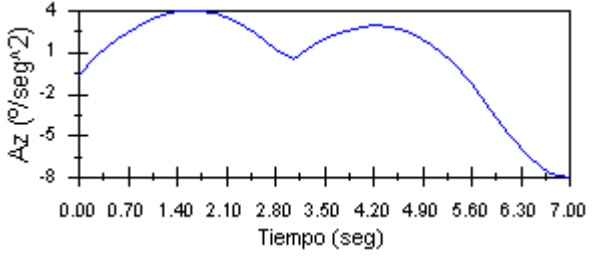
Aceleración angular – Revolute 4



Velocidad angular – Revolute 5



Aceleración angular – Revolute 5



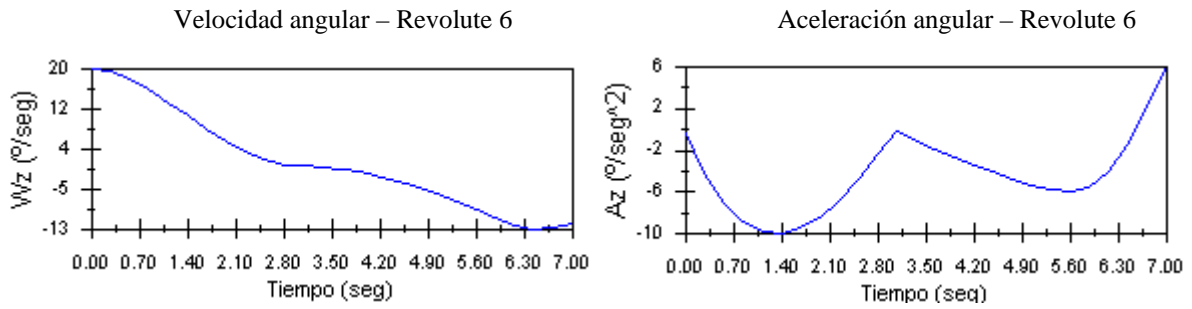


Figura 5.19.- Velocidades y aceleraciones angulares de las articulaciones en la simulación 2.

• SIMULACIÓN 3

Mediante esta simulación comprobaremos los efectos que produce, a nivel de desplazamientos, velocidades y aceleraciones, el alejamiento de la base de la puerta en la dirección normal, desde la posición 1, 90 mm. Las variables para el posicionamiento inicial de la base tendrán asignados en esta simulación los siguientes valores, Figura 5.20:

Rotación base = 0° (perpendicular a la puerta).

n = 490 mm.

t = 510 mm.

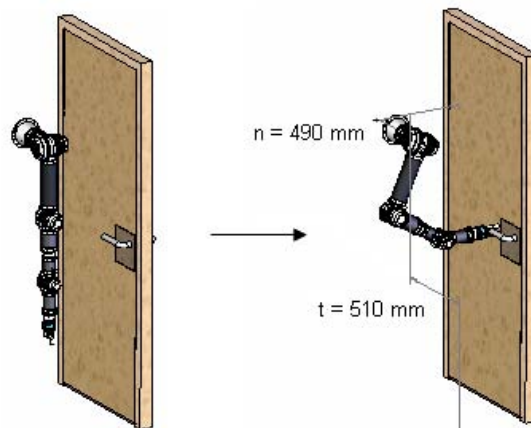


Figura 5.20.- Posición inicial de la base en la simulación 3 para alcanzar el pomo.

En esta situación, las variables articulares necesarias para alcanzar {M} (sistema que se define en la muñeca) y pasar de la posición inicial completamente estirada al agarre del pomo, se resumen en la Tabla 5.5 que se adjunta a continuación.

Revolute 1	+ 23.33° *
Revolute 2	- 0.32° *
Revolute 3	- 79.86° *
Revolute 4	+ 0.23° *
Revolute 5	- 33.48° *
Revolute 6	+ 0.1° *

Tabla 5.5.- Variables articulares en la simulación 3 para alcanzar el pomo.

*medidas con respecto a la posición de partida del brazo completamente estirado.

En este caso, la relación entre los desplazamientos de 2, 4 y 6 encargados de precisar la orientación del elemento extremo, no guardan la misma relación que en los dos casos anteriores.

El afrontar la tarea de abrir la puerta desde una situación más alejada en la dirección normal implica, como cabía esperar, desplazar un ángulo menor en las articulaciones 1 y 5, y también en la 3 (siempre partiendo de la posición del brazo completamente estirada). En esta situación, el ángulo que forman los dos eslabones conectados en las articulaciones 3 y 5 es mayor, sin embargo, el desplazamiento del eslabón respecto de la vertical es menor (cuando el brazo está completamente estirado).

Una vez que tenemos situado el brazo según los ángulos de la Tabla 5.5, se simula nuevamente el movimiento según la trayectoria de giro con velocidad decreciente y apertura con velocidad creciente (caso 2). En esta ocasión se realizó la simulación solamente hasta los 6,8 segundos (7 segundos en los casos anteriores), ya que en tal caso estaríamos muy próximos a la situación de bloqueo estructural lo que provocaría que los valores se vieran alterados por dicho efecto, no aportando valor a este análisis, ya que este caso se tratará posteriormente. Los resultados obtenidos en cuanto a desplazamientos, velocidades y aceleraciones los podemos visualizar en las Figuras 5.21 y 5.22. Para obtener datos precisos sobre las simulaciones acudir al Anexo V de análisis cinemático.

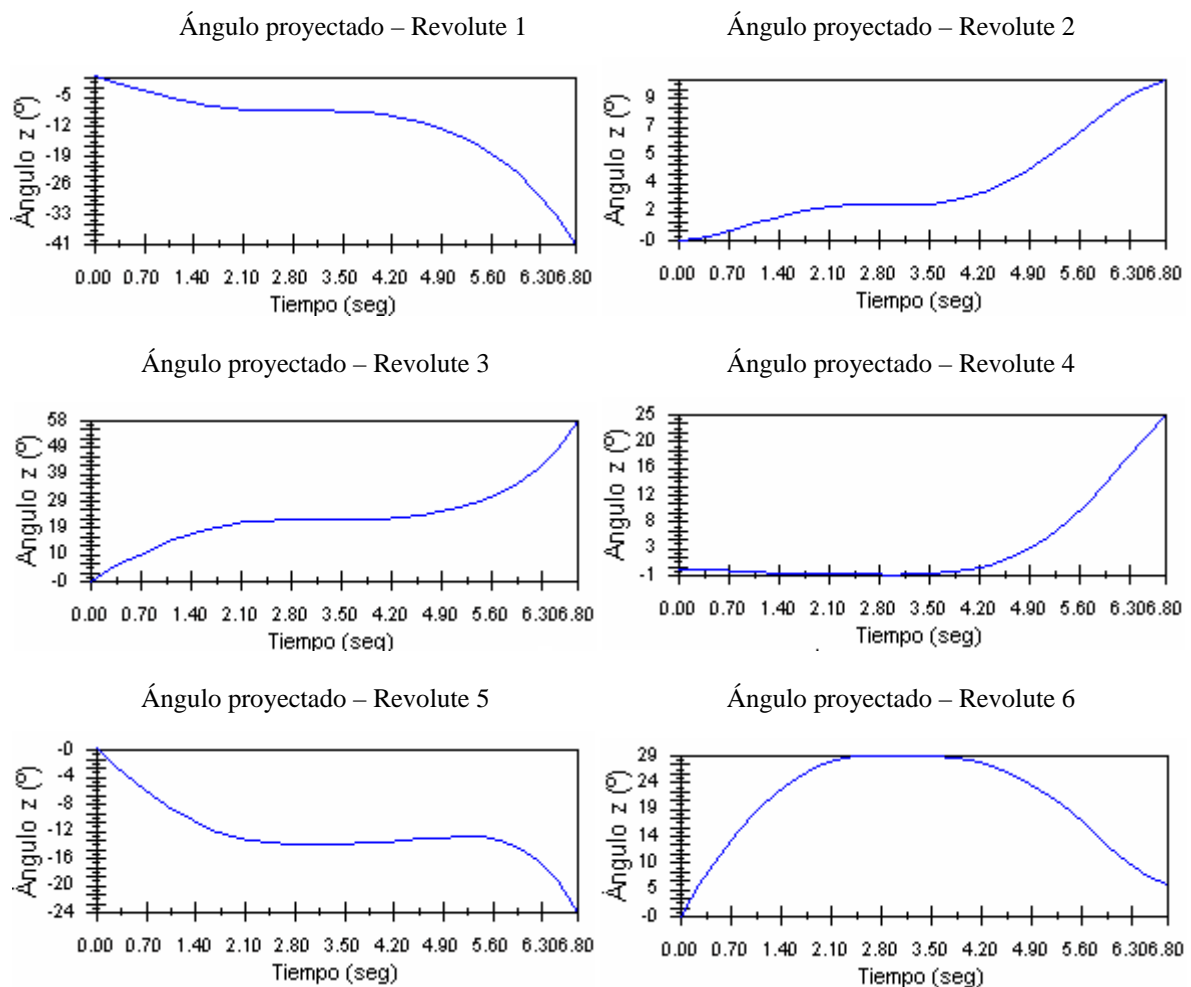
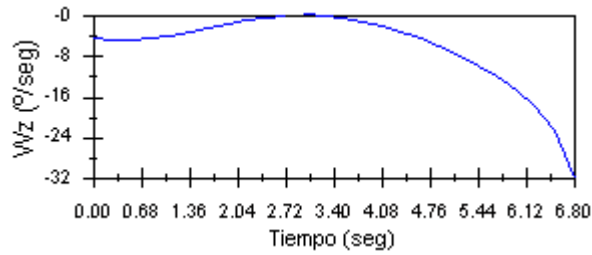
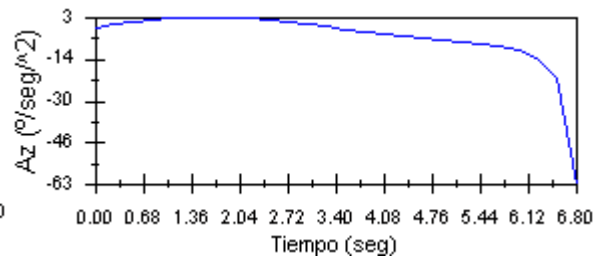


Figura 5.21.- Evolución de los ángulos proyectados en z de cada articulación en la simulación 3.

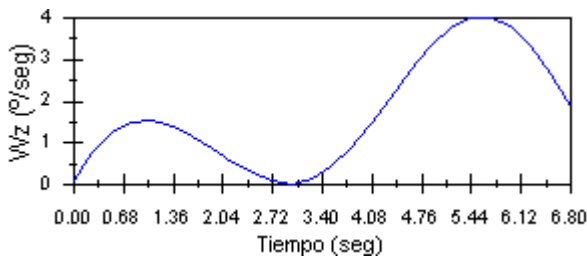
Velocidad angular – Revolute 1



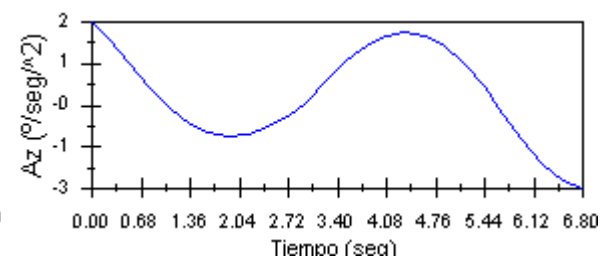
Aceleración angular – Revolute 1



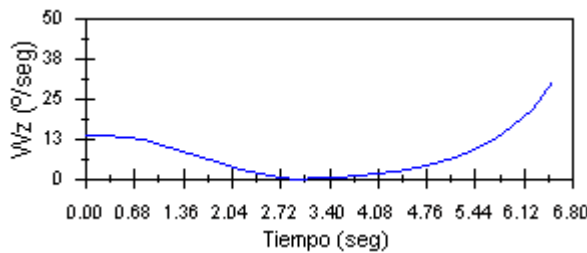
Velocidad angular – Revolute 2



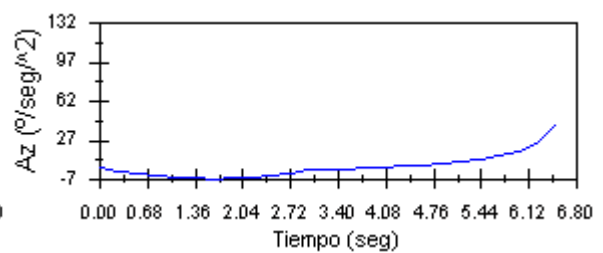
Aceleración angular – Revolute 2



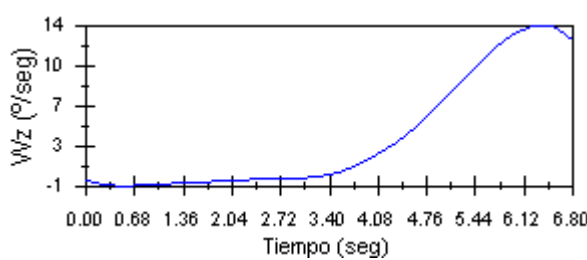
Velocidad angular – Revolute 3



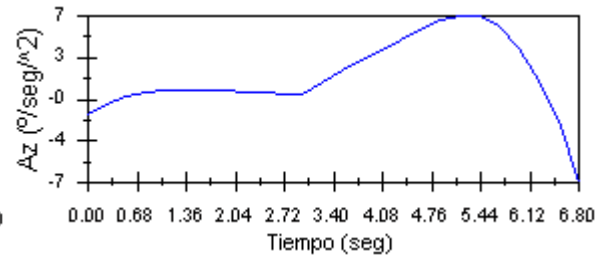
Aceleración angular – Revolute 3



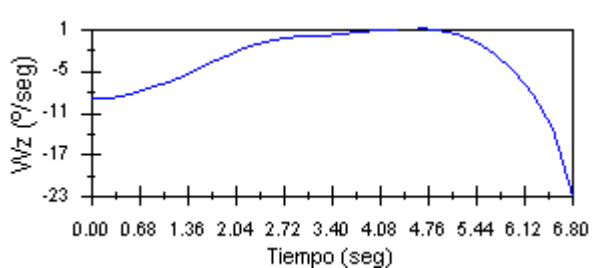
Velocidad angular – Revolute 4



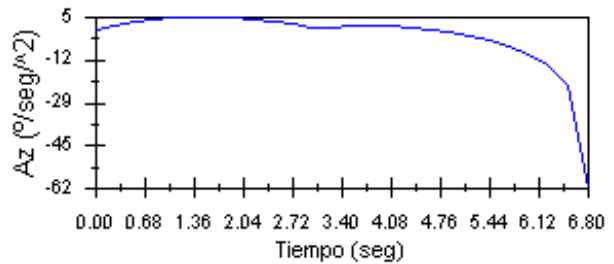
Aceleración angular – Revolute 4



Velocidad angular – Revolute 5



Aceleración angular – Revolute 5



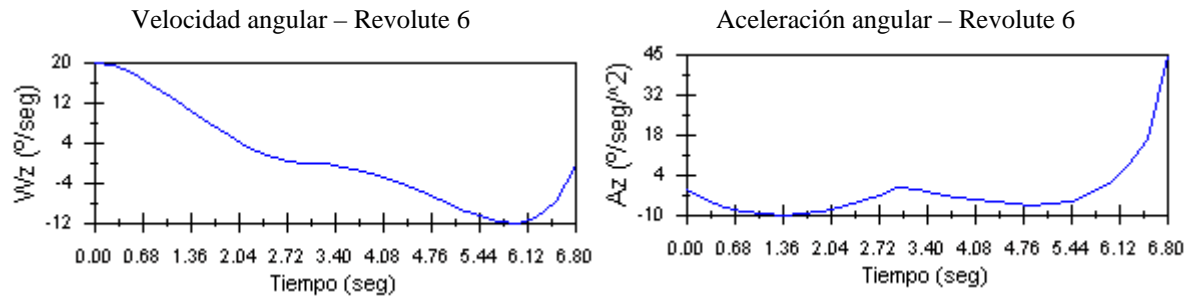


Figura 5.22.- Velocidades y aceleraciones angulares de las articulaciones en la simulación 3.

• SIMULACIÓN 4

Mediante esta simulación comprobaremos los efectos que produce, a nivel de desplazamientos, velocidades y aceleraciones, el mover la base hacia la izquierda en la dirección tangencial, desde la posición 1, 90 mm. Las variables para el posicionamiento inicial de la base tendrán asignados en esta simulación los siguientes valores, Figura 5.23:

Rotación base = 0° (perpendicular a la puerta).
 $n = 400$ mm.
 $t = 600$ mm.

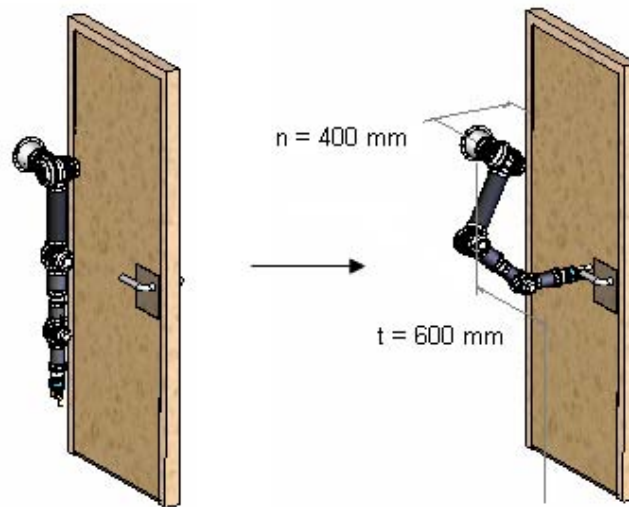


Figura 5.23.- Posición inicial de la base en la simulación 4 para alcanzar el pomo.

En esta situación, las variables articulares necesarias para alcanzar {M} (sistema que se define en la muñeca) y pasar de la posición inicial completamente estirada al agarre del pomo, se resumen en la Tabla 5.6:

Revolute 1	+ 33.58° *
Revolute 2	+ 11.17° *
Revolute 3	- 81.32° *
Revolute 4	- 9.13° *
Revolute 5	- 41.95° *
Revolute 6	- 2.45° *

Tabla 5.6.- Variables articulares en la simulación 4 para alcanzar el pomo.

*medidas con respecto a la posición de partida del brazo completamente estirado.

En esta simulación partimos de una posición inicial, en el primer instante de la simulación, bien distinta a los tres casos anteriores. La principal diferencia que se observa es que la articulación 2 se encuentra desplazada en sentido positivo 11.17°, formando un ángulo respecto a la primera articulación fijo mayor de 90°.

Por su parte, las articulaciones 4 y 6 giran con el objetivo de corregir la orientación de la pinza con unos valores angulares mucho mayores que en las tres simulaciones anteriores. Las variaciones en el resto de articulaciones, con respecto a la simulación 1, no son demasiado significativas. De cualquier forma, son las necesarias para conseguir posición y orientación deseada para manipular el pomo.

Nuevamente, situamos el brazo según los valores articulares de la Tabla 5.6 y simulamos el movimiento según la trayectoria de giro con velocidad decreciente y apertura con velocidad creciente (caso 2). Los resultados obtenidos en cuanto a desplazamientos, velocidades y aceleraciones los podemos visualizar en las Figuras 5.24 y 5.25. Para obtener datos precisos sobre las simulaciones acudir al Anexo V de análisis cinemático.

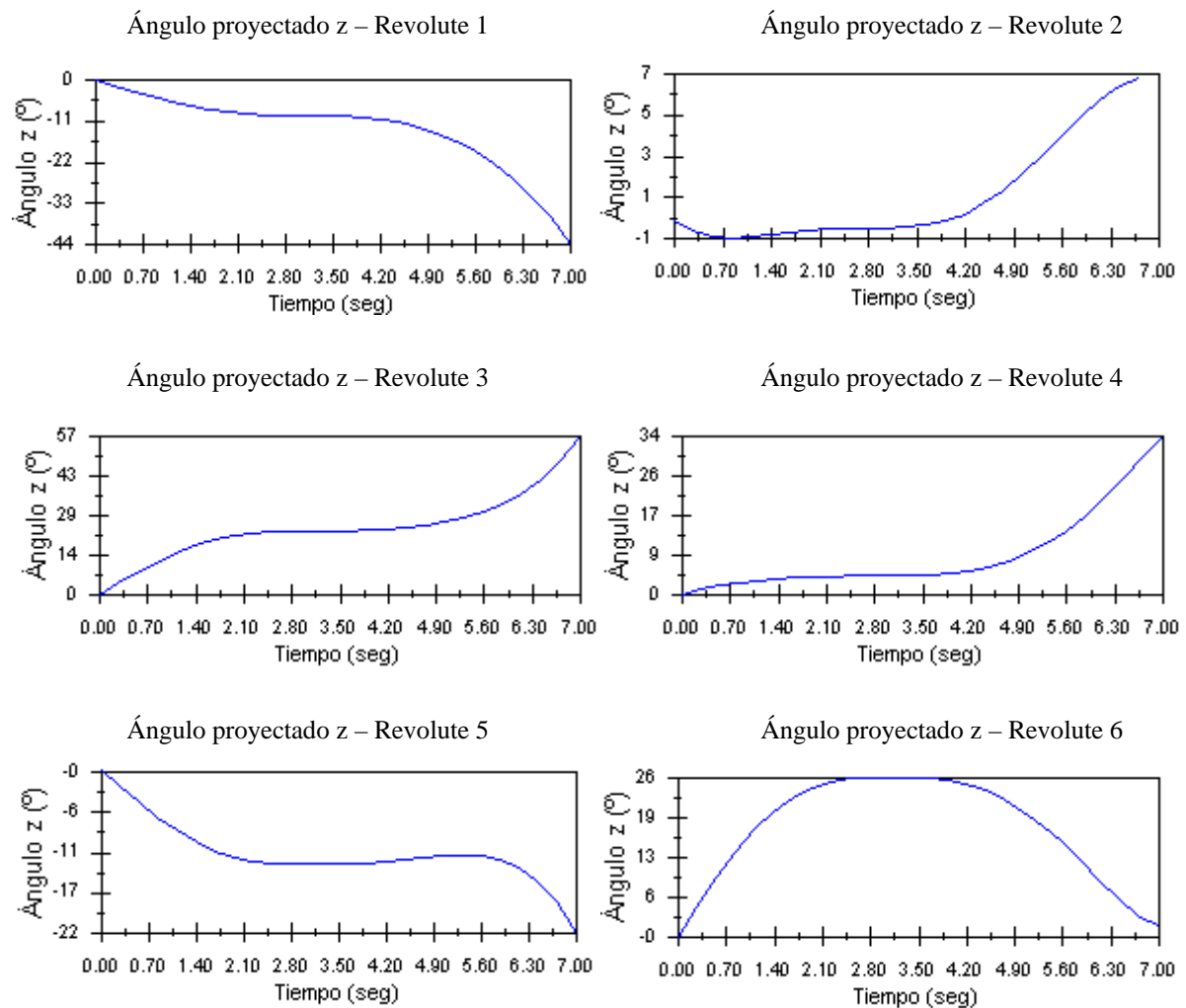
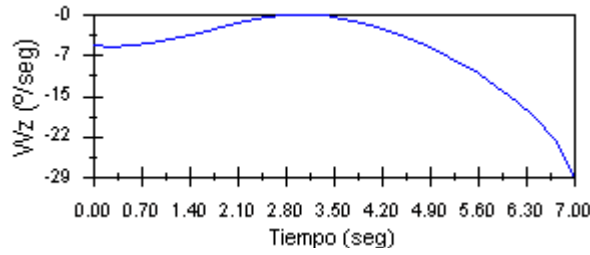
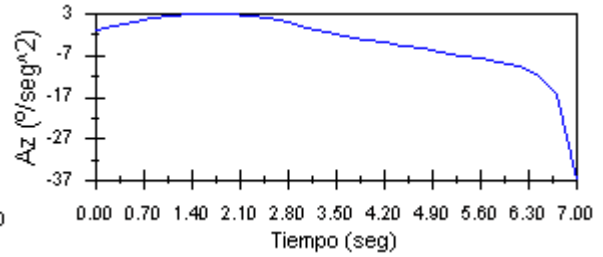


Figura 5.24.- Evolución de los ángulos proyectados en z de cada articulación en la simulación 4.

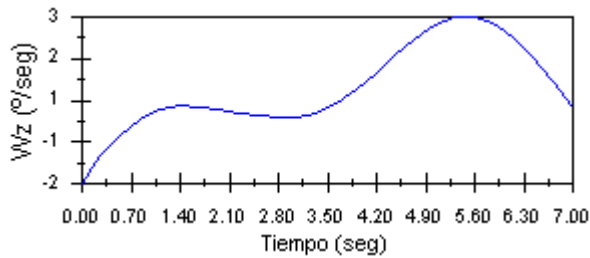
Velocidad angular – Revolute 1



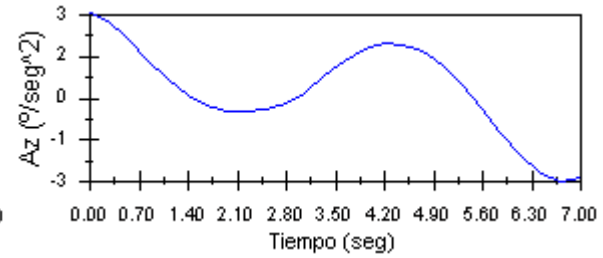
Aceleración angular – Revolute 1



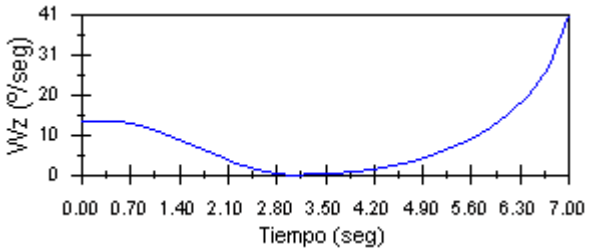
Velocidad angular – Revolute 2



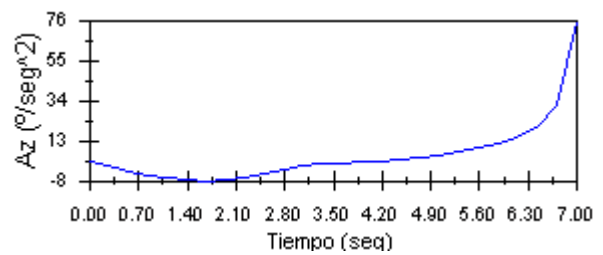
Aceleración angular – Revolute 2



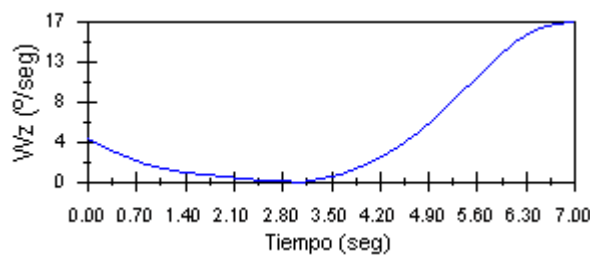
Velocidad angular – Revolute 3



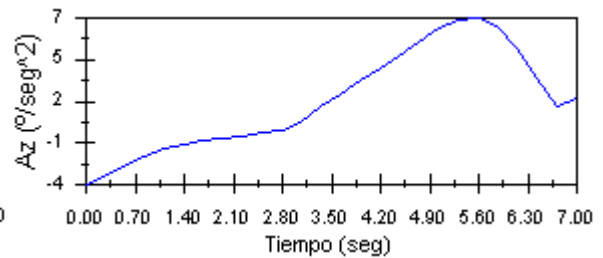
Aceleración angular – Revolute 3



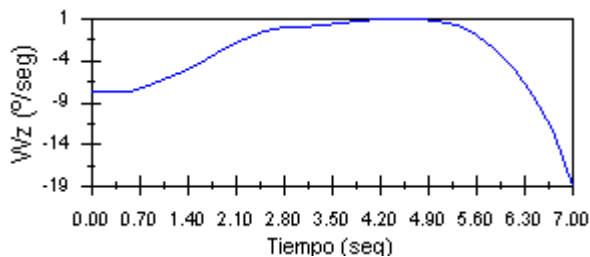
Velocidad angular – Revolute 4



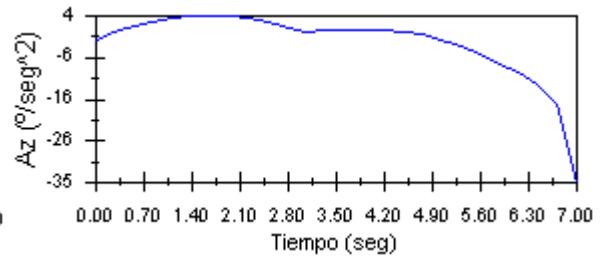
Aceleración angular – Revolute 4



Velocidad angular – Revolute 5



Aceleración angular – Revolute 5



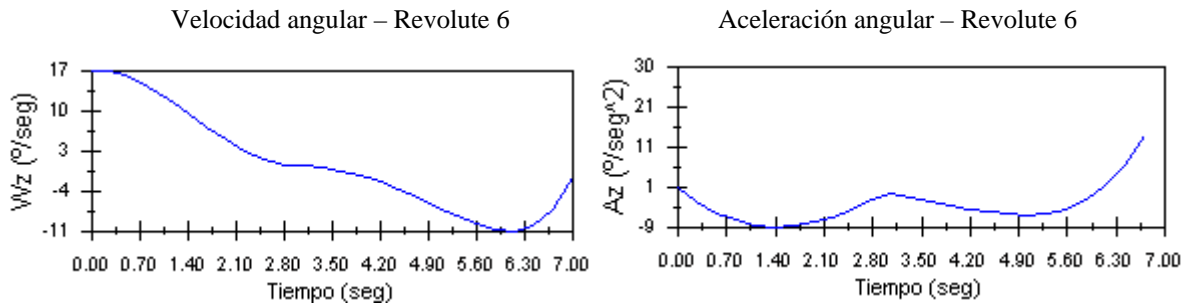


Figura 5.25.- Velocidades y aceleraciones angulares de las articulaciones en el simulación 4.

• SIMULACIÓN 5

Mediante esta simulación comprobaremos los efectos que produce, a nivel de desplazamientos, velocidades y aceleraciones, el mover la base hacia la derecha en la dirección tangencial, desde la posición 1, 90 mm. Las variables para el posicionamiento inicial de la base tendrán asignados en esta simulación los siguientes valores, Figura 5.26:

Rotación base = 0° (perpendicular a la puerta).

n = 400 mm.

t = 420 mm.

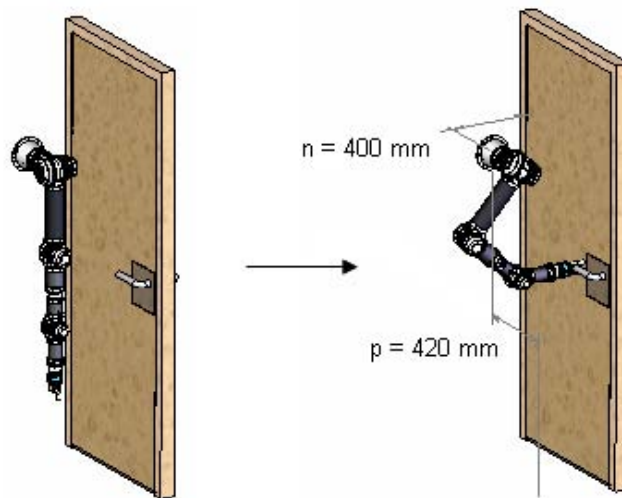


Figura 5.26.- Posición inicial de la base en la simulación 5 para alcanzar el pomo.

En esta situación, las variables articulares necesarias para alcanzar {M} (sistema que se define en la muñeca) y pasar de la posición inicial completamente estirada al agarre del pomo, se resumen a continuación en la Tabla 5.7:

Revolute 1	+ 33.58° *
Revolute 2	- 11.81° *
Revolute 3	- 81.3° *
Revolute 4	+ 9.63° *
Revolute 5	- 42.01° *
Revolute 6	+ 2.61° *

Tabla 5.7.- Variables articulares en la simulación 5 para alcanzar el pomo.

*medidas con respecto a la posición de partida del brazo completamente estirado.

La articulación 2 se encuentra desplazada en sentido negativo 11.81° , formando un ángulo respecto a la primera articulación fijo menor de noventa.

Por su parte, las articulaciones 4 y 6 giran con el objetivo de corregir la orientación de la pinza con unos valores angulares similares al caso anterior. Las variaciones en el resto de articulaciones, con respecto a la simulación 1, no son demasiado significativas. De cualquier forma, son las necesarias para conseguir posición y orientación deseada para manipular el pomo.

Una vez que tenemos situado el brazo según los ángulos clasificados en la Tabla 5.7, simulamos nuevamente el movimiento según la trayectoria de giro con velocidad decreciente y apertura con velocidad creciente (caso 2). Los resultados obtenidos en cuanto a desplazamientos, velocidades y aceleraciones los podemos visualizar en las Figuras 5.27 y 5.28. Para obtener datos precisos sobre las simulaciones acudir al Anexo V de análisis cinemático.

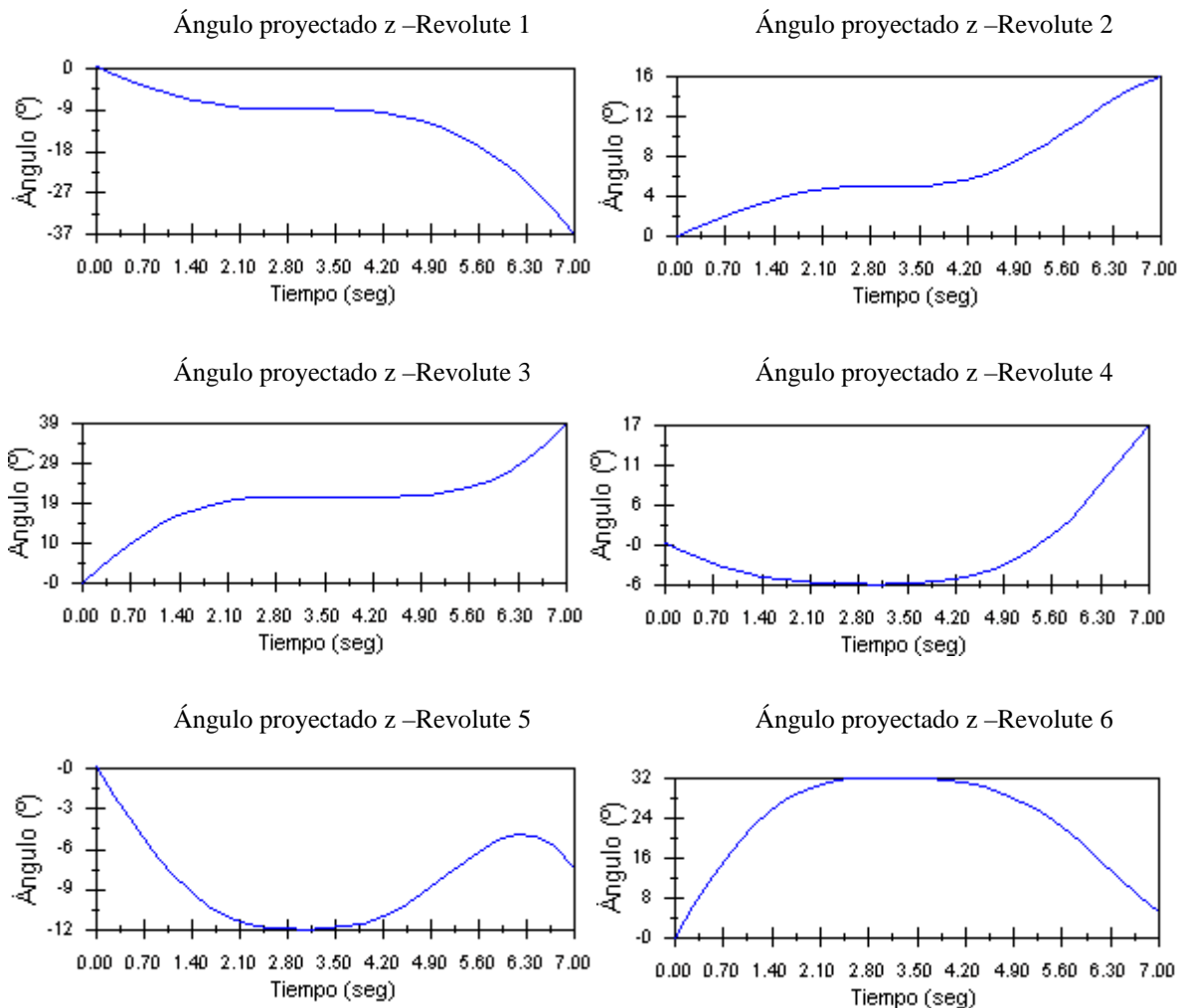
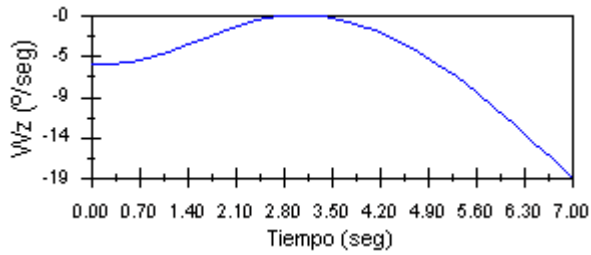
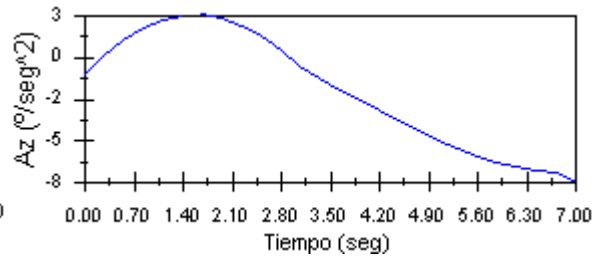


Figura 5.27.- Evolución de los ángulos proyectados en z de cada articulación en la simulación 5.

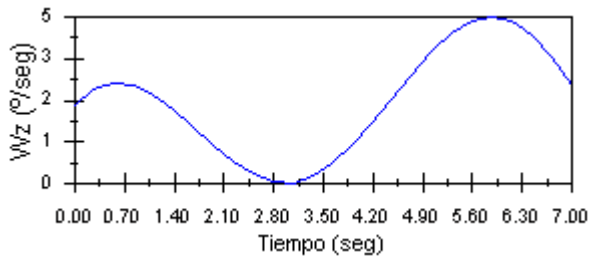
Velocidad angular – Revolute 1



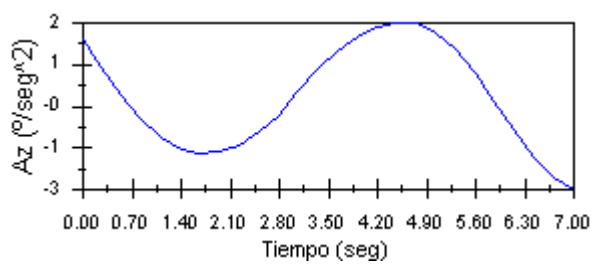
Aceleración angular – Revolute 1



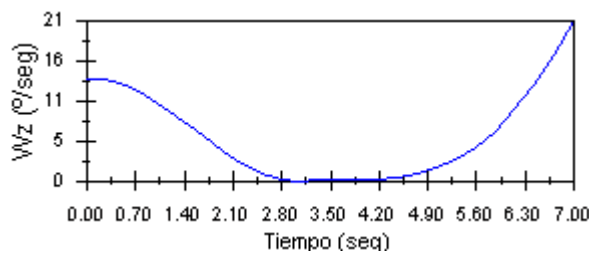
Velocidad angular – Revolute 2



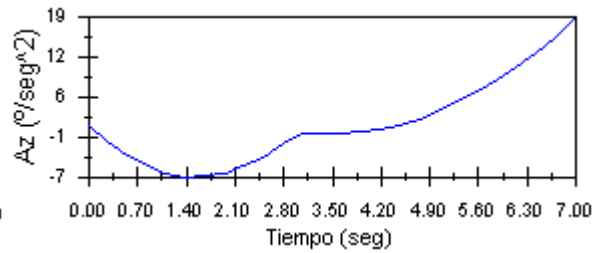
Aceleración angular – Revolute 2



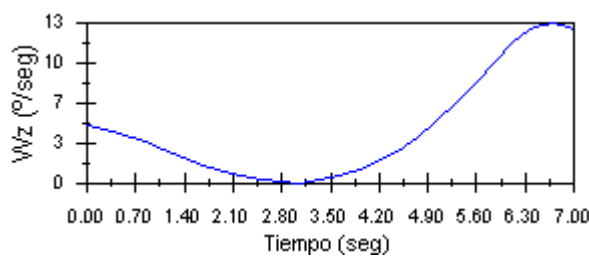
Velocidad angular – Revolute 3



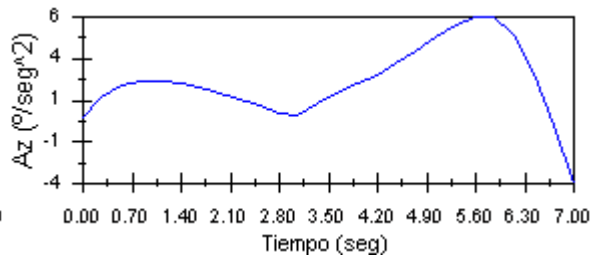
Aceleración angular – Revolute 3



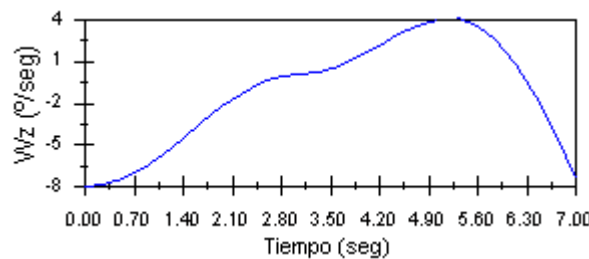
Velocidad angular – Revolute 4



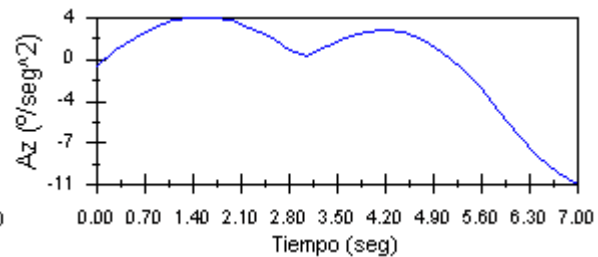
Aceleración angular – Revolute 4



Velocidad angular – Revolute 5



Aceleración angular – Revolute 5



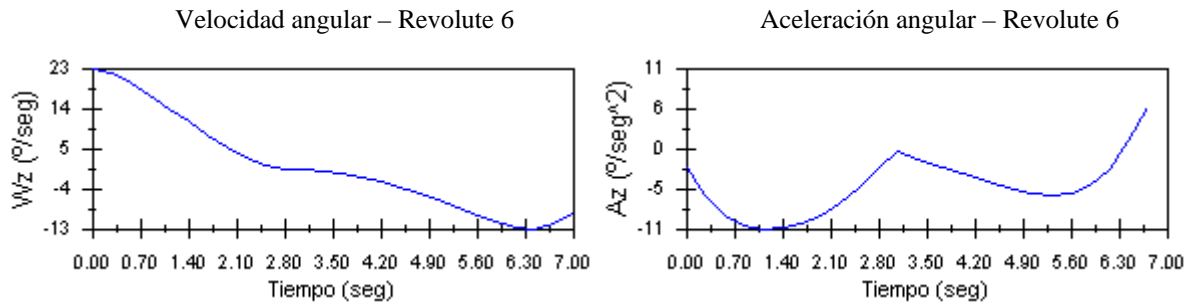


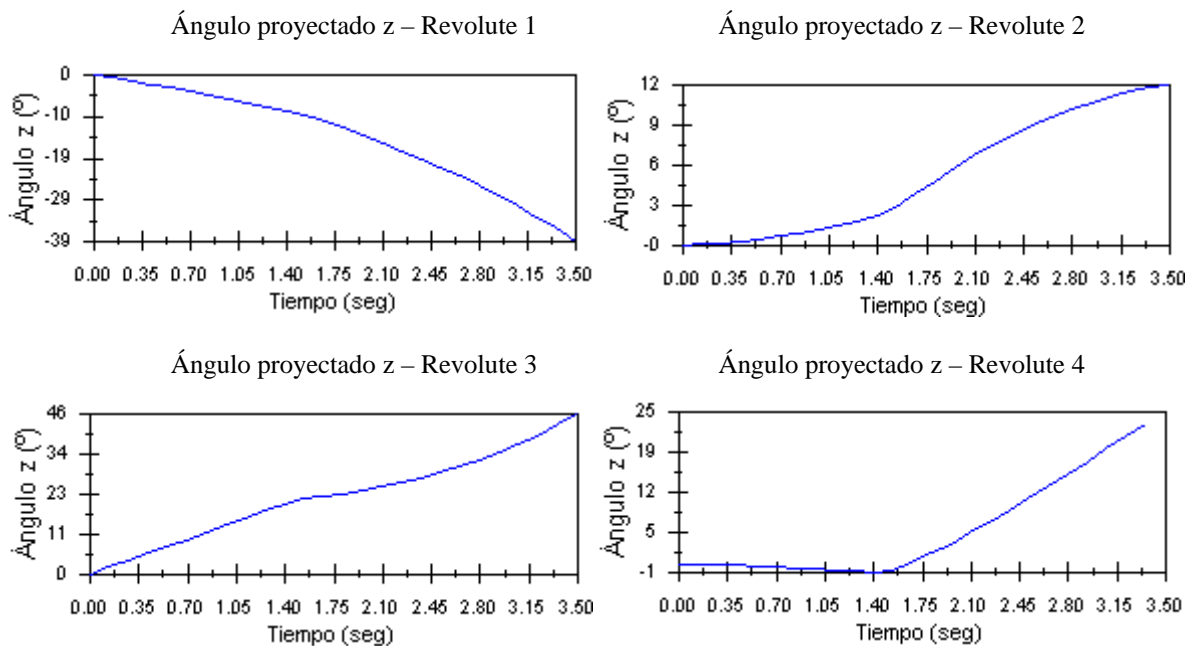
Figura 5.28.- Velocidades y aceleraciones angulares de las articulaciones en la simulación 5.

• SIMULACIÓN 6

En este último caso, estudiaremos las trayectorias que se obtienen en el brazo cuando realizamos el movimiento de giro del pomo y apertura de la puerta a velocidad constante. En la Figura 5.11 veíamos gráficamente cómo se describían estos dos movimientos.

La posición inicial de la base es la misma que en la simulación 1, donde recordamos que se situaba a 400 mm en la dirección normal y a 510 mm en la dirección tangencial (ver Figura 5.10). Las variables articulares que se adoptan para iniciar la tarea dependen de dos factores fundamentalmente: la posición inicial de la base y la situación del objeto de la tarea en el espacio. Se deduce por tanto, que la simulación 6 va a presentar los mismos valores en las variables articulares que los vistos para la simulación 1 (Tabla 5.3).

Una vez que tenemos el brazo en una disposición espacial determinada, que le permita alcanzar {M}, simularemos el movimiento con la ayuda del CosmosMotion. Éste generará automáticamente las trayectorias que siguen a lo largo del tiempo cada una de las articulaciones. Los resultados en cuanto a desplazamientos acusados y velocidades y aceleraciones provocadas se presentan en las dos Figuras 5.29 y 5.30. Notar nuevamente que para acceder a documentación y datos precisos sobre las simulaciones realizadas debemos acudir al Anexo V de análisis cinemático.



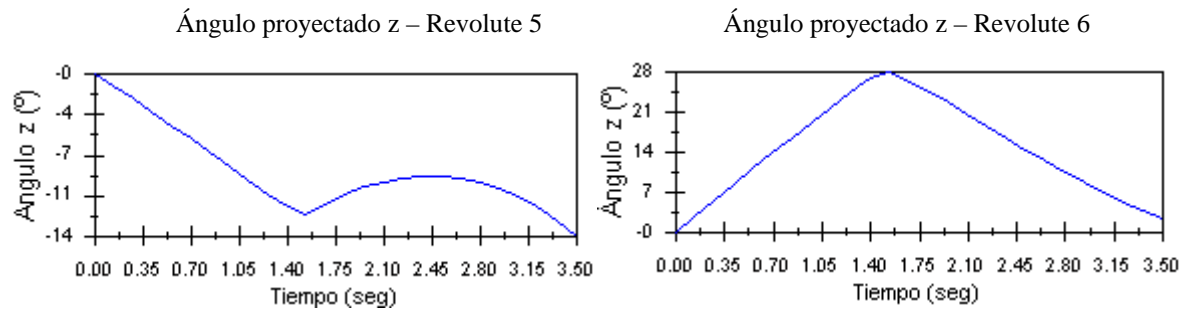
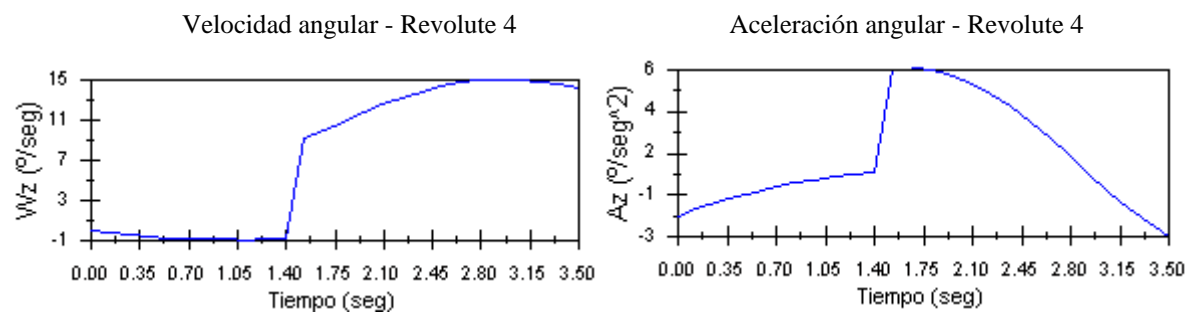
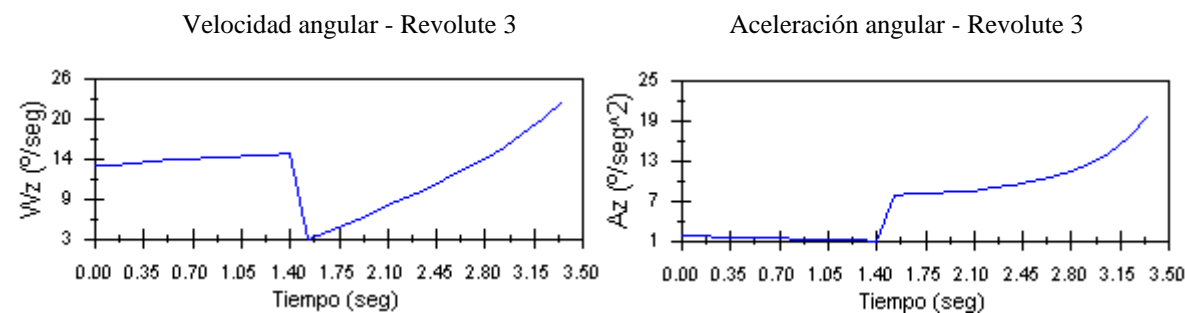
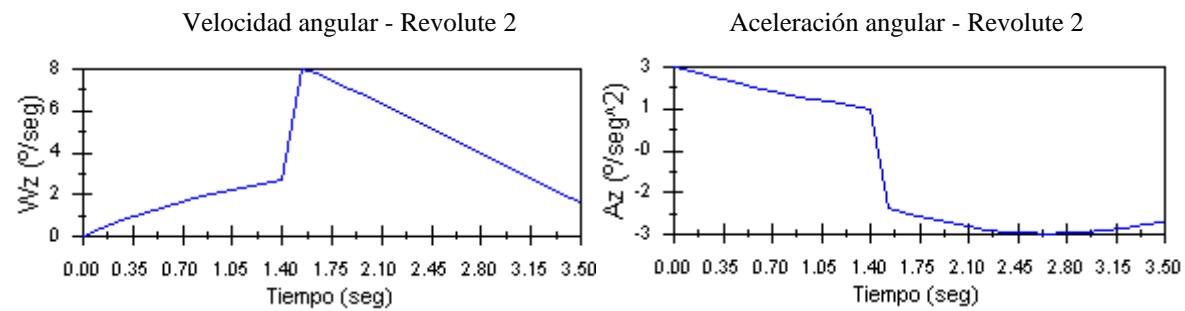
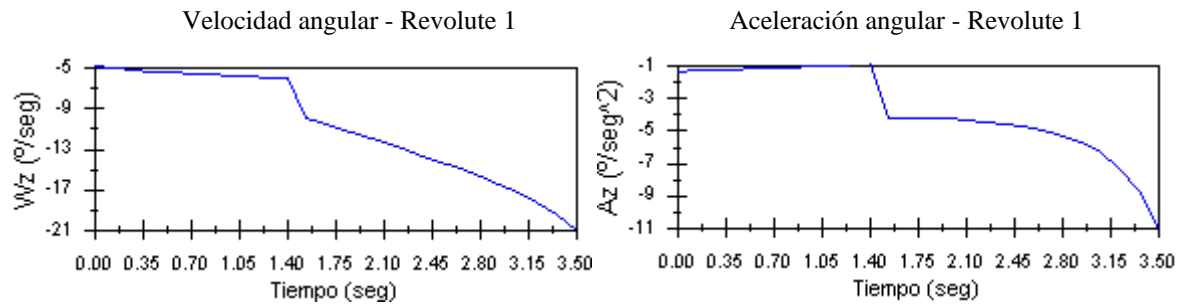


Figura 5.29.- Evolución de los ángulos proyectados en z de cada articulación en la simulación 6.



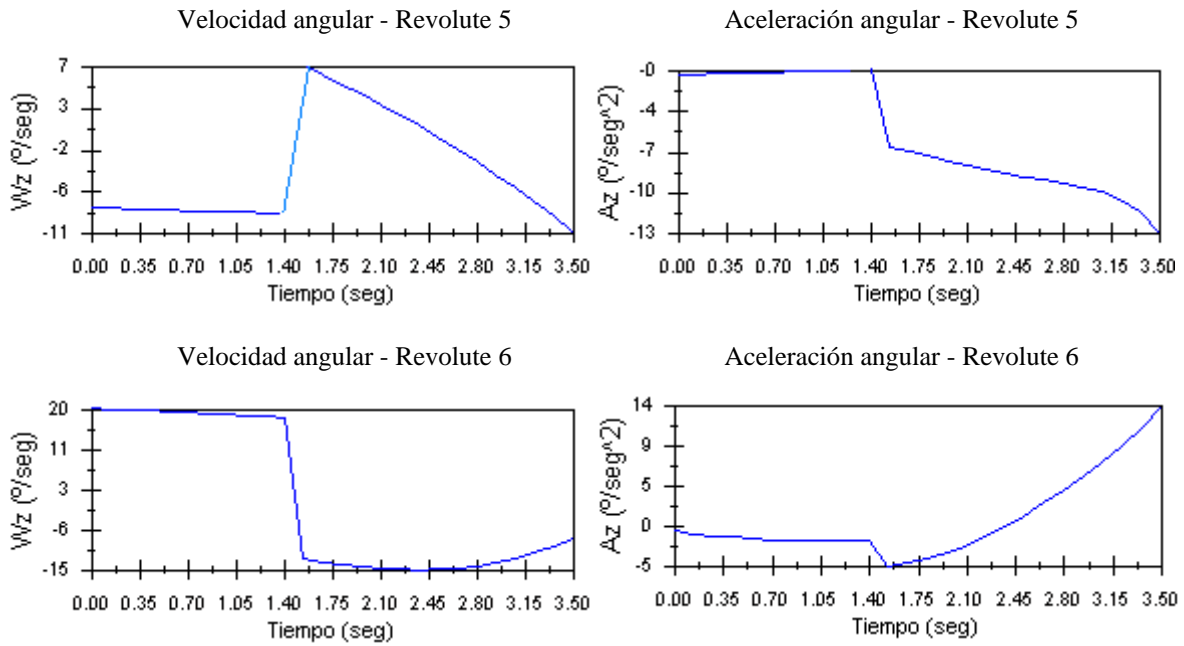


Figura 5.30.- Velocidades y aceleraciones angulares de las articulaciones en la simulación 6.

5.4.3. Análisis comparativo por simulación

Esta sección está destinada a realizar un análisis comparativo de los desplazamientos sufridos por cada articulación en cada uno de las simulaciones realizadas. Para ilustrar las conclusiones obtenidas, se presentan los ángulos proyectados en el eje z de giro de cada articulación en un mismo gráfico, a fin de facilitar la comprensión y visualizar mejor las diferencias. Para no extender demasiado el texto sólo se presentan y comentan gráficos comparativos de desplazamientos. No obstante, en el Anexo V correspondiente al análisis cinemático se pueden encontrar datos precisos correspondientes a los perfiles de velocidades y aceleraciones.

En las cinco primeras simulaciones, según se justificó en el apartado 5.4.1 donde se hacía referencia a la velocidad de las articulaciones, se vio que el tiempo total que tarda el manipulador en realizar la tarea es de 7 segundos, durante los cuales:

- En los tres primeros segundos se encuentra realizando el giro del pomo, con una velocidad decreciente desde 20°/seg hasta 0°/seg; con lo que se consigue un desplazamiento angular de 30° en el pomo.
- Durante los cuatro restantes se realiza la apertura de la puerta, con el pomo desplazado 30°. Dicha apertura se efectúa a velocidad creciente desde 0 °/seg hasta 10°/seg, logrando un giro de 20°.

En la sexta simulación el tiempo total de simulación es de 3.5 segundos durante los cuales:

- Desde el instante inicial hasta los 1.5 primeros segundos realiza el giro del pomo a velocidad constante e igual a 20°/seg, consiguiendo desplazar los 30° el pomo.
- Durante los 2 segundos restantes abre la puerta 20° a velocidad constante de 10°/seg.

Dicho esto, se procede en orden a las simulaciones realizadas. En la Figura 5.31 se ilustran los ángulos desplazados por cada articulación en la simulación 1. Podemos comprobar que todos los desplazamientos siguen el mismo patrón de comportamiento; cada uno fiel a su tendencia. Existe una zona (**Zona 2**), entre los 2,24 y los 4,2 segundos aproximadamente, en la que los desplazamientos permanecen prácticamente constantes. Este intervalo coincide en el momento en el que el giro del pomo está terminando con velocidades angulares cercanas a cero y la apertura de la puerta, que comienza a los 3 segundos, empieza con velocidades angulares todavía muy pequeñas. Salvando el intervalo en el que las curvas permanecen casi constantes, podríamos establecer dos zonas bien diferenciadas: desde 0 hasta 2,24 segundos (**Zona 1** correspondiente al intervalo de tiempo de giro del pomo) y desde 4,2 hasta el final (**Zona 3** correspondiente al intervalo de tiempo de apertura de la puerta). En estas franjas, todas las curvas se pueden aproximar con bastante exactitud a un polinomio de segundo grado. Estas tres zonas, claramente diferenciadas, se repiten en las cinco primeras simulaciones realizadas.

Volviendo a la Figura 5.31, se comprueba que en el giro del pomo (Zona 1) la articulación seis es la que más ángulo se desplaza, llegando casi a 29° y seguida de la articulación tres con 25,5°. La cinco y la uno sólo llegan hasta -12,4° y -9° respectivamente (ver los valores numéricos exactos en el Anexo V de análisis cinemático). La dos y la cuatro prácticamente no se mueven nada en este primer tramo, con valores de 2,3° y -1,3° aproximadamente.

En la apertura de la puerta (Zona 3), la articulación seis, que acababa el giro del pomo con un mayor desplazamiento, manifiesta ahora un comportamiento descendente para acabar el movimiento con un ángulo girado de 2,4° (el menor de todas). A los 7 segundos la articulación que termina desplazando un ángulo mayor es la tres con 45,8° seguida de la uno con -38,8° y de la cuatro con 25,3°. La cinco y la dos presentan ángulos menores, con -14° y 11,7° respectivamente.

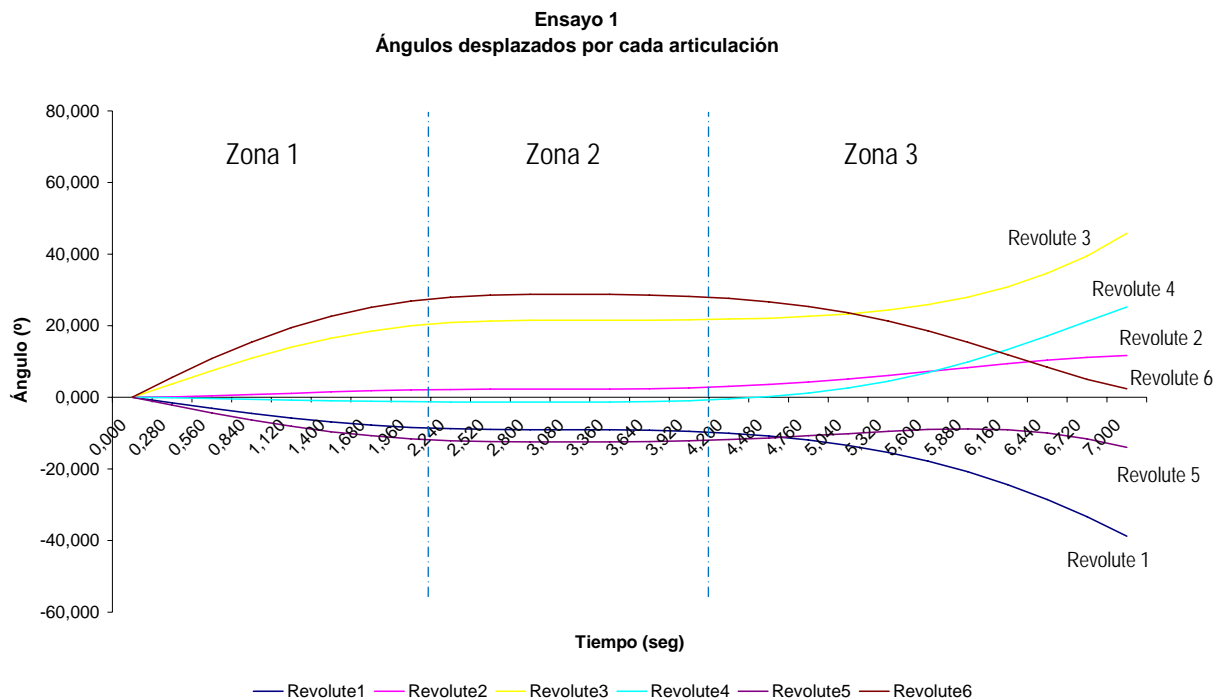


Figura 5.31.- Evolución del desplazamiento angular de cada articulación en la simulación 1.

En la Figura 5.32 vemos los desplazamientos articulares sufridos durante la simulación 2. En este caso, movemos la base hacia delante 90 mm con respecto la simulación 1. La tendencia general de todas las curvas es la misma, aunque con ligeros matices en cuanto a la relación que guardan entre ellas. En el primer tramo el comportamiento es similar, con la salvedad de que las articulaciones uno y cinco desplazan ángulos mucho más parecidos.

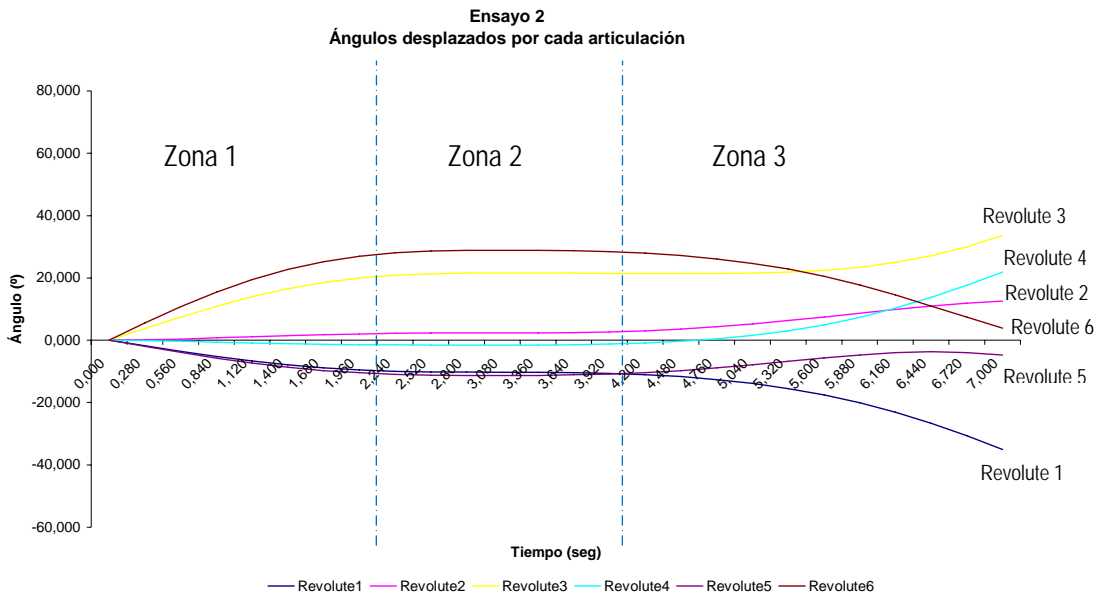


Figura 5.32.- Evolución del desplazamiento angular de cada articulación en la simulación 2.

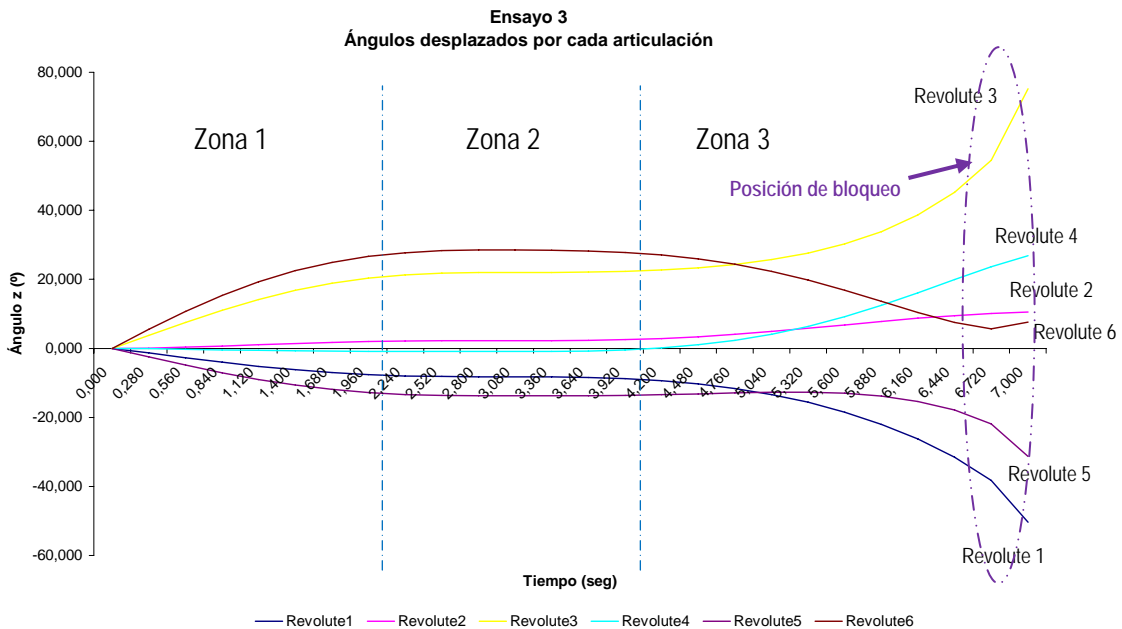


Figura 5.33.- Evolución del desplazamiento angular de cada articulación en la simulación 3.

En la apertura de la puerta de la simulación 2, la articulación 3 desplaza menos que en la simulación 1 debido a que se ve acompañada por el movimiento de la cinco. En general,

todos los desplazamientos registrados al final del movimiento son menores que en el caso anterior.

En la simulación 3 en lugar de acercar la base a la puerta se separa de ella la misma distancia (90 mm) desde la posición uno, los efectos en cuanto a desplazamientos evaluados se muestran en la Figura 5.33. La tendencia general vuelve a ser la misma como cabría esperar. No obstante, en esta ocasión, las curvas correspondientes a las articulaciones 1 y 5 sufren un mayor distanciamiento en el primer tramo. En el tramo de apertura de la puerta, todos los desplazamientos son mayores que en la simulación 1 y por supuesto, que en la simulación 2.

Posteriormente veremos cómo desde la posición 3 el brazo es capaz de abrir como mucho $20,070^\circ$ la puerta sin mover la base. Por tanto, a los siete segundos, cuando lleva girado 20° está cerca de su posición de “bloqueo”, ver Figura 5.33. Entendemos por *posición de bloqueo* aquella en la que el posicionamiento articular es tal, que permite un alcance máximo de la estructura del brazo para esa tarea sin mover la base. En situaciones cercanas a esta posición los valores de los desplazamientos se disparan, cada uno en su tendencia, como hemos podido apreciar en la Figura 5.33.

En las dos figuras siguientes se reflejan los efectos de mover la base, 90 mm desde la posición 1 (recordar Figura 5.10), hacia la izquierda y hacia la derecha, respectivamente. El hecho de desplazarse hacia la izquierda, Figura 5.34, conlleva que la articulación 2 prácticamente no participe en el giro del pomo y la articulación 4 lo haga, pero con ángulos positivos. Si recordamos la Tabla 5.6, la simulación 4 es el único caso donde se parte de un posicionamiento inicial para la articulación 2 en sentido positivo. Lo que ocurre es que estos $+11,17^\circ$ son suficientes para afrontar el giro del pomo sin necesidad de desplazar más ángulo.

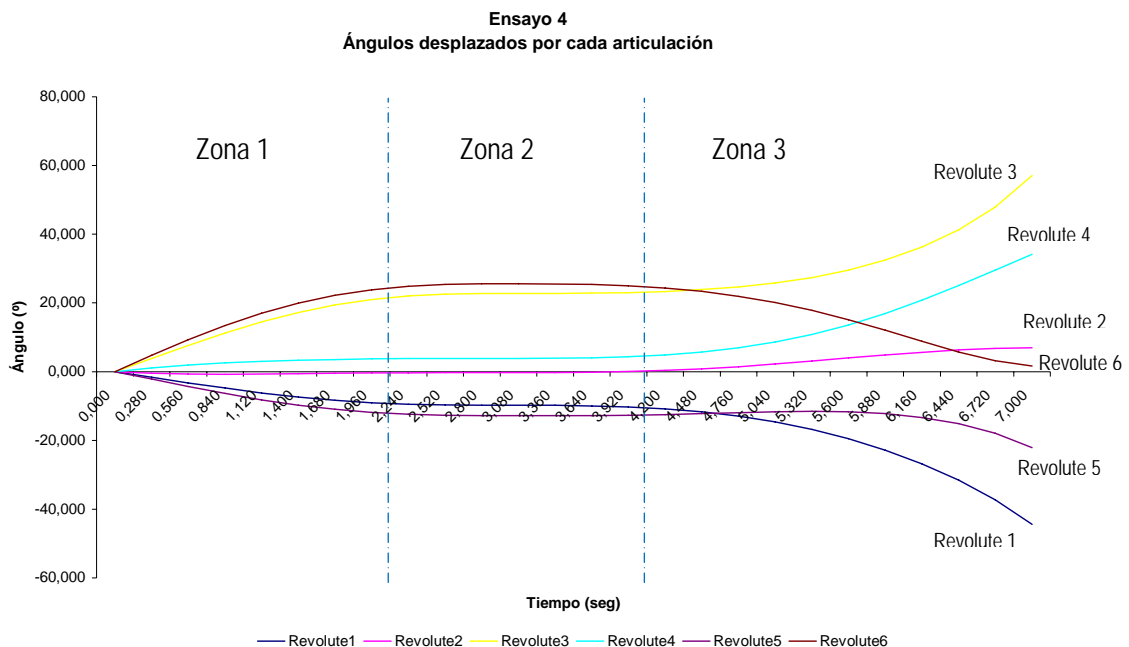


Figura 5.34.- Evolución del desplazamiento angular de cada articulación en la simulación 4.

Algo similar explica el comportamiento diferente en esta simulación de la articulación 4. En todo el primer tramo manifiesta un desplazamiento positivo cuando comenzó con un desplazamiento negativo de $9,13^\circ$ (Tabla 5.6). Por su parte, en la apertura de la

puerta se termina con ángulos mayores en todos los casos excepto en las articulaciones 2 y 6 que son menores (acudir al Anexo V de análisis cinemático para ver datos numéricos).

El desplazamiento hacia la derecha se refleja en la Figura 5.35. En esta ocasión, la tendencia de la articulación 4 vuelve a ser negativa y la articulación 2 vuelve a participar en la primera etapa del movimiento. Los ángulos girados al final de la apertura de la puerta, son mayores en las articulaciones 2 y 6; y menores en el resto (acudir nuevamente al Anexo V de análisis cinemático si se desea comprobar datos numéricos).

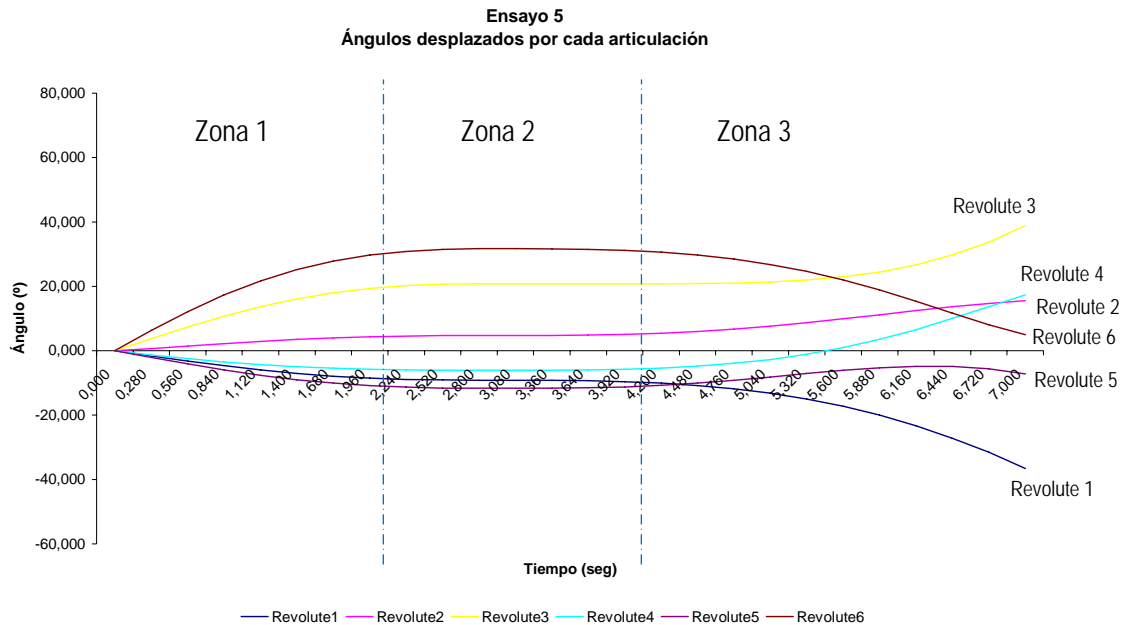


Figura 5.35.- Evolución del desplazamiento angular de cada articulación en la simulación 5.

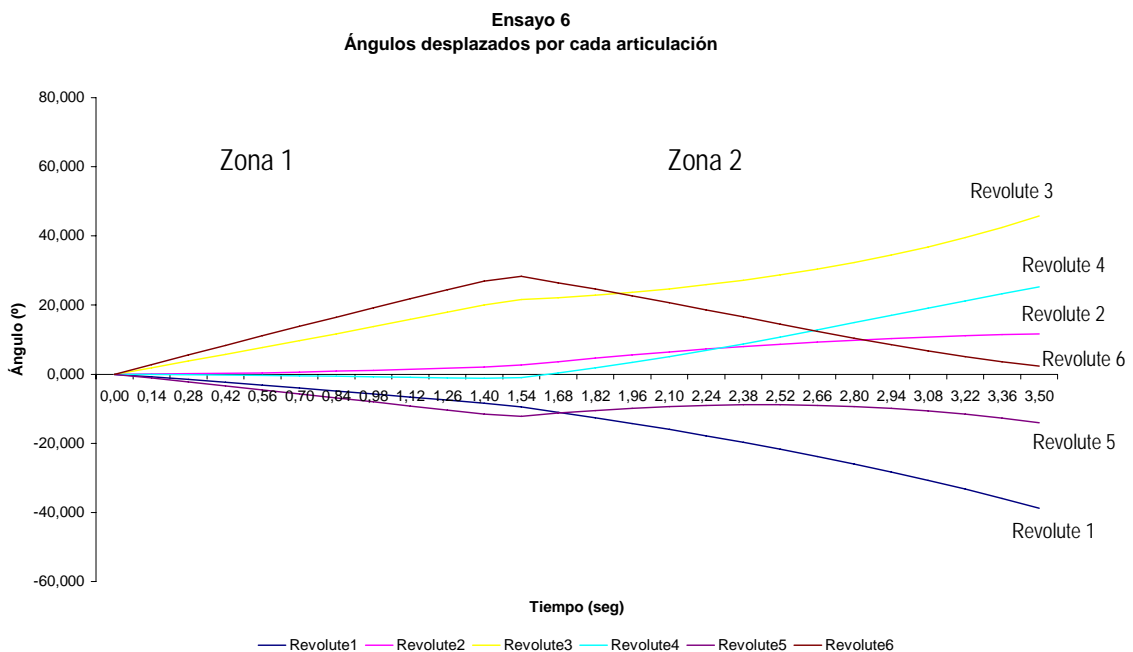


Figura 5.36.- Evolución del desplazamiento angular de cada articulación en la simulación 6.

En la Figura 5.36 se analiza el efecto de realizar la tarea de abrir la puerta con velocidades constantes desde la posición 1. En este caso las curvas que definen los desplazamientos articulares presentan dos zonas claramente diferenciadas que podemos aproximar a líneas rectas. Cada una de estas zonas se corresponde en el tiempo con el giro del pomo (Zona 1) y la posterior apertura de la puerta (Zona2). Los ángulos al inicio y al final de cada movimiento son, evidentemente, los mismos que en la simulación 1, ya que el posicionamiento de la base es el mismo en ambos casos.

5.4.4. Análisis comparativo por articulación

A continuación se presentan las conclusiones obtenidas por articulación en las distintas simulaciones. Para ilustrar dichas conclusiones se han construido una serie de gráficos donde se visualizan conjuntamente los desplazamientos acusados por cada articulación en los casos estudiados. Se hace necesario poner de manifiesto que las curvas correspondientes a la simulación número seis se han adaptado para conseguir ejecutar el mismo movimiento en un tiempo mayor e igual al resto de las simulaciones. Esta modificación cuantitativa se ha realizado en base a conseguir unos gráficos más representativos y fácilmente comparables.

Las curvas extraídas para la articulación 1 se resaltan en la Figura 5.37.

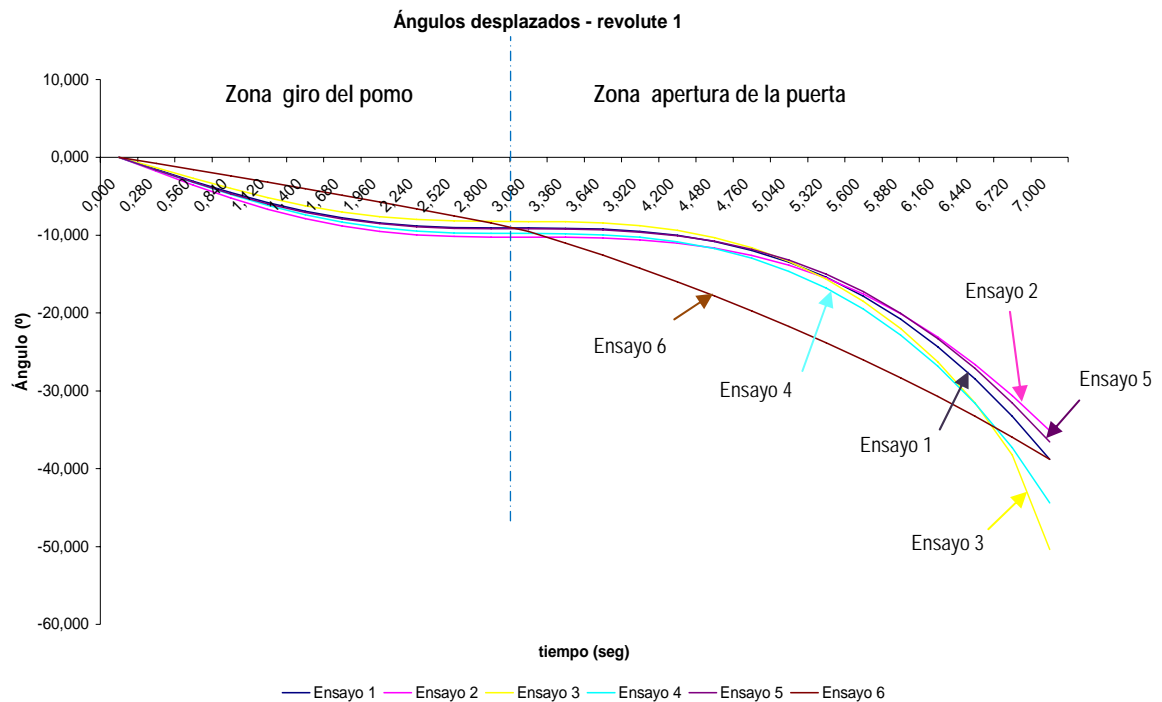


Figura 5.37.- Gráfico comparativo del desplazamiento angular de la articulación 1 en las diferentes simulaciones.

Veamos los efectos observados en la Figura 5.37 en ambas direcciones (recordar la Figura 5.10 dónde la dirección tangencial (t) es según eje Y y la dirección normal (n) según eje Z). Se distingue entre los movimientos de giro del pomo (hasta los 3 segundos) y apertura de la puerta (desde los 3 segundos hasta el final).

- El desplazamiento a lo largo de la dirección normal (simulaciones 1, 2, 3) origina los siguientes efectos:

- En el giro del pomo: presenta desplazamientos mayores mientras más cerca nos encontremos de la puerta (simulación 2), aunque tampoco son magnitudes relativamente significativas.
 - En la apertura de la puerta: los desplazamientos son ahora mayores en posiciones más alejadas de la puerta en la dirección normal.
- El desplazamiento a lo largo de la dirección tangencial (1, 4, 5) origina los siguientes efectos:
- En el giro del pomo: en este primer tramo las diferencias son prácticamente inapreciables entre las tres simulaciones.
 - En la apertura de la puerta: cuando comienza la apertura los comportamientos, en los tres casos, comienzan a desviarse. Apreciamos unas diferencias mayores cuando nos desplazamos hacia la izquierda (simulación 4).

Notar que la curva correspondiente a la simulación 6 presenta los mismos desplazamientos angulares que en la simulación 1 al inicio y al final de cada movimiento pero con distinta tendencia.

En la Figura 5.38 tenemos las curvas obtenidas para la articulación 2.

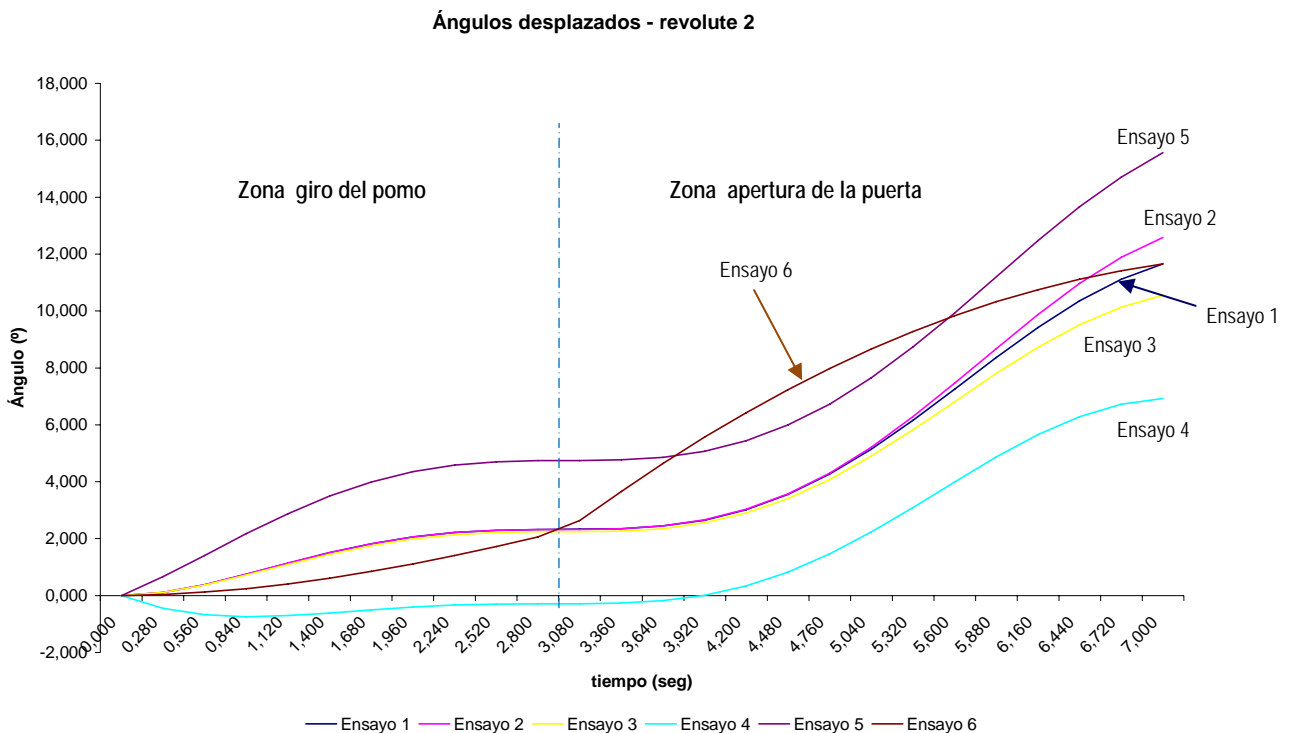


Figura 5.38.- Gráfico comparativo del desplazamiento angular de la articulación 2 en las diferentes simulaciones.

Los efectos observados en ambas direcciones se exponen en los párrafos siguientes. Se distingue entre los movimientos de giro del pomo (hasta los 3 segundos) y apertura de la puerta (desde los 3 segundos hasta el final).

- El desplazamiento a lo largo de la dirección normal (1, 2, 3) origina los siguientes efectos:

- En el giro del pomo: en este tramo las diferencias son casi nulas.
 - En la apertura de la puerta: cuando comenzamos este movimiento las diferencias se empiezan a notar; si bien es cierto, no son tan importantes como en la dirección tangencial. Respecto de la simulación tomada como referencia (simulación 1) en las situaciones más alejadas de la puerta, el distanciamiento comienza antes en el tiempo.
- El desplazamiento a lo largo de la dirección tangencial (1, 4, 5) origina los siguientes efectos:
- En el giro del pomo: en este caso las diferencias son mucho más notables. Este hecho es debido a que una de las articulaciones que más modifica su disposición, al moverse a lo largo de la dirección tangencial, es la número 2. El movimiento hacia la izquierda hace que la articulación 2 casi no tenga que desplazarse angularmente, y en cualquier caso con ángulos negativos.
 - En la apertura de la puerta: las diferencias arrastradas desde el movimiento anterior continúan a lo largo de toda la apertura de la puerta, acentuándose un poco al final del movimiento. El desplazamiento angular experimentado por la articulación 2 es mayor en la simulación 5.

La curva correspondiente a la simulación 6 nuevamente presenta los mismos desplazamientos angulares al inicio y al final de cada movimiento que en la simulación 1, pero con distinta tendencia.

En la Figura 5.39 vemos las curvas correspondientes al desplazamiento de la articulación tres en todos los casos.

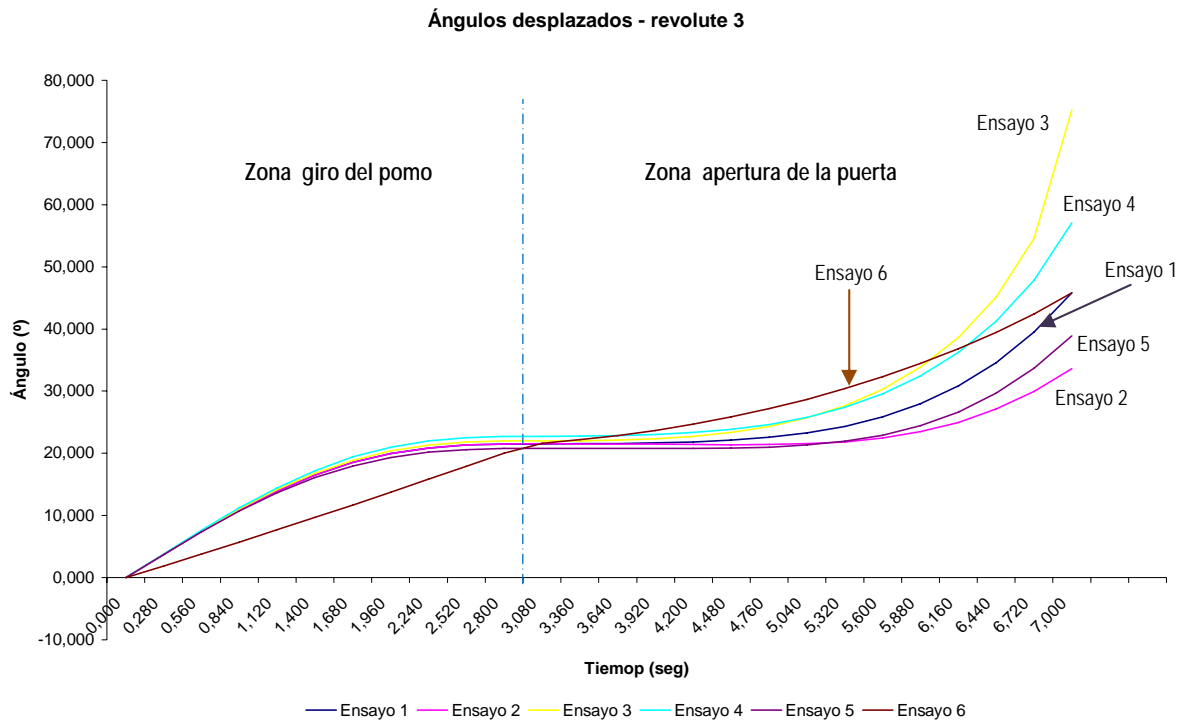


Figura 5.39.- Gráfico comparativo del desplazamiento angular de la articulación 3 en las diferentes simulaciones.



Para explicar los efectos provocados en ambas direcciones, se distingue entre los movimientos de giro del pomo (hasta los 3 segundos) y apertura de la puerta (desde los 3 segundos hasta el final).

- El desplazamiento a lo largo de la dirección normal (1, 2, 3) origina los siguientes efectos:
 - En el giro del pomo: en este tramo las diferencias son casi nulas.
 - En la apertura de la puerta: cuando comienza este movimiento las diferencias se empiezan a notar, alcanzando unos desplazamientos mayores cuanto más lejos se encuentra la base de la puerta.
- El desplazamiento a lo largo de la dirección tangencial (1, 4, 5) origina los siguientes efectos:
 - En el giro del pomo: las diferencias son prácticamente nulas.
 - En la apertura de la puerta: de la misma forma que en la dirección normal, durante este movimiento comienzan a observarse diferencias; aunque menores que en la dirección anterior. En la simulación 4 se desplaza un ángulo mayor, respecto de la simulación 1, que en la simulación 5.

La curva correspondiente a la simulación 6 nuevamente presenta los mismos desplazamientos angulares de la simulación al inicio y al final de cada movimiento pero con distinta tendencia.

En la Figura 5.40 se presentan los resultados correspondientes al desplazamiento de la articulación cuatro en todos los casos. La forma de las curvas de esta articulación en cada uno de las simulaciones es el mismo que la presentada en la articulación 2, con las salvedades de que:

- En la dirección normal (1, 2, 3) se necesita desplazar un ángulo mayor desde posiciones más alejadas (simulación 3). En la articulación 2 era justo a la inversa.
- En la dirección tangencial (1, 4, 5) ocurre el mismo fenómeno que en la normal. El desplazamiento es mayor cuando se mueve la base hacia la izquierda (simulación 4). En la articulación 2 era también a la inversa.

La curva correspondiente a la simulación 6 sigue teniendo las mismas características previamente mencionadas.

En la Figura 5.41, se reflejan los resultados para la articulación 5. En esta ocasión los efectos en ambas direcciones son los mismos que se apreciaban en la articulación 3; cada una en su forma y con su tendencia. La única diferencia es que ahora son desplazamientos negativos, mientras que en el caso de la articulación 3 eran positivos.

Por último, en la Figura 5.42, vemos qué ocurre con la articulación 6. En la dirección normal, al principio no se aprecian diferencias, es al final cuando en posiciones cercanas a la puerta hemos de desplazar un ángulo mayor. En la dirección tangencial la separación entre las curvas permanece constante, siendo mayor el desplazamiento acusado en la simulación 5. El pequeño cambio en la tendencia final de las simulaciones

3 y 4 se debe que están próximos a sus situaciones de “bloqueo”, hecho que desvirtúa un poco los resultados y hace que se dispersen.

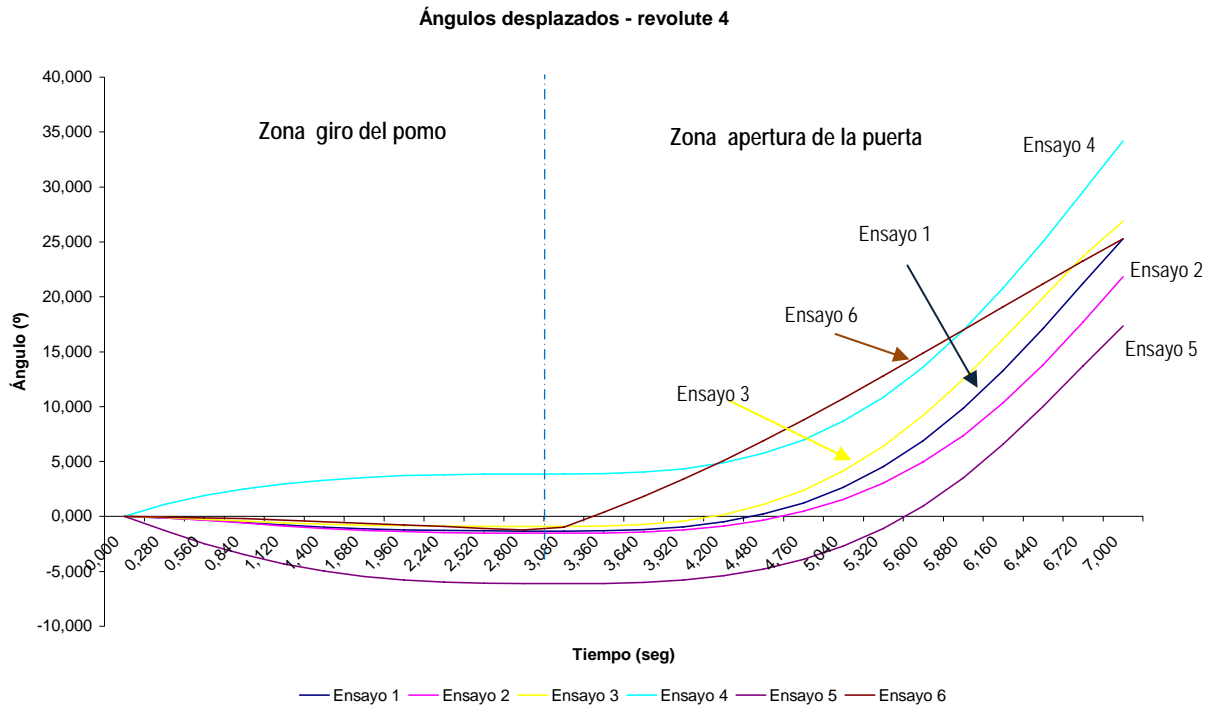


Figura 5.40.- Gráfico comparativo del desplazamiento angular de la articulación 4 en las diferentes simulaciones.

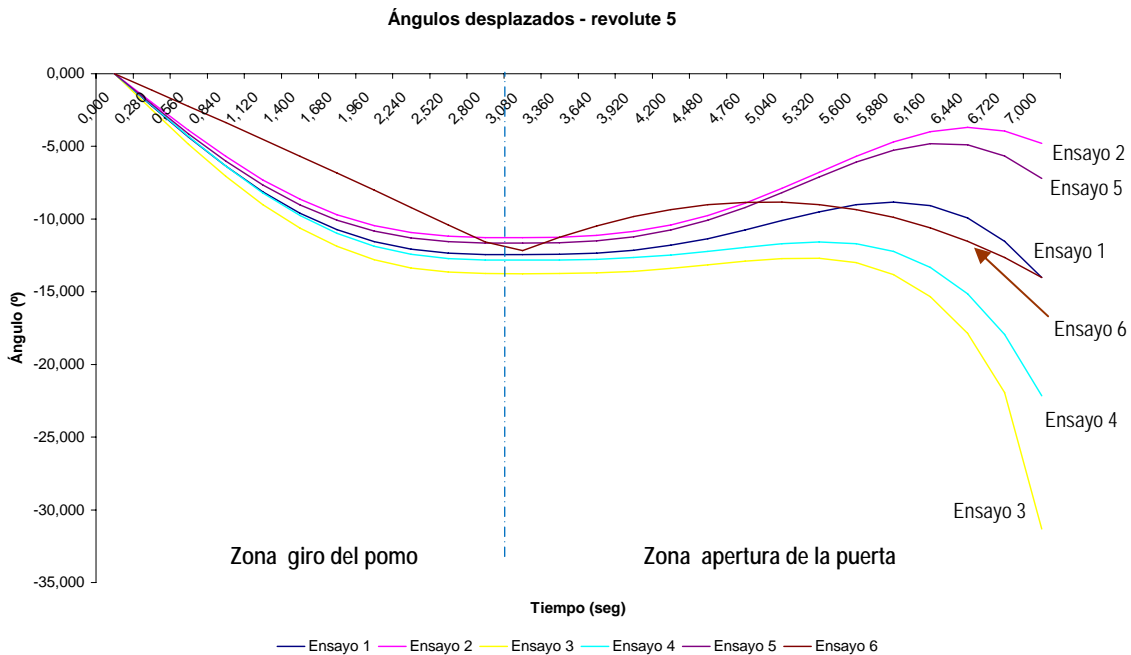


Figura 5.41.- Gráfico comparativo del desplazamiento angular de la articulación 5 en las diferentes simulaciones.

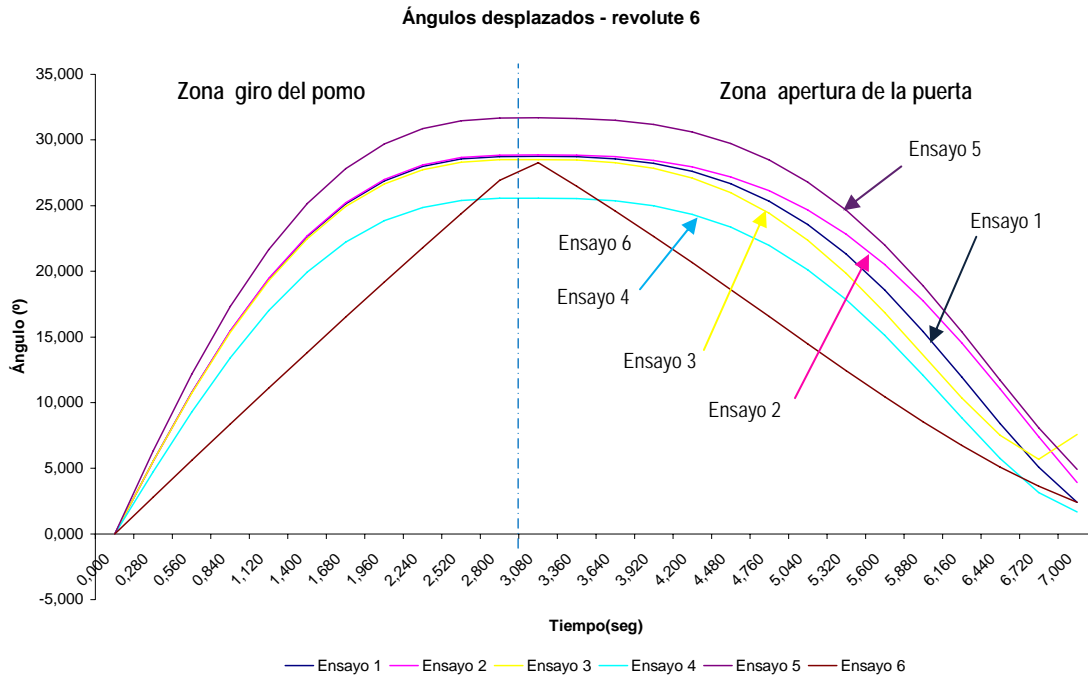


Figura 5.42.- Gráfico comparativo del desplazamiento angular de la articulación 6 en las diferentes simulaciones.

5.4.5. Estudio del alcance máximo del brazo en la apertura

Para terminar con el análisis cinemático se incluye una última sección que aborda la temática del alcance máximo que podemos conseguir en la apertura de la puerta desde cada posición. En otras palabras, cuántos grados como máximo conseguimos abrir la puerta en cada simulación sin necesidad de mover la base.

Para llevar a cabo este estudio, se simulan las trayectorias de giro del pomo y apertura de la puerta para un tiempo mayor y suficiente para alcanzar este estado de máxima apertura de la puerta. En las simulaciones realizadas anteriormente se conseguía en todos girar la puerta un ángulo de 20°. No obstante, y dependiendo de la posición inicial de la base, podríamos conseguir un ángulo de apertura de la puerta mayor sin necesidad de mover la base.

En definitiva, lo que se hace es simular los movimientos en un tiempo siempre superior a siete segundos manteniendo a partir de éste valor una velocidad de apertura constante e igual a 10°/seg. Así mismo, programamos una división en el tiempo de simulación muy pequeña para conseguir unos datos de apertura lo más ajustados posibles.

➤ Estudio del alcance máximo en la apertura de puerta desde la posición 1

Desde la posición 1 (simulación 1 y simulación 6) simulamos hasta 7.8 segundos con 2500 divisiones (Frames), para conseguir valores muy próximos entre sí y obtener datos numéricos más precisos. De esta forma conseguiríamos alcanzar como máximo un ángulo girado de la puerta de 26,7° aproximadamente. En la Tabla 5.8 vemos los últimos resultados obtenidos en Cosmos. Se puede apreciar que no se consigue continuar el movimiento hasta los 7,8 segundos ya que alcanza su límite a los 7,672 segundos y se bloquea como consecuencia de haber alcanzado los límites articulares.



Frame	Tiempo (seg)	Ángulo z puerta (°)
2458	7,666	-26,658
2459	7,669	-26,690
2460	7,672	-26,721

Tabla 5.8.- Alcance máximo en la apertura de la puerta desde la posición 1.

Sin embargo, no es capaz de alcanzar esta posición sin modificar su trayectoria ya que impacta con el marco de la puerta. Deberíamos parar el movimiento y corregir la trayectoria para evitar el obstáculo a los 7,619 segundos, Tabla 5.9:

Frame	Tiempo (seg)	Ángulo z puerta (°)
2443	7,619	-26,190

Tabla 5.9.- Grado de apertura máximo que alcanzamos en la posición 1 antes del choque.

Por tanto, la apertura máxima de la puerta que se consigue realmente desde esta posición sería de **26,190°**.

➤ **Estudio del alcance máximo en la apertura de puerta desde la posición 2**

En esta ocasión se realizó una simulación hasta los 9,1 segundos bloqueándose estructuralmente el brazo a los 8,347 segundos aproximadamente; cuando llevaba abiertos 33,465°, Tabla 5.10:

Frame	Tiempo (seg)	Ángulo z puerta (°)
2292	8,339	-33,392
2293	8,343	-33,429
2294	8,347	-33,465

Tabla 5.10.- Alcance máximo en la apertura desde la posición 2.

De la misma forma que en la simulación 1, no conseguimos alcanzar esta posición debido a que se produce el impacto con el marco de la puerta. Deberíamos parar el movimiento para reprogramar la trayectoria y evitar de esta forma el obstáculo transcurridos 7,619 segundos exactamente, Tabla 5.11:

Frame	Tiempo (seg)	Ángulo z puerta (°)
2094	7,619	-26,185

Tabla 5.11.- Grado de apertura máximo que alcanzamos en la posición 2 antes del choque.

De esta forma la apertura máxima que alcanzaríamos sin mover la base sería de **26,185°**. Notar que deberíamos parar el movimiento cuando aproximadamente el grado de apertura de la puerta fuera similar, hecho que se explica fácilmente por razones geométricas.

➤ **Estudio del alcance máximo en la apertura de puerta desde la posición 3**

Desde esta posición, basta con simular hasta los 7.2 segundos para comprobar que el grado de apertura máximo sería de **20,070°** transcurridos 7.007 segundos exactamente, Tabla 5.12:



Frame	Tiempo (seg)	Ángulo z puerta
2432	7,001	-20,013
2433	7,004	-20,042
2434	7,007	-20,070

Tabla 5.12.- Alcance máximo en la apertura desde la posición 3.

En esta situación no se contabiliza ningún choque por lo que esta situación es perfectamente alcanzable sin realizar ninguna corrección.

➤ **Estudio del alcance máximo en la apertura de puerta desde la posición 4**

Realizando una simulación con una duración total de 7.4 segundos se compró que el alcance estructural del brazo permitiría girar la puerta un ángulo máximo de **22,934°**, Tabla 5.13:

Frame	Tiempo(seg)	Ángulo z (°)
2460	7,288	-22,875
2461	7,290	-22,905
2462	7,293	-22,934

Tabla 5.13.- Alcance máximo en la apertura desde la posición 4.

Al igual que en la posición 3 no se detecta ningún choque durante la simulación.

➤ **Estudio del alcance máximo en la apertura de puerta desde la posición 5**

En la última de las posiciones alargamos el tiempo de simulación hasta alcanzar los 7.9 segundos; aunque sólo consigue mover hasta los 7,8 segundos aproximadamente, Tabla 5.14:

Frame	Tiempo (seg)	Ángulo z (°)
2492	7,872	-28,716
2493	7,875	-28,747
2494	7,878	-28,779

Tabla 5.14.- Alcance máximo en la apertura desde la posición 5.

De nuevo, no conseguirá abrir los 28,779° registrados en la tabla anterior ya que se produciría el choque con el marco de la puerta. Para evitar esta situación, deberíamos detener el movimiento a los 7.619 segundos aproximadamente y programar otra trayectoria que evitase el obstáculo, Tabla 5.15:

Frame	Tiempo (seg)	Ángulo z (°)
2412	7,619	-26,188

Tabla 5.15.- Grado de apertura máximo que alcanzamos en la posición 5 antes del choque.

Por tanto, el grado máximo de apertura sería de **26,188°**.

Para terminar con el estudio cinemático se incluye una última figura, Figura 5.43, donde se muestra el momento en el que se produce el choque del brazo manipulador con el

marco de la puerta; instante en el que se tendría que corregir la trayectoria para conseguir evitar el obstáculo.

① Vista desde arriba

② Vista de frente

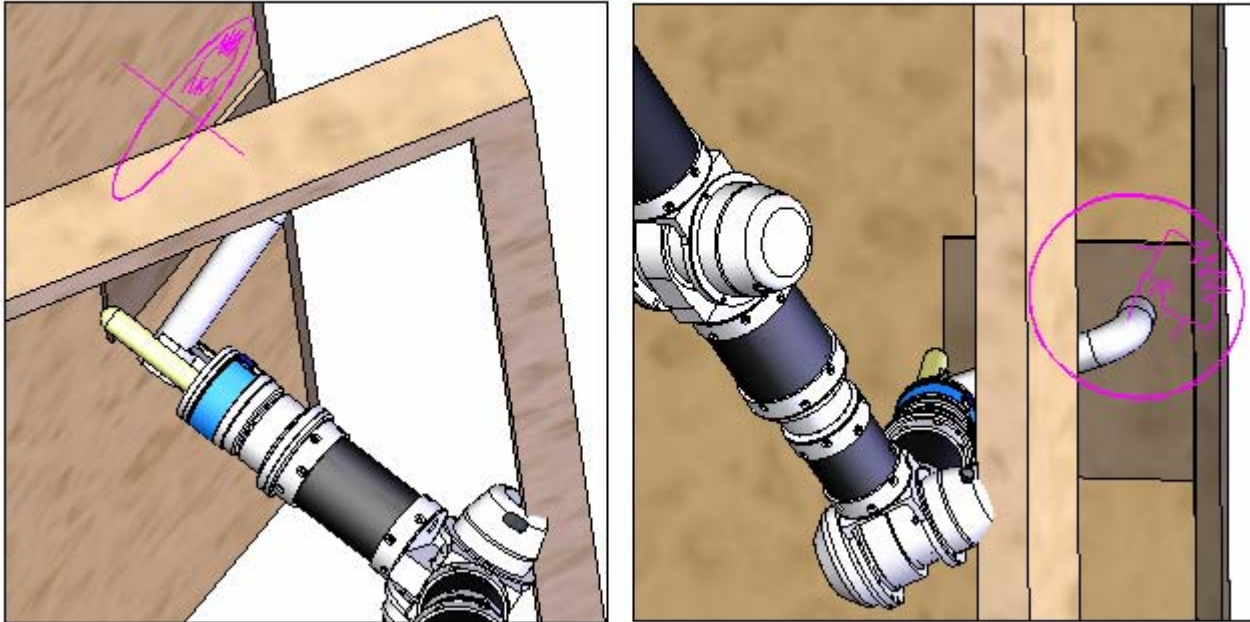


Figura 5.43.- Representación del momento en el que el brazo manipulador impacta con el marco de la puerta durante la trayectoria descrita.

CAPÍTULO VI

ANÁLISIS DINÁMICO DEL BRAZO MANIPULADOR LIGERO

6.1. Introducción

Hasta ahora hemos analizado los movimientos de los elementos sin considerar las fuerzas que los causan. En este capítulo relacionaremos causa y efecto. De esta forma, la dinámica se describe como la ciencia que se ocupa de la relación entre las fuerzas que actúan sobre un cuerpo y el movimiento que en él se origina.

La obtención del modelo dinámico de un mecanismo, y en particular de un robot, se basa fundamentalmente en el planteamiento del equilibrio de fuerzas establecido en la segunda ley de Newton, o su equivalente para movimientos de rotación, la denominada ley de Euler [81] en general se define como [6.1] y [6.2]:

$$\sum F = m \cdot a \quad [6.1]$$

$$\sum T = I \cdot \alpha + w \times (I \cdot w) \quad [6.2]$$

Donde:

F : fuerza [N]

m : masa [Kg]

a : aceleración [m/s^2]

T : par [$N \cdot m$]

I : matriz de inercia [Kg/m^2]

ω : velocidad angular [$^\circ/s$]

α : aceleración angular [$^\circ/s^2$]

El planteamiento teórico de los equilibrios de fuerzas en robots de seis grados de libertad, como el que nos ocupa, no es un trabajo sencillo. En estos casos deben tenerse en cuenta que además de las fuerzas de inercia y gravedad, aparecen fuerzas de Coriolis debidas al movimiento relativo existente entre los diversos elementos, así como de fuerzas centrípetas que dependen de la configuración instantánea del manipulador.

De esta forma, las ecuaciones dinámicas para los manipuladores en cadena abierta se pueden expresar de forma general como en la ecuación [6.3]:

$$H(q)\ddot{q} + h(\dot{q}, \dot{q}) = \tau \quad [6.3]$$

En donde τ hace referencia a las fuerzas aplicadas en las articulaciones en función de la posición q y sus derivadas en el tiempo. $H(q)$ es la matriz de masas o de inercia y $h(\dot{q}, \dot{q})$ contiene las fuerzas centrífugas, de Coriolis, gravitacional y de fricción.

Así, del equilibrio de fuerzas y pares que intervienen sobre el robot se obtienen los denominados *modelos dinámicos directo* e *inverso*. En el primero, se expresa la evolución temporal de las coordenadas articulares del robot en función de las fuerzas y pares que intervienen. Por el contrario, el segundo modelo expresa las fuerzas y pares que intervienen en función de las coordenadas articulares y sus derivadas.

Por su parte, en el estudio reflejado en el presente capítulo de esta tesis se pretende mostrar la evolución del desplazamiento articular $\theta(t)$ así como de sus derivadas

temporales, según un determinado perfil en función del tiempo. Dicho perfil ha sido definido con anterioridad en el estudio cinemático presentado en el capítulo anterior. Nos encontramos por tanto, ante un problema que ha de ser planteado desde el punto de vista de la dinámica inversa. Este problema se basa, en la obtención de las fuerzas y momentos de reacción en cada articulación en función de diversos parámetros. Para desarrollarlo es necesario comprender gran cantidad de parámetros y fórmulas (para mayor detalle consultar bibliografía [81]) que, sin embargo, utilizando herramientas informáticas de elementos finitos, como la que se presentará en el siguiente apartado, no sería necesario un estudio tan detallado.

6.2. La herramienta de análisis dinámico: CosmosMotion

El análisis dinámico del manipulador ligero UC3M-LWR-1 se llevó a cabo mediante la simulación en ordenador de determinados movimientos del robot. Para ello se empleó una herramienta informática llamada **CosmosMotion**. Dicha herramienta es un software diseñado para la simulación de sistemas mecánicos y se encuentra incluida en la interfaz del programa presentado en el capítulo IV, SolidWorks. Esta herramienta permite modelar sistemas mecánicos en 3D como prototipos virtuales.

6.3. Análisis estático

Como se ha comentado anteriormente, en el análisis dinámico, se estudian los esfuerzos de reacción que aparecen en las articulaciones críticas como consecuencia del movimiento de los eslabones. Pero además de este análisis, existe otro tipo de análisis complementario, de gran importancia: el **análisis estático**. En el análisis estático, se estudian los esfuerzos de reacción máxima que aparecen en las articulaciones como consecuencia no del movimiento de los eslabones, sino de los esfuerzos exteriores que aparecen sobre la cadena cinemática. Se entiende, en este caso, como esfuerzos exteriores, los correspondientes al peso de los eslabones, los accionadores y el de la carga que porta el manipulador en el extremo de la cadena cinemática.

El análisis estático ha sido realizado con ayuda del programa de elementos finitos previamente introducido, CosmosMotion. Para la realización del estudio es necesario definir, para cada pieza, las siguientes propiedades:

- Tipo de material.
- Condiciones de contorno; restricciones y cargas que afectan al modelo.
- Condiciones de contacto entre piezas (unidas simplemente, movimiento libre entre las piezas en contacto y/o unión de superficies nodo a nodo).
- Tipo de mallado.

Los elementos finitos permiten dar soluciones analíticas de manera simple a problemas complejos, es un método muy adecuado para su utilización con ordenadores y es universalmente conocido y utilizado. El método de elementos finitos **FEM** (**F**inite **E**lements **M**ethod) es un método numérico que permite aproximar las ecuaciones que rigen el comportamiento de los sistemas continuos [82]. El método divide un sistema continuo en elementos conectados entre sí, que sustituyen a partes finitas del dominio continuo. En cada uno de los elementos debe especificarse su comportamiento mediante un número finito de parámetros. Los elementos se ensamblan y dan lugar a un sistema

complejo. Así, el sistema complejo se resuelve aplicando las reglas de solución a los problemas discretos.

El interés del estudio estático, en el modelo del manipulador realizado, reside en el conocimiento de aquellas piezas que, por su geometría, material, posición y función a realizar, pueden soportar cargas estáticas excesivas para sus características. El estudio estático mediante FEM permite detectar mediante simulación, las posibles sobrecargas que pueden aparecer en piezas críticas, antes de someter al sistema mecánico real a los mismos esfuerzos además de obtener el valor de tensión donde el material rompe. Si se detectara algún posible problema en las reacciones sobre las piezas, entonces debería modificarse el diseño de la misma, seleccionar un material más adecuado para la pieza que presenta problemas o bien modificar las dimensiones de la misma.

El estudio estático se realiza utilizando como criterio de fallo el criterio de von Mises, frente a los otros criterios facilitados por el programa de análisis (Criterio de Tresca, Criterio de tensiones de Mohr-Coulomb) ya que es el más aconsejable para los materiales de construcción del brazo ligero, aluminio y fibra de carbono.

6.3.1. Criterio de von Mises

El criterio de von Mises está basado en la teoría de von Mises-Hencky, y relaciona la energía de deformación por unidad de volumen del material para predecir la deformación de los materiales [83]:

$$\sigma_{\text{vonmises}} = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad [6.4]$$

$$\sigma_{\text{vonmises}} = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2] + 3 \cdot [\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2]} \quad [6.5]$$

La deformación se producirá cuando la tensión de von Mises (definida en la ecuación [6.4] o [6.5] en función de las tensiones principales o normales) supere una tensión límite, que dependerá del material de la pieza. Existe una relación entre la tensión aplicada a una pieza y su correspondiente deformación, que viene determinada por las curvas de tensión deformación de cada material (obtenidas mediante simulaciones de tracción).

6.3.2. Curvas de tensión deformación

Las piezas que componen el brazo robótico son fundamentalmente de aluminio 7075 T6 y fibra de carbono, salvo algunos componentes como los reductores o los motores que son de acero o algunas juntas poliméricas, por lo que será necesario comprobar si las tensiones alcanzadas durante las simulaciones se acercan a los límites de este material. En la Figura 6.1 se presenta la relación entre la tensión y la deformación del aluminio 7075 durante una simulación de tracción.

En la Figura 6.1 distinguimos los puntos de *límite elástico* (punto 1), *tensión máxima* (punto 2) y *tensión de rotura* (punto 3), que vienen dadas por las características del material. La pendiente de la recta del origen al punto de límite elástico se conoce como *Módulo de Young* (E) o módulo de elasticidad, y es también característico de cada material. En el caso del aluminio 7075 el módulo de Young es 72.000 N/mm². Este tramo recto tiene la característica de que las deformaciones son elásticas es decir, el

material se comporta de manera lineal, no produciéndose rotura en los enlaces interatómicos de la red cristalina del aluminio. Si durante el proceso de deformación se supera el límite elástico (punto 1), la pieza se deformará permanentemente. Si alcanzásemos una tensión superior a la del límite elástico (punto rojo), cuando dejásemos de aplicar carga el cuerpo no recuperaría su posición inicial sino que nos quedaría una deformación plástica permanente, es decir una parte de la deformación obtenida se recupera y otra no. Como vemos, además de tener una deformación remanente también se habría aumentado la tensión del límite elástico, este proceso se conoce con el nombre de endurecimiento por deformación y es utilizado en ciertos materiales.

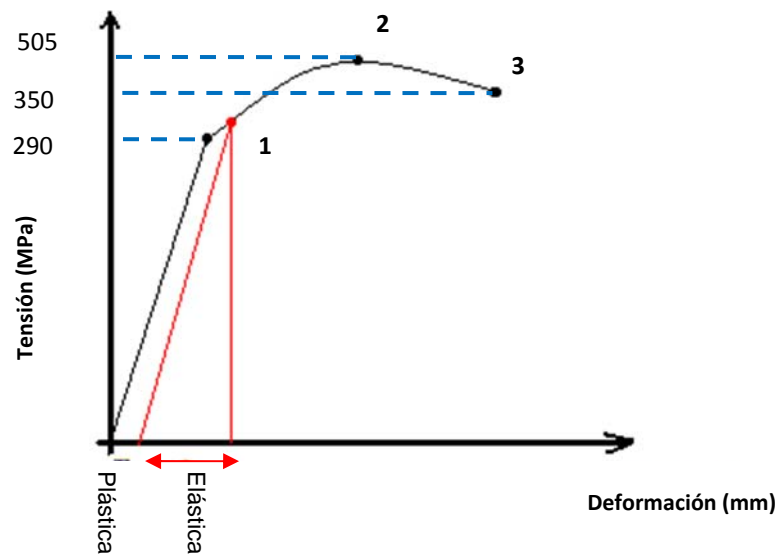


Figura 6.1.- Curva tensión-deformación del aluminio 7075 T6.

Para el análisis estático aquí presentado se trabajó con la curva tensión-deformación del aluminio 7075 T6 (Figura 6.1), y sus puntos límite, así como el valor del módulo de Young 72.000 N/mm^2 . Con estas características, el límite elástico (punto 1 de la Figura 6.1) se alcanza en 290 MPa y la tensión de rotura (punto 3 de la Figura 6.1) es de 350 MPa.

6.3.3. Resultados experimentales

A continuación se muestran los resultados experimentales obtenidos con el análisis estático del modelo del manipulador UC3M-LWR-1, realizado sobre aquellos eslabones que sufren mayores tensiones. Así pues, se presentaran los resultados de la primera y segunda articulación por ser las que mayores tensiones soportan de toda la estructura, ver modelo cinemático en Figura 6.2. Estos resultados consistirán en los gráficos de tensión de von Mises así como de la deformación sufrida por las articulaciones sometidas a diferentes tipos de cargas.

Por otra parte, se mostrarán también los resultados experimentales obtenidos del análisis estático realizado para el diseño del actuador final. En este análisis se analizaron 6 casos diferentes de carga: 3 con variaciones de fuerza puntual en el extremo del dedo superior y 3 con variaciones de momento torsor aplicado también en el cuerpo del dedo superior.

Para la elección de la carga en cada uno de los casos se ha tenido en cuenta que, como requisito del diseño planteado desde el inicio (ver capítulo IV), el manipulador debe ser

capaz de trabajar con cargas de hasta 6 Kg. Este valor se corresponde con una fuerza de 55N. Se han tomado cargas de valores cercanos a 55N y en algunos casos del doble, para comprobar el funcionamiento puntual del sistema mecánico sometido a una sobrecarga.

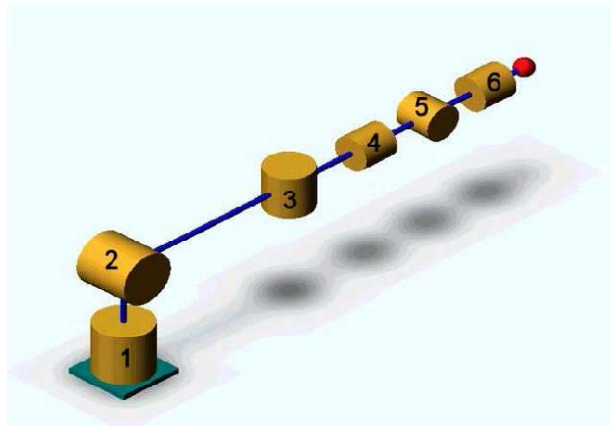


Figura 6.2.- Modelo cinemático del manipulador UC3M-LWR-1, Numeración de las articulaciones.

6.3.3.1. Análisis estático: Articulación 1

I. Caso 100N:

En las siguiente Figuras 6.3 y 6.4, se presentan las tensiones de von Mises y la deformación de la articulación 1 respectivamente. Hay que resaltar que aunque aparentemente la pieza se ha deformado en exceso, no es realmente así, ya que en ambas gráficas se ha aplicado un factor de escala de 11913.1, para que se puedan apreciar los efectos de la carga, por lo que este gráfico no es en escala real.

Como puede verse en el gráfico de tensiones de la Figura 6.3, la tensión máxima alcanzada es de $7.32 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$, que aunque se trata de una tensión muy elevada no llega a superar el límite elástico del aluminio 7075 cuyo valor es de $72.000 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$. Por tanto, todavía tendríamos un margen de seguridad, que permitiría que el brazo pudiera ser sometido a una carga mayor y que éste no llegase a la zona de deformaciones plásticas; Deformaciones que ya serían irreversibles, dejándonos por lo tanto una deformación remanente en la pieza.

En cuanto a las piezas que más sufren, sería la pieza de extensión de aluminio que está situada entre el reductor y la base de fijación de esta primera articulación. El motor estaría ubicado dentro de la base y mediante un eje transmitiría el movimiento al reductor, de esta forma si durante un movimiento se observara cierta deformación en el anillo de unión no afectaría directamente al motor, sino que en todo caso se vería afectado el eje de unión motor-reductor.

Otro elemento que podría dar problemas ante casos de carga extremos sería, el agujero de ventilación, también usado para pasar los cables, que se encuentra en la base. Este tipo de elementos acumulan gran cantidad de tensión en sus bordes, por lo que hay que tener especial cuidado con él.

El gráfico de deformaciones de la Figura 6.4 indica las zonas donde sería máxima la deformación, que corresponden con la de máxima tensión. El valor máximo que se obtiene es de $8.8 \cdot 10^{-6}$. Este valor por sí solo no nos aporta suficiente información, por lo que acudimos al gráfico de desplazamientos de la Figura 6.5, en el que podremos ver

cuánto se mueve cada pieza. En dicho gráfico, Figura 6.5, se aprecia que el punto de mayor desplazamiento se movería una cantidad de $1.45 \mu\text{m}$, prácticamente despreciable o inapreciable por el ojo humano. Como hemos visto antes este desplazamiento no tendría efectos sobre la estructura ya que al no superar el límite elástico no sería una deformación permanente.

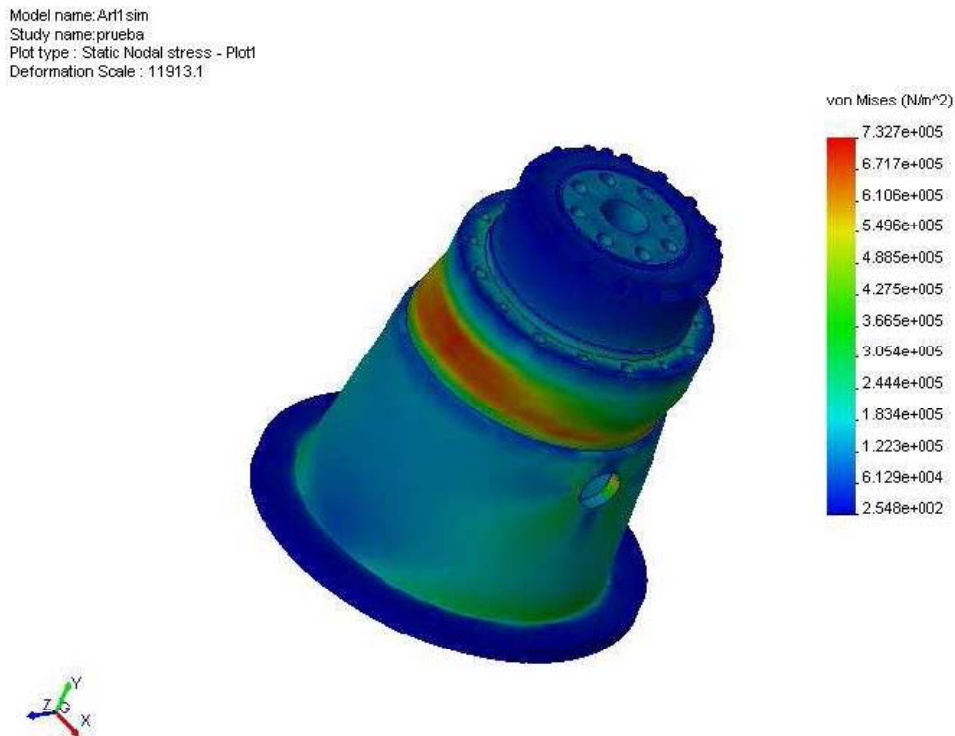


Figura 6.3.- Diagrama de tensiones de la articulación 1 para caso 100N.

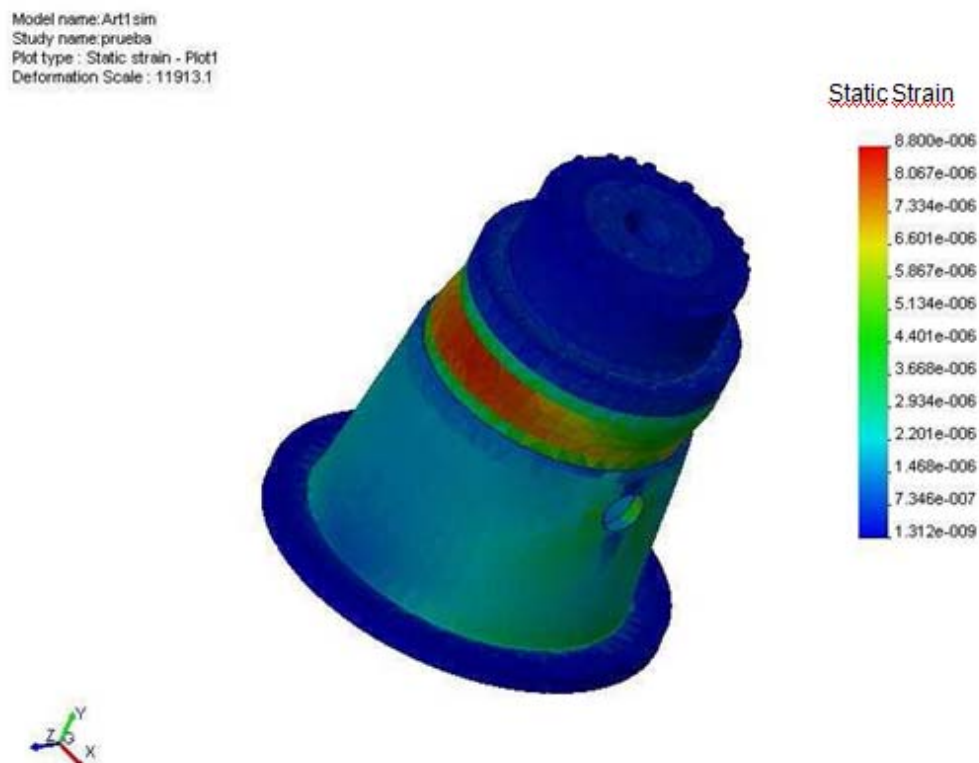


Figura 6.4.- Diagrama de deformaciones de la articulación 1 para caso 100N.

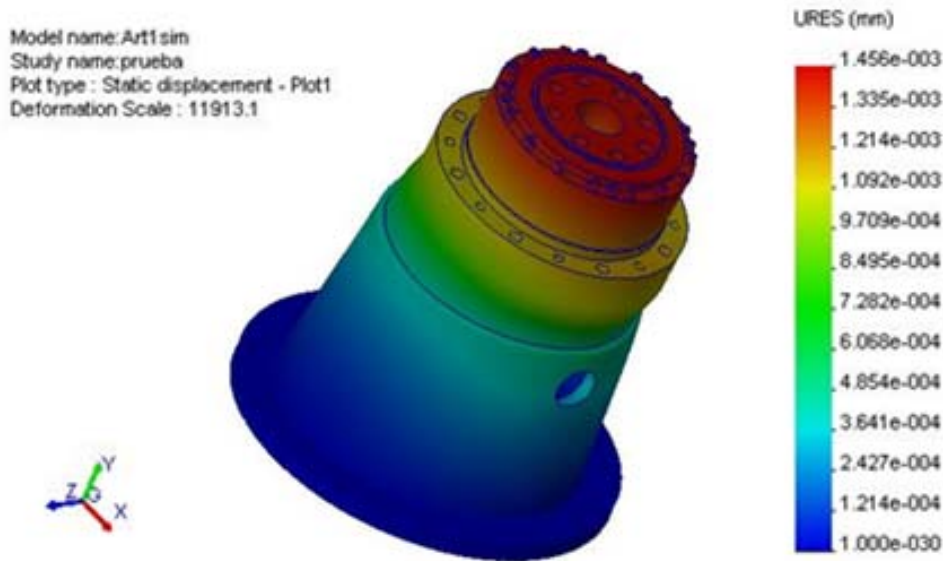


Figura 6.5.- Diagrama de desplazamientos de la articulación 1 para caso 100N.

II. Caso 80N+15N.m:

En este caso se ha aplicado un momento de 15 N.m en el eje del reductor, de ahí que se observen ciertas tensiones en el mismo, Figura 6.6. En los resultados de las Figuras 6.6 y 6.7 cabe destacar que la tensión máxima estimada en esta simulación ha aumentado considerablemente como consecuencia de este par introducido, ya que la carga la hemos reducido en 20N. Ahora hay unas tensiones máximas de $1.79 \cdot 10^6$ N/m², cifra que está más cercana al límite elástico del aluminio 7075.

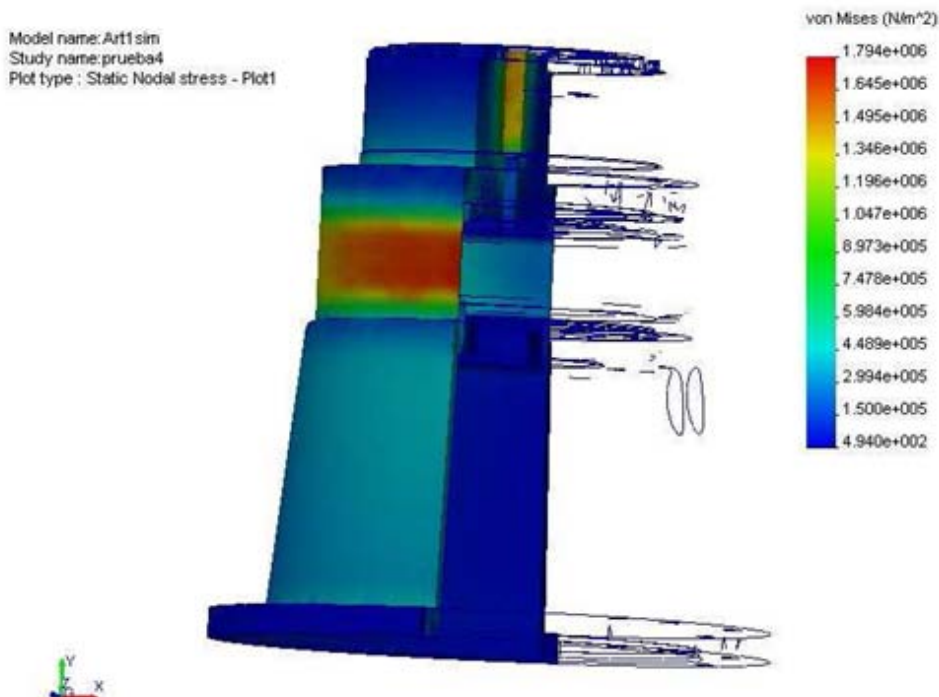


Figura 6.6.- Diagrama de tensiones de articulación 1 para caso 80N +15N.m.

En este caso, el gráfico de tensiones (Figura 6.6) tiene un factor de escala de 1:1, que es como lo veríamos en la realidad. En el caso del diagrama de deformaciones, Figura 6.7,

se puede ver la forma original (sombreada) y la forma final con un factor de escala de 11327.

Por otra parte, en este caso la deformación también es mayor, pero no es preocupante, ya que como vimos en el caso anterior, esta no sería permanente al estar por debajo del límite elástico del material. Análogamente al caso anterior, el máximo desplazamiento no presenta un valor significativo teniendo en cuenta que la estructura no supera el límite elástico del material.

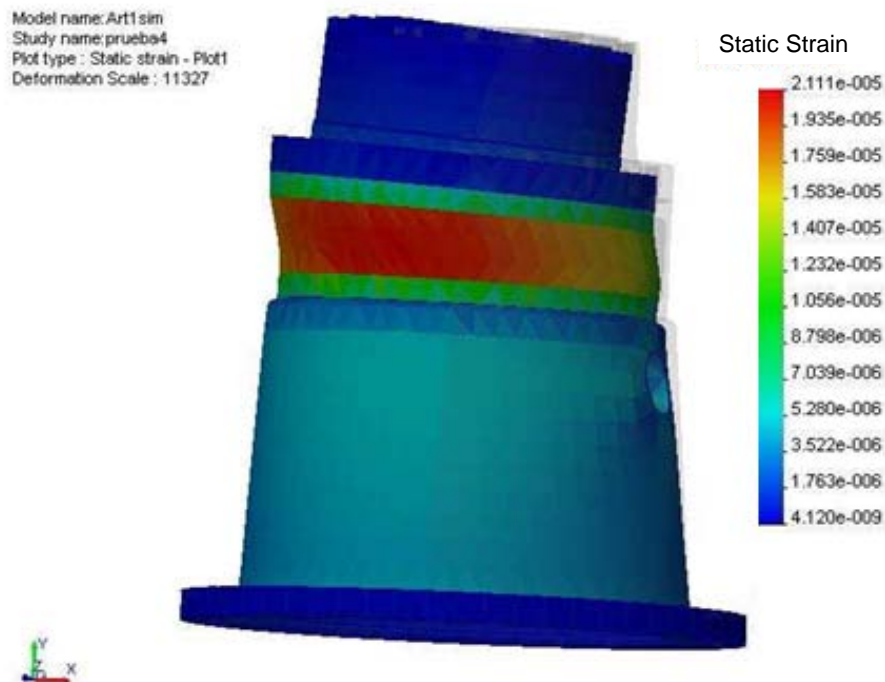


Figura 6.7.- Diagrama de deformaciones de la articulación 1 para caso 80N+15N-m.

6.3.3.2. Análisis estático: Articulación 2

En este caso, el ensamblaje tenía una mayor complejidad, ya que estaba constituido por muchas más piezas, lo que nos provocaba una gran cantidad de interferencias entre unos elementos y otros, complicándose de esta forma el proceso de mallado. Debido a esto hubo que emplear el mallado más fino posible, para que este se ajustara perfectamente al modelo diseñado. En este caso se analizaron los siguientes casos de carga para ver el comportamiento de la articulación 2:

1. Caso 75N:

En la Figura 6.8 se observa un valor de tensión máxima mayor para la articulación 2 que en el caso de la articulación 1 mostrado anteriormente. El valor máximo se encuentra en torno a los 16 MPa, cifra que dista considerablemente del límite elástico del material. Se observa también, en esta misma figura, una zona de concentración de tensiones elevadas nuevamente situada en torno al agujero de ventilación y paso de cables.

En cuanto a los resultados observados en la Figura 6.9 se observan también valores mayores que en el caso anterior, y que la mayoría de ellas se concentran en el agujero de la parte posterior del soporte de aluminio de la articulación.

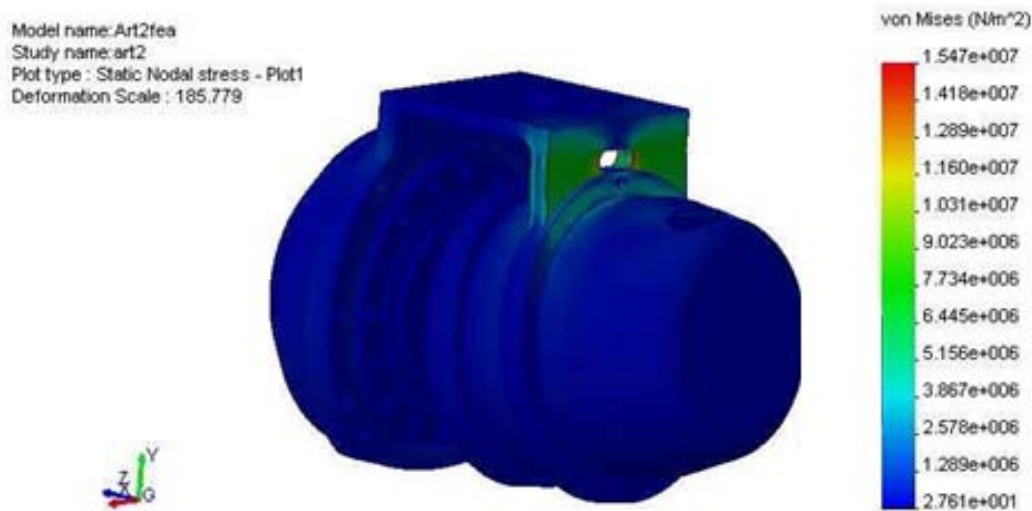


Figura 6.8.- Diagrama de tensiones de la articulación 2 para caso 75N.

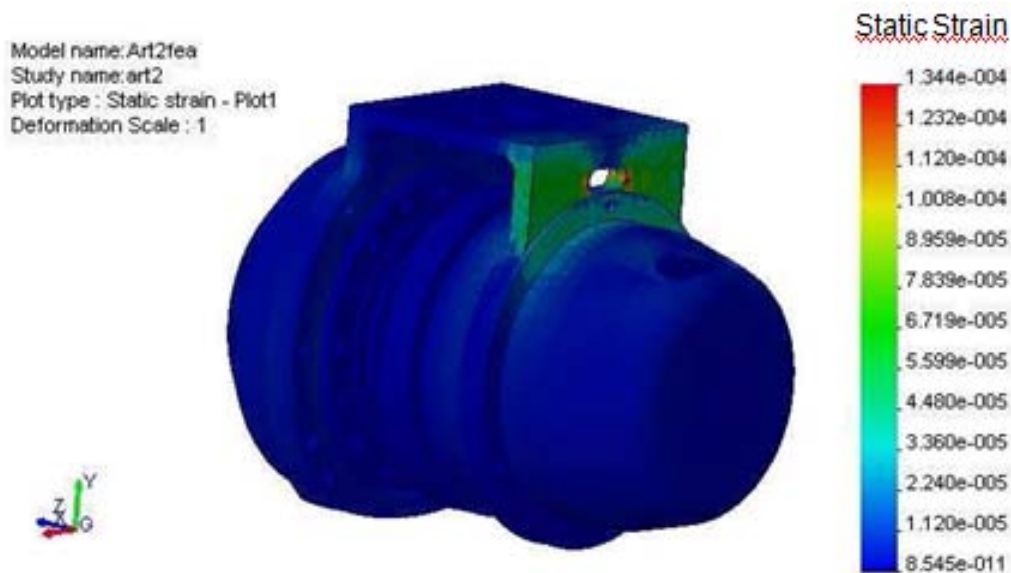


Figura 6.9.- Diagrama de deformaciones de la articulación 2 para caso 75N.

2. Caso 75N+45N.m:

Con la aplicación de un par resistente, aparecen como se muestra en la Figura 6.10, unas tensiones concentradas en la parte posterior del soporte, zonas donde existen cambios de curvatura. En este caso, ya estamos hablando de órdenes de magnitud considerables (40 Mpa), cercanos al límite elástico del material (aluminio). Por lo que sería aconsejable no sobrepasar estos valores para evitar problemas de deformaciones permanentes en la estructura del manipulador y que por tanto, repercutirían negativamente en un correcto funcionamiento de la estructura.

Por otra parte, el diagrama de deformaciones de la Figura 6.11 nos muestra que la deformación máxima está localizada en el radio coloreado en rojo, y, aunque no se aprecie en esta imagen, también presenta valores elevados de deformaciones, como en el caso anterior, en el agujero de la parte posterior, que como se ha comentado anteriormente se emplea para la ventilación y el guiado de los cables de alimentación.

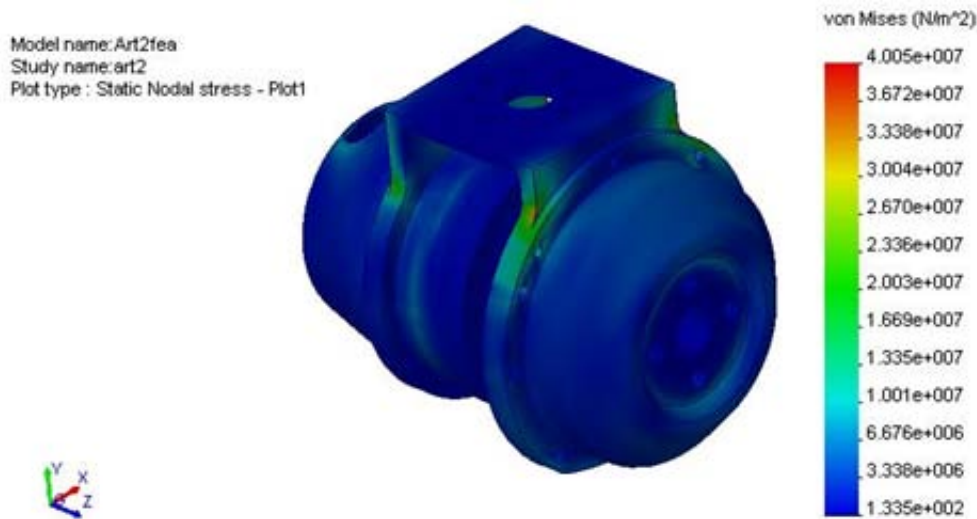


Figura 6.10.- Diagrama de tensiones de la articulación 2 para caso 75N+45N·m.

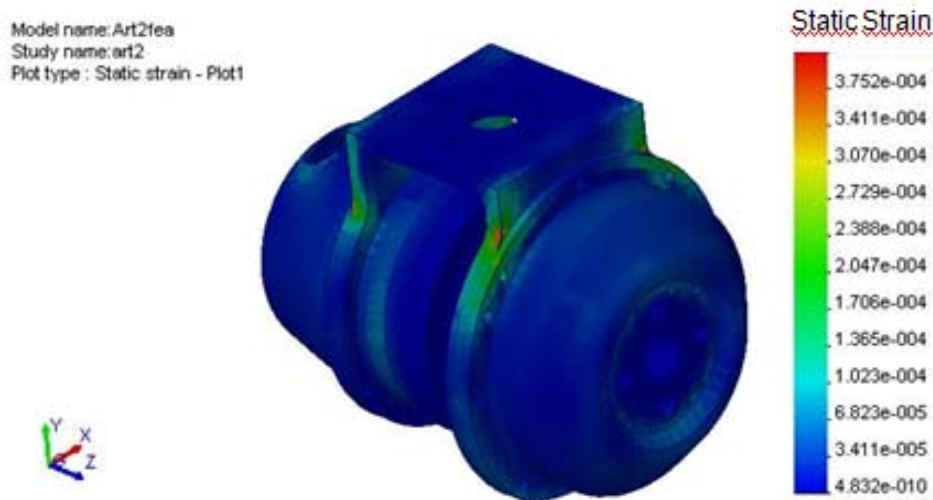


Figura 6.11.- Diagrama de deformaciones de la articulación 2 para caso 75N+45N·m.

Comparando los análisis realizados para cada articulación (recordar articulación 1 y 2) se puede apreciar que el caso más crítico expuesto es el correspondiente a la segunda articulación, por lo que se comprobó mediante el criterio de von Mises los factores de seguridad a tener en cuenta, Figura 6.12. Como se ha explicado anteriormente los puntos de máximo riesgo se hallan en los cambios de curvatura del soporte de la articulación. Estos puntos, aunque aparezcan en rojo, tienen un factor de seguridad de 12, que es el mínimo de toda la estructura. Este factor de seguridad está referido al límite elástico del aluminio de 290 Mpa. Ante esto se puede decir que estamos trabajando del lado de la seguridad y con un buen margen, por lo que estructuralmente hablando las articulaciones están bien dimensionadas y no hay expectativas de fallo en ellas.

Por otra parte, se han llevado a cabo múltiples análisis para comprobar qué cargas, aplicadas sobre esta articulación, provocarían problemas con las deformaciones plásticas. Aumentando progresivamente las fuerzas sobre la articulación 2, concluimos que al aplicar una fuerza de 250 N y un par de 150 N.m en los mismos puntos que las simulaciones realizadas anteriormente, se obtenían unas tensiones máximas de 140

MPa, muy próximas ya al límite elástico del material. Esto nos quiere decir, que al analizar esta articulación por separado, podríamos aplicar en el actuador final cargas de hasta tres veces más que las aplicadas en las simulaciones presentados anteriormente. Evidentemente esto no se debería hacer ya que encontraríamos fallos en otros elementos estructurales, como pudieran ser juntas o incluso motores. Esta misma prueba se ha realizado con la articulación 1, comprobando que esta sufre tensiones mucho menores que la articulación 2, ya que al aplicar las mismas cargas sobre ella (250N, 150N.m), la máxima tensión obtenida era de 17 MPa, un orden de magnitud inferior.

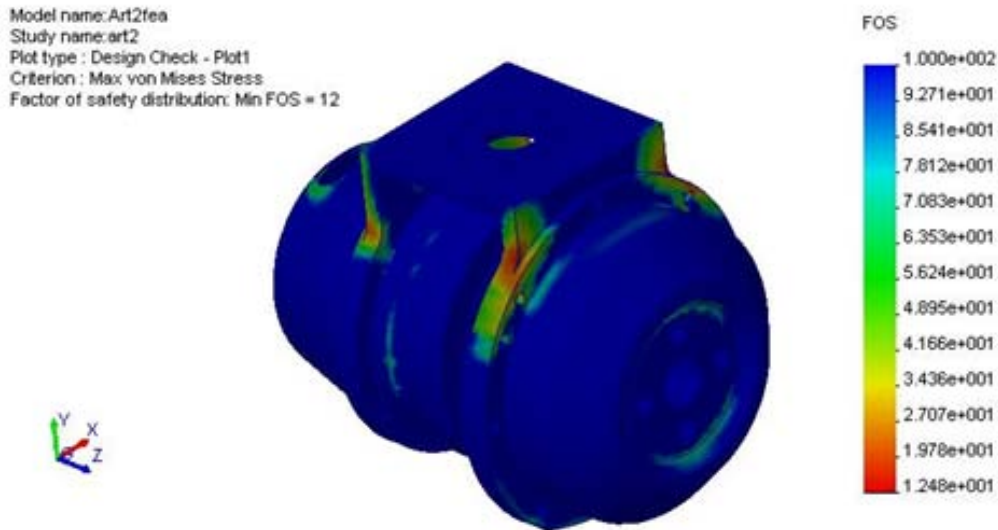


Figura 6.12.- Diagrama de Factor de Seguridad (FOS - Factor Of Security).

6.3.3.3. Análisis estático: Actuador final

Las características de los materiales utilizados en la fabricación del actuador final que han sido necesarias para la simulación en CosmosMotion se presentan en la siguiente Tabla 6.1. Los valores de estas características que se han utilizado tanto para el aluminio como para el caucho son los disponibles en las librerías de materiales del programa de simulación. Sin embargo, para las características del PPS por no hallarse en los ficheros de materiales del programa se han tenido en cuenta los datos proporcionados por fabricantes comerciales en [84].

CARACTERÍSTICAS DE MATERIALES				
Materiales	Módulo de Young o Módulo de Elasticidad E (N/m ²)	Ratio Poisson ⁶ (adimensional)	Densidad (kg/m ³)	Tensión Máxima (Punto 2 Figura 6.1) (N/m ²)
Sulfuro de Polifenileno (PPS)	3.44700E+09	0.15	1.35000E+03	9.30800E+07
Aluminio 7075	7.20000E+10	0.33	2.80000E+03	5.05000E+08
Caucho-Goma	6.10000E+06	0.49	1.00000E+03	9.23737E+06

Tabla 6.1.- Características mecánicas de los materiales utilizados en el actuador final.

⁶ Ratio Poisson: Relación entre la deformación lateral y la correspondiente deformación longitudinal, en un cuerpo elástico sometido a un esfuerzo longitudinal.

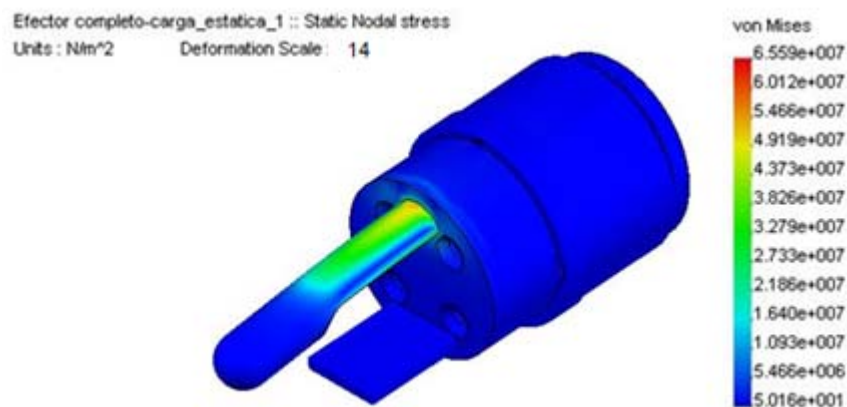
I. Cargas puntuales:

Aunque no suponían un caso real de carga, se estudió el efecto de 3 cargas puntuales para ver la reacción que provocaban en el caucho de seguridad. Los valores de estas cargas fueron: 6 kg (Figura 6.13), 3 kg (Figura 6.14) y 1 kg (Figura 6.15).

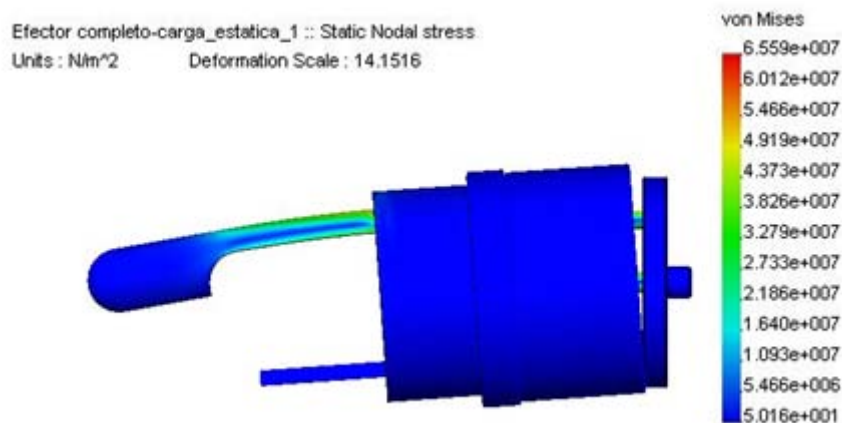
Nótese que en las siguientes Figuras 6.13, 6.14 y 6.15, al haber sido exagerado el nivel de deformación parece haber un contacto, incluso atravesamiento por parte de la base en el contenedor del caucho. Un análisis de resultados sobre la deformación sin escala, Figura 6.16, demostró que esto no era así.

Así pues, sobre estas simulaciones surgió una conclusión ineludible: si no se rebajaba el reborde del contenedor de caucho, el montaje no tenía la utilidad esperada. Esto es así debido a que habría un contacto deformacional entre el contenedor y la base que afectaría a la transmisión de esfuerzo en los tornillos, es decir, que no sólo la tornillería transmitiría el esfuerzo, sino que además lo haría la cubierta de PPS de la pieza de caucho. Por la naturaleza misma de funcionamiento del actuador, se creyó preciso advertir que un correcto funcionamiento sólo tendría lugar en caso de que fuera **el caucho** y sólo el caucho el que **tuviera contacto directo** con la base **además de la tornillería**. Se presentaron así dos opciones:

- Reducir el reborde del contenedor para que no hubiera contacto.
- Separar mediante la tornillería el contenedor y la base, tal y como están montados los modelos de las simulaciones.

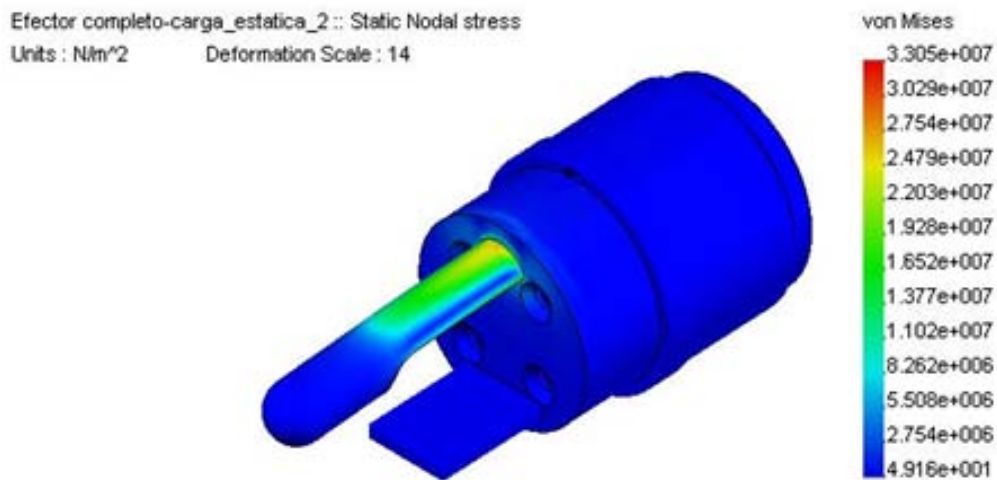


(a)

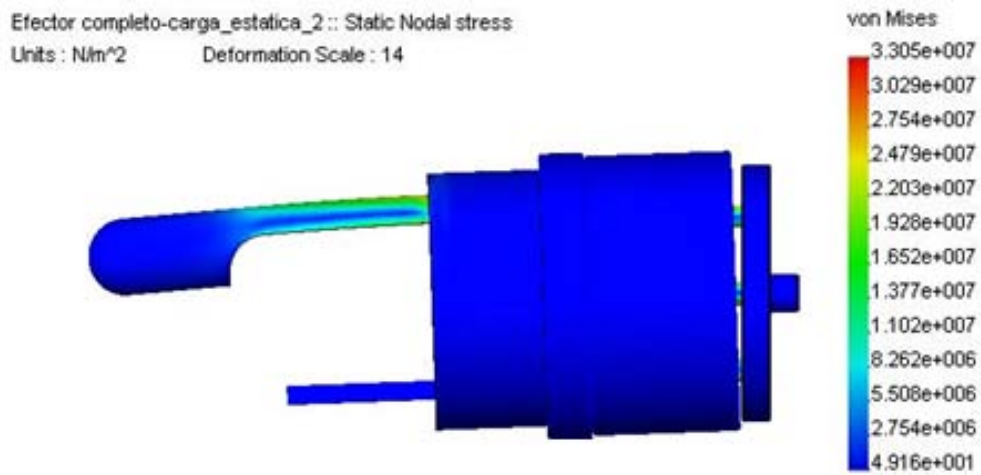


(b)

Figura 6.13.- Carga de 6 kg. Vista isométrica (a) y de perfil (b) del estado tensional que muestra la deformación resultante, esta última, con un factor de escala de 14.

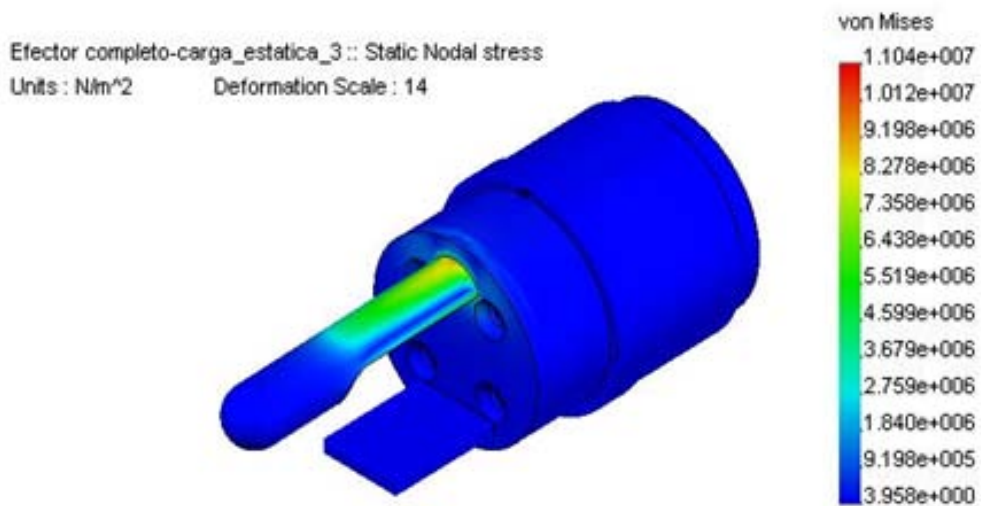


(a)

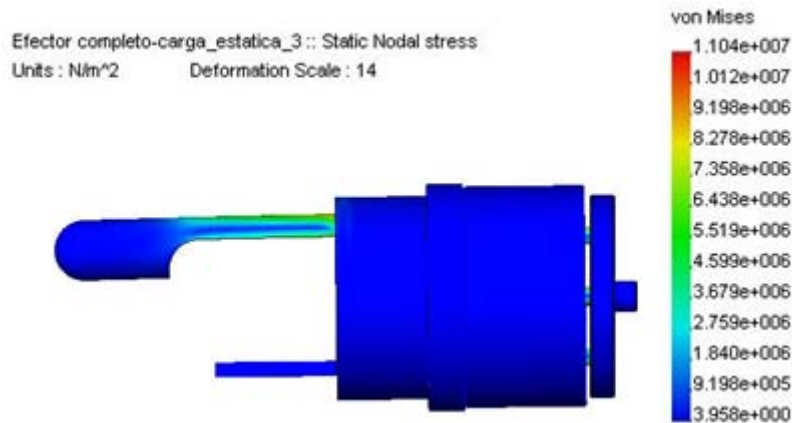


(b)

Figura 6.14.- Carga de 3 kg. Vista isométrica (a) y de perfil (b) del estado tensional que muestra la deformación resultante, esta última, con un factor de escala de 14.



(a)



(b)

Figura 6.15.- Carga de 1 kg. Vista isométrica (a) y de perfil (b) del estado tensional que muestra la deformación resultante, esta última, con un factor de escala de 14.

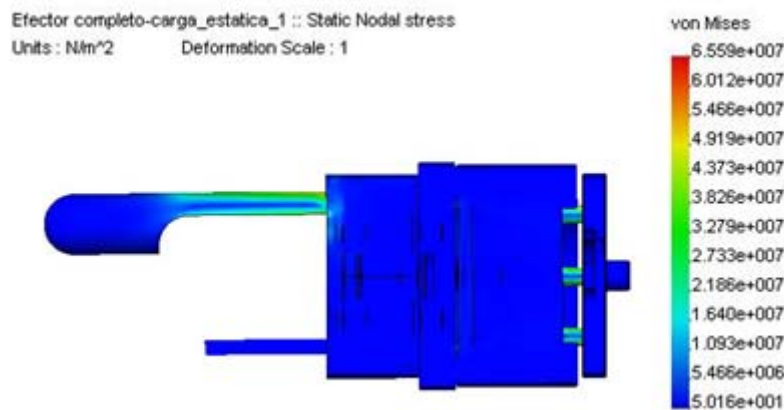


Figura 6.16.- Carga de 6 kg. Vista de sección en plano derecho del estado tensional que muestra la deformación real sin factor de escala.

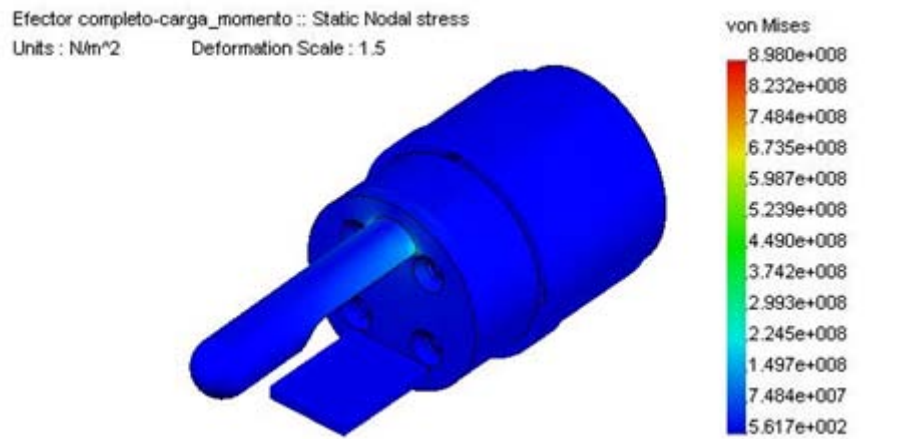
II. Cargas a momento torsor:

Cabe recordar, que dado que el actuador será usado para realizar la tarea de abrir un pomo de una puerta, el momento torsor es la carga a la que mejor respuesta debe ofrecer. Se simularon cargas de 20 N·m (Figura 6.17), 10 N·m (Figura 6.18) y 5 N·m (Figura 6.19). Se recuerda que el par nominal que puede ofrecer la última articulación es de 15 N·m aproximadamente, por lo que estos tres valores de cargas elegidos para las simulaciones son representativos para extraer conclusiones sobre el diseño del actuador final.

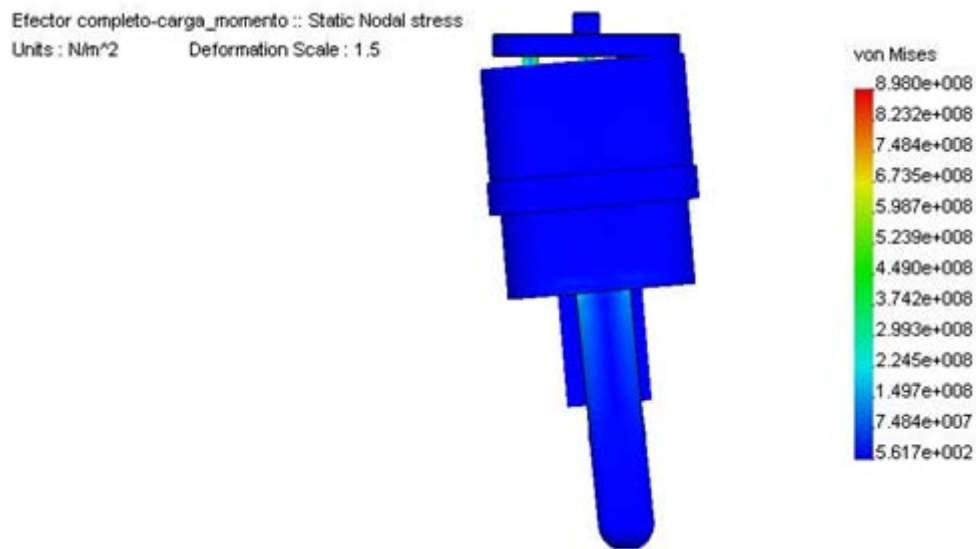
Al igual que en los casos de cargas puntuales, anteriormente simulados, sólo se aprecia una deformación importante en el caso de la carga máxima, Figura 6.20, lo cual justifica la corrección del diseño. Nótese por otro lado que en caso de carga a momento torsor, las deformaciones presentes en la estructura son mucho más pronunciadas como cabría esperar.

Por otra parte, se permite recordar lo expuesto anteriormente para el caso de simulaciones de las cargas puntuales: para un buen funcionamiento del actuador hay que evitar el contacto entre base y contenedor. Si bien en este tipo de cargas habría solamente deslizamiento, la presencia probable de cargas combinadas hacía tener en

cuenta este efecto. En cualquier caso, la simulación presentada demuestra que existirá un acercamiento entre ambas superficies lo cual justificaba la conclusión anterior más si cabe.

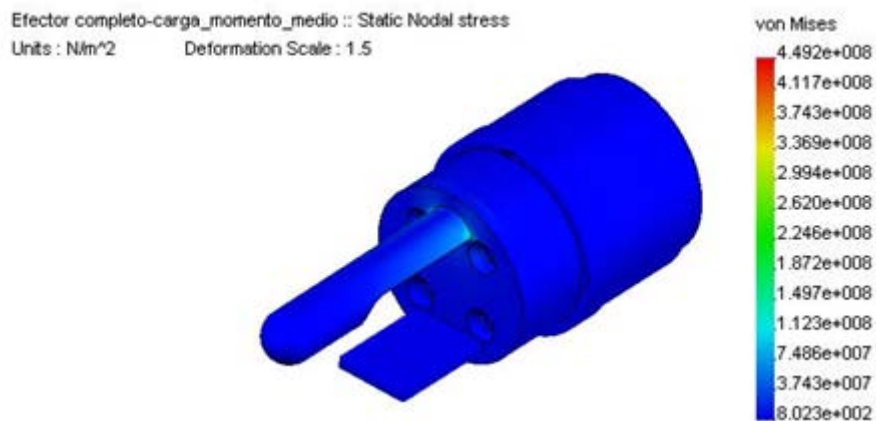


(a)

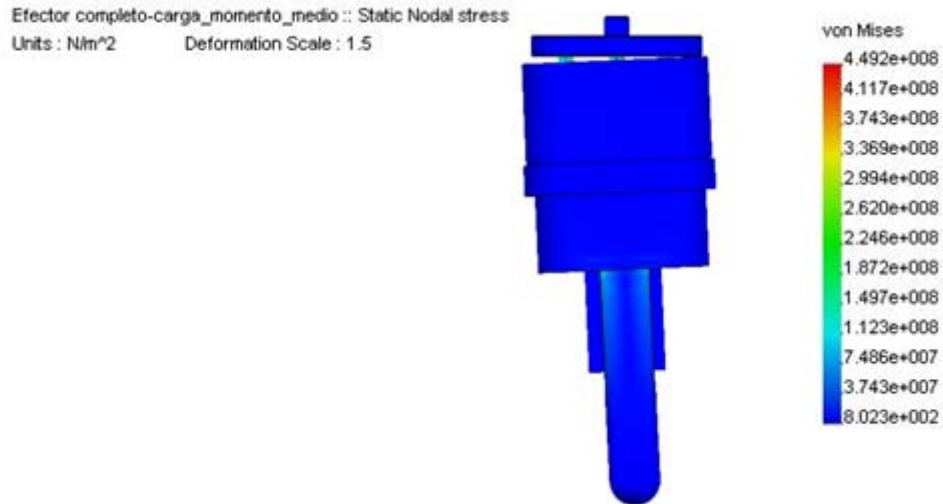


(b)

Figura 6.17.- Carga de 20 N.m. Vista isométrica (a) y cenital (b) del estado tensional que muestra la deformación resultante, esta última, con un factor de escala de 1.5.

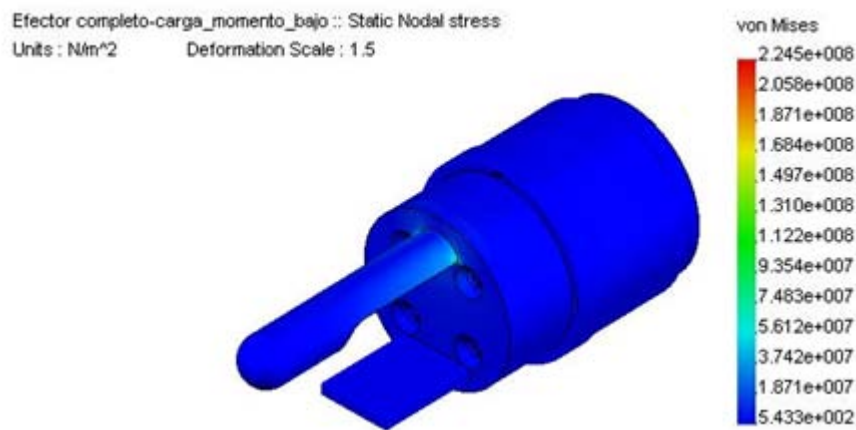


(a)

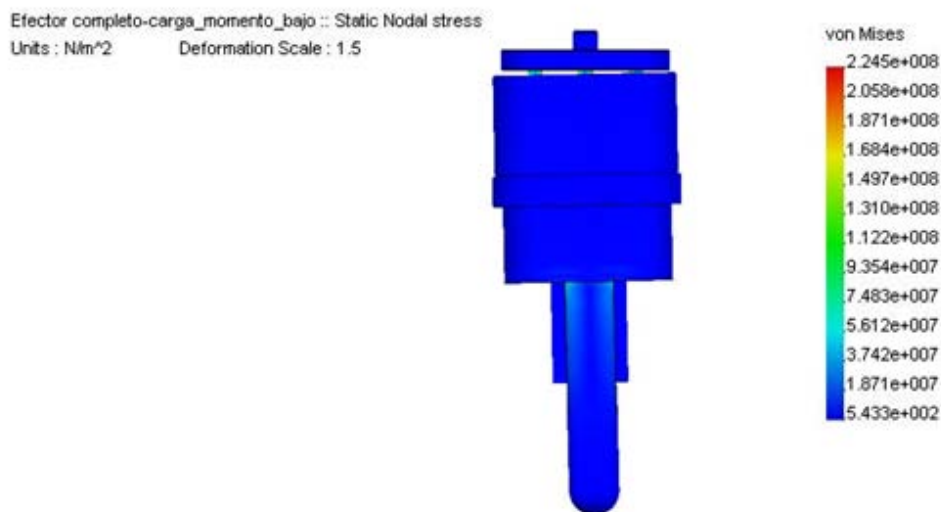


(b)

Figura 6.18.- Carga de 10 N.m. Vista isométrica (a) y cenital (b) del estado tensional que muestra la deformación resultante, esta última, con un factor de escala de 1.5.



(a)



(b)

Figura 6.19.- Carga de 5 N.m. Vista isométrica (a) y cenital (b) del estado tensional que muestra la deformación resultante, esta última, con un factor de escala de 1.5.

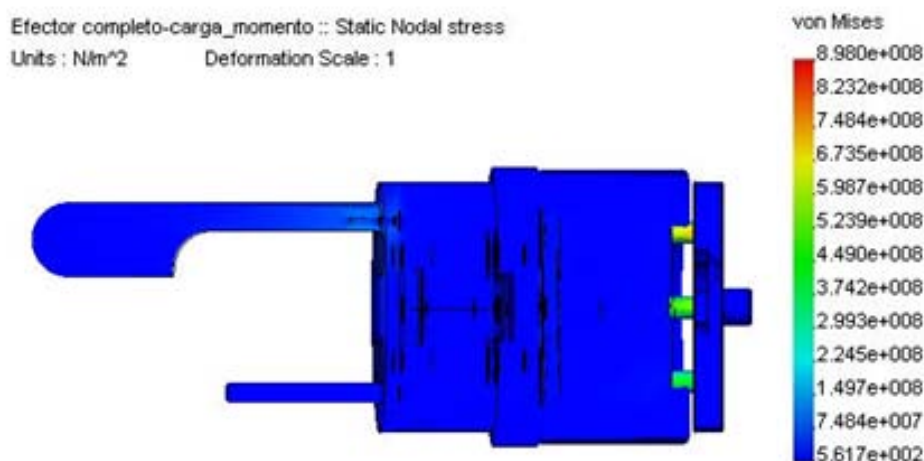


Figura 6.20.- Carga de 20 N.m. Vista en sección del estado tensional que muestra la deformación real sin factor de escala.

6.4. Análisis dinámico

Con el análisis estático hemos estudiado los esfuerzos máximos que aparecen en algunas piezas consecuencia de posiciones críticas del manipulador, como puede ser la del brazo extendido sobre la horizontal. Con ello podemos estudiar si los materiales estructurales cumplen las especificaciones más básicas. Sin embargo, es necesario también realizar un análisis dinámico del mecanismo, puesto que la finalidad principal del manipulador, no es sólo transportar o sostener cargas, sino que deberá realizar determinadas tareas con eficiencia y cumplir con unas características cinemáticas muy restringidas.

Por lo tanto, el interés del estudio dinámico reside en estudiar el comportamiento del manipulador considerando los esfuerzos de inercia, que aparecen como consecuencia de los movimientos acelerados de los eslabones. Un ejemplo es el caso de la apertura de una puerta mediante la manipulación del pomo. Durante el movimiento, será crítica la aceleración de los eslabones, así como la precisión con la que se acerque el extremo de la cadena al punto de destino. Estos esfuerzos dependen, no sólo de las aceleraciones lineales y angulares de cada uno de los eslabones, sino que además, depende fuertemente de la masa y geometría del eslabón.

6.4.1. Planteamiento de los análisis

Para el estudio del análisis dinámico se definen diferentes trayectorias que el manipulador va a realizar de manera típica. En primer lugar se analizan dos trayectorias genéricas del manipulador. Estos movimientos se han utilizado por considerarse como los más críticos para el sistema que se estudia. Se corresponden con el movimiento de las dos primeras articulaciones (1 y 2, ver Figura 6.2). En segundo lugar, se realiza el análisis dinámico de una trayectoria determinada con el manipulador como es la apertura de una puerta. Por tanto, las trayectorias que se consideran en este apartado son:

1. Trayectorias genéricas:

- 1.1. **Elevación lateral del brazo:** En esta trayectoria el movimiento lo realiza la articulación 2, con carga en la pinza. De esta manera, la articulación 2 realiza una rotación de 0° a 90° , Figura 6.21.

- 1.2. **Elevación frontal del brazo:** movimiento de la articulación 1 con carga en la pinza. La articulación 1 realiza una rotación de 0° a 90° , Figura 6.22.
2. **Trayectoria determinada: Apertura de una puerta.**

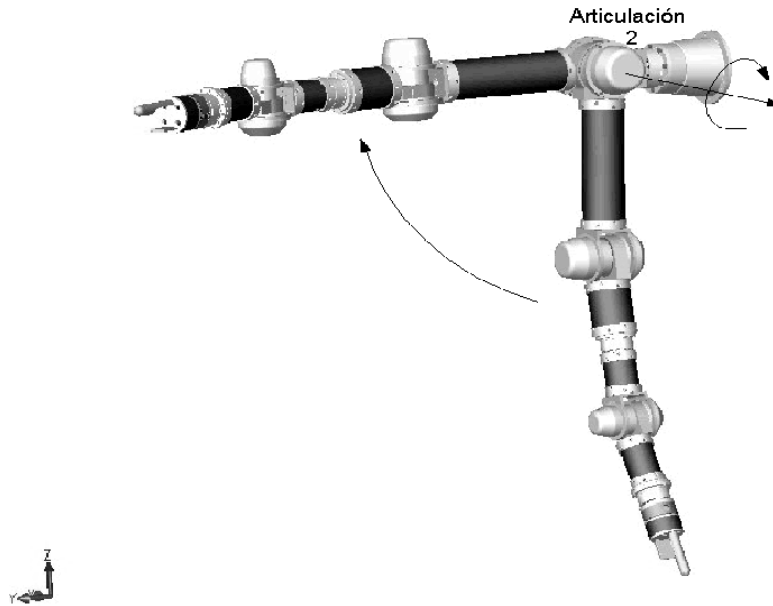


Figura 6.21.- Representación de la trayectoria 1 de elevación lateral del brazo.

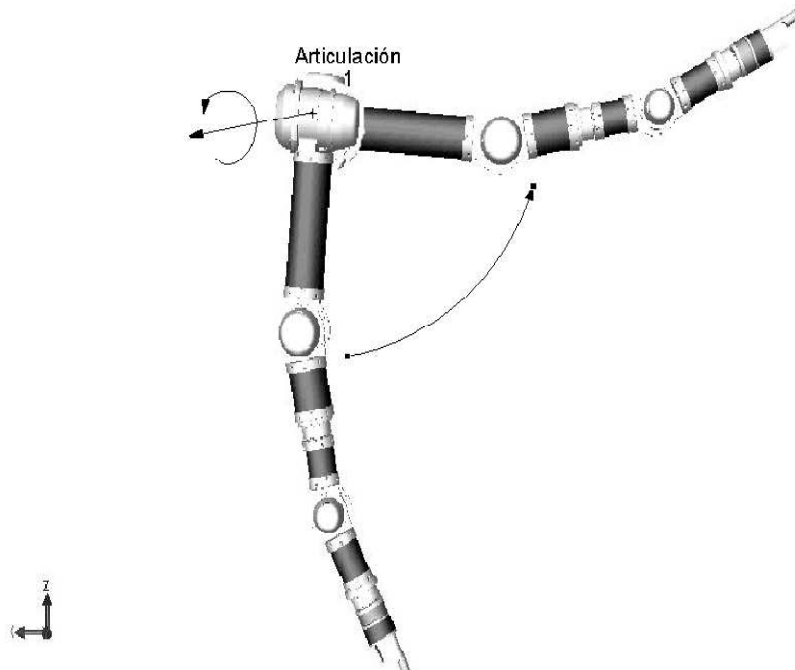


Figura 6.22.- Representación de la trayectoria 2 de elevación frontal del brazo.

6.4.2. Trayectorias genéricas

Estas trayectorias se consideran críticas y a la vez sencillas, puesto que se realiza únicamente con el movimiento de una articulación, que sufre los esfuerzos de todos los eslabones. Consistirá en modificar el valor de diferentes parámetros para analizar su comportamiento ante diferentes situaciones. Primero se varía la velocidad de giro de cada articulación, para comprobar la influencia de ésta. En segundo lugar se varía en

cada trayectoria la carga transportada por el brazo durante el movimiento. Por último se comparan los valores obtenidos en las trayectorias 1 y 2, para comprobar cuál de las dos es más peligrosa para el sistema.

a) Trayectoria 1: Elevación lateral del brazo

La articulación 2 se mueve hasta alcanzar la horizontal, Figura 6.21. Es decir, la articulación 2 realiza un movimiento angular a velocidad constante de 0° a 90° . Para esta trayectoria se han realizado las dos simulaciones siguientes:

I. Estudio sin carga con variación de velocidad

Se realizó la simulación del movimiento de la trayectoria 1 sin carga en el extremo y variando la velocidad de $5^\circ/\text{seg}$ a $40^\circ/\text{seg}$. En las Figuras 6.23 y 6.24 se representan las fuerzas y momentos de reacción sobre la articulación 2 al realizar el movimiento descrito en la trayectoria 1 para una velocidad constante de $15^\circ/\text{seg}$. El resto de resultados obtenidos para las distintas velocidades, presentan la misma forma, no así sus valores máximos de par como se presenta en la Figura 6.25, en la que se representa los valores máximos de par en función de las distintas velocidades de prueba.

Se ha comprobado también en todos los experimentos, que la variación de la fuerza resultante de reacción en las articulaciones estudiadas no depende de la velocidad del movimiento. En este caso, los valores máximos de fuerza de reacción se encuentran en torno a los 38N. En el estudio se han considerado reacciones debidas sólo a la velocidad del movimiento, no se incluyen en estos análisis los efectos derivados de las vibraciones que se pudieran producir como consecuencia de la parada de la articulación, que probablemente tengan un efecto mucho mayor sobre la estructura del robot, que el aquí analizado.

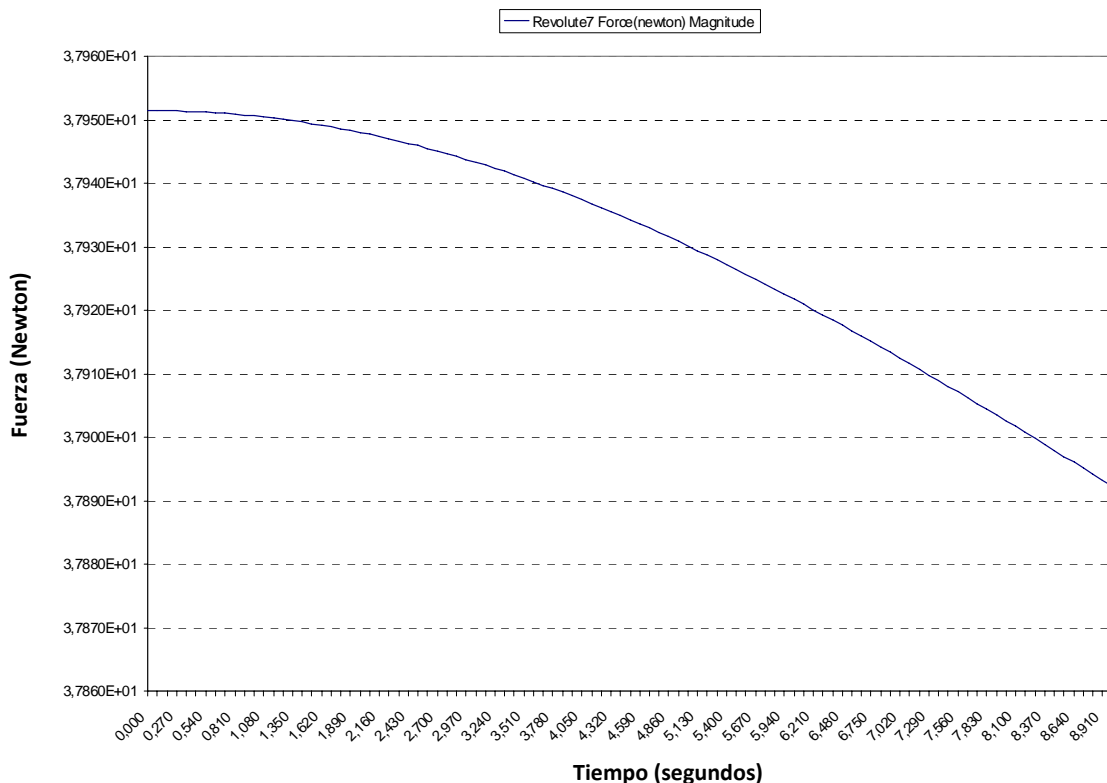


Figura 6.23.- Fuerza de reacción en la articulación 2 sin carga y a velocidad constante de $15^\circ/\text{seg}$.

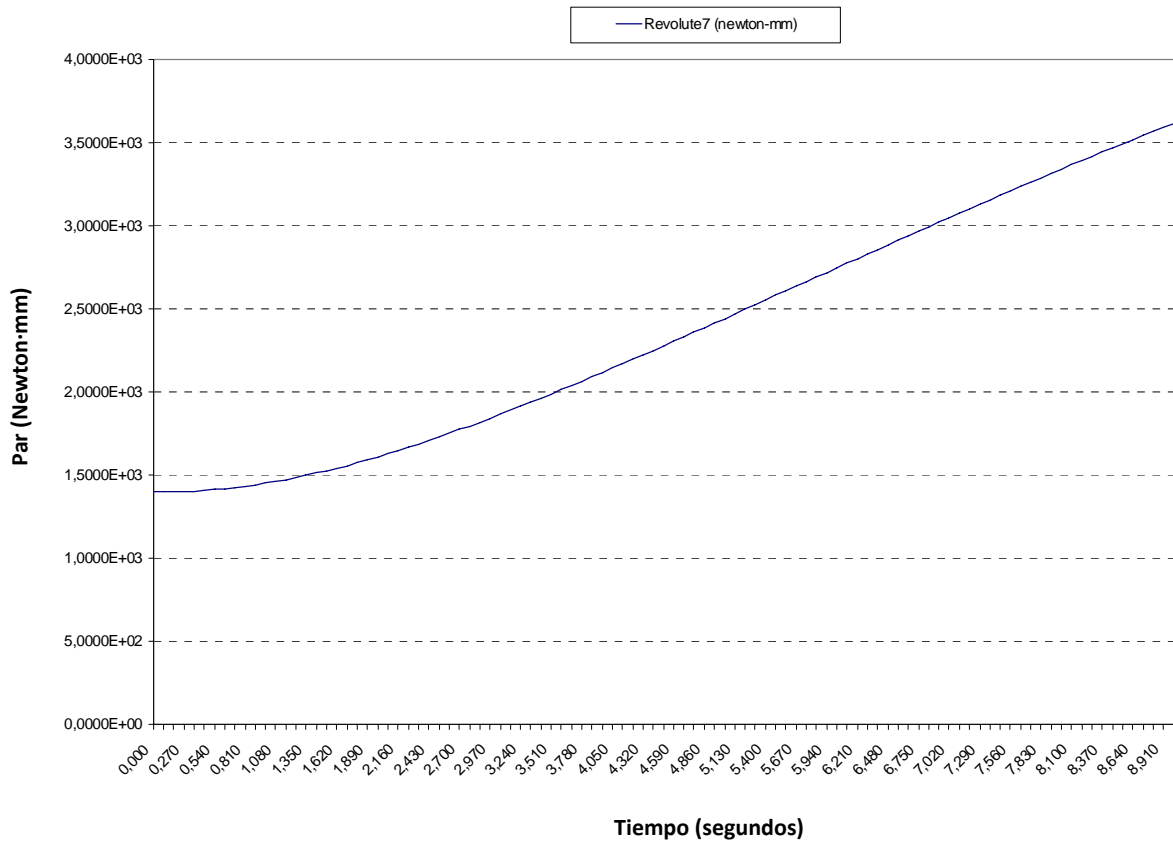


Figura 6.24.- Par de reacción en articulación 2 sin carga y a velocidad constante de 15°/seg.

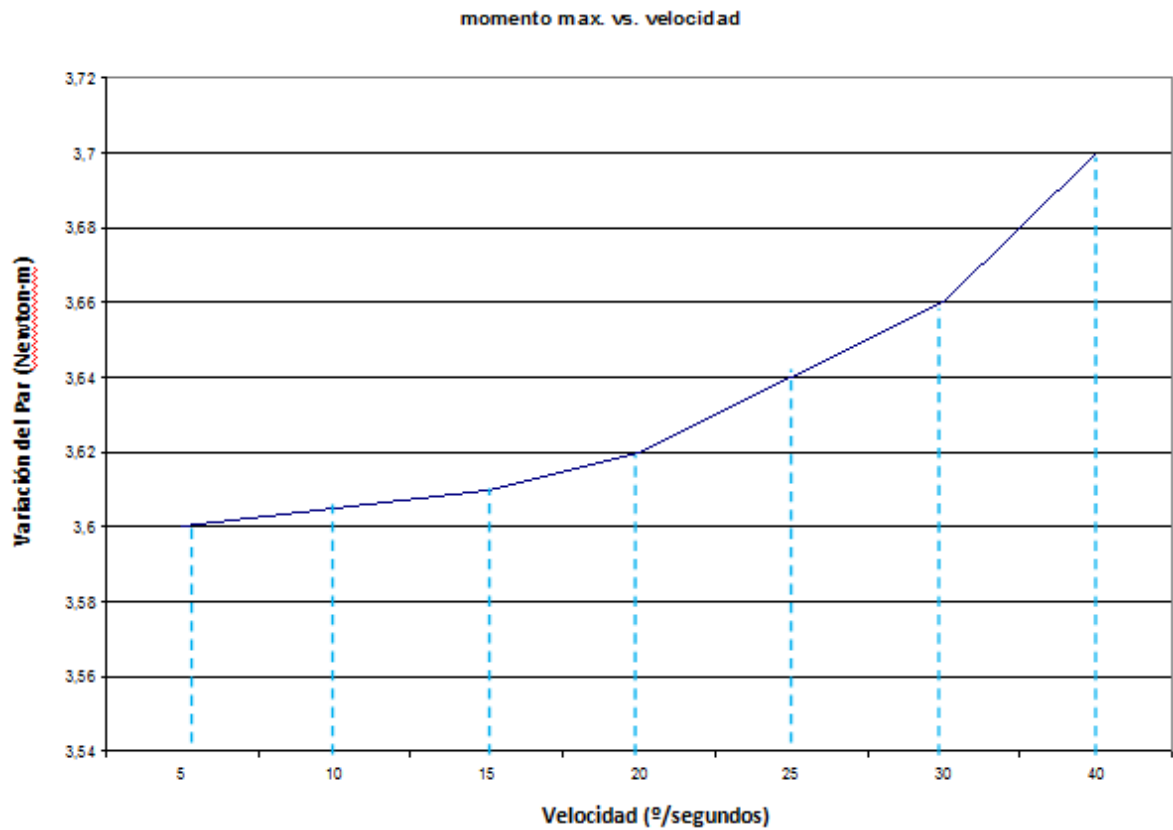


Figura 6.25.- Variación del par de reacción en la articulación 2 sin carga para diferentes velocidades de movimiento.

II. Estudio con carga de 55N y con variación de velocidad

En este caso se utilizó el mismo rango de velocidades pero se le añade carga en el extremo. En las Figuras 6.26 y 6.27 se representan las fuerzas y pares de reacción para una velocidad de 15°/seg.

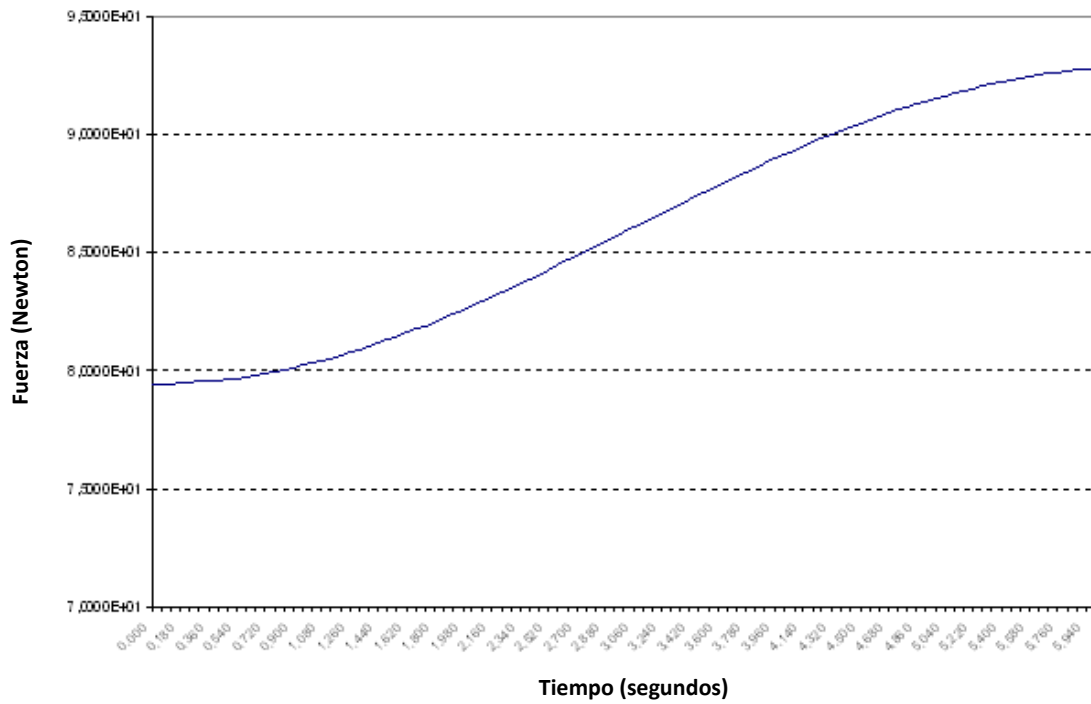


Figura 6.26.- Fuerza de reacción en la articulación 2 con carga de 55N y a velocidad constante de 15°/seg.

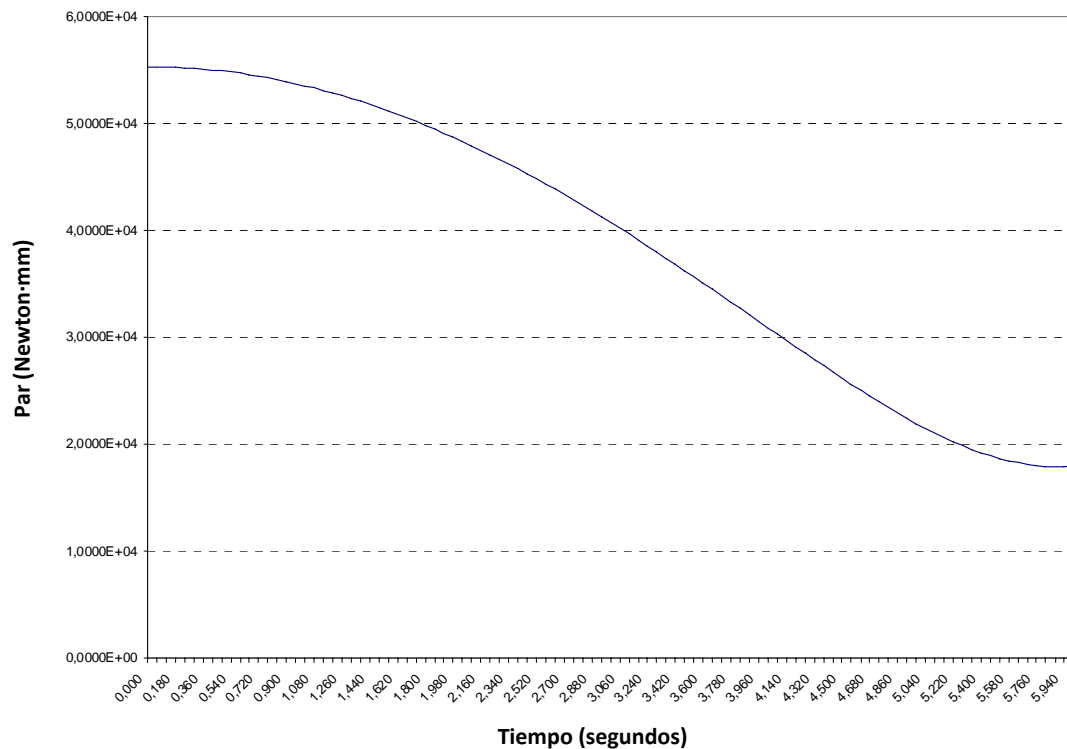


Figura 6.27.- Par de reacción en la articulación 2 con carga de 55N y velocidad constante de 15°/seg.

Por otra parte, las fuerzas máximas de reacción siguen siendo independientes de la velocidad del movimiento de la trayectoria y tienen un valor próximo a 92 N. Los pares máximos en función de la velocidad se presentan en la Figura 6.28.

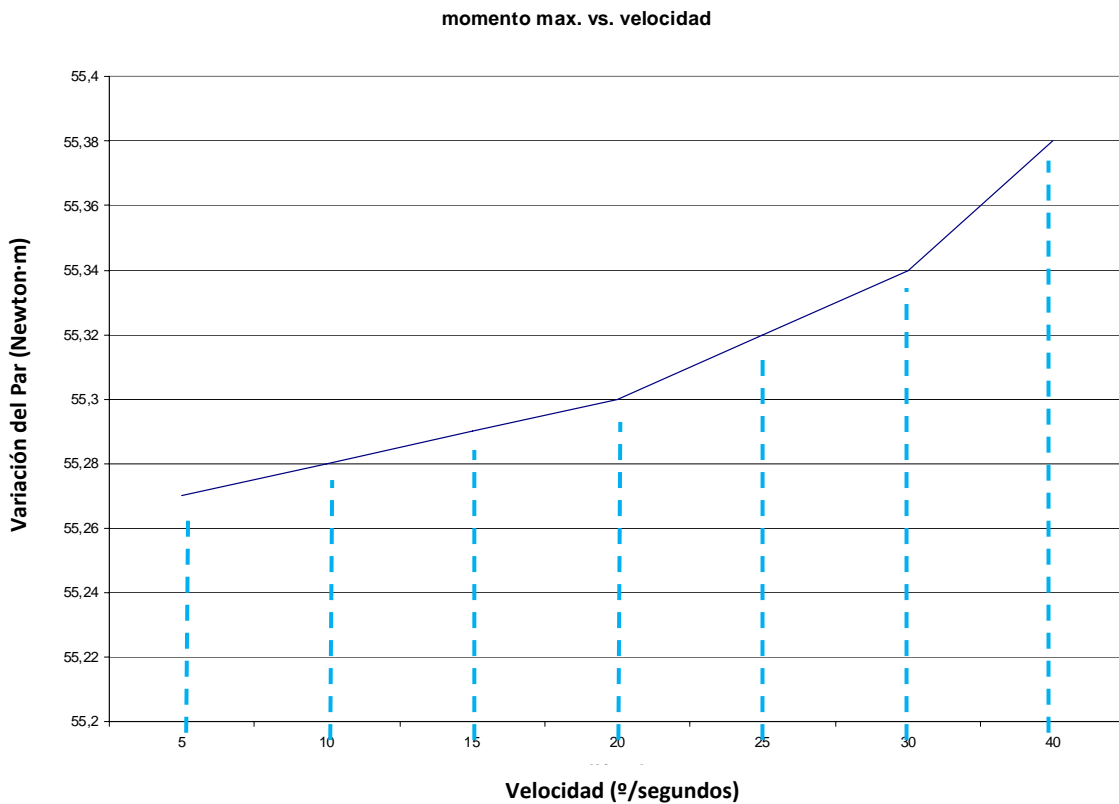


Figura 6.28.- Variación del par de reacción en la articulación 2 con carga de 55N para diferentes velocidades de movimiento.

En la Figura 6.29 se presenta una gráfica de la fuerza de reacción en función de la carga aplicada en el elemento terminal. Como se puede observar, existe una relación lineal entre la fuerza y la carga aplicada en el extremo. Cada incremento de 10N de carga aplicada provoca aproximadamente unos 10N de aumento en la fuerza de reacción registrada en la articulación 2. Esto en parte se puede explicar porque este programa no tiene en cuenta sólidos flexibles, y entonces se transmitiría la carga plenamente a la articulación, sin pérdida de energía en los elementos intermedios. En la Tabla 6.2 Aquí se muestran los valores de fuerza y pares máximos de reacción registrados:

Carga (N)	Fuerza máx. (N)	Par máx. (N.m)
15	46,68	40,66
25	55,48	40,8
35	65,12	50,13
45	74,8	60,1
55	84,65	70,17

Tabla 6.2.- Valores máximos de fuerza y par de reacción registrado en la articulación 2 en función de la carga.

En la Figura 6.30 se presenta la gráfica del par de reacción máximo en función de los valores de carga simulados, en este caso se puede apreciar un efecto muy similar al caso anterior, Figura 6.29, que lógicamente tendrá las mismas causas.

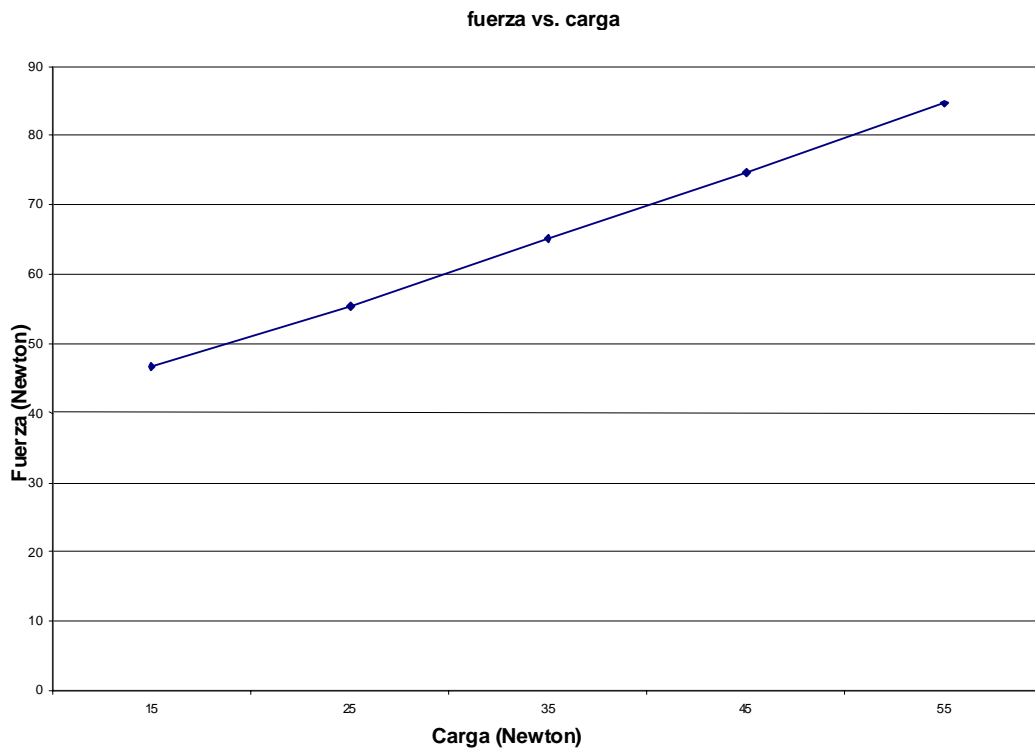


Figura 6.29.- Fuerzas de reacción en la articulación 2 para diferentes valores de carga.

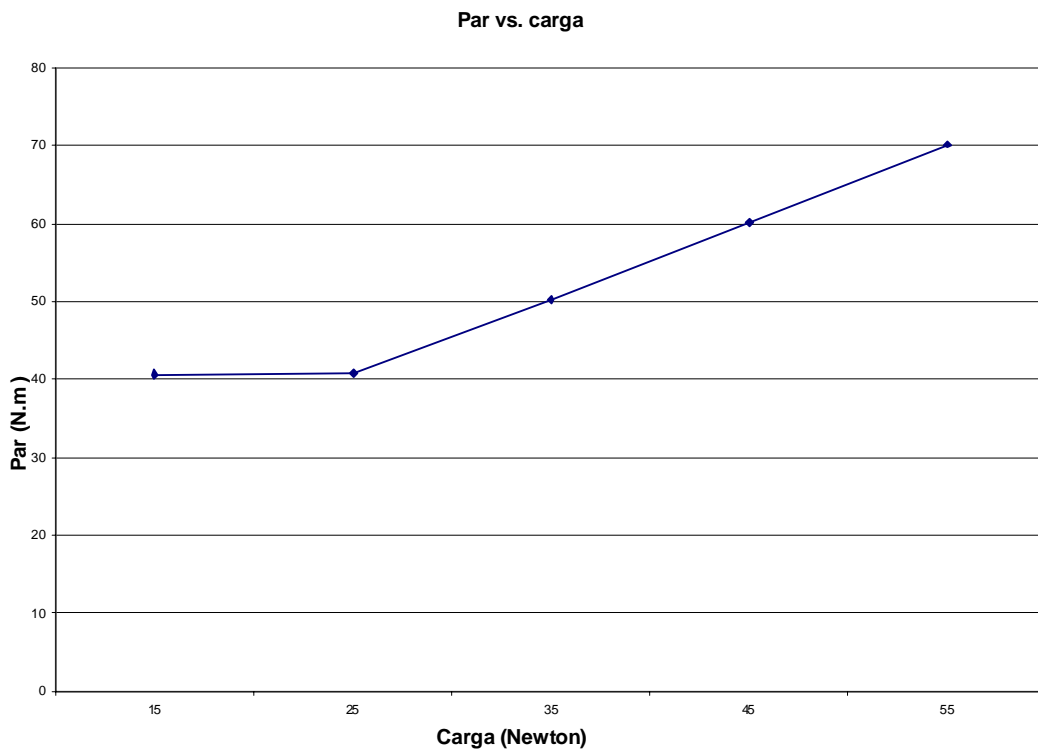


Figura 6.30.- Momento de reacción en la articulación 2 para diferentes valores de carga.

Los resultados obtenidos anteriormente para las fuerzas y momentos de reacción en función de la velocidad por un lado y en función de la carga por el otro muestran, como se ha comentado, una relación cuasi-lineal. Esto hacen pensar que la herramienta de simulación CosmosMotion, va calculando en cada punto las reacciones y velocidades de los cuerpos que intervienen en el movimiento sin tener en cuenta efectos derivados de la posición anterior, como pudiera ser la inercia. No obstante en la simulación de la trayectoria 2 se comprobará si ocurre el mismo fenómeno.

b) Trayectoria 2: Elevación frontal del brazo

En este caso se ensaya el movimiento de la articulación 1 hasta la horizontal. Es decir, la articulación 1 realiza un movimiento de rotación de 0° a 90° , ver Figura 6.22. Los análisis que se realizan para este experimento son idénticos al anterior:

I. Estudio sin carga y variación de la velocidad

Se realiza la simulación del movimiento de la trayectoria 2 sin carga en el extremo y variando la velocidad de $5^\circ/\text{seg}$ a $40^\circ/\text{seg}$. En las Figuras 6.31 y 6.32 se representan las fuerzas y pares de reacción en la articulación 1 para el caso de velocidad de $10^\circ/\text{seg}$.

II. Estudio con carga de 55N y variación de la velocidad

De la misma manera que en el caso anterior, en las Figuras 6.33 y 6.34 se representan las fuerzas y pares de reacción en la articulación 1 para el caso de velocidad de $10^\circ/\text{seg}$. En ambas gráficas, apreciamos que tanto el momento como la fuerza aumentan progresivamente hasta un máximo, que corresponde al punto en el que el brazo llega a la horizontal, a partir de ahí el momento comienza a disminuir su valor ya que la carga se estaría acercando cada vez más al punto de giro (se trata de una carga siempre vertical y hacia abajo, entonces el punto más alejado de la articulación y por tanto donde tenemos el momento máximo será en la horizontal). Hay que notar que las articulaciones más próximas al punto de aplicación de la carga soportarán reacciones menores, ya que la carga, al estar más cercana obliga al motor a realizar menores pares. Esto nos justifica el hecho de que la primera articulación y la segunda aguanten los esfuerzos durante su movimiento. El procedimiento de análisis es igual que los otros casos.

En la Figura 6.35 se muestra la evolución del momento máximo con respecto a la velocidad, se han simulado velocidades bajas, similares a las que se podría mover un brazo humano, ya que el robot tiene que interactuar con humanos no podremos desarrollar velocidades muy elevadas porque nos saldríamos de los parámetros de seguridad.

Como era de esperar, la reacción máxima en la articulación, aumenta con la velocidad, pero esta variación no es muy acusada. Podemos comprobar cómo la pendiente va aumentando a medida que se aumenta la velocidad del proceso. En promedio podemos decir que este aumento es de unos 0.03 N.m cada $10^\circ/\text{seg}$ de aumento de la velocidad.

Teniendo en cuenta que las velocidades que se van a alcanzar no van a ser muy superiores, salvo en simulaciones de prueba, esta variación no es muy significativa.

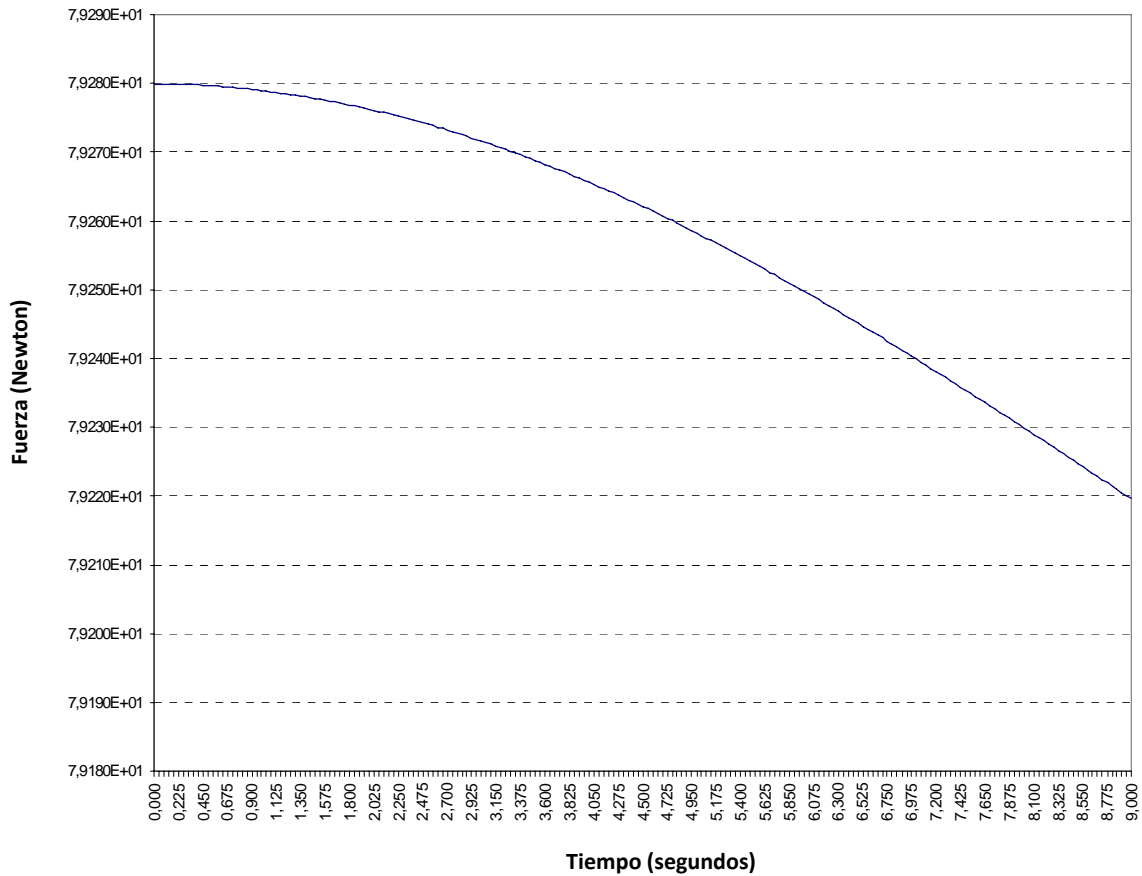


Figura 6.31.- Fuerza de reacción en la articulación 1 sin carga y velocidad constante de 10°/seg.

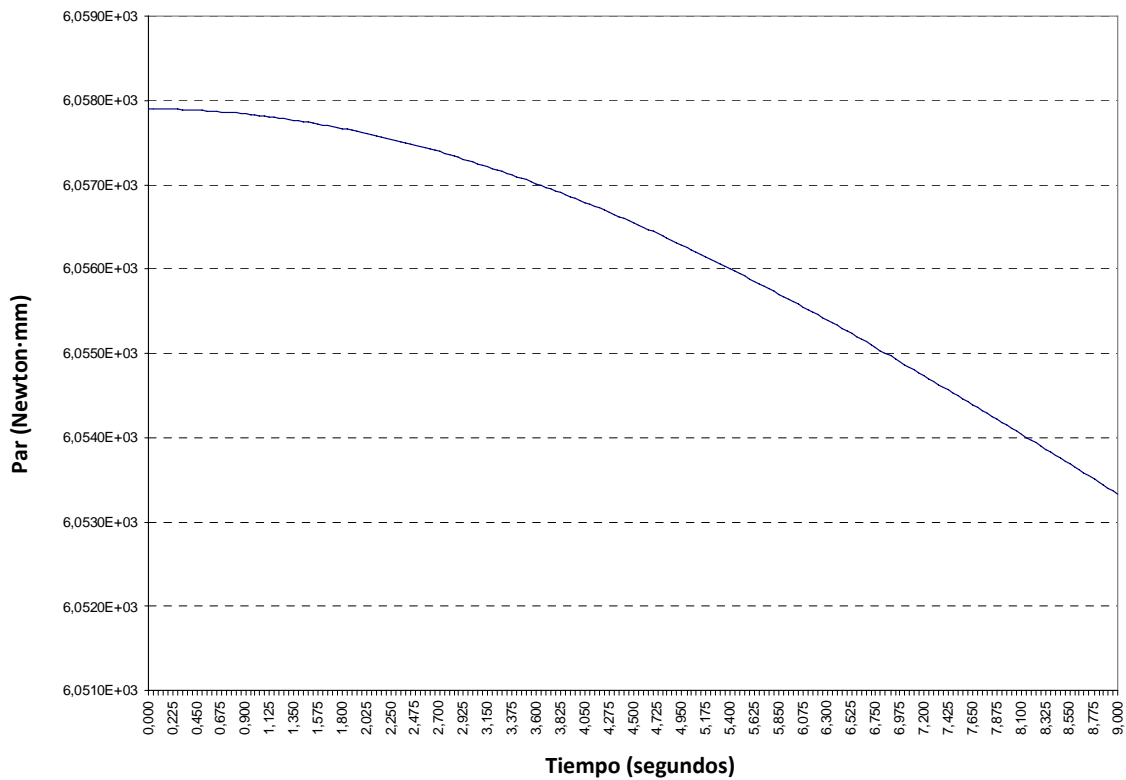


Figura 6.32.- Par de reacción en la articulación 1 sin carga y velocidad constante de 10°/seg.

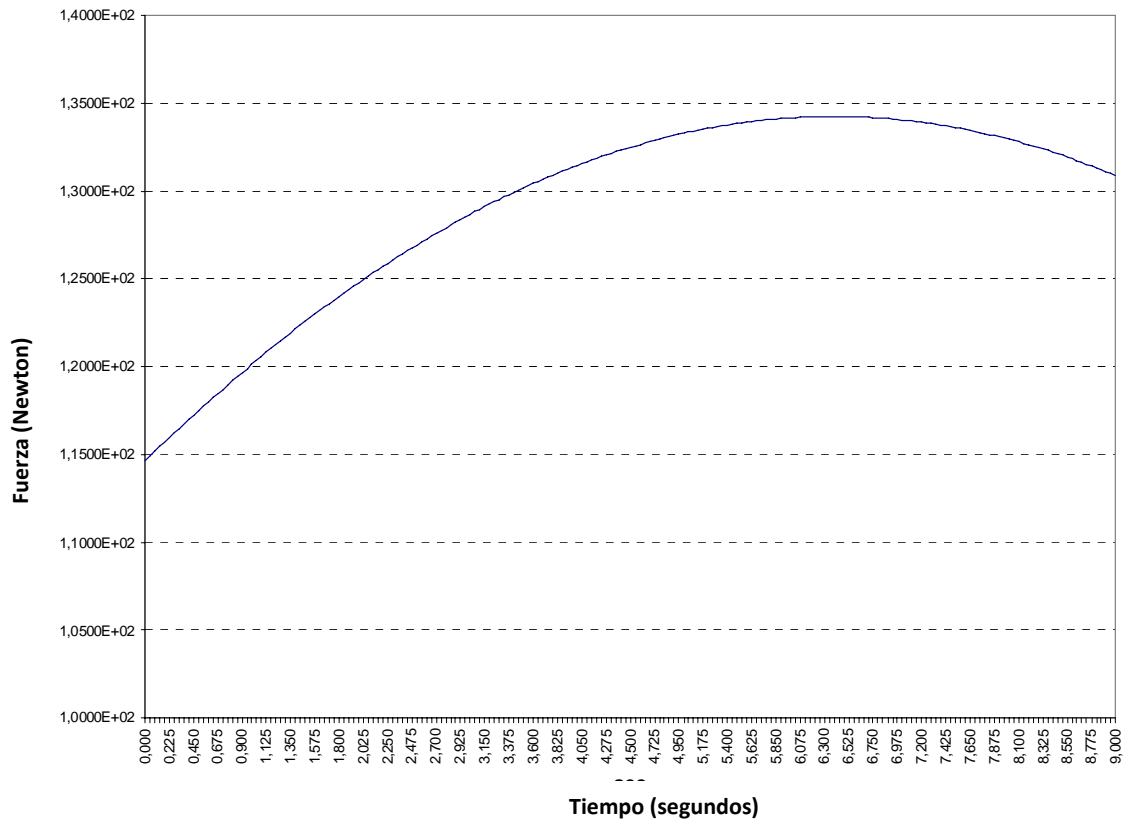


Figura 6.33.- Fuerza de reacción en la articulación 1 con carga de 55N y velocidad constante de 10°/seg.

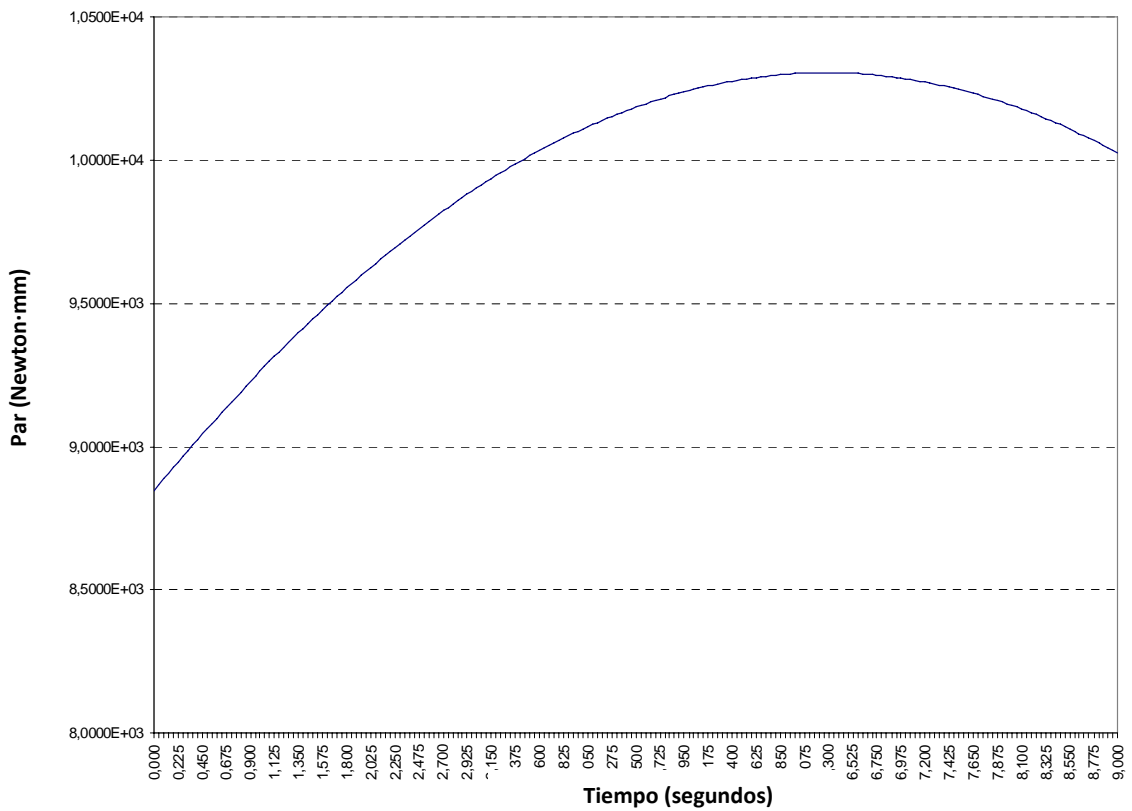


Figura 6.34.- Par de reacción en la articulación 1 con carga de 55N y velocidad constante de 10°/seg.

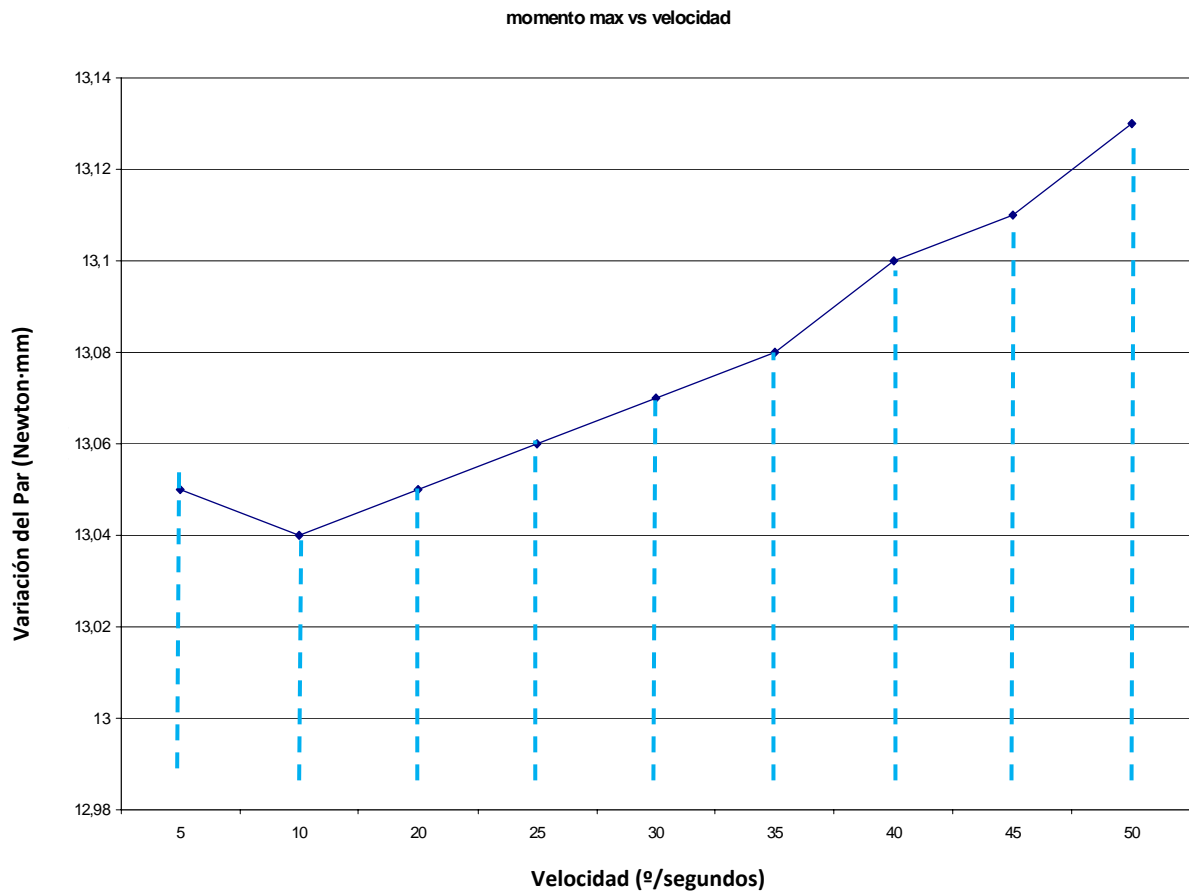


Figura 6.35.- Variación del par de reacción en la articulación 1 para diferentes velocidades de movimiento.

Las gráficas para los demás estados de carga presentan un comportamiento similar a las gráficas anteriores, pero con diferentes valores, de ahí que no se hayan incluido. Para todas ellas, al igual que en las gráficas presentadas para una carga de 55N, se produce un aumento de la reacción conforme se desarrolla el movimiento.

Las Figuras 6.36 y 6.37 muestran una comparativa de los diferentes estados de carga que fueron simulados, analizando exclusivamente los valores máximos de fuerza y par de reacción respectivamente, que se obtuvieron en cada simulación en función del valor de carga. En ambos casos, para la trayectoria simulada de elevación frontal del manipulador, también se puede apreciar una tendencia prácticamente lineal. Cada 10 N que se incrementa la carga en el actuador final se produce un aumento de la reacción de 9-10N aproximadamente.

Lo que nos hace pensar que este programa considera las articulaciones como si fueran sólido rígido, es decir para CosmosMotion, nuestros elementos no son flexibles, de ahí que encontremos esta proporcionalidad entre la carga y la reacción. (El manual de CosmosMotion nos remite al programa ADAMS si deseamos realizar simulaciones con sólidos flexibles). Para el caso del momento, Figura 6.37, podemos extraer prácticamente las mismas conclusiones que en el caso anterior.

En la Tabla 6.3 se recogen los valores de la fuerza y momento de reacción máximo registrado en la articulación 1 para cada valor de carga simulado.

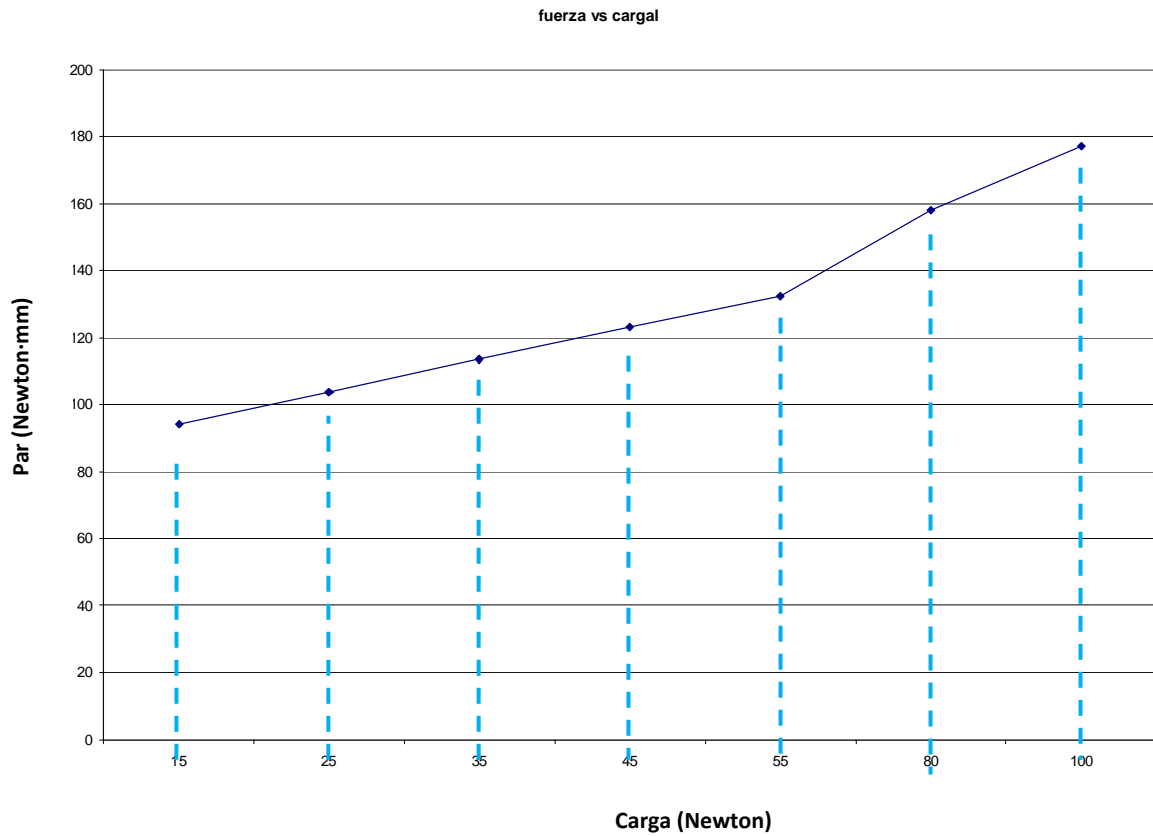


Figura 6.36.- Fuerzas de reacción en la articulación 1 para diferentes valores de carga.

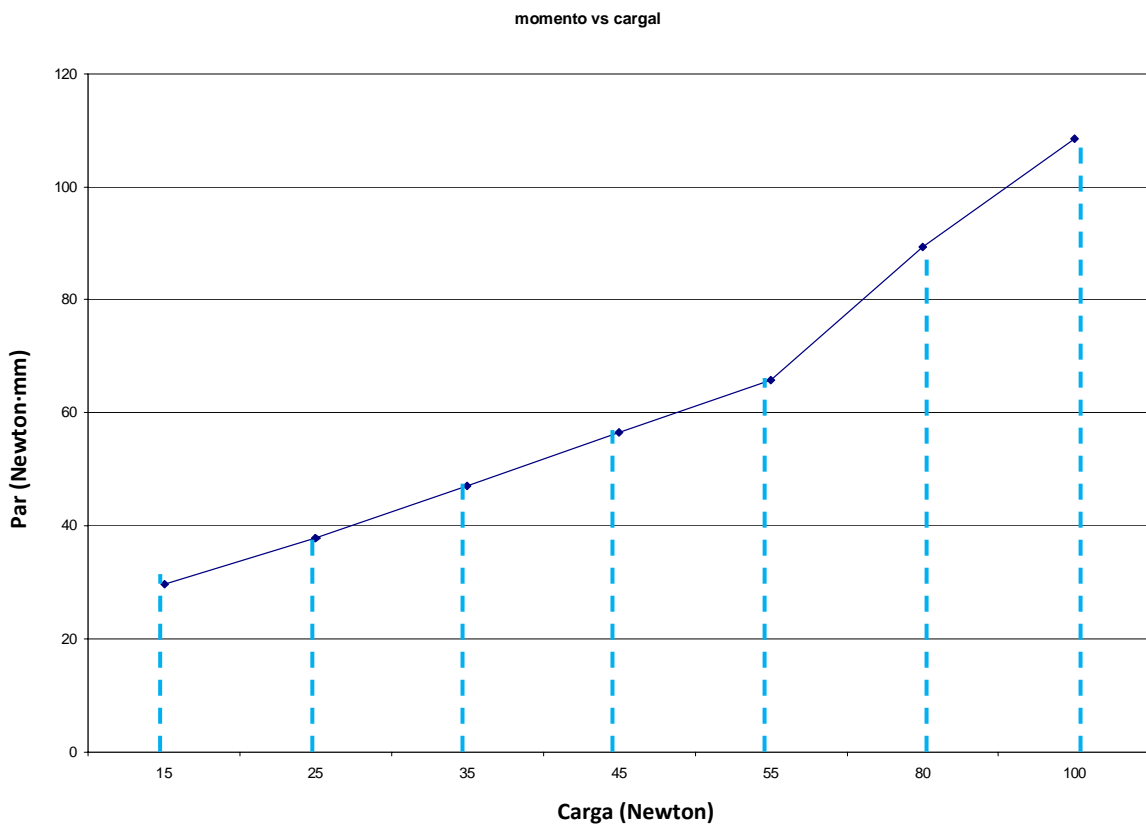


Figura 6.37.- Momento de reacción en la articulación 2 para diferentes valores de carga.

Carga (N)	Fuerza máx. (N)	Par máx. (N·m)
15	94,13	29,57
25	103,6	37,78
35	113,46	47,12
45	123,28	56,48
55	132,28	65,84
80	157,85	89,28
100	177,18	108,5

Tabla 6.3.- Valores máximos de fuerza y par de reacción registrado en la articulación 1 en función de la carga.

6.4.3. Trayectoria determinada: Apertura de una puerta

El manipulador UC3M-LWR-1 como es sabido, cuenta con seis articulaciones de rotación; por tanto será interesante evaluar aspectos dinámicos en cada una de las articulaciones para la tarea de apertura de una puerta. Veremos, por ejemplo, qué fuerzas y qué pares de reacción se originan como consecuencia de los movimientos descritos por el brazo.

Por su parte, la transmisión de fuerza se realiza mediante reducciones del tipo Harmonic drive a las cuales se encuentran acoplados motores de corriente continua del tipo DC-brushless, que presentan las características principales de una relación peso par elevada, una alta eficiencia y bajo consumo. Es por esta razón, por la que será interesante identificar qué pares se requerirán ejercer para inducir en la estructura un determinado movimiento así como la potencia consumida a tal efecto.

En el análisis cinemático presentado en el capítulo V, se estudió la influencia de la posición y de la forma de realizar la tarea sobre los diferentes perfiles de desplazamientos, velocidades y aceleraciones articulares. De la misma forma, en el estudio dinámico se incluyen determinados parámetros variables para detectar los efectos que puedan tener sobre las distintas magnitudes dinámicas analizadas. En este caso, se investigarán variaciones que se puedan producir y que tengan que ver con la fuerza o el par de reacción, el par motor necesario o la potencia consumida. Veremos cómo dependen cada una de estas cantidades de parámetros tales como:

- Posición relativa del brazo con respecto a la puerta al comienzo de la tarea.
- Forma de realizar el giro y la apertura de la puerta.
- Rigidez del muelle de torsión alojado en el mecanismo de apertura.
- Duración de la tarea, o de igual forma, podríamos referirnos en términos de velocidades articulares.

En general, analizaremos qué fenómenos aparecen en cada articulación y cuál es su tendencia durante los movimientos planeados a priori en la simulación cinemática. En todos los casos, la posición inicial y final del elemento extremo en el espacio es la misma, determinada por los movimientos de giro del pomo y apertura de la puerta.

Un punto importante a destacar es que en este modelo no han sido tenidos en cuenta diversos parámetros que no tendrían una influencia importante en los resultados obtenidos para el manipulador; implicando un costo computacional añadido, sin proporcionar una información relevante. Ejemplo de esto puede ser el efecto de rozamiento que se puede ejercer entre la puerta y el suelo, que no consideraremos ya que supondremos que son las bisagras las que soportan el peso de la puerta, y permiten su giro. No así ocurre con la fricción que aparecería en las articulaciones del brazo, a consecuencia del movimiento relativo, que sí ha sido considerado su efecto.

El criterio que se ha seguido en la presentación de los resultados se podría resumir tal y como sigue. En primer lugar, se define una simulación de referencia a efectos comparativos con el resto. Seguidamente, se analiza la evolución de diversas magnitudes dinámicas durante el movimiento del brazo realizando la tarea, presentando en cada caso, al inicio del mismo, las variables de posición y disposición articular determinadas en el análisis cinemático previo. Veremos qué fuerzas y momentos de reacción se registran durante el movimiento en las articulaciones, los pares que necesitan ser generados por los motores para realizar la trayectoria así como las potencias consumidas por los mismos. Posteriormente, se razonará la dependencia que dichas magnitudes presentan con determinados parámetros, realizando diversas simulaciones encaminadas a tal fin. Los resultados de las simulaciones, tanto en forma de gráficos comparativos como de tablas numéricas correspondientes a cada uno de estas simulaciones, se adjuntan en el Anexo VI (Anexo del análisis dinámico) donde podrán ser consultados.

6.4.3.1. Planteamiento del análisis dinámico de la simulación 1

En la simulación 1 se imponen las siguientes condiciones de contorno que determinarán la forma de realizar la tarea:

- Variables para el posicionamiento inicial de la base en la posición 1 (ver Figura 5.10):

$$n = 400 \text{ mm}$$

$$t = 510 \text{ mm}$$

- Las variables articulares que se establecen para poder alcanzar la posición y orientación deseada del actuador final dado el posicionamiento inicial de la base en la posición 1 son (ver Tabla 5.3):
 - Articulación 1: $- 33,75^\circ$
 - Articulación 2: $- 0,33^\circ$
 - Articulación 3: $- 83,15^\circ$
 - Articulación 4: $+ 0,28^\circ$
 - Articulación 5: $- 40,60^\circ$
 - Articulación 6: $+ 0,06^\circ$
- La trayectoria que se define para realizar la tarea es aquella que provoca en el giro del pomo y la apertura de la puerta los perfiles de velocidades de la Figura 6.38.
- De lo anterior se deduce que la duración total de la tarea será de siete segundos, de los cuales tres se invierten en realizar el giro del pomo y cuatro en la apertura de la puerta.

- La constante elástica del muelle de torsión que se incluye en el mecanismo de giro del pomo es:

$$K_m = 1 \text{ N/mm}$$

- Se incluyen los efectos de fricción en las articulaciones. Por su parte, no se considera rozamiento alguno entre suelo y puerta; todo el peso de la misma es soportado en las bisagras.

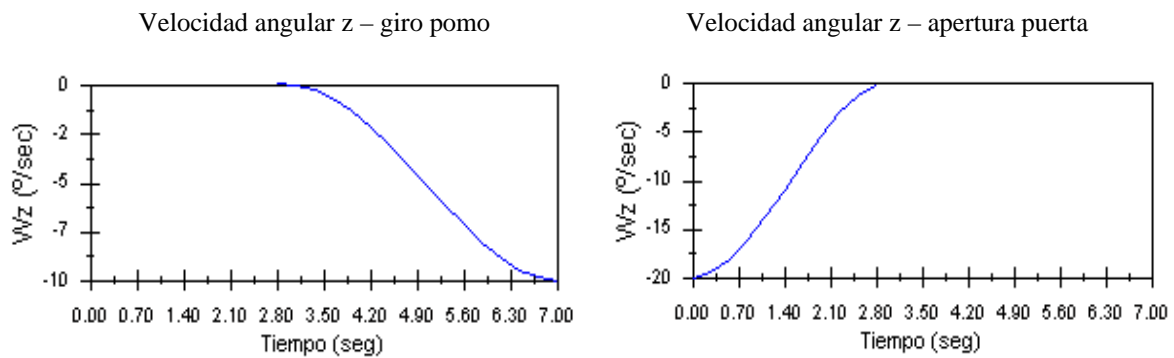


Figura 6.38.- Perfiles de velocidades del giro del pomo y de la apertura en la simulación 1.

En la Figura 6.39 se ilustra una secuencia del movimiento de apertura de una puerta descrito por el brazo según la trayectoria que se describe en la simulación 1. A diferencia del estudio cinemático que se realizó en el capítulo anterior, si analizamos los movimientos desde un punto de vista dinámico hemos de considerar en general, cualquier fuerza que lo pudiera originar. En consecuencia, cuando nuestro brazo se enfrenta a la tarea de abrir una puerta aparecen una serie de fuerzas externas que se originan fundamentalmente por la acción de los siguientes agentes:

- Las fuerzas de inercia y gravedad debidas a las masas de los elementos y sus distribuciones.
- La acción que ejerce el muelle de torsión sobre el mecanismo de giro del pomo, y como consecuencia de su manipulación por parte del elemento extremo; sobre la estructura del brazo.
- La fuerza que aparece cuando intentamos poner en movimiento una masa que inicialmente se encuentra en reposo, como es el caso de la puerta.
- El efecto de las fuerzas que aparecen como consecuencia de la fricción.

Detectar qué esfuerzos se originan en la estructura a lo largo del tiempo de simulación e intentar justificar a qué puedan ser debidos será la tarea principal a la que nos enfrentaremos en este análisis. De la misma forma, se indicarán los pares que será necesario aplicar en las articulaciones para conseguir realizar cada movimiento y la potencia que se consumirá en ello.

6.4.3.2. Evolución de la fuerza de reacción durante el movimiento

En la Figura 6.40 se presentan las gráficas de la evolución temporal de los esfuerzos que se originan en cada articulación obtenidos con la herramienta de análisis CosmosMotion.

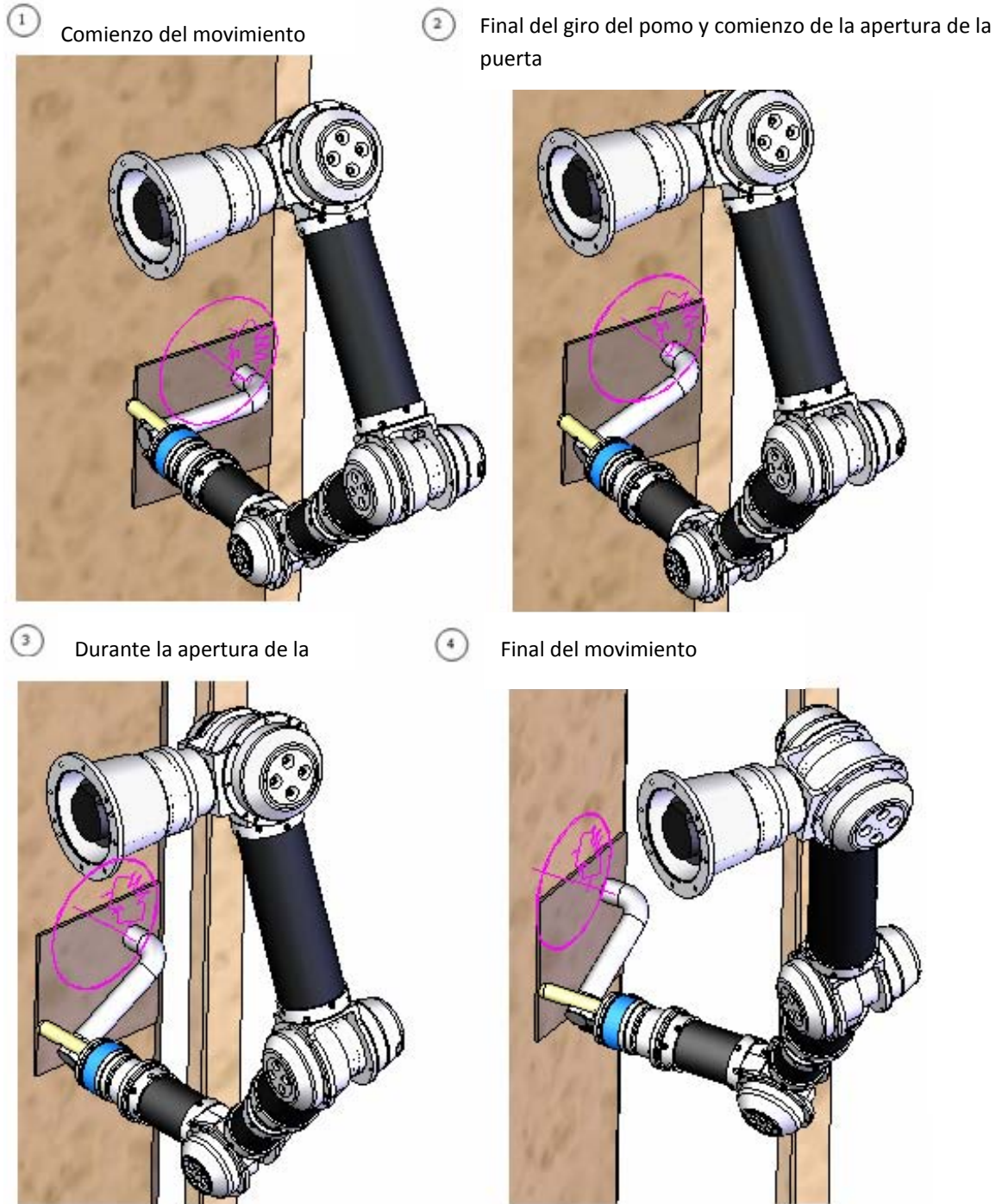
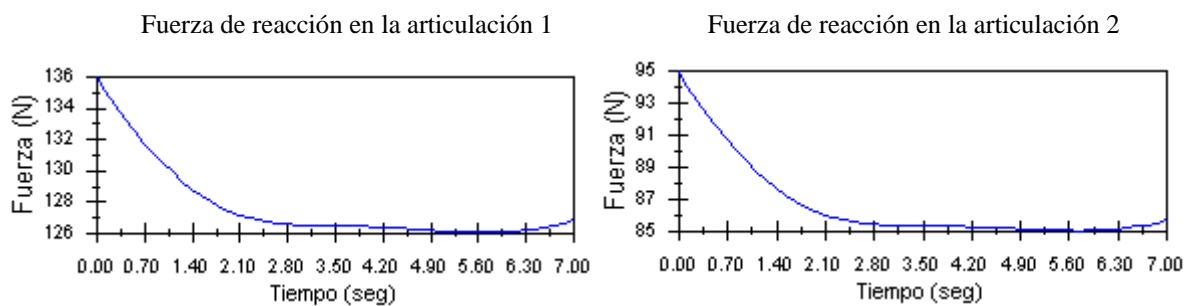


Figura 6.39.- Secuencias del movimiento simulado en la simulación 1.



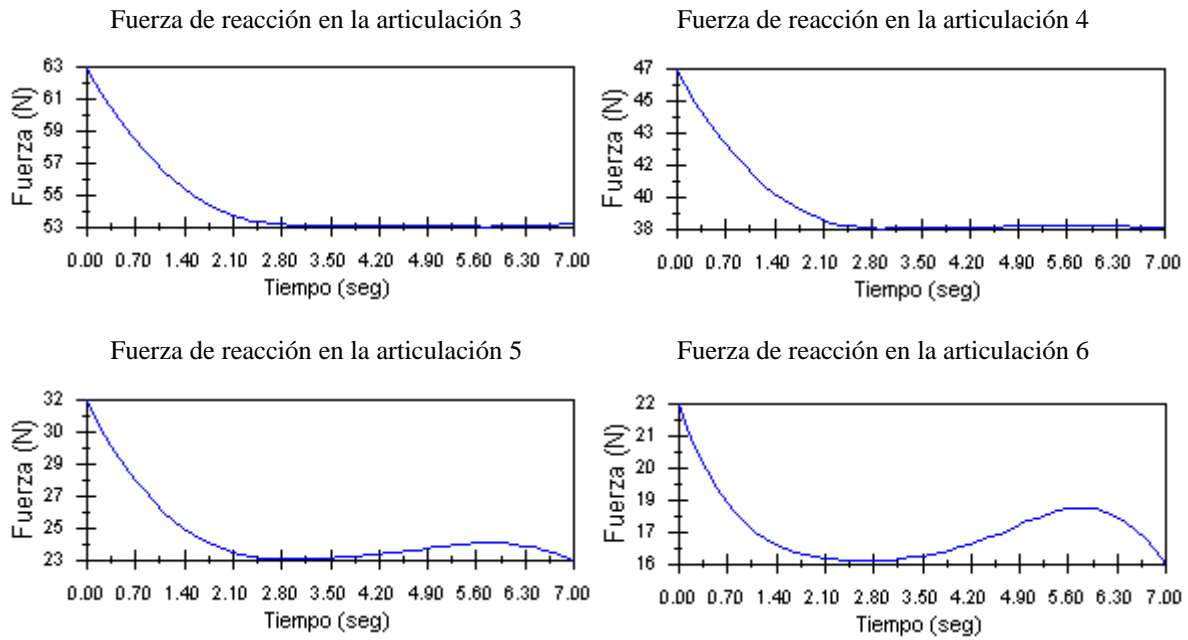


Figura 6.40.- Fuerzas de reacción que se originan en las articulaciones durante la simulación 1.

En el primer tramo de giro del pomo (hasta los 3 segundos) la tendencia general de todas las curvas es descendente. Cuando comenzamos a manipular el pomo girándolo en sentido contrario a las agujas del reloj, comienza a aparecer una fuerza $F(t)$ causada por la acción del muelle y que aumentará en función del ángulo desplazado y de la rigidez del mismo. Ésta fuerza, debido a su propia naturaleza, va incrementando su valor en función del tiempo, alcanzando su valor máximo en el instante t igual a tres segundos. Por definición, $F(t)$ se opone siempre al movimiento que la origina. Si observamos el esquema sencillo de la Figura 6.41 en el que se aprecia una barra de longitud l con un peso distribuido P , empotrada en uno de sus extremos y en el otro aplicada una fuerza $F(t)$. Resulta sencillo intuir el comportamiento que manifiesta la fuerza apuntada en cada articulación a lo largo de la simulación.

En general, la ecuación de cortantes viene dada por [6.6]:

$$Q = P(l - x) - F \quad [6.6]$$

siendo,

Q : cortante [N]

P : peso [Kg]

l : longitud barra [m]

F : fuerza debida al muelle [N]

Cuando la barra se encuentra en voladizo el cortante en el extremo B será nulo. En el momento en el que aparece una fuerza $F(t)$ en sentido contrario al peso se produce una disminución de la fuerza de reacción en el empotramiento que será tanto mayor cuanto mayor sea la fuerza $F(t)$ aplicada en el otro extremo.

Si aplicamos este mismo razonamiento simple a los resultados extraídos para nuestro manipulador ligero, resultan lógicas las curvas de fuerzas obtenidas en las

articulaciones. Hay que recordar que el brazo manipulador UC3M-LWR-1 tiene una masa de 18 Kg aproximadamente y el muelle de torsión que se aplica en este caso tiene una rigidez de 1 N/mm. Por tanto la fuerza $F(t)$ que aparece en nuestro caso es muy pequeña si la comparamos con la masa total del brazo. Nos encontramos por tanto, en el primer caso en el que la aportación debida a la masa distribuida del brazo ($P \cdot L$) supera siempre y en gran medida a la que origina el muelle $\{F(t)\}$. Es por esta razón por la que la curva de la fuerza en cada articulación disminuye con el tiempo en el giro del pomo. De la misma forma, resulta obvio que la articulación que esté sometida a más esfuerzo sea la del hombro, y descienda progresivamente hasta la última rotación.

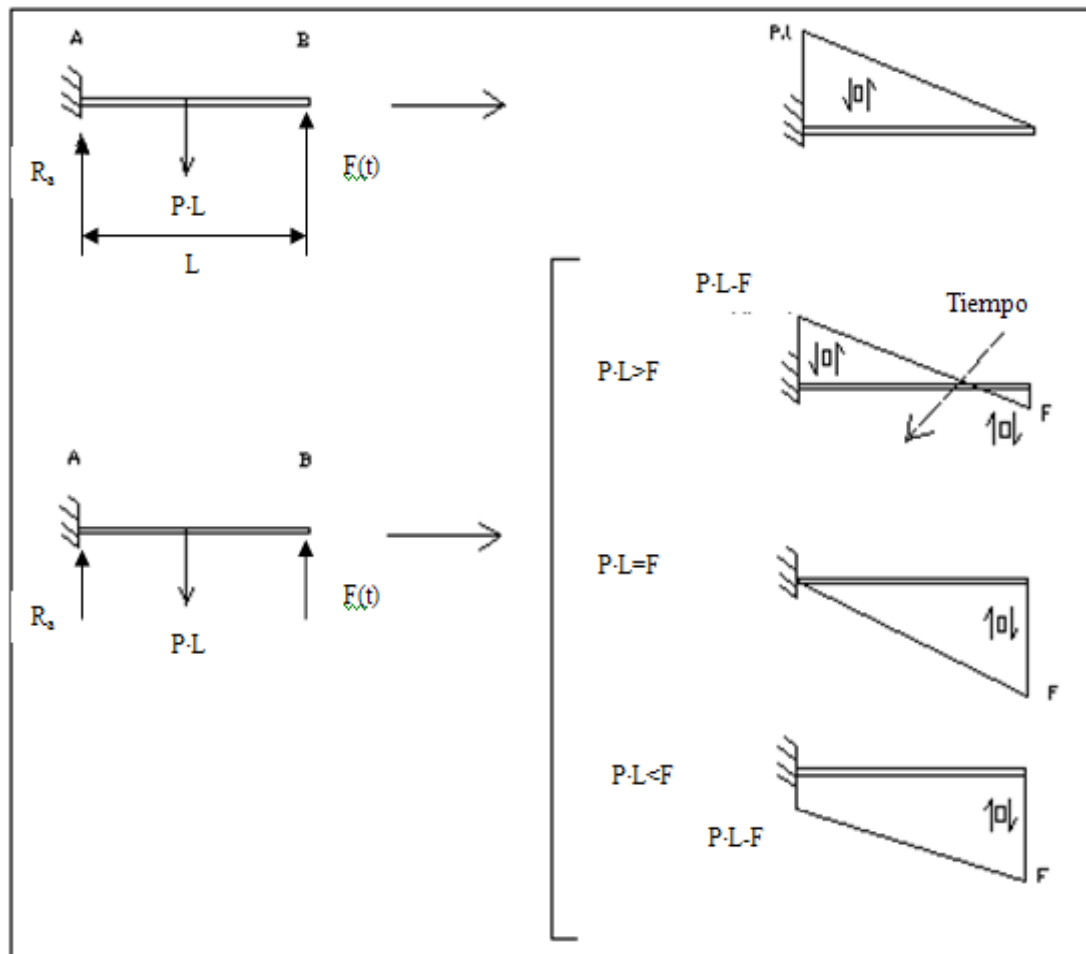


Figura 6.41.- Esquema sencillo de los cortantes sobre una barra.

Cuando comienza la apertura a los 3 segundos aparece un nuevo efecto ocasionado por la necesidad de poner en movimiento una masa que estaba inicialmente en reposo. Ello origina una fuerza que se opondrá nuevamente al movimiento y que será en todo momento en la misma dirección del eje de giro de la articulación seis (se mantiene perpendicular a la puerta en cualquier punto de su trayectoria). Notar que la influencia en el tramo de apertura de este agente externo no supone una alteración significativa en ningún caso, dado que la puerta modelo tiene una masa de 25 Kg, manteniendo una superficie de contacto muy pequeña con las bisagras en las que se apoya y con unos efectos de rozamiento muy disminuidos. Una vez que se inicia el movimiento las fuerzas que he de vencer, por definición, irán siendo todavía menores. No obstante, detectamos pequeños aumentos en la fuerza ejercida sobre todo en las articulaciones 6 y 5 y aún más pequeños en la 4, resultando inapreciables en el resto.

6.4.3.3. Evolución del momento de reacción durante el movimiento

En cuanto a los momentos registrados a lo largo del tiempo en las seis articulaciones hay que destacar el hecho de que los centros de masa no se encuentren perfectamente alineados en los ejes de cada eslabón.

Su evolución en el tiempo de simulación, como consecuencia del movimiento inducido en la estructura, la podemos ver representada en la Figura 6.42. En el giro del pomo vuelven a mostrar tendencia descendente todas las curvas registradas. En parte, estos comportamientos se explican por razones similares a las comentadas en el caso de la fuerza, ya que el muelle de torsión y las masas de los elementos provocan efectos contrarios en todas las articulaciones.

Además, durante el primer tramo del movimiento, la articulación 1 que inicialmente se encontraba formando un ángulo de $+33,75^\circ$ respecto de la horizontal (ver Tabla 5.3), comienza a desplazarse ahora en sentido negativo. Este comportamiento provoca una disminución de la distancia desde el centro de gravedad donde se supone aplicada la resultante del peso, hasta el centro de giro de la articulación 1, con la consiguiente caída de par que esto produce.

Igualmente, en todas las curvas de la Figura 6.42 persiste una zona en la que el par registrado permanece prácticamente inalterable. Este hecho coincide cuando el movimiento de giro de pomo está finalizando con valores en velocidades cercanos a cero y comienza la apertura de la puerta con velocidades angulares también muy pequeñas. Esta particular circunstancia, tiene como resultado que no se produzcan alteraciones significativas de la configuración articular del brazo y, a consecuencia de esto, tampoco en los momentos.

Cuando comienza la apertura de la puerta, aparece una fuerza perpendicular a la puerta y que se opone al movimiento, aunque su influencia es relativamente pequeña. En cualquier caso, a efectos de momentos de reacción provocados, tan sólo afectaría en las articulaciones 1, 2, 3 y 4 ya que dicha fuerza pasa por el centro de giro de la articulación 5 y 6.

En este balance de pares, los elementos que más “peso” tendrían, serían las masas implicadas y su distribución. A medida que avanzamos en el movimiento de apertura de la puerta vamos progresivamente separándonos del centro de gravedad, principalmente debido al ángulo desplazado por la articulación 2, lo que implica un aumento de par sobre todo en el hombro. De la misma forma, se aprecia otro fenómeno que tendría bastante influencia en este aumento de par y es la particularidad de que la articulación uno evoluciona desde ángulos desplazados en sentido negativo hasta valores positivos de los mismos (ver desplazamiento angular de la articulación 1 para las seis simulaciones, capítulo V Figura 5.37). Al comienzo del movimiento, la masa de los elementos se distribuye a ambos lados del centro de giro compensando así su efecto. A medida que transcurre el tiempo, este reparto va siendo cada vez menor, aumentando la masa concentrada a uno de los lados y favoreciendo el momento generado en un sentido.

El descenso del momento generado en las articulaciones 3 y 5 en la última etapa de la tarea, se debe a que estamos más cerca de la posición de equilibrio de los dos eslabones conectados en cada caso.

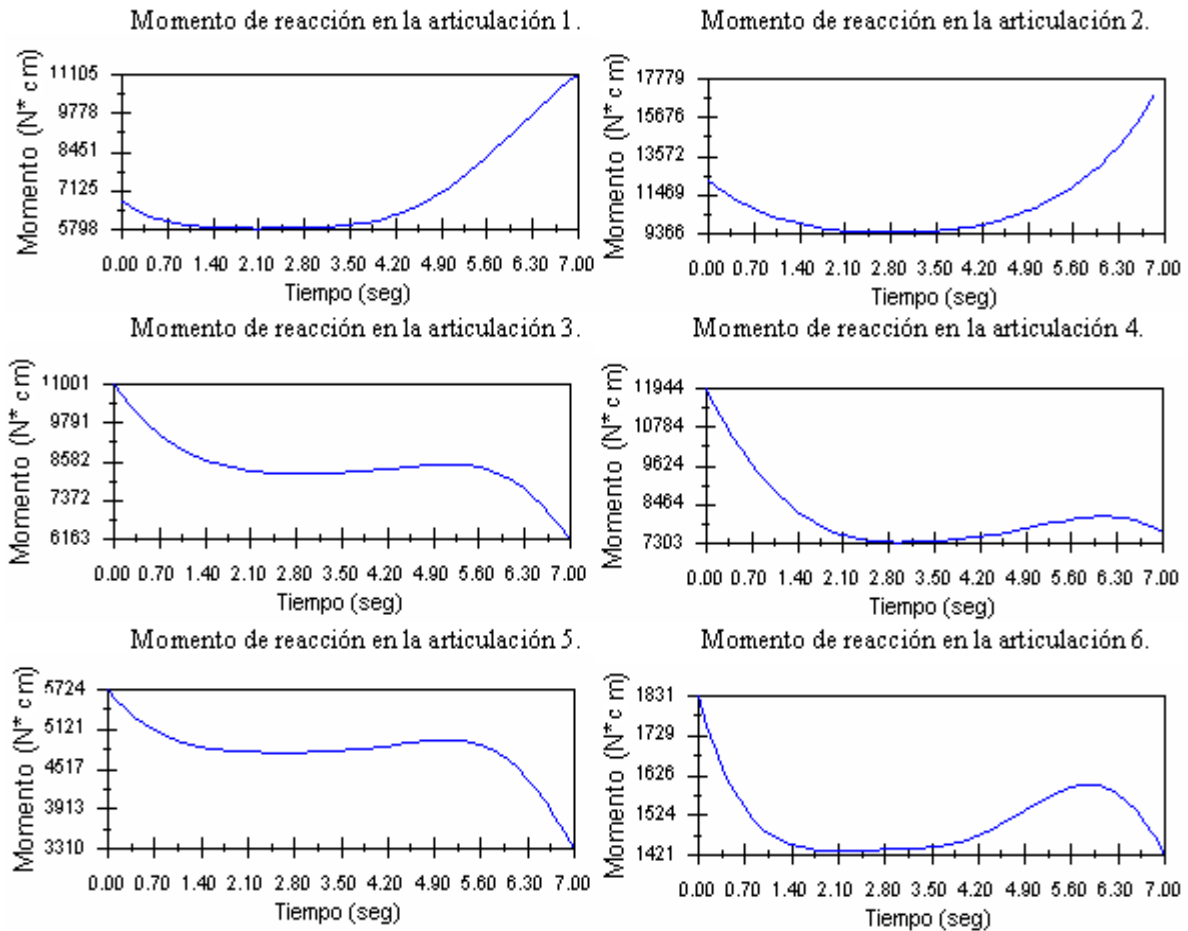


Figura 6.42.- Momentos de reacción que se originan en las articulaciones durante la simulación 1.

6.4.3.4. Pares necesarios para realizar la trayectoria descrita

Hay que señalar que tanto estática como dinámicamente se presentan una serie de esfuerzos resistentes que hemos de vencer para conseguir movernos de una determinada forma. Teniendo esto en cuenta, mediante la simulación en CosmosMotion del movimiento descrito en esta simulación, obtenemos de manera sencilla los pares que tendrían que ejercer los distintos motores alojados en cada una de las articulaciones para mover el brazo manipulador de la manera apropiada según la tarea que se pretenda realizar.

Se hace necesario destacar que los pares que se obtienen en CosmosMotion son, en todos los casos, los pares que se necesitarían después de la reducción que se aplica en cada articulación. En la Figura 6.43, se aprecia de manera esquemática lo que sería para nosotros la representación de una articulación en la que se conectan dos eslabones (denotados como eslabón 1 y eslabón 2 respectivamente). CosmosMotion arroja los resultados referidos al punto en el que se unirían los dos elementos. Sabemos que en cada una de las seis articulaciones de rotación del manipulador la transmisión de fuerza se realiza mediante una reducción del tipo Harmonic drive, a las cuales se encuentran acoplados motores de corriente continua del tipo DC-brushless. Para poder conocer los pares motores necesarios para inducir el movimiento deseado en la estructura, habría que dividir el par obtenido en las simulaciones entre el coeficiente de reducción en cada caso.

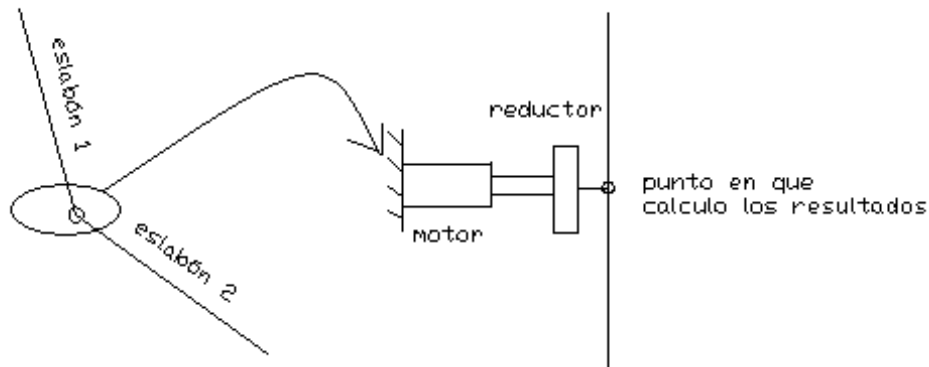


Figura 6.43.- Representación esquemática de la transmisión de fuerza en cada articulación.

A continuación, en la Figura 6.44 se ilustran las curvas de la evolución temporal de los momentos obtenidas en cada articulación durante el desarrollo de la tarea. A simple vista cabría esperar que los motores que más par debieran ejercer serían los alojados en el hombro (correspondientes a los alojados en la articulación 1 y la articulación 2), ya que son los que se encuentran dimensionados para poder ejercer un par mayor. Sin embargo, dada la naturaleza de la tarea que analizamos nunca vamos a registrar esfuerzos resistentes tan elevados en el hombro como para los que está dimensionado, ya que los desplazamientos en las articulaciones 1 y 2 nunca van a ser demasiado importantes para el desarrollo de la tarea que estamos analizando (apertura de una puerta).

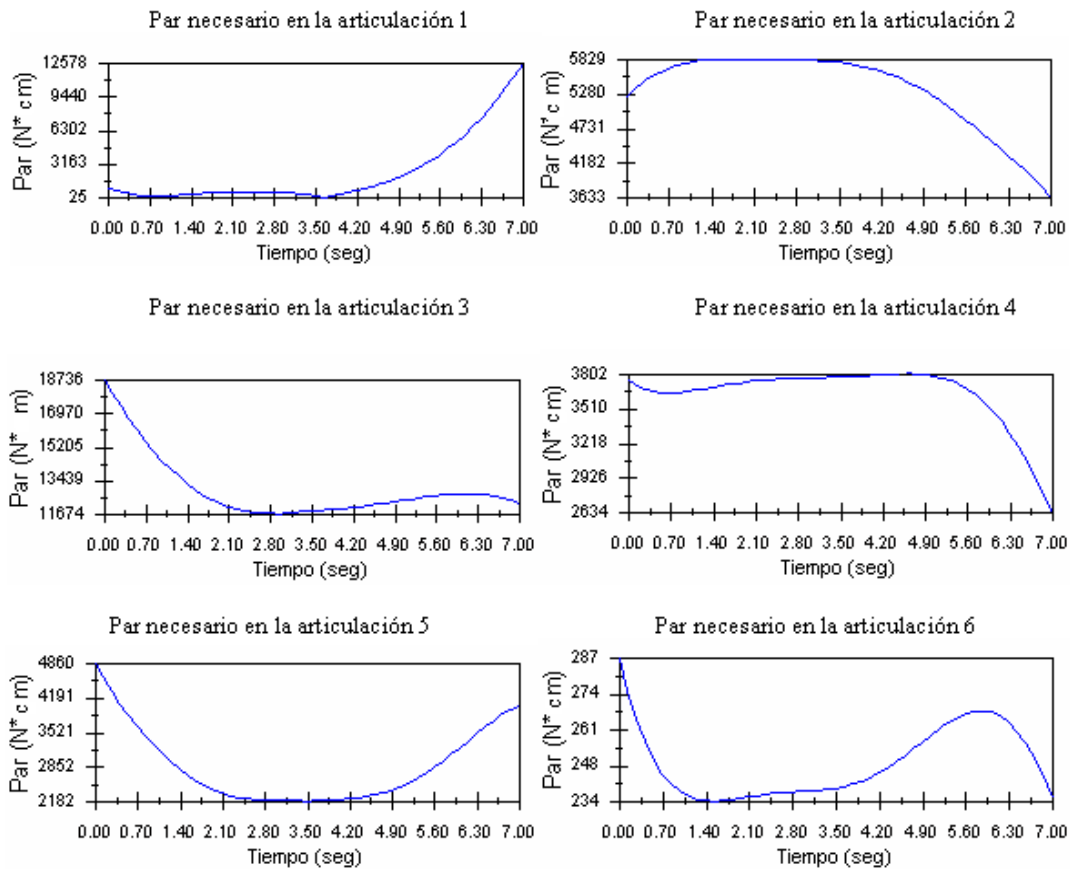


Figura 6.44.- Evolución del par motor necesario en cada articulación para realizar el movimiento en la simulación 1.

Por el contrario a lo que cabría esperar, el motor que más par ejerce con bastante diferencia durante todo el movimiento, es el que se encuentra alojado en la articulación 3, presentando, como se puede observar en la Figura 6.44, un valor máximo al comienzo del movimiento del orden de aproximadamente 19000 N·cm y evolucionando hasta un valor final entorno a 12000 N·cm.

6.4.3.5. Potencia consumida por los motores en la trayectoria descrita

De forma general, recordamos que la potencia se define como la razón con que se efectúa el trabajo. El Trabajo hecho por las fuerzas externas que actúan sobre un cuerpo durante un desplazamiento dr se define en [6.7]:

$$W = \sum F \cdot r \quad [6.7]$$

Obtenemos la potencia P en [6.8] dividiendo esta expresión entre el intervalo de tiempo dt durante el cual tiene lugar el desplazamiento:

$$P = \sum F \cdot v \quad [6.8]$$

Donde,

$$\begin{aligned} W &= \text{trabajo} [J / s] \\ F &= \text{fuerza} [N] \\ r &= \text{desplazamiento} [m] \\ P &= \text{potencia} [W] \\ v &= \text{velocidad} [m / s] \end{aligned}$$

En la Figura 6.45 se muestra la potencia consumida por cada uno de los motores para conseguir mover el manipulador como deseamos.

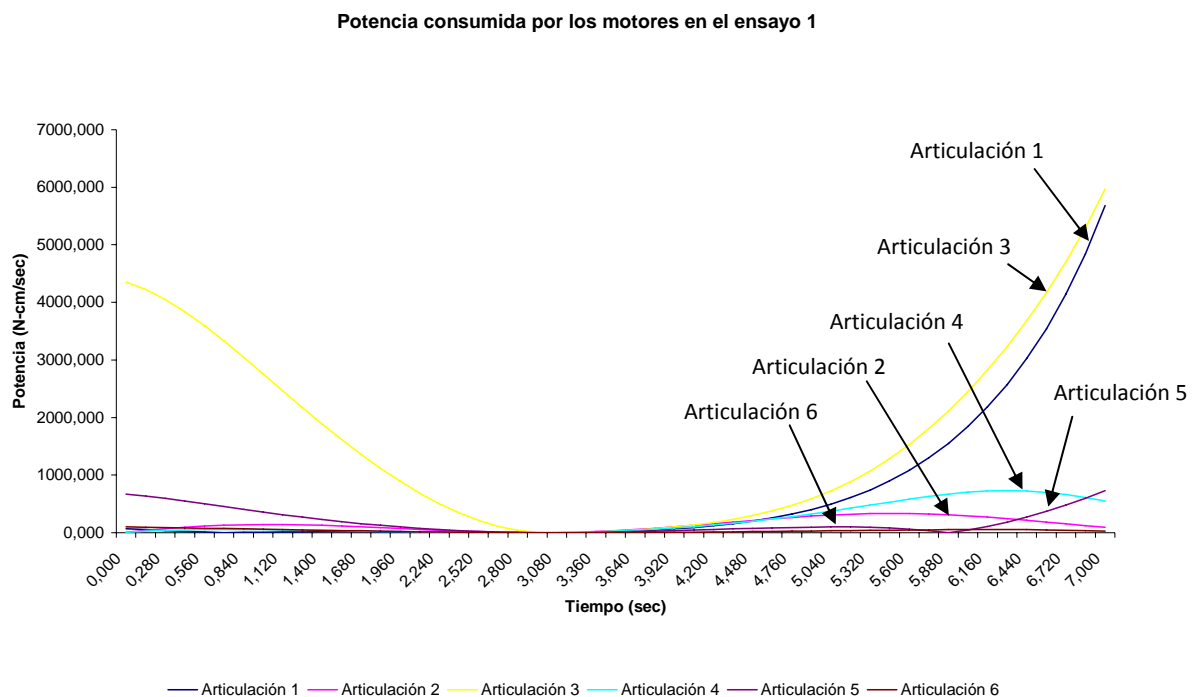


Figura 6.45.- Potencia consumida por los motores en la simulación 1.

Anteriormente se trataron los pares que se necesitaba aplicar para conseguir el movimiento descrito. Igualmente la potencia consumida en ello guardará cierta relación.

El motor que más consume durante el movimiento es el que se aloja en el interior de la carcasa de la articulación 3, empezando el movimiento con un consumo de 43 W aproximadamente y alcanzando casi 60 W de consumo en el instante en el que acaba la apertura de la puerta. El motor alojado en la articulación número 1 presenta en la parte final del movimiento un consumo de hasta 57 W aproximadamente. El resto de motores registran consumos bastante menores.

6.4.3.6. Variaciones registradas en los esfuerzos de reacción

6.4.3.6.1. Dependencia con la posición

Para analizar los efectos que pudieran originar cambios en el posicionamiento inicial de la base y la disposición articular del manipulador para alcanzar la misma posición y orientación final del actuador extremo, se realizaron una serie de simulaciones en las que se van variando estos parámetros. En concreto, se simularon los cinco movimientos que fueron estudiados en el análisis cinemático del capítulo anterior, donde se calcularon los perfiles de desplazamientos, velocidades y aceleraciones en cada caso.

El resto de parámetros de simulación (rigidez del muelle de torsión, duración de la tarea, etc.), permanecen constantes (ver Tabla 6.4). De esta forma, se podrían resumir las características principales de las simulaciones estudiadas como muestra la Tabla 6.4. Con toda esta información, se procederá a simular cada una de estas circunstancias particulares para observar las variaciones que se pudieran originar respecto a las fuerzas y momentos de reacción obtenidos en la simulación 1 y que tomaremos como referencia a efectos comparativos.

Todas las tablas de datos arrojados en las simulaciones realizadas con CosmosMotion, así como los gráficos comparativos que evidencian la dependencia de cada magnitud con la posición pueden ser consultados en el Anexo dinámico VI que se adjunta al final de este documento, ya que no han sido incluidos en esta memoria debido al gran volumen que ocupan. En el texto se expondrán solamente las particularidades más importantes que se detecten, debiendo acudir a dicho Anexo para contrastar las conclusiones obtenidas.

I. Variaciones en las fuerzas de reacción en cada articulación, provocadas por cambios en el posicionamiento inicial de la base

En las tres primeras simulaciones, la fuerza que se detecta en el primer tramo de giro del pomo en todas las articulaciones es prácticamente la misma, sin variaciones significativas. Esta tendencia permanece en la apertura de la puerta, no siendo hasta el final del movimiento cuando aparecen ciertas diferencias aunque relativamente pequeñas (del orden de 2 a 3 Newton en el peor de los casos).

Si por el contrario se produce un desplazamiento en la dirección tangencial respecto de la posición tomada como referencia (posición 1), a uno y otro lado 90 mm, las diferencias resultan mayores. De esta manera, se aprecian ligeras variaciones ya desde el comienzo del movimiento, siendo en la posición 4 en la que se inicia el movimiento con unos esfuerzos mayores en todas las articulaciones. Se podría resumir en los siguientes puntos principales lo que ocurre en estos casos:



Parámetros	Simulación 1	Simulación 2	Simulación 3	Simulación 4	Simulación 5
Posicionamiento inicial del vehículo (mm)					
<i>Normal (n)</i>	400	310	490	400	400
<i>Tangencial (t)</i>	510	510	510	600	420
Variables articulares (°) *medidos con respecto al brazo completamente estirado y sentidos según los ejes de giro definidos.					
Articulación 1	+33.75	+42.91	+23.33	+33,58	+33.58
Articulación 2	-0.33	-0.33	-0.32	+11.17	-11.81
Articulación 3	-83.15	-83.10	-79.86	-81.32	-81.3
Articulación 4	+0.28	+0.28	+0.23	-9.13	+9.63
Articulación 5	-40.60	-49.81	-33.48	-41.95	-42.01
Articulación 6	+0.06	+0.05	+0.1	-2.45	+2.61
Descripción de la trayectoria de la tarea (ver apartado 5.4 del análisis cinemático)	<u>Giro del pomo</u> velocidad decreciente	<u>Giro del pomo</u> velocidad decreciente	<u>Giro del pomo</u> velocidad decreciente	<u>Giro del pomo</u> velocidad decreciente	<u>Giro del pomo</u> velocidad decreciente
	<u>Apertura de la puerta</u> Velocidad creciente	<u>Apertura de la puerta</u> Velocidad creciente	<u>Apertura de la puerta</u> Velocidad creciente	<u>Apertura de la puerta</u> velocidad creciente	<u>Apertura de la puerta</u> velocidad creciente
Duración de la tarea	7 segundos de los cuales: - 3 segundos en el giro. - 4 segundos en la apertura.	7 segundos de los cuales: - 3 segundos en el giro. - 4 segundos en la apertura.	7 segundos de los cuales: - 3 segundos en el giro. - 4 segundos en la apertura.	7 segundos de los cuales: - 3 segundos en el giro. -4 segundos en la apertura.	7 segundos de los cuales: - 3 segundos en el giro. -4 segundos en la apertura.
Rigidez del muelle	1 N/mm	1 N/mm	1 N/mm	1 N/mm	1 N/mm

Tabla 6.4.- Parámetros principales de las simulaciones. Dependencia con la posición.

- Al inicio del movimiento los mayores esfuerzos se manifiestan en la posición 4 en todas las articulaciones mientras que los menores en la posición 5.
- Esta tendencia se invierte en las tres primeras articulaciones relativamente pronto en el tiempo, pasando a registrar mayores esfuerzos durante el resto del movimiento en la posición 5, mientras que serán menores en la posición 4.
- En la articulación 4 este cambio no se produce y las fuerzas menores se presentan ahora en la simulación 1.
- En las articulaciones 5 y 6 desde el inicio del movimiento y a lo largo de todo el tiempo, los esfuerzos mayores los observamos en la simulación 4 y los menores en el 5. En estos últimos elementos del manipulador es, además, donde se contabilizan las mayores diferencias (del orden de 14 N para la articulación 6 en el inicio).

II. Variaciones en los momentos de reacción en cada articulación, provocadas por cambios en el posicionamiento inicial de la base

Llama la atención que en la articulación 1 la evolución que presenta el momento es bastante proporcional en todos las simulaciones. Podríamos atribuirlo a las siguientes razones fundamentalmente:

- En las simulaciones en los que nos movemos normalmente a la puerta (1, 2 y 3): en la posición 2, el momento que se ejerce es menor que en la posición 1 y éste a su vez menor que en la posición 3. Este fenómeno se explica fácilmente por la disposición articular que se adopta en cada caso. Si volvemos a la Tabla 6.4 comprobamos que en el instante inicial la variable articular que define el estado de la articulación 1 en cada caso es el que se muestra en la Figura 6.46.

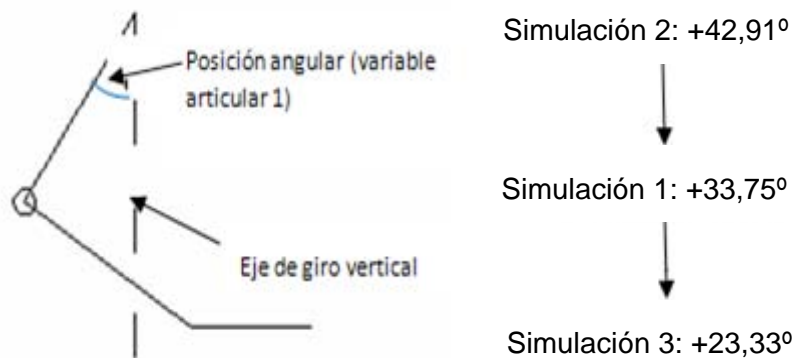


Figura 6.46.- Variable articular de la primera articulación.

- En esta disposición, el efecto de las masas de los elementos se reparte a ambos lados de la vertical que pasa por el centro de giro de la articulación 1. Por tanto, tendremos momentos mayores en la simulación 3 debido a que la compensación de los momentos que provoca la distribución de las masas disminuye, aumentando el par ejercido en el lado predominante.
- En las simulaciones en los que nos movemos tangencialmente a la puerta (1, 4 y 5): cuando nos desplazamos en la dirección tangencial respecto de la posición 1 tiene mucho que ver la configuración que adopta la articulación 2 en relación al

momento acusado. En este caso, la variable articular 1 no sufre apenas variaciones importantes. Sin embargo, la articulación 2 se dispone de manera diferente en cada simulación. Por el mismo efecto compensatorio de los pesos cuando más momento se ejerce es en la posición 4.

- Por su parte, en la articulación 2, la relación entre las diferentes simulaciones al comienzo del movimiento es la misma que en la articulación 1 es decir, no hay variaciones importantes en los momentos de reacción registrados. Sin embargo, esta relación de invariabilidad no se mantiene en el resto del progreso del movimiento. De manera que, al final del movimiento de apertura de la puerta en la simulación 3 se registra el mayor momento de reacción, superando al resto de simulaciones.

En las demás articulaciones, las diferencias existentes entre las simulaciones 4 y 5 son bastante mayores que entre las simulaciones 2 y 3 durante todo el movimiento de apertura de la puerta, aunque van disminuyendo con el tiempo transcurrido.

6.4.3.6.2. Dependencia con la forma de realizar la tarea

Para detectar variaciones en los esfuerzos de reacción que pudieran presentarse como consecuencia de realizar la tarea de apertura de la puerta, se realizó una simulación en el que se alteraba este parámetro. Los perfiles tanto de desplazamientos, velocidades y aceleraciones, correspondientes a esta simulación se mostraron en el análisis cinemático (Capítulo V), englobado dentro de la simulación número 6. De esta forma, los parámetros principales que se fijaron en esta situación se detallan en la Tabla 6.5 junto con los de la simulación 1, que nos servirán de referencia a efectos comparativos. Tras un análisis de los resultados obtenidos mediante la simulación con CosmosMotion de cada una de estas circunstancias se podrían establecer las siguientes consideraciones en cuanto la fuerza y al momento de reacción en cada articulación:

I. Variaciones en las fuerzas de reacción en cada articulación, provocadas por cambios en la forma de realizar el giro del pomo y la apertura de la puerta

En todas las articulaciones del manipulador UC3M-LWR-1 la fuerza de reacción al inicio y al final de cada movimiento es la misma, ya que la posición inicial y la consiguiente disposición articular es, en ambas simulaciones la misma y los movimientos a realizar también. Es, por tanto la manera en la alcanzamos cada una de las posiciones intermedias de la trayectoria lo que provoca ligeras variaciones.

Durante el giro del pomo, la curva de fuerza que se obtiene en la simulación 6 presenta una tendencia lineal de pendiente negativa, mientras que la ya estudiada para la simulación 1 se podía aproximar a un polinomio de segundo grado. Los valores alcanzados durante el movimiento que mantiene constante la velocidad de giro en el pomo (simulación 6) son mayores en todas las articulaciones. Por su parte, durante el tiempo de apertura, las diferencias anotadas son mínimas.

II. Variaciones en los momentos de reacción en cada articulación, provocadas por cambios en la forma de realizar el giro del pomo y la apertura de la puerta

Los valores al inicio y al final de cada movimiento vuelven a ser los mismos tal y como cabría esperar. Sin embargo, para conseguir mantener una velocidad constante de giro

Parámetros	Simulación 1	Simulación 6
Posicionamiento inicial del vehículo (mm)		
<i>Normal (n)</i>	400	400
<i>Tangencial (t)</i>	510	510
Variables articulares (°) *medidos con respecto al brazo completamente estirado y sentidos según los ejes de giro definidos.		
Articulación 1	+33.75	+33.75
Articulación 2	-0.33	-0.33
Articulación 3	-83.15	-83.15
Articulación 4	+0.28	+0.28
Articulación 5	-40.60	-40.60
Articulación 6	+0.06	+0.06
Descripción de la trayectoria de la tarea (ver apartado 5.4 del análisis cinemático)	<u>Giro del pomo</u> velocidad decreciente	<u>Giro del pomo</u> velocidad constante
	<u>Apertura de la puerta</u> Velocidad creciente	<u>Apertura de la puerta</u> Velocidad constante
Duración de la tarea	7 segundos de los cuales: - 3 segundos en el giro. - 4 segundos en la apertura.	3.5 segundos de los cuales: - 1.5 segundos en el giro. - 2 segundos en la apertura.
Rigidez del muelle	1 N/mm	1 N/mm

Tabla 6.5.- Parámetros principales de las simulaciones. Dependencia con la forma de realizar la tarea.

del pomo, hemos de soportar ligeros incrementos en los pares de reacción en todas las articulaciones.

6.4.3.6.3. Dependencia con la rigidez del muelle de torsión

Para evaluar la influencia de la constante elástica que se incluye en el mecanismo de la puerta, se realizó una última simulación en el que solamente modificamos dicho parámetro respecto de la simulación 1. A fin de poder observar diferencias sustanciales se modeló un muelle con una rigidez de 1000 N/mm, excesiva en cualquier caso para un muelle de estas características y con esta función concreta. No obstante, se cree que evidencia con bastante claridad el comportamiento del manipulador y corrobora así, lo argumentado con anterioridad a cerca de la tendencia descendente de los esfuerzos en el primer tramo correspondiente al giro del pomo. Se probaron valores de 1, 10, 100 y 1000 progresivamente. En los tres primeros casos, el comportamiento era el mismo: la fuerza disminuía pero en ningún instante la $F(t)$ era lo suficientemente grande como para igualar al peso. Se optó por tanto en simular los movimientos con una rigidez de 1000, donde se puede observar en un determinado momento cómo se invierte esta tendencia.

I. Variaciones en las fuerzas de reacción en cada articulación, provocadas por cambios en la rigidez del muelle de torsión

Si recordamos el esquema sencillo de una barra representado en la Figura 6.41, veíamos que si la fuerza $F(t)$ era en algún momento lo suficientemente grande como para igualar al efecto provocado por el peso, la reacción en el empotramiento se anulaba. Pues bien, este razonamiento simple puede ser aplicado en este caso para explicar lo que ocurre con las fuerzas que se obtienen en las articulaciones cuando aumentamos mucho el valor de la constante elástica del muelle.

Si ojeamos los gráficos comparativos mostrados en el Anexo VI de dinámica; los destinados a analizar la dependencia con la rigidez del muelle evidencian lo siguiente:

- En todas las articulaciones la fuerza ejercida va disminuyendo hasta hacerse cero, momento en el cual, el efecto de la fuerza $F(t)$ que va aumentando con el tiempo iguala al peso.
- A partir de este tiempo, la fuerza ejercida sobre la articulación comienza a aumentar en sentido contrario para seguir desplazando el pomo en sentido descendente.
- Mientras más alejados nos encontremos del hombro antes se hace cero la fuerza debido a que implicamos un peso menor. En otras palabras, la fuerza $F(t)$ consigue antes igualar los efectos del peso.

II. Variaciones en los momentos de reacción registrados en cada articulación, provocadas por cambios en la rigidez del muelle de torsión

En cuanto al comportamiento de los momentos de reacción provocados en las articulaciones cuando se aumenta la rigidez del muelle ocurre algo similar a lo comentado para la fuerza en el apartado anterior.

6.4.3.6.4. Pares ejercidos y potencias consumidas por cada uno de los motores para mantener las trayectorias descritas en cada uno de las simulaciones

Recordamos que tanto estática como dinámicamente se presentan una serie de esfuerzos resistentes que hemos de vencer para conseguir movernos de una determinada forma. Mediante la simulación en Cosmos del movimiento descrito en cada simulación, obtenemos de manera sencilla los pares que tendrían que ejercer los motores alojados en cada una de las articulaciones para mover el brazo manipulador como se espera.

De igual forma recordamos que los pares que se obtienen en Cosmos son, en todos los casos, los pares que se necesitarían después de la reducción que se aplica en cada articulación. Para poder conocer los pares motores necesarios para inducir el movimiento deseado en la estructura, habría que dividir el par obtenido en las simulaciones entre el coeficiente de reducción en cada caso.

Los pares y la potencia manifestados durante la simulación 1 ya fueron comentados con anterioridad, veremos ahora cuales son los registrados en el resto de simulaciones.

I. Pares ejercidos en las distintas simulaciones

De la misma forma que en apartados anteriores, los datos precisos arrojados en las simulaciones se encuentran en el Anexo dinámico VI. En este caso se adjuntan también unos gráficos donde se muestran conjuntamente los pares que se deberían desarrollar en las diferentes articulaciones de una misma simulación. Se puede asegurar, en vista de los resultados obtenidos, que en todas las simulaciones la articulación que más par necesita desarrollar es la tercera con bastante diferencia.

Notar que los resultados obtenidos, tal y como se comentó con anterioridad, se calculan en el punto donde teóricamente se unen los dos eslabones conectados en la articulación. Por tanto, para poder conocer los pares motores que necesitaremos, hemos de tener en cuenta la reducción que se aplica en cada una (recordar esquema de la Figura 6.43). En la Tabla 6.6 se listan las reducciones del tipo Harmonic que se aplican según las hojas de características de los reductores:

Articulaciones	Factor de Reducción que se aplica
1 y 2	160
3	160
4 y 5	120
6	100

Tabla 6.6.- Factores de reducción de los Harmonic en cada articulación.

En general, se comprueba que según nos alejamos de la puerta en la dirección normal, nos vemos obligados a ejercer un par mayor en las articulaciones 2 y 3 para mantener la misma posición y orientación del elemento extremo en el instante inicial. Sin embargo, las articulaciones 4, 5 y 6 apenas sufren pequeñas variaciones. Mientras que, en la articulación 1, el par necesario al inicio resulta menor desde la posición 1. Por otra parte, hay que señalar que cuando acabamos la tarea, llama la atención el hecho de que desde posiciones alejadas ahora el par necesario para mantener la configuración es bastante menor; sobre todo en la articulación 3.



En las simulaciones en los que nos movemos paralelamente a la puerta, pasamos de posicionar la articulación 2, que formaba un ángulo aproximado de 0° respecto a la horizontal al comienzo (simulación 1), a abrir y cerrar la misma unos 11° aproximadamente. Este hecho se debe a que dejamos de alinear el centro de giro del hombro con el punto que manipulo en el pomo, lo que obliga a modificar estas variables articulares para conseguir la orientación deseada. Esta circunstancia produce variaciones, fundamentalmente, en cuanto a los pares encontrados en las articulaciones 4, 5 y 6, que antes permanecían prácticamente inalterables.

II. Potencia consumida en las distintas simulaciones

La potencia que consumirían los motores para conseguir el movimiento programado es directamente proporcional a la los esfuerzos resistentes que ha de vencer en cada caso. Por tanto, las relaciones en valores absolutos que guardaban las potencias consumidas en las diferentes articulaciones, eran predecibles en función de los resultados obtenidos, en cuanto a esfuerzos de reacción y pares motores necesarios. Finalmente, señalar que el motor que más consume en todos los casos es el que se aloja en la articulación 3, la que más par necesitaba aportar en el movimiento. En concreto, al final de la tarea presenta unos valores en torno a 270 W en el peor de los casos (simulación 3). En el otro extremo, la articulación 6 que consume bastante menos potencia.

CAPÍTULO VII

CONCLUSIONES FINALES, NUEVA GENERACIÓN Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN



7.1. Introducción

Como conclusión a todo lo expuesto en el desarrollo de esta tesis, se presenta este capítulo donde se explican las conclusiones alcanzadas con el desarrollo de la misma. De la misma forma, se presentan los posibles trabajos futuros que esta tesis deja como caminos abiertos de investigación.

En primer lugar, se presentan las conclusiones en sus vertientes mecánica y dinámica, así como cualquier otro tipo de consideración respecto al diseño del manipulador UC3M-LWR-1. En segundo lugar, se repasan los objetivos de diseño planteados al comienzo de esta tesis para analizar su cumplimentación o en caso contrario analizar los motivos por los que no se ha alcanzado dicho cumplimiento. Finalmente, se indican sugerencias para posteriores trabajos sobre futuras generaciones del manipulador diseñado para MANFRED.

Sólo queda por tanto agradecer al lector la atención prestada a lo largo de la memoria e invitarle a revisar los resultados e indicaciones introducidas en los Anexos finales de esta tesis.

7.2. Conclusiones finales del manipulador desarrollado

7.2.1. Sobre el peso

Finalmente se ha logrado un peso del manipulador de aproximadamente **18 kg** (incluyendo tornillería y cableado). Como ya se ha indicado en el capítulo 4, esto se ha conseguido fundamentalmente gracias a una cuidada elección de los elementos constitutivos. Por esta razón se han escogido materiales que respetando los criterios de seguridad para los humanos (nula toxicidad, no inflamables y capacidad de disipación de calor) tuvieran una baja densidad y unas buenas características de acuerdo a los requisitos de diseño previamente establecidos (ver capítulo IV). Además en la elección de los motores se han establecido como uno de los criterios principales el ratio par nominal final/peso lo que nos llevó a elegir, de entre todos los modelos comerciales valorados, los motores sin escobillas de la familia (RBEH) DC de KOLLMORGEN. En cuanto a la elección de los reductores, se eligió finalmente la familia HFUC de la casa comercial Harmonic Drive AG ya que sus características de robustez, rigidez y precisión la hacían idónea para esta aplicación, aunque eso sí, a costa de un elevado peso por componente. Hay que recordar que otra tecnología de reductores altamente valorada fue la familia CSD, también del fabricante Harmonic Drive AG. Esta familia presentaba importantes ventajas respecto a la familia HFUC como una importante disminución de las dimensiones y del peso por componente, así como una mejora considerable en las propiedades mecánicas respecto al par admisible y otorgado. Sin embargo, hay que recordar que la reducción de peso se debía a una deficiencia importante como es la falta de rodamientos de salida. Este hecho obligaría a una elección de dichos rodamientos en cada articulación por lo que finalmente no se notaría una reducción relevante del peso total de la estructura, lo que unido a un coste más elevado de esta tecnología hizo descartar finalmente esta opción.

Hay que destacar, que una de las características del diseño del brazo UC3M-LWR-1 que ha repercutido notablemente en la disminución del peso es la eliminación de los frenos.

Esta característica es relevante ya que no se presentaba en otros manipuladores ligeros desarrollados por diversos grupos de investigación. Esto ha sido posible gracias a los reductores incorporados en cada articulación junto con la disposición antropomórfica y las configuraciones previstas para el manipulador en el desarrollo de sus tareas, que han permitido prescindir de la incorporación de sistemas de frenado en las articulaciones con la consiguiente reducción de coste y peso global.

Por otra parte, la etapa de rediseño y optimización de las piezas del manipulador ha sido fundamental para lograr una reducción de peso considerable de la estructura.

7.2.2. Sobre la carga y los cálculos

La carga máxima teórica que se impuso como requisito del diseño era de **6 Kg**. Sin embargo, una vez construido el brazo se observó que la carga máxima que el manipulador podía aguantar para un correcto funcionamiento de la estructura era de **4.5 Kg**. Esto se debe a:

- a) En las simulaciones, los cálculos de pares no han tenido en cuenta rozamientos viscosos reales, así como todos los casos en los que pueden generarse pares desfavorables.
- b) Los valores de carga analizados en las simulaciones eran de tipo puntual. Este modelo no se corresponde con la realidad ya que cualquier carga real supone aportaciones de inercia en cualquiera de los ejes del espacio. Estas aportaciones de inercia en cada uno de los ejes afectan reduciendo la capacidad de carga del manipulador ya que se necesitaría un aumento del par necesario en las articulaciones.
- c) No se han tenido en cuenta las aportaciones de inercia y peso de la tornillería y los cables. Esto hace que el modelo real del manipulador tenga un peso mayor que el modelo teórico utilizado en las simulaciones, lo que repercute en su capacidad de carga. Hay que tener en cuenta que el aumento de carga es sólo posible si se consigue una reducción de peso de la estructura del manipulador, a igualdad de generación de par, es decir, si utilizamos los mismos motores.
- d) Para los modelos de inercia de los eslabones, no se ha dispuesto de datos precisos sobre los motores, reductores y rodamientos. Aunque un rediseño podría minimizar los desequilibrios no previstos conociendo los datos exactos de estos componentes, en la práctica del montaje estos desequilibrios siempre existirán, aumentando la inercia propia de cada eslabón y asimismo el par necesario.

7.2.3. Sobre la estructura

El diseño de la estructura ha sido validado satisfactoriamente mediante simulaciones de los componentes de la misma. Se ha logrado disminuir el peso de la estructura muy por debajo de los manipuladores industriales comerciales, cuyo peso es excesivo para nuestros propósitos, sin alterar por ello la robustez y rigidez del sistema.

En la etapa de diseño se puso especial atención en eliminar cualquier arista en la estructura mecánica externa del manipulador UC3M-LWR-1 con el objetivo de hacerla lo menos agresiva para el ser humano. Para ello se redondearon todas las terminaciones

de los elementos que cubren las articulaciones y se ocultaron los tornillos en la propia estructura mecánica. Además se ocultó el cableado por el interior de la estructura.

En el análisis estático se ha comprobado y justificado que las articulaciones del manipulador cumplen un factor de seguridad aceptable y con un peso de la estructura adecuado. Por su parte, las tensiones presentes en el diseño no superan en ningún momento el valor límite de deformación plástica para cada una de las piezas implicadas. En especial se han estudiado las tensiones y deformaciones en las articulaciones 1 y 2 por ser las que mayor peso soporta de toda la estructura. Este estudio ha permitido comprobar el correcto funcionamiento del manipulador en el desempeño de sus tareas.

En la fase inicial de diseño se han analizado para la estructura distintas secciones de tipo; cuadrado, triangular, circular y elíptico llegándose a las siguientes conclusiones:

- a) Todas las secciones de estructura analizadas son de relativa fácil fabricación, dado que no tienen geometrías difíciles que imposibiliten su manufactura. Sin embargo, aunque la geometría de sección elipsoide presentaba las mejores características de distribución de tensiones, la circular se perfiló como la de más sencilla de fabricar, y por tanto como la más barata. Este factor si bien no es el más relevante entre los objetivos del diseño, no se puede olvidar en el desarrollo de cualquier prototipo con ambición de ser comercializado.
- b) Considerando que el brazo estará en entornos humanos, el diseño cuadrado y especialmente el triangular fueron descartados por resultar ‘más peligrosos’, debido a sus aristas pronunciadas, en caso de colisión con el ser humano. Además el aspecto estético empeoraba notablemente para este tipo de secciones, no tanto en el caso cuadrado, pero si más acentuado en el caso triangular.
- c) Los diseños cuadrado, rectangular y triangular además de ser los más peligrosos para el ser humano en caso de colisión con él, mostraban una concentración mayor de tensiones en las aristas lo que disminuía el factor de seguridad de la estructura, tan importante para garantizar un seguro y correcto funcionamiento de la misma.
- d) La forma circular tiene además la ventaja de que presenta simetría axial lo que hace que la distribución del peso total de la estructura respecto al eje no sea tan variante con la posición del manipulador mejorando la estabilidad del sistema.

7.2.4. Sobre la construcción del modelo con SolidWorks

Se ha diseñado un prototipo del brazo manipulador que dispone de los 6 grados de libertad que presenta el modelo real construido en el laboratorio. Dichos grados de libertad se han conseguido agrupando y relacionando convenientemente todos los elementos del brazo manipulador UC3M-LWR-1. En el modelo diseñado, se incluyeron todos los efectos de fricción en las uniones, debiendo facilitar información dimensional de la unión así como un coeficiente seleccionable para el rozamiento.

7.2.5. Sobre el análisis estático

Los análisis estáticos tuvieron como finalidad obtener los valores de las reacciones que afectaban a la primera y segunda articulación, que serán las piezas que más sufran ya que a ellas llegan las fuerzas y momentos de mayor magnitud. De esta forma con la

herramienta CosmosMotion se ha demostrado que estas piezas están correctamente dimensionadas y que aún sometiendo estas partes a cargas de hasta 100 N más los momentos, existe todavía un margen de seguridad antes de que se produzca el fallo de algún componente estructural, quedando lejos todavía el límite elástico o incluso más el de rotura.

Comparando ambas articulaciones, la segunda sufre unas tensiones mayores a la primera, por lo que hay que prestar mayor atención a la evolución de esta estructura durante los movimientos. Tratando de evitar en lo posible elevaciones laterales que implican un gran esfuerzo para la misma.

7.2.6. Sobre el análisis dinámico

En el análisis dinámico se ha dividido en dos partes. Por un lado se han simulado dos **trayectorias genéricas** como son la **elevación frontal** del brazo y la **elevación lateral** del mismo. Estas trayectorias fueron elegidas por considerarse críticas y a la vez sencillas, puesto que se realiza únicamente con el movimiento de una articulación, que sufre los esfuerzos de todos los eslabones. En el caso de la elevación frontal se pudo analizar el comportamiento de la articulación uno mientras que en la elevación lateral era la articulación dos la implicada en el movimiento. Para ambos casos se estudió la influencia de diversos parámetros con el fin de analizar su comportamiento ante distintas situaciones. Primero se estudió la influencia de la velocidad de giro de la articulación involucrada en la trayectoria. En segundo lugar se analizó la influencia de distintos valores de carga transportada por el brazo durante el movimiento. Por último se compararon los valores obtenidos en las trayectorias 1 y 2, para comprobar cuál de las dos es más peligrosa para el manipulador debido a que la articulación involucrada sufre mayores tensiones en su estructura.

Por otra parte, se llevó a cabo el análisis dinámico de una tarea concreta como fue la simulación de apertura de una puerta. En esta simulación, para el modelado de la puerta se han utilizado las dimensiones características de cualquiera de las puertas que nos podemos encontrar en el entorno de trabajo donde desarrollará sus tareas el robot MANFRED. De la misma forma, se supuso un peso total de la puerta de 25 Kg. En el mecanismo de giro del pomo se insertó un muelle de torsión con una rigidez media para elementos que trabajan en estas condiciones de 1 N/mm. Notar que CosmosMotion no permite decidir entre diferentes tipos y características de muelles tan sólo permite definir un valor, una rigidez y los componentes entre los que ejerce su acción. La puerta diseñada abre a izquierdas, hecho que tendrá ciertas implicaciones directas en la forma de realizar la tarea así como diferentes limitaciones que se encontraron para una puerta que abra a izquierdas (posicionamiento de la base, corrección de trayectoria por colisión con el marco de la puerta) o, por el contrario, una que abra a derechas.

Señalar que debido al coste computacional que implicaba, a cambio de pequeñas variaciones en unos casos o, singularidades que no afectarían al desarrollo de nuestra tarea en otros, no se han considerado determinados aspectos. Cabe citar algunos como: tornillería y cableado o el rozamiento entre el suelo y la puerta (todo el peso de la misma se supone soportado en las bisagras).

7.2.7. Sobre las simulaciones con CosmosMotion

Se encontraron problemas para definir ciertos movimientos. En un principio el modelo completo puerta-brazo, donde se realizan todas las simulaciones, presentaba ciertas

dificultades para definir cada uno de los perfiles que dirigían el movimiento de las articulaciones. Estas complicaciones venían derivadas de que el modelo, con 8 grados de libertad, (6 de rotación en el brazo y 2 giros sencillos en la puerta) formaba una cadena cinemática cerrada en la que cada uno dependía de forma directa del desplazamiento acusado por los demás. La trayectoria que debía seguir cada elemento estaba obligada a mantener en todo momento una posición y orientación final del actuador final, determinada por los movimientos de giro del pomo y apertura de la puerta.

Por tanto, todos los perfiles programados para la tarea debían ser muy precisos para que el programa nos permitiese simular las trayectorias sin dar errores.

En estas circunstancias, se desarrolló un método de trabajo que resultó bastante eficaz y nos permitió desarrollar el estudio que pretendíamos. En primer lugar, se definieron relaciones entre el punto a manipular en el extremo del pomo y el punto que se ubica en el espacio entre los dedos de la pinza, de forma que permaneciesen coincidentes durante cualquier trayectoria y además, sin permitir movimientos relativos entre ellos.

Seguidamente, se controlaban los dos movimientos sencillos de la puerta, tomando decisiones acerca de cómo y en cuanto tiempo queríamos que se desarrollase la tarea. En estas condiciones se simularon diferentes estados, obteniendo de manera bastante precisa “splines” que determinaban la forma en la que se habían movido cada una de las articulaciones del brazo como consecuencia de los movimientos anteriores. Estas curvas así obtenidas, sí que podían ser programadas simultáneamente y ensayadas sin causar errores a la hora de ser simuladas.

7.2.8. Sobre el planteamiento del análisis

Con las diferentes simulaciones que se han realizado se ha pretendido valorar la influencia que podrían ejercer determinados parámetros, tanto en la forma de planear o afrontar la tarea de apertura de la puerta, como en los esfuerzos a los que podríamos estar sometiendo la estructura, o las exigencias que impondríamos a los actuadores para conseguir los movimientos deseados en el tiempo establecido.

Se han analizado trayectorias con diferentes posicionamientos iniciales de la base móvil del robot y perfiles a la hora de realizar la tarea de apertura de la puerta. Desde un punto de vista dinámico, se han simulado los efectos de muelles con coeficientes de elasticidad distintos.

En todos los casos se ha supuesto el punto de anclaje del hombro al torso del robot como un empotramiento, obviando el hecho de posibles desplazamientos verticales como consecuencia del movimiento de la base, debido a dificultades encontradas para su correcto modelado.

7.2.9. Sobre los resultados obtenidos

Como se ha comentado con anterioridad, se definió un marco de trabajo que nos permitió poder simular las diversas circunstancias particulares que se pretendían. De esta forma, calculamos diferentes trayectorias definidas por ciertos perfiles de desplazamientos, velocidades y aceleraciones articulares que conseguían mantener una posición y orientación del elemento extremo con bastante precisión durante todo el movimiento.



Posteriormente, se realizó un análisis dinámico de los movimientos descritos registrando los valores de los esfuerzos de reacción, pares necesarios para conseguir describir dichos movimientos y potencias consumidas a tal efecto.

7.2.10. Sobre los objetivos cumplimentados

A continuación se presentan los comentarios respecto a la consecución de los objetivos de diseño expuestos en el capítulo I:

1. Lograr un ratio carga / peso propio de 1:3.

Alcanzado un peso máximo total de la estructura de 18 kg con una carga máxima teórica de 6 kg, se puede observar que el ratio carga / peso propio es de 1:3. Sin embargo, como se ha comentado anteriormente la carga real máxima que la estructura podía soportar para un correcto funcionamiento era de 4.5Kg lo que supone una reducción del ratio carga/peso propio, siendo finalmente de 1:4.

2. Minimizar en la medida de lo posible el peso total del montaje, con una masa máxima de 18 kg incluidos tornillería y cableado.

El objetivo ha sido de sobra cumplido al lograr un peso final de la estructura de 18 kg, incluyendo tornillería y cableado.

3. Adecuación de alcances y medidas a estándares humanos para el adecuado funcionamiento del sistema en robótica de servicios aplicada a entornos típicamente humanos.

Como se ha expuesto detalladamente en el capítulo IV y en el Anexo I, ha sido necesario llevar a cabo un estudio antropométrico que permitiera fijar las dimensiones de los eslabones de acuerdo a la estética humaniforme que se pretendía conseguir en el diseño del manipulador. De esta manera, se ha buscado una apariencia de la estructura lo más parecida al ser humano posible respetando los rangos articulares del mismo.

4. Adecuación de estos mismos alcances y medidas a las peculiaridades de la plataforma móvil del MANFRED.

Lo dicho en el objetivo anterior es aquí igualmente válido. Todas las medidas y alcances que se han calculado para el manipulador, incluían las peculiaridades de la plataforma móvil del robot MANFRED. Hay que recordar que a los 6 grados de libertad del manipulador hay que añadirle los 2 grados de libertad de la base, lo que hizo necesario llevar a cabo un control coordinado de todos sus grados de libertad poniendo especial cuidado en las singularidades cinemáticas.

5. Consecución de las máximas capacidades de exactitud y repetibilidad del manipulador.

Respecto a este objetivo cabe decir que aunque finalmente no se han podido llevar a cabo simulaciones para cuantificar la exactitud y la repetibilidad del manipulador LWR-UC-M-1, la elección de los reductores y materiales lo más rígidos posibles, trata de asegurar este objetivo. Como queda expuesto en el capítulo IV con la elección de los reductores de la familia HFUC de la casa comercial Harmonic Drive AG se ha perseguido garantizar características de robustez, rigidez y precisión para el desempeño de las tareas del manipulador.



6. Modularidad del diseño, entendido este concepto como la facilidad del montaje/desmontaje para ser reconfigurable por medio del intercambio de reductores, actuadores, piezas o partes y lograr, entre otros, un elevado grado de versatilidad.

En la medida de lo posible, se han elaborado piezas que permiten cierto grado de modularidad por la simplicidad de su ensamblaje/desensamblaje.

7. Versatilidad, entendida como consecuencia de la modularidad a la vez que como una política de diseño en el orden de medidas, capacidades y posibilidades de movimiento y actuación.

Sin duda el manipulador es versátil por su modelo cinemático, por su distribución de peso e inercias, lo cual le permite una casi total libertad de movimientos, y en la medida de lo posible por sus rangos articulares que aunque limitados, son lo suficientemente elevados como para asegurar pocas singularidades.

8. Inclusión de gran simplicidad en el montaje/desmontaje para lograr así un sencillo mantenimiento.

Todos los montajes son uniones atornilladas de gran simplicidad que permiten un sencillo e intuitivo montaje de las piezas.

9. Bajo coste de adquisición y fabricación de componentes y piezas.

Como se ha comentado a lo largo del desarrollo de esta tesis, el objetivo de bajo coste tanto en la adquisición como en la fabricación de piezas y componentes es indispensable cuando se trata de desarrollar un prototipo que pueda ser comercializado en un futuro. Con esta tesis no solo se ha pretendido desarrollar un manipulador capaz de realizar tareas de forma eficiente, sino que además se pretende que con el perfeccionamiento adecuado este manipulador pueda ser comercializado dentro de las aplicaciones que se enmarcan en la robótica de servicios y más concretamente, en la cooperación con humanos en su mismo entorno.

10. Fácil fabricación de los componentes no comerciales del diseño.

Las piezas que se deben fabricar a medida, aunque con particularidades, no tienen geometrías difíciles que imposibiliten su fabricación con maquinaria industrial convencional.

11. Minimizar en la medida de lo posible el consumo eléctrico del sistema.

La preocupación por minimizar el peso de la estructura repercute en este aspecto. Con un menor consumo eléctrico de los componentes del manipulador se consigue disminuir el peso de la base al poder emplear baterías de menor tamaño. Eso afecta beneficiosamente a la estabilidad del manipulador móvil MANFRED y en consecuencia a la precisión en el desarrollo de las tareas, así como al aumento de la velocidad de movimiento lo que repercute a su vez en un incremento su productividad.

12. Adecuación del diseño a consideraciones ergonómicas y de seguridad para entornos humanos.

Aunque diseñado en materiales rígidos que posibilitan el buen desempeño del sistema, las fuerzas generadas por el manipulador, así como las velocidades

nominales de uso se han elegido de manera que, no supondrán peligro alguno para un entorno humano de trabajo.

Además se ha tenido especial cuidado en la elección de los materiales de la estructura para que no representen ninguna amenaza para el ser humano. Se ha puesto especial cuidado en seleccionar materiales que no resultasen peligrosos por su toxicidad y que tuvieran unas buenas características de disipación de calor generado por los componentes eléctricos presentes en la estructura en funcionamiento.

7.3. La nueva generación

El diseño mecánico de la nueva generación del manipulador móvil MANFRED, Figura 7.1, ha estado orientado a mejorar en la medida de lo posible todos aquellos aspectos que, si bien fueron contemplados en la primera generación, no pudieron ser optimizados. Se ha puesto especial hincapié en modificar la base con el fin de lograr una mayor robustez operacional al mismo tiempo que se lograra evitar inestabilidades e imprecisiones del sistema. Teniendo estos aspectos presentes, se ha rediseñado la base con una filosofía altamente modular con la finalidad de facilitar el acceso y el interconexión de todos los elementos que constituyen el sistema. De esta manera, se ha pretendido facilitar el cambio de componentes bien por reparación o bien por actualización de los mismos. Además el concepto de modularidad permite adaptar el elemento terminal dependiendo del tipo de tarea a realizar.

Por otra parte, como ya se argumentó en la primera generación del brazo manipulador ligero UC3M-LWR-1 presentado en esta tesis, la reducción del peso del brazo manipulador es uno de los retos presentes en este tipo de desarrollos. También se ha planteado en la segunda generación, ya que una reducción de peso conlleva un menor consumo eléctrico además de una mayor estabilidad y mayor capacidad de carga del sistema.

Otro aspecto fundamental en la nueva generación ha sido la mejora de la rigidez de la estructura. Para ello se ha buscado una distribución equilibrada del conjunto de fuerzas aplicadas en la estructura. En este mismo sentido, se ha modificado la distribución de los elementos de la base para lograr la mayor estabilidad posible.



Figura 7.1.- *Diseño de la nueva generación del manipulador móvil MANFRED (MANFRED-II).*

De manera resumida podríamos citar entre las mejoras más relevantes que se han llevado a cabo en la nueva generación del manipulador móvil MANFRED las siguientes:

1. **Modificación de la forma de la base.** La forma originalmente hexagonal, Figura 7.2, se transforma en un volumen alargado, Figura 7.3. Esto se realiza con el propósito de lograr una óptima distribución de los elementos interiores que hagan de contrapeso con el fin de mejorar la estabilidad del conjunto.

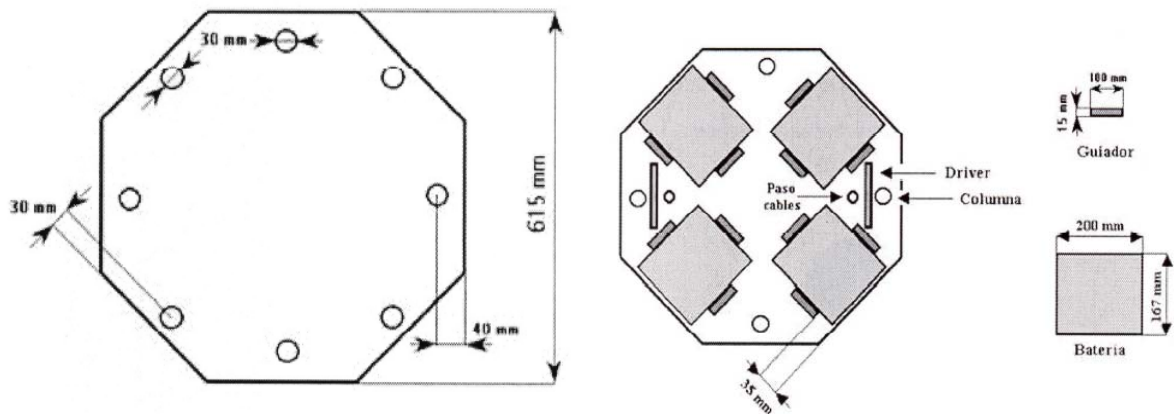


Figura 7.2.- Base del manipulador móvil MANFRED.

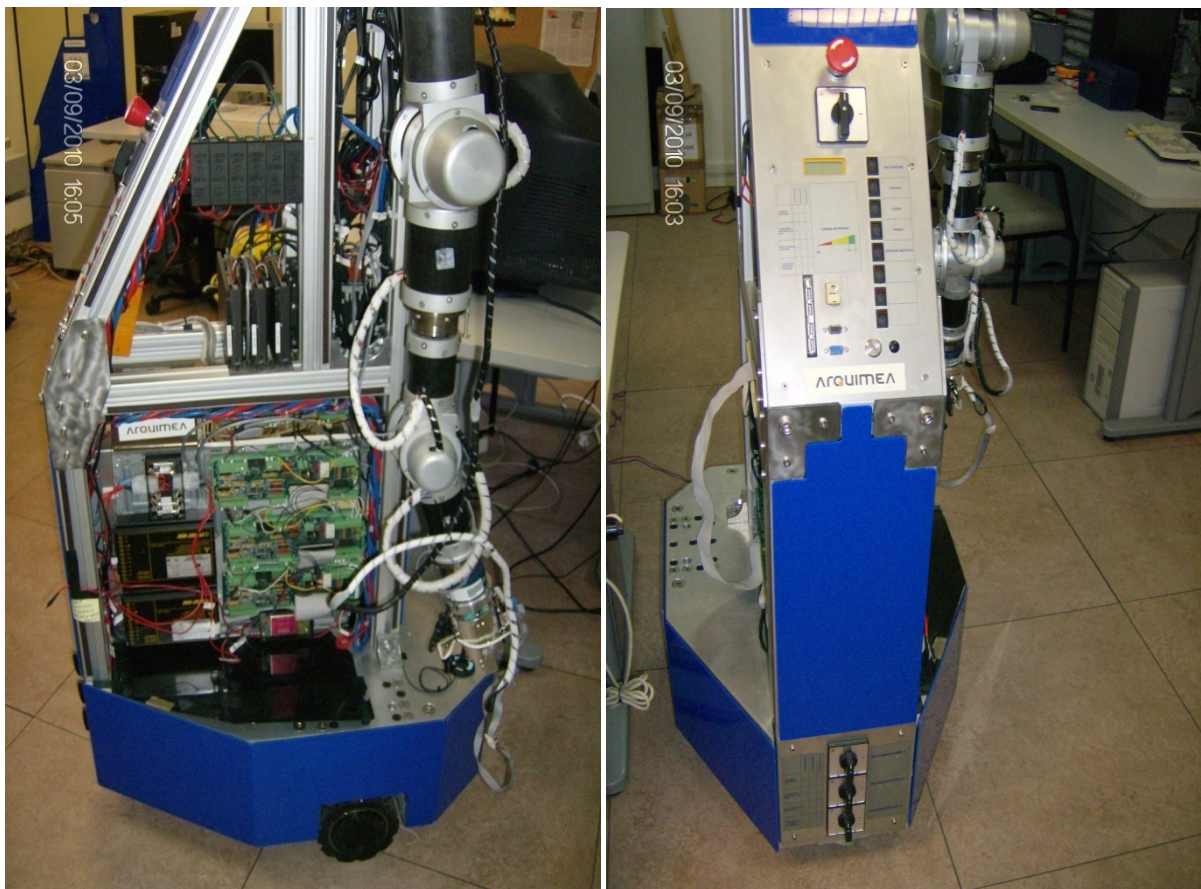


Figura 7.3.- Base de la nueva generación del manipulador móvil MANFRED (MANFRED-II).

2. **Modificación de la altura de la plataforma inferior de la base.** Ésta ha sido modificada situándose a 80 mm del suelo. Con esta modificación se consigue bajar el centro de gravedad del sistema de manera que mejora notablemente su estabilidad.
3. **Mejora en la rigidez de la estructura.** Esta mejora ha sido lograda mediante la prolongación del mástil soporte hasta la placa inferior de la base, fijándolo también a la placa superior de la misma. Además, se han colocado más “columnas” de unión entre las placas superior e inferior. De esta manera se pretende simular una estructura reticular que le confiere una mayor rigidez a la estructura.
4. **Mejora en la accesibilidad a los elementos del sistema.** Para ello se han desarrollado carcasas independientes de fácil retirada y colocación, Figura 7.4. De esta manera se agiliza el acceso a cualquier parte del sistema para cualquier tipo de ajuste.



Figura 7.4.- Carcasas extraíbles (en azul) para la mejora de acceso a los elementos del sistema de la nueva generación del manipulador móvil MANFRED (MANFRED-II).

5. **Mejora en las tareas de reparación y/o sustitución de piezas.** También se ha diseñado un acceso interno a través del mástil hasta la placa inferior. Este acceso es rápido y facilita el cambio o la incorporación de elementos.
6. **Adaptación del sistema a condiciones de reposo y mejoras en la seguridad del sistema.** Cuando el brazo se encuentra en reposo, no alcanza a chocar ni interferir con la base. Además si en algún caso ocurriera que el sistema quedara sin tensión, el brazo caería libremente sin dañarse y sin dañar a la base imposibilitando el choque de ambas estructuras. En este mismo sentido, mejorando la seguridad, se han ubicado todos los interruptores, botones y setas de seguridad en un único panel de forma que se facilite y agilice el acceso a cada elemento de control y seguridad.
7. **Previsión de evolución del diseño.** Se ha tenido en cuenta la incorporación de un segundo brazo manipulador ligero, de manera que todo ha sido diseñado y pensado para facilitar todo lo posible su futura implantación de forma rápida y sencilla.

Por otra parte, el diseño de los elementos del brazo manipulador ligero ha sido concebido para poder ser adaptado a ambos lados del manipulador con ligeras modificaciones en el ensamblaje de las piezas. Esto permite superar las limitaciones que pudieran existir teniendo sólo el brazo ligero adaptado a un único lado y al mismo tiempo le proporcionaría una mayor versatilidad al manipulador móvil MANFRED. Recordemos que en la tarea de apertura de la puerta vimos que existían limitaciones según la posición en la que estuviera situada la base del manipulador al producirse choques del brazo con el marco de la puerta, lo que conllevaba una limitación en el número de grados de apertura que podía abrirse la puerta desde las posiciones más limitadas (posiciones 1, 2 y 5 de las simulaciones del capítulo V, apartado 5.4.5, Figura 5.43).

8. **Diseño de un sistema de regulación de altura de las ruedas motrices.** Este sistema permite calibrar de manera precisa la altura de las ruedas motrices lo que garantiza una óptima adecuación a las condiciones en el desempeño de sus tareas. Este sistema se encuentra formado por dos piezas (una superior y otra inferior) de manera que la pieza superior se encuentra anclada a la placa superior de la estructura de la base. Por su parte, la pieza inferior se encuentra anclada mediante tornillos pasantes a la pieza superior y sustentando la rueda. De esta forma, mediante el ajuste manual de los tornillos que unen ambas piezas, podemos ajustar la altura de las ruedas.
9. **Diseño de un sistema de visión estéreo.** Este sistema permite dotar al robot de una mayor y mejor capacidad de movimiento ya que le proporciona un conocimiento más detallado del entorno permitiéndole operar sin riesgos. La visión estéreo es uno de los procedimientos que existen para obtener información acerca de la estructura tridimensional de una escena y por tanto de las distancias a los objetos que estén situados en ella. Este sistema está formado por dos cámaras cuyos ejes ópticos son paralelos y están separados por una distancia en una única dimensión, la dimensión horizontal, por lo que un punto de una escena captado por las dos cámaras difiere únicamente en su componente horizontal.

7.4. Líneas futuras de investigación

Esta tesis abre como posibles líneas futuras de investigación:

1. **Incorporación de nuevas tareas a desarrollar.** Dentro de esta línea se situarían la incorporación modificaciones y simulaciones para adaptar el manipulador ligero a la realización de diferentes tareas como podría ser la cooperación con personas discapacitadas mediante el alcance de objetos.
2. **Incrementos de capacidades de carga.** Esta línea estaría estrechamente relacionada con la anterior ya que lograr un incremento de la capacidad de carga le confiere al manipulador ligero una mayor versatilidad puesto que ampliaría el rango de tareas que podría realizar.

En este sentido, sería interesante alcanzar ratios carga/peso de 1:1 (frente a 1:4 logrado en esta tesis) para lo cual se podría investigar la utilización de tecnologías modernas de reductores y actuadores que presentaran mejores características y un bajo peso.



- 3. Reducción de peso del brazo manipulador.** Nuevamente esta línea de investigación está estrechamente relacionada con las anteriores ya que como se ha comentado con anterioridad, una disminución del peso de la estructura del manipulador repercute en un aumento de la capacidad de carga puesto que el par que necesita ser generado por los motores va en función del peso total de la estructura.

Por otra parte, el desarrollo que en los últimos años está experimentando el campo de la ingeniería de materiales especialmente en el sector de la aerodinámica en el que cada vez surgen nuevos materiales con unas características elevadas de rigidez, bajo peso y fácil mecanizado, hace pensar que la aplicación de estos nuevos materiales en la fabricación del brazo manipulador ligero podría repercutir en una reducción considerable de su peso. En este sentido, podría valorarse el empleo de este tipo de materiales estudiando todos aquellos parámetros que condicionan su aplicación en este desarrollo, es decir sin perder de vista las condiciones de seguridad que debe de presentar para los humanos.

- 4. Implantación de un segundo brazo y estudio del impacto en el control coordinado de todos los grados de libertad.** La implantación de un segundo brazo en el manipulador móvil le otorgaría una apariencia más humana al diseño. Además, esto tendría un impacto en la estabilidad del manipulador móvil MANFRED equilibrando el peso. Para ello sería necesario realizar un estudio de control coordinado de todos los grados de libertad del sistema.
- 5. Diseñar el torso de MANFRED con algún grado de libertad (GDL).** Esto permitiría tener un diseño más versátil del manipulador móvil MANFRED pudiendo realizar un mayor número de tareas al incrementar el espacio de trabajo del manipulador (su alcance).
- 6. Incrementar el número de GDL en el manipulador ligero.** Hay que recordar que el manipulador ligero desarrollado en esta tesis consta de un total de 6 grados de libertad, mientras que el brazo humano posee 7 grados de libertad. Por tanto si se incrementara el número de grados de libertad del manipulador ligero, se podría aumentar el rango de trabajo del manipulador haciéndolo más versátil y eficiente en el desarrollo de tareas típicamente humanas.
- 7.** Finalmente otra línea de investigación importante surge de la necesidad de crear **un elemento terminal más versátil** de manera que pueda adaptarse a distintos tipos de tareas de forma eficiente.

ANEXOS

Se presentan los siguientes anexos:

Anexo I: Ergonomía del brazo humano.

Anexo III: Configuración del brazo manipulador ligero UC3M-LWR-1.

Nota: El resto de los anexos (II, IV, V & VI) están incluidos en el CD adjunto.

ANEXO I

ERGONOMÍA DEL BRAZO HUMANO

En este anexo se presentan los conceptos relacionados con el estudio de la ergonomía del brazo humano. Dicho estudio ha sido necesario realizarlo para poder dotar de apariencia antropomórfica al brazo manipulador ligero, para así poder desarrollar las tareas de forma eficaz en entornos humanos.

Se describen cada uno de los grados de libertad presentes en la ergonomía del brazo humano junto con la definición de movimientos que dichos grados de libertad permiten realizar.

El miembro superior del cuerpo humano, el brazo, tiene un total de 7 GDL hasta llegar a la muñeca. Tres de ellos se sitúan en el hombro, otro más en el codo y tres más en la muñeca. A continuación se detallan los tipos de movimientos asociados a estos grados de libertad. A menos que se indique lo contrario, se tomará como posición de referencia la de **posición erguida con los brazos paralelos al tronco**. Todos los rangos articulares y los movimientos estarán referidos a esa posición de referencia inicial.

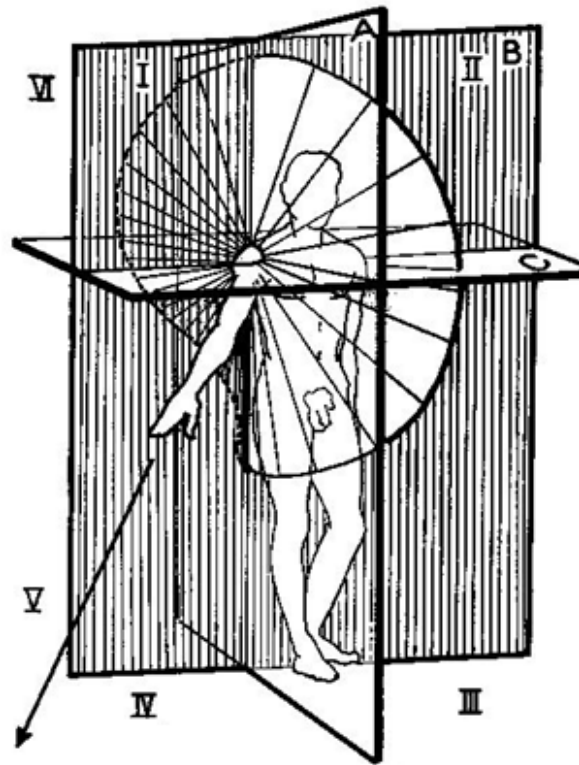


Figura A-I.1.- Ejes y planos de movimiento del hombro: A –plano sagital-, B –plano frontal-, C –plano horizontal-. Los ejes se encuentran en las intersecciones: AB –eje vertical-, BC –eje transversal-, AC –eje antero-posterior-.

A.1.- HOMBRO: 3 GDL

El hombro es la articulación dotada de mayor movilidad del cuerpo humano [69]. Esto es así debido a que sus movimientos se desarrollan en tres ejes, Figura A-I.1:

a) Eje Transversal

Este eje dirige los movimientos contenidos en el plano sagital, de manera familiar podríamos decir el plano de perfil. Los movimientos asignados a este eje son, Figura A-I.2:

a.1.) *flexión*: movimiento de elevación del brazo en el plano sagital en la dirección de la mirada, por ejemplo el movimiento desarrollado por un nadador de estilo espalda.

a.2.) *extensión*: movimiento de elevación del brazo en el plano sagital en dirección hacia su parte anterior – espalda –; por ejemplo es el movimiento

típico de un atleta en las carreras de relevos cuando se dispone a recoger el testigo.

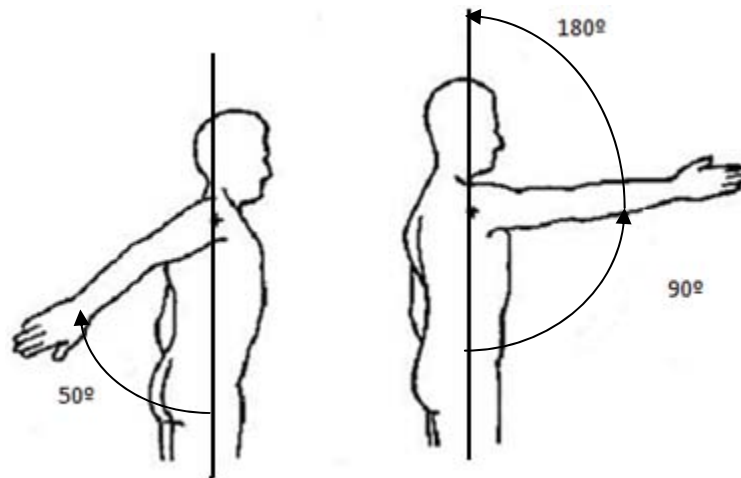


Figura A-I.2.- Movimientos en torno al eje transversal. Izquierda, extensión. Derecha, flexión.

b) Eje Antero-posterior

Este eje es el de giro de los movimientos contenidos en el plano frontal, de manera familiar plano de frente. Los movimientos asignados a este eje son, Figura A-I.3:

b.1.) aducción: sólo posible con una posición del brazo alejada de la posición de referencia, siendo:

b.1.1.) aducción y extensión: pasar el brazo por la parte anterior del sujeto. Familiarmente es el movimiento efectuado cuando se esconde algo detrás de la espalda, Figura A-I.3 Izquierda.

b.1.2.) aducción y flexión: pasar el brazo por la parte delantera del sujeto. Familiarmente es el movimiento realizado al limpiar una superficie horizontal en la dirección contraria al brazo utilizado, Figura A-I.3 derecha.

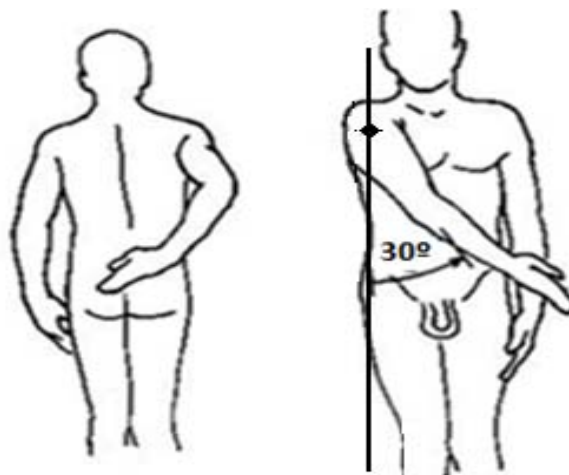


Figura A-I.3.- Movimientos de abducción. Aducción y extensión, izquierda. Aducción y flexión, derecha.

b.2.) *abducción*: separación con respecto al tronco en el plano frontal. Es el movimiento que emplearía alguien en una conferencia para levantar la mano y pedir la palabra, Figura A-I.4.

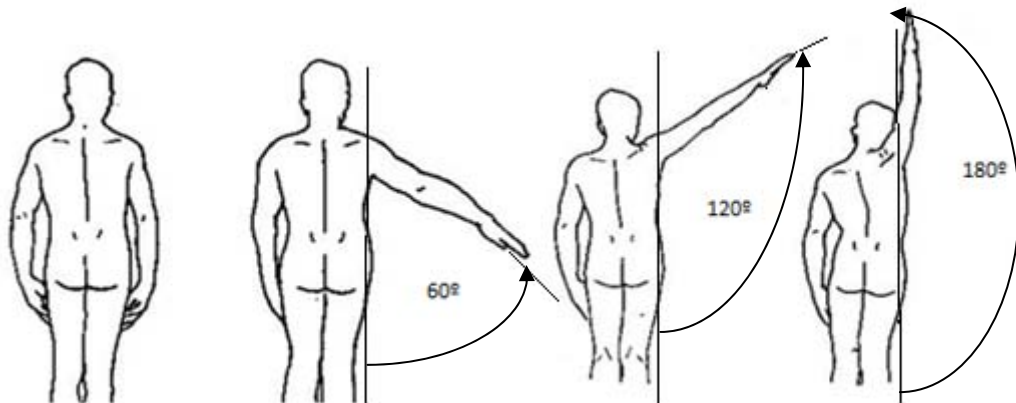


Figura A-I.4.- Secuencia del movimiento de abducción.

c) Eje Vertical

Es el eje en torno al cual se ejecutan los movimientos contenidos en el plano horizontal, es decir, aquel que sólo podría ser visto desde encima del sujeto. Hay dos grupos de movimientos según sea la posición de referencia elegida. Estos dos grupos deben ser expuestos para analizar a posteriori los rangos articulares:

c.1.) *rotación sobre el eje longitudinal*: la posición de referencia elegida en este grupo es con el brazo superior en paralelo al tronco, mientras que el antebrazo está flexionado por el codo en 90° con el eje natural de la posición de reposo. De esta manera, el eje del brazo superior coincide con el de giro. Sus movimientos son:

c.1.1.) *rotación externa*: el brazo va desde la posición de reposo en dirección a la espalda, respetando el eje de giro vertical, Figura A-I.5 izquierda.

c.1.2.) *rotación interna*: el dorso de la mano queda contra la espalda por detrás de esta. No es un movimiento continuo sino que sirve para establecer el rango articular del eje vertical en un movimiento antagónico con el anterior, Figura A-I.5 derecha y arriba.

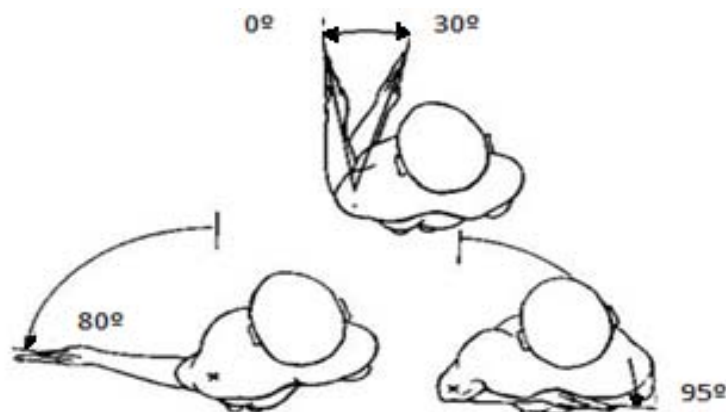


Figura A-I.5.- Rotaciones longitudinales. Izquierda, rotación externa. Derecha y arriba, rotaciones internas.

c.2.) *rotaciones horizontales*: aquí la posición de referencia es la de brazo completamente extendido a 90° siguiendo un movimiento de abducción. Familiarmente es la indicación que un guarda de tránsito hace cuando desea que no circulen los coches que le vengan por la espalda.

c.2.1.) *flexión horizontal*: Desde la posición de referencia es trasladar el brazo hacia el lado contrario, de manera que el sujeto pueda verse la mano, Figura A-I.6 arriba.

c.2.2.) *extensión horizontal*: Desde la posición de referencia es llevar el brazo a su lado, de manera que la mano quede lo más cerca posible de la espalda, Figura A-I.6 abajo.

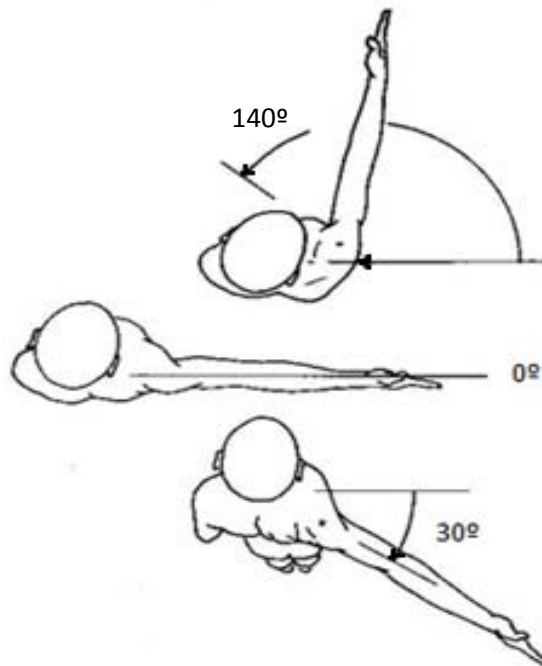


Figura A-I.6.- Rotaciones horizontales. Flexión horizontal, arriba. Posición de referencia, centro. Extensión horizontal, abajo.

A.2.- CODO: 1 GDL

Entendemos como tal el movimiento de flexión-extensión. Es posible tomar como parte de los grados de libertad del codo el movimiento de pronosupinación [63], ya que envuelve a la articulación radio-cubital superior además de a la inferior. Se ha preferido la consideración de tomar la pronosupinación como tercer grado de libertad de la muñeca, por ser la opción más común utilizada en las fuentes.

- flexión*: es el movimiento que lleva el antebrazo a entrar en contacto con el brazo. Es el movimiento típico de un levantador de pesas que ejercita sus músculos bíceps. Tendrá distintos rangos articulatorios según el movimiento sea pasivo o activo, Figura A-I.7 izquierda.
- extensión*: es el movimiento antagonista del anterior, que lleva al brazo a la posición de referencia y más allá si hay laxitud, Figura A-I.7 derecha.

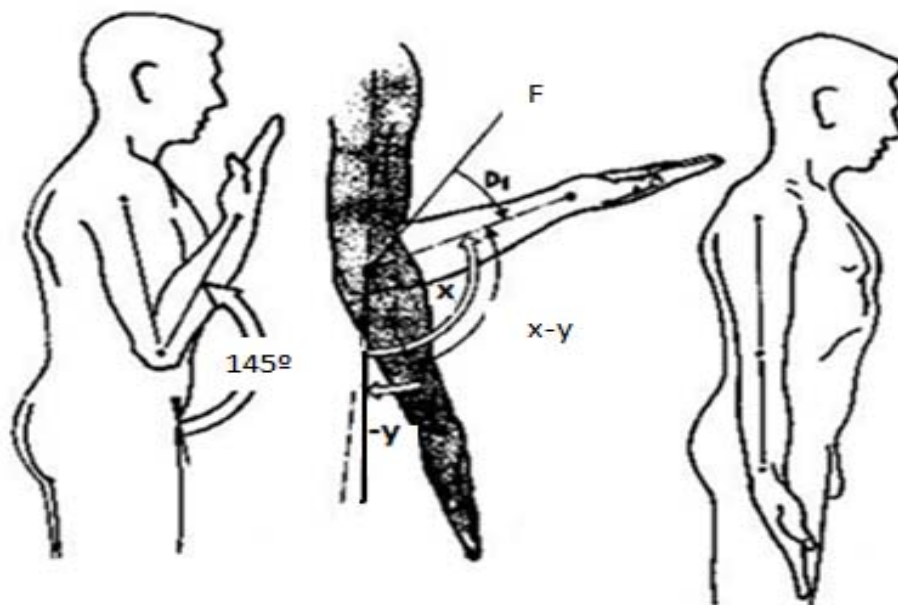


Figura A-I.7.- Movimientos de flexión y extensión. Izquierda, flexión. Derecha, extensión en posición de referencia.

A.3.- MUÑECA: 3 GDL

A.3.1.- Pronosupinación

La pronosupinación es el movimiento de rotación del antebrazo en torno a su eje longitudinal. Ese movimiento precisa la intervención de la asociación mecánica de dos articulaciones: la radio-cubital superior y la inferior. Al intervenir la inferior es tomado como un grado de libertad de la muñeca.

La posición intermedia será la del brazo superior pegado al tronco y el antebrazo levantado 90° respecto al eje longitudinal del brazo superior. La mano estará situada tal que el pulgar esté apuntando hacia arriba. La posición recuerda a la actitud de dar la mano en los países occidentales.

- a) *supinación*: es el movimiento de giro del antebrazo sobre su eje longitudinal tal que desde la posición de referencia la palma de la mano queda hacia arriba y el pulgar de la mano en el lado más alejado del torso, Figura A-I.8 izquierda. La postura final recuerda la de alguien que espera recibir algo en la palma de la mano.
- b) *pronación*: es el movimiento antagónico. Desde la posición de referencia, el pulgar queda pegado al torso, Figura A-I.8 derecha. Recuerda vagamente a la postura que la mano toma cuando se va a acariciar algo.

A.3.2.- Ejes Transversal y Antero-posterior

La posición de referencia es el antebrazo en supinación completa, es decir, con la palma hacia arriba. De esta manera quedan definidos dos ejes: transversal y antero-posterior, Figura A-I.9. Hay que añadir que la mayoría de movimientos de la muñeca no incluyen a la vez estos dos grados de libertad, por lo que sería aconsejable en un diseño de

manipulador, el que una sola articulación se encargue de desarrollar ambos movimientos, teniendo así dos grados de libertad ficticios.

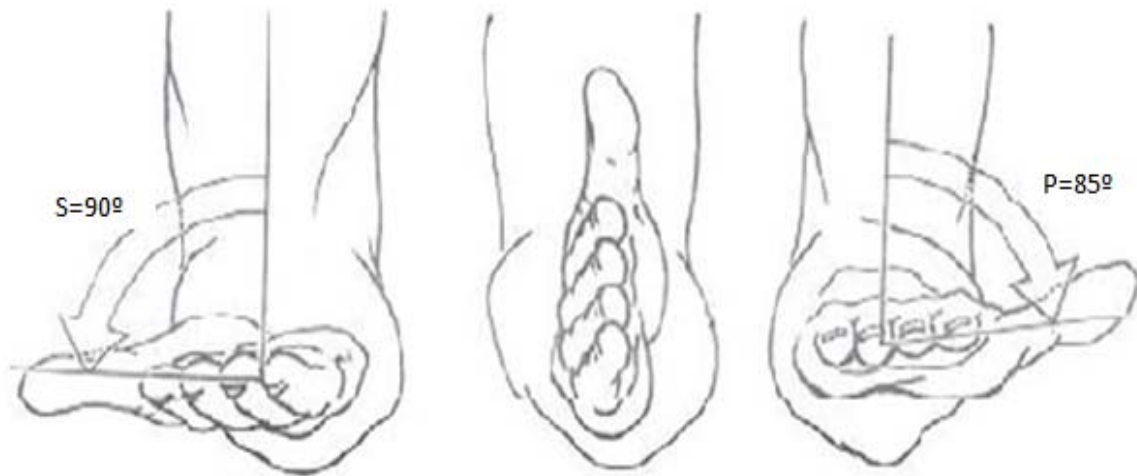


Figura A-I.8.- Movimientos de pronosupinación. Izquierda, supinación. Centro, posición de referencia. Derecha, pronación.

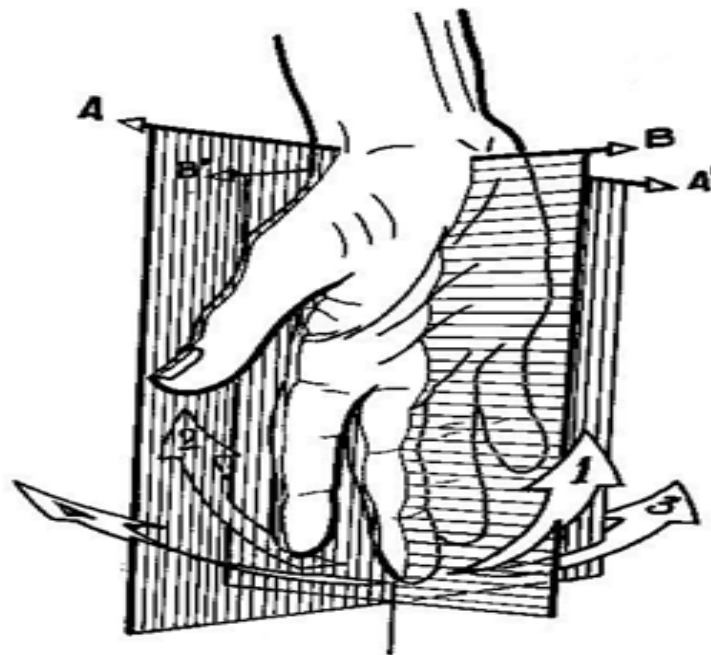


Figura A-I.9.- Ejes y planos de movimiento de la muñeca. Eje AA', transversal. Eje BB' antero-posterior.

Según giro en cada eje quedan definidos los dos grados de libertad.

A.3.2.1- Flexión -Extensión- Eje transversal

a) *flexión*: es el movimiento en el que la palma queda hacia arriba, estando el eje transversal de giro en la muñeca, Figura A-I.10 izquierda.

b) *extensión*: el antagonista. La palma queda hacia abajo, Figura A-I.10 derecha.

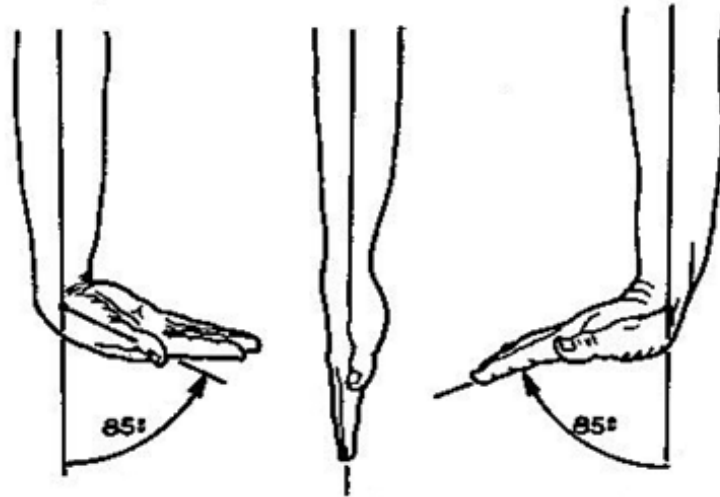


Figura A-I.10.- Movimientos en torno al eje transversal. Izquierda, flexión. Centro, posición de referencia. Derecha, extensión.

A.3.2.2.- Aducción -Abducción- Eje antero-posterior

- a) **aducción:** considerando el eje de giro en la muñeca, es el giro en torno al eje antero-posterior que deja el pulgar apuntando hacia el suelo, Figura A-I.11 derecha. Nótese que la cantidad de grados de giro varía con respecto a qué dedo esté tomada la medida. Estando el eje en la muñeca y la línea de referencia en el dedo medio, el ángulo está entre los 40 y 45 grados.
- b) **abducción:** el antagonista del anterior. El giro ocasiona que sea el dedo meñique el que queda apuntando al suelo, Figura A-I.11 izquierda.

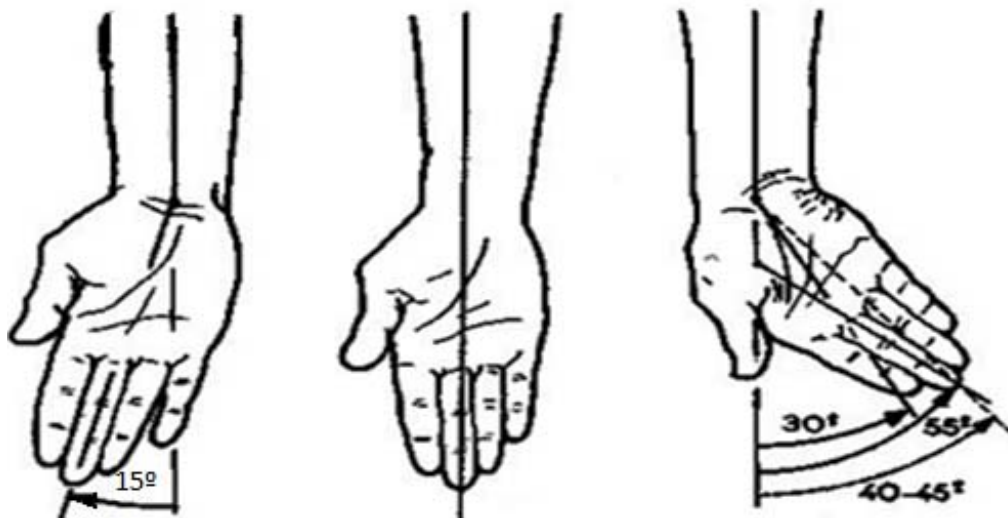


Figura A-I.11.- Movimientos en torno al eje antero-posterior. Izquierda, abducción. Centro, posición de referencia. Derecha aducción.

ANEXO III

CONFIGURACIÓN DEL BRAZO MANIPULADOR LIGERO UC3M-LWR-1

En este anexo se adjuntan las tablas que recogen, para cada articulación, la información de los valores de referencia de los materiales, así como la masa y el volumen de cada elemento calculado con SolidWorks. Estos valores han sido empleados en las simulaciones de los análisis tanto cinemático como dinámico.

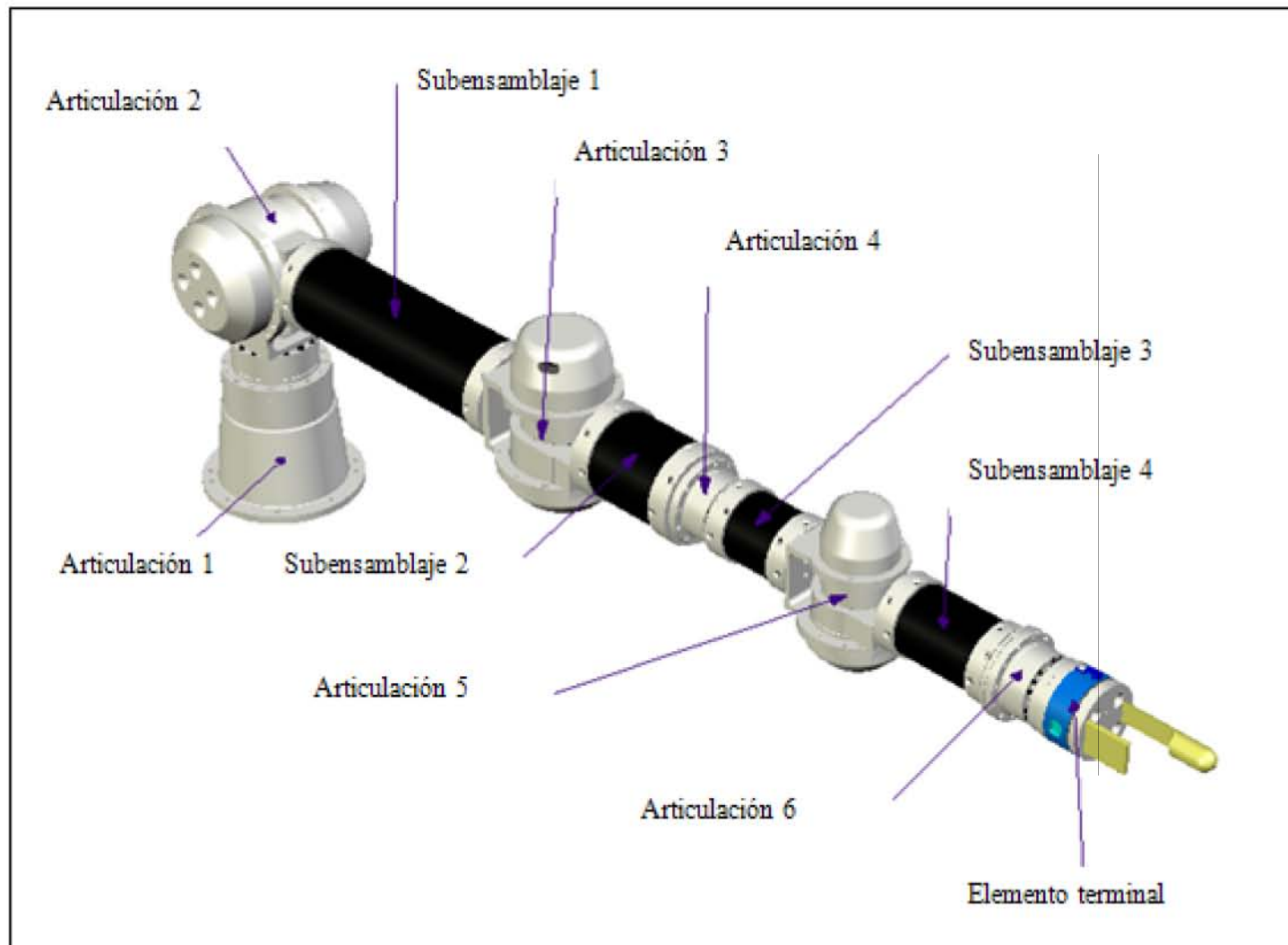


Figura A-III.1.- Esquema de la configuración del brazo manipulador UC3M-LWR-1.

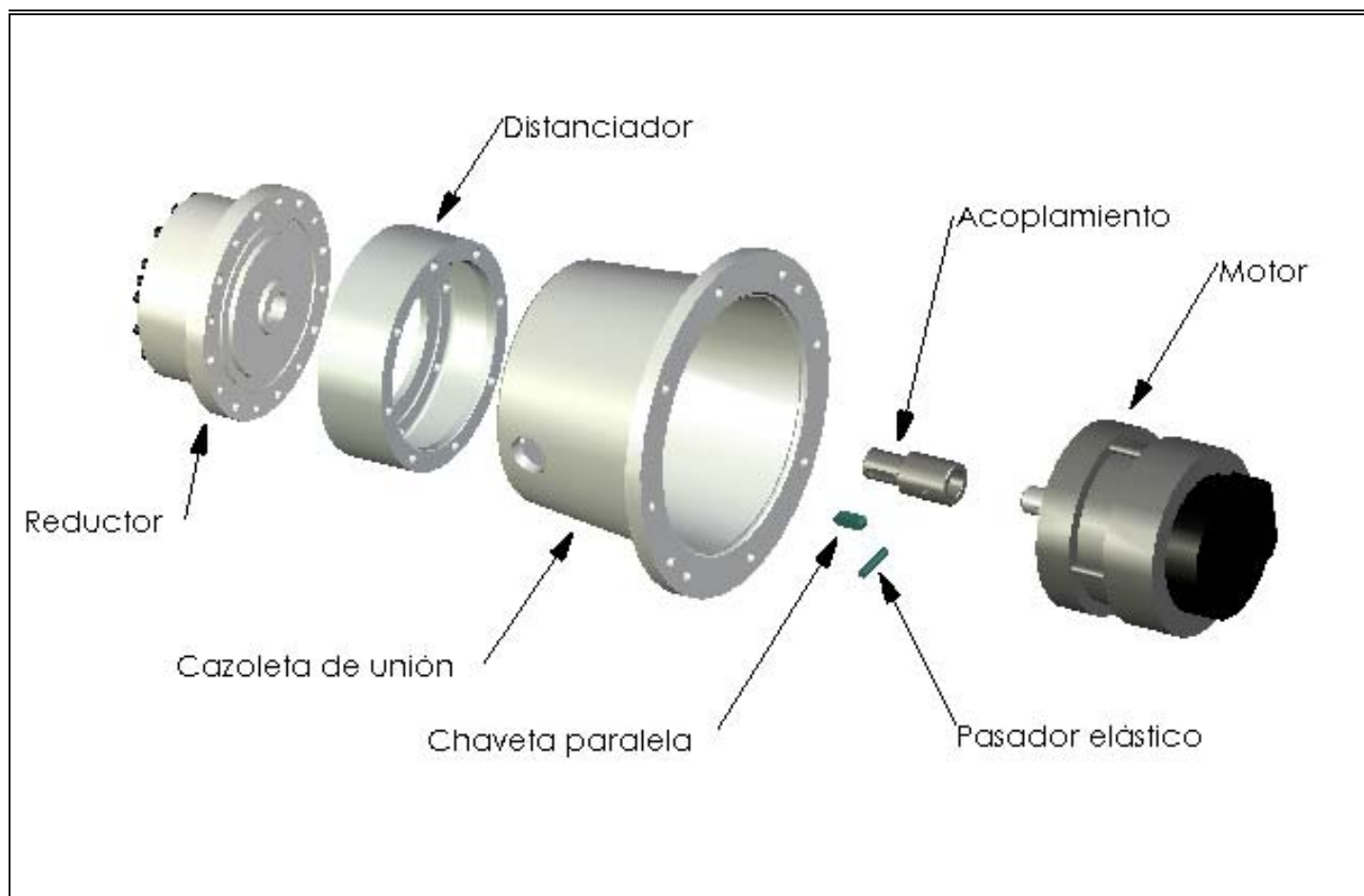


Figura A-III.2.- Vista explosionada de la articulación 1.



ARTICULACIÓN 1								
Carcasa							Motor	Reductor
Número	Cantidad	Designación	Material	Densidad	Volumen	Masa	Peso	Peso
				g/cm3	cm3	g	g	g
1	1	Cazoleta de unión	Aluminio	2,7	294,467	795,061	1300	1500
2	1	Acoplamiento	Acero	7,8	7,849	61,222		
3	1	Pasador elástico	Acero	7,8	0,251	1,958		
4	1	Chaveta paralela	Acero	7,8	0,348	2,714		
5	1	Distanciador	Aluminio	2,7	49,736	134,287		
Subtotal						995,243	1300	1500
TOTAL								3795,243

Tabla A-III.1.- Materiales y pesos de los componentes de la primera articulación.

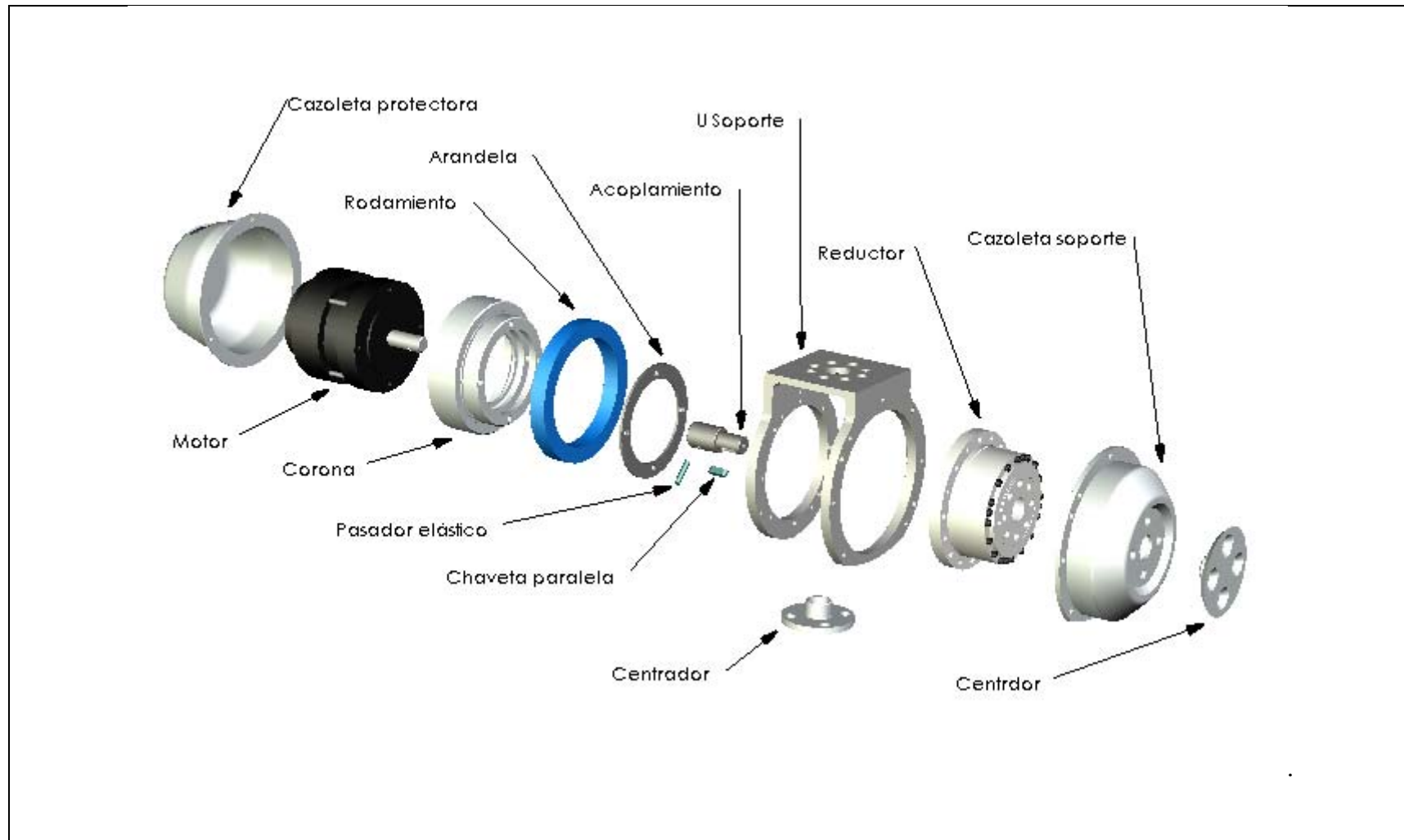


Figura A-III.3.- Vista explosionada de la articulación 2.



ARTICULACIÓN 2								
Carcasa							Motor	Reductor
Número	Cantidad	Designación	Material	Densidad	Volumen	Masa	Peso	Peso
				g/cm3	cm3	g		
1	1	Centrador	Aluminio	2,7	11,512	31,082	1300	1500
2	1	U Soporte	Aluminio	2,7	125,873	339,857		
3	1	Corona	Aluminio	2,7	80,706	217,906		
4	1	Rodamiento	Variado	-	-	300,000		
5	1	Arandela	Aluminio	2,7	5,409	14,604		
6	1	Acoplamiento	Acero	7,8	7,849	61,222		
7	1	Pasador elástico	Acero	7,8	0,251	1,958		
8	1	Chaveta paralela	Acero	7,8	0,348	2,714		
9	1	Cazoleta soporte	Aluminio	2,7	104,235	281,435		
10	1	Centrador	Aluminio	2,7	14,634	39,512		
11	1	Cazoleta protectora	Aluminio	2,7	37,684	101,747		
Subtotal						1392,038	1300	1500
TOTAL								4192,038

Tabla A-III.2.- Materiales y pesos de los componentes de la segunda articulación.

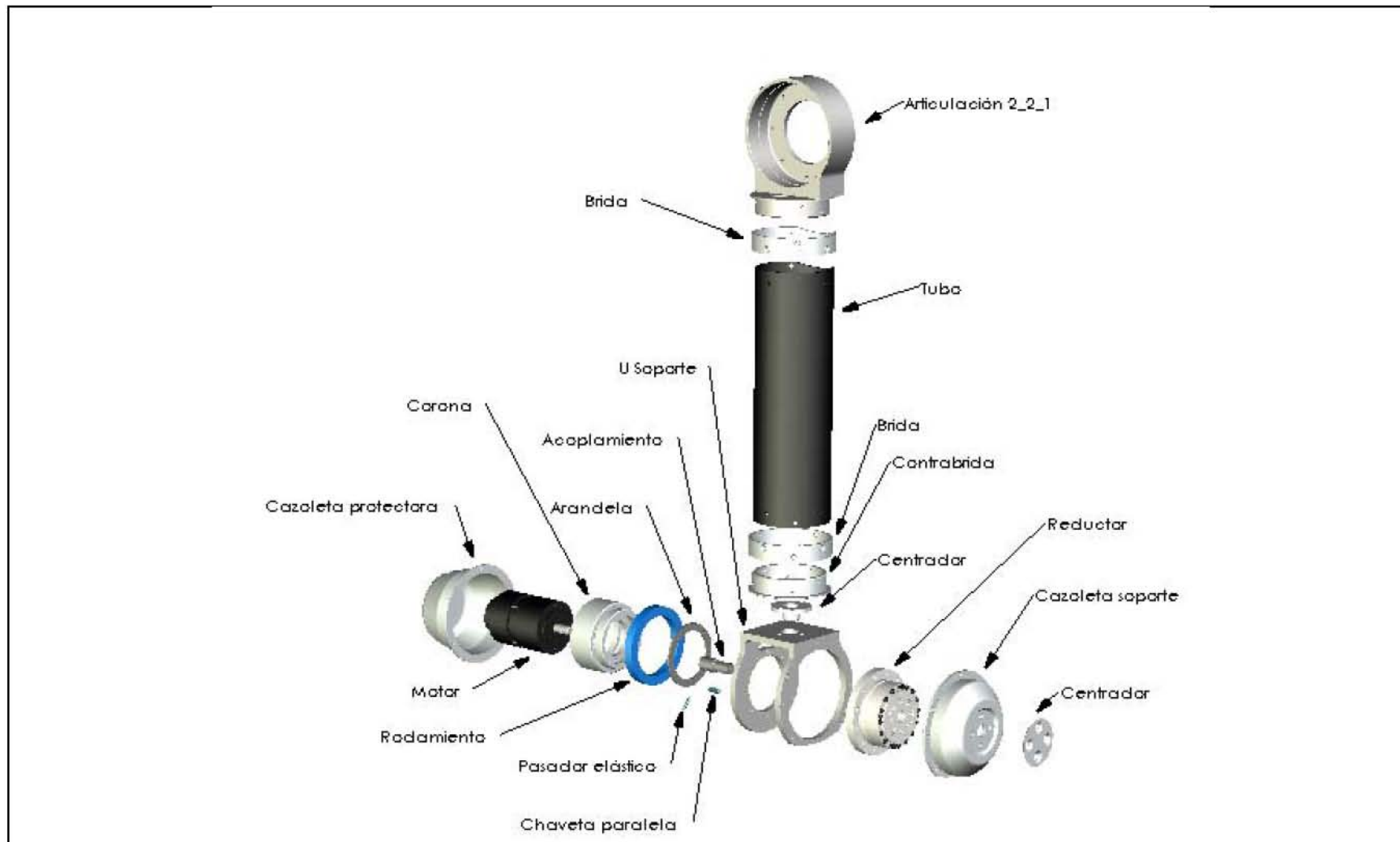


Figura A-III.4.- Vista explosionada del sub-ensamblaje 1.



SUBENSAMBLAJE 1								
Brazo -tubos y bridas-								
Carcasa							Motor	Reductor
Número	Cantidad	Designación	Material	Densidad	Volumen	Masa	Peso	Peso
				g/cm3	cm3	g	g	g
1	1	Articulación	Aluminio	2,7	179,742	485,303	No existe	No existe
2	1	Tubo	Fibra de carbono	1,6	130,166	208,266		
3	2	Brida	Aluminio	2,7	26,918	72,679		
4	1	Contra-brida	Aluminio	2,7	38,527	104,023		
Subtotal						870,271		
Articulación 3								
Carcasa							Motor	Reductor
Número	Cantidad	Designación	Material	Densidad	Volumen	Masa	Peso	Peso
				g/cm3	cm3	g	g	g
1	1	Centrador	Aluminio	2,7	6,103	16,478	641	980
2	1	U Soporte	Aluminio	2,7	104,893	283,211		
3	1	Corona	Aluminio	2,7	54,605	147,434		
4	1	Rodamiento	Variado	-	-	140,000		
5	1	Arandela	Aluminio	2,7	2,999	8,097		
6	1	Acoplamiento	Acero	7,8	4,073	31,769		
7	1	Chaveta paralela	Acero	7,8	0,106	0,827		
8	1	Pasador elástico	Acero	7,8	0,226	1,763		
9	1	Cazoleta soporte	Aluminio	2,7	65,363	176,480		
10	1	Centrador	Aluminio	2,7	5,064	13,673		
11	1	Cazoleta protectora	Aluminio	2,7	32,353	87,353		
Subtotal						767,085	641	980
TOTAL								3258,356

Tabla A-III.3.- Materiales y pesos de los componentes del sub-ensamblaje 1.

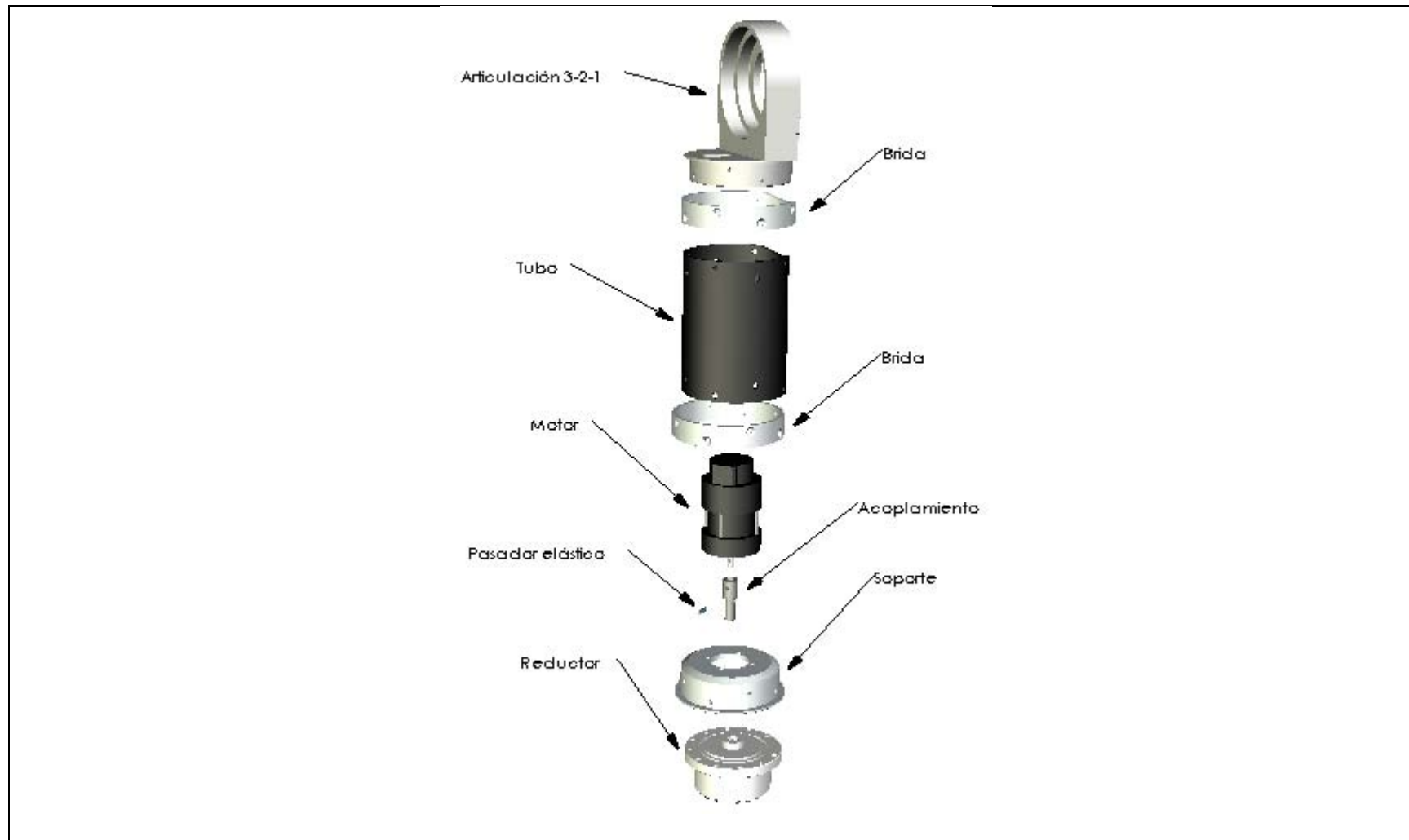


Figura A-III.5.- Vista explosionada del sub-ensamblaje 2.



SUBENSAMBLAJE 2								
<u>Ante-Brazo 1 -tubos y bridas-</u>								
Carcasa							Motor	Reductor
Número	Cantidad	Designación	Material	Densidad	Volumen	Masa	Peso	Peso
				g/cm3	cm3	g	g	g
1	1	Articulación	Aluminio	2,7	144,767	390,871	No existe	No existe
2	1	Tubo	Fibra de carbono	1,6	52,589	84,142		
3	2	Brida	Aluminio	2,7	26,918	72,679		
4	1	Soporte	Aluminio	2,7	46,83	126,441		
Subtotal						674,133		
<u>Articulación 4</u>								
Carcasa							Motor	Reductor
Número	Cantidad	Designación	Material	Densidad	Volumen	Masa	Peso	Peso
				g/cm3	cm3	g	g	g
1	1	Acoplamiento	Acero	7,8	2,209	17,230	344	640
2	1	Pasador elástico	Acero	7,8	0,085	0,663		
Subtotal						17,893	344	640
TOTAL								1676,026

Tabla A-III.4.- Materiales de los componentes del sub-ensamblaje 2.

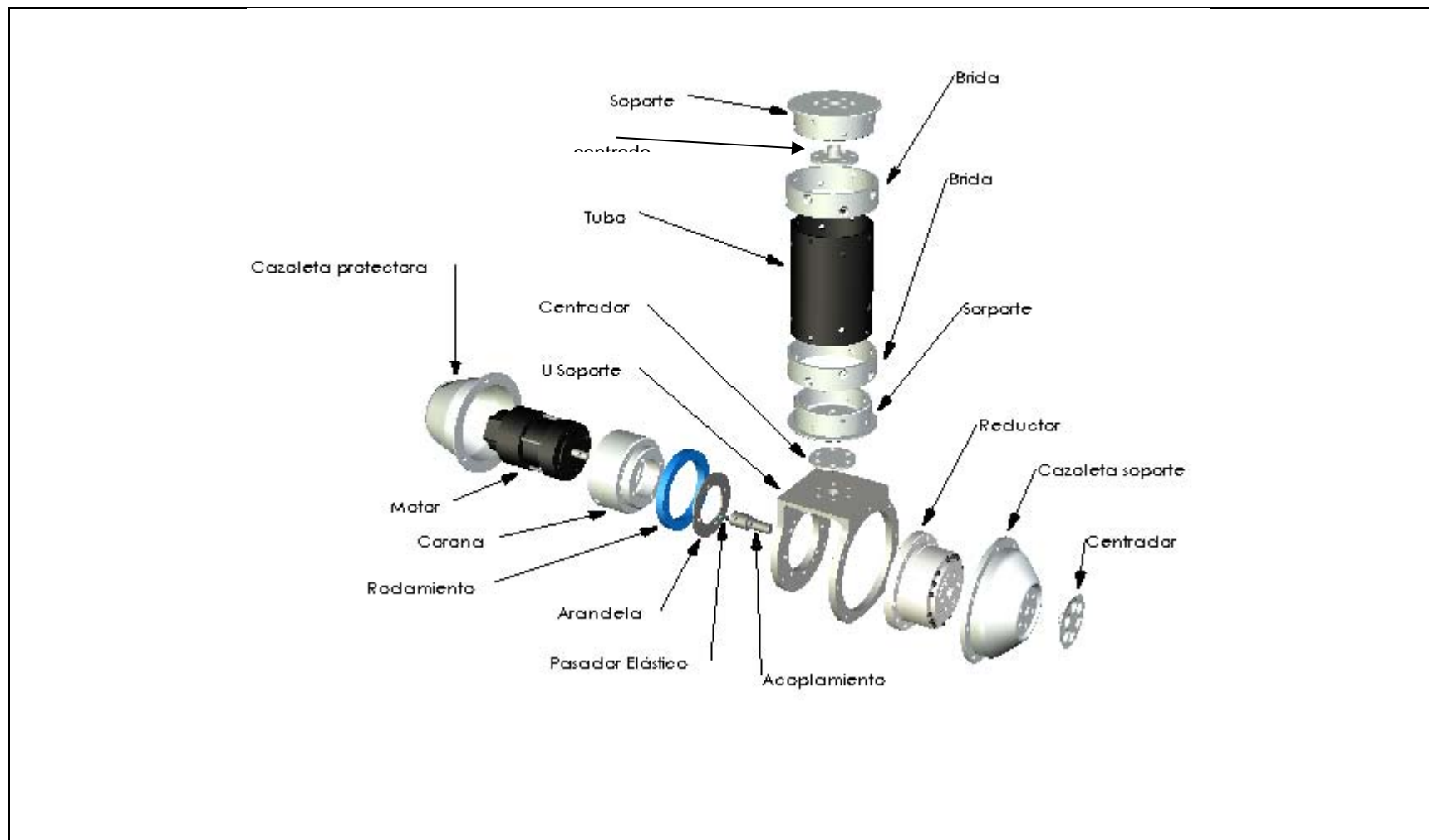


Figura A-III.6.- Vista explosionada del sub-ensamblaje 3.



SUBENSAMBLAJE 3								
Ante-Brazo 2 -tubos y bridas-								
Carcasa							Motor	Reductor
Número	Cantidad	Designación	Material	Densidad	Volumen	Masa	Peso	Peso
				g/cm3	cm3	g	g	g
1	2	Soporte	Aluminio	2,7	43,558	117,607	No existe	No existe
2	1	Centrador	Aluminio	2,7	2,45	6,615		
3	2	Brida	Aluminio	2,7	21,918	59,179		
4	1	Tubo	Fibra de carbono	1,6	31,616	50,586		
5	1	Centrador	Aluminio	2,7	2,383	6,434		
Subtotal						240,420		
Articulación 5								
Carcasa							Motor	Reductor
Número	Cantidad	Designación	Material	Densidad	Volumen	Masa	Peso	Peso
				g/cm3	cm3	g	g	g
1	1	U Soporte	Aluminio	2,7	57,288	154,678	344	640
2	1	Corona	Aluminio	2,7	32,413	87,515		
3	1	Rodamiento	Variado	-	-	80,000		
4	1	Arandela	Aluminio	2,7	2,027	5,473		
5	1	Acoplamineto	Acero	7,8	2,209	17,230		
6	1	Pasador elástico	Acero	7,8	0,085	0,663		
7	1	Cazoleta protectora	Aluminio	2,7	19,635	53,015		
8	1	Cazoleta soporte	Aluminio	2,7	43,221	116,697		
9	1	Centrador	Aluminio	2,7	2,733	7,379		
Subtotal						442,649	344	640
TOTAL								1667,069

Tabla A-III.5.- Materiales y pesos de los componentes del sub-ensamblaje 3.

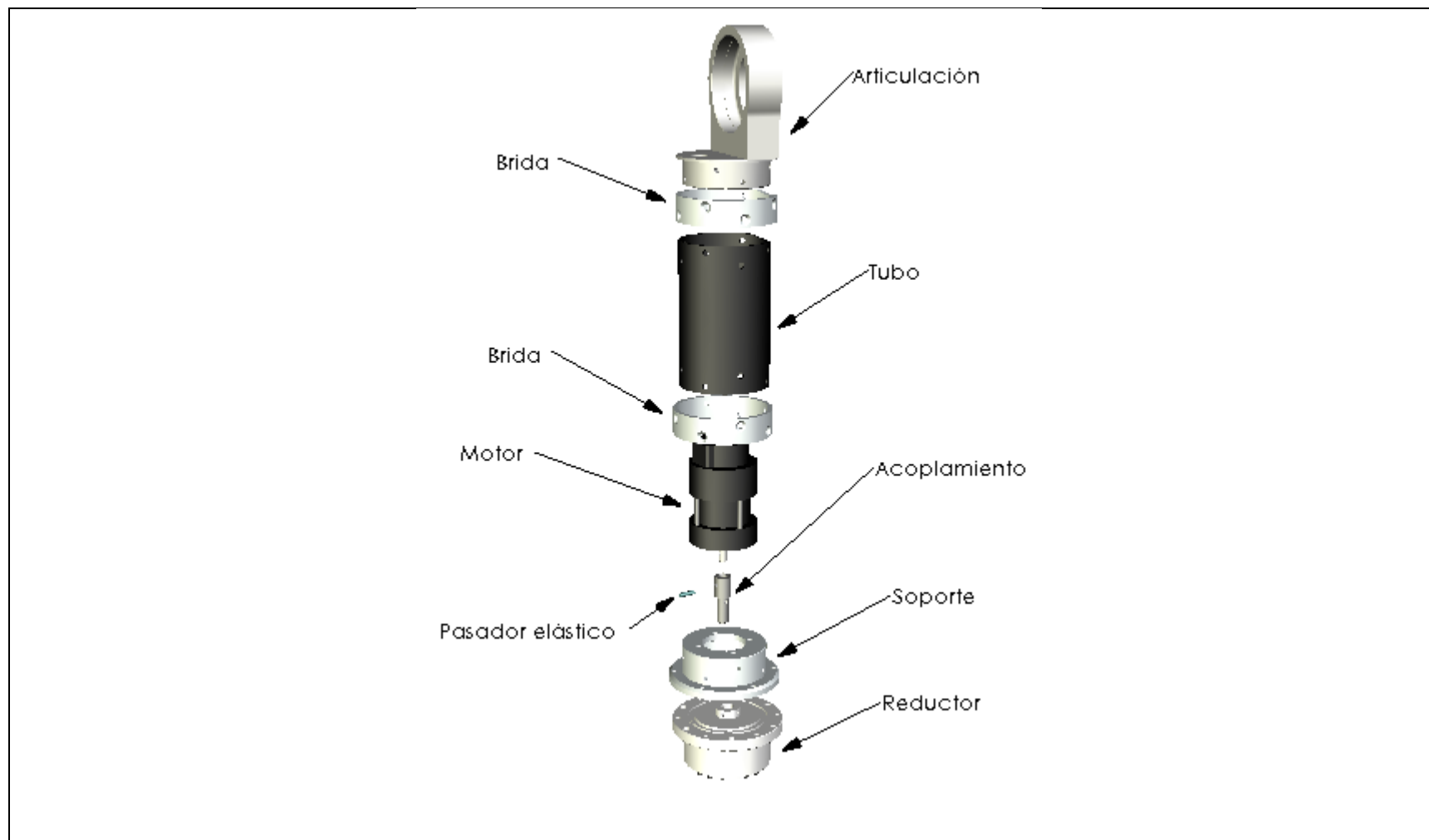


Figura A-III.7.- Vista explosionada del sub-ensamblaje 4.



SUBENSAMBLAJE 4								
Muñeca -tubos y bridas-								
Carcasa							Motor	Reductor
Número	Cantidad	Designación	Material	Densidad	Volumen	Masa	Peso	Peso
				g/cm3	cm3	g		
1	1	Articulación	Aluminio	2,7	86,611	233,850	No existe	No existe
2	1	Tubo	Fibra de carbono	1,6	40,696	65,114		
3	2	Brida	Aluminio	2,7	21,586	58,282		
4	1	Soporte	Aluminio	2,7	42,506	114,766		
Subtotal						472,012		
Articulación 6								
Carcasa							Motor	Reductor
Número	Cantidad	Designación	Material	Densidad	Volumen	Masa	Peso	Peso
				g/cm3	cm3	g		
1	1	Acoplamiento	Acero	7,8	2,209	17,230	344	640
2	1	Pasador elástico	Acero	7,8	0,17	1,326		
Subtotal						18,556	344	640
TOTAL								1474,568

Tabla A-III.6.- Materiales y pesos de los componentes del sub-ensamblaje 4.

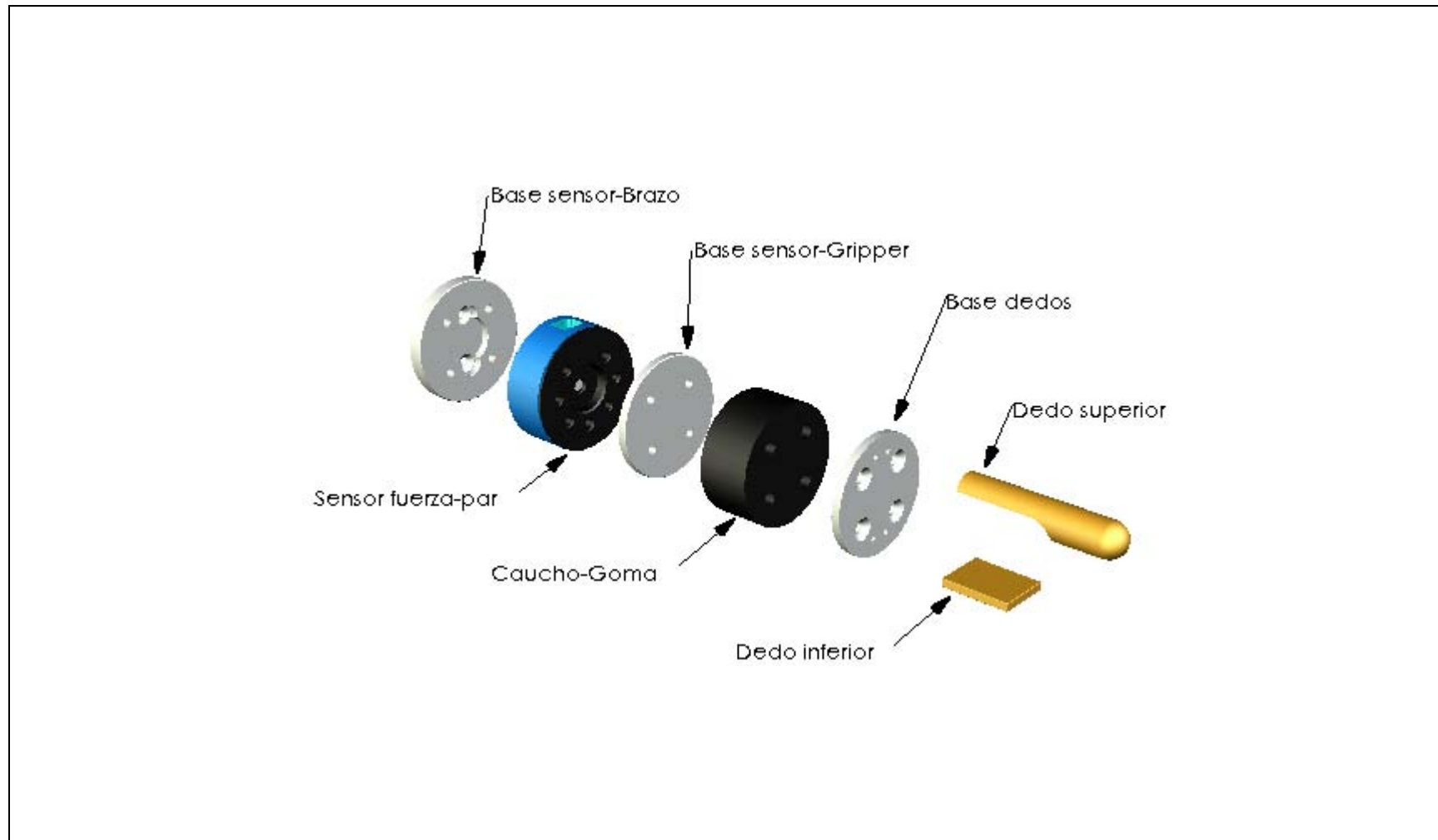


Figura A-III.8.- Vista explosionada del actuador final.



ACTUADOR FINAL								
<u>Pinza</u>								
Carcasa							Motor	Reductor
Número	Cantidad	Designación	Material	Densidad	Volumen	Masa	Peso	Peso
				g/cm3	cm3	g		
1	1	Brazo_sensor_base	PPS	1.350	24.800	33.480	No existe	No existe
2	1	Sensor fuerza-par	N/D	N/D	84.572	175.000		
3	1	Gripper_sensor_base	PPS	1.350	47.605	64.266		
4	1	Caucho-Goma	Caucho	1.0	80.893	80.893		
5	1	Base dedos	Aluminio	2,8	18.899	52.916		
6	1	Dedo superior	Aluminio	2,8	16,990	47.573		
7	1	Dedo inferior	Aluminio	2,8	5,905	16.533		
8	1	Contenedor de caucho	PPS	1.350	73.617	99.383		
9	1	Fijador del caucho	PPS	1.350	9.058	12.228		
Subtotal						582.272		
TOTAL								582.272

Tabla A-III.7.- Materiales y pesos de los componentes de la pinza.

N/D = No Disponible.

<u>ELEMENTOS DEL MANUPULADOR UC3M-LWR-1</u>			
Número	Cantidad	Designación	MASA (g)
1	1	Articulación 1	3795,243
2	1	Articulación 2	4192,038
3	1	Sub-ensamblaje 1	3258,356
4	1	Sub-ensamblaje 2	1676,026
5	1	Sub-ensamblaje 3	1667,069
6	1	Sub-ensamblaje 4	1474,568
7	1	Actuador Final	582.272
TOTAL			16645,57*

Tabla A-III.8.- Pesos totales de los componentes del manipulador UC3M-LWR-1.

- * La diferencia de peso del manipulador, que aquí se obtiene con un valor de 16.645 Kg respecto a los 18 Kg que se asumió como valor en las características técnicas de la Tabla 3.1 del capítulo III, se debe a que no se han tenido en cuenta elementos tales como el peso de la tornillería, ni del cableado así como tampoco de los sensores de posición.



BIBLIOGRAFÍA

- [1] O. Khatib; K. Yokoi; K. Chang; D. Ruspini; R. Holmberg and A. Casal “Vehicle / arm coordination and multiple mobile manipulator decentralized cooperation”, In Proceedings of the 1996 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS '96), Vo. 2, pp. 546–553, Osaka, Japan, 04-08 November 1996.
- [2] M. Zinn; O. Khatib; B. Roth and J. K. Salisbury “Towards a Human – Centered Intrinsically - Safe Robotic Manipulator”, In Proceedings of the 2nd IARP – IEEE/RAS Joint Workshop on Technical Challenge for Dependable Robots in Human Environments, Vol. 17, №. 7, pp. 57-66, LAAS-CNRS, Toulouse, France, October 2002.
- [3] M. Zinn; O. Khatib; B. Roth and J.K. Salisbury “A new actuation approach for human friendly robot design”, In Proceedings of the International Symposium on Experimental Robotics, Sant'Angelo d'Ischia, Italy, 2002.
- [4] R. Holmberg and O. Khatib “Development and Control of a Holonomic Mobile Robot for Mobile Manipulation Tasks”, the International Journal of Robotics Research, Vol. 19, №. 11, pp. 1066-1074, November 2000.
- [5] O. Khatib; K. Yokoi; O. Brock; K. Chang and A. Casal “Robots in Human Environments: Basic Autonomous Capabilities”, the International Journal of Robotics Research, Vo. 18, № 7, pp. 684–696, July 1999.
- [6] <http://world.honda.com/ASIMO/>
<http://www.roboticspot.com/especial/asi2004/asi2004.php>
<http://www.roboticspot.com/spot/artic.shtml?todo=&block=7&newspage=robots>
Última fecha de consulta: 05/06/2011
- [7] P. Dario; E. Guglielmelli; C. Mule and M. Di Natale “URMAD: An Autonomous Mobile Robot System for the Assistant to the Disabled”, In Proceedings of the 6th International Conference on Advanced Robotics ICAR'93, pp. 341-346, Tokyo, Japan, 1993.
- [8] C. Innocenti; G. Mondino; P. Regis and G. Sandini “Trajectory planning and real-time control of an autonomous mobile robot equipped with vision and ultrasonic sensors”, In Proceedings of the IROS'94, Vol. 3, pp. 1861-1866, Munich, Germany, September 12-16, 1994.



http://www.lira.dist.unige.it/projects/past_project/urmad.html

Última fecha de consulta: 05/06/2011

- [9] P. Dario; E. Guglielmelli; C. Laschi; C. Guadagnini; G. Pasquarelli and G. Morana “*MOVAID: A New European Joint Project in the Field of Rehabilitation Robotics*”, In Proceedings of the Seventh International Conference on Advanced Robotics ICAR'95, pp. 51-59, Sant Feliu, Spain, 1995.
- [10] P. Dario; E. Guglielmelli; C. Laschi and G. Teti “*MOVAID: a personal robot in everyday life of disabled and elderly people*”, Technology and Disability Journal, IOS Press, Vol. 10, PP. 77-93, January 1999. IOS Press.
- [11] P. Dario; E. Guglielmelli; V. Genovese and M. Toro “*Robot Assistants: Applications and evolution*”, In Robotics and Autonomous Systems, Vol. 18, Nº.1-2, pp. 225-234, Pisa, Italy, July 1996.
- [12] E. Ettelt; R. Furtwängler; U. D. Hanebeck and G. Schmidt “*Design Issues of a Semi-Autonomous Robotic Assistant for the Health Care Environment*”, Journal of Intelligent and Robotic Systems, Vol. 22, Nº. 3-4, pp. 191-209, May 1998.
- [13] <http://www.frc.ri.cmu.edu/index.php>
<http://www.frc.ri.cmu.edu/project/index.php>
Última fecha de consulta: 05/06/2011
- [14] E. Potemkin; P. Astafurov; A. Osipov; M. Malenkov; V. Mishkinyuk; P. Sologub, “*Remote-Controlled Robots for Repair and Recovery in the Zones of High Radiations Levels*”, In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol. 2, pp. 80-82, Nice, France, 12-14 May 1992.
- [15] Adam Slifko et al., “*Pioneer: A Robot for Structural Assessment of the Chornobyl Shelter*”, In Proceedings of the 8th International Topical Meeting on Robotics and Remote Systems, American Nuclear Society, Pittsburg, Pennsylvania, 1999.
<http://www.frc.ri.cmu.edu/projects/pioneer/>
<http://www.frc.ri.cmu.edu/projects/pioneer/technical.html>
[http://www.ornl.gov/~webworks/cppr/y2001/pres/109944 .pdf](http://www.ornl.gov/~webworks/cppr/y2001/pres/109944.pdf)
Última fecha de consulta: 05/06/2011
- [16] C. R. Weisbin; B. L. Burks; J. R. Einstein; R. R. Feezell; W. W. Manges and D. H. Thompson “*Hermies-III: A step toward autonomous mobility, manipulation and perception*”, National Laboratory, Robotics and Intelligent Systems Program, Oak Ridge, Vol. 8, Nº. 7-12, Cambridge University Press, TN 37831–6364, USA, 1990.
- [17] R. Welch and G. Edmonds “*Applying Robotics to HAZMAT*”, In Proceedings of the Forth National Technology Transfer Conference - NASA Technology 2003, Vol. 2, pp. 279-287, Anaheim, CA, December 1993.
<http://www-robotics.jpl.nasa.gov/tasks/showTask.cfm?TaskID=119&tdaID=800002>
Última fecha de consulta: 05/06/2011



- [18] H. W. Stone and G. Edmonds “*HAZBOT: A Hazardous Materials Emergency Response Mobile Robot*”, In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol. 1, pp. 67-73, Nice, France, 12-14 May 1992.
- [19] NASA Intelligent Systems Project Website: <http://ti.arc.nasa.gov/ti/is/>
Última fecha de consulta: 05/06/2011
- [20] S. Hayati; R. Volpe; P. Backes; J. Balaram; R. Welch; R. Ivlev; G. Tharp; S. Peters; T. Ohm; R. Petras and S. Laubach “*The Rocky 7 rover: a Mars science craft prototype*”, In Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol. 3, pp. 2458-2464, Albuquerque, NM , USA, April 1997.
- [21] <http://www.ovaliente.com.ar/perso/robot/nasa.htm>
<http://proton.ucting.udg.mx/robotica/r166/r137/r137.htm>
Última fecha de consulta: 05/06/2011
- [22] http://en.wikipedia.org/wiki/Lunokhod_program
http://en.wikipedia.org/wiki/Lunokhod_1
http://en.wikipedia.org/wiki/Lunokhod_2
Última fecha de consulta: 05/06/2011
- [23] <http://mars.jpl.nasa.gov/MPF/rover/sojourner.html>
<http://www1.pacific.edu/eng/research/cvrg/members/bvotaw/>
Última fecha de consulta: 05/06/2011
- [24] Jet Propulsion Laboratory (JPL) Web-Page, Field Integrated Design and Operations Rover. <http://www.jpl.nasa.gov/>
Última fecha de consulta: 05/06/2011
- [25] M. Lamboley; C. Proy; L. Rastel; T. Nguyen Trong; A. Zashchirinski and S. Buslaiev “*Marsokhod: Autonomous navigation tests on a Mars-like terrain*”, Autonomous Robots, Springer Netherlands, Vol. 2, №. 4, pp. 345-351, December 1995.
- [26] Tim C. Lueth; Uwe M. Nassal and Ulrich Rembold “*Reliability and integrated capabilities of locomotion and manipulation for autonomous robot assembly*”, Journal on Robotics and Autonomous Systems, Institute for Real-Time Computer Systems and Robotics, IPR, University of Karlsruhe, Karlsruhe, Germany, Vol. 14, Issues 2-3, pp. 83-246, May 1995.
- [27] T. Ueyama; S. Takeda; S. Hashimoto; H. Terada and H. Kotani “*Decentralized Autonomous Mobile Robots for Adaptive Production System, Cooperative Work in Autonomous Starter Assembly Line*”, In Proceedings of the Ninth International Conference on Advanced Robotics, pp. 211-216, Tokyo, Octubre 1999.
- [28] K. Dowling; R. Bennett; M. Blackwell; T. Graham; S. Gatrall; R. O’Toole and H. Schempf “*A Mobile Robot System for Ground Servicing Operations on the Space*”



- Shuttle*”, Ph.D. thesis, the Robotics Institute - **Carnegie Mellon University**, 1999.
- [29] K. Berns; R. Dillmann and T. Asfour “*Armar: an anthropomorphic arm for humanoid service robot*”, In Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Vol. 1, pp. 702-707, Detroit, MI, USA, 10-15 May 1999.
- [30] T. Asfour; K. Berns; and R. Dillmann “*The humanoid robot ARMAR: Design and control*” in the first IEEE/RAS International Conference on Humanoid Robots (HUMANOIDS 2000), MIT, Boston, USA, 7-8 September 2000.
http://www.iain.ira.uka.de/users/asfour/HumanoidsGroup/content/integration/topi_c0.html
- Última fecha de consulta: 05/06/2011
- [31] B. J. F. Driessen; H. G. Evers and J. A. Van Woerden “*MANUS: a wheelchair mounted rehabilitation robot*”, In Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine, Vol. 215, №. 3, pp. 285-290, TNO-TPD, Delft, the Netherlands, 2001.
- [32] Exact Dynamics “Assistive robotic manipulator (arm)”, Web-Page:
<http://www.exactdynamics.nl/> & <http://www.exactdynamics.nl/site/>
- Última fecha de consulta: 05/06/2011
- [33] G. Hirzinger; J. Butterfass; M. Grebenstein; I. Schafer; N. Sporer; M. Fischer; L. Hong; A. Albu-Schaffer; M. Schedl and P. Neumann “*Space robotics-driver for a new mechatronic generation of light-weight arms and multi-fingered hands*”, In Proceedings of IEEE/ASME International Conference on Advance Intelligent Mechatronics 2001, Vol. 2, pp. 1160-1168, Como, Italy, 8-12 July 2001.
- [34] G. Hirzinger; N. Sporer; A. Albu-Schaffer; M. Hahnle, M. Krenn, R. Pascucci and A. Schedl “*DLR’s torque-controlled light weight robot III, Are we reaching the technological limits now?*”, In Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA’02), Vol. 2, pp. 1710-1716, 2002.
- [35] G. Hirzinger; B. Brunner; K. Landzettel; J. Batterfaß; N. Sporer, and M. Schedl “*Space robotics-DLR’s Tele-robotic Concepts, Lightweight Arms and Articulated Hands*”, Autonomous Robots, Vol. 14, №. 2-3, pp. 127–145, May 2003.
- [36] J. Vandorpe; H. Xu and H. Van Brussel “*Dynamic docking integrated in a navigation Architecture for intelligent mobile robot LiAS*”, In Workshop on Intelligent Adaptive Systems (IAS), pp. 143-149, Kalsruhe, Germany, 1995.
- [37] European Robotics Network “*AMADEUS: autonomous mobile manipulator for dexterous and universal services*”. PROFACTOR Produktionsforschungs GmbH, Austria. Project funded by the European Community under the "Information Society Technologies" Programme (1998-2002), 20 August 2006.
<http://www.cas.kth.se/euron/euron-res-db/research-actors.html>

Última fecha de consulta: 05/06/2011



- [38] T. Bergener; C. Bruckhoff; P. Dahm; H. Janßen; F. Joublin and R. Menzner “*ARNOLD: An Anthropomorphic Autonomous Robot for Human Environments*”, In the Work shop (SOAVE'97), №. 663, pp. 25-34, Selbstorganisation von Adaptivem Verhalten, September 1997.
- [39] R. Bischoff “*HERMES: A Humanoid Mobile Manipulator for Service Tasks*”, In Proceedings of the International Conference on Field and Service Robotics (FSR'97), pp. 508-515, Canberra, Australia, December 1997.
- [40] R. Bischoff “*Recent Advance in the Development of the Humanoid Service Robot HERMES*”, In Proceedings of the 3th EUREL Workshop and Masterclass-European Advance Robotics Systems Development, pp. 125-134, Salford, U.K., 2000.
- [41] A. Konno; K. Nagashima; R. Furukawa; K. Nishiwaki; T. Noda; M. Inaba and H. Inoue “*Development of a Humanoid Robot Saika*”, In Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'97), Vol. 2, pp. 805-810, Grenoble , France, 7-11 September 1997.
<http://www.jsk.t.u-tokyo.ac.jp/research/saika/index.html>
Última fecha de consulta: 05/06/2011
- [42] T. Morita; H. Iwata; S. Sugano “*Development of human symbiotic robot: WENDY*”, In Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol. 4, pp. 3183-3188, Detroit, MI, USA, 10-15 May 1999.
http://www.twendyone.com/index_e.html
Última fecha de consulta: 05/06/2011
- [43] T. Ogata; T. Komiya and S. Sugano “*Development of arm system for human-robot emotional communication*”, In Proceedings of IEEE International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation Society (IECON 2000), Vol. 1, pp. 475–480, Nagoya, Japan, 22-28 October 2000.
<http://www.sugano.mech.waseda.ac.jp/research.html>
<http://www.sugano.mech.waseda.ac.jp/wendy/arm/mia1-e.html>.
Última fecha de consulta: 05/06/2011
- [44] R. Bischoff and V. Graefe “*Hermes: an intelligent humanoid robot, designed and tested for dependability*”, In Proceedings of the 8th International Symposium (ISER'02), Vol. 5, pp. 64-74, Springer Tracts in Advanced Robotics.
- [45] G. Giralt and P. Corke, Eds. “*Technical Challenge for Dependable Robots in Human Environments*”, In Proceedings 2nd IARP/IEEE-RAS Joint Workshop (IARP 2002), Toulouse, France, 7-8 October 2002.
<http://spiderman-2.laas.fr/DRHE2010/>
Última fecha de consulta: 05/06/2011
- [46] RIA Department Web-Page: <http://www.laas.fr/>
Última fecha de consulta: 05/06/2011



Bibliografía

- [47] B. Armstrong; O. Khatib and J. Burdick “*The explicit Dynamic Model and Inertial Parameters of the PUMA 560 Arm*”, In Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 510-518, San Francisco, USA, April 1986.
- [48] O. Khatib “*A Unified Approach for Motion and Force Control of robot Manipulators: The Operational Space Formulation*”, IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. 3, №. 1, pp. 43-53, February 1987.
- [49] S. Morinaga and K. Kosuge “*Collision detection system for manipulator based on adaptive impedance control law*”, In Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'03), Vol. 1, pp. 1080-1085, Taipei, Taiwan, 14-19 September 2003.
- [50] Carlos III of Madrid University, Robotics Laboratory Web-Page: <http://roboticslab.uc3m.es/roboticslab/>
Última fecha de consulta: 05/06/2011
- [51] Vicente Fernández García “*Control coordinado de manipuladores móviles no holónomos. Aplicación a la cooperación active Hombre-Robot*”, Tesis Doctoral, Universidad Carlos III de Madrid, Leganés, 2000.
- [52] http://theelectrostore.com/datasheets/PLS101-312_-datasheet-20090411_0201.pdf
<http://www.lpc-uk.com/sick/file1.pdf>
Última fecha de consulta: 05/06/2011
- [53] http://www.specamotor.com/en/Faulhaber/motors/2642-024CR/datasheet_motor.html
Última fecha de consulta: 05/06/2011
- [54] <http://pro.sony.com/bbsc/ssr/cat-industrialcameras/cat-industrialcamerapantiltzoom/product-EVID100/>
<http://pro.sony.com/bbsccms/assets/files/mkt/indauto/Brochures/evid100.pdf>
<http://www.sony.es/biz/product/ptzcams/evi-d100p/overview>
Última fecha de consulta: 05/06/2011
- [55] <http://mvs.co.th/downloads/XC-ES50CE%5B1%5D.pdf>
<http://www.pro.sony.eu/biz/lang/en/sy/product/intbwxsmall/xc-es50ce/overview>
Última fecha de consulta: 05/06/2011
- [56] Página web de sensor-fuerza par JR3: <http://www.jr3.com>
Última fecha de consulta: 05/06/2011
- [57] <http://students.uta.edu/vn/vnh8619/heds550-e.pdf>
<http://www.newark.com/avago-technologies/heds-5500-f06/optical-encoder/dp/05F8277>
Última fecha de consulta: 05/06/2011



- [58] http://www.secomtel.com/UpFilesPDF/PDF/Agilent/PDF_DOCS/ISONCONT/02_MOTN/2_52_62.pdf
<http://www.alldatasheet.net/datasheet-pdf/pdf/134447/HP/HEDS-9040.html>
Última fecha de consulta: 05/06/2011
- [59] A. Okabe; B. Boots; K. Sugihara and S. Nok Chiu “*Spatial tessellations: Concepts and applications of Voronoi diagrams*”, Wiley series in Probability and Mathematical Statistics, 2nd Edition [ISBN: 978-0-471-98635-5], May 2000.
- [60] D. Blanco; B. L. Boada; L. Moreno and M. A. Salichs “*Local mapping from on-line laser Voronoi extraction*”, In Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2000), Vol. 1, pp. 103-108, Takamatsu, Japan, 31st October – 5th November 2000.
- [61] Dolores Blanco Rojas “*Planificación Local Basada en Sensores para un Manipulador Móvil en Tareas de Colaboración con Humanos*”, Tesis Doctoral, Universidad Carlos III de Madrid, Leganés, 2002.
- [62] D. Blanco; B. L. Boada and L. Moreno “*Localization by Voronoi Diagrams Correlation*”, In Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2001), Vol. 4, pp. 4232-4237, Seoul, Korea, 2001.
- [63] A. I. Kapandji “*Cuadernos de fisiología articular*”, 4^a Edición, Tomo I, Editorial TORAY-MASSON 1996.
- [64] J. Lenarcic and A. Umek “*Simple model of human arm reachable workspace*”, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Vol. 24, pp. 1239-1246, August 1994.
- [65] J. E. Shigley and C. R. Mischke “*Diseño en ingeniería mecánica*”, 6^o edición, Editorial MC GRAW HILL, Book, 2002.
- [66] W. B. Greene and J. D. Heckmen “*The clinical measurement of joint motion*”, Editorial American Academy of Orthopedic Surgeons, 30 June 1994 [ISBN: 0892030909]. Cortesía de la Biblioteca de la Escuela Universitaria de Enfermería, Podología y Fisioterapia - Universidad Complutense de Madrid.
- [67] W. Schneider; H. Spring and T. Tritschler “*Mobility: Theory and Practice*”, Editorial Germany Theme Medical Publishers, 1992 [ISBN: 3-13-767301-1 (GTV, Stuttgart)].
- [68] J. L. Pacheco “*Antropometría de los atletas españoles de élite*”, Tesis Doctoral del Dpto. Biología Animal, sección Antropología, Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Complutense de Madrid, 1993. Cortesía de la Biblioteca de la Escuela Universitaria de Enfermería, Podología y Fisioterapia. Universidad Complutense de Madrid.
- [69] F. Ferrer; G. Minaya; J. Niño and M. Ruiz “*Manual de ergonomía*”, Editorial FUNDACIÓN MAPFRE, 1995 [ISBN: 84-7100-933-1].



Bibliografía

- [70] American Society of Metals “*Engineered material handbook*”, Editorial ASM International (International AMERICAN SOCIETY FOR METALS), 1987 [ISBN: 0871702800].
- [71] Robert L. Mott “*Diseño de elementos de máquinas*”, 4ª Edición, Editorial PEARSON Educación, 2006 [ISBN: 970-26-0812-0].
- [72] X. Bao and Y. Bar-Cohen “*Complete modeling of rotary ultrasonic motors actuated by traveling flexural waves*”, In Proceedings of SPIE’s 7th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials, Paper 3992-103, Newport, CA, USA, 1-5 March 2000.
- [73] N. Fukaya; S. Toyama; T. Asfour and R. Dillmann “*Design of the TUAT/Karlsruhe Humanoid Hand*”, In Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2000), Vol. 03, pp. 1754-1759, Kagawa University, Takamatsu, Japan, October 30 - November 5, 2000.
- [74] Página web de Harmonic Drive de AG:
<http://www.harmonicdrive.de/spanish/descargas/catalogos/catalogo-general/>
Última fecha de consulta: 05/06/2011
- [75] Thomas R. Kurfess “*Robotics and automation handbook*”, Publisher: CRC Press, 1º Edition, 2005 [ISBN: 0849318041].
- [76] J. Gilbert Kaufman “*Fracture resistance of aluminum alloys: notch toughness, tear resistance, and fracture toughness*”, Editorial International AMERICAN SOCIETY FOR METALS, 2001 [ISBN: 978-0871707321].
- [77] Página de SolidWork:
<http://www.solidworks.com/sw/products/cad-software-3d-design.htm>
Última fecha de consulta: 05/06/2011
- [78] A. Barrientos; L. F. Peñín; C. Balaguer y R. A. Santoja “*Fundamentos de robótica*”, 2ª Edición, Editorial McGraw-Hill, Madrid, España, Mayo 2007 [ISBN: 8448156367].
- [79] http://www.solidworks.com/sw/docs/SolidWorks_Simulation_TriFold_Datasheet_2011.pdf
Última fecha de consulta: 05/06/2011
- [80] Craig John J. “*Introduction to robotics: Mechanics and control*”, 3ª Edición, Editorial Prentice Hall, 2004 [ISBN: 0201543613].
- [81] Aníbal Ollero Baturone “*Robótica; Manipuladores y Robots Móviles*”, 1ª Edición, Editorial MARCOMBO, Barcelona, España, Septiembre 2001 [ISBN: 8426713130].



Bibliografía

- [82] Carolina Álvarez Caldas “*Banda Extenso-métrica Virtual: diseño y aplicaciones de un nuevo tipo de elemento finito*”, Tesis Doctoral, Universidad Carlos III de Madrid, Leganés, 2003.
- [83] Luis Ortiz Berrocal “*Curso de elasticidad y resistencia de materiales*”, 3^a Edición, Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Madrid, 1998 [ISBN: 8448120469].
- [84] Página web:
http://www.lanema.es/productos_semiacabados2.php?id=30&lang=5&gclid=CKjTgZnjqaICFc6X2AodzWNYRg

Última fecha de consulta: 05/06/2011