



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y DISEÑO
INDUSTRIAL

Grado en Ingeniería Electrónica y Automática Industrial

TRABAJO FIN DE GRADO

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BRAZO ROBÓTICO PARA EL APOYO A LA INTERACTIVIDAD DE PERSONAS ENFERMAS

Enrique Heredia Aguado

Cotutor: Alberto Brunete
González

Departamento: Ingeniería
eléctrica, electrónica automática
y física aplicada

Tutor: Miguel Hernando
Gutiérrez

Departamento: Ingeniería
eléctrica, electrónica automática
y física aplicada

Madrid, Febrero 2018



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y
DISEÑO INDUSTRIAL

Grado en Ingeniería Electrónica y Automática Industrial

TRABAJO FIN DE GRADO

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN
BRAZO ROBÓTICO PARA EL APOYO A
LA INTERACTIVIDAD DE PERSONAS
ENFERMAS

Firma Autor

Firma Cotutor

Firma Tutor

Copyright ©2018. Enrique Heredia Aguado

Esta obra está licenciada bajo la licencia Creative Commons Atribución-CompartirIgual 4.0 International (CC BY-SA 4.0). Para ver una copia del resumen de esta licencia, visite <https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/>. Puede acceder al código legal de la misma en <https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/legalcode>



Todas las opiniones aquí expresadas son del autor, y no reflejan necesariamente las opiniones de la Universidad Politécnica de Madrid.

Título: Diseño y construcción de un brazo robótico para el apoyo a la interactividad de personas enfermas

Autor: Henrique Heredia Aguado

Tutor: Miguel Hernando Gutiérrez

Cotutor: Alberto Brunete González

EL TRIBUNAL

Presidente: Miguel Hernando Gutiérrez

Vocal: Alberto Brunete González

Secretario: Cecilia García Cena

Realizado el acto de defensa y lectura del Trabajo Fin de Grado el día 28 de Febrero de 2018 en Madrid, en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Diseño Industrial de la Universidad Politécnica de Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de:

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE

Agradecimientos

Agradecimiento especial a mi familia por el apoyo incondicional desde las pequeñas a las grandes cosas.

En concreto agradecer a Miguel Hernando, tutor a cargo de este proyecto, toda la ayuda, ilusión y conocimientos transmitidos antes, durante y seguramente después de finalizar el mismo.

También agradecer a amigos y compañeros de HackLab con los que, en mayor o menor medida, he podido compartir esta experiencia.

Resumen

Este proyecto se resume en el diseño y construcción de un brazo robótico asistencial para su inclusión en entornos hospitalarios. Junto con una tablet funcionarán como interfaz entre pacientes con movilidad reducida de forma que puedan interactuar con el entorno.

Palabras clave: brazo robótico, robótica asistencial.

Abstract

This project covers from the design to the implementation and construction of a robotic arm aimed to be used in hospitals. Along with a tablet device it will be used as an interface for patients in bed to interact with the environment.

Keywords: robotic arm, robotic assistance.

Índice general

Agradecimientos	v
Resumen	vii
Abstract	ix
1. Introducción	1
1.1. Motivación del proyecto	1
1.2. Objetivos	1
1.2.1. Objetivos derivados	2
1.3. Estructura del documento	2
1.4. Software utilizado	4
1.5. Iconografía del proyecto	4
2. Estado del arte	9
2.1. Soportes articulados sin motorizar	9
2.1.1. Anclaje a la pared: Cotytech MW-M13P	9
2.1.2. Anclaje al techo: Titan Elite T2EQ-C8X5	10
2.1.3. Anclaje a una mesa o superficie de trabajo: Ergotron LX Sit-Stand Desk Arm	11
2.1.4. Consideraciones generales sobre los soportes no motorizados	12
2.2. Soportes articulados motorizados	12
2.2.1. Consideraciones generales sobre los soportes motorizados	13
2.3. Brazos robóticos para asistencia de pacientes	13
2.3.1. JACO 3 fingers, Kinova robotics	14
2.3.2. Brazo Multi-manipulador de la Universidad de Navarra	14
2.3.3. Brazo robótico para personas con movilidad reducida	15
2.3.4. Consideraciones generales sobre los brazos robóticos	16
3. Diseño del brazo robótico: Punto de inicio	17
4. Mecánica y soporte físico del proyecto	23
4.1. Visión general y materiales estructurales	23
4.2. Filosofía y justificación de diseño	25
4.2.1. Realidad de las formas	26
4.3. Primera articulación. Giro en el eje Z	27
4.4. Articulaciones dos y tres. Posicionamiento en el plano sagital	30

5. Diseño Electromecánico	37
5.1. Actuadores	37
5.2. Interfaz servos-microcontrolador	39
5.3. Placa controladora	40
5.4. Sensores	42
5.5. Fuente de alimentación	43
5.6. Adaptador USB para puerto serie	44
5.7. Integración de los componentes en la estructura mecánica	45
6. Estudio Cinemático y Matemático	49
6.1. Convenio de ángulos y referencias	49
6.2. Cinemática del robot	51
6.2.1. Parámetros de Denavit-Hartenberg	52
6.2.2. Cinemática directa	53
6.2.3. Cinemática inversa	54
6.2.4. Cinemática diferencial	55
6.2.5. Rango de movimientos	58
6.3. Realimentación articular	58
7. Diseño del Control	59
7.1. Control de velocidad para los servos	60
7.2. Control de posición articular	63
8. Diseño del software	65
8.1. Filosofía de diseño	65
8.2. Aspectos generales del diseño	66
8.3. Estructura de directorios y ficheros	67
8.4. Descripción de componentes	68
8.4.1. Utilidades de debug	68
8.4.2. Tipos de datos propios del proyecto	68
8.4.3. Gestión de la información del servo	69
8.4.4. Gestión de la información de la articulación	70
8.4.5. Manejador de articulaciones	71
8.4.6. Manejador del mando Nunchuck	73
8.4.7. Gestión del brazo robótico	74
8.4.8. Fichero fuente principal	75
8.4.9. Interfaz gráfica para el control del brazo robótico	76
8.5. Test y verificación del software	76
8.5.1. Test sobre los tipos de datos definidos	79
8.5.2. Test sobre la gestión de la información del servo	80
8.5.3. Test sobre la construcción de paquetes para la comunicación con los servos	80
8.6. Gestión de la complejidad y mantenibilidad	80
8.6.1. Comprobación del cumplimiento de las reglas de codificación del Código	83
9. Resultados y discusión	87
9.1. Resultados	87

10. Gestión del proyecto	91
10.1. Ciclo de vida	91
10.2. Planificación	93
10.3. Presupuesto	95
11. Conclusiones	97
11.1. Conclusión	97
11.2. Desarrollos futuros	98
11.2.1. Primera Articulación	98
11.2.2. Seguridad Software	98
11.2.3. Grados de libertad de Orientación	98
11.2.4. Mejoras generales	99
Apéndice	100
A. Listado de piezas diseñadas	101
B. Montaje del prototipo	117
C. Reglas de codificación del Software	125
C.1. Aspectos generales	125
C.2. Ficheros de cabecera	125
C.2.1. Inclusión Múltiple	125
C.2.2. Orden de inclusión de ficheros	126
C.3. Ámbitos	126
C.3.1. Espacios de nombres	126
C.3.2. Variables Locales	127
C.4. Clases	127
C.4.1. Constructores y métodos de Inicialización	127
C.4.2. Estructuras o Clases	128
C.4.3. Control de Acceso	128
C.5. Tipos de datos	128
C.6. Nombres	128
C.6.1. Reglas generales	128
C.6.2. Nombre de los ficheros	128
C.6.3. Nombre de los directorios	129
C.6.4. Nombres para objetos	129
C.6.5. Nombres de variables	129
C.6.6. Nombres de atributos de clases	129
C.6.7. Nombres de miembros de estructuras	130
C.6.8. Nombres de funciones	130
C.6.9. Nombres de parámetros funciones	130
C.6.10. Espacios de nombres	130
C.6.11. Nombres de enumeraciones	130
C.6.12. Nombres de macros	131
C.7. Comentarios	131
C.7.1. Comentarios de ficheros	131
C.7.2. Comentarios de funciones	131

C.7.3. Comentarios y aclaraciones	131
C.7.4. TODO y notas	132
C.7.5. Código en desuso	132
C.8. Formato	132
C.8.1. Espacios y tabulaciones	132
C.8.2. Declaración y definición de funciones	132
C.8.3. Condicionales	133
C.8.4. Bucles	133
C.8.5. Valor de retorno de funciones y métodos	134
C.8.6. Formato para clases	134
C.8.7. Espacios de nombre	134
C.9. Espacios en blanco	134
C.9.1. Caso general	134
C.9.2. Bucles, condicionales y estructuras de control	135
C.9.3. Operadores	135
C.10. Espacio vertical	135
D. Comunicación con los Servos G15	137
D.1. Distintos tipos de instrucciones	139
D.1.1. Petición del estado del servo	139
D.1.2. Operaciones de lectura	140
D.1.3. Operaciones de escritura	140
D.1.4. Operaciones de escritura con activación desacoplada	141
D.1.5. Resetear la memoria de los servos a los valores de fábrica	141
D.1.6. Operaciones de escritura sobre múltiples servos	141
D.1.7. Aspectos interesantes a tener en cuenta	142
E. Protocolo de comunicación del brazo robótico	147
E.1. Estado del robot	148
E.2. Informes de error	148
E.3. Comandar el robot	150
Bibliografía	151

Índice de figuras

1.1.	Recopilación de los iconos diseñados y utilizados	5
3.1.	Ejemplos de como se acoplan y compensan estructuras basadas en mecanismos de cuatro barras	18
3.2.	Captura del documento original digitalizado de [1]	18
3.3.	Maquetas en plástico y madera DM	19
3.4.	Leyenda gráfica de la figura 3.6	20
3.5.	Piezas previas al diseño definitivo	21
3.6.	Esquema de la evolución de diferentes versiones del diseño mecánico .	22
4.1.	Modelo de los grados de libertad de posición. Convencionalismos tomados	24
4.2.	Ejemplo de parámetros definidos en Inventor	26
4.3.	Predominancia de formas rectangulares en el entorno de trabajo .	27
4.4.	Montaje de la transmisión del movimiento del servo a la articulación encargada de girar en Z	28
4.5.	Apoyo basado en un rodamiento Axial	29
4.6.	Apoyo basado en ruedas	29
4.7.	Comparación de como afecta el punto de apoyo de la carga superior sobre los diferentes apoyos	29
4.8.	Contrapeso para evitar el vencimiento del brazo	30
4.9.	Esquema de las articulaciones dos y tres. Estructura de unión triangular	31
4.10.	Esquema de las articulaciones dos y tres. Estructura de unión lineal .	31
4.11.	Diferentes posiciones articulares manteniendo la barra acopladora y el extremo perpendiculares	32
4.12.	Diferentes geometrías de la barra acopladora	32
4.13.	Imagen del acoplamiento <i>romboide</i>	33
4.14.	Vista genérica de los grados de libertad dos y tres	33
4.15.	Polea Móvil	34
4.16.	Transmisión hasta la primera articulación	35
4.17.	Transmisión del movimiento hasta la segunda articulación	35
4.18.	Redirección a la salida de los servomotores	35
4.19.	Redirección superior. Eje de la primera articulación	35
5.1.	Esquema de la conexión de los servos formando un bus serie de servos y la placa <i>Shield</i>	38
5.2.	Conectores de los G15 Cube y uso de cada uno de los cables	38
5.3.	Posibilidades para la alimentación de los servos	40

5.4. Esquema de la conexión entre la placa Shield y Arduino para utilizar los puertos Hardware Serie de la Arduino Mega	42
5.5. Visual del potenciómetro escogido	43
5.6. Visual de la fuente de alimentación escogida	44
5.7. Adaptador puerto serie a USB	44
5.8. Representación de como se fijan los servos a la estructura	45
5.9. Acoplamiento de las placas y motores	46
5.10. Montaje de la realimentación para la segunda articulación	47
5.11. Montaje de la realimentación para la tercera articulación	47
6.1. Relación con los ángulos y medidas de interés	50
6.2. Representación de los ángulos y distancias auxiliares más representativas. GDL 2 y 3	50
6.3. Representación de los ángulos y distancias más representativas. Primer grado de libertad	51
6.4. Sistemas de referencia	52
6.5. Espacio de trabajo en el plano XZ para Y = 0	58
7.1. Control en cascada de Posición + Velocidad	59
7.2. Variación de la velocidad del servo ante variaciones del par aplicado por el mismo	61
7.3. Variación de la velocidad del servo ante variaciones del peso aplicado sobre el mismo	62
7.4. Cálculo matemático de la prealimentación adaptativa.	62
8.1. Diagrama de relación entre los diferentes objetos	66
8.2. Estructuras de datos auxiliares	69
8.3. Atributos y métodos más relevantes del objeto <i>ServoRHA</i>	70
8.4. Atributos y métodos más relevantes del objeto <i>JointRHA</i>	71
8.5. Diagrama de secuencia del bucle de control de velocidad gestionado por el objeto <i>joint_handler</i>	72
8.6. Diagrama de secuencia del bucle de control de posición gestionado por el objeto <i>joint_handler</i>	72
8.7. Atributos y métodos más relevantes del objeto <i>JointHandler</i>	73
8.8. Atributos y métodos más relevantes del objeto <i>ChuckHandler</i> o manejador del mando Nunchuk	74
8.9. Atributos y métodos más relevantes que gestionan el brazo robótico .	75
8.10. Aspecto de la interfaz gráfica	76
8.11. Aviso de errores de la interfaz gráfica	76
8.12. Salida de Platformio Test para cada caso	78
8.13. Salida de Platformio Test con casos fallidos	78
8.14. Salida de Platformio Test con el resumen de los casos de test .	78
8.15. Resumen Test satisfactorios	79
8.16. Test satisfactorios RHATypes	79
8.17. Test satisfactorios PIDRegulator (caso dentro de RHATypes) . .	79
8.18. Test satisfactorios ServoRHA	80
8.19. Test satisfactorios JointHandler	80
8.20. Análisis del código del proyecto. Situación a lo largo del tiempo .	82
8.21. Análisis del código del proyecto. Situación final	82

8.22. Ejemplo de la Salida de cpplint con errores	84
8.23. Ejemplo de errores con cpplint	84
8.24. Salida de cpplint una vez eliminados los errores	85
9.1. Espacio de trabajo limitado por los muelles y la estructura mecánica	88
9.2. Pruebas de precisión en (0.85,0.0,0.6)	89
9.3. Pruebas de precisión en (0.65,0.0,0.46)	89
10.1. Diagrama con las diferentes fases del proyecto	92
10.2. Diagrama de Gantt con la distribución temporal de tareas	94
11.1. Sistema de referencia para los grados de libertad de orientación	99
D.1. Paquete de información genérico para comunicar con los Servos G15 Cube	138
D.2. Paquete de información genérico de retorno de los Servos G15 Cube .	138
E.1. Paquete de información genérico para comunicar con los Servos G15 Cube	148

Índice de tablas

5.1. Características relevantes de los Servos G15 de Cytron	39
5.2. Comparativa entre placas Arduino Uno y Arduino Mega2560	41
5.3. Comparativa entre placas Arduino Uno y Arduino Mega2560	42
5.4. Características resumidas del modelo de potenciómetro TW1502KA .	43
5.5. Características de la fuente de alimentación	44
6.1. Rango de movimiento articular.	51
6.2. Medidas estructurales	52
6.3. Medidas estructurales	52
9.1. Test de precisión del brazo robótico	88
10.1. Costes del proyecto	95
10.2. Tornillería requerida	96
A.1. Listado de piezas diseñadas de fabricación propia	102
D.1. Resumen de las instrucciones aceptadas por los Cytron G15 Cube servo	138
D.2. Codificación del error de los servos G15 Cube en cada bit del byte de error.	139
D.3. Codificación del error de comunicación en cada bit del segundo byte de error.	139
D.4. Ejemplo paquete con la instrucción <i>iSYNC_WRITE</i>	143
D.5. Direcciones de memoria de los servos con los diferentes parámetros a ajustar. Incluye valores mínimos y máximos así como valores por defecto para cada parámetro	145
E.1. Codificación del estado del robot.	149
E.2. Codificación de error en servos.	150
E.3. Codificación de error en articulaciones.	150



Capítulo 1

Introducción

En este capítulo se perfila la estructura, organización y contenidos principales del documento así como la motivación y objetivos del proyecto.

1.1. Motivación del proyecto

Este proyecto está enmarcado bajo el proyecto Robohealth, proyecto financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad con el objetivo del diseño de sistemas robóticos y domóticos para entornos hospitalarios que mejoren el sistema de salud actual.

Tal y como se cuenta en [2], en este proyecto se busca el desarrollo de robótica asistencial y de rehabilitación para la creación de entornos inteligentes hospitalarios.

Está principalmente enfocado a pacientes con un elevado grado de pérdida de movilidad, capacidad cognitiva reducida o enfermedades crónicas .Este grupo representa aproximadamente el 10 % de la población de la Unión Europea.

Este proyecto busca el diseño y construcción de un brazo robótico que permita incrementar la independencia de este tipo de pacientes actuando a modo de interfaz entre los usuarios y el entorno.

1.2. Objetivos

El objetivo que este Trabajo de Fin de Grado persigue es el del diseño, construcción y control de brazo robótico previo estudio de las opciones comerciales disponibles y su posible adaptación.

El prototipo debe estar diseñado para una completa adaptación a un entorno hospitalario en el que deberá estar en contacto constante con usuarios a los que deberá respetar.

El objetivo del brazo robótico es el de ubicar ante un paciente una *tablet*. Ésta llevará montado un dispositivo de seguimiento de vista de forma que, a través del movimiento de las pupilas, el paciente podrá interactuar con el resto de dispositivos

de la habitación así como el personal médico. Es necesario motorizar el dispositivo para mantener el dispositivo de seguimiento siempre a una distancia y ángulo, respecto a la cara del paciente, mínima para facilitar el funcionamiento del mismo. Está pensado principalmente para pacientes con movilidad reducida o sin movilidad (temporal o permanente), aunque también podría agilizar la interfaz humano-habitación para el resto de pacientes.

Así pues, algunos aspectos claves del prototipo deben ser:

- El Objetivo del prototipo será el de permitir una interacción más cómoda y automatizada entre los pacientes cuya capacidad de interacción se ha visto reducida por la causa que sea.
- Se debe tener en cuenta es que el prototipo estará en constante contacto con gran variedad de usuarios: pacientes, médicos, familiares, etc. El diseño debe proteger en todo momento la seguridad de dichos usuarios
- Concretamente el diseño está pensado para interactuar con pacientes que se encuentran recostados en una camilla en el hospital.

1.2.1. Objetivos derivados

La realización de dicho prototipo implica el cumplimiento de otros objetivos secundarios o derivados del principal. Se pueden listar algunos como:

- Prueba de diferentes tipos de estructuras y materiales como base física del brazo robótico.
- Adquisición de conocimientos sobre modelado 3D digital así como diferentes métodos de fabricación como son la impresión 3D, el corte láser, fresado CNC así como el uso de otras herramientas de mecanizado más tradicionales.
- Diseño e implementación de un sistema de control en cascada, que permita un control en posición y en velocidad del brazo robótico.
- Trabajar con protocolos de comunicación serie a bajo nivel (Comunicación entre el robot y el exterior exterior además de la comunicación con los actuadores).
- Diseñar una interfaz que permita controlar el brazo de manera intuitiva (interfaz gráfica o similar).

1.3. Estructura del documento

El documento está organizado de tal forma que irá introduciendo al lector progresivamente en los diferentes aspectos del diseño y montaje del prototipo mencionado, desde aspectos más generales hasta los más técnicos.

Los capítulos están a su vez organizados en el orden que se seguiría de cara a montar el prototipo empezando por una base física, añadiendo a posteriori los componentes electromecánicos para finalizar con los aspectos de control. Concretamente los capítulos contienen la siguiente información:

- Como continuación de los requerimientos generales se encuentra descritos en la introducción, en el capítulo 2, un estudio de diferentes modelos y diseños comerciales que podrían adaptarse para cumplir los objetivos presentados.
- El estudio del estado del arte ayuda a definir las ideas más importantes que regirán el diseño del prototipo. Éstas consideraciones se presentan en el capítulo 3.
- El capítulo 4 entra de lleno en los aspectos mecánicos del brazo robótico, pasando por una valoración de distintas posibilidades para llegar al diseño definitivo.
- Continuando con la descripción de soporte físico, el capítulo 6 supone un cambio de perspectiva que guiará al lector desde la parte mecánica y física expuesta anteriormente a la descripción matemática y cinemático del modelo.
- Una vez descrito el soporte físico del brazo robótico se detalla el hardware escogido para su puesta en marcha. En el capítulo 5 presentan los componentes electromecánicos que se han integrado en prototipo; sus características principales así como su ubicación en el montaje.
- El análisis de la estructura software diseñado queda cubierto en el capítulo 8. Este apartado anticipa además algunas ideas sobre el sistema de control diseñado.
- Continuando con las pinceladas aportadas en el apartado anterior, el capítulo 7 expone de forma detallada los distintos aspectos de diseño y desarrollo del control del brazo.
- Una vez alcanzado este punto, habiendo cubierto los aspectos del diseño del brazo, el capítulo 9 recoge los resultados de funcionamiento de prototipo para ser analizados.
- No se dejan de lado aspectos de gestión, costes y viabilidad del prototipo que se detallan en el capítulo 10.
- Finalmente, el capítulo 11 expone las conclusiones finales del trabajo así como posibles desarrollos futuros.

Como complemento a la información que exponen los apartados de esta memoria se añaden al final diferentes anexos:

- Se adjunta un listado de todas las piezas diseñadas con información relevante sobre su uso y fabricación en el anexo A.
- Vistas las piezas que conforman el prototipo es importante localizarlas para entender su uso y diseño. El anexo B detalla unas pautas y orden para el ensamblado del prototipo. Además permite localizar en su contexto las piezas listadas en el anexo A.
- Volviendo sobre los aspectos del software, en el Anexo C se concretan las reglas de codificación, mencionadas en el capítulo 8, más relevantes que se han aplicado en el desarrollo del código.

Además del presente documento puede ampliarse la información sobre el software desarrollado en [3]. En dicho documento se encuentra la documentación del software generada a través de la herramienta *doxygen*.

1.4. Software utilizado

No está de más conocer las herramientas a utilizar de antemano, ya que éstas marcan unas pautas en la ideología de diseño y una estructura a la hora de ordenar y desarrollar el proyecto.

- Autodesk Inventor 2016: Es un software de modelado paramétrico 3D de la compañía Autodesk Inc.
- Atom: Se trata de un editor de texto *open source*. Permite la instalación de diferentes extensiones para ampliar sus utilidades, entre otras será necesario instalar *PlatformIO*, que convierte el editor en un *Entorno de desarrollo integrado (IDE)* completo para el desarrollo de software para diferentes placas como Arduino, que será la base de este proyecto.
- Matlab: herramienta de cálculo utilizada para analizar la información recogida del ámbito de control así como para las comprobaciones pertinentes sobre la cinemática.
- Lizard: Software que permite el análisis de la complejidad de código. Se compone de una serie de scripts en python que, al ser ejecutados devuelven un fichero con métricas de complejidad referentes a los ficheros de código sobre los que se invoca: complejidad ciclomática, número de funciones en cada fichero, líneas de código en cada función y fichero, entre otras..
- Cloc: Es una herramienta sencilla que cuenta, de forma más precisa, el número de líneas de código, comentarios y líneas en blanco de los ficheros de código.
- cpplint: Análisis del cumplimiento de las reglas de codificación en el software. Es una herramienta desarrollada en python por Google LLC para asegurar que los proyectos cumplen con sus reglas de codificación, que se han seguido de forma parcial en este proyecto. Se pueden ver los aspectos más relevantes de las reglas de codificación en el Anexo C.
- doxygen: Permite la generación de documentación para código de diferentes lenguajes, c++ en este caso, de forma automática. La herramienta obtiene comentarios del código, escritos con una sintaxis determinada, para documentar los diferentes métodos, objetos y estructura del software.

1.5. Iconografía del proyecto

Se han diseñado y utilizado diferentes iconos que pueden servir para orientar el propósito o temática de las diferentes figuras incluidas en el documento así como el capítulo al que pertenecen, manteniendo un color uniforme a lo largo de cada capítulo. Además de tener en la figura 1.1 una recopilación de los mismos, a continuación se expone una lista con su significado y capítulo al que se asocia.

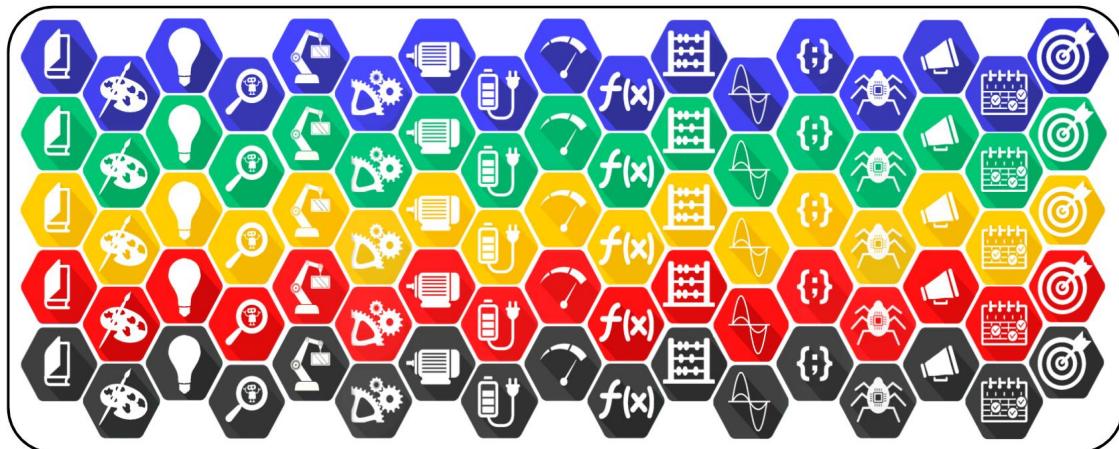


Figura 1.1: Recopilación de los iconos diseñados y utilizados

*Fuente: Autor***Capítulo 1: Introducción**

- Introducción, apertura del proyecto

Capítulo 2: Estado del arte

- Aspectos relacionados con el estado del arte

Capítulo 3: Punto de inicio del diseño

- Detalles sobre el robot



- Ideas de interés

Capítulo 4: Mecánica

- Aspectos generales de la estructura del brazo robótico



- Transmisión mecánica de movimiento

Capítulo 5: Electromecánica

- Actuadores para el brazo robótico



- Alimentación y etapas de potencia



- Sensores para el brazo robótico

Capítulo 6: Estudio matemático

- Ecuaciones y relaciones matemáticas



- Resultados calculados

Capítulo 7: Aspectos de Control

- Gráficas y aspectos del control

Capítulo 8: Software

- Diseño y desarrollo del software



- Test, verificación y debug del software desarrollado

Capítulo 9: Resultados y discusión**Capítulo 10: Gestión del proyecto**

- Gestión del proyecto

Capítulo 11: Conclusiones

- Conclusiones



Capítulo 2

Estado del arte

Una vez se han repasado los aspectos generales que se buscan para este proyecto conviene hacer un estudio de la situación actual de modelos comerciales o de investigación con los que se puedan encontrar sinergias.

De esta manera este capítulo hace un repaso de diferentes soluciones destinadas al soporte y posicionamiento de monitores, ordenadores o tablets. Además se hace referencia también a modelos de brazos robóticos específicamente destinados a la asistencia en entornos de usuarios. Dentro de todas las soluciones comerciales se centrará el estudio en las que están específicamente pensadas para su instalación en entornos médicos siempre que sea posible.

Según el apoyo así como los tipos de grados de libertad hay diferentes configuraciones posibles, en este capítulo se verán algunos modelos concretos de cada caso evaluando sus características, ventajas e inconvenientes de los mismos de forma que se pueda generalizar a modelos equivalentes. De igual manera se podrán encontrar modelos motorizados y modelos sin motorizar, clasificación por la que serán agrupados a continuación.

2.1. Soportes articulados sin motorizar

Dentro del grupo de soportes articulados sin motorizar se pueden clasificar según el tipo de anclaje que tienen, ya se enganchen al techo, pared, suelo, etc.

Dentro de cada tipo de anclaje los soportes comerciales disponibles son bastante parecidos por lo que se presentará un modelo concreto que encaje dentro de las dimensiones y capacidad de carga requeridas para la aplicación que se pretende explotar para sacar conclusiones generales sobre cada tipo de soporte.

2.1.1. Anclaje a la pared: Cotytech MW-M13P

Dentro de esta gama (Cotytech MW-M*) se pueden encontrar modelos para soportar diferentes cargas. Concretamente se ha elegido el modelo con menores prestaciones y que soporta menos carga por ser suficiente para la aplicación que se pretende

dar. Otros modelos pueden incluir soporte para teclado, caja y cobertura para cables y enganche a pared, entre otros, suponiendo un incremento sobre el precio de este modelo. Obtenida de [4] tenemos información relevante que se resume a continuación:



- Tipo de anclaje: Anclaje a la pared.
- Tipo de articulación: Articulaciones rotacionales.
- Capacidad de carga: entre $1kg$ y $6kg$.
- Extensión máxima: $185,7cm$.
- Número de grados de libertad: 5.
- Ángulos articulaciones: 370° (brazo posición), 270° (muñeca posición), 180° (pared)¹.
- Ángulos de orientación: Tilt: $20^\circ/-35^\circ$ (muñeca orientación) y $20^\circ/-60^\circ$ (brazo orientación).
- Peso del soporte: $4,76kg$.
- Precio estándar: 686.98€ .²

¹En la imagen se pueden ver tres puntos articulados diferenciados, el punto que se fija a la pared con un grado de libertad, el punto central del brazo, que tiene dos grados de libertad (se separarán entre orientación y posición, aunque su efecto no está desacoplado) y la muñeca, que incluye la articulación que se aprecia justo encima de la pantalla como la rotacional sobre la que queda enganchada la misma (con una clasificación análoga al caso intermedio).

²Precio a pasado a Euros según el cambio oficial en el día consultado.

Paralelamente a este modelo la marca Cotytech tiene una versión que, manteniendo el mismo esquema de mecánico, permite un anclaje al techo: el modelo CM-M13 visto en [5] con un coste de 853.06€ .

2.1.2. Anclaje al techo: Titan Elite T2EQ-C8X5

Concretamente se ha tomado el modelo con la montura doblada hacia arriba para un anclaje en el techo. La siguiente información constituye un resumen con los puntos más importantes vistos en [6]:



- Tipo de anclaje: Anclaje al techo.
- Tipo de articulación: Articulaciones rotacionales.
- Capacidad de carga: hasta $12,7kg$ en diferentes configuraciones.
- Extensión máxima: $106cm$ (la longitud vertical del anclaje al techo variará según se elija al comprar).
- Número de grados de libertad: 5.
- Ángulos articulaciones: 360° para las tres primeras articulaciones que rotan sobre el eje horizontal.
- Ángulos de orientación: Tilt: 50° .
- Peso del soporte: $9kg$.
- Precio estándar: 628.30€ .

Este mismo modelo cuenta con diferentes enganches y longitudes de los tubos que permiten anclarlo al suelo, al techo o a la pared indistintamente.

2.1.3. Anclaje a una mesa o superficie de trabajo: Ergotron LX Sit-Stand Desk Arm

De la gama incluida en los modelos de Ergotron LX se ha elegido aquel que tenía unas dimensiones más ajustadas a los requisitos de este proyecto. En general el resto de la gama y otros soportes similares tienen unas dimensiones más reducidas. Resumidas de [7] y [8] se encuentran a continuación las principales características del modelo:



- Tipo de anclaje: Anclaje a una mesa, camilla o similar.
- Tipo de articulación: Primera articulación prismática, resto rotacionales.
- Capacidad de carga: hasta 11,3kg.
- Extensión máxima: se puede variar hasta 36cm en altura (articulación prismática, esta es susceptible de ser modificada para ajustarla a otras alturas) y alcanza una extensión de 84cm
- Número de grados de libertad: 6 (una prismática y cinco rotacionales).
- Ángulos articulaciones: 180° la primera articulación, fija al anclaje; 360° a mitad del brazo y 180° en la muñeca.
- Ángulos de orientación: Tilt: (giro sobre el eje medio horizontal de la pantalla) 75°; Pan (eje perpendicular a la pantalla): 360°.
- Peso del soporte: 8,9kg.
- Precio estándar: 247.00€– 299.00€ dependiendo de la tienda y configuración.

Este mismo modelo cuenta con diferentes enganches y longitudes de los tubos que permiten anclarlo al suelo, al techo o a la pared indistintamente.

2.1.4. Consideraciones generales sobre los soportes no motorizados

Los modelos vistos hasta ahora presentan un rango de movimientos muy amplio, están certificados y preparados para su uso en entornos hospitalarios además de estar destinados precisamente al soporte de monitores. En todos los casos la capacidad de carga excede con creces la que se estima necesaria en este proyecto por lo que todas las opciones podrían ser válidas.

Aunque cuentan con puntos bastante favorables se trata de productos cerrados sobre los cuales sería complicado integrar actuadores y sensores de manera adecuada, segura y en última instancia, elegante. Además el rango de precios en el que se encuentran es bastante elevado.

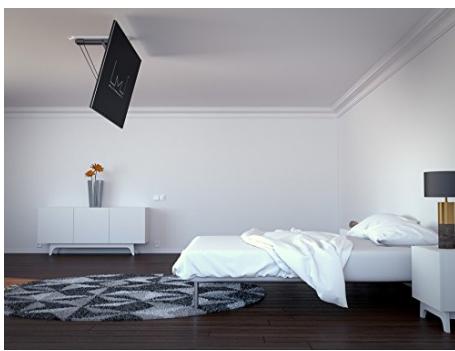
2.2. Soportes articulados motorizados

Se centrará este apartado en los modelos que se pueden ver en [9], como por ejemplo el MaiorFlip 900.



- Tipo de anclaje: Anclaje al techo.
- Tipo de articulación: Primera articulación rotacional, segunda prismática y tercera rotacional.
- Capacidad de carga: máximo de *28kg*.
- Extensión máxima: Descenso de hasta *68cm*
- Número de grados de libertad: 3 (una prismática y dos rotacionales).
- Ángulos articulaciones: Primera rotación giro de hasta 90° ; articulación prismática con un alcance de *68cm* con una capacidad de giro de la articulación final de 360° .
- Peso del soporte: *35kg*.
- Precio estándar: No facilitado.

Otros modelos que se pueden encontrar presentan unas características similares:



2.2.1. Consideraciones generales sobre los soportes motorizados

En esta línea podemos encontrar también los diseños de [10] o [11]. Se puede ver también el modelo [10] dotado de articulaciones paralelas que permiten controlar la orientación del dispositivo.

Este tipo de soportes están principalmente pensados para motorizar televisores de gran tamaño con unos rangos de movimiento bastante limitados. Comúnmente presentan grados de libertad para modificar la orientación de la pantalla y en pocos casos un grado de libertad extra para desplazar, sobre algún eje el dispositivo. No son aptos para la aplicación que se pretende dar puesto que no permiten su posicionamiento a una distancia adecuada del usuario.

2.3. Brazos robóticos para asistencia de pacientes

En general para el propósito que se plantea en este proyecto se podría adaptar una solución robótica comercial implementando una interfaz entre la tablet y el con-

trolador del brazo. En esta sección se presentan algunos modelos de brazos robóticos especialmente pensados como robots asistenciales, preparados para una interacción directa con pacientes en entornos hospitalarios o en casa.

2.3.1. JACO 3 fingers, Kinova robotics

Pertenece a la línea de productos de Kinova robotics especialmente diseñados como robots asistenciales. Están pensados para una interacción directa con el paciente o usuario de forma que pueda convertirse en una extensión del mismo proporcionándole una mayor independencia. Entre las características descritas en [12] y [13] podemos recoger las siguientes más relevantes:



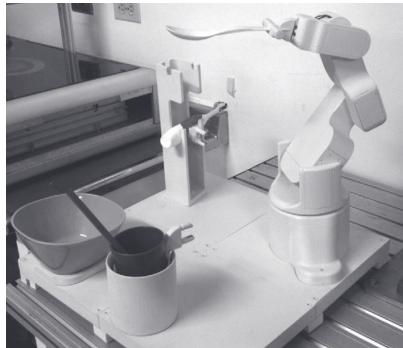
- Tipo de anclaje: Adaptativo a una mesa, silla de ruedas, etc
- Tipo de articulación: 6 grados de libertad rotacionales
- Capacidad de carga: entre $1,8kg$ y $1,6kg$ dependiendo de la versión elegida (con tres dedos tiene una capacidad menor).
- Extensión máxima: alcanza $90cm$.
- Número de grados de libertad: 6.
- Ángulos de posición: Rotación continua en las articulaciones.
- Ángulos de orientación: 55° en la muñeca.
- Peso del brazo: $5,7kg$.
- Precio estándar: desde 34900€ .

Este modelo concreto, Jaco, viene en dos formatos pudiendo tener dos o tres dedos en el manipulador de su extremo.

De esta marca se puede adquirir también el modelo MICO con algo menos de alcance ($70cm$) como se ve en [14]. Los grados de libertad ofertados varían entre 4 y 7, se ha optado por tomar una solución lo más parecida a la requerida.

2.3.2. Brazo Multi-manipulador de la Universidad de Navarra

Dejando de lado el ámbito puramente comercial se encuentran proyectos que es interesante repasar. En [15] se describe un modelo diseñado específicamente como robot asistencial con capacidad de cambiar, de forma autónoma, entre diferentes manipuladores disponibles como pueden ser una cuchara, un tenedor, un cuenco, entre otros.



- Tipo de anclaje: Lleva su propia plataforma sobre la que se monta
- Tipo de articulación: 4 grados de libertad rotacionales
- Capacidad de carga: manipuladores que adjunta.
- Extensión máxima: alcanza Superficie de trabajo de 40cm x 40cm.
- Número de grados de libertad: 4.
- Actuadores: Dynamixel AX-12
- Precio estándar: proyecto no comercial.

Es interesante destacar que aunque no se aportan demasiados datos sobre el modelo (peso del modelo, capacidad de giro de sus articulaciones, etc) si presenta un estudio completo de su aceptación así como facilidad de uso. Un sistema intuitivo es más fácilmente aceptado por los usuarios, a los cuales les será más fácil empezar a hacer uso de las facilidades que ofrece un robot de este tipo.

Los actuadores que utiliza son de la gama de Dynamixel, una serie de servo motores muy versátiles aunque sin demasiada carga útil una vez montados sobre las articulaciones.

2.3.3. Brazo robótico para personas con movilidad reducida

Continuando con modelos de un ámbito más académico se encuentra el modelo descrito en [16]. Se trata de un modelo plegable que puede ser almacenado o transportado dentro de una maleta de forma sencilla. Viene con un manipulador en forma de manopla que permite agarres de una amplia gama de objetos. También pensado para la asistencia de personas con movilidad reducida ha sido principalmente testeado para administrar alimentos y bebidas.



- Tipo de anclaje: Sin determinar.
- Tipo de articulación: 7 grados de libertad rotacionales
- Extensión máxima: alcanza 71cm.
- Número de grados de libertad: 7.
- Peso del brazo: 5kg con dos baterías.
- Precio estándar: proyecto no comercial.

2.3.4. Consideraciones generales sobre los brazos robóticos

Además de los mencionados, en esta misma línea podemos encontrar otros modelos como [17], para ayuda a la alimentación, en [18] diseñado específicamente para personas con movilidad reducida o [19] presentando un prototipo asistencial genérico.

Dentro de este formato conviene repasar el estudio hecho por [20] en el cual se comparan diferentes modelos de brazos robóticos asistenciales en parámetros como movilidad, capacidad de carga y también seguridad.

Aunque entre los modelos descritos sería fácil encontrar uno válido para la aplicación que se pretende dar, la mayoría de modelos comerciales (en los casos académicos se desconoce el precio que rondaría en caso de convertirse en producto comercial) tienen unos precios elevados que dificultarían su aplicación a gran escala.



Capítulo 3

Diseño del brazo robótico: Punto de inicio

En este capítulo se continuará perfilando los aspectos de diseño generales del prototipo. Una vez repasado el estado del arte en el capítulo 2 ya se tiene una idea de las soluciones disponibles y sus deficiencias y fortalezas. Este capítulo vuelve sobre los objetivos presentados en el capítulo 1 para ofrecer un marco más completo sobre el que se apoye todo el desarrollo del proyecto así como posteriores capítulos.

Es importante recordar que el prototipo debe estar en constante interacción con usuarios no especializados; es por ello que se han pre establecido unas características básicas que suponen un afianzamiento de la seguridad hacia los usuarios inherentes al diseño.

- Se impone el uso de motores con bajo par de trabajo. De esta manera se vuelve físicamente imposible que los mismos puedan suponer un riesgo para los usuarios ya que la fuerza que son capaces de realizar no es suficiente para suponer un peligro para los mismos.
- El uso de motores de bajo par implica una compensación del peso del propio brazo de forma que los motores deban cargar con el menor peso posible. Eso se consigue a través de mecanismos de cuatro barras acoplados, de igual forma que se hace en diferentes lupas y lámparas comerciales como se puede ver en la figura 3.1. Como demuestra [21] compensar este tipo de estructuras mediante el uso de muelles es bastante sencillo sea cual sea el número de articulaciones que acopladas.
- Además la elección de dichos motores implica una amplificación mecánica a lo largo de la transmisión del movimiento en el diseño del prototipo. Los motores estarán ubicados en la base y el par de los mismos será transmitido a las articulaciones. Se ha optado por una transmisión mediante hilos que, como dice [1] será siempre más silenciosa y suave, permitirá hacer la transmisión solo en un sentido, es decir, para subir el extremo del brazo (figura 3.2). El sentido de bajada se hará soltando dicho hilo dejando que la gravedad y el peso del brazo lo hagan descender. El paciente no sufrirá daños en caso de encontrarse en la trayectoria por la que se desplaza el robot ya que éste no será capaz de ejercer una fuerza activa sobre el paciente. La única carga soportada será el peso del robot resultante una vez compensada la carga.

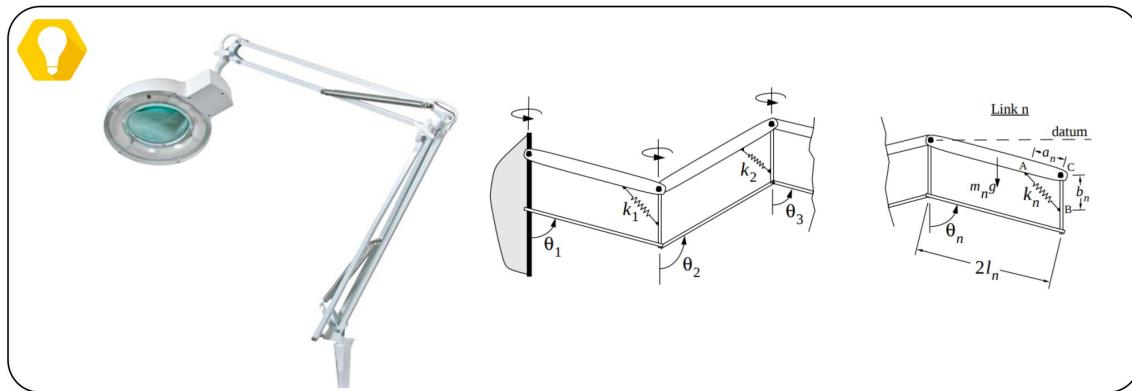


Figura 3.1: Ejemplos de como se acoplan y compensan estructuras basadas en mecanismos de cuatro barras

Fuente: A la izquierda imagen de internet. A la derecha es una captura de [21]



Figura 3.2: Captura del documento original digitalizado de [1]

Fuente: Captura de [1]

- El uso de hilos para la transmisión permitirá además una reversibilidad en el control efectuado. Otra posible alternativa es la transmisión del movimiento por rozamiento, de forma que el usuario no sufrirá daño alguno en cuanto la fuerza que haga el mismo sobre el robot supere el rozamiento de dicha transmisión.
- Se debe tener en cuenta, como requisito imprescindible, la carga que llevará en el extremo. El brazo debe ser capaz de soportar, en todo su rango de movimiento, el peso de la tablet, concretamente el modelo Surface de [22] con un peso de alrededor de 770g.

Como pruebas de concepto, puesto que el diseño de una versión completa lleva una cantidad de tiempo y de trabajo nada despreciables se ha hecho uso de diferentes maquetas diseñadas específicamente para probar algunas estructuras mecánicas que formarán parte de la estructura del robot. Algunos métodos sobre los que se puede apoyar la construcción de maquetas, siempre a escala, son la impresión 3D (maquetas en plástico) o el corte láser (maquetas en madera DM). De esta forma se realizan de forma rápida y barata pruebas de concepto para descartar o incluir diferentes ideas en el diseño final. Algunas maquetas realizadas para pruebas de concepto de la estructura mecánica se pueden ver en la figura 3.3.

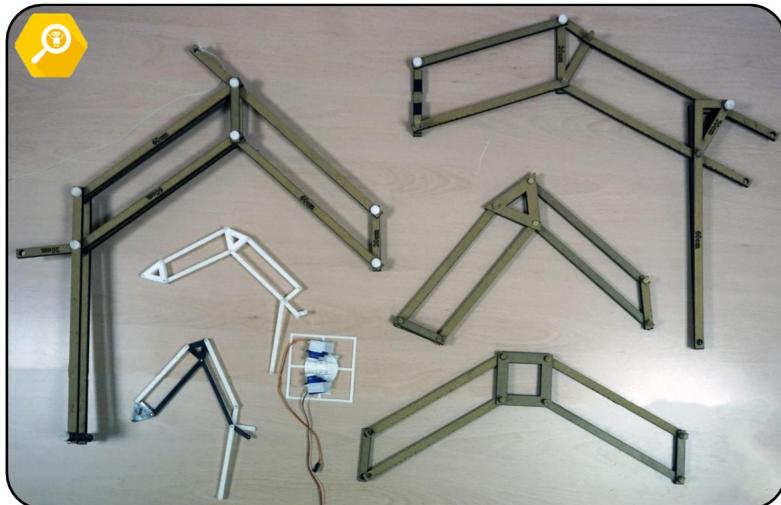


Figura 3.3: Maquetas en plástico y madera DM

Fuente: Autor

Aun haciendo uso de maquetas, y como en cualquier proyecto de prototipo, ha sido necesario seguir una metodología iterativa. Para los diferentes aspectos del proyecto se van probando y corrigiendo diferentes aspectos de la mecánica e integración de los componentes de forma que se va refinando y completando un modelo definitivo. Como ejemplo se puede ver en la figura 3.6 como ha ido evolucionando el desarrollo mecánico que se verá a continuación. La figura 3.4 contiene, de forma gráfica, una leyenda para entender el diagrama mencionado.

- **Versión 1.0:** Es la primera versión diseñada, y aunque no se llega a construir por completo supone un aprendizaje imprescindible para llevar a cabo modificaciones que den viabilidad al prototipo. Las piezas diseñadas e impresas daban soporte estructural al brazo. El giro Z queda articulado mediante ruedas tal y como se describe en la sección 4.3. La estructura mecánica se corresponde en esta versión con la descrita en la sección 4.4, concretamente en la figura 4.9, aun a modo de boceto.
- **Versión 1.1:** Supone un robustecimiento de las piezas auxiliares diseñadas. Las ruedas se sustituyen por un modelo más reducido que permite compactar la primera articulación. Se añade una base lo suficientemente pesada como para compensar el peso de la estructura manteniéndola en su posición en todo momento. Aunque se empieza a trabajar sobre los enganches para las articulaciones dos y tres, estas aun se encuentran en etapas iniciales del diseño.
- **Versión 2.0:** Se refinan las piezas dando más protagonismo estructural a los perfiles de aluminio y barras de acero, quedando las piezas con funciones de acoplamiento auxiliar. Se afirman los encajes de los motores y se afianzan las articulaciones dos y tres. La versión 2.0 constituye una primera versión real del prototipo. Supone una reducción en las dimensiones del brazo robótico para adaptarlas de forma más ajustada a las dimensiones de la camilla reduciendo a su vez el par soportado por los servos.
- **Versión 2.1:** Principalmente supone una evolución en la estructura de las

articulaciones dos y tres. Dentro de esta versión se agrupan diferentes modelos que llevan el diseño hasta la situación descrita en la sección 4.4, concretamente en la figura 4.10.

- **Versión 3.0:** Esta versión incluye nuevas piezas para el guiado del cableado así como fijación de los elementos estructurales. Constituye una versión ya funcional del prototipo, incluyendo las realimentaciones para los grados de libertad que corresponde. La mecánica desde el punto de vista de compensar carga queda bastante refinada.
- **Versión 4.0:** Se incluye un mejor guiado del cableado así como se corrigen diferentes piezas para optimizar su funcionalidad. El documento continúa describiendo en detalle la situación en esta última versión remarcando ideas de como ha evolucionado hasta la misma.

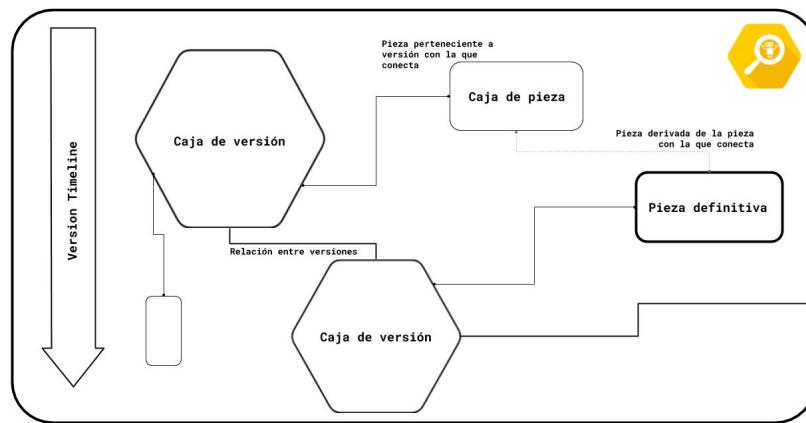


Figura 3.4: Leyenda gráfica de la figura 3.6

Fuente: Autor

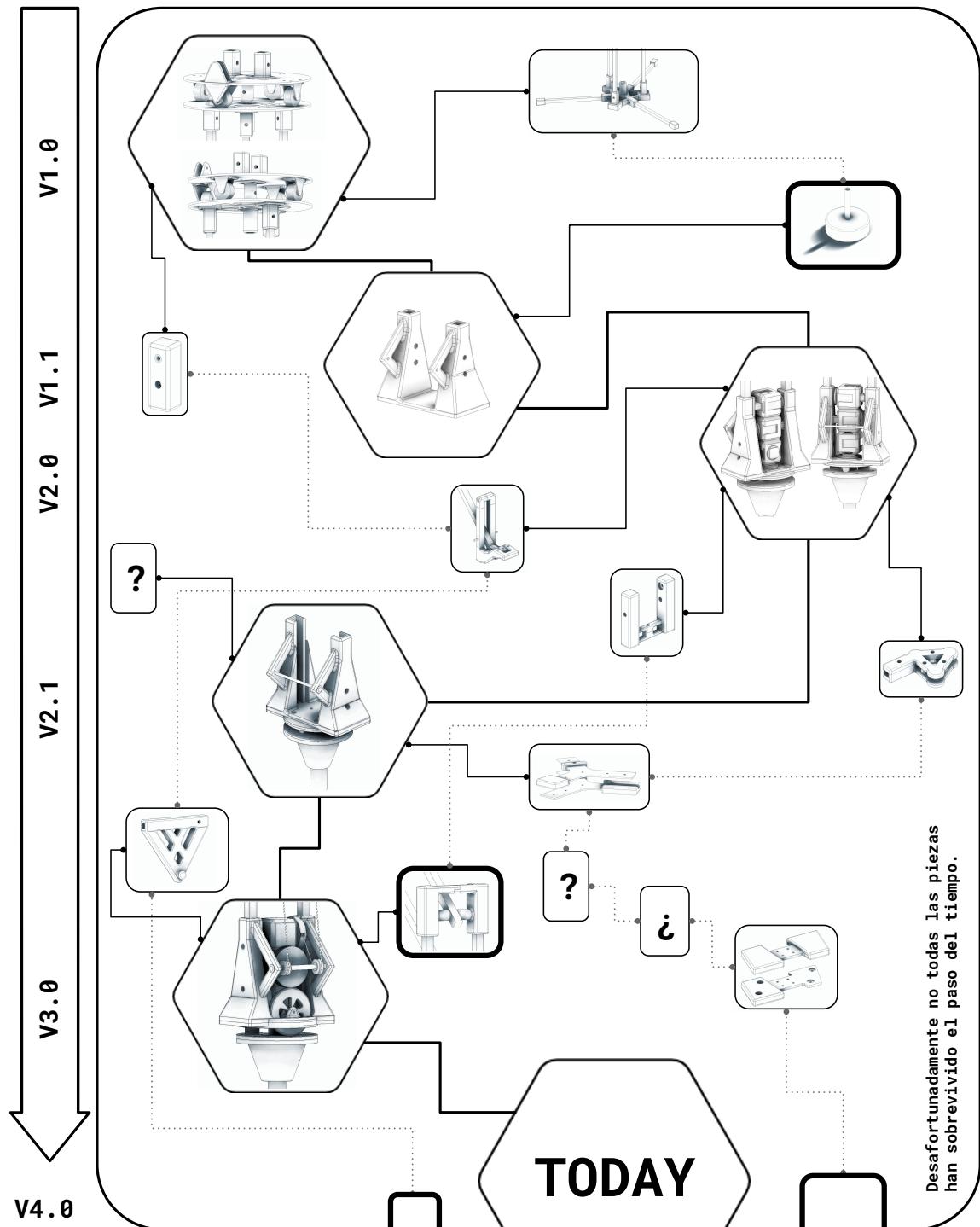
Como es de esperar, un proceso iterativo de este tipo acaba por generar un *cementerio* de piezas desecharadas y actualizadas a modelos más completos y mejorados.



Figura 3.5: Piezas previas al diseño definitivo

Fuente: Autor

Rob-volution



Enrique Heredia Aguado - Proyecto RoboHealtArm

Figura 3.6: Esquema de la evolución de diferentes versiones del diseño mecánico

Fuente: Autor



Capítulo 4

Mecánica y soporte físico del proyecto

Una vez vistas algunas ideas previas generales que deberá tener el prototipo diseñado este capítulo entra de lleno en la descripción de la solución mecánica obtenida así como una comparación con ideas previas.

4.1. Visión general y materiales estructurales

Antes de empezar a repasar los detalles concretos es necesario establecer unos convencionalismos respecto al uso de nomenclatura.

Como se ha descrito en el capítulo 3 el movimiento de las articulaciones encargadas de posicionar el extremo del robot se transmitirá de forma mecánica desde los motores hasta la propia articulación. Aunque no viene impuesto por ningún requisito funcional, se ha optado por fijar los tres primeros grados de libertad de tipo rotacional. En la figura 4.1 se puede ver un diagrama esquematisado de un brazo robótico con tres grados de libertad rotacionales. A partir de ahora se hará referencia a los tres primeros grados como los *GDL* o articulaciones de posición.

En la imagen se puede ver como serán nombradas las primeras tres articulaciones también se debe aclarar la nomenclatura a utilizar sobre los elementos que unen dichas articulaciones. Serán llamados indistintamente eslabones o barras estando numerando desde la barra cero, que conecta el suelo con el primer grado de libertad, en adelante.

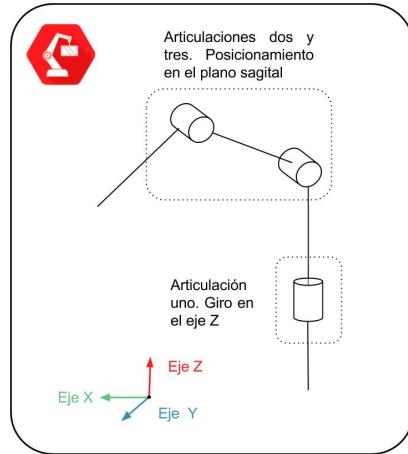


Figura 4.1: Modelo de los grados de libertad de posición. Convencionalismos tomados

Fuente: Autor

Como se ha comentado en secciones anteriores el brazo debe ser capaz de orientar la tablet de forma que ésta sea capaz de *ver* y seguir los ojos del paciente. Aunque el brazo podría anclarse a diferentes estructuras de ahora en adelante se centra la justificación y desarrollo en el caso de uso sobre una camilla. Este caso es el que requiere mayor longitud de trabajo de forma que las dimensiones del brazo deberán permitirle abarcar de un lado a otro de la camilla.

Este espacio de trabajo definido, que deberá abarcar aproximadamente 90cm (la mayoría de camas y camillas tienen esta medida), implica unas dimensiones de los eslabones del brazo considerables. Como se ha visto en capítulos anteriores el peso del prototipo es un factor importante tanto para la seguridad del usuario como para que pueda ser desplazado por unos motores de bajo par.

La transmisión mecánica del movimiento debe optimizarse para ser capaz de mover el brazo; este trabajo se verá simplificado a su vez aligerando, cuando sea posible, la estructura del mismo. Como material estructural base se han elegido perfiles de aluminio de sección cuadrada (cuya referencia es puede encontrar en el capítulo 10 junto con el resto de materiales). Estos perfiles presentan una alta resistencia y capacidad de carga a la vez que un peso reducido.

El material estructural definido se complementa con otra serie de piezas diseñadas específicamente para este proyecto (En el anexo A se encuentran descritas estas piezas). En este caso, por su versatilidad se utilizarán piezas modeladas digitalmente e impresas en 3D posteriormente. De igual manera parte del diseño se apoya en piezas de metacrilato cortado con láser. El tipo de fabricación del prototipo está en gran medida determinado por las posibilidades dadas en el laboratorio de proyectos.

Aunque el peso del brazo completo se estima será reducido, la transmisión mediante cuerdas debe ser completamente fiable. Debido a las dimensiones con las que se trabaja se ve inviable el uso de cadenas o cuerdas de gran grosor; es por eso que se ha optado por utilizar hilo de *kevlar* de un milímetro de grosor (pudiente aguantar hasta 135kg).

Aunque supone anticipar parte del desarrollo que se verá a continuación, a continuación se enumeran los materiales necesarios a nivel constructivo del proyecto, pudiéndose encontrar más información sobre los mismos en el capítulo 10:

- Barras de aluminio de sección cuadrada de 1/2" x 1m (lado de la sección x longitud). Siendo necesario un total de 3.3m de perfil.
- Rodamientos de bolas de 4mm x 13mm (diámetro interior X diámetro exterior)
- Rodamientos de bolas de 3mm x 10mm (diámetro interior X diámetro exterior)
- Rodamiento axial de 37.5mm x 52mm (diámetro interior X diámetro exterior)
- Barras de acero macizo cilíndricas de 4mm de diámetro
- Barras de acero macizo cilíndricas de 3mm de diámetro
- Piezas impresas en impresora 3D. (Lista detallada en el Anexo A)
- Piezas de metacrilato cortadas con láser. (Lista detallada en el Anexo A)
- Tornillería: tornillos y tuercas de diferentes métricas.
- Hilo de kevlar. Siendo necesario aproximadamente 3m.
- Poleas de acetal de 4.9mm x 21.8mm (diámetro interior X diámetro exterior).
- Soporte de sombrilla. La base sobre la que se apoye el brazo debe ser capaz de soportarlo en una posición de trabajo en todo momento. Para no fijar ni imponer ningún tipo de anclaje (a superficie plana, anclaje a una camilla, etc) se ha optado por esta solución para el desarrollo del prototipo.
- Barra cilíndrica de acero. Soporte para el robot de 70cm de longitud (20mm de diámetro y 1.2mm de grosor).
- Barra cilíndrica de aluminio. Eje de giro para la primera articulación, esta barra tiene 65cm de longitud (16mm de diámetro y 1mm de grosor).

En el capítulo 10, concretamente en la tabla 10.1, están reflejados los detalles técnicos de estos materiales así como las referencias de compra, cantidades necesarias y precios.

4.2. Filosofía y justificación de diseño

Tal y como se ha adelantado en el capítulo introductorio el software empleado para modelar el brazo robótico es Autodesk Inventor. Este programa es especialmente potente para modelado paramétrico; esto significa que permite definir una serie de parámetros que serán utilizados para definir las medidas de los bocetos. Un diseño bien modelado paramétricamente permite mucha flexibilidad a la hora de modificar ciertas medidas como pueden ser agujeros para tornillería, ejes u holguras.

El modelado de todas las piezas ha seguido esta filosofía de parametrización y dependencia entre las piezas de forma que el diseño sea lo más flexible posible en

cuanto a modificación de medidas. En la figura 4.2 se puede ver a modo de ejemplo parte de la lista de parámetros definida.

Nombre de parámetro	Unidad/Tipo	Ecuación	Valor nominal
+ Parámetros del modelo			
+ Parámetros de referencia			
- Parámetros del usuario			
DiametroBarraAluminio	mm	20 mm	20,000000
DiametroExtBarraAcero	mm	30 mm	30,000000
GrosorPared	mm	6 mm	6,000000
Holgura	mm	0,4 mm	0,400000
DistanciaEntrante	mm	20 mm	20,000000
MetricaPasante	mm	4 mm	4,000000
DiametroCabezaTornillo	mm	7 mm	7,000000
AltoCabezaTornillo	mm	4 mm	4,000000
AltoTuerca	mm	3 mm	3,000000
DiametroCircunscritoTuerca	mm	7 mm	7,000000
RedondeoBarras	mm	GrosorPared / 2 su	3,000000
LadoBarraCuadrada	in	1 in / 2 su	0,500000
DiametroExtRodamiento_4x13	mm	13 mm	13,000000
AltoRodamiento_4x13	mm	5 mm	5,000000

Figura 4.2: Ejemplo de parámetros definidos en Inventor

Fuente: Autor

4.2.1. Realidad de las formas

Cualquier diseño de producto, incluso desde un punto de vista más técnico incluye a su vez consideraciones sobre el diseño estético del mismo. Para este proyecto se ha intentado respetar la verdad de las formas predominantes tanto a nivel estructural como en el entorno de trabajo.

Como ya se ha visto, la base estructural del prototipo está conformada por barras de aluminio de sección cuadrada. Unido a la predominancia de formas rectangulares y/o cuadradas en una habitación de hospital (figura 4.3) se ha optado por un diseño basado en prismas rectangulares, con un aspecto más *retro*.

A nivel bibliográfico y del estado del arte estudiado se puede observar una tendencia a formas más suavizadas en muchos de los casos. En este proyecto se busca un contraste entre las formas que caracterizan al ser humano, más suavizadas y con geometrías complejas, en contraposición con las formas que definen el prototipo, formas geométricas y angulares.



Figura 4.3: Predominancia de formas rectangulares en el entorno de trabajo

Fuente: Imagen de consalud.es, editada posteriormente por el Autor

4.3. Primera articulación. Giro en el eje Z

Volviendo sobre el diseño mecánico, la primera articulación que se encuentra subiendo desde la base es la encargada de girar todo el robot en el eje Z.

Esta articulación está actuada por un Servo motor (descrito en detalle en el Capítulo 5. Como se ha anticipado el movimiento de este servo se transmite a través de un juego de ruedas que, solidarias a la parte superior (parte móvil), y por rozamiento, transmiten el movimiento de giro con respecto a la parte inferior (parte fija o base).

Una de las ruedas gira solidaria al servo motor, haciendo contacto firme con la rueda a continuación (rueda transmisora). Ésta será la encargada de transmitir el par sobre la superficie sobre la que apoya. El peso del brazo sobre dicho apoyo es suficiente como para asegurar que en condiciones normales de funcionamiento la articulación gire con normalidad; en caso de chocar contra aun usuario la fuerza será mayor y la rueda transmisora deslizará sobre la superficie inferior evitando daños al usuario.

En la figura 4.4 se puede ver en detalle el montaje de dicha estructura. Las piezas que aparecen en la imagen se pueden encontrar en mayor detalle descritas en el Anexo A.



Figura 4.4: Montaje de la transmisión del movimiento del servo a la articulación encargada de girar en Z

Fuente: Autor

Una vez vista la transmisión del movimiento queda otro punto importante, el apoyo del peso del brazo sobre la articulación. Referente a este punto se han explorado dos líneas del desarrollo posibles:

- Apoyo sobre ruedas: Además de la rueda transmisora se fijan a la parte móvil de la articulación una serie de ruedas sobre las que apoyará el brazo. Inicialmente puede parecer que el apoyo será más estable cuantos más puntos tenga; desde el punto de vista práctico incluir apoyos redundantes genera más problemas a la larga. Tres puntos son suficientes para definir un plano y es el número de ruedas óptimo a utilizar: dos ruedas de apoyo más la rueda de transmisión. Se puede ver en detalle como queda el montaje en la figura 4.6. Como se puede ver el diseño incluye unas piezas en metacrilato, en concreto la pieza solidaria a la parte fija del robot cuenta con una la superficie ranurada (grabado con la máquina de corte láser) para aumentar el rozamiento con la rueda de transmisión. Las ruedas de apoyo están ubicadas a la misma distancia del eje de giro que la rueda transmisora.
- Apoyo sobre rodamiento: El apoyo se realiza sobre un rodamiento axial; quedando junto a ambas piezas, superior e inferior, incrustados entre si. Sobre este punto se apoya el peso del brazo y el encaje entre las piezas impide que el eje del brazo se mueva de la vertical. El uso de un rodamiento implica reducir la distancia sobre la que se apoya el peso, aunque permite fijar por ambos lados las piezas al rodamiento de forma más firme. Finalmente ésta es la opción adoptada para el brazo robótico por aportar una mayor solidez y estabilidad al aportar punto de apoyo continuo en los 360° al rededor del eje.

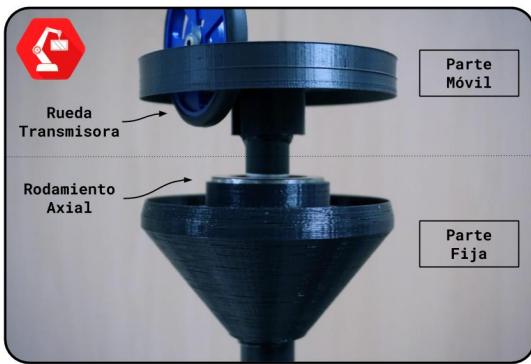


Figura 4.5: Apoyo basado en un rodamiento Axial

Fuente: Autor

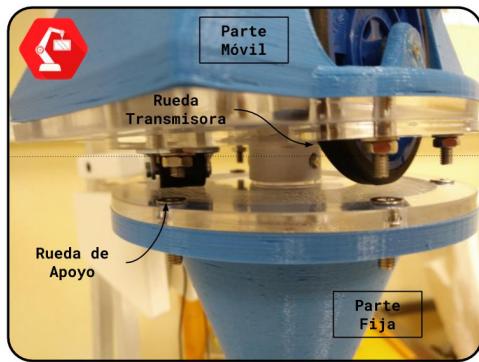


Figura 4.6: Apoyo basado en ruedas

Fuente: Autor

Además del tipo de apoyo se debe valorar en qué lado se sitúa la rueda de transmisión. Anticipando siguientes apartados la estructura del brazo sobresale por uno de los lados. En caso de ubicar la rueda motriz en el lado opuesto la carga dificulta el apoyo de la misma. En el caso de apoyo con ruedas además se apoya todo el peso sobre un voladizo, la distancia entre las dos ruedas de apoyo contrarias a la rueda de transmisión. Aunque en el caso del apoyo mediante rodamiento axial este efecto se suaviza, ya no apoya sobre un voladizo, el diseño final aprovecha la carga del brazo para asegurar el apoyo de la rueda de transmisión. En caso de que la explicación textual no sea suficientemente clara, se puede ver una representación gráfica de las diferentes situaciones en la figura 4.7.

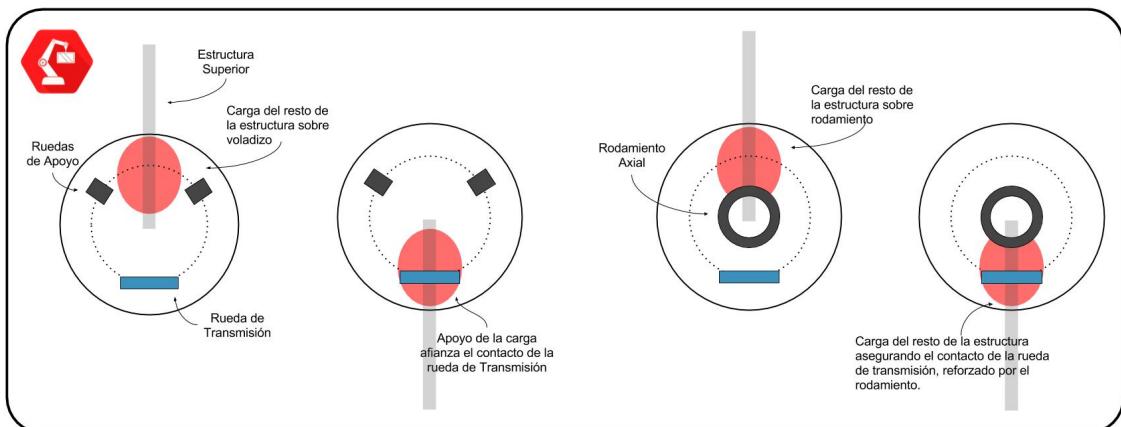


Figura 4.7: Comparación de como afecta el punto de apoyo de la carga superior sobre los diferentes apoyos

Fuente: Autor

Toda esta estructura va montada sobre una base que ejerce de contrapeso para evitar que el eje central del brazo (eje Z) se incline, que puede verse en la figura 4.8. Como se ha visto anteriormente para esta base se ha adaptado un contrapeso de sombrilla sobre el que encaja el brazo. Este apoyo podría modificarse e incluso adaptar una fijación a otra superficie en caso de montar el brazo en otro entorno.



Figura 4.8: Contrapeso para evitar el vencimiento del brazo

Fuente: Autor

4.4. Articulaciones dos y tres. Posicionamiento en el plano sagital

Las articulaciones dos y tres, representadas de forma esquemática en la figura 4.1 son las encargadas de posicionar el robot en el plano sagital del robot. Este plano girará al rededor del eje Z gracias a la articulación primera, vista en la sección anterior. Como se ha anticipado en el capítulo 3 estas dos articulaciones están conformadas por dos mecanismos de cuatro barras acopladas en serie.

La figura 3.3 del capítulo 3 ya anticipaba diferentes métodos de acople entre los mecanismos , cada uno presentando sus ventajas y desventajas.

La primera forma de acoplar ambos mecanismos es mediante una unión triangular (representada en la figura 4.9). En este caso se plantea fijar el segundo mecanismo, situado en el extremo a modo de estructura fija trasladando la responsabilidad de manejar ambos grados de libertad desde la primera articulación. El movimiento del extremo vendrá determinado por la combinación del giro de ambas articulaciones. Llevar ambos grados de libertad a un mismo punto de actuación supone una gran ventaja al evitar alargar la transmisión del movimiento del motor. Según se varíe la relación entre el tamaño de las barras así como los ángulos del acople se podrán conseguir diferentes relaciones de movimientos.

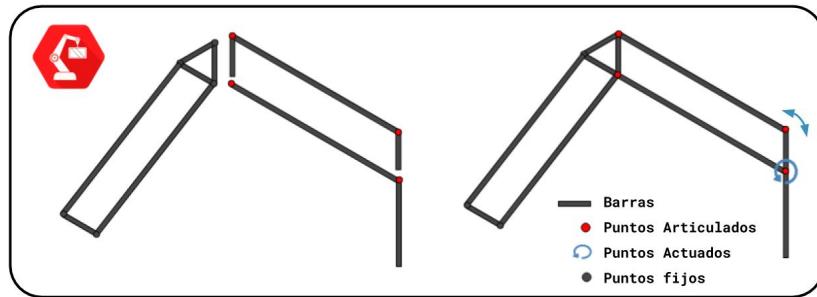


Figura 4.9: Esquema de las articulaciones dos y tres. Estructura de unión triangular
Fuente: Autor

La situación final elegida basa por presentar ambos mecanismos las mismas dimensiones siendo sus barras iguales dos a dos. Una cadena de eslabones configurada de esta manera, aunque alarga la necesidad de transmitir el movimiento hasta cada eje de giro, tiene la particularidad de que mantiene la orientación del extremo del brazo siempre paralela a la de la barra de acople y en este caso, al eje Z. En la figura 4.10 se pueden ver los puntos sobre los que se actúan ambas articulaciones. Concretamente se ha diseñado de forma que tanto el extremo como la barra acopladora se mantienen siempre perpendiculares al plano del suelo como se puede apreciar en la figura 4.11.

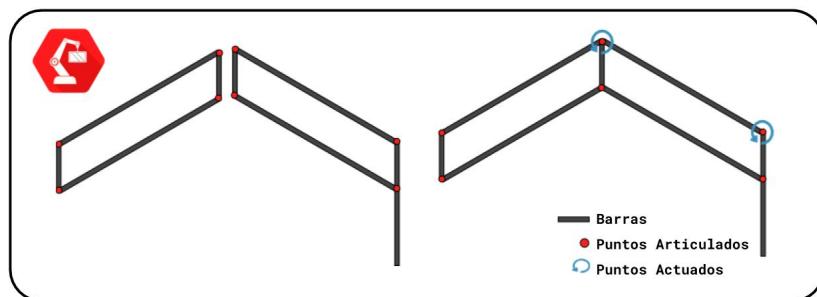


Figura 4.10: Esquema de las articulaciones dos y tres. Estructura de unión lineal
Fuente: Autor

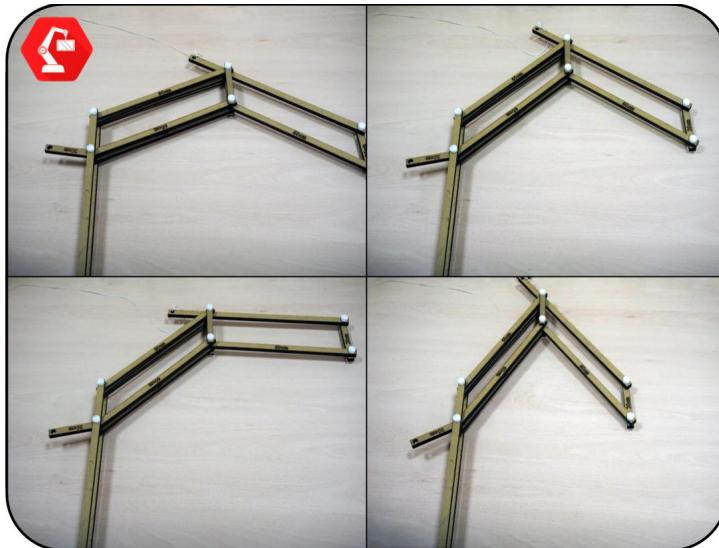


Figura 4.11: Diferentes posiciones articulares manteniendo la barra acopladora y el extremo perpendiculares

Fuente: Autor

Se ha adelantado en el capítulo 3 la importancia de compensar el peso. En [21] se puede encontrar una demostración matemática de como se puede compensar, mediante el uso de muelles, el peso de los eslabones así como de parte de la carga. Ambas estructuras expuestas permiten este tipo de compensación de la carga. Finalmente se ha optado por la segunda opción (acoplamiento lineal) ya que mantiene la orientación del extremo siempre constante y perpendicular al plano del suelo. Esta característica resulta muy útil ya que simplifica el análisis matemático y posterior control del brazo robótico en gran medida.

En versiones anteriores se ha probado con diferentes tipos de acoplamiento, en la figura 4.12 se puede ver como afecta esta pieza a la orientación del extremo en base a maquetas preparadas.



Figura 4.12: Diferentes geometrías de la barra acopladora

Fuente: Autor

Aunque en el esquema sobre el papel cuadre bien un acoplamiento lineal, en la realidad esto supone el apilamiento de muchos componentes sobre la misma barra. En ese caso la estructura resultante va engrosando y alejándose del plano sagital, lo que a futuro puede provocar fuerzas transversales indeseadas.

Para el montaje este acoplamiento lineal se ha separado formando una geometría de tipo paralelogramo (en línea con la representación de la figura 4.12), concreta-

mente romboide. Está conformado por una base de metacrilato con piezas de apoyo impresas en plástico que atrapan, a modo de *sándwich*, las barras estructurales de aluminio.

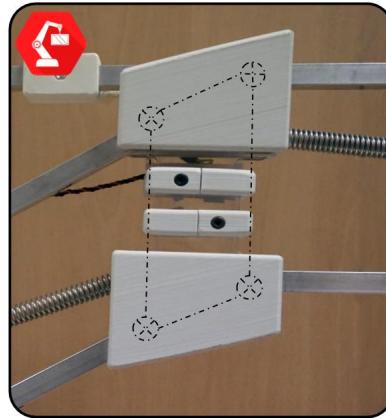


Figura 4.13: Imagen del acoplamiento *romboide*

Fuente: Autor

Volviendo sobre la compensación del peso del robot, se ha seguido una estrategia similar aunque simplificada a la planteada por [21]. El propósito de los muelles, uno para cada mecanismo, es el de compensar el peso de toda la estructura del brazo de forma que, en vacío, el brazo tenderá a elevarse. Será el peso de la *tablet* una vez se acople el culpable del funcionamiento del brazo tal y como se ha planteado: el manipulador asciende gracias al par aportado por los servomotores; y desciende por gravedad.

En la figura 4.14 se puede ver el montaje de las barras con los muelles que, de forma cruzada, se oponen al peso de la estructura. En esta imagen se anticipa algunos conceptos y servirá como mapa general para localizar diferentes componentes del brazo robótico sobre los que se focalizará a continuación.

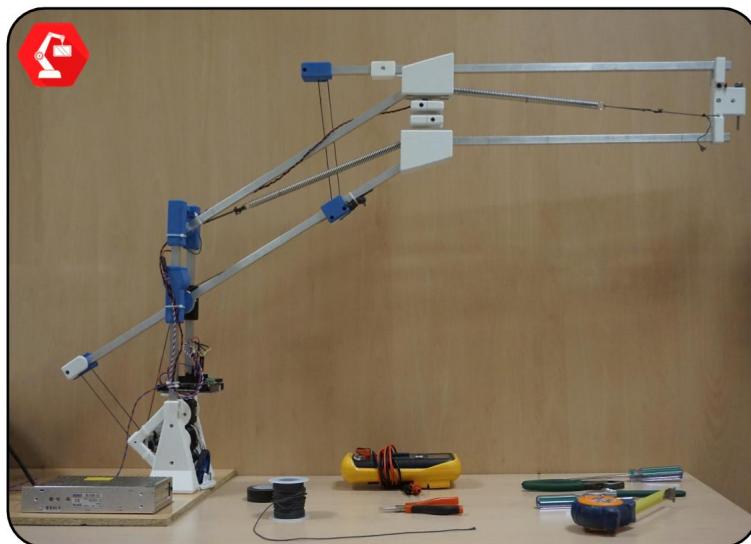


Figura 4.14: Vista genérica de los grados de libertad dos y tres

Fuente: Autor

La transmisión del movimiento para estos dos grados de libertad se ha realizado a través de hilos que van desde los servomotores hasta la articulación. Esos hilos están configurados de forma que no retornan hasta la polea de salida, polea acoplada al giro del motor. La transmisión está preparada para tirar de la carga de forma activa cuando se quiere subir la muñeca del robot, soltando cuerda en el caso contrario para dejarlo descender poco a poco.

En el caso de ambas articulaciones la carga recibida por el motor ha sido reducida a través de elementos mecánicos sencillos. El enganche para ambas articulaciones hace uso de la misma filosofía. Se ha alejado el punto de actuación del eje de giro para conseguir una palanca sobre la que se actúa maximizando así la fuerza realizada por el servo.

A su vez se ha aprovechado el concepto de *polipasto* ampliamente utilizado en actividades de trabajo vertical en las que sea necesario elevar cargas demasiado pesadas para ser manipuladas por una persona. Descritas en detalle por [23] basan su funcionamiento en combinar el uso de poleas fijas y móviles de forma que, el cable que las recorre, queda conectado a un punto fijo. De esta manera se reduce la fuerza necesaria para desplazar la carga, que estará acoplada a una de las poleas móviles.

La figura 4.15 representa una polea móvil de forma similar a como se ha aplicado en el proyecto. Como puntualiza [23] siempre y cuando las cuerdas se mantengan paralelas se obtiene una reducción de la fuerza necesaria para mover la carga P del 50 %. Esta sencilla demostración se puede ver en 4.1, que se deduce de un punto de equilibrio estático:

$$P = T_1 + T_2; T_1 = T_2; T_1 = \frac{P}{2} \quad (4.1)$$

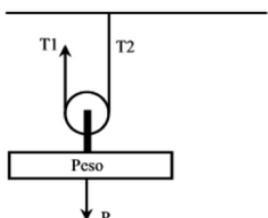


Figura 4.15: Polea Móvil

Es importante remarcar que ésta relación es una relación matemática; en la práctica, como bien Fuente: [23] apunta [23], el rozamiento supondrá pérdida del rendimiento. En función de la calidad de los rodamientos de la polea se obtendrán rendimientos de entre el 70 % y el 97 %.

Volviendo sobre el diseño del brazo se ha diseñado de forma que en todo momento ambas cuerdas se mantendrán paralelas; además las poleas están montadas sobre dos rodamientos que aseguran un mayor rendimiento de la amplificación mecánica. Se pueden ver ambos montajes (palanca y polipasto) en las figuras 4.16 y 4.17 el montaje de estos *columpios* para ambas articulaciones.

Para maximizar el par aplicado por el cable se ha buscado un punto de aplicación que forme 90°d con la palanca durante la mayor parte del recorrido. Al presentar una configuración no lineal, en los extremos se producirá una pérdida de par. Se ha diseñado de forma que este efecto se minimice.

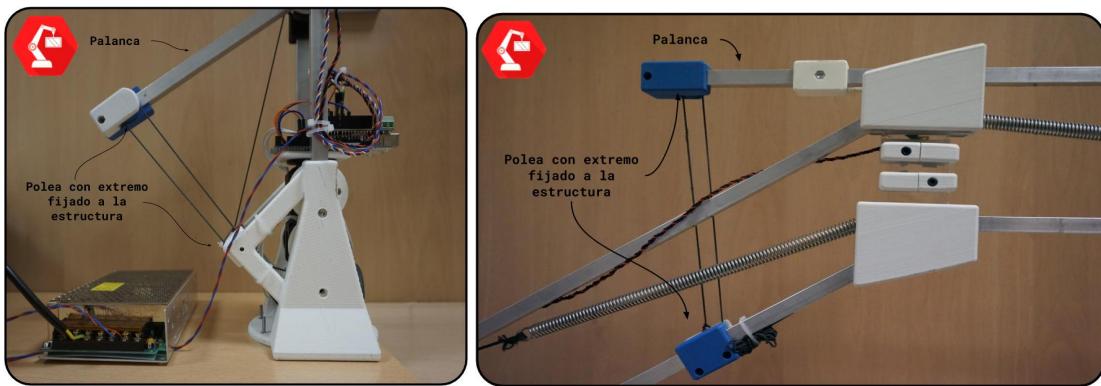


Figura 4.16: Transmisión hasta la primera articulación Figura 4.17: Transmisión del movimiento hasta la segunda articulación

Fuente: Autor

Fuente: Autor

Para conducir los cables de forma controlada hasta los puntos de actuación se ha hecho uso de poleas de redirección, cuyo ensamblaje puede verse en las figuras 4.18 y 4.19.

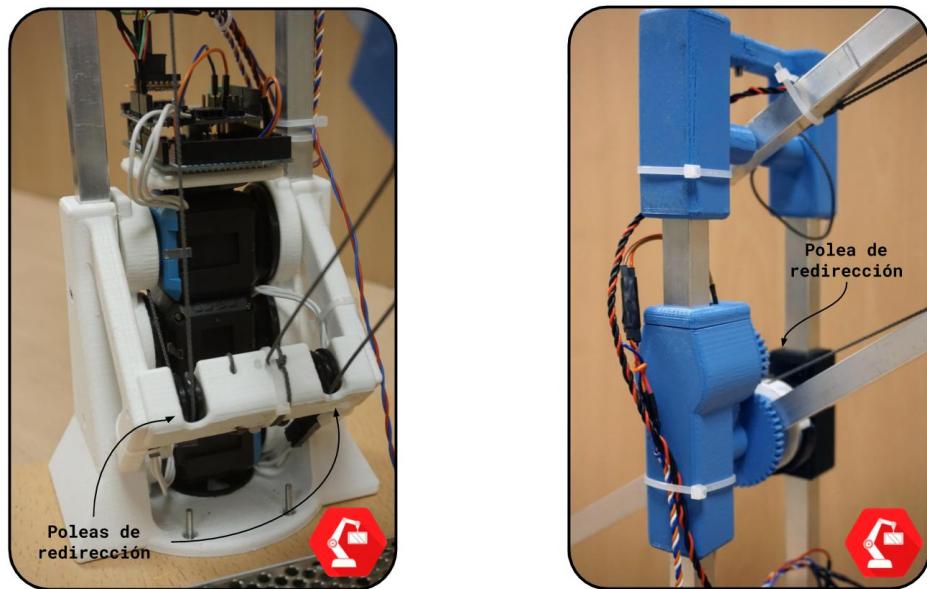


Figura 4.18: Redirección a la salida de los servomotores Figura 4.19: Redirección superior. Eje de la primera articulación

Fuente: Autor

Fuente: Autor



Capítulo 5

Diseño Electromecánico

Aunque se han anticipado tanto textualmente como a través de imágenes algunas características de los componentes electrónicos utilizados aún no se han descrito en detalle. Este capítulo se mete de lleno en los aspectos electromecánicos del brazo robótico, haciendo una descripción de los componentes empleados, algunas pautas para su correcto uso así como su integración dentro de la estructura descrita en el capítulo 4.

5.1. Actuadores

La imposición de utilizar unos motores de par reducido puede interpretarse como una desventaja, pero en este caso al quedar descartados los motores de corriente continua y motores paso a paso convencionales queda la alternativa de uso de *smart servos* con todas las ventajas que ofrecen.

Los *smart servos* elegidos para el proyecto son, concretamente, los G15 Cube de la marca Cytron. Estos servos vienen acompañados de una gran variedad de funcionalidades que facilitarán el control y manejo del brazo robótico. Estos servos, como la mayoría de *smart servos*, tienen implementado un sistema de comunicación bidireccional con la placa controladora a través de un tipo de comunicación conocida como *Half Serial Duplex Communication*. Como se cuenta en [24], este tipo de comunicación utiliza un solo cable que podrá operar en una u otra dirección cada vez. Puede darse la situación en que varios componentes intenten comunicar al mismo tiempo en ambas direcciones pudiendo ocasionar graves problemas en la electrónica de los mismos. El uso de este tipo de servos implica el uso de electrónica adicional, no solo a modo de etapa de potencia, si no para la gestión de la comunicación entre los mismos y el microcontrolador.

Utilizar un protocolo de comunicación más complejo permite conectar varios servos a un mismo puerto de comunicación, conectando cada servo al anterior, también conocido como conexión *daisy chain*. En la figura 5.1 se puede ver representada este tipo de cadena y donde se puede ver el aspecto del modelo de servos seleccionado.

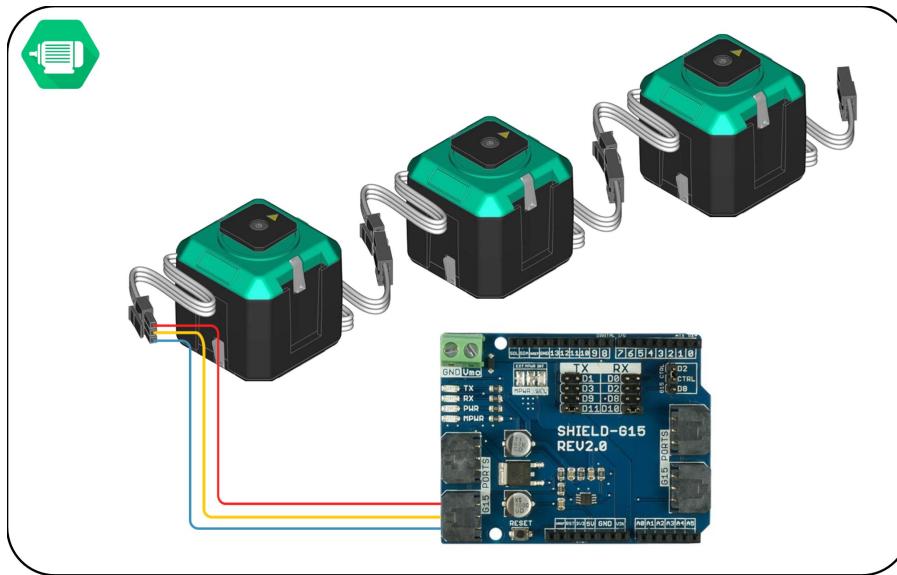


Figura 5.1: Esquema de la conexión de los servos formando un bus serie de servos y la placa *Shield*
Fuente: Montaje del Autor a partir de imágenes del fabricante

Para hacer efectiva la comunicación los servos G15 Cube cuentan con dos puertos de tres cables cada uno. Cada uno cuenta con un conector de aspecto y forma diferente que fuerzan las conexiones en un mismo sentido siempre de forma inequívoca. Estos tres cables, como se puede ver en la imagen 5.2, son utilizados para alimentación, referencia a tierra y canal de información.

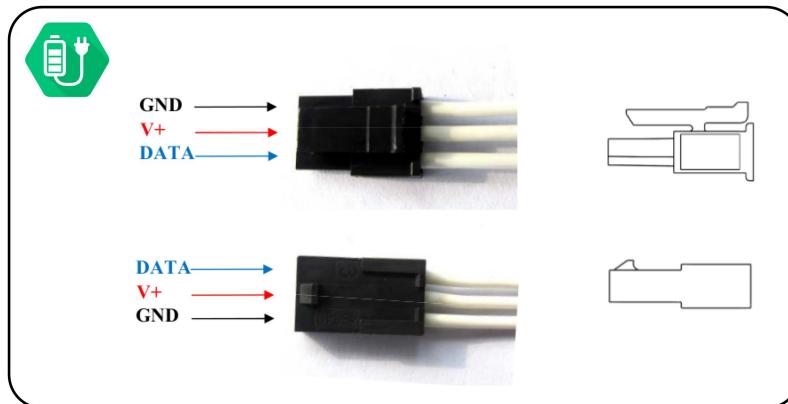


Figura 5.2: Conectores de los G15 Cube y uso de cada uno de los cables
Fuente: Captura obtenida de [25]

Entre las ventajas de utilizar *smart servos* es que se cuenta con información relevante que se podrá *preguntar* al servo cuando sea necesaria. Estos servos tienen diferentes modos de funcionamiento, aunque se utilizará principalmente el modo de **giro continuo**. Para este caso los servos ofrecen un control en par de manera que se podrán enviar comandos del par que deberá ejercer. Como información relevante a consultar ofrece datos de posición del servo, par realizado y sentido del mismo, temperatura, voltaje de alimentación, velocidad y sentido de movimiento, entre otros.

Cabe destacar algunas características importantes de los mismos, que se encuen-

tran resumidas en la tabla 5.1. Concretamente es de destacar los $12kg \cdot cm$ de par efectivo; un par relativamente bajo que se aprovechará como medida extra de protección a usuarios del brazo robótico tal y como se ha anticipado en capítulos anteriores.

Tabla 5.1: Características relevantes de los Servos G15 de Cytron.

Fuente: Tabla traducida y resumida de [25]

Características eléctricas			
Parámetro	Valor Mínimo	Valor Típico	Valor Máximo
Voltaje	6,5V	12V	17,8V
Consumo de corriente (12V)			1,5A
Temperatura de funcionamiento	0°C		80°C

Especificaciones técnicas	
Peso	63g
Par capaz de realizar (a 12V)	12kg · cm
Par capaz de soportar	15kg · cm
Margen angular de operación	360° en giro continuo
Máxima velocidad (en vacío a 12V)	63RPM
Comunicación	Half duplex asynchronous serial communication (7812,5bps – 500kbps)

Como curiosidad extra, este modelo de servos presenta la particularidad de estar diseñados de forma modular; así podrán ser apilados de diferentes maneras entre ellos.

5.2. Interfaz servos-microcontrolador

Pasada la descripción de los actuadores, los G15 Cube Servo, se hace patente la necesidad de una etapa intermedia entre la placa controladora y los servos que gestione la comunicación entre ambos de forma segura y que desacople la alimentación del controlador de la alimentación de los servos, que requieren un voltaje de 12V (ver 5.1).

Es la propia marca que fabrica los servos, Cytron Technologies, la que suministra una placa auxiliar o *shield* con este propósito. Concretamente se utilizará la segunda generación de dicha placa, vista en la figura 5.1 de la sección anterior.

Para la alimentación de los servos se ofrecen dos posibles entradas remarcadas en la figura 5.3 con los colores azul y rojo. Para alternar de una a otra habrá que, mediante el uso de un soldador, modificar la conexión recuadrada en amarillo para habilitar la opción deseada deshabilitando la contraria.

- Alimentación externa (recuadrada en azul): en este caso se conecta la fuente de alimentación directamente a los conectores pasando el voltaje a los cables de alimentación de los servos.
- Alimentación mixta shield-controlador (recuadrada en rojo): en este caso la alimentación se comparte con la placa controladora (que deberá rectificar el voltaje de entrada a valores aceptables para la misma). Por defecto esta es la entrada que viene habilitada; se ha mantenido ya que permite la alimentación

simultánea de los servos y de la placa controladora a partir de la misma fuente de alimentación (se verá en secciones posteriores la elección del controlador y otros aspectos). Esta entrada suministra los 12V necesarios para los servos a la vez que, internamente a la placa Arduino, se rectifica a 5V para la alimentación de la misma.

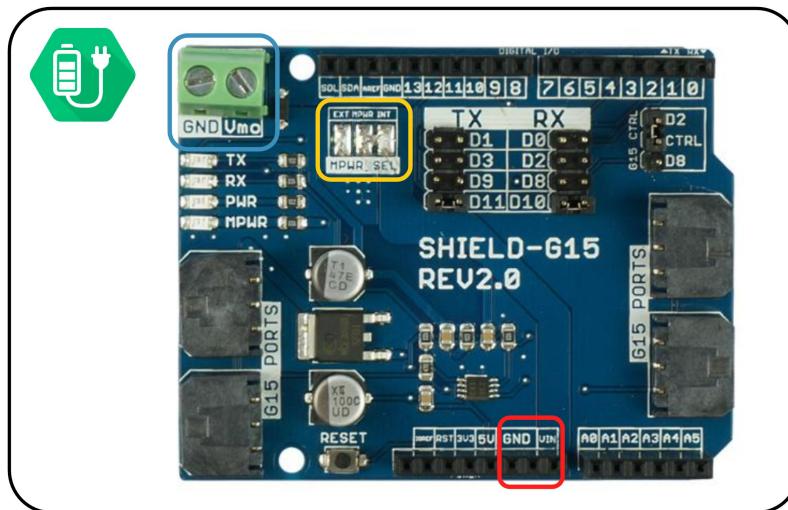


Figura 5.3: Posibilidades para la alimentación de los servos

Fuente: Captura obtenida de [25] y editada por el Autor del proyecto

En la figura 5.3 pueden distinguirse una serie de pines de conexión con las letras RX, TX y CTRL. Esta placa está pensada para funcionar a modo de interfaz entre un puerto serie común (con un cable de emisión y otro de recepción de datos) y un puerto serie de tipo *Half Duplex* como el empleado por los servos.

Como se describe en [25] la *shield* incluye integrada un circuito integrado (concretamente el 74HC126 IC) que resuelve los problemas de comunicación inherentes a la comunicación bidireccional por un solo hilo. A través de un pin de control (CTRL en la shield) se gestiona la conexión entre el hilo del *Half Duplex* y los hilos del puerto serie alternando de uno a otro en función del estado de la señal de control (alto nivel o bajo nivel).

5.3. Placa controladora

La placa *shield* descrita en el apartado anterior está especialmente diseñada para encajar en placas tipo Arduino, concretamente el modelo Arduino Uno. En el marco de este proyecto se ha realizado una fase del desarrollo utilizando como base una placa Arduino Uno, aunque posteriormente se ha cambiado a un Arduino Mega. Más adelante se explicará la motivación de dicho cambio, pero merece volver sobre el aspecto de la alimentación de la placa descrito en el apartado anterior. Según se especifica en [26] y en [27] el voltaje de entrada recomendado abarca desde los 7 a los 12V teniendo como limitación inferior un mínimo de 6V y un máximo de 20V. En este caso se aplicarán 12V, que quedan incluidos dentro del rango recomendado por el fabricante.

En el caso de la placa Arduino Uno la *shield* viene preparada para encajar sobre la misma. La comunicación con los servos está pensada para efectuarse de dos formas:

- A través de un puerto serie UART hardware: en el caso de la placa Arduino Uno solo dispone del puerto conectado a los pines 0 y 1, que también es el usado para la carga de software y comunicación con el ordenador, por lo que queda descartado.
- Emulando un puerto serie mediante software en otros pines de la placa. La *shield* trae una serie de *jumpers*¹ que permiten cambiar entre una selección de pines para cada caso (RX, TX o CTRL).

Como se puede ver, utilizando una placa Arduino Uno la comunicación con los servos queda relegada a un puerto emulado por software. Esta es la razón principal por la cual se decide cambiar y utilizar una Placa Arduino Mega2560, que además presenta mayores prestaciones respecto a memoria (ver tabla 5.3). Para el control del brazo robótico y el diseño y testeo del software es necesario optimizar la velocidad de comunicación entre los dispositivos al máximo. La placa Arduino Mega incluye tres puertos serie hardware adicionales que se podrán puentear a la placa *shield* para ser utilizados. Esta conexión se puede ver en la figura 5.4. De esta forma se podrá aprovechar todo el potencial de la comunicación a través de un puerto serie hardware.

Se utilizarán tres puertos serie de la placa: uno para comunicar con los servos, otro para la carga de software así como funcionalidades de debug para desarrollo y un tercer puerto para el control del robot a través una comunicación serial.

Para hacerse una idea de la importancia que tiene este cambio se ha forzado la comunicación en ambos casos para obtener los máximos en los cuales sería viable trabajar. Los datos presentados en la tabla 5.2 se han obtenido de forma experimental bajo el marco de este proyecto. Entre los mismos se puede apreciar la gran diferencia existente entre las diferentes formas de comunicación. Las velocidades se han ido duplicando (a modo de convencionalismo las velocidades de comunicación estándar para Placas Arduino suelen obtenerse de esta manera) hasta llegar al máximo que permite una comunicación satisfactoria.

Tabla 5.2: Comparativa entre placas Arduino Uno y Arduino Mega2560

Fuente: Tabla con información obtenida de forma experimental

Tipo de comunicación	Velocidad máxima en baudios	Velocidad máxima en bytes/milisegundo
Puerto Serie Software (AUno): Shield-controlador	57600 bauds	7.2 bytes/ms
Puerto Serie Hardware (AMega): Shield-controlador	460800 bauds	57.6 bytes/ms
Puerto Serie Hardware (Ambas): controlador-ordenador	921600 bauds	115.2 bytes/ms

En este proyecto concreto se enlazarán diferentes lazos de control a diferentes frecuencias de refresco (ver capítulo 7) que exigirán el máximo de la capacidad comu-

¹Los *jumpers* son conectores que sirven para cortocircuitar el par de pines que se deseé.

nica entre los dispositivos. Los datos máximos obtenidos para la placa Arduino Mega son los utilizados para el funcionamiento del robot.

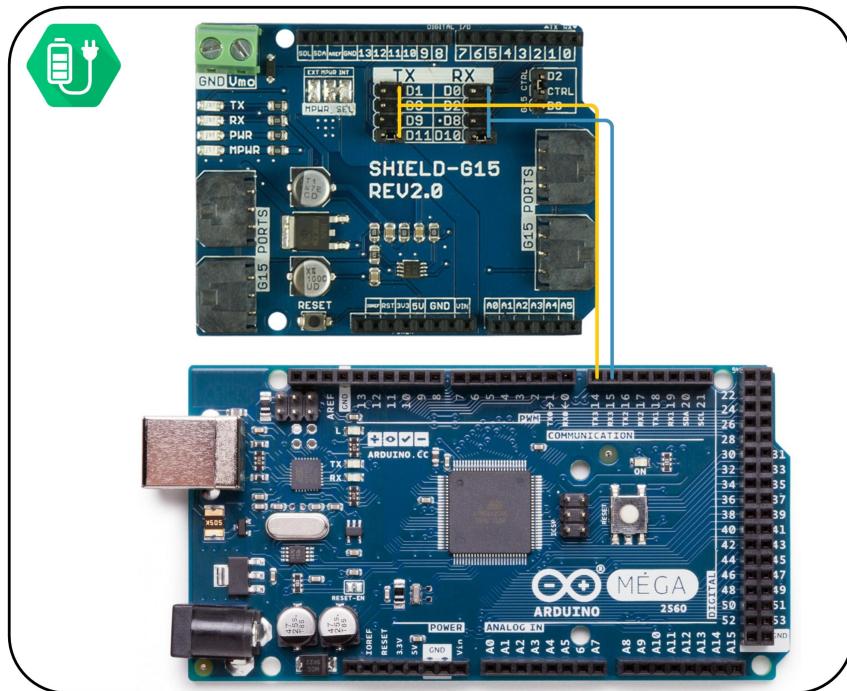


Figura 5.4: Esquema de la conexión entre la placa Shield y Arduino para utilizar los puertos Hardware Serie de la Arduino Mega

Fuente: Montaje del Autor a partir de imágenes del fabricante

Tabla 5.3: Comparativa entre placas Arduino Uno y Arduino Mega2560

Fuente: Tabla con información resumida de [26] y [27]

	Arduino Uno	Arduino Mega2560
Número de pines entrada/salida	14	54
Memoria flash	32KB	256 KB
SRAM	2KB	8KB
EEPROM	1KB	4KB
Velocidad de reloj	16MHz	16Mhz

5.4. Sensores

A pesar de la gran cantidad de información que ofrecen los servos escogidos, por las características mecánicas descritas las medidas que proporcionan no son medidas directamente referenciadas a las articulaciones. Desde el punto de vista de control del brazo robótico el objetivo es el control del brazo completo descomponiendo el problema de control de las articulaciones. Principalmente en las articulaciones dos y tres cuya relación entre las medidas del servo y el comportamiento de la articulación es más compleja es conveniente incluir una realimentación externa, concretamente de posición.

La realimentación se hará efectiva a través del uso de potenciómetros para ambas articulaciones. Aunque aun no se ha tratado en detalle los rangos de movimiento posibles para cada articulación, la explicación de la sección 4.4 permite deducir que el rango de movimiento será: para el caso de la segunda articulación menor a 180° ; para la tercera articulación menor a 90° . En capítulos posteriores se tratará en detalle estos aspectos del robot; es necesario anticiparse para la elección de los potenciómetros.

El modelo de potenciómetro elegido es el modelo TW1502KA de la marca TE Connectivity (ver figura 5.5). Se pueden ver las características principales mostradas en [28] en la tabla 5.4



Figura 5.5: Visual del potenciómetro escogido

Fuente: Fotografía del fabricante

Tabla 5.4: Características resumidas del modelo de potenciómetro TW1502KA

Fuente: Tabla con información resumida de [28]

Resistencia	$5K\Omega$
Rotación (rango eléctrico)	$265^\circ \pm 5^\circ$
Tolerancia	10 %
Tipo de Respuesta	Lineal

Se puede apreciar, que los potenciómetros escogidos cubren por completo el rango de movimiento de las articulaciones que se pretende realimentar.

5.5. Fuente de alimentación

Acorde con la información que se ha dado anteriormente la fuente elegida (ver figura 5.6) deberá suministrar un voltaje suficiente para la alimentación de todo el sistema. Se ha escogido el modelo S-120-12, cuyas características se pueden ver en la tabla 5.5.



Figura 5.6: Visual de la fuente de alimentación escogida

Fuente: Fotografía del fabricante

Tabla 5.5: Características de la fuente de alimentación

Fuente: Fuente de alimentación

Voltaje de entrada	200 – 240V(AC)a
Intensidad de entrada	1,2A
Voltaje de salida	+12V(DC)
Intensidad de salida	10A

5.6. Adaptador USB para puerto serie

Este componente permite adaptar los puertos serie de la placa Arduino Mega de forma que sean compatibles con una entrada USB. De esta forma se tiene acceso a los pines RX y TX a través de USB. Se utiliza para comunicar otro puerto serie extra a través de USB.

En modelo de la figura 5.7 es compatible con dispositivos a 3.3V y a 5V (como es el caso de la placa utilizada).

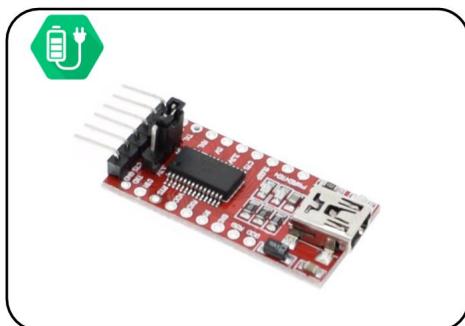


Figura 5.7: Adaptador puerto serie a USB

Fuente: Fotografía del fabricante

5.7. Integración de los componentes en la estructura mecánica

Una vez conocidos los componentes electromecánicos que se van a utilizar pueden ser integrados en la estructura diseñada.

En el caso de los tres servos encargados de los grados de libertad de posición, han sido montados en una torre apoyándose en la modularidad de su diseño. De esta forma la torre queda anclada a ambos lados de la estructura así como a la base.

En el caso de los correspondientes a la segunda y tercera articulación, el eje que fija la polea solidaria al motor que enrolla el cable se apoya en el otro extremo para evitar que el servo tenga que absorber las fuerzas de tracción que provoca el peso del brazo transmitidas a través de la cuerda. Se puede ver una representación del despiece de dicha estructura en la figura 5.8

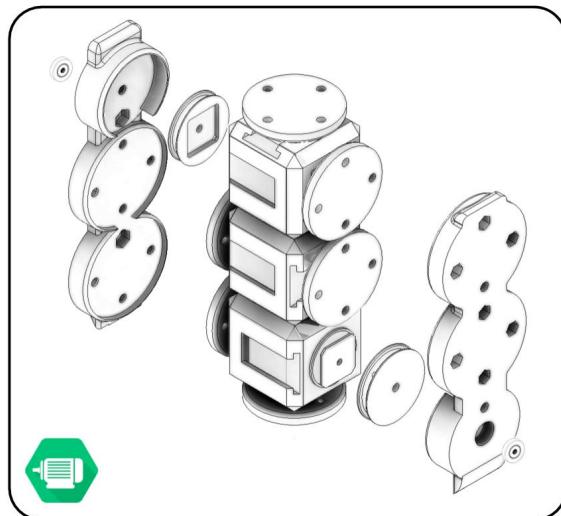


Figura 5.8: Representación de como se fijan los servos a la estructura

Fuente: Autor

Ambas placas, tanto la *shield* como la placa Arduino Mega van montadas sobre una plataforma aprovechando los anclajes de los servos, tal y como se presenta en la figura 5.9.

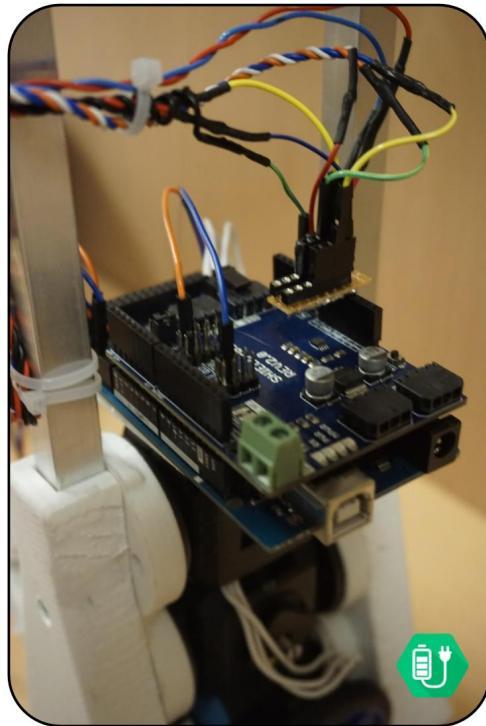


Figura 5.9: Acoplamiento de las placas y motores

Fuente: Autor

En el caso de los potenciómetros su montaje difiere de un caso a otro:

- Segunda Articulación: El movimiento de la articulación se transmite a través de un juego de engranajes hasta el potenciómetro, que está ubicado sobre el eje de dicha articulación. Se puede ver el montaje en la figura 5.10. Se ha aprovechado el uso de engranajes para aumentar la resolución de medida de forma que el movimiento se amplifica para aprovechar en su totalidad los 265° de giro ofrecidos por el potenciómetro. La relación entre las medidas se presenta a continuación:

$$MedidaArticular = \frac{MedidaPotenciometro \cdot 180}{265} \quad (5.1)$$

- Tercera articulación: El eje del potenciómetro se encuentra en la misma línea que el eje de la articulación. Se ha diseñado una pieza para unir el eje del potenciómetro al giro de la barra que puede verse en la figura 5.11 En este caso la lectura leída del potenciómetro (en grados) es equivalente al desplazamiento articular.

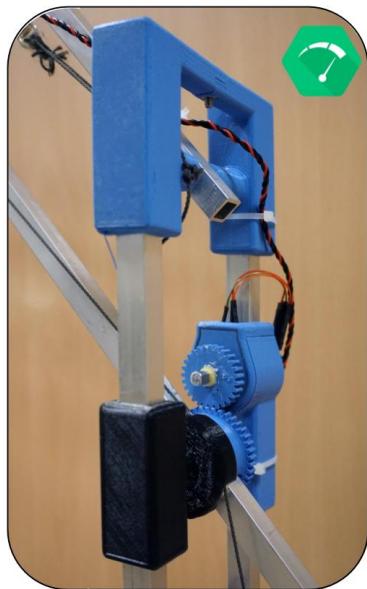


Figura 5.10: Montaje de la realimentación para la segunda articulación

Fuente: Autor

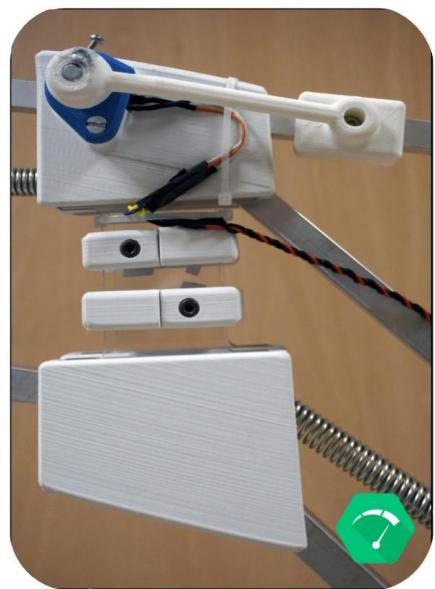


Figura 5.11: Montaje de la realimentación para la tercera articulación

Fuente: Autor



Capítulo 6

Estudio Cinemático y Matemático

Este capítulo describe y desarrolla las relaciones matemáticas que definen los aspectos del brazo robótico tal y como se ha descrito, principalmente las relacionadas con la cinemática del robot.

6.1. Convenio de ángulos y referencias

Antes de comenzar con las ecuaciones matemáticas se deben establecer unas referencias básicas. En la figura 6.1 se pueden ver representadas las que se utilizarán en apartados posteriores.

- **q1, q2 y q3:** ángulo de giro de las articulaciones uno, dos y tres respectivamente. La flecha marca el sentido creciente de los ángulos estando el cero situado en: eje X para el caso de q1 y en el eje vertical para el caso de q2 y q3.
- **Dimensiones del brazo:** siendo conocidas L1, L2, L3, LA, LB.
- **Punto** (x_r, y_r, z_r): extremo del brazo respecto al cual se obtiene la cinemática.
- **Ángulos auxiliares:** q2' y q3' que tendrán un papel importante en cálculos posteriores.

Tal y como se ha explicado en el capítulo 4 se contempla una variación en el apoyo y/o base del brazo robótico en función del lugar donde se instale. La cinemática está referenciada respecto de la articulación A_1 , utilizando el sistema de referencia representado en la figura 6.1.

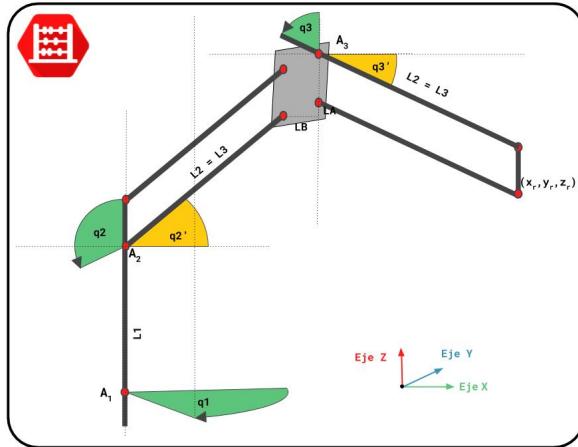


Figura 6.1: Relación con los ángulos y medidas de interés

Fuente: Autor

Además de los parámetros descritos el desarrollo de la cinemática utiliza una serie de medidas auxiliares que se pueden ver en la figura C donde es importante destacar la definición del punto (x_p, y_p, z_p) .

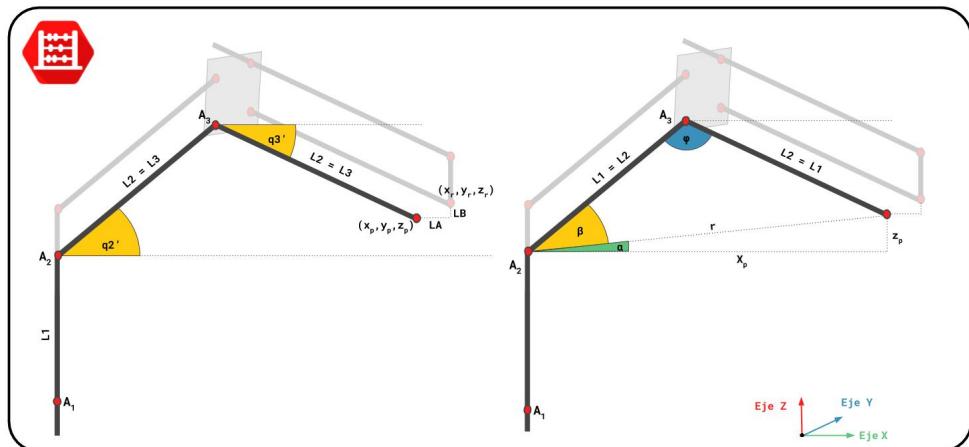


Figura 6.2: Representación de los ángulos y distancias auxiliares más representativas. GDL 2 y 3

Fuente: Autor

Las coordenadas X y Z del punto p se obtienen de desplazar el punto r simplificar los cálculos angulares. La coordenada en el eje Y coincide para ambos puntos (ver figura 6.3).

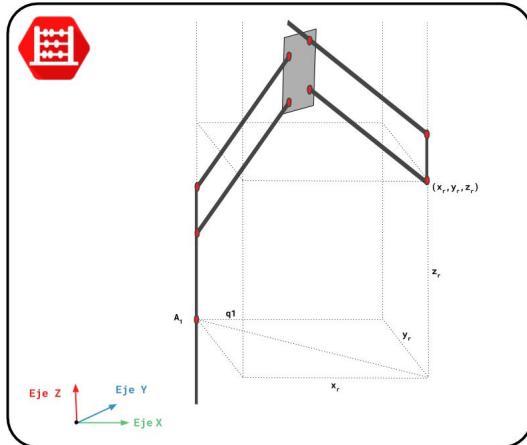


Figura 6.3: Representación de los ángulos y distancias más representativas. Primer grado de libertad

Fuente: Autor

6.2. Cinemática del robot

La solución del problema cinemático del brazo tal y como se ha diseñado es bastante sencilla de obtener mediante métodos geométricos. Aunque se presentan los parámetros de Denavit-Hartenberg y el cálculo definitivo y control del brazo utilizan las relaciones obtenidas mediante relaciones geométricas.

Como se ha descrito en el capítulo 4 la orientación de la barra acopladora así como de la barra del extremo se mantienen siempre perpendiculares al plano del suelo; esto permite referenciar los ángulos de las articulaciones dos y tres (d2 y q3 en la figura 6.1) respecto del eje vertical, de forma que son independientes de la posición angular del resto de articulaciones. Como se verá a continuación esta característica facilita los cálculos matemáticos.

Las funciones trigonométricas seno, coseno y tangente no son unívocas para giros completos de 360° , la cinemática calculada tiene unos rangos de aplicación definidos para cada articulación en base al movimiento que físicamente son capaces de realizar. Se pueden ver estos intervalos en la tabla 6.1.

Tabla 6.1: Rango de movimiento articular.

Fuente: Autor

Articulación	Extremo inferior	Extremo superior
q1	0°	180°
q2	90°	180°
q3	0°	90°

Las medidas del brazo robótico, presentadas inicialmente en la figura 6.1 pueden verse en la tabla 6.2 , los cálculos de la cinemática mantendrán estas variables de manera simbólica.

Tabla 6.2: Medidas estructurales

Fuente: Autor

L1	0.3270 m
L2	0.455 m
L3	0.455 m
LA	0.030 m
LB	0.042 m

6.2.1. Parámetros de Denavit-Hartenberg

Se ha desarrollado siguiendo los pasos descritos por [29]. En la figura 6.4 puede verse la posición de los sistemas de referencia definidos. En la tabla 6.3 se muestran los parámetros de Denavit-Hartenberg en base a dichos sistemas de referencia.

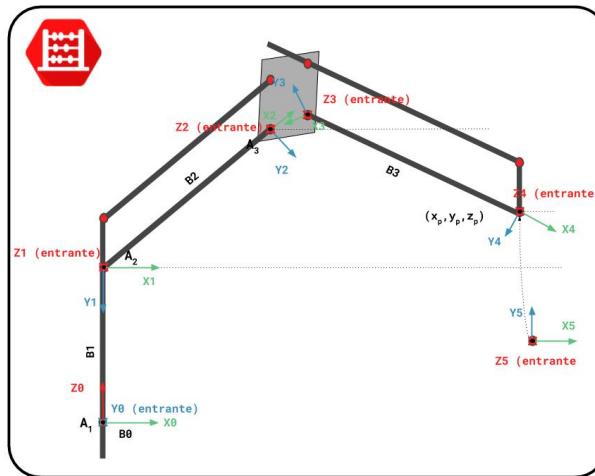


Figura 6.4: Sistemas de referencia

Fuente: Autor

Nótese que los ángulos q_2 y q_3 a los que se hace referencia en este apartado, los ángulos de los parámetros de Denavit-Hartenberg, son en realidad q'_2 y q'_3 presentados anteriormente.

Tabla 6.3: Medidas estructurales

Fuente: Autor

Articulación	Θ (grados)	d	a	α (grados)
1	q_1	L1	0	90
2	q_2	0	L2	0
3 (virtual)	$(180 + q_2 - \arctan \frac{LB}{LA})$	0	$\sqrt{LA^2 + LB^2}$	0
4	$(\arctan \frac{LB}{LA} + q_3)$	0	L3	0
5 (virtual)	$-q_3$	0	0	0

Aunque no se muestra el desarrollo completo matricial para resolver la cinemática directa se ha desarrollado una serie de funciones en matlab para resolverla. Se presentan a continuación en el fragmento de código 6.1.

Código 6.1: Cálculos con DH en matlab

```

function [dh] = denavith_Aij(theta ,d_i ,a_i ,alfa_i )
    syms theta_i %d_i a_i alfa_i
    theta_i=theta ;
    dh = [cos(theta_i),-cosd(alfa_i)*sin(theta_i),sind(alfa_i)*sin(theta_i),a_i
           *cos(theta_i);sin(theta_i),cosd(alfa_i)*cos(theta_i),-sind(alfa_i)*cos(theta_i),a_i*sin(theta_i);0,sind(alfa_i),cosd(alfa_i),d_i;0,0,0,1];
end

%%%%%%%
function Dirkinematics
syms th1 th2 th3 L1 L2 L3

%Parametros Denavit-Hartenberg del robot
teta = [th1 90+th2 90+th3 0];
d = [0 L1 0 L3];
a = [0 0 L2 0];
alfa = [0 90 0 0];

%Matrices de transformacion homogenea entre sistemas de coordenadas
%consecutivos
A01 = denavith_Aij( teta(1) ,d(1) ,a(1) ,alfa(1) );
A12 = denavith_Aij( teta(2) ,d(2) ,a(2) ,alfa(2) );
A23 = denavith_Aij( teta(3) ,d(3) ,a(3) ,alfa(3) );
A34 = denavith_Aij( teta(4) ,d(4) ,a(4) ,alfa(4) );

%Matriz de transformacion del primer al ultimo sistema de coordenadas
T04 = A01*A12*A23*A34;

%Coordenadas posicion ejes cartesianos
PX = T04(1,4);
PY = T04(2,4);
PZ = T04(3,4);
end

```

6.2.2. Cinemática directa

Siendo conocidos las posiciones articulares de los tres grados de libertad se puede obtener la posición en coordenadas cartesianas del punto r definido respecto al punto A1. Se definen primero algunos puntos intermedios sobre los que se apoya el cálculo:

Ángulos auxiliares $q2'$ y $q3'$:

$$q2' = q2 - \frac{\pi}{2} \quad (6.1)$$

$$q3' = \frac{\pi}{2} - q3 \quad (6.2)$$

Conviene también recordar de la tabla 6.2 la relación siguiente:

$$L1 = L2 \quad (6.3)$$

Apoyándose en las relaciones de 6.1, 6.2 y 6.3 se obtiene la cinemática directa del brazo robótico:

$$x_r = x_p + LA = \cos(q1) (LA + L2 \cdot (\cos(q2') + \cos(q3'))) \quad (6.4)$$

$$y_r = y_p = \sin(q1) (LA + L2 \cdot (\cos(q2') + \cos(q3'))) \quad (6.5)$$

$$z_r = z_p + LB + L1 = LB + L1 + L2 \cdot (\sin(q2') - \sin(q3')) \quad (6.6)$$

6.2.3. Cinemática inversa

Siendo conocida la posición del extremo (punto r) en coordenadas cartesianas se calcula la posición angular de cada articulación. Se definen algunas relaciones sobre las que se apoyará el cálculo matemático.

Se definen las coordenadas X y Z del punto p de la siguiente manera:

$$x_p = \sqrt{x_r^2 + y_r^2} - LA \quad (6.7)$$

$$y_p = y_r \quad (6.8)$$

$$z_p = z_r - LB - L1 \quad (6.9)$$

La diagonal r representada en la figura 6.2:

$$r = \sqrt{x_p^2 + y_p^2} \quad (6.10)$$

Además se utilizan los ángulos auxiliares descritos a continuación:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{z_p}{x_p}\right) \quad (6.11)$$

$$\beta = \arccos\left(\frac{r^2 + L2^2 - L3^2}{2 \cdot L2 \cdot r}\right) = \arccos\left(\frac{r}{2 \cdot L2}\right) \quad (6.12)$$

$$\varphi = \arccos\left(\frac{L2^2 + L3^2 - r^2}{2 \cdot L2 \cdot L3}\right) = \arccos\left(\frac{r}{2L2}\right) \quad (6.13)$$

$$q2' = \alpha + \beta \quad (6.14)$$

$$q3' = \Pi - q2' - \varphi \quad (6.15)$$

Finalmente, apoyándose sobre las relaciones descritas (y recordando las ecuaciones 6.1 y 6.2) se obtiene las relaciones cinemáticas para obtener las posiciones articulares conociendo el punto del extremo:

$$q1 = \arctan\left(\frac{y_p}{x_p}\right) \quad (6.16)$$

$$q2 = \frac{\Pi}{2} - q2' \quad (6.17)$$

$$q3 = q3' - \frac{\Pi}{2} \quad (6.18)$$

6.2.4. Cinemática diferencial

Por derivación de las relaciones de la cinemática directa se puede obtener la relación entre las velocidades articulares y la velocidad del extremo, el punto r . De forma matricial se puede expresar esta relación de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_r \\ \dot{y}_r \\ \dot{z}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_{11} & N_{12} & N_{13} \\ N_{21} & N_{22} & N_{23} \\ N_{31} & N_{32} & N_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix} \quad (6.19)$$

Teniendo los valores N_{xx} la siguiente forma:

$$N_{11} = \frac{\partial x_r}{\partial q_1} \quad (6.20)$$

$$N_{33} = \frac{\partial z_r}{\partial q_3} \quad (6.21)$$

Se ha desarrollado un *script* en matlab para resolver esta serie de cálculos de manera simbólica, puede verse en el fragmento de código 6.2.

Código 6.2: Cálculo cinemática diferencial

```
%Cinemática diferencial
syms q1 q2 q3 l2 l1 a b
q2_transf = q2 - pi/2;
q3_transf = pi/2 - q3;

xp = cos(q1)*(a + l2*cos(q2_transf) + l2*cos(q3_transf));
yp = sin(q1)*(a + l2*cos(q2_transf) + l2*cos(q3_transf));
zp = b + l2*sin(q2_transf) - l2*sin(q3_transf) + l1;

N11 = diff(xp,q1)
N12 = diff(xp,q2)
N13 = diff(xp,q3)

N21 = diff(yp,q1)
N22 = diff(yp,q2)
N23 = diff(yp,q3)

N31 = diff(zp,q1)
N32 = diff(zp,q2)
N33 = diff(zp,q3)
```

Obteniéndose los siguientes resultados:

$$N_{11} = -\sin(q1) \left(a + l2 \cos\left(q2 - \frac{\pi}{2}\right) + l2 \cos\left(q3 - \frac{\pi}{2}\right) \right) \quad (6.22)$$

$$N_{12} = -l2 \cos(q1) \sin\left(q2 - \frac{\pi}{2}\right) \quad (6.23)$$

$$N_{13} = -l2 \cos(q1) \sin\left(q3 - \frac{\pi}{2}\right) \quad (6.24)$$

$$N_{21} = \cos(q1) \left(a + l2 \cos\left(q2 - \frac{\pi}{2}\right) + l2 \cos\left(q3 - \frac{\pi}{2}\right) \right) \quad (6.25)$$

$$N_{22} = -l2 \sin(q1) \sin\left(q2 - \frac{\pi}{2}\right) \quad (6.26)$$

$$N_{23} = -l2 \sin(q1) \sin\left(q3 - \frac{\pi}{2}\right) \quad (6.27)$$

$$N_{31} = 0 \quad (6.28)$$

$$N_{32} = l_2 \cos\left(q_2 - \frac{\pi}{2}\right) \quad (6.29)$$

$$N_{33} = l_2 \cos\left(q_3 - \frac{\pi}{2}\right) \quad (6.30)$$

Una vez resuelto matemáticamente el cálculo de todos los valores de N_{xx} y sustituyendo en la ecuación 6.19 se obtiene la siguiente relación:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_r \\ \dot{y}_r \\ \dot{z}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin(q_1) \left(a + l_2 \cos(q_2 - \frac{\pi}{2}) + l_2 \cos(q_3 - \frac{\pi}{2}) \right) & -l_2 \cos(q_1) \sin(q_2 - \frac{\pi}{2}) & -l_2 \cos(q_1) \sin(q_3 - \frac{\pi}{2}) \\ \cos(q_1) \left(a + l_2 \cos(q_2 - \frac{\pi}{2}) + l_2 \cos(q_3 - \frac{\pi}{2}) \right) & -l_2 \sin(q_1) \sin(q_2 - \frac{\pi}{2}) & -l_2 \sin(q_1) \sin(q_3 - \frac{\pi}{2}) \\ 0 & l_2 \cos(q_2 - \frac{\pi}{2}) & l_2 \cos(q_3 - \frac{\pi}{2}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix} \quad (6.31)$$

6.2.5. Rango de movimientos

Con los límites angulares definidos se obtiene un espacio de trabajo de brazo robótico (para el plano de trabajo XZ, en la posición y=0). Tal y como puede apreciarse en la figura 6.5, este espacio de trabajo es suficiente para el objetivo que se desea dar. Abarca una distancia óptima para alcanzar los diferentes puntos a lo ancho de una camilla pudiendo posicionar la tablet a diferentes alturas. Para obtener el espacio de trabajo tridimensional solo hay que girar el espacio obtenido en el plano XZ al rededor del eje Z, para abarcar los 180° que gira la primera articulación.

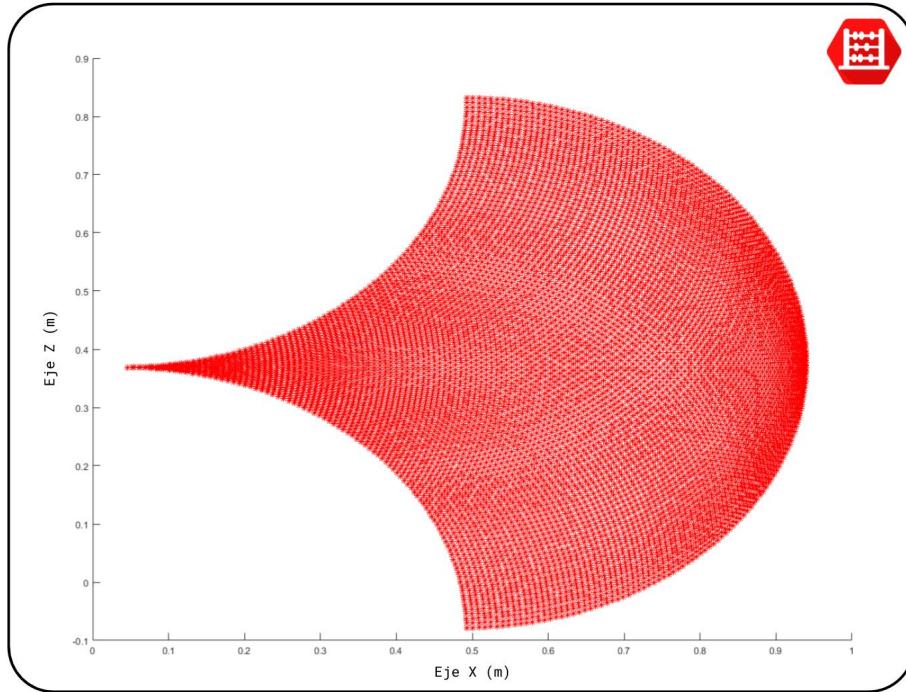


Figura 6.5: Espacio de trabajo en el plano XZ para Y = 0

Fuente: Autor.

6.3. Realimentación articular

La relación entre las medidas angulares de los potenciómetros y de las articulaciones varían de una a otra. En ambos casos una vez transformado a ángulo articular habrá que aplicar el desfase para posicionar el cero angular en las posiciones descritas en la figura 6.1. Hay que recordar de la sección 5.7 de qué manera se han integrado los potenciómetros en la estructura.

$$\text{Segunda articulación: } \rightarrow \text{angulo}_{\text{articulacion}} = \text{angulo}_{\text{potenciometro}} \quad (6.32)$$

$$\text{Tercera articulación: } \rightarrow \text{angulo}_{\text{articulacion}} = \text{angulo}_{\text{potenciometro}} \cdot 0,679 \quad (6.33)$$



Capítulo 7

Diseño del Control

El manejo del brazo de una forma adecuada requiere la aplicación de diferentes lazos de control; en este capítulo se detalla el trabajo realizado en esta línea.

El control más básico a realizar sobre un brazo robótico es el control en posición articular: el objetivo es poder introducir una consigna en grados (posición que se quiere alcanzar) que deberá ser alcanzada por el sistema, por cada articulación. El enfoque a seguir para conseguir este tipo de control puede variar en función de los diferentes componentes utilizados; en este caso el diseño de este control se ve fuertemente marcado por los actuadores elegidos, los servos Cytron G15 Cube (vistos en 5.1).

Poder controlar la posición de las articulaciones lleva implícito el control del movimiento de las mismas. Esto implica controlar la velocidad a la que se mueven, de forma que, ajustándola se podrá acelerar y desacelerar el movimiento articular para alcanzar, de forma suave las diferentes posiciones articulares deseadas. De esta manera se enlaza un control en posición con un control de velocidad en cascada. La figura 7.1 representa el lazo de control completo de posición con un lazo de velocidad integrado. En los siguientes apartados se detalla en concreto cada uno de los lazos representados.

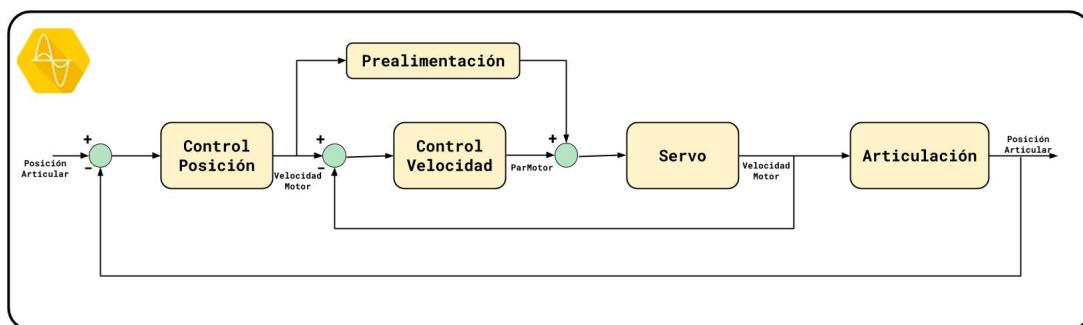


Figura 7.1: Control en cascada de Posición + Velocidad

Fuente: Autor

Este esquema de control se aplica principalmente a las articulaciones dos y tres, que son las que incluyen realimentación de posición. La primera articulación se controlará en posiciones incrementales ajustando a lo comandado por parte de la

tablet en el extremo.

7.1. Control de velocidad para los servos

La relación entre la velocidad articular y la velocidad de los servos no es directa debido a la cadena de transmisión mecánica por la que pasa el movimiento. El objetivo de controlar la velocidad de la articulación es poder acelerar y desacelerar de forma controlada dicha articulación. En este caso bastará con asegurar que, cuando se pida una velocidad superior o inferior la articulación se comporte en consecuencia, sin ser tan relevante la velocidad real de la articulación. El problema, una vez concretado esto, se reduce a controlar la velocidad de los servos.

Los servos elegidos, aunque poseen un control efectivo de velocidad cuando se configuran en modo posicional (se envían posiciones objetivo en grados a alcanzar), carecen del mismo en un modo de rotación continua. La cadena cinemática construida implica que el servo deberá permitir giro multivuelta en los servos. Por lo tanto es obligatorio utilizar el modo de rotación continua, con un control implementado de par a realizar (aceptando valores mapeados de 0 a 1023).

El lazo de control de velocidad implementado recibe una consigna de velocidad objetivo y actúa sobre el par motor que se enviará al servo.

Puesto que se debe lograr una alta velocidad de respuesta este ajuste no se puede realizar por compensación del error (mediante una acción integral). Como se ha visto en la imagen 7.1 la estrategia seguida ha sido la de prealimentar el controlador de velocidad. Esto significa que para cada consigna de velocidad se estimará el par requerido en cadena abierta para luego corregir el posible error y ruido con un controlador tradicional; es decir, se implementará un cálculo de la prealimentación adaptativa que se ajustará según la situación del brazo.

Ajustar dicha prealimentación requiere conocer el comportamiento del servo. En la figura 7.2¹ se pude ver como se comporta la variación de velocidad del servo en vacío frente a una variación del par requerido. Se pueden reconocer dos etapas en la evolución de dichas variables. En los instantes iniciales la velocidad se mantiene a cero hasta que el par aplicado es capaz de superar el par necesario para mover el servo (superar el rozamiento estático). A partir de ese punto la variación de la velocidad frente al par aplicado si se comporta de manera lineal.

Este comportamiento se repite de forma análoga aplicando diferentes cargas sobre el servo, tal y como puede verse en la figura 7.3². Para las diferentes cargas se puede observar una zona en la que, variando el par, la velocidad permanece inalterable (zona en la cual el par aplicado por la carga es superior al aplicado por el servo) y

¹Esta gráfica surge de realizar un test de aceleración controlada almacenando los valores de tiempo, par y velocidad. Los valores se recogen de forma discreta a una frecuencia de 100 Hz. Para obtener una gráfica más significativa el test se ha realizado hasta veinte veces para, haciendo la media, obtener una relación estimada de como se comporta el servo de forma *continua*.

²Test de aceleración controlada discretizando los valores a una frecuencia de 100 Hz. El test para cada valor de carga se ha realizado hasta veinte veces obteniéndose una estimación del comportamiento continuo del servo haciendo la media. La carga se ha aplicado en el eje vertical de forma que se mantenga continua a lo largo del test con un montaje del servo similar al que llevará en el brazo robótico.

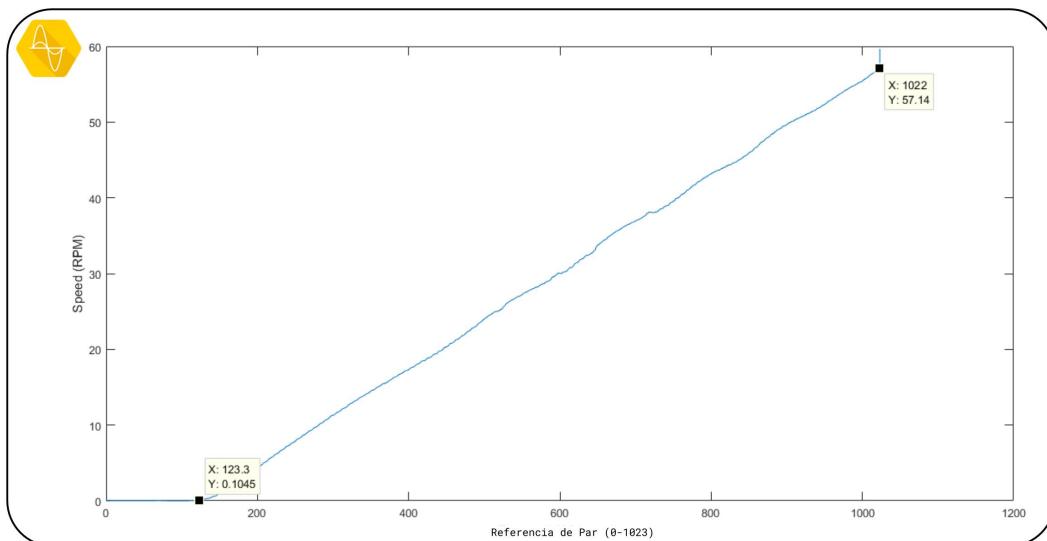


Figura 7.2: Variación de la velocidad del servo ante variaciones del par aplicado por el mismo
Fuente: Autor

una zona lineal³. En la zona de comportamiento lineal, en base a la gráfica mostrada, se puede asumir que la pendiente es igual en todos los casos. Esta deducción concuerda con el hecho de que una vez salvado el peso de la carga, un aumento en el par si debería, físicamente, suponer un aumento proporcional en la velocidad.

Matemáticamente significa que, conociendo el punto de funcionamiento [par, velocidad] en el que se está trabajando se pude obtener el par necesario para compensar los efectos de la gravedad sobre la el par en el motor. Los servos utilizados permiten leer, entre otros datos, estos dos valores necesarios de forma que en todo momento podemos observar la posición de la situación actual en el plano representado de par frente a velocidad.

Basándose en la representación de la figura 7.4 se puede ver, gráficamente como se calcula la prealimentación para el punto ($n+1$) conocido el punto en el instante (n). Conociendo dicho punto y la pendiente que relaciona la variación de ambos parámetros una vez vencida la gravedad se obtiene el par necesario para vencer dicho par:

$$Torque_{Compensacion} = Torque_n - \frac{Velocidad_n}{pendiente} \quad (7.1)$$

Conocido dicho valor se puede calcular, desplazándose de vuelta hacia arriba por la recta el valor de par que proporcione la velocidad requerida:

$$Torque_{n+1} = Torque_{Compensacion} - \frac{Velocidad_{target}}{pendiente} \quad (7.2)$$

³Ocurre que el servo, al funcionar en modo multivuelta va almacenando cuerda sobre la polea variando la distancia al eje desde la que se efectúa el par. A cargas elevadas supone una distorsión en el comportamiento esperado. Las repeticiones de los test se han realizado en las mismas condiciones de partida por lo que dichas distorsiones se han mantenido equivalentes en todas ellas

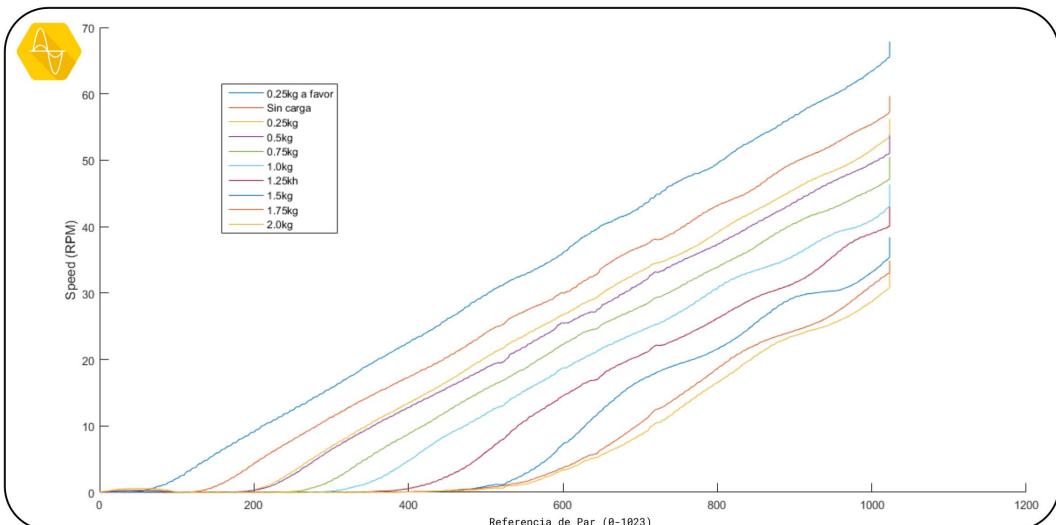


Figura 7.3: Variación de la velocidad del servo ante variaciones del peso aplicado sobre el mismo
Fuente: Autor

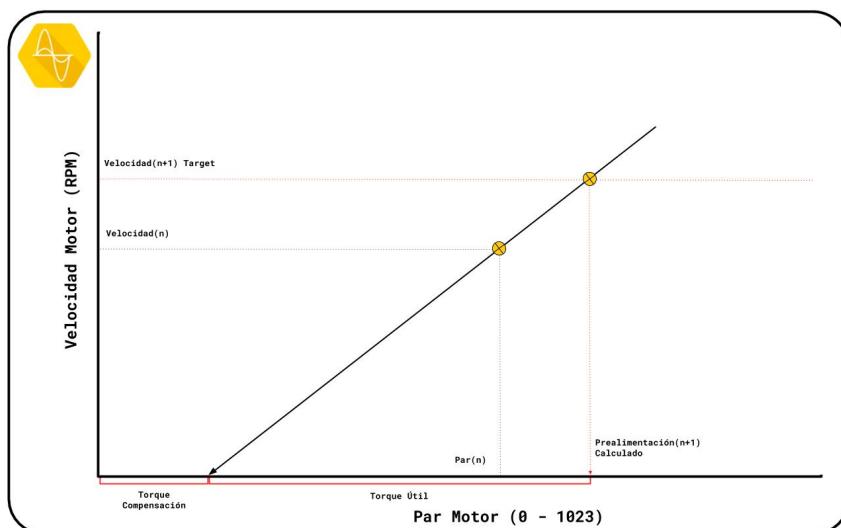


Figura 7.4: Cálculo matemático de la prealimentación adaptativa.

Fuente: Autor

Este método de calcular la prealimentación a través de un observador del estado del servo conlleva cierto error en la medida obtenida en base a que la información se obtiene de forma discreta de igual forma que la actualización del par. La frecuencia a la que se actualizan dichos valores es lo suficientemente rápida como para que el efecto sea mínimo. Aún así, posible error así como ruidos o perturbaciones externas son absorbidas por la segunda parte del control en velocidad descrito: el regulador PID implementado.

A continuación se añade un regulador que podrá absorber ruido y ayudar a reaccionar ante perturbaciones externas. El regulador implementado es un regulador PID estándar cuyas constantes (constante proporcional, integral y derivativa) se han ajustado de forma experimental. Debido a la prealimentación el regulador que-

da reducido a una acción de tipo PD, con unas constantes $kp = 3$ y $kd = 1$.

La frecuencia a la que funciona el lazo de control de velocidad está limitada por el tiempo que se tarda en comunicar toda la información entre el sistema y los servos.

Los servos aceptan valores de par hasta 1023. Se ha limitado el regulador de forma que satura en dicho valor manteniendo el valor máximo de manera constante hasta que el valor sea inferior al mencionado.

7.2. Control de posición articular

El control de posición articular recibe una consigna de posición a alcanzar y la *transforma* en una consigna de velocidad para el servo. Para que el control en cascada funcione correctamente el lazo de control de velocidad ha de ser más rápido que el de posición, concretamente el lazo de control de posición funciona a una frecuencia 10 veces inferior al lazo de control de velocidad.

El regulador PID implementado se encarga de llevar la articulación al punto deseado. Es importante asegurar que conforme se acerca al punto de consigna se desacelere de forma que se eviten oscilaciones provocadas por los muelles que compensan la carga de la segunda y tercera articulación.

Aunque los servos pueden alcanzar una velocidad de 65 revoluciones por minuto en vacío se ha establecido un máximo de 30 rpm a la salida de este regulador. De esta forma la velocidad del brazo depende de la salida del regulador impidiendo así que se vea afectada por la posición o carga del mismo.

El regulador, que tras el ajuste experimental ha resultado ser un PD tiene por constantes los siguientes valores: $kp = 5$; $kd = 0.2$.



Capítulo 8

Diseño del software

Este capítulo cubre el diseño e implementación del software que hace efectivo el estudio matemático y el control descrito anteriormente para el brazo robótico.

El capítulo presenta unos aspectos generales así como una filosofía de diseño a implementar para posteriormente hacer una descripción detallada de los distintos componentes implementados. Finalmente se hace una justificación de los test que se han efectuado sobre los diferentes componentes así como un análisis de la correcta gestión de la complejidad y mantenimiento que se plantea inicialmente.

8.1. Filosofía de diseño

En la figura 8.1 puede verse el diseño a alto nivel que se ha realizado para el software. Una de las características más importantes en la aplicación del patrón de *Experto en información* tal y como lo explica [30]. La responsabilidad de la creación de un objeto recade de esta manera en sobre la clase con conocimiento de la información necesaria para crearlo. De igual manera, toda funcionalidad o método se genera allí donde reside la información. De esta manera los objetos generados encapsulan la información referente a ellos mismos así como los métodos y funcionalidades que operan con dicha información.

Mantener una legibilidad y coherencia a lo largo del software es importante para asegurar una mantenibilidad a largo plazo así como facilitar la lectura y extensión del software. Es por ello que se han definido unas reglas de codificación, desarrolladas en el anexo C, que deberán seguirse a lo largo de todo el código. Además es necesaria unos niveles mínimos de documentación del código así como una gestión de la complejidad del mismo. Este tipo de aspectos se deben tener en cuenta desde la fase de diseño y se amplían en la sección 8.6.

Aunque no se ha seguido un modelo de diseño basado en test o *Test-Driven Development* (TDD) tal y como se describe en [31] si se han desarrollado test unitarios y de componentes. Estos aspectos se detallan en el apartado 8.5.

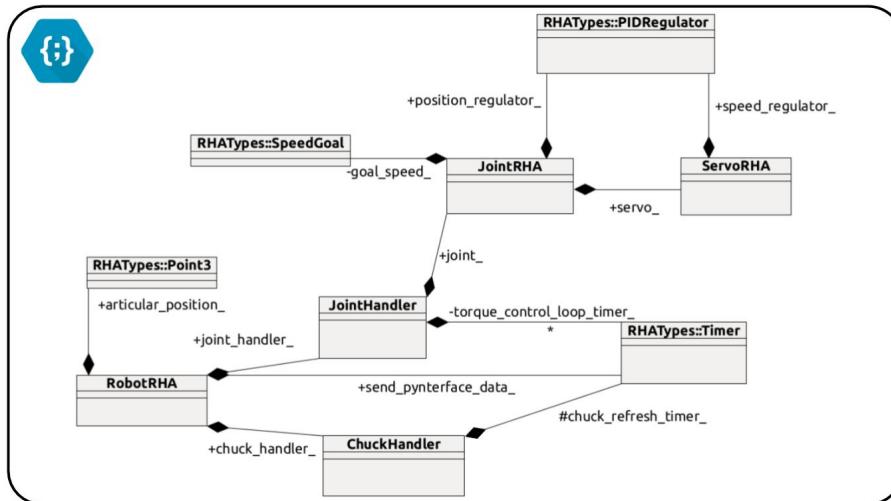


Figura 8.1: Diagrama de relación entre los diferentes objetos

Fuente: Autor

8.2. Aspectos generales del diseño

El software del proyecto está separado en diferentes componentes que interactúan entre si para realizar las diferentes funcionalidades necesarias. Como se ha explicado en el capítulo 7 se han implementado diferentes lazos de control a diferentes niveles que serán coordinados a diferentes frecuencias.

Es importante recordar del capítulo 5 la necesidad de interactuar con un protocolo de comunicación a bajo nivel con los Servos. Este protocolo se encuentra explicado en detalle en el anexo D. Siguiendo esta misma línea de trabajo se ha implementado a otro nivel superior un protocolo de comunicación que permitirá la comunicación y control del brazo robótico con cualquier dispositivo externo a través de un puerto serie estándar.

El fabricante de los G15 Cube Servos suministra una librería, que se puede ver en [32], por defecto para el manejo de los mismos. Esta librería se caracteriza por implementar un objeto que funciona como controlador del puerto serie de forma que irán invocados los diferentes métodos incluidos en la librería completando con la información a enviar. Esta filosofía difiere con la filosofía de diseño que se pretende aplicar en este proyecto; aun así se ha utilizado como base para desarrollar la nueva estructura de control de los servos.

El diseño del *software* del brazo robótico pasa por desacoplar los comandos solicitados por los controladores del envío de la información a enviar por el puerto serie. Se define un objeto servo que contendrá toda la información referente al mismo y será el encargado de actualizar los comandos a enviar en base a la información contenida que será actualizada ciclicamente.

De esta forma es necesario crear otro objeto encargado de gestionar la comunicación de todos los servos a través del puerto serie.

De forma general se puede decir que los objetos de más alto nivel están encargados de efectuar la actualización de los datos de las clases de más bajo nivel para que estas, con la información que poseen de si mismas efectúen los cálculos correspondientes. Se desarrollará en profundidad este aspecto en los apartados siguientes.

8.3. Estructura de directorios y ficheros

Para el desarrollo y test del software se ha utilizado el editor *Atom*, presentado anteriormente en el capítulo 1, ampliando su funcionalidad con el paquete *PlatformIO*, que expande las capacidades del editor base convirtiéndolo en un entorno de desarrollo integrado (IDE) que permite trabajar software embebido, entre ellas las de la gama *Arduino*.

La elección de esta herramienta conlleva un formato en el árbol de directorios en los que se separa el código debido a la forma que tiene de compilar y enlazar los diferentes ficheros. De esta manera y para mantener el orden los ficheros de código se separan en tres grandes directorios:

- lib: directorio donde se introducen, en carpetas, las librerías o componentes que se van a utilizar.
- src: directorio donde se introduce el fichero o ficheros de código principales.
- test: directorio donde se introducen los ficheros donde se codifican los test. Estos irán introducidos a su vez dentro de directorios con el nombre de cada test.

Concretamente, en el caso de este proyecto y anticipando los componentes que lo integran, el árbol de directorios queda con la estructura mostrada a continuación. Adicionalmente hay otros directorios donde se almacena información y utilidades que se explican más adelante.

```
— Sw
|-- lib
|   |-- chuck_handler
|   |-- cytron_g15_servo // A modo de ejemplo
|   |-- debug
|   |   + debug.cpp
|   |   + debug.h
|   |-- joint_handler
|   |   + joint_handler.cpp
|   |   + joint_handler.h
|   |-- joint_rha
|   |-- memory_free
|   |-- rha_types
|   |-- robot.rha
|   |-- servo_rha
|   |-- utilities
|   |-- readme.txt
|-- src
|   |-- main.cpp
|   |-- main_utilities.cpp
|-- test
|   |-- a-test_rha_types
|   |   + test_rha_types.cpp
|   |-- b-test-pid-regulator
```

```

|   |-- d_test_servo_rha
|   |-- e_test_joint_rha
|   |-- f_test_joint_handler_mock
|-- platformio.ini
    // Hasta aqui la estructura impuesta por la herramienta
    platformio
|-- code_analysis
|-- utilities
|-- sw_documentation
-- makeAnalysis.sh

```

8.4. Descripción de componentes

Como se ha explicado anteriormente el software del brazo robótico se puede separar en diferentes componentes y utilidades que se proceden a explicar a continuación.

8.4.1. Utilidades de debug

No se trata de un componente propiamente dicho si no de una serie de *macros* que permiten, mediante directivas al precompilador activar mensajes de debug para los diferentes componentes de forma independiente. Cabe destacar que estos mensajes de debug se emiten utilizando el puerto serie por defecto a través de los pines 0 y 1 de la placa tal y como se ha descrito en la sección 5.3. Se debe tener en cuenta que el uso de estas funcionalidades incrementa notablemente el uso de memoria RAM y FLASH de la placa.

Activar o desactivar dichas funcionalidades supone comentar o descomentar las directivas referentes a cada componente. Concretamente, a modo de ejemplo, estas tienen el siguiente aspecto:

```
// #define DEBUG_SERVO_RHA
// #define DEBUG_TEST_SERVO_RHA_REAL
```

8.4.2. Tipos de datos propios del proyecto

Para facilitar tanto el traspaso de información como la codificación del software se han implementado diferentes tipos de dato genéricos para ser utilizados en las diferentes capas de software. Concretamente se han implementado los siguientes componentes cuyos diagramas de clases se pueden ver en la figura 8.2:

- *SpeedGoal* condensa en un solo objeto toda la información necesaria para codificar un objetivo de velocidad.
- *Point3* permite un uso más cómodo de coordenadas con tres componentes ya sean articulares de posición o cartesianas.
- *Regulator* encapsula el funcionamiento de un *Regulador PID* estándar. Guarda los valores de las constantes así como de la integral del error para luego, introduciendo el valor del error, derivada del error e integral del error en un intervalo poder obtener el valor de la consigna a la salida del regulador.

- *Timer* codifica un temporizador (en milisegundos) de forma que se le podrá preguntar al objeto si el tiempo ya ha pasado. Normalmente interesa continuar en caso de que el tiempo no haya pasado, aun así incluye también una versión que bloquea la ejecución del programa hasta que este tiempo haya transcurrido.
- *TimerMicroseconds* hereda las características del objeto *Timer* implementando la funcionalidad en microsegundos.

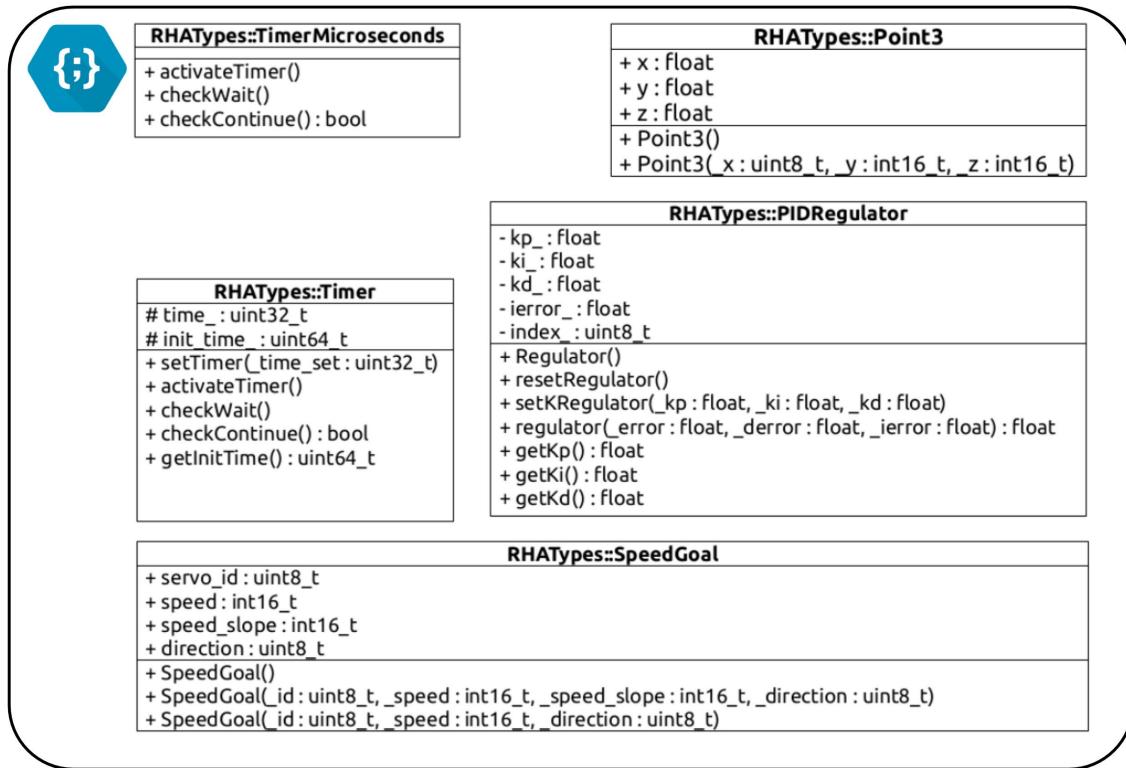


Figura 8.2: Estructuras de datos auxiliares

Fuente: Autor

Se puede consultar información de más bajo nivel referente a estos tipos de datos en [3] que agrupa documentación de todo el software.

8.4.3. Gestión de la información del servo

Como ya se ha anticipado el objeto de tipo ServoRHA (como se ha nombrado internamente) es el encargado de gestionar toda la información referente al servo así como de realizar los cálculos necesarios que involucren dicha información. A petición de objetos de capas superiores encapsula la información que se requiera en un *buffer* o un vector con los valores correspondientes, siguiendo siempre una estructura concreta para facilitar posterior comunicación con los servos físicos. Como es común en este tipo de objetos incluye el concepto de métodos de interfaz para acceder a la información almacenada.

La información se actualiza, encapsulada en un buffer con un orden concreto, a través de un método concreto que suministra este componente.

Desde el punto de vista de control gestiona una parte importante referente al lazo de control de velocidad del servo siendo el encargado en realizar los cálculos necesarios así como de almacenar los valores de consigna a requerir. El objeto *ServoRHA* instancia un objeto del tipo Regulador visto en la sección 8.4.2 inicializado con las constantes de control concretas al servo. En el diagrama de la figura 8.3 se pueden ver los diferentes métodos que hacen efectiva la implementación del lazo de control de velocidad de los servos.

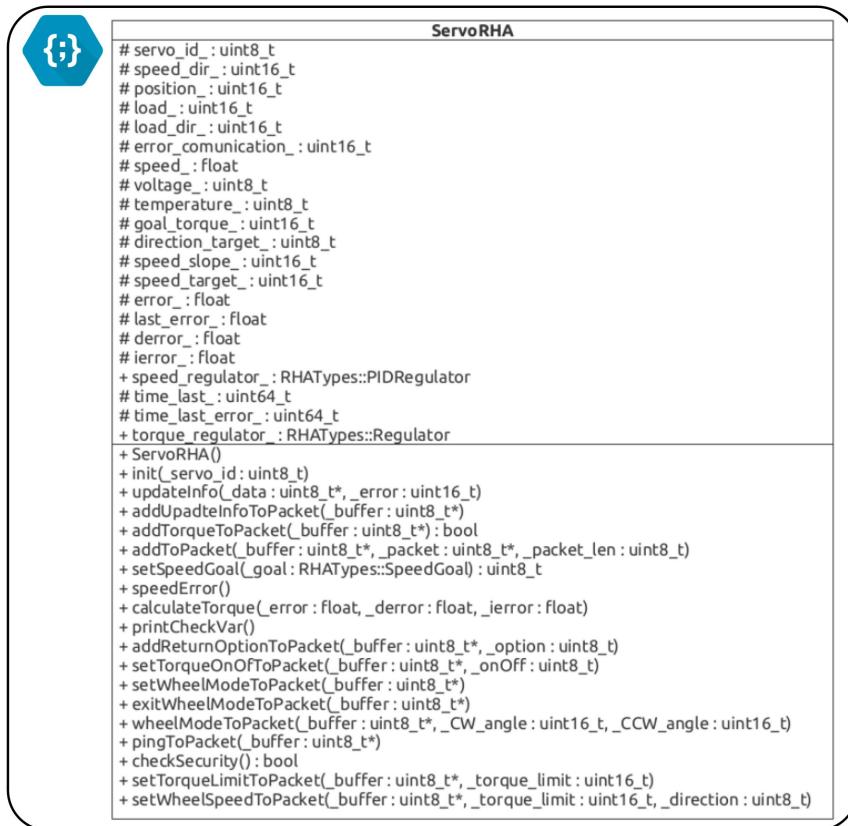


Figura 8.3: Atributos y métodos más relevantes del objeto *ServoRHA*

Fuente: Autor

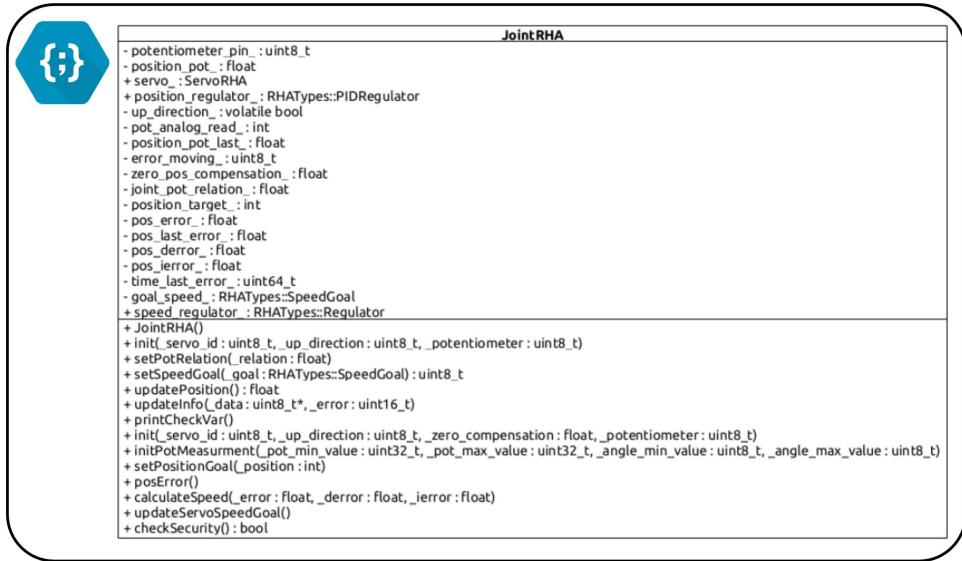
Se puede consultar información de más bajo nivel referente a este objeto así como a sus atributos y métodos en [3].

8.4.4. Gestión de la información de la articulación

Instanciando un objeto del tipo Servo el objeto tipo JointRHA (nombre dado en el proyecto) agrupa toda la información y funcionalidad referente a la articulación. De un modo análogo al caso descrito anteriormente implementa el control de posición efectuado sobre la articulación así como toda la matemática implicada.

Este componente recibe consignas de posición a alcanzar de forma que calcula la velocidad a requerir al servo, que será procesada por el objeto Servo descrito en 8.4.3.

En el diagrama de la figura 8.3 puede verse información genérica de la estructura implementada para este componente.

Figura 8.4: Atributos y métodos más relevantes del objeto *JointRHA**Fuente: Autor*

Como en los casos anteriores se puede ampliar la información sobre este componente, a más bajo nivel, en [3].

8.4.5. Manejador de articulaciones

El componente encargado de gestionar y coordinar las funcionalidades descritas para los componentes ServoRHA y JointRHA es el conocido internamente como JointHandler. Este componente está a cargo de gestionar la comunicación con el puerto serie así como de gestionar los bucles de control de posición y velocidad.

Para cumplir con su propósito instancia temporizadores como los descritos en el apartado 8.4.2 de forma que establece una frecuencia de funcionamiento concreta para cada lazo de control.

Ambos lazos de control siguen una estructura similar cuyos pasos pueden resumirse en los siguientes, que solo se llevarán a cabo en caso de que no se haya detectado ningún error bloqueante.

1. Actualización de la información: todos los componentes de cada articulación actualizan su información suministrada por los servos físicos o por la implementación correspondiente. En el caso del control de posición este paso se omite dado que esta información ya ha sido obtenida por el lazo más veloz.
2. Realización de los cálculos correspondientes: el manejador va llamando a los componentes correspondientes para que, utilizando la información reunida en el paso anterior actualicen la consigna que se enviará.
3. Rutinas de seguridad: un paso imprescindible en el cual se asegura que los datos que se van a enviar no ponen en riesgo la integridad del robot ni del paciente. Además se comprueba que los datos recibidos del entorno son coherentes, en caso contrario se almacena un marcador de error.

4. Envío de comandos al siguiente nivel: una vez se cumplen los requisitos de seguridad se puede enviar la información al siguiente nivel. En el caso articular se pasa el objetivo de velocidad a los servos; en el caso de los objetos de tipo servo se envía la consigna de par obtenida a los servos físicos a través del puerto serie. En el caso concreto de existir algún tipo de error se envía una señal de parada para todos los componentes inferiores.

Se puede ver este comportamiento para el caso concreto del control de velocidad implementado para los servos en la figura 8.5.

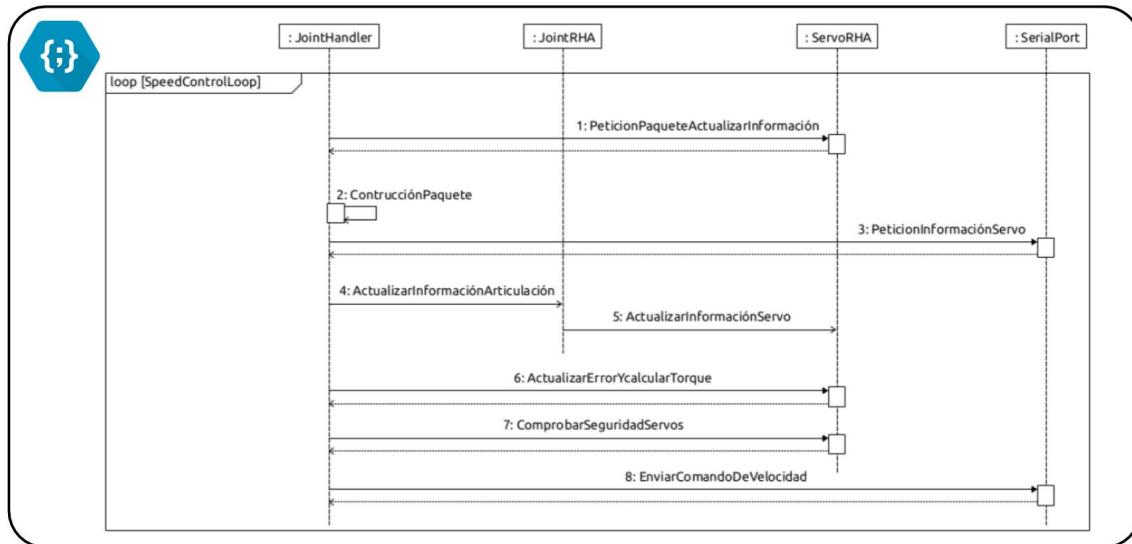


Figura 8.5: Diagrama de secuencia del bucle de control de velocidad gestionado por el objeto joint_handler

Fuente: Autor

De igual forma se puede ver como se estructura el ciclo de control referente al control de posición articular en la figura 8.6.

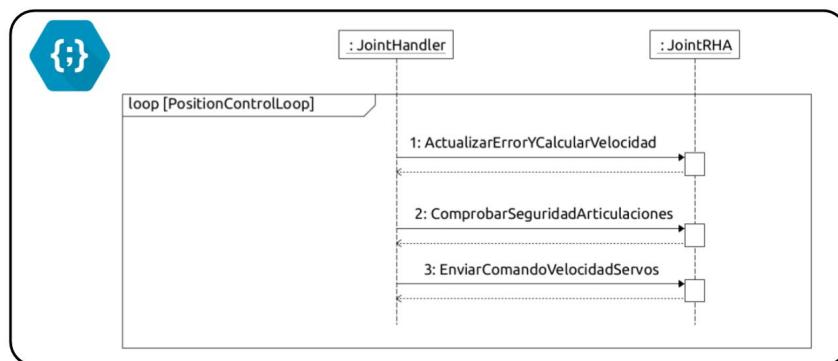
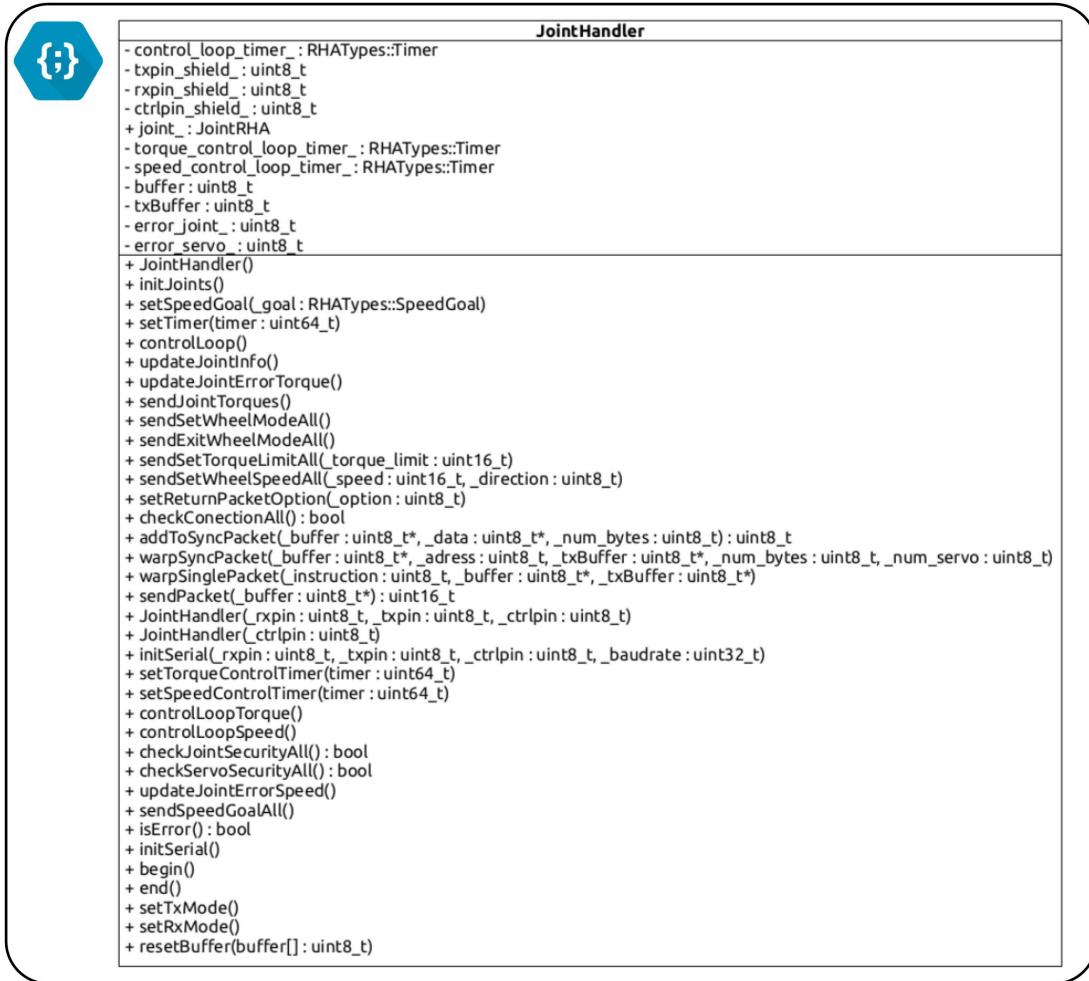


Figura 8.6: Diagrama de secuencia del bucle de control de posición gestionado por el objeto joint_handler

Fuente: Autor

El diagrama de clases de este componente, junto con los métodos y atributos más significativos se encuentran en la figura 8.7.

Figura 8.7: Atributos y métodos más relevantes del objeto *JointHandler**Fuente: Autor*

Información más detallada sobre el componente puede encontrarse en [3].

8.4.6. Manejador del mando Nunchuck

Se ha desarrollado un componente para permitir el control de los tres grados de libertad de posición, tal y como se han descrito en el capítulo 4, a través de un mando Nunchuck de la consola Wii de Nintendo. Este componente no se ha incluido ni listado en la descripción de la electrónica por no ser un componente intrínseco al robot. El uso de este componente ha sido con fines puramente de test de las funcionalidades previa a la definición de una interfaz más estable.

Este componente utiliza la librería *Wire* estándar de Arduino para comunicar con el mando y posteriormente traduce los valores recogidos en consignas de velocidad para las diferentes articulaciones a una frecuencia preestablecida. El diagrama correspondiente a este objeto se encuentra en la figura 8.8.

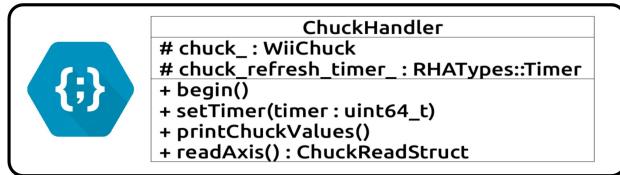


Figura 8.8: Atributos y métodos más relevantes del objeto *ChuckHandler* o manejador del mando Nunchuk

Fuente: Autor

Información más concreta sobre el componente y el software asociado puede encontrarse en [3].

8.4.7. Gestión del brazo robótico

Este componente es el encargado de coordinar el resto de objetos descritos. Contiene la información de la cinemática vista en el capítulo 6 e implementa diferentes modos de funcionamiento o control del brazo robótico.

El primer caso se ha adelantado en la descripción del manejador del Nunchuck de forma que se actualizan los comandos de velocidad de los servos a partir de la información obtenida del mando.

Para una comunicación y control más complejo este componente implementa un protocolo de comunicación serie a través del cual se podrá establecer una comunicación con el brazo robótico desde componentes externos a través de un puerto serial estándar. En este caso se utiliza uno de los puertos series extra incluidos en la placa Arduino Mega, tal y como se ha descrito en el apartado 5.3 dejando el puerto serie por defecto para funciones de carga del software así como *debug*.

La interfaz principal de este componente se puede ver en el diagrama de la figura 8.9 pudiendo ampliar la información del mismo en [3].

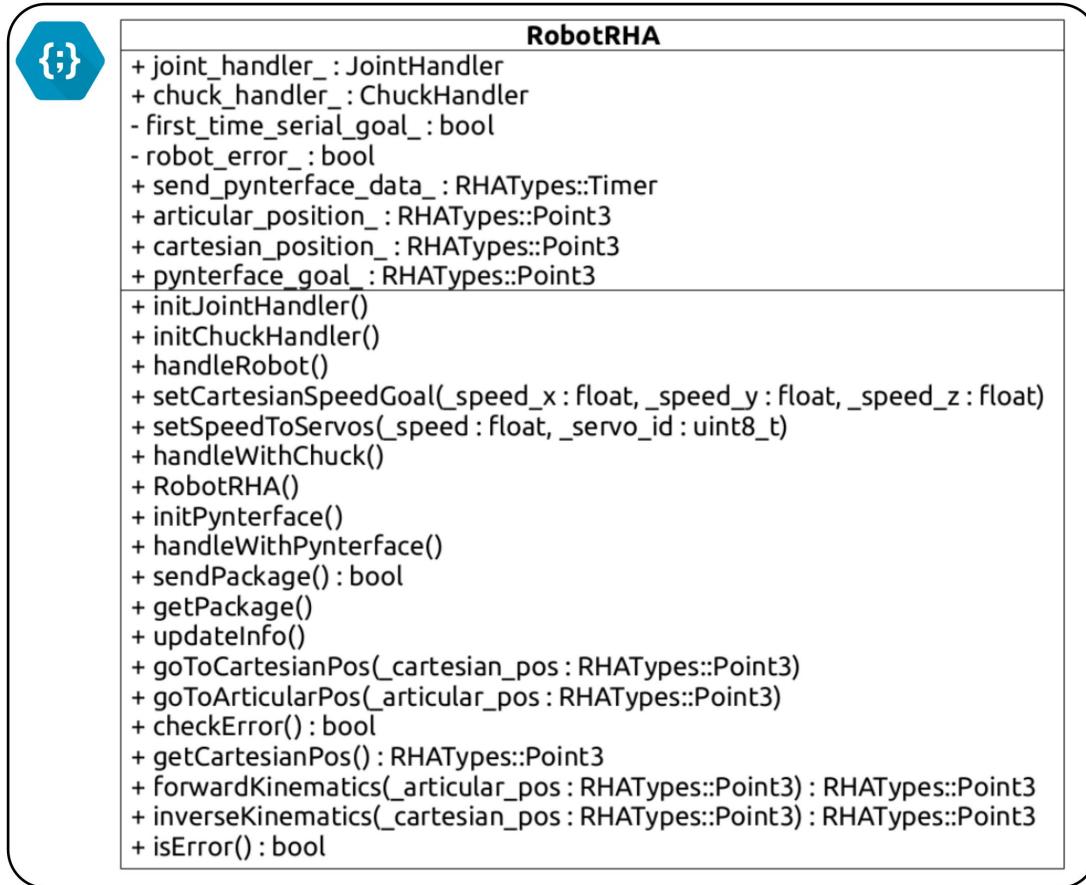


Figura 8.9: Atributos y métodos más relevantes que gestionan el brazo robótico

El protocolo de comunicación implementado para interactuar con el brazo robótico está descrito en el anexo E.

8.4.8. Fichero fuente principal

La funcionalidad completa del brazo robótico se incluye dentro de los componentes descritos. El fichero de código principal crea un objeto de tipo Robot, lo inicializa e invoca al método principal del mismo.

8.4.9. Interfaz gráfica para el control del brazo robótico

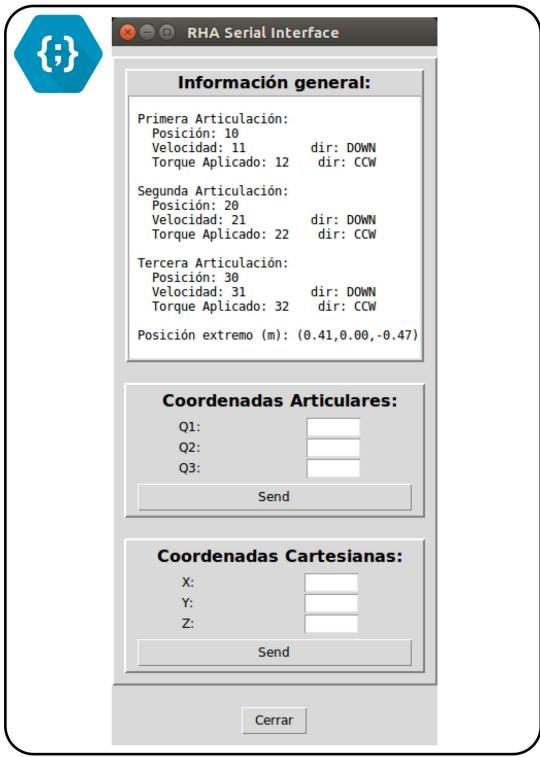


Figura 8.10: Aspecto de la interfaz gráfica

Fuente: Autor.

En caso de error en alguna de las articulaciones un mensaje de error, como el de la figura 8.11, se abre en una nueva ventana a modo de aviso para el usuario.



Figura 8.11: Aviso de errores de la interfaz gráfica

Fuente: Autor.

8.5. Test y verificación del software

Una parte importante de todo desarrollo de software pasa por una correcta verificación del funcionamiento del mismo. Para una comprobación efectiva se han realizado diferentes tipos de test, desde test unitarios de diferentes métodos hasta test de integración de los diferentes componentes. La verificación del sistema en general se ha realizado de modo visual, poniendo en marcha el brazo robótico y comprobando su correcto funcionamiento. Aunque las funcionalidades de *debug* son tremadamente útiles para hacer un seguimiento del desarrollo de la ejecución el trabajo a bajo nivel con protocolos de comunicación puede hacer que se convierta

Interfaz desarrollada en lenguaje *Python*, concretamente haciendo uso de la librería TkInter. Esta librería permite generar interfaces gráficas para prototipado de forma sencilla, [33] da acceso a toda la documentación oficial de la misma.

En el desarrollo de la interfaz se ha buscado sencillez y claridad. Se puede ver en la figura 8.10, en la parte superior, una consola sobre la que se van mostrando diferentes datos sobre el brazo robótico y las diferentes articulaciones de forma independiente.

En la parte inferior de la consola se puede ver la interfaz para mover el brazo a las coordenadas, articulares o cartesianas, que el usuario desee.

en un trabajo complicado y tedioso una vez empiezan a acumularse los paquetes de bytes por la salida en pantalla. Por esta razón de han diseñado diferentes test automáticos para diferentes componentes.

Una de las ventajas que ofrece el uso de *PlatformIO* es que incorpora una herramienta o *framework* con el objetivo de realizar test sobre la propia placa que se está programando. La interfaz que ofrece es similar a otros sistemas de testing como pudiera ser *google test*.

Esta filosofía de trabajo, además de permitir una comprobación rápida y cómoda de información a bajo nivel, permite generar una serie de test **automatizados** que se podrán ejecutar regularmente para asegurar que los cambios efectuados al software no corrompen funcionalidades clave.

Como se ha visto en la sección 8.3 se ha incluido un directorio donde se agrupan todos los test a realizar, dentro del cual, nuevamente en diferentes directorios, se encuentran los test a realizar. Cada directorio congrega los diferentes casos de test a realizar sobre un componente concreto.

La ejecución de estos test se realizará sobre la placa recibiendo un informe detallado sobre los resultados en cada caso así como un resumen final con todos los casos ejecutados. La propia herramienta se encarga de compilar y cargar los test en la placa a través del puerto serie así como de recoger los resultados pertinentes. Para ejecutar los mismos solo es necesario añadir la siguiente directiva para el precompilador, de forma que se desactive el bucle principal cuando se ejecuten los test:

```
#ifndef UNIT_TEST // disable program main loop while unit testing in progress
...
...
#endif
```

En la figura 8.12 se puede ver la salida correspondiente a un caso de ejecución de un test. De forma independiente se puede observar el desarrollo de los procesos primero de compilado, posteriormente de carga en la placa y finalmente de la ejecución todos los casos correspondientes al test que se está ejecutando. Este proceso se sigue de forma análoga para los diferentes test definidos.



```
=====
[test::b_test_pid_regulator] Building... (1/3)
-----
Please wait...
test/b test_pid_regulator/test_pid_regulator.cpp: In function 'void test_class_regulator_function_regulator_simple_acumulative_overload()':
test/b test_pid_regulator/test_pid_regulator.cpp:96:11: warning: unused variable 'ierror_accumulated2' [-Wunused-variable]
float ierror_accumulated2 = 0;
^

=====
[test::b_test_pid_regulator] Uploading... (2/3)
-----
Please wait...
Warning! Please install '99-platformio-udev.rules' and check that your board's PID and VID are listed in the rules.
https://raw.githubusercontent.com/platformio/platformio/develop/scripts/99-platformio-udev.rules
Reading | ##### | 10% 0.01s
Writing | ##### | 10% 1.39s
Reading | ##### | 100% 1.05s

=====
[test::b_test_pid_regulator] Testing... (3/3)
-----
If you don't see any output for the first 10 secs, please reset board (press reset button)

test/b test_pid_regulator/test_pid_regulator.cpp:122:test_class_regulator_function_setRegulator [PASSED]
test/b test pid regulator/test pid regulator.cpp:123:test class regulator function resetRegulator [PASSED]
test/b test_pid_regulator/test_pid_regulator.cpp:124:test class regulator function regulator_simple [PASSED]
test/b test pid regulator/test pid regulator.cpp:125:test class regulator function regulator_simple_acumulative_1 [PASSED]
test/b test pid regulator/test pid regulator.cpp:126:test class regulator function regulator_simple_acumulative_2 [PASSED]
test/b test pid regulator/test pid regulator.cpp:127:test class regulator function regulator_simple_acumulative_overload [PASSED]
-----
6 Tests 0 Failures 0 Ignored
```

Figura 8.12: Salida de Platformio Test para cada caso

Fuente: Autor. Salida de Platformio

Como se puede apreciar en la figura 8.13, de fallar uno o varios casos implementados en el test se verá un mensaje detallando la causa del resultado erróneo



```
=====
[test::d_test_servo_rha] Testing... (3/3)
-----
If you don't see any output for the first 10 secs, please reset board (press reset button)

test/d_test_servo_rha/test_servo_rha.cpp:289:test_function_compareSpeed [PASSED]
test/d_test_servo_rha/test_servo_rha.cpp:290:test_function_compareAngles [PASSED]
test/d_test_servo_rha/test_servo_rha.cpp:291:test_function_addToPacket [PASSED]
test/d_test_servo_rha/test_servo_rha.cpp:64:test_function_updateInfoToPacket:FAIL: Element 3 Expected 8 Was 6 [FAILED]
test/d_test_servo_rha/test_servo_rha.cpp:293:test_function_addReturnOptionToPacket [PASSED]
test/d_test_servo_rha/test_servo_rha.cpp:294:test_function_setTorque0nOfToPacket [PASSED]
test/d_test_servo_rha/test_servo_rha.cpp:295:test_function_set_exit_WheelModeToPacket [PASSED]
test/d_test_servo_rha/test_servo_rha.cpp:136:test function updateInfo:FAIL: Expected 50 Was 5. Speed [FAILED]
test/d_test_servo_rha/test_servo_rha.cpp:157:test_function_calculateTorque:FAIL: Expected 0 Was 101. Torque test 1 [FAILED]
test/d_test_servo_rha/test_servo_rha.cpp:196:test_function_addTorqueToPacket:FAIL: Element 3 Expected 150 Was 121 [FAILED]
test/d_test_servo_rha/test_servo_rha.cpp:299:test_function_addPingToPacket [PASSED]
test/d_test_servo_rha/test_servo_rha.cpp:300:test_function_setSpeedGoal [PASSED]
test/d_test_servo_rha/test_servo_rha.cpp:249:test_function_speedError:FAIL: Values Not Within Delta . Test 1 [FAILED]
-----
13 Tests 5 Failures 0 Ignored
```

Figura 8.13: Salida de Platformio Test con casos fallidos

Fuente: Autor. Salida de Platformio

Como se ha adelantado, una vez ejecutados todos los test propuestos se obtiene un resumen de los resultados generales, tal y como se puede observar en la figura 8.14.



```
=====
[TEST SUMMARY]
-----
test:a_test_rha_types/env:megaatmega2560 [PASSED]
test:b_test_pid_regulator/env:megaatmega2560 [PASSED]
test:e_test_joint_rha/env:megaatmega2560 [PASSED]
test:f_test_joint_handler_mock/env:megaatmega2560 [PASSED]
test:log/env:megaatmega2560 [IGNORED]
test:d_test_servo_rha/env:megaatmega2560 [FAILED]
=====
[FAILED] Took 71.92 seconds =====
```

Figura 8.14: Salida de Platformio Test con el resumen de los casos de test

Fuente: Autor. Salida de Platformio

A continuación se procede a describir en más detalle los test ejecutados sobre los diferentes componentes.

Concretamente la complejidad del objeto que gestiona la articulación no es muy elevada y no tiene test automatizados asociado. El control de posición articular funciona de forma análoga al control de velocidad, que si será testeado. De igual manera

ocurre con la gestión del mando Nunchuck, cuyo funcionalidad principal del componente es la traducción de los valores del mando a valores de velocidad apropiados para el brazo robótico.

Como es de esperar, en caso de que un test se comporte de forma incorrecta se deberá revisar tanto el test como el código para arreglar el error. Finalmente los test deben tener un resultado positivo, como el que puede verse en la figura 8.15



```
===== [TEST SUMMARY] =====
test:a_test_rha_types/env:megaatmega2560      [PASSED]
test:b_test_pid_regulator/env:megaatmega2560   [PASSED]
test:d_test_servo_rha/env:megaatmega2560       [PASSED]
test:e_test_joint_rha/env:megaatmega2560        [PASSED]
test:f_test_joint_handler_mock/env:megaatmega2560 [PASSED]
test:log/env:megaatmega2560        [IGNORED]
===== [PASSED] Took 52.65 seconds =====
```

Figura 8.15: Resumen Test satisfactorios

Fuente: Autor. Salida de Platformio

8.5.1. Test sobre los tipos de datos definidos

Para los objetos englobados dentro de esta categoría se han definido diferentes test. Concretamente se ha comprobado de esta forma el correcto funcionamiento de los tipos de temporizadores definidos, en la figura 8.16. Este componente resulta clave y sobre el se apoya el funcionamiento de varios de los objetos por lo que es imprescindible tener una herramienta que compruebe su correcto funcionamiento cuando sea necesario.

Igual de importante, en este caso para los lazos de control definidos es el objeto encargado de encapsular el funcionamiento de un regulador PID, en la figura 8.17. En este caso se ha comprobado tanto la inicialización, la gestión de los valores del error así como la respuesta del mismo.



```
===== [test::a_test_rha_types] Testing... (3/3) =====
If you don't see any output for the first 10 secs, please reset board (press reset button)

test/a_test_rha_types/test_rha_types.cpp:65:test_class_timer_function_checkwait [PASSED]
test/a_test_rha_types/test_rha_types.cpp:66:test_class_timer_function_checkcontinue   [PASSED]
test/a_test_rha_types/test_rha_types.cpp:67:test_class_timer_micros_function_checkwait [PASSED]
test/a_test_rha_types/test_rha_types.cpp:68:test_class_timer_micros_function_checkcontinue   [PASSED]
-----
4 Tests 0 Failures 0 Ignored
```

Figura 8.16: Test satisfactorios RHATypes

Fuente: Autor. Salida de Platformio



```
===== [test::b_test_pid_regulator] Testing... (3/3) =====
If you don't see any output for the first 10 secs, please reset board (press reset button)

test/b_test_pid_regulator/test_pid_regulator.cpp:122:test_class_regulator_function_setRegulator [PASSED]
test/b_test_pid_regulator/test_pid_regulator.cpp:123:test_class_regulator_function_resetRegulator   [PASSED]
test/b_test_pid_regulator/test_pid_regulator.cpp:124:test_class_regulator_function_regulator_simple [PASSED]
test/b_test_pid_regulator/test_pid_regulator.cpp:125:test_class_regulator_function_regulator_simple_acumulative_1 [PASSED]
test/b_test_pid_regulator/test_pid_regulator.cpp:126:test_class_regulator_function_regulator_simple_acumulative_2 [PASSED]
test/b_test_pid_regulator/test_pid_regulator.cpp:127:test_class_regulator_function_regulator_simple_acumulative_overload [PASSED]
-----
6 Tests 0 Failures 0 Ignored
```

Figura 8.17: Test satisfactorios PIDRegulator (caso dentro de RHATypes)

Fuente: Autor. Salida de Platformio

8.5.2. Test sobre la gestión de la información del servo

Tal y como se ha descrito en la sección 8.4.3 es importante comprobar el correcto manejo de la información efectuado por este componente. Los test realizados incluyen la correcta actualización de la información, cálculo de errores así como encapsulado de dicha información cuando componentes de más alto nivel lo requieren. Se puede ver la salida correcta ofrecida por Platformio para este componente concreto en la figura 8.18.



```
=====
[ test::d_test_servo_rha] Testing... (3/3)
=====
If you don't see any output for the first 10 secs, please reset board (press reset button)

test/d_test_servo_rha/test_servo_rha.cpp:292:test_function_compareSpeed [PASSED]
test/d_test_servo_rha/test_servo_rha.cpp:293:test_function_compareAngles [PASSED]
test/d_test_servo_rha/test_servo_rha.cpp:294:test_function_addToPacket [PASSED]
test/d_test_servo_rha/test_servo_rha.cpp:295:test_function_updateInfoToPacket [PASSED]
test/d_test_servo_rha/test_servo_rha.cpp:296:test_function_addReturnOptionToPacket [PASSED]
test/d_test_servo_rha/test_servo_rha.cpp:297:test_function_setTorqueOnOffToPacket [PASSED]
test/d_test_servo_rha/test_servo_rha.cpp:298:test_function_set_exit_WheelModeToPacket [PASSED]
test/d_test_servo_rha/test_servo_rha.cpp:299:test_function_updateInfo [PASSED]
test/d_test_servo_rha/test_servo_rha.cpp:300:test_function_calculateTorque [PASSED]
test/d_test_servo_rha/test_servo_rha.cpp:301:test_function_addTorqueToPacket [PASSED]
test/d_test_servo_rha/test_servo_rha.cpp:302:test_function_addPingToPacket [PASSED]
test/d_test_servo_rha/test_servo_rha.cpp:303:test_function_setSpeedGoal [PASSED]
test/d_test_servo_rha/test_servo_rha.cpp:304:test_function_speedError [PASSED]
-----
13 Tests 0 Failures 0 Ignored
```

Figura 8.18: Test satisfactorios ServoRHA

Fuente: Autor. Salida de Platformio

8.5.3. Test sobre la construcción de paquetes para la comunicación con los servos

El protocolo de comunicación completo de los servos sigue una estructura de paquetes de datos descrita en el anexo D. El componente que gestiona dicha comunicación, descrito en el apartado 8.4.5 ha sido sometido a diferentes test que comprueban la correcta formación de los paquetes de información en los casos más relevantes. En la figura 8.19 se puede comprobar los diferentes casos de test a los que se ha sometido así como su correcta resolución.



```
=====
[ test::f_test_joint_handler_mock] Testing... (3/3)
=====
If you don't see any output for the first 10 secs, please reset board (press reset button)

test/f_test_joint_handler_mock/test_joint_handler.cpp:212:test_function_warpSinglePacket [PASSED]
test/f_test_joint_handler_mock/test_joint_handler.cpp:213:test_function_addToSyncPacket [PASSED]
test/f_test_joint_handler_mock/test_joint_handler.cpp:214:test_function_warpSyncPacket [PASSED]
test/f_test_joint_handler_mock/test_joint_handler.cpp:215:test_function_checkConnection_mock [PASSED]
test/f_test_joint_handler_mock/test_joint_handler.cpp:216:test_function_sendSetWheelModeAll_mock [PASSED]
test/f_test_joint_handler_mock/test_joint_handler.cpp:217:test_function_controlLoop_oneJoint [PASSED]
-----
6 Tests 0 Failures 0 Ignored
```

Figura 8.19: Test satisfactorios JointHandler

Fuente: Autor. Salida de Platformio

8.6. Gestión de la complejidad y mantenibilidad

Como se ha adelantado al inicio de este capítulo, se han seguido unas ciertas pautas para medir y gestionar la complejidad del software desarrollado. Este apartado se centra en concretar las diferentes métricas medidas así como de justificar el

seguimiento de dicha filosofía de diseño.

Para llevar a cabo el análisis de las diferentes métricas se han combinado dos herramientas, *lizard* y *Cloc*, junto con una serie de *scripts* que se han desarrollado para automatizar la recogida y análisis de la información.

Las diferentes métricas obtenidas son:

1. Número de líneas de código.
2. Número de líneas de comentarios.
3. Número de líneas de mensajes de *debug*.
4. Número de ficheros.
5. Número de funciones totales y por fichero.
6. Complejidad ciclomática.¹

Combinando las métricas iniciales y midiendo el porcentaje de comentarios y líneas de debug sobre el total se puede controlar un desarrollo equilibrado del software y la documentación del mismo. Como es de suponer no todas las líneas de comentarios se corresponden a documentación explícita del software, aunque da una idea bastante aproximada.

En la Figura 8.20 se puede ver una serie de gráficas donde se puede ver la relación entre el código, la documentación (comentarios) y el *debug* que se lleva a cabo en el software.

Como puede observarse se ha intentado mantener constante el desarrollo de los diferentes aspectos de forma que ninguno quede descompensado. En la gráfica se ha omitido intencionadamente las referencias del eje horizontal puesto que lo importante de la gráfica es la constancia y relación de los parámetros medidos. El desarrollo del proyecto implica discontinuidades en el desarrollo del software para realizar ajustes en otros aspectos del mismo, la representación a escala con información de las fechas de toma de dicha información enmascaran la verdadera intención de la gráfica.

¹La complejidad ciclomática mide el número de ramas de ejecución que pueden abrirse en cada función; entendiendo que el hilo de ejecución se divide con cada condicional que implemente dos o varias opciones a seguir. Una elevada complejidad ciclomática implica una mayor dificultad a la hora de testear todos las situaciones posibles de su funcionamiento.



Figura 8.20: Análisis del código del proyecto. Situación a lo largo del tiempo

Fuente: Autor

En la figura 8.21 se puede ver la última situación de forma más detallada.

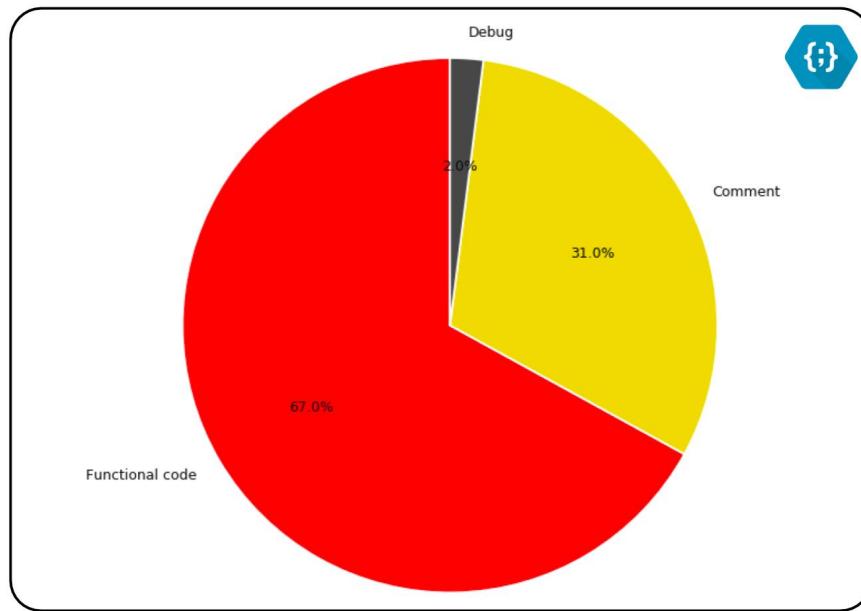


Figura 8.21: Análisis del código del proyecto. Situación final

Fuente: Autor

Las métricas que miden el número de ficheros así como de funciones en los mismos son menos significativas, aunque un menor número de funciones normalmente implique una menor complejidad dentro de ese fichero no se puede establecer un

número de referencia. Con la complejidad ciclomática ocurre lo mismo, bastará con mantener un control continuado de la misma y llevar a cabo correcciones puntuales para evitar que crezca en distintas funciones. A continuación se muestran datos de la situación final del software:

- Número de funciones total: 178
- Media de funciones: 8.9 (contando ficheros con extensión .h y .cpp)
- Fichero con máximo número de funciones: 31, joint_handler.cpp)
- Número de líneas de código total: 2019
- Media de líneas de código en cada fichero: 100.95 (contando ficheros con extensión .h y .cpp)
- Fichero con máximo número de líneas: 411, joint_handler.cpp)
- Complejidad ciclomática media: 2.2
- Función con máxima complejidad ciclomática: 20, JointHandler::sendPacket

Como se puede ver la media de líneas, funciones y complejidad ciclomática se mantiene en unos rangos manejables a lo largo del software. Concretamente se sale de los márgenes en el componente descrito en la sección 8.4.5, el manejador de las articulaciones. Este caso sobrepasa bastante los datos medios debido a que gestiona el puerto serie que comunica con los servos así como los lazos de control de posición y velocidad. Todas estas operaciones conllevan una complejidad intrínseca que no se puede evitar. Paralelamente el componente que gestiona el brazo robótico (descrito en la sección 8.4.7) destaca en estas medidas. De igual manera gestiona la comunicación serie de todo el sistema con el exterior así como la matemática del robot.

8.6.1. Comprobación del cumplimiento de las reglas de codificación del Código

Para asegurar la mantenibilidad del software es importante imponer una coherencia en la codificación del mismo. En este caso se han definido una serie de reglas de codificación, descritas en el anexo C. Para hacer un seguimiento del cumplimiento de las mismas se ha hecho uso de una herramienta desarrollada por Google para la comprobación de este tipo de sintaxis y reglas en proyectos de grandes dimensiones: *Cpplint*.

Esta herramienta recorre el código especificado analizando diferentes tipos de errores. En la figura 8.22 se puede ver un ejemplo de como la herramienta enumera los tipos de errores encontrados en el código analizado.



```

Category 'readability/namespace' errors found: 8
Category 'whitespace/braces' errors found: 17
Category 'whitespace:semicolon' errors found: 3
Category 'whitespace/tab' errors found: 4
Category 'readability/alt_tokens' errors found: 2
Category 'whitespace/blank_line' errors found: 30
Category 'whitespace/newline' errors found: 18
Category 'readability/todo' errors found: 9
Category 'readability/braces' errors found: 10
Category 'whitespace/comma' errors found: 37
Category 'whitespace/operators' errors found: 8
Category 'readability/casting' errors found: 15
Category 'whitespace/parens' errors found: 31
Category 'runtime/references' errors found: 4
Category 'runtime/indentation_namespace' errors found: 7
Category 'runtime/int' errors found: 9
Category 'whitespace/comments' errors found: 86
Category 'whitespace/indent' errors found: 20
Category 'runtime/explicit' errors found: 4
Total errors found: 322

```

Figura 8.22: Ejemplo de la Salida de cpplint con errores

Fuente: Autor. Salida de la herramienta cpplint

Además de dicho resumen se adjunta un informe detallado de los errores y su ubicación concreta en el código, como puede verse en la figura 8.23.



```

/home/quique/Documentos/RHA/SW/lib/servo_rha/servo_rha.cpp:37: Missing space after , [whitespace/comma] [3]
/home/quique/Documentos/RHA/SW/lib/servo_rha/servo_rha.cpp:77: Using deprecated casting style. Use static_cast<float>(...) instead [readability/casting] [4]
/home/quique/Documentos/RHA/SW/lib/servo_rha/servo_rha.cpp:115: If an else has a brace on one side, it should have it on both [readability/braces] [5]
/home/quique/Documentos/RHA/SW/lib/servo_rha/servo_rha.cpp:115: Else clause should never be on same line as else (use 2 lines) [whitespace/newLine] [4]
/home/quique/Documentos/RHA/SW/lib/servo_rha/servo_rha.cpp:124: Missing username in TODO; it should look like /// TODO(my username): Stuff. [readability/todo] [2]
/home/quique/Documentos/RHA/SW/lib/servo_rha/servo_rha.cpp:131: Missing username in TODO; it should look like /// TODO(my username): Stuff. [readability/todo] [2]
/home/quique/Documentos/RHA/SW/lib/servo_rha/servo_rha.cpp:132: Using C-style cast. Use static_cast<float>(...) instead [readability/casting] [4]
/home/quique/Documentos/RHA/SW/lib/servo_rha/servo_rha.cpp:133: Extra space after ( [whitespace/parens] [2]
/home/quique/Documentos/RHA/SW/lib/servo_rha/servo_rha.cpp:133: Extra space before ) [whitespace/parens] [2]
/home/quique/Documentos/RHA/SW/lib/servo_rha/servo_rha.cpp:152: If/else bodies with multiple statements require braces [readability/braces] [4]
/home/quique/Documentos/RHA/SW/lib/servo_rha/servo_rha.cpp:157: Using deprecated casting style. Use static_cast<float>(...) instead [readability/casting] [4]
/home/quique/Documentos/RHA/SW/lib/servo_rha/servo_rha.cpp:248: Redundant blank line at the end of a code block should be deleted. [whitespace/blank_line] [3]
/home/quique/Documentos/RHA/SW/lib/servo_rha/servo_rha.cpp:307: Redundant blank line at the end of a code block should be deleted. [whitespace/blank_line] [3]
/home/quique/Documentos/RHA/SW/lib/servo_rha/servo_rha.cpp:366: Else clause should never be on same line as else (use 2 lines) [whitespace/newLine] [4]
/home/quique/Documentos/RHA/SW/lib/servo_rha/servo_rha.cpp:379: Else clause should never be on same line as else (use 2 lines) [whitespace/newLine] [4]
Done processing /home/quique/Documentos/RHA/SW/lib/servo_rha/servo_rha.cpp
/home/quique/Documentos/RHA/SW/lib/servo_rha/servo_rha.h:119: Do not indent within a namespace [runtime/indentation_namespace] [4]
/home/quique/Documentos/RHA/SW/lib/servo_rha/servo_rha.h:120: At least two spaces is best between code and comments [whitespace/comments] [2]
/home/quique/Documentos/RHA/SW/lib/servo_rha/servo_rha.h:120: Should have a space between // and comment [whitespace/comments] [4]
/home/quique/Documentos/RHA/SW/lib/servo_rha/servo_rha.h:124: Namespace should be terminated with ":// namespace ServoRHAConstants" [readability/namespace] [5]
/home/quique/Documentos/RHA/SW/lib/servo_rha/servo_rha.h:149: Single-parameter constructors should be marked explicit. [runtime/explicit] [5]
/home/quique/Documentos/RHA/SW/lib/servo_rha/servo_rha.h:196: Redundant blank line at the end of a code block should be deleted. [whitespace/blank_line] [3]
Done processing /home/quique/Documentos/RHA/SW/lib/servo_rha/servo_rha.h

```

Figura 8.23: Ejemplo de errores con cpplint

glosar

Fuente: Autor. Salida de la herramienta cpplint

Se ha desarrollado un *script* que filtrará las reglas de codificación que no aplican a este proyecto. De esta manera y haciendo uso de dicho script se hará un seguimiento continuo del cumplimiento de dichas reglas para evitar que se acumulen malas prácticas. Una vez corregidos los errores la salida debería parecerse a la captura de la figura 8.24; un análisis sin errores.



```

Done processing /home/quique/Documentos/RHA/SW/lib/chuck_handler/chuck_handler.h
Ignoring /home/quique/Documentos/RHA/SW/lib/cytron_g15_servo/cytron_g15_servo.cpp.txt; not a valid file name (cpp, h)
Done processing /home/quique/Documentos/RHA/SW/lib/cytron_g15_servo/cytron_g15_servo.cpp.txt
Ignoring /home/quique/Documentos/RHA/SW/lib/cytron_g15_servo/cytron_g15_servo.h.txt; not a valid file name (cpp, h)
Done processing /home/quique/Documentos/RHA/SW/lib/cytron_g15_servo/cytron_g15_servo.h.txt
Done processing /home/quique/Documentos/RHA/SW/lib/debug/debug.cpp
Done processing /home/quique/Documentos/RHA/SW/lib/debug/debug.h
Ignoring /home/quique/Documentos/RHA/SW/lib/debug/debug.gch; not a valid file name (cpp, h)
Done processing /home/quique/Documentos/RHA/SW/lib/debug/debug.gch
Done processing /home/quique/Documentos/RHA/SW/lib/joint_handler/joint_handler.cpp
Done processing /home/quique/Documentos/RHA/SW/lib/joint_handler/joint_handler.h
Ignoring /home/quique/Documentos/RHA/SW/lib/joint_handler/joint_handler.gch; not a valid file name (cpp, h)
Done processing /home/quique/Documentos/RHA/SW/lib/joint_handler/joint_handler.gch
Done processing /home/quique/Documentos/RHA/SW/lib/joint_rha/joint_rha.cpp
Done processing /home/quique/Documentos/RHA/SW/lib/joint_rha/joint_rha.h
Ignoring /home/quique/Documentos/RHA/SW/lib/joint_rha/joint_rha.h.gch; not a valid file name (cpp, h)
Done processing /home/quique/Documentos/RHA/SW/lib/joint_rha/joint_rha.h.gch
Done processing /home/quique/Documentos/RHA/SW/lib/rha_types/fuzzy_regulator.h
Done processing /home/quique/Documentos/RHA/SW/lib/rha_types/pid_regulator.h
Done processing /home/quique/Documentos/RHA/SW/lib/rha_types/rha_types.h
Ignoring /home/quique/Documentos/RHA/SW/lib/rha_types/rha_types.h.gch; not a valid file name (cpp, h)
Done processing /home/quique/Documentos/RHA/SW/lib/rha_types/rha_types.h.gch
Done processing /home/quique/Documentos/RHA/SW/lib/robot_rha/robot_rha.cpp
Done processing /home/quique/Documentos/RHA/SW/lib/robot_rha/robot_rha.h
Ignoring /home/quique/Documentos/RHA/SW/lib/robot_rha/robot_rha.h~; not a valid file name (cpp, h)
Done processing /home/quique/Documentos/RHA/SW/lib/robot_rha/robot_rha.h~
Ignoring /home/quique/Documentos/RHA/SW/lib/robot_rha/robot_rha.h.gch; not a valid file name (cpp, h)
Done processing /home/quique/Documentos/RHA/SW/lib/robot_rha/robot_rha.h.gch
Done processing /home/quique/Documentos/RHA/SW/lib/servo_rha/servo_rha.cpp
Done processing /home/quique/Documentos/RHA/SW/lib/servo_rha/servo_rha.h
Ignoring /home/quique/Documentos/RHA/SW/lib/servo_rha/servo_rha.h.gch; not a valid file name (cpp, h)
Done processing /home/quique/Documentos/RHA/SW/lib/servo_rha/servo_rha.h.gch
Done processing /home/quique/Documentos/RHA/SW/lib/utilities/utilities.cpp
Ignoring /home/quique/Documentos/RHA/SW/lib/utilities/utilities.cpp.old; not a valid file name (cpp, h)
Done processing /home/quique/Documentos/RHA/SW/lib/utilities/utilities.cpp.old
Done processing /home/quique/Documentos/RHA/SW/lib/utilities/utilities.h
Done processing /home/quique/Documentos/RHA/SW/src/main.cpp
Ignoring /home/quique/Documentos/RHA/SW/src/main_utilities.cpp; not a valid file name (cpp, h)
Done processing /home/quique/Documentos/RHA/SW/src/main_utilities.cpp_
Done processing /home/quique/Documentos/RHA/SW/test/a_test_rha_types/test_rha_types.cpp
Done processing /home/quique/Documentos/RHA/SW/test/b_test_pid_regulator/test_pid_regulator.cpp
Done processing /home/quique/Documentos/RHA/SW/test/c_test_fuzzy_regulator/test_fuzzy_regulator.cpp
Done processing /home/quique/Documentos/RHA/SW/test/d_test_servo_rha/test_servo_rha.cpp
Done processing /home/quique/Documentos/RHA/SW/test/e_test_joint_rha/test_joint_rha.cpp
Done processing /home/quique/Documentos/RHA/SW/test/f_test_joint_mock/test_joint_handler.cpp
Total errors found: 0

```

Figura 8.24: Salida de cpplint una vez eliminados los errores

Fuente: Autor. Salida de la herramienta cpplint



Capítulo 9

Resultados y discusión

En este capítulo se detallan los resultados conseguidos con la versión final del brazo robótico.

9.1. Resultados

El **espacio de trabajo** visto en el capítulo 6 representa las limitaciones matemáticas del sistema tal y como se ha planteado; además de la matemática, para definir el espacio de trabajo definitivo se deben tener en cuenta ciertas limitaciones impuestas por los mecanismos tal y como están construidos así como la compensación por muelles. El resultado de la última versión se puede ver en la figura 9.1 con un rango de movimiento algo inferior a 50cm en el eje X y algo menor a 90cm en el eje Z. Se debe recordar que en la primera articulación no existe ninguna limitación mecánica ni de compensación, por lo que el rango de 180 grados establecido anteriormente permanece vigente.

Aunque se considera que esta capacidad de movimiento es suficiente para el propósito que se pretende dar, siempre puede modificarse a otro rango, desplazándolo o ampliéndolo, reajustando la compensación de carga así como la matemática de la cinemática (variando el origen de la realimentación).

Se ha conseguido controlar el brazo con la **carga** inicialmente planteada, de 780g. En la configuración definitiva el brazo robótico es capaz de aguantar hasta 1kg de carga en el extremo de la forma esperada. Aunque no se ha probado, nuevamente variando la tensión de los muelles esta capacidad puede incrementarse notablemente.

Se han llevado a cabo dos test de **precisión** del brazo robótico, pudiendo verse los resultados en las figuras 9.2 y 9.3. El prototipo presenta una estructura mecánica compleja realizada con técnicas y materiales que no aseguran gran precisión, aún así se ha conseguido dotar al brazo robótico de una precisión suficiente para el uso para el cual será destinado.

En la tabla 9.1 pueden verse resumidos los resultados de los test así como la desviación frente a la precisión y repetibilidad observada. Se presentan datos respecto de la desviación máxima primero en precisión, de todos los puntos respecto a la referencia; y segundo respecto a la repetibilidad midiendo la desviación dentro

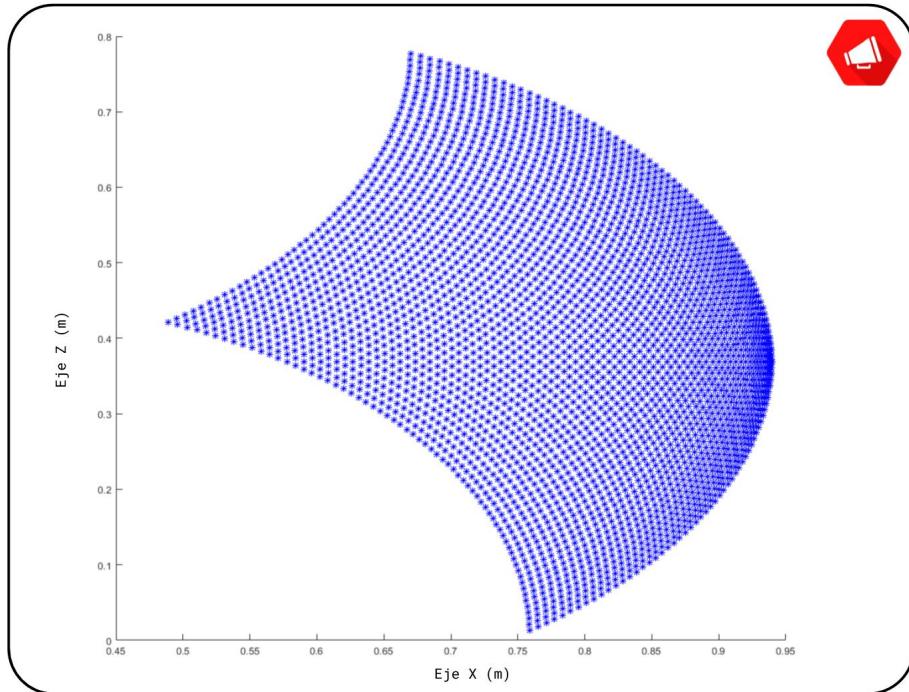


Figura 9.1: Espacio de trabajo limitado por los muelles y la estructura mecánica
Fuente: Autor

de agrupaciones de puntos. Los datos proporcionados son estimaciones altamente dependientes de la precisión con que se han realizado los test y la limitación del material utilizado.

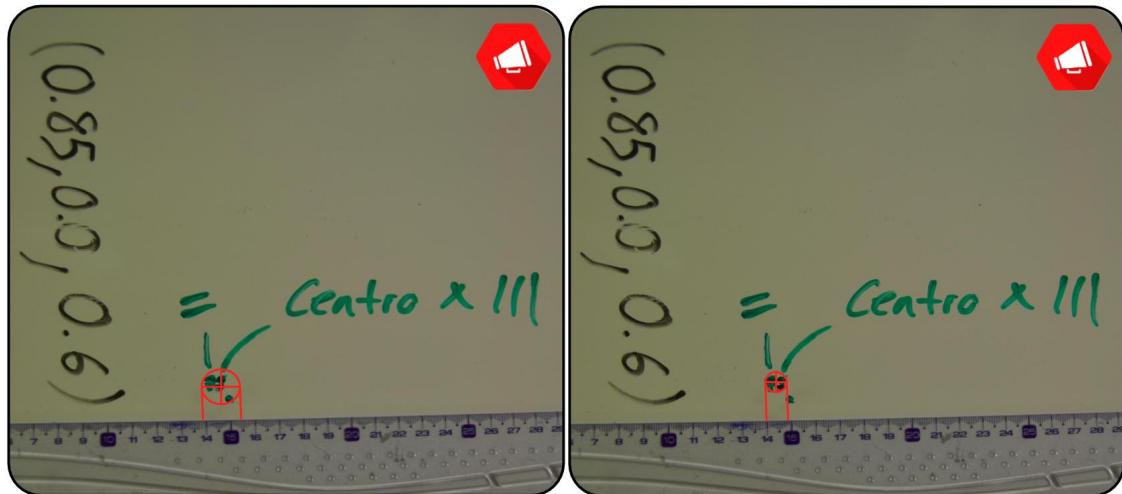
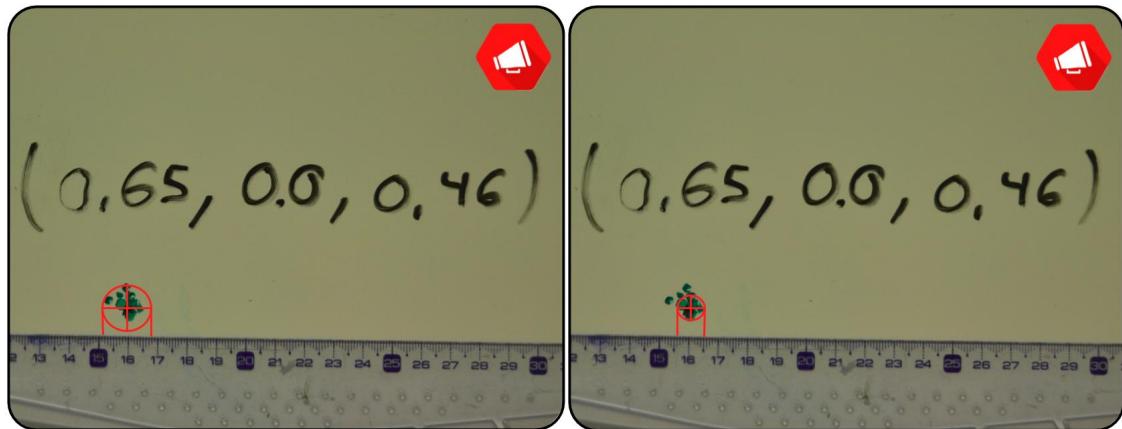
Puede apreciarse que, aun habiendo ligeras desviaciones entre grupos de puntos se dan bastantes repeticiones donde los puntos se superponen.

Se puede concluir, que aunque la precisión no es muy elevada es suficiente para la aplicación buscada. Además, aun acumulando error en la precisión se puede comprobar que se consigue una repetibilidad más que aceptable.

Tabla 9.1: Test de precisión del brazo robótico

Fuente: Autor

Test	Repeticiones	Precisión	Repetibilidad
1	10	< 4 mm	< 5 mm
2	9	< 5 mm	< 6 mm

Figura 9.2: Pruebas de precisión en $(0.85, 0.0, 0.6)$ *Fuente: Autor*Figura 9.3: Pruebas de precisión en $(0.65, 0.0, 0.46)$ *Fuente: Autor*



Capítulo 10

Gestión del proyecto

En este capítulo se describe la gestión del proyecto: ciclo de vida, planificación y presupuesto, tanto del material utilizado como del coste que tendría el material para construir un prototipo funcional tal y como se ha diseñado.

10.1. Ciclo de vida

El proyecto, desde sus inicios ha ido pasando por una serie de fases que no siempre se han mantenido secuenciales. En la construcción de un brazo robótico se pueden separar diferentes etapas, que a grandes rasgos cubren todos los aspectos del diseño. Se puede ver un diagrama con las diferentes etapas en la figura 10.1, que se detallan a continuación.

El primer paso para siempre pasa por el diseño del soporte físico del prototipo. Esta fase incluye una etapa de aprendizaje de las tecnologías a utilizar (impresión 3D y corte láser) así como el estudio de diferentes opciones y el desarrollo iterativo a través de las diferentes versiones. Las etapas finales del desarrollo mecánico o físico del proyecto se funden con las siguientes etapas, que implican adaptar parte de la estructura para incluir, de forma satisfactoria, el resto de aspectos constructivos o de control.

Otra fase importante pasa por la elección del material electromecánico. Este material, sensores y actuadores, y su integración en el brazo robótico influye de forma notable en el diseño del propio brazo robótico. Es necesario tener definidos estos componentes antes de continuar con posteriores desarrollos para evitar inconsistencias con el diseño. En esta etapa será imprescindible comprobar que los sensores elegidos cubren el rango necesario, una vez integrados; de igual manera los actuadores deben ser capaces de realizar las operaciones tal y como se espera. Estas comprobaciones pueden implicar cambios en el diseño mecánico o en los elementos elegidos.

Una vez se tiene el soporte físico completo, es decir, el esqueleto del brazo robótico, se puede pasar a la siguiente fase: el estudio matemático del mismo. Se entiende que llegados a esta fase los cambios que puede sufrir los componentes mecánicos y electrónicos del prototipo no afectarán notablemente a las relaciones matemáticas del brazo (cinemática y dinámica) así como de los sensores.

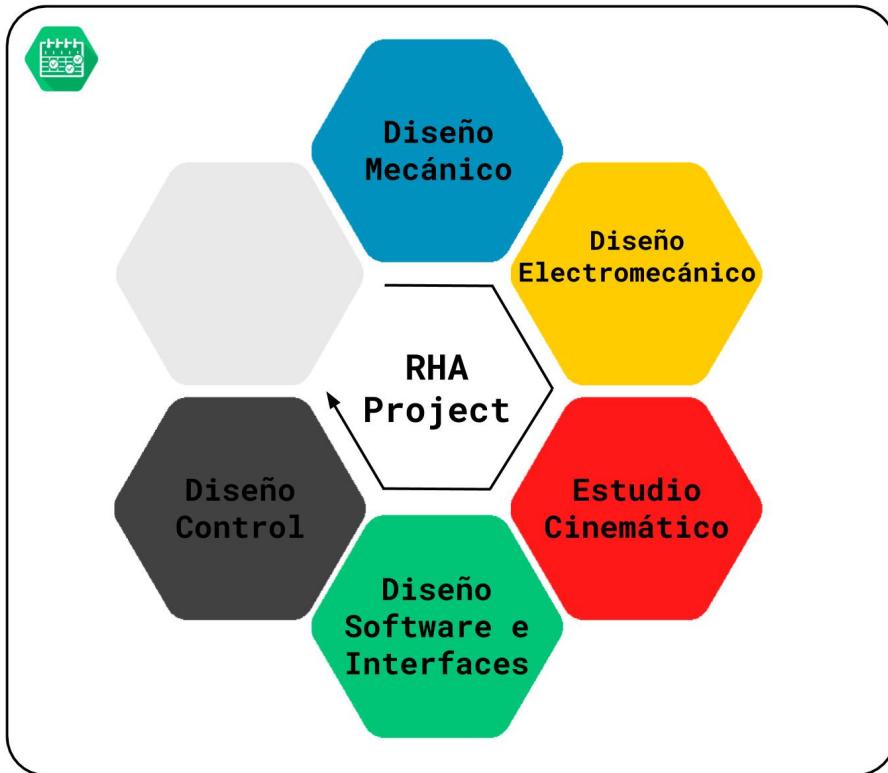


Figura 10.1: Diagrama con las diferentes fases del proyecto

Fuente: Autor

En este caso concreto, a continuación o incluso paralelamente al estudio matemático se comienza con la implementación del software. Es necesario generar un marco que permita controlar el brazo, aun de forma rudimentaria. Esta fase implica definir la estructura del software, la gestión interna de la información así como los componentes principales (a falta de las modificaciones pertinentes del control). Concretamente es de especial interés definir como se manejan los servos (protocolo de comunicación) y ciclos de funcionamiento entre los diferentes componentes. Una vez se tiene un marco lo suficientemente maduro (con la verificación y testing correspondiente de cada componente) se puede introducir la siguiente fase.

Teniendo un sistema básico de software es imprescindible para poder hacer un estudio dinámico y estático del sistema. Usando de apoyo el desarrollo de software actual se obtiene la información del brazo que propiciará el análisis y diseño del sistema de control correspondiente. Una vez se tiene diseñado el control se procede a su implementación software.

En cada etapa se debe ir comprobando el funcionamiento de conjunto según se acumulan funcionalidades. De esta forma, la verificación del funcionamiento como conjunto del brazo, una vez finalizado el ciclo, se vuelve más sencilla.

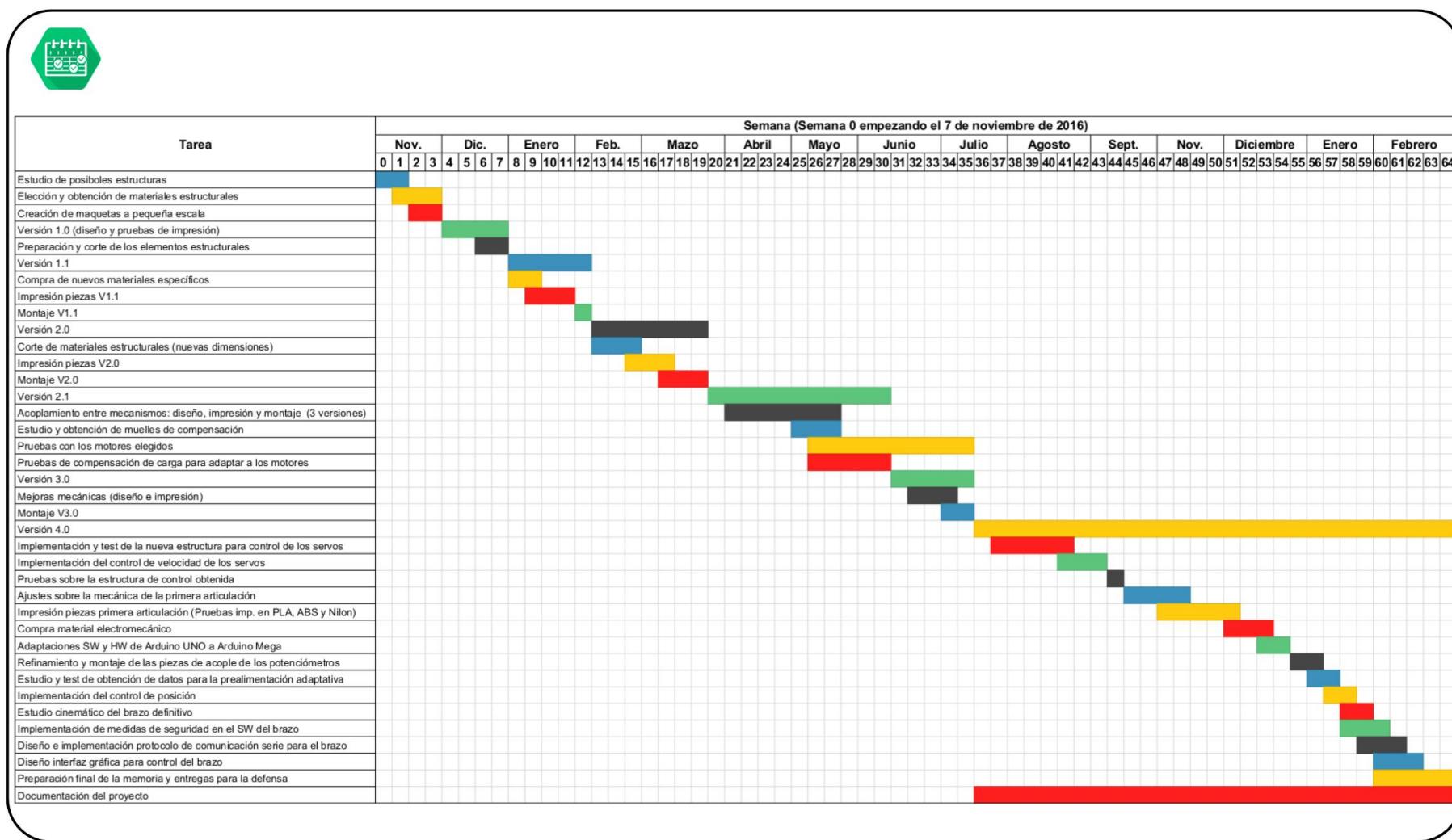
La figura 10.1 representa estas fases a modo de ciclo. Como en todo proyecto de prototipado, una vez finalizada la primera etapa, y con un prototipo funcional, se

han de tomar las decisiones pertinentes que, afectando a todas las etapas, permitan evolucionar a través de un nuevo ciclo el prototipo a una segunda versión. De esta manera el prototipo diseñado pasa por diferentes ciclos hasta que es completamente apto para comercializarse como producto.

10.2. Planificación

El ciclo de vida que se ha explicado en el apartado anterior puede desglosarse en detalle en la figura 10.2, donde se muestra un diagrama de Gantt con las diferentes actividades implicadas en el desarrollo del proyecto.

El diagrama muestra una evolución temporal de los diferentes pasos seguidos en la ejecución y construcción del brazo robótico de forma que se puede observar, semana a semana, el tiempo dedicado a cada actividad.



10.3. Presupuesto

Se puede ver el coste de los materiales en la tabla 10.1 así como el presupuesto estimado para la construcción del prototipo. Se debe tener en cuenta que para la estimación del precio total se han tomado los precios resultantes de la compra de unidades sueltas a través de los distribuidores oficiales para cada caso. De igual manera, parte de los materiales que se presentan no son consumidos en su totalidad en la realización de un solo montaje, si no que valdrían para varios.

El presupuesto que se muestra se puede tomar como referencia del coste máximo que conllevaría la construcción, a pequeña escala, del brazo robótico diseñado.

Tabla 10.1: Costes del proyecto

Artículo	Referencia	Coste Unitario ¹	Cantidad	Total
Arduino Mega	A000067	35.00 € ²	1	35.00 €
Cytron G15 Cube Servo	G15	23.23 € ³	3	69.69€
Cytron G15 Shield	SHIELD-G15	6.64 €	1	6.64 €
Potenciómetro Serie TW	502-8621	9.29 € ⁴	2	18.58€
Fuente de alimentación	S-120-12	12.05 € ⁵	1	12.05€
TTL Serial Adapter Module	FT232RL	1.39 €	1	1.39€
Perfiles Aluminio sección cuadrada	304-7894	5.626 € ⁶	5	28.13 €
Rodamiento 13x4	618-9890	1.83€	14	25.62 €
Rodamiento 10x3	618-9856	2.02€	2	4.04 €
Rodamiento Axial	286-8549	23.57€	1	23.57€
Poleas acetal 10x3	352-0636	2.30€	2	4.60€
Hilo Kevlar (100ft 300lb)	-	9.99 € ⁷	1	9.99 €
GM Series Plastic Wheel	GMPW	2.70 € ⁸	1	2.70 €
Parasol Hormigón 24kg	15710142	27.95 € ⁹	1	27.95 €
Barra cilíndrica de Acero	734482	4.75 €	1	4.75 €
Perfil cilíndrico de Aluminio	12705322	3.65 €	1	3.65 €
Muelle Tracción (1.8x200mm, 17kg)	18613553	3.70 €	2	7.40 €
Tornillería variada (ver tabla 10.2)	-	-	-	-
Eje de acero de 4mm ¹⁰	-	-	-	-
Eje de acero de 3mm ¹¹	-	-	-	-
PLA filamento (1.75mm, 1kg)	-	19.90 €/kg ¹²	-	-
			Total:	285.75 €

¹En los casos en qué ha sido necesario se ha aplicado el cambio a Euros oficial propuesto por [34] en el día en que se han consultado los precios

²Precios consultados en [35] a 19 de Febrero 2018.

³Precios consultados en [36] a 07 de Septiembre 2017.

⁴Precios consultados en [37] a 07 de Septiembre 2017.

⁵Precios consultados en [38] a 19 de Febrero 2018.

⁶Precios consultados en [37] a 07 de Septiembre 2017.

⁷Precio consultados en [39] a 07 de Septiembre 2017.

⁸Precio consultados en [40] a 11 de Septiembre 2017.

⁹Precios consultados en [41] a 11 de Septiembre 2017.

¹⁰Material del laboratorio de proyectos del cual no se poseen datos

¹¹Material del laboratorio de proyectos del cual no se poseen datos

¹²Precio consultados en [42] a 11 de Septiembre 2017.

La tornillería utilizada venía como parte de una caja con múltiples componentes.

El precio del total no resulta representativo, es por eso que en la tabla 10.2 se muestran las necesidades de tornillería del prototipo sin incluir el precio de los mismos.

Tabla 10.2: Tornillería requerida

Modelo	Cantidad
Tuercas M4	26
Tuercas M3	17
Tornillos M3x10	15
Tornillos M3x25	2
Tornillos M4x10	4
Tornillos M4x12	2
Tornillos M4x20	18



Capítulo 11

Conclusiones

Este capítulo aúna las conclusiones así como posibles líneas de desarrollo a futuro.

11.1. Conclusión

Una vez se ha alcanzado un punto y aparte en este proyecto se puede afirmar que los objetivos inicialmente planteados han sido cumplidos.

El desarrollo del proyecto ha supuesto un aprendizaje extenso en el área de diseño y fabricación en 3D así como una familiarización con las estructuras diseñadas. Estos conocimientos han permitido obtener una compensación de la carga del brazo bastante notable que ha permitido alcanzar una mayor seguridad al reducir la fuerza de los motores, y por tanto su capacidad de provocar daños.

Se ha implementado de manera más que satisfactoria una librería para la gestión de los servos que gestiona, a bajo nivel, la comunicación serie con los mismos. Además se ha diseñado un protocolo de comunicación de tamaño y tipo de mensaje variable para la comunicación del brazo con el exterior. Aunque podría acoplarse a cualquier otro dispositivo se ha diseñado una interfaz gráfica en python que permite un control intuitivo y claro del brazo robótico. Estos aspectos han supuesto un aprendizaje en el desarrollo de protocolos de comunicación a bajo nivel y diferentes aspectos a controlar (longitud, encabezado, integridad del mensaje). Este desarrollo se ha llevado a cabo en el lenguaje nativo de Arduino, C++, pero también en Python, lenguaje en el que se ha implementado la interfaz gráfica.

En lo referente al control se ha diseñado una estructura de control que permite un movimiento controlado y estable aun contando con los muelles de la segunda y tercera articulación como con el hecho de estar la articulación suelta en uno de los sentidos (cabe recordar que el hilo se recoge solo en un sentido). Esta estructura de control aprovecha al máximo la información proporcionada por los servos para adaptarse a la situación de carga para cada punto.

Aunando los aspectos descritos se ha conseguido implementar un brazo robótico capaz de sostener una tablet Surface de [22] y posicionarlala dentro en su espacio de trabajo. Las características del brazo robótico así como consideraciones en el

software permiten unos niveles de seguridad elevados para los usuarios con los que interactúe.

11.2. Desarrollos futuros

Como se ha visto en el apartado 10.2 el desarrollo del prototipo se plantea de manera iterativa en su totalidad. Una vez pasado el primer ciclo de desarrollo se han planteado diferentes líneas a mejorar en una posible segunda iteración. Estas mejoras se detallan a continuación.

11.2.1. Primera Articulación

El giro en el eje Z plantea un reto complicado. Está encargado de mantener el brazo erguido en todo momento sin que esto suponga un perjuicio a la libertad de giro de la articulación. Se plantea sustituir el rodamiento axial por un rodamiento de bolas de tamaño equivalente de forma que ambas partes de la articulación puedan atornillarse al mismo aumentando la robustez de la unión.

Desde el punto de vista de la transmisión de movimiento se plantea guiar el movimiento desde el motor hasta la rueda de transmisión a través de correas de distribución asegurando la transmisión en esta primera etapa aun manteniendo la flexibilidad de la rueda de transmisión a la base. El giro en Z del brazo robótico seguirá estando condicionado a la fuerza que se oponga impidiendo así que pueda causar daños a los usuarios.

11.2.2. Seguridad Software

El grado de seguridad alcanzada con la estructura es bastante notable, aún así se puede ampliar la seguridad implementada por software extendiéndola a más niveles. La información utilizada para actualizar el controlador de velocidad descrito en la sección 7.1 puede dar información útil de la situación del brazo robótico que puede ser aprovechada para gestionar la seguridad del mismo.

De igual manera, a todos los niveles se pueden implementar protocolos para gestionar los diferentes tipos de errores de forma que se evite el bloqueo y la necesidad de reiniciar el sistema en caso de diferentes errores.

11.2.3. Grados de libertad de Orientación

En el marco de este proyecto de fin de grado no se han llegado a implementar los grados de libertad de orientación para la tablet.

Se ha planteado implementar dos grados de libertad que controlen la inclinación de la tablet, fijándose en la figura 11.1 estos dos grados de libertad gestionarán el giro al rededor del eje Z y del eje Y respectivamente. Se plantea utilizar un par de accionamientos paralelos, similar a los vistos en [10] en el capítulo 2, accionados por medio de dos servos ubicados en el extremo del brazo.



Figura 11.1: Sistema de referencia para los grados de libertad de orientación

Fuente: Imagen del fabricante editada por el autor

11.2.4. Mejoras generales

Una segunda iteración podría centrarse también en identificar diferentes mejoras posibles a robustecer que hayan pasado desapercibidas en los test realizados para los diferentes aspectos del diseño.

Apéndice A

Listado de piezas diseñadas

En este anexo se presenta una tabla listando las piezas que se han diseñado y fabricado para el proyecto. En la tabla A1 se puede ver una miniatura de la pieza en cuestión, la cantidad necesaria de cada tipo, una estimación del peso (material consumido en su fabricación) así como una breve descripción de la pieza y/o proceso de fabricación de la misma. A su vez llevan asociado una referencia alfanumérica que se corresponde con los ficheros en formato digital entregados, asignada de la siguiente forma:

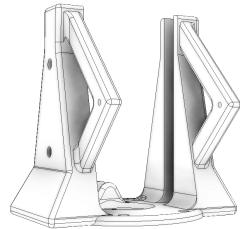
RHA + ubicación + número_de_pieza

- *ubicación*: A\$ (articulación), B\$ (barra). La letra va acompañada de un número (sustituyendo al carácter \$) que variará dependiendo de donde se encuentre la pieza en el montaje. A1 - articulación uno, B2 - barra 2 y así sucesivamente.
- *número_de_pieza*: valor numérico que diferencia las piezas en la misma ubicación.

Nota: En caso de que la pieza se utilice en varias partes diferenciadas la referencia se tomará para la primera vez que aparece la pieza en orden ascendente (desde la barra 0 en adelante e igual desde la articulación 1).

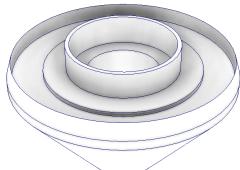
Nota 2: la miniatura de las piezas no sigue ninguna escala concreta. Es una representación que permite un reconocimiento visual de la pieza, aunque no de su tamaño.

Tabla A.1: Listado de piezas diseñadas de fabricación propia

Num	Esquema Pieza	Referencia	Cantidad	Descripción
1		RHAB1001	1	Es la base sobre la que se colocan los servos de los tres primeros grados de libertad. También fija la rueda para efectuar el giro en Z
2		RHAB1002	1	Funciona a modo de fijación de la torre de motores. Además encapsula la polea sobre la que se enrolla el hilo, accionada por el servo. Supone un apoyo para el eje motriz, de forma que absorbe parte de las fuerzas de tracción a las que es sometido.
3		RHAB1003	1	Su función es equivalente a la de la pieza RHAB1002

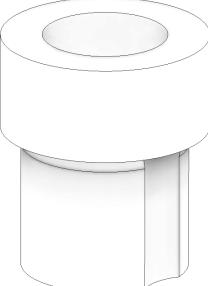
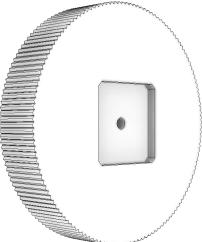
Continua en la página siguiente

Tabla A.1 – Continuación de la página anterior

Num	Esquema Pieza	Referencia	Cantidad	Descripción
4		RHAB1004	2	Polea motriz sobre la que se enrolla/desenrolla el hilo para accionar el brazo robótico
5		RHAA1005	1	Es la pieza móvil de la primera articulación.
6		RHAA1006	1	Pieza fija de la primera articulación y base sobre la que rota el brazo robótico.

Continua en la página siguiente

Tabla A.1 – Continuación de la página anterior

Num	Esquema Pieza	Referencia	Cantidad	Descripción
7		RHAB0001	1	Asegura el ajuste entre la barra de acero que soporta el brazo y el soporte elegido.
8		RHAB0002	1	Acompaña a la pieza RHAB0001 en su función.
10		RHAA1001	1	Transmite el giro del motor a la rueda de transmisión para accionar la primera articulación.

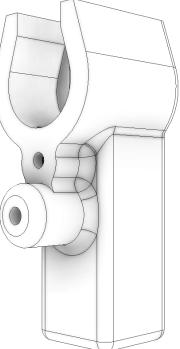
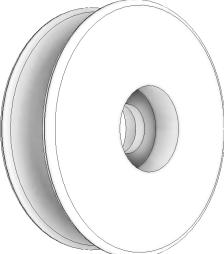
Continua en la página siguiente

Tabla A.1 – Continuación de la página anterior

Num	Esquema Pieza	Referencia	Cantidad	Descripción
19		RHAB1007	2	Asegura el ajuste entre las poleas de redirección y el eje utilizado
19		RHAB1008	2	Soporta las poleas de redirección encapsulando y protegiendo el cable de salirse de las mismas. Además sirve de anclaje para la vuelta del cable de la segunda articulación.
9		RHAB1009	1	Soporte para acoplar la electrónica a los servos (Placa Arduino y shield)

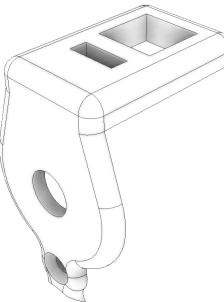
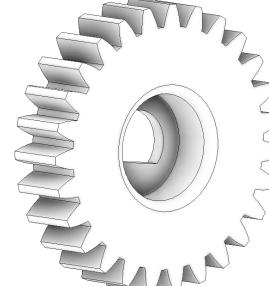
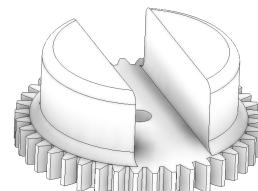
Continua en la página siguiente

Tabla A.1 – Continuación de la página anterior

Num	Esquema Pieza	Referencia	Cantidad	Descripción
11		RHAA2001	1	Encapsula la polea que redirige el cable hacia la tercera articulación.
12		RHAA2002	1	Integra el potenciómetro encargado de realimentar la segunda articulación próximo al eje de giro de la misma.
13		RHAA2003	1	Polea para redirigir el movimiento hacia la tercera articulación a su paso por el eje de giro de la segunda.

Continua en la página siguiente

Tabla A.1 – Continuación de la página anterior

Num	Esquema Pieza	Referencia	Cantidad	Descripción
14		RHAA2004	1	Tapa para el potenciómetro ubicado en la segunda articulación
15		RHAA2005	1	Engranaje para transmitir el giro de la articulación al potenciómetro. Gira solidario al potenciómetro.
16		RHAA2006	1	Hace pareja con la pieza RHAA2005 encajándose en la barra y girando solidaria a la misma.

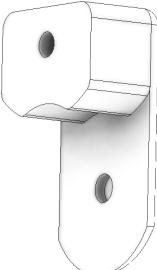
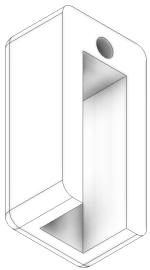
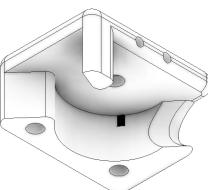
Continua en la página siguiente

Tabla A.1 – Continuación de la página anterior

Num	Esquema Pieza	Referencia	Cantidad	Descripción
17		RHAB2001	1	Cierra las barras verticales en el extremo superior. Guía uno de los ejes de giro de la segunda articulación asegurando que la barra que gira en el mismo se mantenga en la posición adecuada.
17		RHAB2002	1	Complementa la pieza RHAB2001.
18		RHAB2003	3	Polea para los <i>polipastos</i> correspondientes a la segunda y tercera articulación. También se encuentra redirigiendo el cable hacia la tercera articulación en la etapa final.

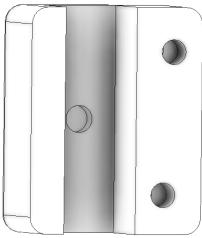
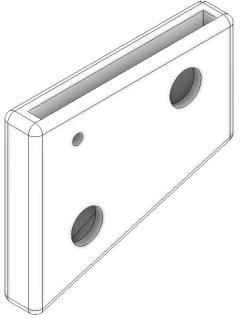
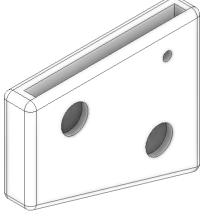
Continua en la página siguiente

Tabla A.1 – Continuación de la página anterior

Num	Esquema Pieza	Referencia	Cantidad	Descripción
19		RHAB2004	2	Asegura la unión y giro de la polea RHAB2003 sobre la barra correspondiente.
20		RHAB2005	2	Acompaña a la pieza RHAB2004 abrazando la barra de sección cuadrada y fijando el montaje a la misma.
22		RHAB3002	1	Cubre y fija la polea de redirección hacia la tercera articulación justo antes de la misma.

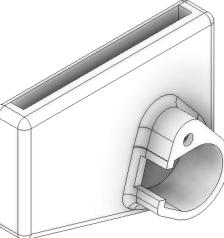
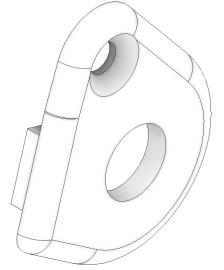
Continua en la página siguiente

Tabla A.1 – Continuación de la página anterior

Num	Esquema Pieza	Referencia	Cantidad	Descripción
21		RHAB3001	1	Encapsula la polea de redirección junto a la pieza RHAB3002. Permite la fijación del montaje a la barra cuadrada. También sirve de punto de encaje para el extremo fijo del hilo.
23		RHAA3001	2	Encaja sobre la pieza RHAA3005 quedando fijas a través de los rodamientos sobre los que se apoyarán los ejes de giro. Estas piezas componen la barra de acoplamiento entre los mecanismos paralelos que componen las articulaciones dos y tres.
24		RHAA3002	1	La función es equivalente a la de la pieza RHAA3001 siendo su simétrica. Además esta pieza integra el potenciómetro que realimenta la tercera articulación.

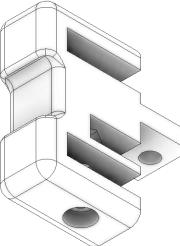
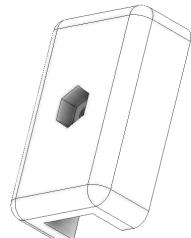
Continua en la página siguiente

Tabla A.1 – Continuación de la página anterior

Num	Esquema Pieza	Referencia	Cantidad	Descripción
25		RHAA3003	1	La función es equivalente a la de las piezas RHAA3001 y RHAA3002. Además esta pieza integra el potenciómetro que realimenta la tercera articulación.
26		RHAA3004	1	Tapa y fija el potenciómetro a la pieza RHAA3002.
27		RHAA3005	2	Esta pieza y su simétrica componen la base estructural de la barra de acoplamiento entre los mecanismos paralelos, componiendo el eje de giro de la tercera articulación.

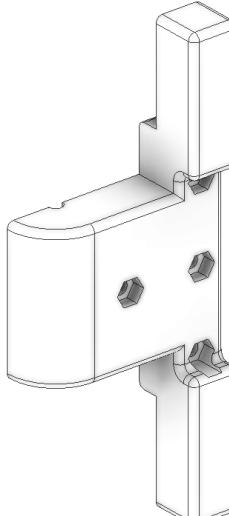
Continua en la página siguiente

Tabla A.1 – Continuación de la página anterior

Num	Esquema Pieza	Referencia	Cantidad	Descripción
28		RHA3006	4	Encaja sobre la pieza RHA3005 y su simétrica fijándolas.
29		RHA3007	1	Transmite el movimiento de la barra al potenciómetro que realimenta la segunda articulación.
30		RHA3008	1	Fija la pieza RHA3007 al rededor de la barra cuadrada correspondiente.

Continua en la página siguiente

Tabla A.1 – Continuación de la página anterior

Num	Esquema Pieza	Referencia	Cantidad	Descripción
30		RHAA4001	1	Mantiene las barras del extremo a la distancia adecuada fijando los ejes sobre los que rota. Permite el acoplamiento del extremo añadiendo un grado de libertad (giro en eje Z)

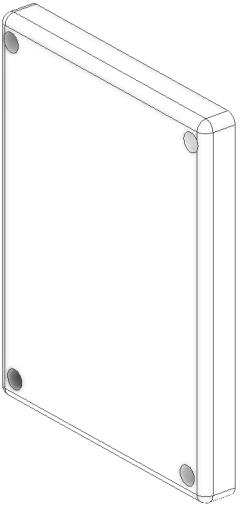
Continua en la página siguiente

Tabla A.1 – Continuación de la página anterior

Num	Esquema Pieza	Referencia	Cantidad	Descripción
30		RHAA4002	1	Complementa la pieza RHAA4001
30		RHAA4003	1	Encaja en el montaje de las piezas RHAA4001 y RHAA4002. Además está diseñado como encaje para el soporte de la tablet.

Continua en la página siguiente

Tabla A.1 – *Continuación de la página anterior*

Num	Esquema Pieza	Referencia	Cantidad	Descripción
30		RHAA4004	1	Complementa la pieza RHAA4003 aprisionando el soporte de la tablet por ambos lados.

Apéndice B

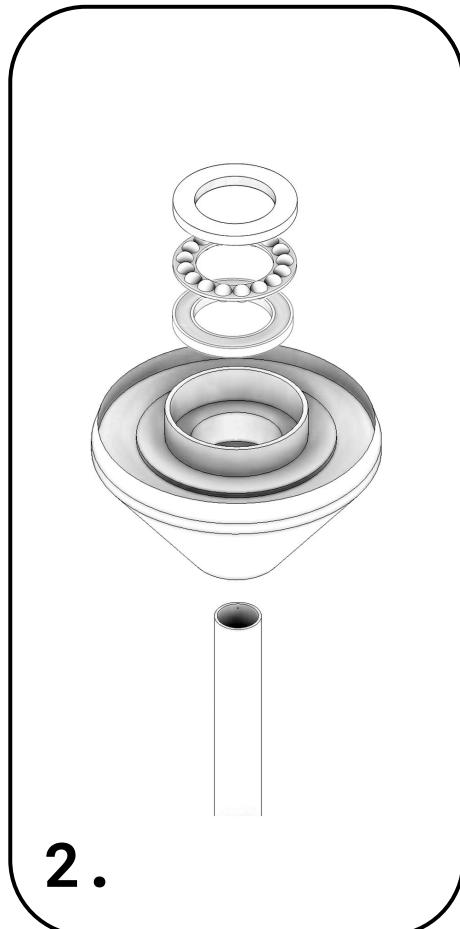
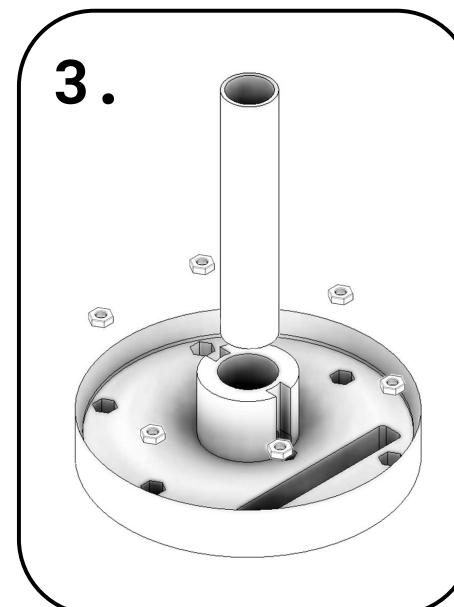
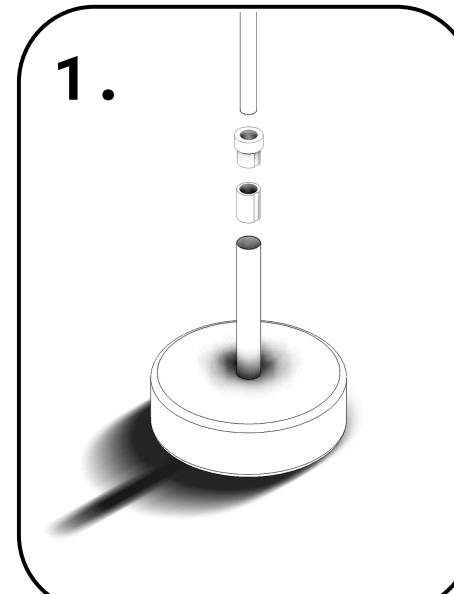
Montaje del prototipo

Complementando a la lista de figuras presentada en el anexo A se adjuntan a continuación unas nociones sobre como se ensambla el prototipo. Se espera que las diferentes imágenes permitan ubicar en el diseño las diferentes piezas descritas.

G u í a d e

RHA Project

M o n t a j e



El paso 3 requiere
para su posterior
ensamblaje:



x6 - M4

4.



Al unir los pasos 2 y 3, si las tuercas no han quedado encajadas por exceso de holgura, se pueden fijar con cualquier tipo de adhesivo.

También se podrán sujetar a mano cuando en el momento de ensamblar, sobre dicha estructura, el montaje del paso 5.



El paso 5 requiere para fijar el soporte de los motores:

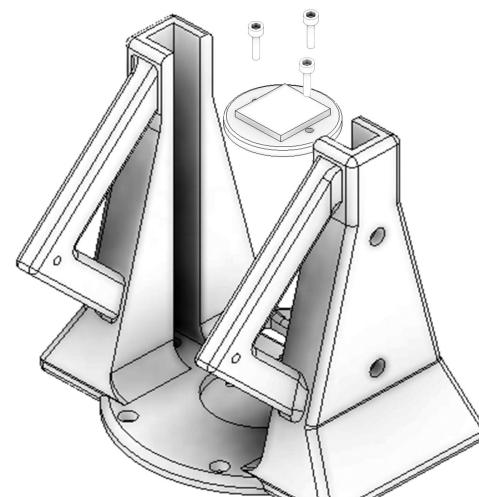


x3 - M3

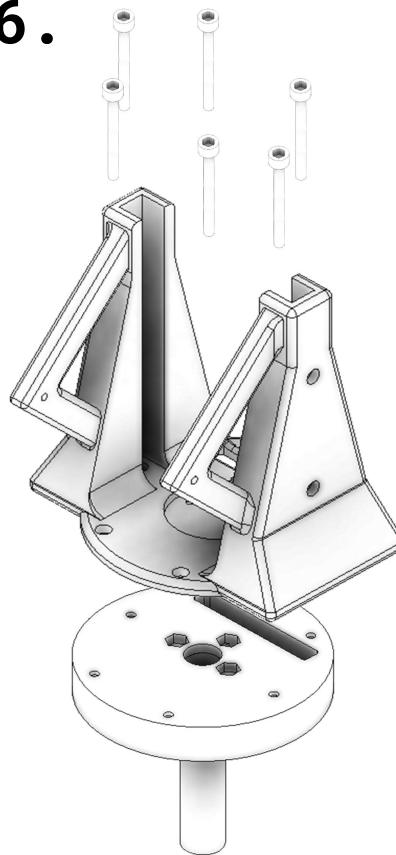


x3 - M3x10

5.



6.

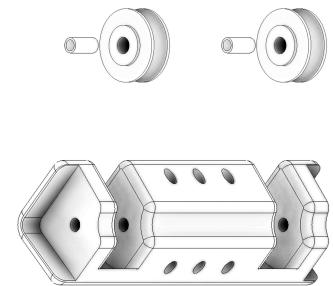


El paso 6 requiere:



x6 - M4x20

7.

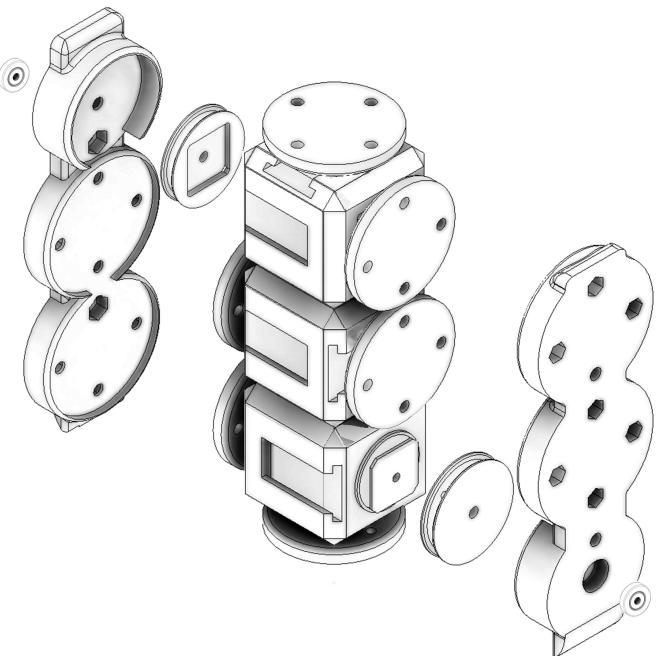


Las poleas llevan un adaptador para reducir el diámetro interior de las mismas para evitar movimiento respecto al eje utilizado.

Esta pieza se reserva para ser ensamblada posteriormente.



8.



El paso 8 requiere:



x12 - M3x10



x2 - 3x10



x12 - M3

Es recomendable que
se ate el hilo de
kevlar a las poleas
antes de taparlas.

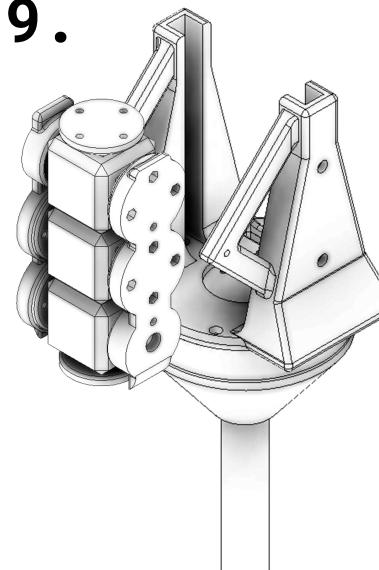


x2 - M3x25



x4 - M4

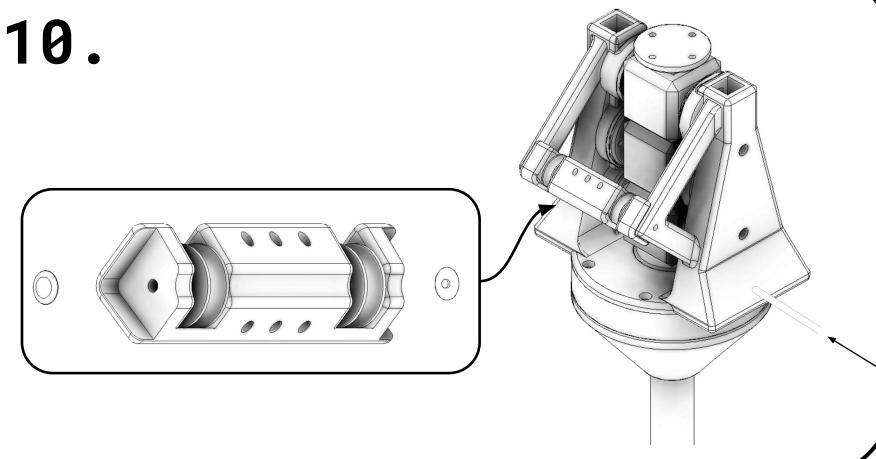
9.



Paso 9: El motor inferior se encaja sobre el soporte que se ha fijado en el paso 5 sobre la base.

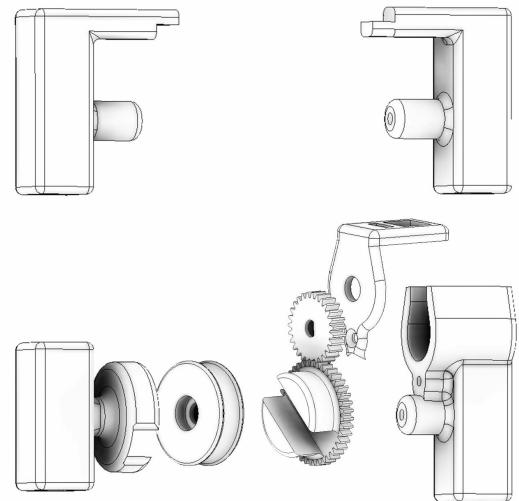
Paso 10: se recupera el montaje del paso 7 para encavarlo con el eje (acero 3mm de diámetro) en la pieza montada en el paso 9. Opcionalmente se pueden añadir las tapas para bloquear las salidas del eje.

10.

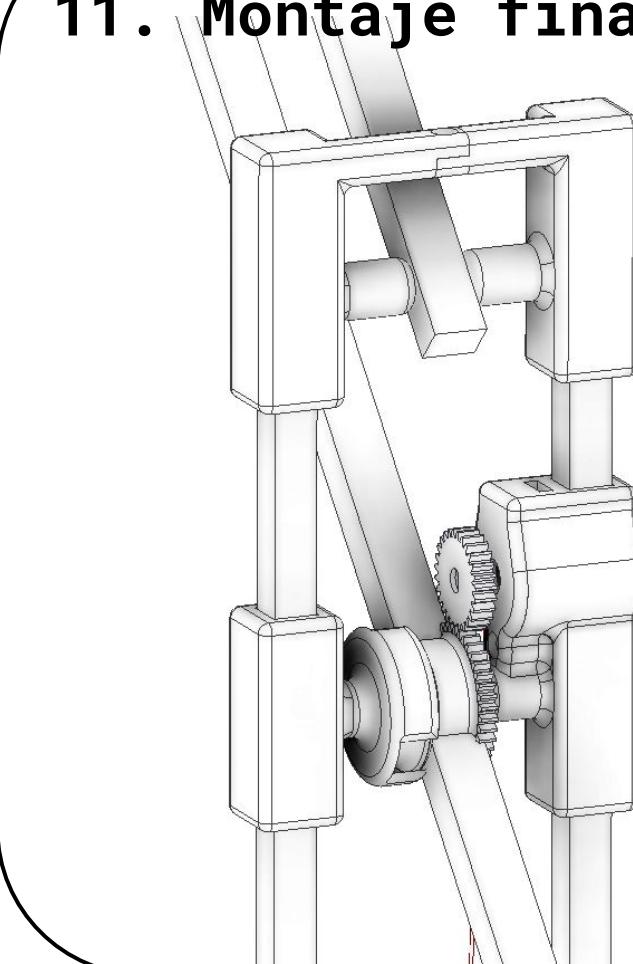




11.



11. Montaje final



El paso 11 requerirá:

- x2 Ejes de acero de 4mm de diámetro



x1 - M4x12



x1 - M4



x1 - M4x10



x1 - M4

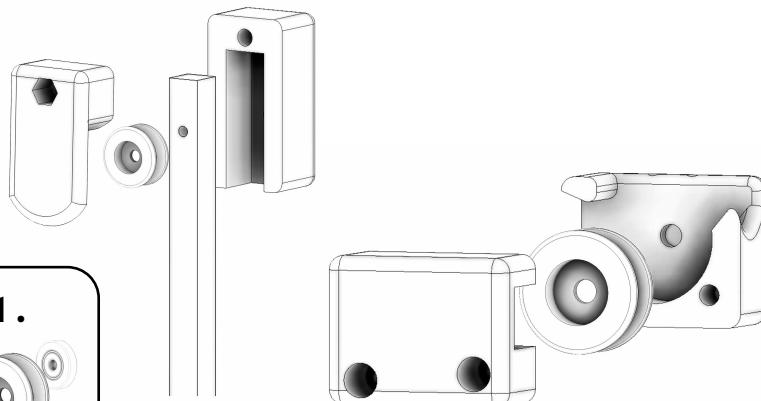


x2 - 4x13

Los ejes atraviesan todas las piezas fijando las mismas a las barras de aluminio, que tienen agujeros pasantes donde quedan encajados los ejes y sobre los que giran.

- Potenciómetro: habrá que insertarlo en el hueco reservado

12.



El paso 12 requerirá:

- x2 Ejes de acero de 4mm de diámetro



x3 - M4x10mm



x3 - M4



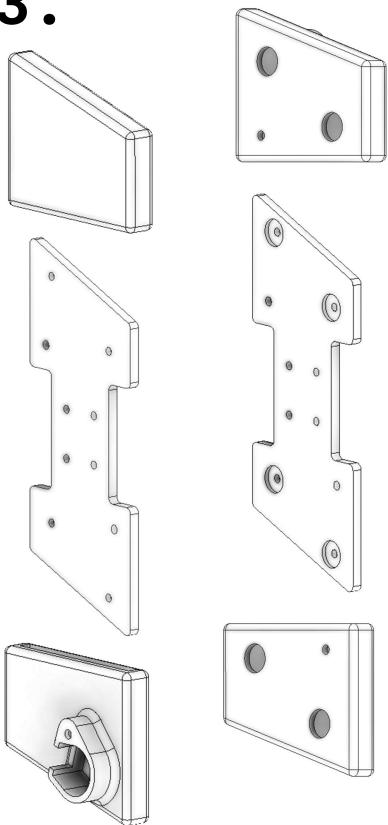
x4 - 4x13 (dos en cada polea)

Ambos montajes abrazan una barra de aluminio. En el caso de la derecha la pieza redirige el cableado; el caso de la izquierda reduce el par soportado por el servo.

El montaje representado en el lado izquierdo se debe ensamblar por duplicado ya que se utiliza para las articulaciones dos y tres.



13.

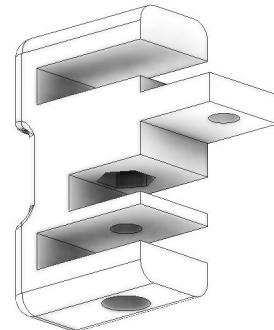


Nota: Una vez encajadas las piezas expuestas en el paso 13, se fijan encastados en los huecos preparados para ello. Serán necesarios:

x8 - 4x13

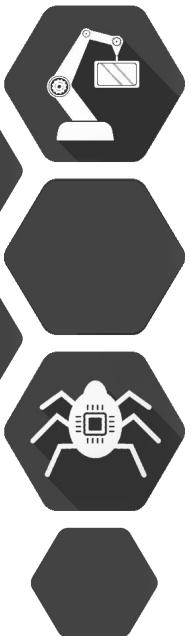
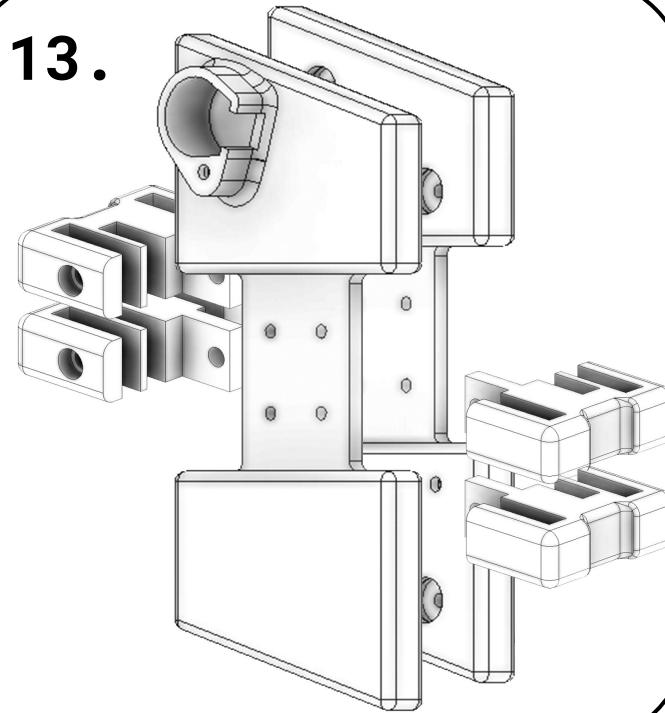


Nota:



Para el siguiente paso será necesario encajar tuercas en cada pieza para fijarlas posteriormente.

13.



Notas: En cada pareja de rodamientos queda encerrado un eje de acero de 4mm de diámetro, que atraviesa las barras de aluminio. Es recomendable añadir arandelas a cada lado de la barra. Habrá que añadir un quinto eje en el par de agujeros que corresponde, este será el punto de enganche del muelle. Una vez encajadas las piezas se solapan las pinzas dos a dos y se fijan con un tornillo a cada lado. Será necesario para este ensamblaje:

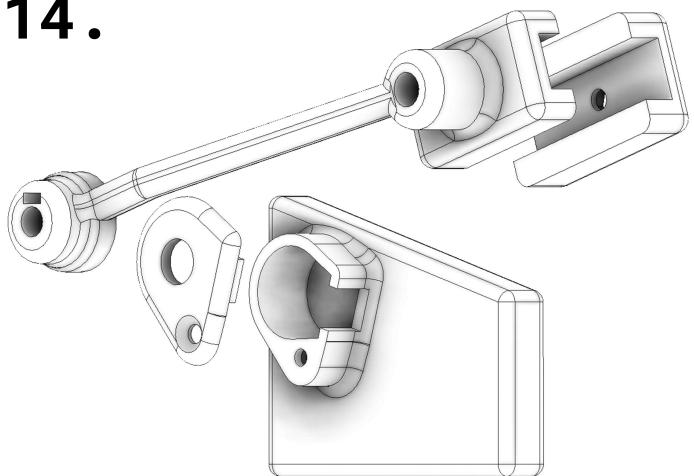


x4 - M4

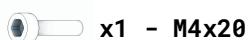
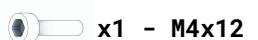


x4 - M4x20

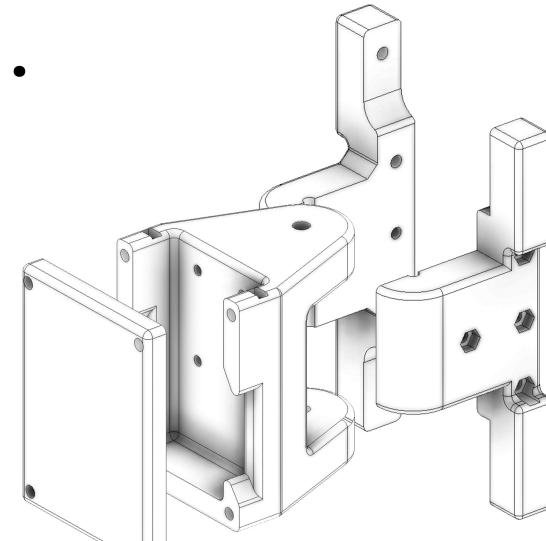
14.



Nota: Se debe introducir el potenciómetro en el hueco correspondiente. El acople del potenciómetro abraza una de las barras de aluminio para transmitir el giro de la articulación al potenciómetro.



15.



El paso 15 requiere para su ensamblaje:



x7 - M7



x7 - M7x20



Apéndice C

Reglas de codificación del Software

Las reglas de codificación aplicadas al software del proyecto se han obtenido, por utilizar una referencia, de las reglas aplicadas por Google en sus proyectos libres. Esta guía está ampliamente documentada en [43] e incluye su propia herramienta para comprobar su correcta aplicación, Cpplint, lo que facilita la revisión del código así como corrección de desviaciones de estilo.

En este anexo se traducen y resumen los aspectos más importantes de dicha guía. En algunos casos se han adaptado las reglas al caso concreto de este proyecto.

Establecer unas reglas de codificación, unificando un estilo en la notación y uso de la sintaxis, es interesante de cara a posibilitar una mayor facilidad de lectura en futuros desarrollos aumentando así la mantenibilidad del código.

Estas reglas aplican al código C++ del proyecto, no a los *scripts* auxiliares.

C.1. Aspectos generales

C.2. Ficheros de cabecera

En general todos los ficheros con extensión .cpp correspondientes a las librerías deberán ir acompañados del fichero de cabecera .h correspondiente.

Quedan exentos de cumplir esta regla los ficheros correspondientes a Test (unitarios, de integración, etc) así como ficheros que contengan únicamente una función main().

C.2.1. Inclusión Múltiple

Para evitar problemas de inclusión múltiple todos los ficheros de cabecera con extensión .h deberán incluir guardas con el siguiente formato y escrito en mayúsculas: <nombre_del_fichero>_<extensión>.

Ejemplo :

```
#ifndef SERVO_RHA_H  
#define SERVO_RHA_H
```

```

...
...
...
#endif
```

C.2.2. Orden de inclusión de ficheros

Para evitar problemas en las dependencias de las distintas librerías se incluirán las mismas dejando para el final las librerías propias del proyecto e incluyendo el resto de la más general a la más particular.

Ejemplo orden al incluir cabeceras:

```
#include <stdint.h>      // lib estandar de c++
#include <Arduino.h>      // lib de Arduino
#include <SoftwareSerial.h>    // lib para controlar el puerto serie. Basado
                             en Arduino

#include "debug.h"        // def y control de las funciones de debug
#include "rha-types.h"     // tipos de datos
#include "joint_rha.h"      // clase a incluir
```

Nota: def. se utiliza de aquí en adelante como abreviatura de *definición*.

Se deben incluir todos los ficheros que definan los símbolos utilizados en el fichero sobre el que se incluyen. Las declaraciones anticipadas de objetos no están permitidas salvo excepciones justificadas.

C.3. Ámbitos

C.3.1. Espacios de nombres

Como norma general las constantes, variables o funciones que no estén contenidas en ningún objeto se incluirán dentro de un espacio de nombres o *namespace* que haga referencia a la utilidad de las mismas.

No está permitido usar directivas del tipo `<using namespace ____;>`.

Los espacios de nombres se escriben con la primera letra de cada palabra, en caso de haber más de una, en mayúscula y sin separación de ningún tipo.

Ejemplo: Constantes referentes al test de comportamiento ante una entrada tipo rampa

```
namespace SlopeTest {
    #define SAMPLE_SLOPE 110
    #define SAMPLE_TEST_SLOPE 20
    #define SLOPE_SPEED 0.1
}
```

Prohibido el uso de:

```
using namespace StepTest;
```

C.3.2. Variables Locales

Las variables se definirán preferiblemente en el ámbito más local en que se vayan a utilizar. Preferiblemente la inicialización de las mismas se hará junto a la declaración.

Se pueden dar excepciones, como pueden ser vectores sobre los que se iterará dentro de un bucle u otros casos similares. En estos casos se de declarará el objeto fuera del propio ámbito para evitar recursivas llamadas a constructor y destructor de los mismos.

Ejemplo:

```
// Siempre que la variable sobre la que se itera no se vaya a utilizar para
// posteriores operaciones:
for(int i = 0, i < 10; i++) {
}

//mejor que el caso siguiente, que adicionalmente incumple la regla preferente
//de inicializar la variable cuando se declara:
int i;
for(i = 0, i < 10; i++) {

}

//quedá permitido declarar vectores u otros objetos similares antes si se va a
//iterar o trabajar sobre los mismos
int vector[5] = {1,2,3,4,5};
for(int i = 0, i < 10; i++) {
    Serial.print(vector[i]);
}
```

C.4. Clases

C.4.1. Constructores y métodos de Inicialización

Para todos los objetos debe haber constructores por defecto sin parámetros de entrada. Aunque se pueden añadir constructores que inicialicen los diferentes parámetros será obligatorio generar métodos que los inicialicen una vez construido el objeto así como constructores por defecto para todos los métodos. Arduino, aún estando basado en el lenguaje C++ no permite un uso completo de memoria dinámica. Los objetos se declaran como miembros haciendo uso del constructor por defecto para ser inicializados posteriormente.

Ejemplo:

```
//NO se permite:
- joint_rha.h -
ServoRHA servo_.*;
- joint_rha.cpp -
servo_ = new ServoRHA(1, 10, 5);

//Se llama al constructor del objeto para luego inicializarlo:
- joint_rha.h -
ServoRHA servo_;
- joint_rha.cpp -
servo.init(... params ...);
```

Para evitar funciones con muchos parámetros que reduzcan la legibilidad del código se permite generar diferentes inicializadores para los distintos parámetros.

En la documentación del objeto deberá quedar bien claro que inicializadores deben invocarse para el correcto funcionamiento del mismo.

C.4.2. Estructuras o Clases

Por norma general las estructuras se utilizarán exclusivamente para objetos pasivos, objetos que contienen información. Todo lo demás se codificará dentro una clase.

En el caso de estructuras se permiten únicamente métodos para el manejo de los datos sin añadir ninguno tipo de comportamiento, están permitidos los constructores, destructores, métodos de reset, validación, etc. El acceso a los miembros de la estructura se hará directamente sobre los propios parámetros y no mediante métodos específicos. Los parámetros serán siempre públicos para ser consistente con este punto.

Para mayores funcionalidades se generará una clase.

C.4.3. Control de Acceso

Como norma general se declararan como privados todos los atributos de las clases exceptuando aquellos objetos que a su vez tengan, internamente, control de acceso definido (otras clases). De cara a generar Test con clases propias se permite la declaración de atributos como `protected`.

C.5. Tipos de datos

Los tipos de datos usados irán acordes con la librería `stdint.h`. Estos son del tipo `int16_t`, `uint32_t`, etc. Este tipo de datos garantiza el control del tamaño del dato declarado.

Se utilizarán los nombres `float` y `double` convencionales para declarar datos en coma flotante.

C.6. Nombres

C.6.1. Reglas generales

Los nombres deberán ser descriptivos. Por norma general no se utilizarán abreviaciones que no estén comúnmente aceptadas.

C.6.2. Nombre de los ficheros

Los nombres de los ficheros de código C++ se nombran en minúsculas separando, en caso de haber varias palabras, con un guión bajo. Los ficheros correspondientes a los test llevarán, precediendo al nombre la palabra "test".

Ejemplos:

`joint_handler.h`

```
joint_rha.cpp
test_servo_rha.cpp
```

C.6.3. Nombre de los directorios

Los ficheros de código irán contenidos en diferentes directorios para cada librería o conjunto de test. Estos directorios llevarán el nombre de la librería que contienen, en el mismo formato que la misma, en este caso sin extensión. Los test se ejecutan en el orden en que se ordenan los directorios. En este caso se añadirá un carácter para ordenar los mismos de manera adecuada.

Están exentos de esta regla los ficheros principales (que contienen la función `main()`, ó `setup()` y `loop()` en caso de ser ficheros con extensión `.ino`).

Ejemplos :

```
/lib/
    joint_handler/
        joint_rha/
/test/
    a_test_servo_rha/
    b_test_joint_rha/
```

C.6.4. Nombres para objetos

Los nombres llevarán mayúscula al comienzo así como al inicio de cada palabra, sin guion bajo como separación.

Ejemplo :

```
class ServoRHA{ ... };
class JointHandler{ ... };
struct SpeedGoal { ... } ;
```

C.6.5. Nombres de variables

Por norma general las variables se nombrarán en minúsculas, separando, cuando fuera necesario, las diferentes palabras mediante un guión bajo.

C.6.6. Nombres de atributos de clases

La norma para nombrar atributos de clases será igual que en el caso general acabando, en este caso, con un guión bajo.

Ejemplo :

```
class Regulator {
    float kp_, ki_, kd_;
    float ierror_[INTEGER_INTERVAL];
    uint8_t index_;
    ...
};
```

C.6.7. Nombres de miembros de estructuras

Las variables miembro de estructuras serán nombradas de igual forma que en el caso general.

Ejemplo:

```
struct SpeedGoal {
    uint8_t servo_id;
    int16_t speed;
    int16_t speed_slope;
    uint8_t direction;
} ;
```

C.6.8. Nombres de funciones

Las funciones comenzarán en minúscula marcando con mayúscula cada nueva palabra que aparezca. Los acrónimos irán en mayúscula. Esta regla afecta a métodos de clases a de igual manera a excepción de constructores y destructores.

Ejemplo:

```
class ServoRHA {
    ...
public:
    ServoRHA() { time_last_error_ = 0; time_last_ = 0; last_error_ = 0;
                  error_ = 0; derror_ = 0; ierror_ = 0; }
    ServoRHA(uint8_t servo_id);
    void init(uint8_t servo_id);
    void addUpadteInfoToPacket(uint8_t *buffer);
    bool addTorqueToPacket(uint8_t *buffer);
    void setTorqueOnOffToPacket(uint8_t *buffer, uint8_t onOff);
} ;
```

C.6.9. Nombres de parámetros funciones

Los parámetros de métodos y funciones se nombran siguiendo el caso general para nombrar variables.

C.6.10. Espacios de nombres

Como se ha visto en la sección C.3 los espacios de nombres se definen de manera equivalente a las clases.

C.6.11. Nombres de enumeraciones

En el caso de enumeraciones se seguirá la misma norma que para las clases y espacios de nombres. En este caso cabe la excepción de poder ser declaradas sin nombre.

C.6.12. Nombres de macros

Todo nombre precedido por una instrucción `#define` se nombrará en mayúsculas, separando las palabras, si las hubiera, mediante el uso del guión bajo. Esto aplica tanto a macros como constantes.

C.7. Comentarios

Es necesario el uso de comentarios para documentar el código y aumentar la legibilidad del mismo. En este caso se seguirá el estilo utilizado por *doxygen*, que será la herramienta utilizada para, posteriormente generar la documentación.

C.7.1. Comentarios de ficheros

Todos los ficheros deberán llevar comentarios en su cabecera. Estos comentarios tendrán el siguiente aspecto:

Ejemplo:

```
/**  
 * @file  
 * @brief Implements ServoRHA class. This object inherits from CytronG15Servo  
 * object to enhance its capabilities  
 *  
 * @Author: Enrique Heredia Aguado <enheragu>  
 * @Date: 2017-Sep-08  
 * @Project: RHA  
 * @Filename: servo_rha.h  
 * @Last modified by: quique  
 * @Last modified time: 30-Sep-2017  
 */
```

C.7.2. Comentarios de funciones

Todas las funciones y métodos deberán llevar un comentario describiendo su funcionamiento así como los parámetros de entrada y salida. Estos comentarios tendrán el siguiente aspecto y se situarán encima de la definición de la función o método:

Ejemplo:

```
/** @brief Saves in buffer the package return level of servo (error information  
for each command sent)  
 * @method ServoRHA::addReturnOptionToPacket  
 * @param { uint8_t* } buffer array in which add the information  
 * @param { uint8_t } option RETURN_PACKET_ALL -> servo returns packet for all  
commands sent; RETURN_PACKET_NONE -> servo never returns state packet;  
RETURN_PACKET_READ_INSTRUCTIONS -> servo answer packet state when a READ  
command is sent (to read position, temperature, etc)  
 * @see addToPacket()  
 */
```

C.7.3. Comentarios y aclaraciones

Cuando sea necesario hacer aclaraciones, a nivel de código se harán utilizando el estilo de comentario con doble barra `//`. Por lo general los nombres de variables y

funciones deberán ser de por si descriptivas por lo que este tipo de comentarios se reservan para partes del código especialmente enrevesadas.

Los comentarios, cuando vayan en línea con el código, se situarán a dos espacios del mismo, dejando un espacio entre el comentario en sí y la doble barra.

C.7.4. TODO y notas

En algunos casos se podrán dejar cosas para hacer en futuro (TODO) o notas aclaratorias (NOTE). En ambos casos se pondrá en mayúsculas y seguido de dos puntos. Quedando comentados mediante doble barra.

Ejemplo :

```
// TODO: complete CW and CCW selection
// NOTE: important the use of mascares to obtain direction os movement
```

C.7.5. Código en desuso

En algunas situaciones hay fragmentos de código que ya no se utilizan o están temporalmente deshabilitados. Estos fragmentos serán comentados mediante barra y asterisco :

Ejemplo :

```
/* ...
... some code ...
... */
```

C.8. Formato

C.8.1. Espacios y tabulaciones

Por norma general se utilizará cuatro espacios como indentación para distintos ámbitos.

Ejemplo :

```
void ServoRHA :: setWheelSpeedToPacket( ... ) {
    ...
    if ( ... ) {
        ...
    }
    ...
}
```

C.8.2. Declaración y definición de funciones

El valor de retorno así como los parámetros de una función deberán ir en la misma línea. En caso de no caber o para mayor claridad se pondrán a la misma altura que los anteriores.

Ejemplo:

```
void ServoRHA::setWheelSpeedToPacket( uint8_t *buffer , uint16_t speed , uint8_t
    direction ) {
    ...
}

void ServoRHA::setWheelSpeedToPacket( uint8_t *buffer , uint16_t speed ,
    uint8_t direction ) {
    ...
}
```

C.8.3. Condicionales

Como norma general no se dejarán espacios entre los paréntesis. Si se dejará un espacio entre la sentencia **if** y el condicional, así como entre este último y la llave que abre el ámbito condicional.

Ejemplo:

```
//Forma correcta:
if (direction == CW) {
    speed = speed | 0x0400;
}

//Ejemplos incorrectos:
if(direction == CW) { // Falta un espacio tras la sentencia if
if (direction == CW){ // Falta un espacio entre el condicional y la llave
if(direction == CW){ // Combina los casos anteriores
```

En caso de que el condicional afecte solo a una sentencia esta se pondrá, como norma general, sin llaves y en la misma línea que el condicional. De igual forma se hará tras sentencias de tipo **else** o combinando **else if**. En caso de utilizar llaves se seguirá la norma que aplica a dicho caso.

Ejemplo:

```
if (speed1 < speed2-speed_margin) return ServoRHAConstants::LESS_THAN;
else if (speed1 > speed2+speed_margin) return ServoRHAConstants::GREATER_THAN;
else return ServoRHAConstants::EQUAL;
```

Cuando si afecta a diferentes líneas y hay sentencias de tipo **else**, estas irán en la misma línea de cierre de llave del condicional (siempre que no afecte a la legibilidad del código ya sea por presencia de comentarios u otras causas similares).

Ejemplo:

```
if (...) {
    ...
} else {
    ...
}
```

C.8.4. Bucles

El formato será equivalente al caso de los condicionales:

Ejemplo:

```
for (...) {
    ...
}
for (...) oneLineStatement;
while (condition) {
    ...
}
```

C.8.5. Valor de retorno de funciones y métodos

No es necesario utilizar paréntesis para rodear la expresión a retornar. Solo se utilizarán en los casos en que se utilizarían si se fuera a asignar dicha expresión a una variable.

C.8.6. Formato para clases

Las directivas `public`, `protected` y `private` irán indentados un espacio respecto a la definición de la clase. Por norma general irán precedidos por una línea en blanco (excepto cuando las preceda la definición de la propia clase).

Ejemplo:

```
class JointHandler {
    private: // un espacio
    ...
    public:
    ...
```

C.8.7. Espacios de nombre

Los espacios de nombres siguen la norma general para indentar diferentes ámbitos.

C.9. Espacios en blanco

Los espacios horizontales dependerán de cada caso. En ningún caso se finalizará una línea con un espacio en blanco.

C.9.1. Caso general

Ejemplo:

```
void JointHandler::setTimer(uint64_t timer) { // Un espacio entre el cierre
    del parentesis y la apertura de llaves
class TimerMicroseconds : public Timer { // Espacio entre los dos puntos en
    casos de herencia o inicializadores dentro de constructores. Se pone un
    espacio a cada lado.
void checkWait() // No se deja espacio entre el nombre y los parentesis.
    Tampoco entre parentesis vacios.
float getError() { return error_; } // Se deja espacio entre llaves e
    implementacion, a ambos lados.
```

C.9.2. Bucles, condicionales y estructuras de control

Ejemplo:

```
if (b) { // Espacio entre la sentencia if y la condicion, asi como esta misma
    con la apertura de llaves
} else { // Espacios al rededor de la sentencia else
}
switch (i) {
    case 1: // No se deja espacio antes de los dos puntos
    ...
    case 2: break; // Si se deja despues de los mismos
for (int i = 0 ; i < 5 ; i++) { // En caso de bucles for, ademas de los
    espacios al rededor de los parentesis se dejara un espacio tras cada punto
    y coma.
```

C.9.3. Operadores

Ejemplo:

```
// En general se deja un espacio al rededor de los distintos tipos de
operadores
x = 0;
v = w * x + y / z;
v = w*x + y/z;
v = w * (x + z);

// No se separan operadores unarios de sus argumentos:
x = -5;
x++;
if (x && !y)
```

C.10. Espacio vertical

Por lo general se dejaran espacios verticales para una mayor claridad del código sin abusar de los mismos. Aunque separar diferentes partes puede ayudar demasiados espacios verticales pueden dificultar la lectura de código.

Apéndice D

Comunicación con los Servos G15

En este anexo se describe como se trabaja con el protocolo de comunicación a bajo nivel para codificar el paso de mensajes entre los servos G15 Cube y el microcontrolador.

Antes de describir el formato de la información cabe destacar que en todo momento la información enviada irá codificada en formato hexadecimal, para los paquetes enviados como recibidos desde el microcontrolador. Todos los paquetes, tanto los enviados a los servos como la respuesta por parte de los mismos tendrán en común la siguiente información:

- Encabezado: Los primeros dos bytes del mensaje estarán compuestos por encabezado que será el que marque el inicio del mensaje. Estos bytes serán: 0xFF 0xFF
- Un fin de mensaje: El último byte del mensaje estará marcado por un valor llamado *CheckSum* que será el encargado de verificar que todo el paquete ha llegado correctamente. El *CheckSum* es el inverso del valor binario de la suma de todos los bytes enviados a excepción del encabezado y el propio *CheckSum*.

En los paquetes que se envíen a los servos la información se codificará de la siguiente manera concreta:

- Bytes 0 y 1: reservados para el encabezado.
- Byte 2: codifica el ID del servo al que se quiere enviar la acción. De forma general se puede utilizar la dirección 0xFE (en hexadecimal) para enviar el mensaje a todos los servos conectados.
- Byte 3: codifica la longitud del mensaje. Contando a partir del encabezado y el ID (excluyendo ambos) el número de bytes que se envían. De esta forma, al recibirse el paquete se podrá identificar el inicio del mismo, a que servo va dirigido (el resto ignorarán el paquete) y cuantos bytes tendrá que leer el aludido. Por supuesto el último byte de la cadena será el ya mencionado *CheckSum* cuyo valor tendrá que coincidir con el esperado al analizar la cadena.
- Byte 4: codifica la instrucción que se desea realizar. Sobre la memoria de los servos se podrán hacer operaciones de lectura y escritura de distinta manera. Se pueden ver las diferentes instrucciones posibles en la tabla D.1. Serán explicadas posteriormente más en detalle.

- Bytes del 5 al N: Parámetros que se quieran enviar al servo.
- Byte N+1: *CheckSum*

En la figura D.1 se puede ver representado, a modo de resumen gráfico, este esquema de información genérico.

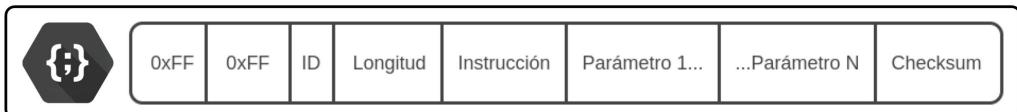


Figura D.1: Paquete de información genérico para comunicar con los Servos G15 Cube

Tabla D.1: Resumen de las instrucciones aceptadas por los Cytron G15 Cube servo

Fuente: *Información obtenida de [25]*

Instrucción	Valor Hex.	Comentarios
iPING	0x01	Solicita un paquete con el estado del servo
iREAD_DATA	0x02	Lee información de la memoria del servo
iWRITE_DATA	0x03	Escribe información en la memoria del servo
iREG_WRITE	0x04	Escribe sobre la memoria y hasta que llega la acción <i>ACTION</i> para ejecutar dichos cambios
iACTION	0x05	Activa la acción codificada con la instrucción <i>REG_WRITE</i>
iRESET	0x06	Resetea la memoria a los valores por defecto
iSYNC_WRITE	0x83	Para escribir simultáneamente información sobre varios servos

La respuesta por parte de los servos tiene también una estructura general que se detalla a continuación byte a byte:

- Bytes 0 y 1 de encabezado. Igual que en el caso anterior.
- Byte 2: codifica el ID del servo que responde.
- Byte 3: codifica la longitud a leer.
- Byte 4: sirve para informar de posibles errores en el servo. Cada bit del byte codifica un tipo de error, estando todos a 0 cuando la comunicación y el servo se encuentran buen estado. Estos errores están detallados en la tabla D.2, junto a la máscara en binario que se aplicará a dicho byte para comprobar cada error.
- Bytes del 5 al N: Parámetros que envía el servo.
- Byte N+1: *CheckSum*.

En la figura D.2 se puede ver representado, a modo de resumen gráfico, este esquema de información genérico que se ha expuesto previamente.

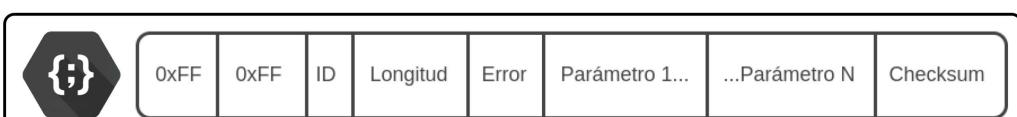


Figura D.2: Paquete de información genérico de retorno de los Servos G15 Cube

Tabla D.2: Codificación del error de los servos G15 Cube en cada bit del byte de error.

Fuente: Información obtenida de [25]

Bit	Error	Máscara a aplicar
0	Error en voltaje de entrada	0X0001
1	Límite de ángulo	0X0002
2	Sobrecalentamiento	0X0004
3	Error en el rango pedido	0X0008
4	Error en el <i>CheckSum</i>	0X0010
5	Sobrecarga	0X0020
6	Instrucción incorrecta	0X0040
7	-	-

Aunque como se ha visto anteriormente y se ha detallado en la tabla D.2 el servo devuelve un solo byte de error, al leer la información recibida el error, tanto en la librería de Cytron como en la estructura desarrollada para este proyecto este byte se amplia a dos bytes para añadir la posibilidad de nuevos errores en la recepción del paquete de datos. Se pueden ver de forma detallada en la tabla D.3, nuevamente junto a la máscara que se aplicará a dicho byte para cada caso. En el byte más bajo queda la información que devuelve el servo y en el más alto la información añadida.

Tabla D.3: Codificación del error de comunicación en cada bit del segundo byte de error.

Fuente: Información obtenida de [25]

Bit	Error	Máscara a aplicar
8	Paquete perdido o tiempo de espera superado	0X0100
9	Encabezado incorrecto	0X0200
10	ID incorrecto	0X0400
11	Error en el <i>CheckSum</i>	0X0800
12	-	-
13	-	-
14	-	-
15	-	-

D.1. Distintos tipos de instrucciones

A continuación se detallan las distintas instrucciones que aceptan los Servos, presentadas en la tabla D.1.

D.1.1. Petición del estado del servo

Se hace una petición del estado o una operación de tipo *PING* cuando se quiere conocer la existencia y estado de un servo con un ID específico. Adicionalmente si se envía utilizando el ID comodín (0xFE, para todos los servos) se podrá recoger el ID del servo conectado (cuando solo haya uno).

Un paquete para una operación *PING* podría tener el siguiente aspecto (*iPING* al servo con ID 1. El mensaje enviado tendrá una longitud de dos bytes a leer. Las diferentes instrucciones se han visto en la tabla D.1):

0xFF	0xFF	0x01	0x02	0x01	0xFB
------	------	------	------	------	------

Como se puede ver este mensaje no lleva parámetros.

El mensaje de retorno podría ser, por ejemplo el siguiente. Respondiendo el servo con ID 1 dos bytes a leer, el error que es 0 (todo correcto) y el *CheckSum*:

0xFF	0xFF	0x01	0x02	0x00	0xFC
------	------	------	------	------	------

D.1.2. Operaciones de lectura

Las operaciones de lectura, con la instrucción *iREAD_DATA* vista en la tabla D.1 están pensadas para leer la memoria interna de los servos. Los parámetros enviados serán la dirección de memoria a partir de la cual se quiere leer y el número de bytes a leer. Se puede ver en la tabla D.5 las posibles direcciones de memoria a las que acceder, el tipo de acceso que tienen (lectura/escritura o ambos) así como los valores típicos (por defecto, máximos y mínimos).

Un ejemplo de este tipo de mensajes puede ser una petición de lectura de la temperatura (0x2B en la tabla D.5). En este caso sobre el servo con ID 1. La temperatura ocupa un solo byte.

0xFF	0xFF	0x01	0x04	0x02	0x2B	0x01	0xCC
------	------	------	------	------	------	------	------

Como en el caso anterior el paquete de retorno devolverá el ID del servo que responde, la longitud, que en este caso será de 3 bytes, y el error, el parámetro leido (un byte con la temperatura) y el *CheckSum*:

0xFF	0xFF	0x01	0x03	0x00	0x20	0xDB
------	------	------	------	------	------	------

D.1.3. Operaciones de escritura

Las operaciones de escritura tienen un funcionamiento análogo al de lectura. La instrucción *iWRITE_DATA* vista en la tabla D.1 envía una cadena de bytes a escribir a partir de una dirección de memoria dada. Nuevamente se pueden ver las direcciones de memoria en la tabla D.5.

Como ejemplo se escribirá, sobre el servo con ID 1 un ángulo objetivo (empieza en la dirección 0x1E). Como se puede ver ocupa dos bytes, empezando por el de más bajo y a continuación el más alto. A la hora de enviar el mensaje hay que tener en cuenta estos aspectos para que los parámetros vayan ordenados de igual manera:

0xFF	0xFF	0x01	0x05	0x03	0x1E	0xAA	0x00	0x2E
------	------	------	------	------	------	------	------	------

El paquete de retorno en este caso devolverá el posible error en la comunicación, sin parámetros.

0xFF	0xFF	0x01	0x02	0x00	0xFC
------	------	------	------	------	------

D.1.4. Operaciones de escritura con activación desacoplada

La idea de este tipo de operación es la de enviar a distintos servos operaciones de escritura pero que queden pendientes de ejecutarse. De esta forma, utilizando la instrucción *iACTION* se podrán activar todos a la vez.

Para la operación de escritura en memoria se seguirá un formato análogo al descrito en el apartado D.1.3. El único cambio es que la instrucción utilizada, en vez de ser *iWRITE_DATA* como se ha descrito en dicho apartado, se utilizará la instrucción *iREG_WRITE* (se puede consultar en la tabla D.1).

Una vez enviada la información a escribir a todos los servos, se procederá a enviar el mensaje de activación. En este caso se enviará a todos los servos conectados (ID genérico de 0xFF):

0xFF	0xFF	0xFF	0x02	0x05	0xFA
------	------	------	------	------	------

Por norma general, en los casos en los que se utiliza el ID genérico (menos en el caso de la instrucción *iPING* en los que hay un servo conectado) no se recogerá mensaje de retorno alguno.

D.1.5. Resetear la memoria de los servos a los valores de fábrica

La instrucción *iRESET* devolverá la memoria al estado por defecto. Se pueden ver los valores por defecto en la tabla D.5.

Para efectuarla se enviará dicha instrucción al servo correspondiente, en este caso al servo cuyo ID es 0:

0xFF	0xFF	0x00	0x02	0x06	0xF7
------	------	------	------	------	------

Nuevamente el mensaje de error contendrá únicamente el posible error en la comunicación.

0xFF	0xFF	0x00	0x02	0x00	0xFD
------	------	------	------	------	------

Se debe tener en cuenta, que aunque el mensaje de retorno responda con el valor inicial, una vez ejecutado el reset de la memoria el ID del servo valdrá 1 y el *baud rate* será de 19,2kb/s

D.1.6. Operaciones de escritura sobre múltiples servos

De igual forma que se puede escribir sobre varios servos para activar la acción al mismo tiempo, se puede encapsular la información de todos los servos en un solo paquete de información. Este caso presenta la limitación de que la dirección de memoria a la que se quiere acceder y la longitud de parámetros a escribir son iguales para todos los servos.

La comunicación será parecida a los casos anteriores. En este caso se utilizará siempre el ID genérico (0xFF). La instrucción a utilizar será la *iSYNC_WRITE* (0x83, de la tabla D.1). La longitud del paquete será:

$$\text{Longitudtotal} = (L + 1) * N + 4 \quad (\text{D.1})$$

Siendo L la longitud del mensaje a cada servo y N el número de servos en la ecuación D.1.

Los parámetros necesarios serán:

- Parámetro 1: dirección de memoria a partir de la cual se quiere escribir.
- Parámetro 2: longitud de los datos a escribir, L en la ecuación D.1 (distinto de la longitud del paquete).
- Parámetro 3: ID del servo al que se quiere escribir.
- Parámetro 4: primer byte de los datos a enviar al servo con el ID marcado en el parámetro 3.
- Parámetro 5: segundo byte de los datos a enviar al servo con el ID marcado en el parámetro 3.
- ...
- Parámetro L+3: ID del segundo servo sobre el que se quiere escribir.
- Parámetro L+4: primer byte a escribir sobre el mismo.
- ...

Se puede ver en la tabla D.4 un ejemplo de como se construye un paquete con este propósito; en este caso concreto se comunicará con cuatro servos para enviarle objetivos de posición y velocidad (orientarse a un cierto ángulo con una velocidad dada):

- G15 con ID 0 a la posición 0x010 con velocidad 0x150
- G15 con ID 1 a la posición 0x220 con velocidad 0x360
- G15 con ID 2 a la posición 0x030 con velocidad 0x170
- G15 con ID 3 a la posición 0x220 con velocidad 0x380

Aun siguiendo las indicaciones del manual de usuario no se ha conseguido efectuar este tipo de comunicación de forma efectiva. Se ha desarrollado una estructura de funciones para aplicarlo (en la librería original no estaba dicha funcionalidad implementada) que están a la espera de completarse.

D.1.7. Aspectos interesantes a tener en cuenta

Los servos aceptan dos modos de funcionamiento: un modo para controlarlo en posición y otro modo de rotación continua. Se darán mas detalles sobre el modo de giro continuo ya que es sobre el que se vasa el funcionamiento del prototipo.

Tabla D.4: Ejemplo paquete con la instrucción *iSYNC_WRITE*

Fuente: Ejemplo obtenido de [25]

Byte	Contenido	Exp	Byte	Contenido	Exp
1	0xFF	Encabezado	16	0x60	Param 2
2	0xFF	Encabezado	17	0x03	Param 2
3	0xFE	ID genérico	18	0x02	ID tercer servo
4	0x18	Longitud total	19	0x30	Param 1
5	0x83	Instrucción	20	0x00	Param 1
6	0x1E	Dirección	21	0x70	Param 2
7	0x04	Longitud para cada servo	22	0x01	Param 2
8	0x00	ID primer servo	23	0x03	ID cuarto servo
9	0x10	Param 1	24	0x20	Param 1
10	0x00	Param 1	25	0x02	Param 1
11	0x50	Param 2	26	0x80	Param 2
12	0x01	Param 2	27	0x03	Param 2
13	0x01	ID segundo servo	28	0x12	CheckSum
14	0x20	Param 1			
15	0x02	Param 1			

Para cambiar de un modo a otro se deberá modificar los cuatro bytes correspondientes a los límites de giro (cuatro bytes a partir de la dirección 0x06, CW Angle Limit (L), se puede ver la información más detallada en la tabla D.5). Es necesario recordar que el valor debe escribirse en hexadecimal respetando el byte inferior y superior tal y como se muestra en la tabla mencionada.

- Para activar el modo de giro continuo se pondrán ambos valores a 0.
- Para salir del modo de giro continuo se pondrá el *CW Angle Limit* a 0 y el *CCW Angle Limit* a 1087.

Es importante tener en cuenta que cuando se controla en modo rueda, aunque el registro sobre el que se escribe hace referencia a la velocidad del servo (dirección 0x020, Moving Speed (L)) e realidad lo que se está enviando es el par que ejercerá el servo, con valores discretizados entre 0 y 1023. En vacío los servos son capaces de alcanzar una velocidad de 65rpm. A un mismo valor de par enviado la velocidad variará en función de la carga que soporte el servo.

Aunque el control se deba efectuar respecto al par, el valor contenido en la dirección 0x24 y 0x25 (Present Speed) contiene el dato de velocidad. Esta información se almacena de la siguiente manera: el 10 bit codifica el sentido de giro mientras que los 9 anteriores la velocidad. Esta codificación es equivalente a la dirección de memoria correspondiente a Present Load (0x28 y 0x29).

Estos datos se pueden obtener de la siguiente forma. Como se puede ver se obtiene la información de ambos bytes recibidos y se ordenan de manera adecuada. En este caso concreto se corresponde a los valores de velocidad:

```

velocidad = byte(L) \\
velocidad |= (byte(H) << 8)
velocidad_direction = ((velocidad & 0x0400) >> 10)
velocidad = velocidad & inverso(0x0400)

```

Además de la velocidad, a través de las posiciones de memoria adecuadas se podrá leer el torque aplicado (Present Load), la posición en la que se encuentra el servo (Present Position), la velocidad (Present Speed) así como el Voltaje, la temperatura o se podrá consultar si el servo se está moviendo o no. Para interpretar algunos de estos valores habrá que tener algunas consideraciones en cuenta:

- Posición: El dato de posición viene almacenado en un rango de 0 a 1087, para pasarlo a grados habrá que aplicar la ecuación D.2

$$Pos(grados) = \frac{(PosReg - 0) * (360 - 0)}{(1087 - 0) + 0} \quad (D.2)$$

- Velocidad: El dato de velocidad almacenado en los registros correspondientes viene en una escala de 0 a 1023. Para pasar a revoluciones por minuto (RPM) se deberá aplicar la ecuación D.3

$$Vel(RPM) = \frac{VelReg * 112,83}{1023} \quad (D.3)$$

- Torque aplicado: Es el torque efectuado por el servo en el momento actual (valor entre 0 y 1023). En el caso de control por par el valor es el mismo que se ha enviado.
- Detectar movimiento: Este registro se pone a uno cuando el servo se está moviendo a un objetivo de posición y a cero una vez llega. En caso de controlar en modo rueda este byte permanece inalterable.

Tabla D.5: Direcciones de memoria de los servos con los diferentes parámetros a ajustar. Incluye valores mínimos y máximos así como valores por defecto para cada parámetro

Fuente: Tabla obtenida de [25]

Area	Address (Hex)	Parameter	Read only /Read Write	Factory default value (Hex)	Minimum value (Hex)	Maximum value (Hex)
EEPROM	0 (0x00)	Model (L)	R	'G' (0x0F)	-	-
	1 (0x01)	Model(H)	R	15 (0x47)	-	-
	2 (0x02)	Firmware Revision	R		-	-
	3 (0x03)	ID	RW	1 (0x01)	0 (0x00)	253 (0xFD)
	4 (0x04)	Baud Rate	RW	103 (0x67)	3 (0x03)	255 (0xFF)
	5 (0x05)	Return Delay	RW	250 (0xFA)	1 (0x01)	255 (0xFF)
	6 (0x06)	CW Angle Limit (L)	RW	0 (0x0000)	0 (0x0000)	1087 (0x043F)
	7 (0x07)	CW Angle Limit (H)	RW			
	8 (0x08)	CCW Angle Limit (L)	RW	1087 (0x043F)	0 (0x0000)	1087 (0x043F)
	9 (0x09)	CCW Angle Limit (H)	RW			
	10 (0x0A)	Reserved	-	-	-	-
	11 (0x0B)	Temperature Limit	RW	70 (0x46)	0 (0x00)	
	12 (0x0C)	Lowest Voltage Limit	RW	65 (0x41)	65 (0x41)	178 (0xB2)
	13 (0x0D)	Highest Voltage Limit	RW	150 (0x96)		
	14 (0x0E)	Max Torque (L)	RW	1023 (0x03FF)	0 (0x0000)	1023 (0x03FF)
	15 (0x0F)	Max Torque (H)	RW			
	16 (0x10)	Return Packet Enable	RW	2 (0x02)	0 (0x00)	2 (0x02)
	17 (0x11)	Alarm LED	RW	36 (0x24)	0 (0x00)	127 (0x7F)
	18 (0x12)	Alarm Shutdown	RW	36 (0x24)	0 (0x00)	127 (0x7F)
	19 (0x13)	Reserved	-	-	-	-
	20 (0x14)	Down Calibration (L)	R			
	21 (0x15)	Down Calibration (H)	R			
	22 (0x16)	Up Calibration (L)	R			
	23 (0x17)	Up Calibration (H)	R			
RAM	24 (0x18)	Torque Enable	RW	0 (0x00)	0 (0x00)	1 (0x01)
	25 (0x19)	LED	RW	0 (0x00)	0 (0x00)	1 (0x01)
	26 (0x1A)	CW Compliance Margin	RW	1 (0x01)	0 (0x00)	254(0xFE)
	27 (0x1B)	CCW Compliance	RW	1 (0x01)	0 (0x00)	254(0xFE)
	28 (0x1C)	CW Compliance Slope	RW	32 (0x0020)	1 (0x01)	254(0xFE)
	29 (0x1D)	CCW Compliance Slope	RW	32 (0x0020)	1 (0x01)	254(0xFE)
	30 (0x1E)	Goal Position (L)	RW	Address 36	0 (0x0000)	1087 (0x043F)
	31 (0x1F)	Goal Position (H)	RW	Address 37		
	32 (0x20)	Moving Speed (L)	RW	0 (0x0000)	0 (0x0000)	1023 (0x03FF)
	33 (0x21)	Moving Speed (H)	RW			
	34 (0x22)	Torque Limit (L)	RW	Address 14	0 (0x0000)	1023 (0x03FF)
	35 (0x23)	Torque Limit (H)	RW	Address 15		
	36 (0x24)	Present Position (L)	R			
	37 (0x25)	Present Position (H)	R			
	38 (0x26)	Present Speed (L)	R			
	39 (0x27)	Present Speed (H)	R			
	40 (0x28)	Present Load (L)	R			
	41 (0x29)	Present Load (H)	R			
	42 (0x2A)	Present Voltage	R			
	43 (0x2B)	Present Temperature	R			
	44 (0x2C)	Registered	R	0 (0x00)	0 (0x00)	1 (0x01)
	45 (0x2D)	Reserved	-	-	-	-
	46 (0x2E)	Moving	R	0 (0x00)	0 (0x00)	1 (0x01)
	47 (0x2F)	Lock	RW	0 (0x00)	1 (0x01)	1 (0x01)
	48 (0x30)	Punch (L)	RW	32 (0x0020)	0 (0x0000)	1023 (0x03FF)
	49 (0x31)	Punch (H)	RW			

Apéndice E

Protocolo de comunicación del brazo robótico

En este anexo se describe el protocolo de comunicación a bajo nivel que se ha diseñado para codificar el paso de mensajes entre el brazo robótico y un controlador externo, en este caso la interfaz gráfica diseñada.

Se trata de un protocolo de comunicación para mensajes de longitud variable multipropósito y con comprobación de errores mediante un *checksum*.

El protocolo se ha diseñado pensando en posibilitar y facilitar su ampliación posterior. Por ahora se incluyen algunas funcionalidades básicas que podrán ser ampliadas.

Tal y como se describe en el anexo [?] la información enviada va codificada en formato hexadecimal, byte a byte. Nuevamente los mensajes contienen unos elementos comunes:

- Encabezado: Los primeros dos bytes del mensaje estarán compuestos por encabezado que será el que marque el inicio del mensaje. Estos bytes serán: 0xFF 0xFF
- Longitud: se codifica, en el propio mensaje, la longitud en bytes que se debe leer.
- Un fin de mensaje: El último byte del mensaje estará marcado por un valor llamado *CheckSum* que será el encargado de verificar que todo el paquete ha llegado correctamente. El *CheckSum* es el inverso del valor binario de la suma de todos los bytes enviados a excepción del encabezado y el propio *CheckSum*.

Los paquetes enviados, en ambos sentidos, comparten la siguiente estructura:

- Bytes 0 y 1: reservados para el encabezado.
- Byte 2: Codifica la longitud del mensaje sin contar el encabezado. Se puede entender como el número de bytes a leer una vez detectado el inicio del mensaje.
- Byte 3: codifica la instrucción que se desea realizar. Se han establecido diferentes tipos de mensaje, interpretándose cada de una forma e identificándose mediante un número codificado en este byte.

- Bytes del 4 al N: Parámetros que se quieran enviar.
- Byte N+1: *CheckSum*

En la figura E.1 se puede ver una representación gráfica de este esquema de mensaje.

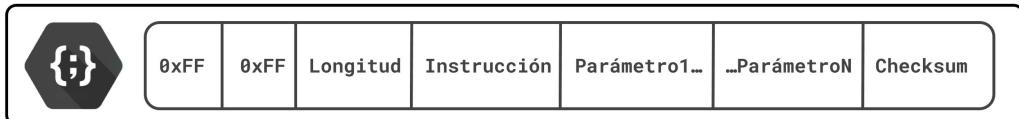


Figura E.1: Paquete de información genérico para comunicar con los Servos G15 Cube

Como se ha visto, el byte 3 acepta diferentes valores en función del propósito del mensaje. Estas funcionalidades se codifican con un id, que en binario será:

- Opción 0: Mensaje de actualización de la información del robot, en el cual el mismo codifica la información general sobre su estado.
- Opción 1: Mensaje de error del robot, donde se codifican y envian errores en las articulaciones o servos.
- Opción 2: Comandos para actuar sobre el robot. En este caso es la interfaz gráfica (o cualquier otro controlador con una conexión serie) quien evía comandos de posiciones articulares a alcanzar al robot.

E.1. Estado del robot

En la tabla E.1 puede verse la cadena de mensaje que se envía con este propósito. Cabe destacar que parte de los datos sobrepasan el valor que puede codificarse en un byte y se codifican en dos quedando el de más bajo nivel el primero seguido del byte superior.

Aunque la información codificada es la que se presenta en la tabla, ésta puede ser ampliada de forma sencilla añadiendo más bytes al mensaje.

E.2. Informes de error

El robot es capaz de notificar errores en los servos. Este tipo de mensaje se construye de la siguiente manera:

- Bytes 0 y 1: con el encabezado: 0xFF en ambos.
- Byte 2: 5 (longitud)
- Byte 3: 0x01 (tipo de mensaje).
- Byte 4: Codifica el estado de los servos. Siguiendo la codificación descrita en la tabla E.2 se puede almacenar la información de hasta ocho servos en un solo byte. Este error codifica posibles errores en la comunicación con los servos, cada servo se identifica según la articulación en la que se encuentra, no según el ID interno a cada uno. Se almacena el error poniendo el bit correspondiente a uno y la ausencia del mismo poniéndolo a cero

Tabla E.1: Codificación del estado del robot.

Fuente: Autor

Byte	Información contenida
0	Encabezado (Fijo: 0xFF)
1	Encabezado (Fijo: 0xFF)
2	Longitud a leer (18)
3	Tipo de mensaje (0)
Información de la primera articulación	
4	Posición articular
5	Velocidad (con dirección). Byte L
6	Velocidad (con dirección). Byte H
7	Par aplicado (con dirección). Byte L
8	Par aplicado (con dirección). Byte H
Información de la segunda articulación	
9	Posición articular
10	Velocidad (con dirección). Byte L
11	Velocidad (con dirección). Byte H
12	Par aplicado (con dirección). Byte L
13	Par aplicado (con dirección). Byte H
Información de la tercera articulación	
14	Posición articular
15	Velocidad (con dirección). Byte L
16	Velocidad (con dirección). Byte H
17	Par aplicado (con dirección). Byte L
18	Par aplicado (con dirección). Byte H
19	Checksum

- Byte 5: Como en el caso anterior y siguiendo las indicaciones de la tabla E.3 se puede almacenar el estado de error de hasta ocho articulaciones en un byte. Este error informa de posibles inconsistencias en el funcionamiento de la articulación. Un caso de ejemplo puede ser que el movimiento del servo no se traduzca en un movimiento articular.
- Byte 6: *CheckSum*

Tabla E.2: Codificación de error en servos.

Fuente: Autor

Bit	Información contenida	Máscara de error
0	error servo (articulación 1)	0x01
1	error servo (articulación 2)	0x02
2	error servo (articulación 3)	0x04

Tabla E.3: Codificación de error en articulaciones.

Fuente: Autor

Bit	Información contenida	Máscara de error
0	error articulación 1	0x01
1	error articulación 2	0x02
2	error articulación 3	0x04

E.3. Comandar el robot

El mensaje que codifica objetivos para el robot es similar a los mensajes enviados por el mismo, manteniendo la misma estructura incluye:

- Bytes 0 y 1: con el encabezado: 0xFF en ambos.
- Byte 2: 6 (longitud del mensaje sin encabezado)
- Byte 3: 0x02 (tipo de mensaje).
- Byte 4: Objetivo de posición para la primera articulación.
- Byte 5: Objetivo de posición para la segunda articulación.
- Byte 6: Objetivo de posición para la tercera articulación.
- Byte 7: *CheckSum*

Bibliografía

- [1] L. da Vinci, *Codex Madrid I: Tratado de estática y mecánica*, vol. 1, pp. 59–60. 1493. [recurso ONLINE, documentos digitalizados en año 2017 por La Biblioteca Nacional de España].
- [2] Robohealth. <http://www.robohealth.es/>.
- [3] E. H. Aguado, *RHA Software Documentation*, 2018.
- [4] ErgoDirect, “Características del modelo de soporte cotoytech mw-m13p.” http://www.ergodirect.com/product_info.php?products_id=16881, (s.d). [Consulta Online del 02-01-2018].
- [5] ErgoDirect, “Características del modelo de soporte cotoytech cm-m13.” http://www.ergodirect.com/product_info.php?products_id=16891, (s.d). [Consulta Online del 02-01-2018].
- [6] ICW, *Titan Elite Ceiling Mount Product Sheet Document (model T2EQ-C8X5)*, 2016. [Consulta Online del 02-01-2018].
- [7] Ergotron, *LX Sit-Stand Monitor Arms*, 2017. [Consulta Online del 02-01-2018].
- [8] Ergotron, “Características del modelo de soporte lx-stand.” <https://www.ergotron.com/en-us/products/product-details/45-360#/>, (s.d). [Consulta Online del 02-01-2018].
- [9] Maior, *Maior Flip 900 technical specification*, -. [Consulta Online del 28-01-2018].
- [10] J. Chung, B. J. Yi, and S. Oh, “A foldable 3-DOF parallel mechanism with application to a flat-panel TV mounting device,” *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 25, no. 5, pp. 1214–1221, 2009.
- [11] Chung L. Chang, “FLAT THIN SCREEN TVAMONITOR AUTOMOTIVE ROOF MOUNT,” 2008.
- [12] K. Robotics, *Jaco User Guide Assistive Robotics*, 2017. [Consulta Online del 20-01-2018].
- [13] K. Robotics, “Características del modelo de soporte jaco3.” <http://www.kinovarobotics.com/assistive-robotics/products/robot-arms/>, (s.d). [Consulta Online del 20-01-2018].
- [14] K. Robotics, *Mico2 technical specification*, 2017. [Consulta Online del 20-01-2018].

- [15] P. C. Márquez P, Alfredo J., “Avances en el desarrollo de un prototipo de robot asistencial para personas con limitaciones de movilidad,” *Ingenio Magno*, vol. 4, pp. 53–56, 2013.
- [16] T. S. Hideyuki Uehara, Hiroki Higa, “A mobile robotic arm for people with severe disabilities,” in *3rd IEEE RAS and EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics*, University of Tokyo, September 2010.
- [17] K. Arai and K. Yajima, “Robot arm utilized having meal support system based on computer input by human eyes only,” ... *Journal of Human Computer Interaction (IJHCI)*, vol. 2, no. 1, pp. 1–9, 2011.
- [18] P. H. Chang and H. S. Park, “Development of a robotic arm for handicapped people: A task-oriented design approach,” *Autonomous Robots*, vol. 15, no. 1, pp. 81–92, 2003.
- [19] A. S. Ali, M. G. Madariaga, D. C. McGeary, W. R. Pruehsner, and J. D. Enderle, “The Assistive Robotic Arm,” in *Bioengineering, Proceedings of the Northeast Conference*, pp. 291–292, 2007.
- [20] S. S. Groothuis, S. Stramigioli, and R. Carloni, “Lending a helping hand: Toward novel assistive robotic arms,” *IEEE Robotics and Automation Magazine*, vol. 20, no. 1, pp. 20–29, 2013.
- [21] R. R. Tariq Rahman, “A simple technique to passively gravity-balance articulated mechanisms.” PDF, published in The College of Information Sciences and Technology - CiteSeerX. [Consulta Online en Noviembre de 2017].
- [22] Microsoft. <https://www.microsoft.com/>.
- [23] H. del Campo, “Polipastos: teoría y aplicaciones.” <http://www.granvertical.com/2015/05/23/98/>, 2015. [Consulta Online en Enero de 2018].
- [24] D. H. Summerville, *Embedded Systems Interfacing for Engineers Using the Freescale HCS08 Microcontroller*, vol. II of *Digital and analog hardware interfacing*. Morgan and Claypool Publishers, 2009. [Consulta Online].
- [25] Cytron Technologies Sdn. Bhd., *G15 Cube Servo User’s Manual ROBOT . HEAD to TOE Product User’s Manual –G15 Cube Servo*, 2012.
- [26] Arduino, “Arduino uno tech specs.” <https://store.arduino.cc/arduino-uno-rev3>, -. [Consulta Online en Enero de 2018].
- [27] RobotShop, *Arduino Mega 2560 Datasheet*, -.
- [28] T. Electronics, *Wirewound Spindle Operated Potentiometer: Type TW Series*, 2005. [Consulta Online de Enero de 2018].
- [29] C. B. Antonio Barrientos, Luis Felipe Peñin, *Fundamentos de robótica*, ch. 4, pp. 97–103. McGraw Hill, 1997.
- [30] J. G. Carmona, “Solid y grasp. buenas prácticas hacia el éxito en el desarrollo de software.,” in *IWT2 DojoUS*, Universidad de Sevilla, Noviembre 2012.

- [31] H. S. David Janzen, “Test-driven development: Concepts, taxonomy, and future direction,” *IEEE Computer Society*, pp. 43–50, 2005.
- [32] Cytron, “Arduino library for cytron g15 shield.” <https://github.com/CytronTechnologies/Cytron-G15Shield>, 2016.
- [33] P. Wiki, “Tkinter.” <https://wiki.python.org/moin/TkInter>.
- [34] B. de España. <https://www.bde.es/bde/es/>.
- [35] ArduinoStore. <https://store.arduino.cc/>.
- [36] Cytron. <http://www.cytron.com.my/>.
- [37] RS. <http://es.rs-online.com/web>.
- [38] AliExpress. <https://es.aliexpress.com>.
- [39] “Emmakites.” <http://www.emmakites.com>.
- [40] SolarBotics. <https://solarbotics.com>.
- [41] LeroyMerlin. <http://www.leroymerlin.es/>.
- [42] BQ. <https://store.bq.com/es/>.
- [43] Google, “Google c++ style guide.” <https://google.github.io/styleguide/cppguide.html>.