

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción

Diseño y construcción de un compañero robótico de asistencia para
niños hospitalizados (Yaren)

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingenieros en Mecatrónica

Presentado por:

Yandri Jair Uchuari Gallardo
Rhandall Kevin Valdez Yepez

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2022

DEDICATORIA

El presente trabajo se lo dedico a Dios y a la Virgen María, quienes me han guiado con sabiduría en cada paso de mi vida.

A mis padres, Luis Uchuarí y Lorena Gallardo, y a mi hermano Luis Andrey, quienes con mucho amor, alegría, esfuerzo y esperanza me han guiado y apoyado a lo largo de mi vida.

A mis abuelitos, a mis tíos, y a mis primos, quienes siempre me han brindado una mano amiga, un buen consejo y una buena sonrisa.

A mis profesores, quienes han puesto su confianza en mi persona, y me han guiado con su experiencia y buenos consejos.

A mis queridos amigos. La universidad me ha dado grandes amistades, y valoro mucho cada palabra de aliento, cada granito con que han aportado a que este sueño se haga realidad.

Yandri Jair Uchuarí Gallardo

DEDICATORIA

A mis padres y familiares.

A mis amigos.

A Jake, Daisy, y Baloo.

A mí.

Rhandall Kevin Valdez Yepez

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis padres celestiales por cada bendición recibida, por el apoyo y esperanza, por cada minuto en este mundo, y por permitirme seguir soñando despierto.

Agradezco a mi familia por cada gota de esperanza que depositaron en mí para lograr ser un profesional.

A mis amigos por sus buenos gestos.

A toda la planta de docentes de la carrera de Ingeniería Mecatrónica, quienes han sido partícipes y colaboradores de este gran sueño.

A mi compañero Rhandal por ser paciente, por su apoyo y amistad.

Este sueño comenzó en conjunto; seguiré soñando despierto con mi mano extendida, caminando y conquistando nuevos mundos. Estaré esperando que los locos soñadores se vuelvan a juntar.

Yandri Jair Uchuary Gallardo

AGRADECIMIENTOS

A mi familia por siempre estar.

A los docentes ejemplares con los que
he coincidido.

A mis compañeros por ser parte de esta
etapa.

Rhandall Kevin Valdez Yepez

DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Yandri Jair Uchuari Gallardo y Rhandal Kevin Valdez Yepez* damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"



Yandri Jair Uchuari Gallardo



Rhandal Kevin Valdez Yepez

EVALUADORES

Marcelo Rodolfo Fajardo Pruna, Ph.D.

PROFESOR DE LA MATERIA

Francisco Xavier Yumbla Arevalo, Ph.D.

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

Los infantes hospitalizados perciben al aislamiento como un agravante relacionado con las complicaciones físicas y afectaciones psicológicas afrontadas durante su proceso de rehabilitación. Aproximadamente cuarenta mil niños son internados anualmente en establecimientos de salud ecuatorianos, en donde existen terapias y actividades lúdicas de tiempo limitado debido a la disponibilidad del personal médico. En consecuencia, se plantea diseñar y construir un compañero robótico para niños hospitalizados que, mediante la interacción con el paciente, logre reducir su estrés y aislamiento social. Se realizó el dimensionamiento de las piezas en base a medidas promedio de infantes para luego modelar sus diseños 3D e imprimirllos con PLA. Se determinó el modelo cinemático del robot para determinar los grados de libertad y el control de posición. Se seleccionaron los motores y componentes electrónicos requeridos para la interacción con el infante y se diseñó la arquitectura de comunicación entre elementos. Además, se programó en ROS el funcionamiento del sistema mecatrónico. Finalmente se obtuvo un compañero robótico con doce grados de libertad en base a juntas revolutas, para las cuales se establecieron controladores PID con valores máximos del 4% para el error en estado estable y de tres segundos para el tiempo de estabilización. Adicionalmente, se realizó un análisis de manufactura y de elementos finitos. En conclusión, se ha desarrollado un sistema mecatrónico interactivo que se relaciona con el infante a través de una serie de movimientos y funcionalidades. Con ello, se provee una alternativa al sistema sanitario en el proceso de rehabilitación de los infantes internados.

Palabras Clave: Robot social, ROS, Niños hospitalizados, Control de posición.

ABSTRACT

Hospitalized infants perceive isolation as an aggravating factor related to the physical complications and psychological affectations faced during their rehabilitation process. Approximately forty thousand children are hospitalized annually in Ecuadorian health facilities, where therapies and recreational activities are limited in time due to the availability of medical personnel. Therefore, the design and construction of a robotic companion for hospitalized children is proposed. Through interaction with the patient, it reduces his stress and social isolation. The dimensioning of the parts was carried out based on the average measurements of infants. Then, 3D designs were modelled and printed with PLA. The kinematic model of the robot was obtained to determine its degrees of freedom and control the position of each joint. The motors and electronic components required for the interaction with the infant were selected and the communication architecture between elements was designed. In addition, the operation of the mechatronic system was programmed in ROS. Finally, a robotic companion with twelve degrees of freedom was designed based on revolute joints, for which PID controllers were tuned with maximum values of 4% for the steady state error and three seconds for the stabilization time. Additionally, a manufacturing analysis and a finite element analysis were performed. In conclusion, the developed interactive mechatronic system connects with the infant through a series of movements and functionalities. Consequently, it provides an alternative to the healthcare system for the rehabilitation process of hospitalized infants.

Keywords: Social robot, ROS, Hospitalized children, Position control.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	I
ABSTRACT	II
ÍNDICE GENERAL	III
SIMBOLOGÍA.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
ÍNDICE DE TABLAS.....	X
ÍNDICE DE PLANOS.....	XII
CAPÍTULO 1	
1. Introducción	1
1.1 Descripción del problema.....	2
1.2 Justificación del problema	3
1.3 Objetivos	4
1.3.1 Objetivo General	4
1.3.2 Objetivos Específicos.....	4
1.4 Marco teórico.....	5
1.4.1 Aislamiento social de menores en hospitales	5
1.4.2 Impresión 3D.....	6
1.4.3 Normativas para dispositivos médicos de uso humano	7
1.4.4 Estado del arte.....	8
1.4.5 Vigilancia tecnológica	10
CAPÍTULO 2	
2. Metodología	11
2.1 Selección de alternativa de solución	11
2.2 Requerimientos y limitaciones de diseño	14
2.2.1 Consideraciones en base a normativas	16
2.2.2 Consideraciones éticas y legales.....	17

2.3	Metodología de diseño	18
2.4	Diseño conceptual.....	19
2.5	Parámetros del diseño mecánico	20
2.5.1	Diseño de movilidad del robot.....	20
2.5.2	Antropometría para dimensionamiento de piezas.....	22
2.5.3	Estimación de torque y velocidad angular	23
2.5.4	Selección de motores	25
2.5.5	Modelado de partes	29
2.5.6	Diseño del contrapeso	29
2.6	Parámetros del diseño electrónico	31
2.6.1	Selección de elementos para interacción con el usuario	31
2.6.2	Selección de microcomputadora y <i>Driver</i> para motores	34
2.6.3	Estimación de potencia eléctrica requerida	36
2.6.4	Selección de fuente de energía	37
2.7	Parámetros del diseño de control.....	38
2.7.1	Análisis cinemático del robot	38
2.7.2	Arquitectura de comunicación.....	42
2.7.3	Diseño de controlador PID para control de posición de los motores.....	43
2.7.4	Programación en ROS y diseño de funcionamiento	44

CAPÍTULO 3

3.	Resultados y análisis	46
3.1	Diseño mecánico del robot.....	46
3.1.1	Análisis de elementos finitos de partes críticas	50
3.1.2	Movilidad del robot.....	51
3.1.3	Espacio de trabajo del compañero robótico	52
3.2	Programación en ROS	53
3.3	Esquema eléctrico del compañero robótico.....	54

3.4	Controladores PID de posición para los motores	55
3.5	Manufactura de piezas	58
3.6	Análisis de costos.....	61

CAPÍTULO 4

4.	Conclusiones y recomendaciones	64
4.1	Conclusiones	64
4.2	Recomendaciones.....	66

BIBLIOGRAFÍA

APÉNDICES

ABREVIATURAS

TEPT	Trastorno por estrés postraumático
CNN	Convolutional Neural Network
ROS	Robot Operating System
ARCSA	Agencia Nacional de Regulación, Control y Vigilancia Sanitaria
ISO	International Organization for Standardization
IEC	International Electrotechnical Commission
CE	Comisión Europea
PL	Performance Level
MSP	Ministerio de Salud Pública
EEPROM	Electrically erasable programmable read-only memory
PLA	Polylactide
LCD	Liquid-Crystal Display
IPS	In-plane Switching
USB	Universal Serial Bus
HDMI	High-Definition Multimedia Interface
GDL	Grados de libertad
PID	Proporcional, integral, y derivativo
BLDC	Brushless Direct Current Motor
MEMS	Microelectromechanical system
3D	Tridimensional
URDF	Unified Robot Description Format

SIMBOLOGÍA

rpm	Revoluciones por minuto
kg	Kilogramo
cm	Centímetro
mm	Milímetro
m	Metro
g	Gramo
V	Voltio
N·m	Newton-metro
min	Minuto
°C	Grado Celsius
°	Grado
GHz	Gigahercio
A	Amperio
W	Vatio
Ah	Amperio hora
Wh	Vatio hora
rad/s ²	Radianes por segundo al cuadrado
kWh	Kilovatio hora

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Prótesis manufacturada por impresión 3D	6
Figura 1.2 Robot social móvil con fines pediátricos.....	9
Figura 1.3 Robot Sciurus-17.....	9
Figura 1.4 Robot Willow.....	10
Figura 2.1 Metodología de diseño	18
Figura 2.2 Diseño conceptual del compañero robótico.....	19
Figura 2.3 Articulaciones incluidas en el diseño de movilidad	21
Figura 2.4 Configuración anatómica y arquitectura cinemática del robot Yaren - proporciones de longitud antropométrica del cuerpo humano	22
Figura 2.5 Descripción gráfica de articulaciones críticas.....	23
Figura 2.6 Motor 2XC430-W250-T junto con su curva torque-velocidad	26
Figura 2.7 Motor XC430-W240-T junto con su curva torque-velocidad	26
Figura 2.8 Motor MX106-R junto con su curva torque-velocidad.....	27
Figura 2.9 Modelado del robot en la posición más crítica con los centros de masa de cada pieza.....	30
Figura 2.10 Cámara IMX219-160	32
Figura 2.11 Pantalla IHANFO LCD de 5 pulgadas	33
Figura 2.12 Tarjeta de audio Waveshare para Jetson Nano	34
Figura 2.13 NVIDIA Jetson Nano	34
Figura 2.14 U2D2 situada en la tarjeta de fuente de poder	35
Figura 2.15 Estructura cinemática del robot	38
Figura 2.16 Estructura cinemática del brazo derecho	40
Figura 2.17 Estructura cinemática de la cabeza.....	41
Figura 2.18 Estructura cinemática de la cadera	41
Figura 2.19 Arquitectura de comunicación	42
Figura 2.20 Modelado del sistema en lazo cerrado con controlador PID de posición para el motor.....	43
Figura 2.21 Metodología de diseño de controladores PID para los motores	44
Figura 2.22 Esquema de funcionamiento del sistema	45
Figura 3.1 Sujeción de pieza móvil con motor	47
Figura 3.2 Sujeción entre piezas	47

Figura 3.3 Sujeción de motor fijo respecto a pieza	47
Figura 3.4 Diseño 3D renderizado del robot indicando cada una de sus piezas	48
Figura 3.5 Ubicación de las articulaciones en el diseño final	48
Figura 3.6 Prototipo del compañero robótico para niños hospitalizados	49
Figura 3.7 Secuencia de movilidad del robot.....	49
Figura 3.8 Simulación de funcionamiento del compañero robótico	51
Figura 3.9 Vista superior del espacio de trabajo del robot.....	52
Figura 3.10 Vista frontal del espacio de trabajo del robot.....	52
Figura 3.11 Vista lateral del espacio de trabajo del robot.....	52
Figura 3.12 Diagrama de flujo de la programación del robot	53
Figura 3.13 Diagrama de nodos activos y tópicos durante el funcionamiento del robot	54
Figura 3.14 Conexiones de componentes considerando su ubicación en el modelo del robot	54
Figura 3.15 Respuesta al escalón del motor 2XC430-W250 en la articulación 7 empleando el controlador PID diseñado.....	56
Figura 3.16 Respuesta al escalón del motor XC430-W240 en la articulación 5 empleando el controlador PID diseñado	56
Figura 3.17 Respuesta al escalón del motor MX-106R en la articulación 2 empleando el controlador PID diseñado	57

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Fuentes de estrés durante la hospitalización infantil	5
Tabla 2.1 Relevancia de los criterios de selección	13
Tabla 2.2 Matriz de decisión para selección de alternativa	13
Tabla 2.3 Requerimientos y limitaciones de diseño.....	15
Tabla 2.4 Consideraciones por cada normativa analizada	16
Tabla 2.5 Análisis de movilidad con grados de libertad deseados	20
Tabla 2.6 Información de las articulaciones y sus ejes de rotación	21
Tabla 2.7 Proporciones de longitud antropométrica del cuerpo humano.....	22
Tabla 2.8 Principales características por articulación crítica	24
Tabla 2.9 Parámetros mecánicos asociados al movimiento de las articulaciones críticas	25
Tabla 2.10 Principales características de actuadores seleccionados.....	27
Tabla 2.11 Selección de motores por articulación	28
Tabla 2.12 Datos relevantes en el cálculo del contrapeso	31
Tabla 2.13 Características de la cámara IMX219-160.....	32
Tabla 2.14 Características de la pantalla seleccionada.....	33
Tabla 2.15 Características de la Jetson Nano	35
Tabla 2.16 Consumo total de potencia	36
Tabla 2.17 Análisis de consumo de baterías de 12 V.....	37
Tabla 2.18 Parámetros de Denavit-Hartenberg del brazo	40
Tabla 2.19 Parámetros de Denavit-Hartenberg de la cabeza.....	41
Tabla 2.20 Parámetros de Denavit-Hartenberg de la cadera	42
Tabla 2.21 Motores incluidos en las cadenas de conexión a la U2D2.....	43
Tabla 2.22 Efectos de incrementar un parámetro de manera independiente	44
Tabla 2.23 Descripción de uso de diversas herramientas en la programación y simulación del robot.....	45
Tabla 3.1 Valores críticos del análisis de elementos finitos.....	50
Tabla 3.2 Rango de movimiento de cada articulación	51
Tabla 3.3 Constantes de controladores	55
Tabla 3.4 Configuraciones de Impresoras 3D	58
Tabla 3.5 Parámetros de impresión para piezas de la cadera.....	59

Tabla 3.6 Parámetros de impresión para piezas del torso central.....	59
Tabla 3.7 Parámetros de impresión para piezas de la cabeza	60
Tabla 3.8 Parámetros de impresión para piezas de los brazos	60
Tabla 3.9 Cotización de rubros.....	62
Tabla 3.10 Comparativa con diseños de propósito similar	63

ÍNDICE DE PLANOS

MX-106R	Plano mecánico del motor MX-106R
2XC430	Plano mecánico del motor 2XC430
XC430	Plano mecánico del motor XC430
YAR-000	Ensamble de conjunto general del compañero robótico
YAR-100	Ensamble de conjunto del torso superior
YAR-200	Ensamble de conjunto de la cabeza
YAR-300	Ensamble de conjunto del brazo
YAR-400	Ensamble de conjunto de la cadera
YAR-101	Plano mecánico del torso superior
YAR-102	Plano mecánico de la tapa anterior del torso
YAR-103	Plano mecánico de la tapa posterior del torso
YAR-104	Plano mecánico de la hombrera
YAR-105	Plano mecánico de pieza de sujeción de Jetson Nano
YAR-201	Plano mecánico del cuello
YAR-202	Plano mecánico de la parte anterior de la cabeza
YAR-203	Plano mecánico de la parte posterior de la cabeza
YAR-301	Plano mecánico del hombro
YAR-302	Plano mecánico del antebrazo
YAR-303	Plano mecánico del brazo
YAR-401	Plano mecánico de la tapa de la cadera
YAR-402	Plano mecánico de la cadera inferior
YAR-403	Plano mecánico de la cadera superior
YAR-404	Plano mecánico del torso inferior
YAR-405	Plano mecánico de la pieza de sujeción del motor MX106 en el torso
YAR-500	Plano eléctrico

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

Un infante hospitalizado percibe su nuevo lugar de descanso como un lugar hostil y extraño ya que se encuentra rodeado por instrumentos y dispositivos poco convencionales. Además, sus actividades son restringidas por personas desconocidas y se ve obligado a seguir una serie de instrucciones. Es por ello que la ausencia de mecanismos de integración a este nuevo entorno conlleva a una serie de conflictos para el infante, que a su vez tornan a la experiencia en una poco grata.

En el ambiente hospitalario el paciente percibe numerosas diferencias en su entorno y estilo de vida respecto a la convivencia en su hogar. En consecuencia, se produce una ruptura social reflejada en la psiquis del infante, lo cual aumenta las posibilidades de alteraciones en su comportamiento cognitivo [1]. A partir de ello, con el reciente desarrollo de nuevas metodologías asociadas al cuidado de las necesidades comunicativas de los pacientes se destaca la terapia asistida por robots sociales, a través de la cual se interrumpe la soledad percibida debido a la reclusión por algún tratamiento y se interrelaciona la robótica con los ámbitos médico y educativo.

Por lo anterior, en el presente proyecto se busca diseñar y construir un compañero robótico, cumpliendo con estándares y normativas correspondientes al entorno de trabajo hospitalario, cuyo principal objetivo sea disminuir el aislamiento percibido por el infante. El robot se plantea como un intermediario que logre animar al niño a interactuar con su entorno y evitar que la comunicación con sus amigos y familiares se degrade.

1.1 Descripción del problema

Pacientes menores de edad que sufren de lesiones o enfermedades crónicas deben lidiar con dolores y complicaciones físicas, además de situaciones psicológicamente extenuantes asociadas a los procedimientos médicos y al aislamiento social en los procesos de rehabilitación. Aquellas situaciones pueden repercutir en el desarrollo de cuadros de ansiedad y depresión relacionados con el miedo e incertidumbre respecto al estado de salud. En consecuencia, aproximadamente 1 de cada 5 niños con lesiones presentan TEPT, mientras que 1 de cada 8 menores con enfermedades crónicas desarrolla aquellas condiciones [2].

Dentro de la red hospitalaria en Ecuador se emplean diversos tipos de terapias que, además de ser parte del proceso de rehabilitación del paciente, contribuyen a disminuir las tensiones emocionales del menor debido a su reclusión [3] - [7]. Sin embargo, ninguna de aquellas alternativas proporciona un acompañamiento permanente ya que dependen de la disponibilidad del personal de enfermería, quienes se rigen según horarios específicos. Por consiguiente, el menor puede no contar con alguna actividad para realizar en ciertos intervalos de tiempo en el transcurso del día, los cuales conllevan a la presencia de sensaciones de soledad y aislamiento que pueden ser perjudiciales para su bienestar [8].

En función de la carencia de tecnología en hospitales destinada al ámbito social y la necesidad de maximizar el tiempo de acompañamiento, el uso de un dispositivo interactivo se debe limitar a un solo paciente -durante su estancia-, quien requiere de interacciones físicas y verbales. Por ello, este proyecto se enfoca en el diseño abierto de un sistema mecatrónico que cuente con funcionalidades que permitan el acompañamiento y la interacción constante con el menor considerando el cumplimiento de normas de fabricación de dispositivos médicos.

1.2 Justificación del problema

El aislamiento del paciente menor de edad es un aspecto crítico en su rehabilitación puesto que el temor a ser abandonado provoca reacciones emocionales frecuentes e influye en problemas de conducta y dificultades de aprendizaje a largo plazo [8]. Por ello, el acompañamiento constante, por parte de los padres del paciente o los profesionales de enfermería, y la presencia de juegos y actividades interactivas facilita la adaptación al nuevo entorno en la hospitalización [9].

No obstante, en la red hospitalaria de Ecuador se ha limitado a cubrir las necesidades sociales del menor hospitalizado aplicando metodologías tradicionales -centradas en la interacción esporádica con personal médico- sin considerar alternativas que incorporen nuevas tecnologías y permitan un acompañamiento constante que logre, hasta cierto punto, suplir la presencia de personas en su entorno cuando estas no pueden estar presentes.

En consecuencia, es preciso cuestionarse de qué manera y bajo cuáles características un sistema mecatrónico puede contribuir en el proceso de rehabilitación del paciente. En función de ello, en el presente proyecto se plantea proveer al infante de actividades interactivas que le permitan estar activo física y mentalmente, en busca de atenuar las complicaciones que experimenta debido al aislamiento social y complicaciones asociadas a su ingreso hospitalario. Adicionalmente, se propone establecer comunicación entre el dispositivo y el usuario a partir de la cual existirá interacción y recopilación de información que será de utilidad para el seguimiento del personal médico al paciente.

De esta manera, con el proyecto se beneficia al paciente emocional, social y psicológicamente brindándole un acompañamiento continuo que implique una interacción diaria de una hora en promedio. Además, se propone incrementar la calidad del servicio médico brindado por el hospital, determinada por el padre o tutor del menor, con base en un nivel de aceptación del diseño propuesto superior al 80%.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Diseñar un sistema mecatrónico para acompañamiento de niños hospitalizados que contribuya a la reducción del estrés y aislamiento social en sus procesos de recuperación a partir de actividades interactivas.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Diseñar una estructura mecánica en base a mecanismos con movimientos naturales de sus partes que permita una interacción ergonómica con el paciente.
- Desarrollar un sistema mecatrónico acorde con las normativas para fabricación de dispositivos médicos mediante un proceso de diseño iterativo de tal manera que el diseño final sea seguro y acorde al entorno del usuario.
- Implementar funcionalidades interactivas que permitan una inmersión del diseño en el entorno del paciente mediante acciones y comunicación con el diseño.
- Desarrollar un sistema de control que, a partir de sensores y actuadores, accione componentes del sistema de acuerdo con las condiciones del entorno o comandos del usuario.

1.4 Marco teórico

En esta sección se describen los fundamentos técnicos y teóricos requeridos para la comprensión de la problemática y posterior elaboración de la solución, además de explorar proyectos relacionados que permitan dar un enfoque previo y orientar el proceso de diseño.

1.4.1 Aislamiento social de menores en hospitales

La reacción de los infantes hospitalizados depende, en gran medida, de su comprensión de los acontecimientos que ocurren a su alrededor. Violant [10] afirma que en cualquier situación de enfermedad se deben considerar los componentes cognitivos de comprensión y percepción, además de los socioafectivos, puesto que permiten mejorar las capacidades de adaptación y resiliencia.

Con base en lo expuesto por Ortigosa y Méndez [11], se determina una serie de fuentes de estrés en la hospitalización infantil, que se resumen en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1 Fuentes de estrés durante la hospitalización infantil [12]

Enfermedades	- Características de la enfermedad: naturaleza, duración, gravedad. - Aspectos de la enfermedad: síntomas, malestar, dolor. - Secuelas: desfiguración, alteraciones físicas, restricciones, incapacidad, riesgo de muerte.
Procedimientos médicos	- Atemorizantes: inyecciones, extracciones de sangre, cirugía. - Dolorosos: aspirado de médula ósea, punciones lumbares, hidroterapia, cateterismo cardíaco.
Contexto sanitario	- Estructura: diseño arquitectónico, mobiliario extraño, decoración fría e impersonal, vestimenta de los profesionales, medicaciones. - Organización: Interrupción de la actividad diaria, pérdida de autonomía e intimidad, tiempos de espera.
Relaciones personales	- Padres: separación de los padres, ansiedad paterna. - Externos: relación con desconocidos, gente con deformidades. - Profesionales de la salud: falta de contacto, relación distante y fría.

1.4.2 Impresión 3D

La manufactura aditiva presenta ventajas respecto a otras opciones en términos de costo, variedad de geometrías posibles, y accesibilidad. Entre los materiales más utilizados para impresiones 3D se encuentran los polímeros, los cuales se dividen en dos categorías principales:

- Materiales termoplásticos: se funden debido a la aplicación de calor pero mantienen su composición interna, por lo que pueden ser reutilizados.
- Materiales termoestables: tienden a solidificarse al aplicarles calor, generando modificaciones en su composición interna y limitándolos a ser de uso único.

Según Kurman [13], la fabricación de piezas en impresión 3D se define en cinco principios claves, los cuales se detallan a continuación:

- El costo de fabricación no aumenta según la dificultad del proceso de impresión de la pieza.
- Se admite variedad en el diseño de la pieza a ser impresa, ya que solo se requiere un modelo en digital.
- No es necesario contar con un ensamblaje ya que se pueden obtener diversas piezas en una sesión de impresión, lo cual permite ahorrar tiempo y dinero.
- No se restringe el diseño por limitaciones de fabricación.
- Se garantizan diseños compactos y portátiles, brindando mayor espacio de trabajo y portabilidad.



Figura 1.1 Prótesis manufacturada por impresión 3D [14]

1.4.3 Normativas para dispositivos médicos de uso humano

Con el fin de regular la producción, fabricación, y diseño de dispositivos médicos se disponen de normativas. A nivel nacional se cuenta con la resolución ARCSA-DE-026-2016-YMIH, emitida por el Ministerio de Salud en conjunto con ARCSA, en donde se describen los lineamientos asociados al control y registro sanitario de dispositivos médicos de uso humano [15]. En su artículo 3 sugiere que todo sistema implementado para el tratamiento o alivio de una enfermedad o lesión se categoriza como un dispositivo médico.

Existe obligatoriedad en la obtención del registro sanitario emitido por ARCSA para la fabricación y comercialización del dispositivo, el cual se categoriza bajo cuatro niveles de riesgo y según su tipo -activo, invasivo, no invasivo, in vitro-. Para la obtención de aquel aval, se destacan los siguientes requerimientos:

- Presentar estudios clínicos que evidencien la eficacia del producto.
- Incluir información que describa el proceso de fabricación del dispositivo.
- Incluir un manual de uso con las instrucciones requeridas para que el usuario final haga buen uso del dispositivo. El contenido requerido se describe en el artículo 26 de la resolución ARCSA-DE-026-2016-YMIH [15].
- Cumplir con las buenas prácticas de manufactura.
- Certificado de cumplimiento de la Norma ISO 13485, asociada a la reducción de riesgos legales y de seguridad mediante la gestión de la calidad y la validación de procesos [16], u otra normativa de mayor rigor.
- Certificado de cumplimiento de la Norma IEC 60601, referente a la seguridad del dispositivo y en donde se especifican grados y tipos de protección contra descargas eléctricas [17].

1.4.4 Estado del arte

Los robots sociales conforman una amplia categoría de sistemas mecatrónicos con funcionalidades interactivas que operan en el marco de la atención hospitalaria y presentan objetivos similares a los del presente trabajo. De manera general, los propósitos a partir de los que se plantea su uso son: telepresencia, acompañamiento, entretenimiento, entre otros [18].

Logan [19] describe un robot social para niños teleoperado por personal médico, el cual tiene una forma de oso de peluche y realiza movimientos corporales y expresiones. Utiliza un teléfono inteligente como principal unidad computacional. Además, el operador puede supervisar los alrededores y comunicarse con el menor mediante voz -distorsionada para ajustarse a las características físicas del diseño-. Incluso mediante un experimento se obtuvieron mejores métricas de felicidad y tristeza en los pacientes que hicieron uso del robot respecto a quienes interactuaron con un avatar en una aplicación y a niños a los que se les entregó un oso de peluche común.

Los robots sociales también pueden emplearse para el tratamiento de diversas condiciones médicas específicas. En cuanto a la disgrafía, Gouraguine [20] propone un robot humanoide de asistencia para menores con aquella condición durante su proceso de aprendizaje de escritura. Mediante redes neuronales CNN se detecta, con precisión y especificidad del 75%, si un menor presenta disgrafía o no en base al análisis de escritos de su autoría. En base al resultado, modera sesiones de aprendizaje de caracteres del alfabeto, asiste en tareas, y recomienda procedimientos de rehabilitación.

Por otro lado, la inteligencia artificial y modelos fabricados mediante manufactura aditiva se implementaron para el desarrollo de un robot de asistencia a menores con capacidades diferentes -autismo, síndrome de Down, entre otros- [21]. Se basa en el diseño Inmmov y presenta funcionalidades como: reconocimiento del habla y gestos con las manos e imitación de gestos. El diseño busca dialogar con el paciente y motivarle a realizar actividades durante sesiones de terapia.

La alternativa de un robot social móvil con fines pediátricos es propuesta por Ali [22], contando con diez grados de libertad para el movimiento relativo entre piezas de su estructura y tres grados adicionales asociados al movimiento de su base. Su interacción con el menor ocurre a partir de diálogos, dando respuestas y gestos según un diagrama de conversación diseñado.



Figura 1.2 Robot social móvil con fines pediátricos [22]

Paralelamente al diseño de robots sociales humanoides, también se desarrollan propuestas tales como la descrita por Kimura [23], donde se utilizan mascotas robóticas en hospitales pediátricos con el fin de acompañar a los pacientes e interactuar con ellos mediante una serie de comandos de voz, emisión de sonidos, expresión de emociones, entre otros.

Finalmente, en relación con robots humanoides de propósito general, el modelo de diseño abierto Sciurus-17 presenta diecisiete grados de libertad con una base estática y se ha desarrollado en ROS [24].

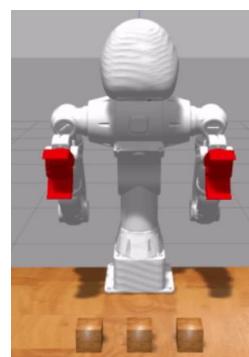


Figura 1.3 Robot Sciurus-17 [24]

1.4.5 Vigilancia tecnológica

Actualmente en la red hospitalaria de Ecuador los sistemas mecatrónicos interactivos no son de amplio uso a pesar de las diversas posibles aplicaciones. Por ejemplo, se cuenta con tres robots de esterilización de instrumentación médica y áreas en un hospital en Quito [25].

Por otro lado, existen proyectos de robots sociales a partir de la iniciativa de empresa privada. Uno de ellos es Willow, un robot terapéutico programable para niños con dificultades sociales para la comunicación que cuenta con un diseño flexible, pues su interfaz consta de un teléfono inteligente y sus funcionalidades son accedidas desde una aplicación [26].



Figura 1.4 Robot Willow [26]

A pesar de la existencia de diseños relacionados con el sector salud, ninguno abarca, parcialmente cuando menos, la problemática expuesta en el presente proyecto. No obstante, sus funcionalidades interactivas proveen de alternativas y un punto de partida para mejora continua en el desarrollo del presente proyecto.

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

En el presente capítulo se describe el procedimiento utilizado para el desarrollo del prototipo que permita la solución de la problemática planteada inicialmente y, por consecuencia, el cumplimiento de los objetivos propuestos.

Se inicia con la explicación de las etapas iniciales del proceso de diseño al explorar alternativas de solución junto con requerimientos y limitaciones. Luego, se realiza un análisis de ciertas características físicas del diseño mecánico para posteriormente continuar con la selección de elementos mecánicos y eléctricos, además del planteamiento del control y la arquitectura de comunicación entre elementos del sistema mecatrónico.

2.1 Selección de alternativa de solución

Con base en la problemática descrita en el capítulo anterior, se definieron tres alternativas de solución que se describen a continuación:

Alternativa 1

Diseño de robot humanoide de base fija con partes móviles que permitan interacción física con el usuario y sensores que obtengan información del entorno del paciente para establecer comunicación.

Alternativa 2

Diseño de robot con base móvil que presenta una pantalla interactiva con juegos, acceso a limitadas aplicaciones, e interacción por comandos de voz.

Alternativa 3

Diseño de juguete mecatrónico de estructura inmóvil con sensores que permiten al personal médico monitorear al paciente y una interfaz de comunicación verbal avanzada para la interacción con el paciente.

Con el fin de determinar cuál de las alternativas propuestas es la idónea se establecieron una serie de criterios de selección relacionados con la problemática planteada, a partir de los cuales se permite definir cuál opción es más conveniente para cada criterio.

- **Grados de libertad:** Movilidad del diseño para interactuar con una mayor combinación de posibles movimientos.
- **Factibilidad de cumplimiento de normas:** El diseño final presenta las cualidades requeridas para cumplir con las normas a las que un dispositivo de uso médico se debe regir en Ecuador.
- **Costo final:** Los componentes del diseño mecatrónico, en conjunto con costos de mano de obra y desarrollo, se ajustan a la capacidad económica del cliente.
- **Tiempo de operación:** Lapso continuo en el que el dispositivo podría operar en función de las capacidades energéticas de su fuente de alimentación.
- **Facilidad de ensamble:** Las piezas del diseño, sensores, y actuadores logran acoplarse fácilmente entre sí.
- **Modularidad:** Posibilidad de un diseño flexible y de variedad de uso al contar con la separación de sus componentes y adecuados mecanismos para la integración entre ellos.
- **Escalabilidad:** Posibilidad de ampliar el número de funcionalidades y, por consiguiente, escenarios de uso.
- **Aceptación por el usuario:** El aspecto del prototipo resultará agradable para el usuario final en términos estéticos y funcionales.

En la Tabla 2.1 se muestran los pesos asignados a cada uno de los criterios de selección mencionados anteriormente, denotando el orden de importancia establecido de acuerdo con el diseño final deseado y a la problemática. Se compararon todos los criterios entre sí, estableciendo entre pares cuál presentaba

mayor relevancia para la solución. Lo mostrado en la Tabla 2.1 integra información de todas las comparativas a manera de resumen.

Tabla 2.1 Relevancia de los criterios de selección

Criterio	Peso	Rango de importancia
Escalabilidad	7.5	1
Facilidad de ensamble	6	2
Factibilidad de cumplimiento de normas	6.5	3
Grados de libertad	5.5	4
Aceptación por el usuario	4	5
Costo final	3.5	6
Tiempo de operación	2	7
Modularidad	1	8

Posteriormente, se evaluaron cada una de las alternativas en función de los criterios establecidos considerando los pesos determinados. En la Tabla 2.2 se determina, por cada criterio, el orden de prioridad entre las opciones de solución disponibles, en donde para determinar el puntaje final de la alternativa se integran todos los criterios con sus respectivos pesos.

Tabla 2.2 Matriz de decisión para selección de alternativa

Pesos	Criterio								Resultados		
	7.5	6	6.5	5.5	4	3.5	2	1	Puntaje sin peso	Puntaje con peso	Prioridad
Opciones	Escalabilidad	Facilidad de ensamble	Factibilidad de cumplimiento de normas	Grados de libertad	Aceptación por el usuario	Costo final	Tiempo de operación	Modularidad			
Alternativa 1	0.42	0.25	0.42	0.50	0.42	0.17	0.33	0.42	2.92	13.42	1
Alternativa 2	0.42	0.25	0.33	0.33	0.17	0.33	0.17	0.17	2.17	10.96	3
Alternativa 3	0.17	0.50	0.25	0.17	0.42	0.50	0.50	0.42	2.92	11.63	2

Finalmente, según el análisis expuesto en la Tabla 2.2, se seleccionó la primera alternativa asociada al robot humanoide. Esta opción permite solucionar la problemática considerando los requerimientos para obtener una amplia producción

del diseño, contando con un modelo fácil de construir y que cumpla con las normativas de uso de dispositivos médicos.

Además, en términos de funcionalidad, aquella opción permite obtener una gran cantidad de movimientos debido a la presencia de articulaciones por el diseño humanoide, e incluso es altamente escalable ya que se pueden aumentar sus usos en base a movimientos o agregando sensores.

2.2 Requerimientos y limitaciones de diseño

Durante las diversas etapas en la creación y construcción del asistente robótico para niños hospitalizados, y en cada cambio requerido en el proceso, se tomaron en consideración una serie de requerimientos establecidos inicialmente según el entorno de trabajo del sistema propuesto y consideraciones o necesidades que el usuario y cliente pueda presentar.

Adicionalmente, se enunciaron limitaciones para el diseño con la finalidad de delimitar el alcance del presente trabajo según las características deseadas para el prototipo del sistema. Tanto los requerimientos como las limitaciones se detallan en la Tabla 2.3 según determinados criterios.

Tabla 2.3 Requerimientos y limitaciones de diseño

Criterio	Requerimientos	Limitaciones
Funcionalidad	Interacción física y comunicativa con el paciente.	Contar con máximo 2 funcionalidades.
Movilidad	Base estática, pero con más de 8 grados de libertad en movimientos relativos entre partes.	Velocidades de piezas menores a 2 rpm, se busca movimiento relativamente lento.
Autonomía	Sistema debe ser de autonomía mayoritaria.	Considerar máximo 2 sensores o dispositivos electrónicos que obtengan información del entorno.
Tiempo de operación diario	Mínimo 1 hora diaria de operación continua -en promedio-.	En caso de usar baterías se debe minimizar su tamaño.
Mantenimiento	Calibración de motores y revisión de circuito electrónico en períodos semestrales. Revisión anual del estado de las piezas.	Se deben disminuir las cargas en piezas y el torque desarrollado por motores para evitar afectaciones.
Costos	Máximo \$2000.	Presupuestos en la red hospitalaria pueden comprometer la inversión en el asistente robótico.
Tamaño	Altura máxima de 50 cm y ancho máximo de 60 cm, ajustado a la fisionomía de un infante.	Motores utilizados comprometen las dimensiones de varias piezas.
Peso	Máximo 5 kg.	Material de las piezas debe ser poco denso y resistir las cargas por movimiento.
Acoplamiento entre piezas	La construcción no debe ser compleja y la unión de sus partes va iniciando desde la base hasta la cabeza.	Elementos de sujeción y modificaciones en piezas son acorde a actuadores y dispositivos dentro del sistema.
Información de entrada y salida del sistema	Entrada de video, y salida por movimiento de actuadores.	Solo las imágenes serán utilizadas para las funcionalidades a implementar.

2.2.1 Consideraciones en base a normativas

Debido a la presencia de diversas normativas relacionadas a varios aspectos que componen o describen al dispositivo diseñado, se han establecido una serie de consideraciones relevantes tomadas de cada uno de aquellos estatutos con el fin de adecuar el sistema mecatrónico propuesto. En la Tabla 2.4 se enumeran las observaciones correspondientes al asistente robótico, las cuales se tomaron en cuenta en la metodología de diseño.

Tabla 2.4 Consideraciones por cada normativa analizada

Normativa	Consideraciones
ISO 13849-1:2008	Se requiere determinar el tiempo promedio hasta el fallo, el comportamiento ante condiciones de fallo, la cobertura de diagnóstico, etc. Se requiere determinar los límites de operación del dispositivo y analizar peligros potenciales. El asistente robótico se clasifica en la categoría 2, en términos de resistencia al fallo, y debe cumplir con los principios de seguridad de categorías inferiores [27].
Norma Europea Directiva de Máquinas 2006/42/CE	El sistema de control debe lidiar con los esfuerzos durante la operación e influencias externas. Además, un fallo de <i>hardware</i> o <i>software</i> , errores en la lógica del control, o errores humanos previsibles no pueden conllevar a situaciones peligrosas. No deben existir encendidos inesperados, la señal de parada de operación debe ser prioritaria, y ninguna pieza móvil de la estructura debe desprenderse [27].
IEC 61508:2010	El nivel de integridad de la seguridad por operación continua se considera de 2 bajo un modo de baja demanda, acorde a la aplicación presentada [28].
ISO 12100:2010	Se requiere establecer el rango de movimiento de las partes, los requerimientos de espacio para el uso del dispositivo, limitaciones en la interacción con el usuario, y el tiempo de vida del sistema y de sus componentes [29].
IEC 62061	El asistente robótico se establece menor al grado PL a -en términos de riesgo-: puede causar lesiones menores, el peligro al usarlo es poco frecuente y se puede evitar [30].
IEC 60529	El grado de protección establecido para el diseño es IP 51: se considera protección contra el polvo, aunque este no debe ingresar en cantidades considerables, y el recubrimiento contra el agua evita ingreso de gotas en caída vertical [31].

2.2.2 Consideraciones éticas y legales

Para el sistema mecatrónico propuesto se debe especificar que la responsabilidad legal del mal funcionamiento de cada uno de los componentes electrónicos utilizados recae en el proveedor. No obstante, se requiere que previo al ensamblaje cada uno de aquellos elementos sean inspeccionados y probados, estando estos procedimientos a cargo del equipo de trabajo que provee el asistente robótico. Además, en caso de fallo de alguno de los dispositivos se tiene la obligación de proveer de un servicio de revisión y mantenimiento, cuyo valor monetario se acuerda con el cliente.

Por otro lado, todos los programas empleados para el desarrollo del sistema son de licencia libre y no se cuenta con algún compromiso, en términos de retribución económica, con ninguno de sus autores. Se exceptúa al programa SolidWorks, el cual fue utilizado en un dispositivo que contaba con una licencia de número serial 9020002958899195SS79QS9K.

En términos éticos, el proyecto propuesto es provechoso desde la perspectiva del utilitarismo, ya que mediante el acompañamiento y la interacción se pretende preservar el bienestar de los niños hospitalizados. De igual manera, su implementación es correcta desde la ética del derecho ya que se busca proveer de una vida digna al infante. En consecuencia, el único aspecto que cuestionaría moralmente la implementación del presente proyecto recaería en el ámbito económico, puesto que se podría ofertar con sobreprecio y priorizando el beneficio de los diseñadores, utilizando a la problemática como una falsa motivación. En función de ello, se necesita realizar una minuciosa selección de elementos considerando su costo y establecer un porcentaje de ganancia justo, avalado adicionalmente por entes externos como el MSP.

2.3 Metodología de diseño

Para el desarrollo de la metodología se consideraron los aspectos fundamentales de la problemática y los requerimientos que debe presentar la solución propuesta. De esta manera, se definió una metodología de diseño sinérgica modificada, tal como se indica en la Figura 2.1. Debido a la interrelación entre los distintos componentes de diseño se realizaron iteraciones continuas durante el proceso, en donde modificaciones específicas conllevaron cambios en más de un componente del procedimiento adoptado.

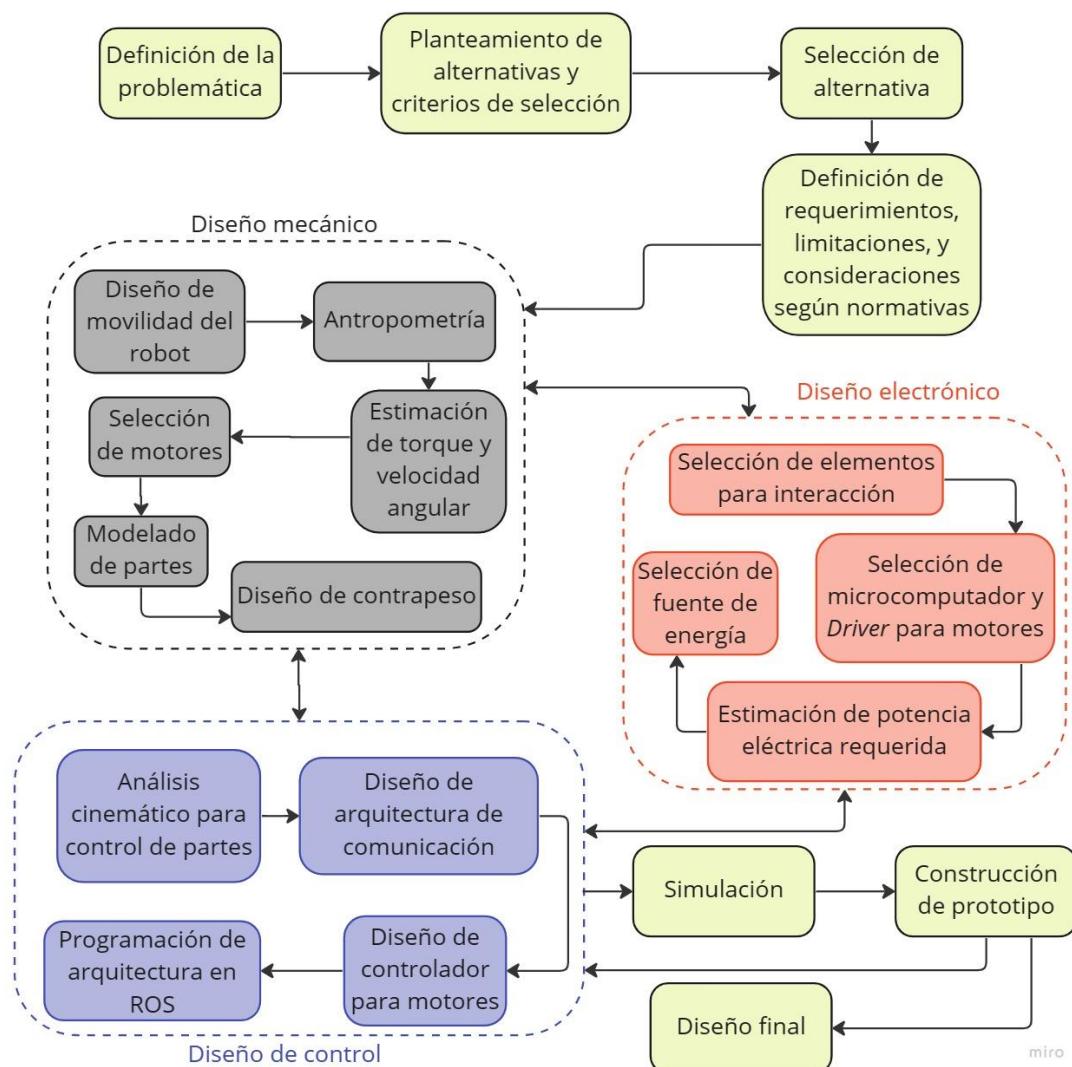


Figura 2.1 Metodología de diseño

2.4 Diseño conceptual

En la Figura 2.2 se presenta un boceto de diseño inicial del compañero robótico para niños hospitalizados, en donde se identifica a breves rasgos la movilidad del sistema y la geometría de sus elementos, excluyendo las partes del cuerpo correspondientes a las extremidades inferiores a excepción de la cadera.

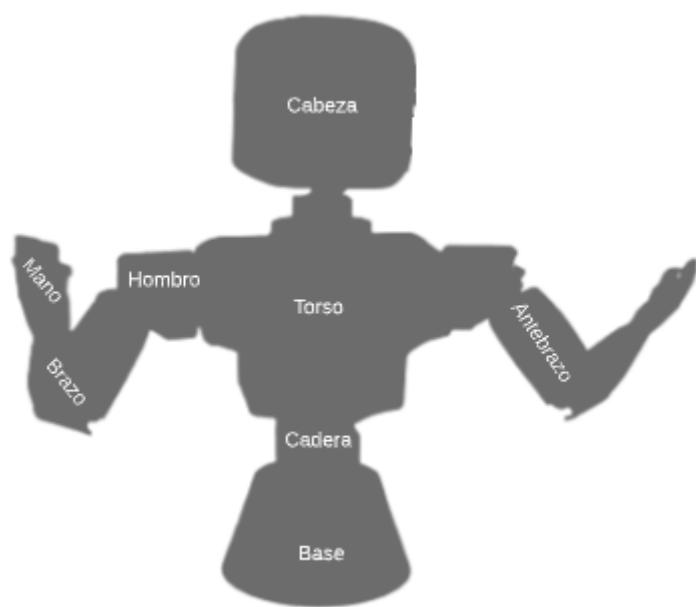


Figura 2.2 Diseño conceptual del compañero robótico

Para el correcto desarrollo del diseño se requirió analizar la problemática a partir de sus componentes principales, considerando los requerimientos técnicos y las normativas pertinentes para el desarrollo de un dispositivo médico. Dado que se planteó el diseño de un robot social con al menos nueve grados de libertad se requiere el estudio de cadenas cinemáticas para determinar la posición anatómica de las diversas partes de la estructura.

2.5 Parámetros del diseño mecánico

En la búsqueda de un diseño antropomórfico de movilidad se han considerado como principales parámetros mecánicos: grados de libertad, torque y velocidad angular de actuadores, y dimensiones de cada pieza. Además, se ha planteado un modelado cuya silueta se asemeje relativamente a la de su usuario, tal que este otorgue un mayor grado de aceptación al diseño.

2.5.1 Diseño de movilidad del robot

En función del requerimiento de contar con un mínimo de nueve grados de libertad, se determinó que la movilidad del diseño comprenda una serie de juntas revolutas que, al moverse, permitan al robot describir un comportamiento humanoide. En consecuencia, se enumeran en la Tabla 2.5 las articulaciones contempladas en el diseño y los grados de libertad asociados a cada una de ellas.

Respecto al movimiento del brazo, se requirió dividir los diversos desplazamientos del hombro en dos articulaciones, considerando virtualmente al antebrazo. Esto otorga menores restricciones en el diseño y facilita la selección de actuadores.

Tabla 2.5 Análisis de movilidad con grados de libertad deseados

Grados de libertad				
Cuello	Hombro	Antebrazo	Codo	Cadera
2	1	2	1	2

En la Figura 2.3 se indican gráficamente las articulaciones consideradas para el diseño, mostrando cuántos grados de libertad comprende cada una.

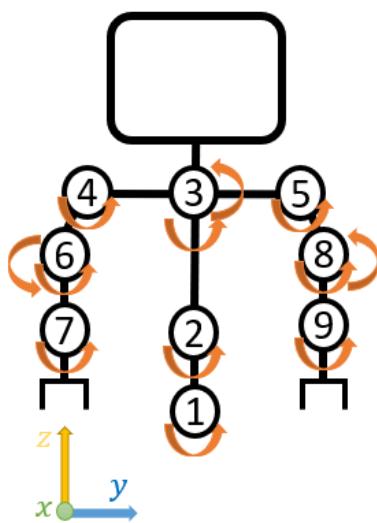


Figura 2.3 Articulaciones incluidas en el diseño de movilidad

Adicionalmente, se definieron los ejes de rotación para cada articulación, priorizando asemejar el movimiento de las partes a las del cuerpo humano y tomando en cuenta la cantidad de grados de libertad que cada una posee. Aquella información se especifica en la Tabla 2.6, en donde además se otorgan números identificadores a cada junta revoluta, los cuales se utilizan para el posterior control de los actuadores.

Tabla 2.6 Información de las articulaciones y sus ejes de rotación

Articulación	Eje de rotación	Número identificador
1	Z	1
2	X	2
3	Z	3
	Y	4
4	Y	5
5	Y	9
6	X	6
	Z	7
7	X	8
8	X	10
	Z	11
9	X	12

2.5.2 Antropometría para dimensionamiento de piezas

En el diseño de prótesis debe existir una relación exacta entre el modelo físico y las dimensiones geométricas del diseño mecánico de cada sección de estudio. Imitando aquel procedimiento, el diseño de cada sección del robot humanoide se basó en dimensiones referenciadas de datos antropométricos.

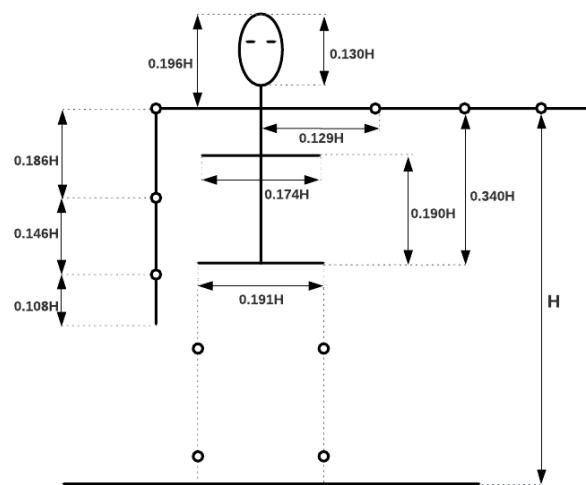


Figura 2.4 Configuración anatómica y arquitectura cinemática del robot Yaren - proporciones de longitud antropométrica del cuerpo humano, adaptado de [32]

En la Figura 2.4 se establecen las relaciones antropométricas en relación con la altura de una persona. Con aquellas proporciones se determinaron las longitudes de las partes del robot, mostradas en la Tabla 2.7.

Tabla 2.7 Proporciones de longitud antropométrica del cuerpo humano

No.	Segmento	Fórmula	Valor (mm) para H= 750
1	Cabeza	0.130H	97.50
2	Cuello	0.066H	49.50
3	Torso	0.340H	255.00
4	Hombro	0.129H	96.75
5	Antebrazo	0.186H	139.50
6	Brazo	0.146H	109.50
7	Mano	0.108H	81.00
8	Cadera	0.191H	143.25

2.5.3 Estimación de torque y velocidad angular

Para la presente aplicación las velocidades no representan un factor crítico para el funcionamiento del dispositivo ni existe un requerimiento en el que se determinen valores específicos. En consecuencia, no es indispensable que los motores muevan las partes a una rapidez específica y rigurosamente sincronizada respecto a los actuadores restantes.

Por lo tanto, aquel parámetro mecánico se puede seleccionar libremente. Para ello es preciso considerar que menores de edad serán los usuarios y resulta conveniente optar por bajas velocidades para evitar posibles lesiones físicas a causa de colisiones del niño con alguna pieza en movimiento -incluso tomando en cuenta que puede invadir el espacio de trabajo del compañero robótico-. Finalmente, se estableció un rango de velocidades angulares general para los actuadores: entre 5 y 25 rpm.

Adicionalmente, para analizar el torque requerido se determinaron las articulaciones críticas asociadas al diseño conceptual propuesto, las cuales se muestran en la Figura 2.5. Estas fueron seleccionadas en función del torque requerido para obtener los movimientos deseados, en función de las masas y momentos de inercia con los que deben lidiar. Debido a que las articulaciones 4 y 5 son equivalentes, se considerará solo una de ellas en el análisis.

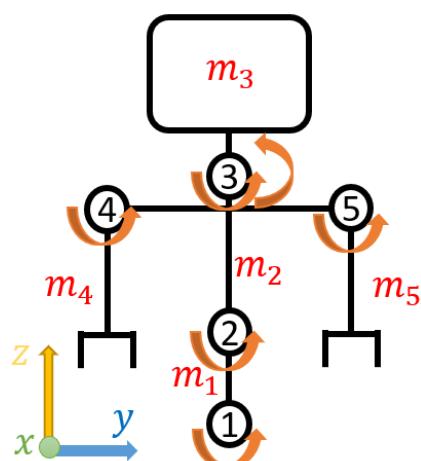


Figura 2.5 Descripción gráfica de articulaciones críticas

Respecto a las articulaciones especificadas en la Figura 2.5, se describen sus principales características en la Tabla 2.8. Las masas máximas se consideran en función del requerimiento de contar con un límite de 5 kg en toda la estructura -sin tomar en cuenta el contrapeso-. Por otro lado, los momentos de inercia se especifican modelando las piezas con un radio máximo y considerando idealmente su forma como la de un cilindro hueco de espesor de 5 mm.

Para el cálculo de los momentos de inercia de ejes concéntricos a la sección hueca se considera la ecuación (2.1), mientras que para ejes perpendiculares se utiliza la ecuación (2.2).

$$I = 0.5 \cdot M \cdot (r_e^2 + (r_e - 0.005 \text{ m})^2) \quad (2.1)$$

$$I = 0.25 \cdot M \cdot (r_e^2 + (r_e - 0.005 \text{ m})^2) + \frac{1}{3} \cdot M \cdot L \quad (2.2)$$

Tabla 2.8 Principales características por articulación crítica

Articulación	Masa máxima (M) [kg]	Plano de rotación	Radio máximo de pieza (r _e) [m]	Desfase eje paralelo – centro de pieza (L) [m]	Momento de inercia (I) [x10 ⁻⁴ kg·m ²]	Velocidad angular máxima (w) [rpm]
1	5	xy	0.14	0.00	945.63	10
2	4.75	yz	0.12	0.05	1119.71	10
3	1	xy	0.07	0.00	45.63	15
		xz	0.04	0.03	107.06	15
4	1	xz	0.02	0.01	34.90	15

En la Tabla 2.9 se describen los parámetros mecánicos que describen la cinemática y dinámica del movimiento en las articulaciones mostradas previamente. Para ello se emplea la ecuación (2.3) para determinar el torque necesario en el eje del motor, y la ecuación (2.4) para calcular la potencia requerida. Además, se considera que los motores a seleccionar tendrán una aceleración angular máxima de 10 rad/s².

$$\tau = I \cdot \alpha - m \cdot g \cdot L \quad (2.3)$$

$$P = \tau \cdot \omega \quad (2.4)$$

Tabla 2.9 Parámetros mecánicos asociados al movimiento de las articulaciones críticas

Articulación	Plano de rotación	Torque (τ) [N·m]	Potencia (P) [$\times 10^{-3}$ HP]
1	xy	0.946	1.328
2	yz	3.447	4.841
3	xy	0.046	0.096
	xz	0.401	0.845
4	xz	0.133	0.280

2.5.4 Selección de motores

Debido al requerimiento de contar con velocidades bajas y torques moderados, principalmente por seguridad del usuario, resulta conveniente seleccionar un motor que cuente con un reductor incorporado. Considerando adicionalmente las limitaciones de tamaño y la precisión deseada en las posiciones angulares, un servomotor o un motor a paso resultan opciones convenientes y acordes a lo requerido, tomando en cuenta la variedad de modelos ofertados.

A partir de la revisión de diversos proveedores y sus productos, se identificó que los modelos ofertados por Robotis, además de cumplir con las necesidades estipuladas previamente, cuentan con una serie de beneficios para el presente diseño:

- Se facilita el control del actuador a partir del uso de una tabla de direcciones en una EEPROM que permiten escribir o leer información relacionada con el estado deseado o actual del motor.
- Cuenta con una librería de sencilla implementación en ROS, en donde se establecen funciones para el envío y recibo de datos.
- Ofrece la opción de establecer un controlador PID configurando las tres constantes en tres direcciones de memoria distintas.

Dentro de los modelos analizados se identificaron tres de particular interés que pueden ser seleccionados para las distintas articulaciones, considerando el análisis de torque y velocidades angulares y el diseño de movilidad. Cada uno de ellos se muestra, junto con sus respectivas curvas de torque-velocidad, desde la Figura 2.6 hasta la Figura 2.8.

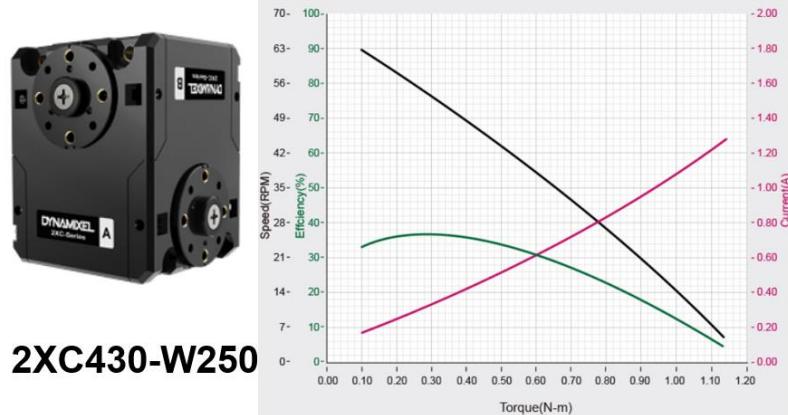


Figura 2.6 Motor 2XC430-W250-T junto con su curva torque-velocidad [33]

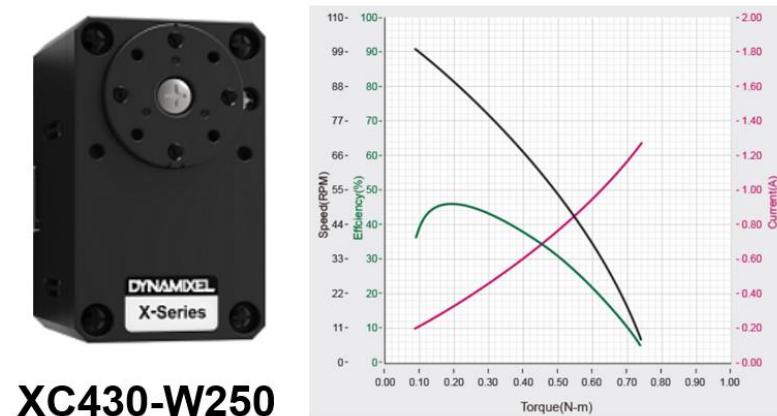


Figura 2.7 Motor XC430-W240-T junto con su curva torque-velocidad [34]



MX-106R

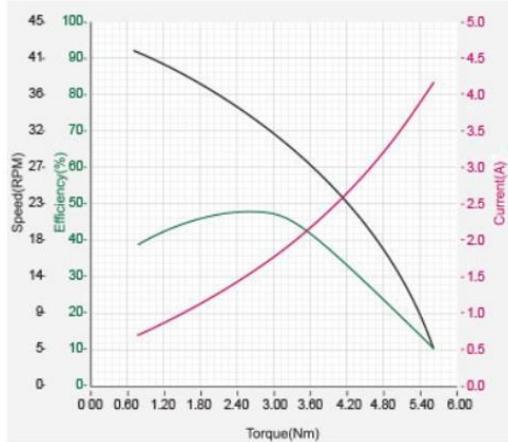


Figura 2.8 Motor MX106-R junto con su curva torque-velocidad [35]

Las principales características de cada uno de los actuadores presentados se describen en la Tabla 2.10. Además, en el APÉNDICE A se incluyen los planos correspondientes.

Tabla 2.10 Principales características de actuadores seleccionados

Características	2XC430-W250	XC430-W240	MX-106R
Microcontrolador	ARM Cortex-M3		
Motor	DC, sin núcleo, sin escobillas		
Peso	102 g	65 g	153 g
Grados de libertad	2	1	
Voltaje de alimentación recomendado	12 V		
Torque máximo	1.8 N·m	1.6 N·m	8.4 N·m
Velocidad sin carga	64 rpm	106 rpm	45 rpm
Tipo de comunicación serial	TTL		RS485
Sensor de posición	Encoder absoluto de 12 bits, sin contacto		

A partir de lo expuesto en la Figura 2.8 se aprecia que el motor MX-106R permite desarrollar un torque casi cinco veces mayor respecto a los otros dos modelos en gran parte de su curva torque-velocidad, cuenta con un torque máximo superior, y en la zona crítica de torques elevados alcanza las velocidades planteadas en la Tabla 2.8. Por lo tanto, aquel motor se selecciona para las articulaciones críticas 1 y 2,

mostradas en la Figura 2.5, cuyas cargas mecánicas son similares y críticas tanto en magnitud como en importancia para la adecuada movilidad del diseño.

Por otro lado, las articulaciones críticas 3, 4, y 5 soportan pesos y cargas menores respecto a las mencionadas anteriormente. Además, los torques y velocidades requeridos, descritos en la sección 2.5.3, se encuentran dentro del rango de operación de los motores XC430 y 2XC430. Por ello, tanto a las articulaciones críticas restantes como a las que aún no han sido analizadas -incluidas en el diseño de movilidad-, se les asigna un actuador entre los modelos XC430 y 2XC430.

Debido a que el motor 2XC430 cuenta con dos ejes de rotación, se elige este modelo para las articulaciones del cuello y antebrazo ya que en ambas se busca una mayor capacidad de movimiento. Para las restantes, que requieren un eje de rotación, se elige el motor XC430.

Finalmente, en la Tabla 2.11 se resume la selección de motores para cada articulación descrita en la Figura 2.3.

Tabla 2.11 Selección de motores por articulación

Articulación	2XC430-W250-T	XC430-W240-T	MX-106R
1			X
2			X
3	X		
4		X	
5		X	
6	X		
7		X	
8	X		
9		X	

2.5.5 Modelado de partes

Para el modelado de cada parte del compañero robótico se empleó el programa Solidworks, en donde se desarrollaron diferentes versiones por pieza considerando los siguientes aspectos:

- Minimizar el material empleado y, paralelamente, garantizar que la estructura resista los esfuerzos a causa de los torques aplicados por los actuadores.
- Establecer orificios, aberturas en piezas, o hendiduras que permitan el paso de los cables que interconecten a los diversos componentes electrónicos entre sí, tomando en cuenta que la mayoría se albergarían en la parte central del torso -a excepción de los motores-.
- Modelar los orificios requeridos para el ingreso de elementos de sujeción, facilitando el acoplamiento entre piezas. Se estableció el uso general de tornillos M2.5, a excepción del uso de M2 en caso sea requerido para la sujeción de los actuadores.
- Obtener la movilidad deseada en cada articulación, limitando el rango de movimiento de cada una por la geometría de las piezas.

2.5.6 Diseño del contrapeso

En la estructura diseñada existía un considerable riesgo por volcamiento debido al elevado peso de las piezas localizadas sobre el torso inferior, lo cual generaba que el centro de gravedad se sitúe alejado de la base y pueda estar por fuera de su área de apoyo cuando el torso central se inclinaba a un ángulo máximo. En consecuencia, se consideró al robot en la posición más crítica de funcionamiento, de tal manera que la adición de un contrapeso bajo aquella condición permita modificar correctamente el centro de gravedad global y evitar el volcamiento en cualquier caso de funcionamiento.

En función del sistema de referencia mostrado en la Figura 2.5, se determinó que la rotación de piezas respecto a los ejes Y-Z no produce inestabilidad en el robot debido a que estos movimientos ocurren en el torso inferior, brazos o cabeza, en

donde existe poca masa y los centros de gravedad locales experimentan desplazamientos leves debido a los movimientos relativos.

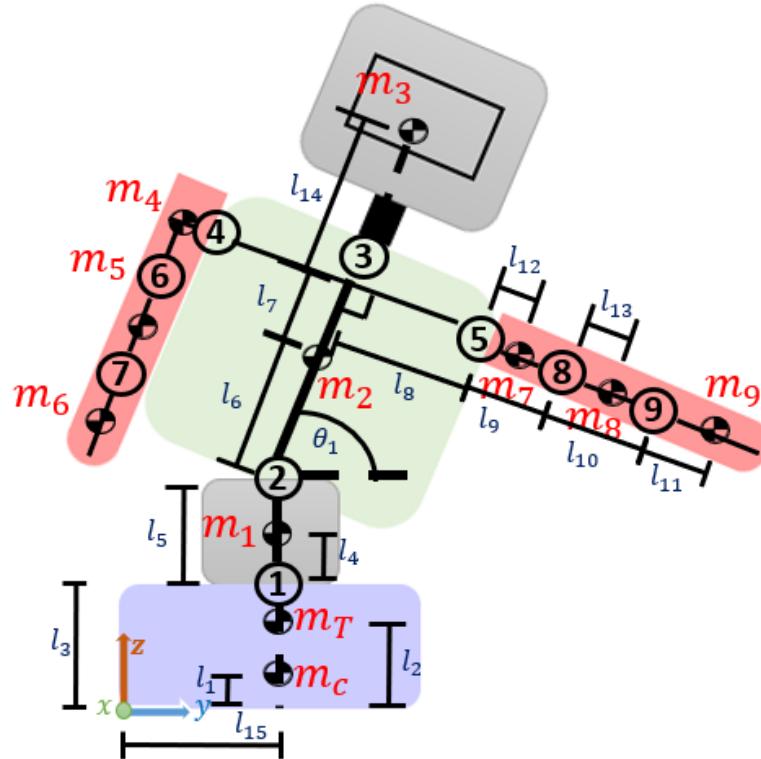


Figura 2.9 Modelado del robot en la posición más crítica con los centros de masa de cada pieza

Por lo tanto, el contrapeso fue diseñado en base a movimientos respecto al eje X, pues la rotación del torso provoca que la mayoría de las piezas se inclinen y las posiciones de sus centros de gravedad se modifiquen.

Se muestra en la Figura 2.9 el modelado del robot en su posición crítica debido a la rotación del torso respecto al eje X. Para el diseño del contrapeso se consideraron las dimensiones definidas en la sección 2.5.2 y un ángulo crítico (θ_1) de 50° . Además, se estableció como requerimiento de diseño que el contrapeso sea una base situada por debajo del torso inferior, cuya área de contacto al plano XY sea mayor o igual al área equivalente entre el ancho y la profundidad del torso central.

En el APÉNDICE B se describe el cálculo del contrapeso, en donde se aplicaron las consideraciones descritas en la Tabla 2.12. Para ello se empleó la ecuación (2.5), tomando en cuenta que el robot es simétrico y su centro de gravedad está alineado con la sección media de la nueva base.

$$m_T \vec{r}_T = m_C \vec{r}_C + \sum_{i=1}^9 m_i \vec{r}_i \quad (2.5)$$

Tabla 2.12 Datos relevantes en el cálculo del contrapeso

Variable	Magnitud física
l_1 : Distancia desde el plano XY hasta el centro de gravedad del contrapeso	25 mm
l_2 : Distancia desde el plano XY hasta el centro de gravedad global resultante del robot	180 mm
l_3 : Altura del contrapeso	90 mm
l_{15} : Coordenada en Y de la línea media del contrapeso	80 mm
m_1 : Masa del torso inferior	0.25 kg
m_2 : Masa del torso central	1.75 kg
m_3 : Masa de la cabeza	1 kg
m_4 : Masa del hombro	0.25 kg
m_5 : Masa del antebrazo	0.5 kg
m_6 : Masa del brazo	0.25 kg

2.6 Parámetros del diseño electrónico

En función del requerimiento asociado al tiempo diario de uso de una hora en promedio, se estableció a la potencia consumida como uno de los principales parámetros de interés en el diseño electrónico. En consecuencia, en esta sección se realiza la selección de los componentes del sistema y se determina la fuente de alimentación adecuada tal que se logre obtener el tiempo deseado de funcionamiento continuo.

2.6.1 Selección de elementos para interacción con el usuario

Debido a que se requiere que el diseño interactúe físicamente con el usuario se seleccionaron una serie de motores y se ha diseñado una estructura que permite llevar a cabo movimientos. Con estos elementos se establece una funcionalidad que

consiste en el desarrollo de rutinas de movimiento para contribuir a que el niño los replique y se mantenga activo.

Además, se definió la necesidad de establecer comunicación con el paciente. Para ello se ha establecido que el robot interactúe de manera no verbal a través de una cámara que captura el estado de ánimo y los movimientos del usuario, para luego replicarlos. Adicionalmente, se desea que exista una comunicación verbal en donde el robot pueda escuchar y emitir sonidos, por lo que se requieren un micrófono y un parlante pequeño.

La cámara se seleccionó considerando criterios como un bajo consumo de potencia, una resolución mínima de dos megapíxeles, y priorizando modelos cuyas dimensiones sean mínimas. Por ende, se seleccionó la cámara IMX219-160. En la Tabla 2.13 se muestran sus principales características.



Figura 2.10 Cámara IMX219-160 [36]

Tabla 2.13 Características de la cámara IMX219-160

Resolución	8 megapíxeles: 3280 x 2464
Ángulo de visión	160°
Temperatura de operación	0°C-50°C
Apertura	2.35 mm
Distancia focal	3.15 mm
Dimensiones	25 mm x 24 mm

Además, se incluyó una pantalla que le confiera al diseño una apariencia amigable y antropomórfica, pues esta sirve para otorgarle una cara al robot. Para la selección

de este elemento se consideró únicamente que sea de cinco pulgadas máximo, ya que se sitúa en la cabeza y con aquella dimensión se ajustaría a las proporciones de la pieza. Por lo tanto, se escogió la pantalla IHANFO LCD de cinco pulgadas, cuyas principales características se muestran en la Tabla 2.14.

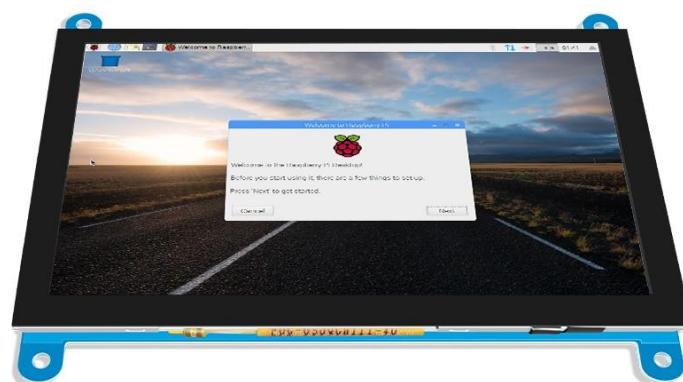


Figura 2.11 Pantalla IHANFO LCD de 5 pulgadas [37]

Tabla 2.14 Características de la pantalla seleccionada

Tamaño	5 pulgadas
Resolución	800 x 480
Ángulo de visualización horizontal	165°
Tipo de pantalla	LCD - IPS
Relación de visualización	16:10
Puertos	1 USB, 1 HDMI
Voltaje de alimentación	5 V

Finalmente, para la selección del micrófono y el parlante se priorizaron alternativas que provean las funcionalidades de recepción y emisión de sonido de manera integrada para evitar aumentar el número de componentes. En consecuencia, se seleccionó la tarjeta de audio de Waveshare, diseñada para ser usada con la Jetson Nano. Cuenta con dos micrófonos MEMS con grabación dual de audio, su voltaje de alimentación es de 5 V, permite conexión directa mediante USB, y posee parlantes duales.



Figura 2.12 Tarjeta de audio Waveshare para Jetson Nano [38]

2.6.2 Selección de microcomputadora y *Driver* para motores

Debido a las dimensiones del diseño se debe priorizar la selección de una microcomputadora de poco tamaño. Además, considerando la funcionalidad de replicar movimientos en donde se incluye procesamiento de imágenes, se debe contar con suficientes recursos computacionales para el manejo de aquellos datos, descartando la alternativa de los microcontroladores.

Por consiguiente, se escogió la Nvidia Jetson Nano puesto que es un modelo comúnmente usado para la aplicación previamente descrita y se ajusta a las necesidades del diseño. Sus características más relevantes se describen en la Tabla 2.15.



Figura 2.13 NVIDIA Jetson Nano [39]

Tabla 2.15 Características de la Jetson Nano

GPU	Arquitectura Maxwell de 128 núcleos
CPU	Quad-core ARM A57 @ 1.43 GHz
Puertos	4 USB 3.0, 1 HDMI, 3 UART
Voltaje de alimentación	5 V
Rango de temperatura de operación	25 °C – 97 °C
Potencia máxima de consumo	10 W

Por otro lado, para el control de los motores desde la Jetson se precisa de un componente que permita la conversión de la comunicación serial entre dispositivos, considerando que se cuenta con motores con protocolo de comunicación serial TTL y RS485. Por ello se escogió al dispositivo U2D2, el cual es ofertado por Robotis -el proveedor de los motores-. Además, debido a que los motores se deben alimentar de energía externamente, se incluye una placa de fuente de poder compatible con la U2D2.

La selección de la U2D2 ofrece facilidades en la conexión con los motores y en la integración de señales de distintos protocolos de comunicación serial, permitiendo el control de varios actuadores presentes en distintas líneas de conexión.

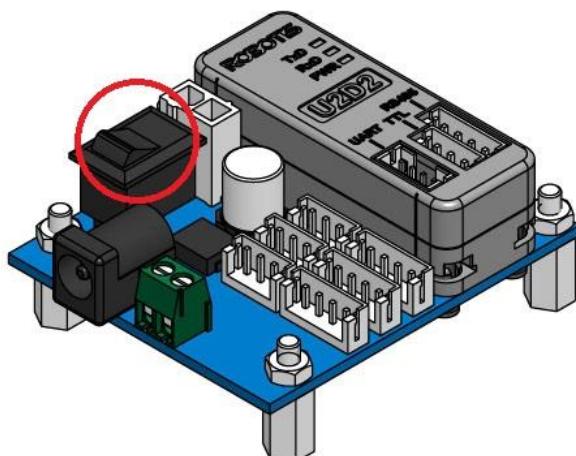


Figura 2.14 U2D2 situada en la tarjeta de fuente de poder [40]

Finalmente, se incluye un interruptor para el encendido y apagado de todo el sistema junto con un convertidor reductor de voltaje YwRobot M3 XL2596S con salida de 5 V para los componentes electrónicos que requieran de aquel menor voltaje de alimentación.

2.6.3 Estimación de potencia eléctrica requerida

Para el cálculo de potencia eléctrica consumida por los motores se consideró que estos operan constantemente aplicando sus torques máximos a las velocidades de operación especificadas en la Tabla 2.8, lo cual conlleva a un caso crítico de consumo de energía. Aunque aquello ocurre en pocas ocasiones, permite sobredimensionar los requerimientos energéticos considerando que para ciertos componentes de bajo consumo de potencia no se cuenta información precisa para desarrollar cálculos.

En la Tabla 2.16 se muestra la potencia total requerida por el sistema, en donde se utiliza la definición de potencia eléctrica especificada en la ecuación (2.6) - exceptuando en componentes en donde se conoce el consumo máximo-.

$$P = V \cdot I \quad (2.6)$$

Tabla 2.16 Consumo total de potencia

Elemento	Cantidad	Voltaje [V]	Corriente [A]	Potencia [W]
MX106-T	2	12	1.1	26.40
2XC-430	3	12	0.44	15.84
XC-430	4	12	0.28	13.44
Jetson Nano	1	-	-	10.00
Tarjeta de audio Waveshare	1	-	-	5.00
Cámara IMX219-160	1	-	-	0.66
U2D2	1	12	0.08	0.96
Potencia total				72.30

2.6.4 Selección de fuente de energía

Para la selección de la fuente de alimentación se optó por explorar opciones de baterías, ya que estas permiten una mayor portabilidad y evitan que deba existir conexión permanente a la red eléctrica para el funcionamiento del robot. Considerando el voltaje de alimentación de la mayoría de los componentes se optó por seleccionar baterías de 12 V, analizar su consumo energético, y determinar el tiempo en días y horas que demorarían en descargarse totalmente, lo cual se muestra en la Tabla 2.17.

Respecto al cálculo de los vatios-hora para cada modelo de batería se utiliza la ecuación (2.7), mientras que para determinar los tiempos de uso se implementa la ecuación (2.8) considerando el requerimiento de funcionar una hora diaria.

$$W_h = A_h \cdot V = A_h \cdot (12 V) \quad (2.7)$$

$$t_{día} = \frac{W_h}{\left(P \cdot t_{\frac{h}{día}} \right)} = \frac{W_h}{\left(72.30 W \cdot 1 \frac{h}{día} \right)} \quad (2.8)$$

Tabla 2.17 Análisis de consumo de baterías de 12 V

Modelo de batería	Wh	Tiempo de funcionamiento al día
Li-ion 12 V, 2 Ah	24 Wh	20 min
Li-ion 12 V, 3 Ah	36 Wh	30 min
Li-ion 12 V, 3.5 Ah	42 Wh	35 min
Li-ion 12 V, 5.2 Ah	62.4 Wh	52 min
Li-ion 12 V, 5.6 Ah	67.2 Wh	56 min

Debido a que se sobredimensionó el consumo de potencia tal que la fuente de alimentación seleccionada cumpla incluso más allá de los requerimientos energéticos reales, resulta suficiente que la batería idónea tenga un tiempo de funcionamiento calculado cercano al tiempo estipulado de una hora por día. Por lo tanto, se escogió la batería Li-ion de 12 V y 5.6 Ah.

2.7 Parámetros del diseño de control

Debido al entorno de trabajo en el que se desenvuelve el compañero robótico, se requiere establecer un control robusto de las partes de su estructura. Para ello, en esta sección se describe el análisis cinemático del robot, el procedimiento de diseño de controladores PID para cada actuador, la arquitectura de comunicación entre componentes, y las herramientas utilizadas para la programación en ROS junto con la descripción general del procedimiento para el control de posición.

2.7.1 Análisis cinemático del robot

En la Figura 2.15 se presenta la estructura cinemática del robot de medio torso. Dado que el robot humanoide es simétrico, se analizaron el brazo derecho, la cabeza, el torso, y la cadera. La estructura cinemática del brazo izquierdo se obtiene modificando las referencias del sistema empleadas para el brazo derecho.

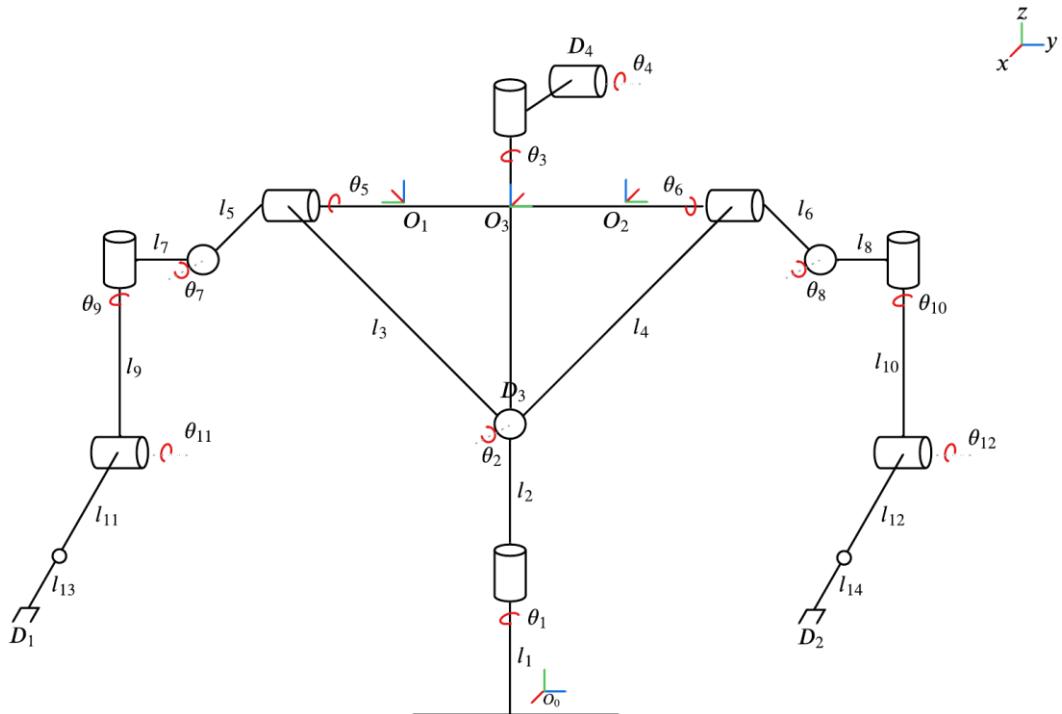


Figura 2.15 Estructura cinemática del robot

Para facilitar el control de posición de cada parte se emplea la representación Denavit-Hartenberg para parametrizar cada una de las articulaciones a partir de cuatro valores: θ (ángulo respecto a Z), d (distancia respecto a Z), a (distancia respecto a X), α (ángulo respecto a X). Se determinan sistemas de referencia locales por articulación a partir de los cuales se definen los parámetros mencionados previamente. Debido a que se utilizan únicamente juntas revolutas, en todos los casos θ es la variable de la junta mientras que los demás parámetros son valores constantes.

Para representar el sistema de referencia de una articulación respecto al sistema de una articulación previa, se define la matriz de transformación homogénea descrita en la ecuación (2.9), en donde se emplean implícitamente rotaciones y traslaciones considerando los parámetros de Denavit-Hartenberg.

$$T_i^{i-1}(\theta_i) = \begin{bmatrix} C_i & -S_i & 0 & a_{i-1} \\ S_i C_{\alpha_{i-1}} & C_i C_{\alpha_{i-1}} & -S_{\alpha_{i-1}} & -S_{\alpha_{i-1}} d_i \\ S_i S_{\alpha_{i-1}} & C_i S_{\alpha_{i-1}} & C_{\alpha_{i-1}} & C_{\alpha_{i-1}} d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{cases} C_n = \cos(\theta_n) \\ S_n = \sin(\theta_n) \\ C_{\alpha_n} = \cos(\alpha_n) \\ S_{\alpha_n} = \sin(\alpha_n) \end{cases} \quad (2.9)$$

Para obtener matrices de transformación homogénea entre articulaciones no contiguas se concatenan a manera de multiplicaciones matriciales, como se muestra en la ecuación (2.10).

$$T_N^0 = T_1^0 T_2^1 \dots T_N^{N-1} \quad (2.10)$$

Por lo tanto, es suficiente definir los parámetros de Denavit-Hartenberg de cada articulación para obtener una representación adecuada de la estructura y obtener la posición de cualquier punto de interés. A continuación se divide la estructura por secciones y se definen cada uno de los parámetros correspondientes.

2.7.1.1 Modelado del Brazo

La Figura 2.16 muestra la estructura cinemática del brazo derecho. Cada brazo presenta cuatro GDL a raíz de la presencia de tres actuadores. Se debe considerar la relación que comparten el hombro y el brazo, debido al punto en común existente que conlleva a la intersección de sus ejes de rotación.

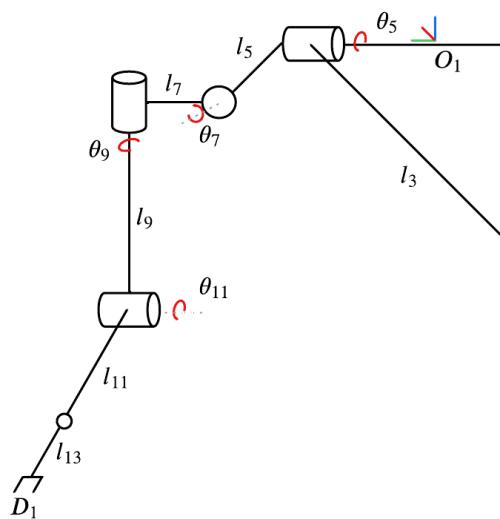


Figura 2.16 Estructura cinemática del brazo derecho

En la Tabla 2.18 se determinan los parámetros de Denavit-Hartenberg para las articulaciones consideradas en el brazo.

Tabla 2.18 Parámetros de Denavit-Hartenberg del brazo

Articulación	θ_n	d_n (mm)	a_n (mm)	α_n
5	θ_5	24.01	8.8	90°
7	$\theta_7 + 90^\circ$	0	21.85	90°
9	$\theta_9 + 90^\circ$	89.84	0	90°
11	$\theta_{11} + 90^\circ$	0	87.34	0°

2.7.1.2 Modelado de la Cabeza

La Figura 2.17 muestra la estructura cinemática de la cabeza, la cual cuenta con dos GDL accionados por un actuador con dos juntas revolutas incorporadas.

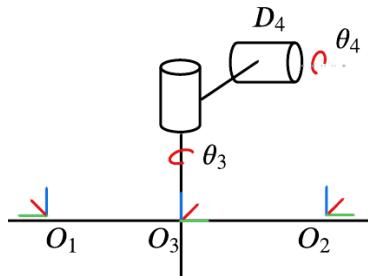


Figura 2.17 Estructura cinemática de la cabeza

En la Tabla 2.19 se determinan los parámetros de Denavit-Hartenberg para las articulaciones consideradas en la cabeza.

Tabla 2.19 Parámetros de Denavit-Hartenberg de la cabeza

Articulación	θ_n	$d_n(\text{mm})$	$a_n(\text{mm})$	α_n
3	θ_3	0	0	0
4	θ_4	0	8.8	90°

2.7.1.3 Modelado de la Cadera

La Figura 2.18 muestra la estructura cinemática de la cadera, la cual cuenta con dos GDL accionados por dos actuadores con una junta revoluta en cada uno.

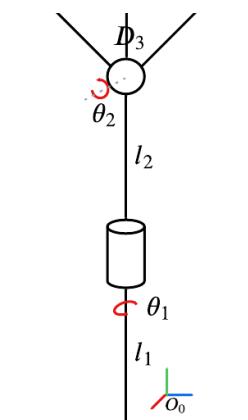


Figura 2.18 Estructura cinemática de la cadera

En la Tabla 2.20 se determinan los parámetros de Denavit-Hartenberg para las articulaciones consideradas en la cadera.

Tabla 2.20 Parámetros de Denavit-Hartenberg de la cadera

Articulación	θ_n	$d_n(\text{mm})$	$a_n(\text{mm})$	α_n
1	θ_1	0	0	0
2	θ_2	44	0	90°

2.7.2 Arquitectura de comunicación

Para la arquitectura de comunicación se utilizan protocolos seriales, interfaz de video (HDMI), e interfaz serie para cámaras (CSI). Cada uno de ellos se definen en base a las características de los componentes, puesto que para todos se describe en sus especificaciones bajo cuál protocolo se debe enviar y recibir información. La arquitectura general se muestra en la Figura 2.19.

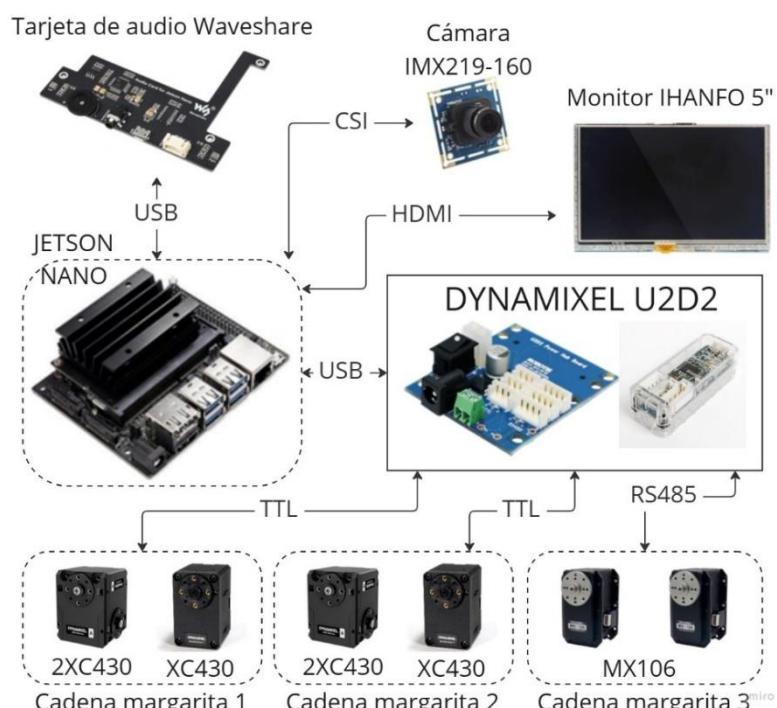


Figura 2.19 Arquitectura de comunicación

Para la comunicación entre la U2D2 y los diversos motores seleccionados se requirieron implementar tres cadenas margarita -o conexiones en serie- debido a

limitaciones de cableado y a la existencia de más de un tipo de puerto de conexión. Los motores interconectados en cada cadena se especifican en la Tabla 2.21, en base a los números identificadores descritos en la Tabla 2.6.

Tabla 2.21 Motores incluidos en las cadenas de conexión a la U2D2

Número de cadena margarita	Motores conectados en serie
1	1, 2
2	3-4,5,6-7,8
3	9,10-11,12

2.7.3 Diseño de controlador PID para control de posición de los motores

Los controladores fueron diseñados tomando como premisa que los motores seleccionados presentan espacios de memoria en donde se almacenan las constantes del controlador PID de posición, obteniendo un sistema en lazo cerrado como se muestra en la Figura 2.20.

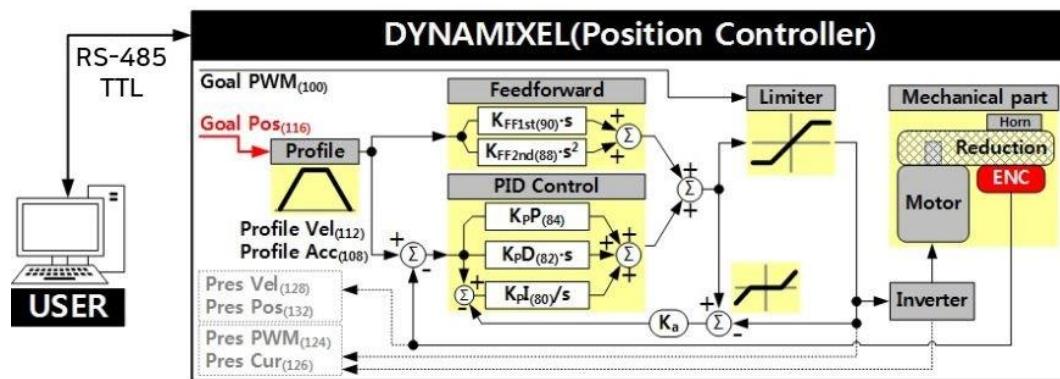


Figura 2.20 Modelado del sistema en lazo cerrado con controlador PID de posición para el motor [35]

La metodología para el diseño del controlador se describe en la Figura 2.21. Primero se desarrolló el modelo matemático de un motor BLDC debido a que los actuadores seleccionados corresponden a aquel tipo de motor y cuentan con sensores de posición incorporados. El procedimiento se describe a detalle en el APÉNDICE C.

Debido a que todos los motores presentan cargas distintas, se realizó la identificación de planta para cada uno de ellos considerando el número de polos y ceros de la función de transferencia determinada en el modelo matemático. Para ello se obtuvieron señales de voltaje y datos de posición de los motores.

Posteriormente, se sintonizaron los controladores según las características deseadas en la respuesta: un máximo error en estado estable del 4%, tres segundos de tiempo de estabilización, y un tiempo de levantamiento de al menos un segundo. Un ejemplo de la identificación de planta y la sintonización del controlador se detalla en el APÉNDICE D.

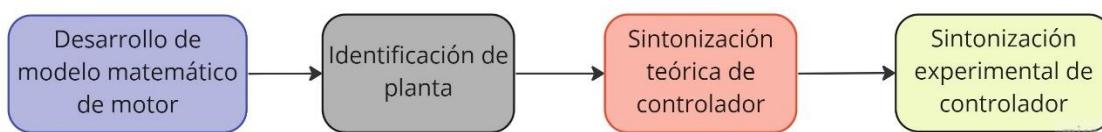


Figura 2.21 Metodología de diseño de controladores PID para los motores

Finalmente, se configuraron los controladores en los motores y se realizó una sintonización experimental adicional para ajustar levemente su comportamiento. Para ello, se consideraron los criterios expuestos en la Tabla 2.22.

Tabla 2.22 Efectos de incrementar un parámetro de manera independiente [41]

Parámetro	Tiempo de levantamiento	Sobrenivel porcentual	Tiempo de estabilización	Error en estado estable
Kp	Disminuye	Incrementa	Poca variación	Disminuye
Ki	Disminuye	Incrementa	Incrementa	Se elimina
Kd	Poca variación	Disminuye	Disminuye	Sin cambio

2.7.4 Programación en ROS y diseño de funcionamiento

Para la programación en ROS se emplearon diversas librerías y herramientas auxiliares que permitieron controlar y simular el robot, además de obtener funcionalidades en el código que permitieron obtener el comportamiento deseado del sistema. En la Tabla 2.23 se enumeran y se detalla cómo fue empleada cada una.

Tabla 2.23 Descripción de uso de diversas herramientas en la programación y simulación del robot

Herramienta utilizada	Descripción de uso
Sensor_msgs.msg	Librería de Python en donde se definen mensajes comúnmente usados por sensores, en donde aquellos mensajes están adecuados para ser enviados entre nodos mediante tópicos en ROS. Para el robot se empleó el mensaje de estado de articulación, que presenta un formato que permite registrar posición, velocidad y carga aplicada a la articulación.
Dynamixel_sdk	Librería elaborada por el proveedor de los motores seleccionados. Se utilizaron funciones en Python que permiten la escritura y lectura de datos en la tabla de control en memoria de los motores.
Rospy	Librería de Python para utilizar ROS, facilitando el uso de tópicos, servicios, etc.
Exportador de Solidworks a URDF	No fue utilizado en la programación, pero permitió exportar el modelo 3D en formato URDF para la simulación.
Gazebo	Empleado para establecer las interfaces requeridas para la simulación.
Rviz	Herramienta de visualización para ROS empleada en simulación.
Moveit	Empleado en simulación para la planificación de trayectoria de las partes del robot al moverse de una posición a otra.
Pygame	Librería de Python empleada para el diseño de la cara del robot visualizada por pantalla.

Adicionalmente, se determinó un diagrama de funcionamiento conciso respecto al movimiento de la estructura, mostrado en la Figura 2.22, de tal manera que este sea plasmado en la programación del sistema mecatrónico diseñado.

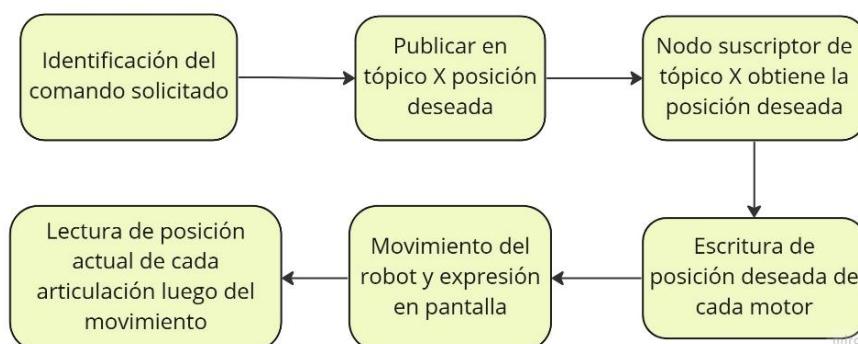


Figura 2.22 Esquema de funcionamiento del sistema

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En el presente capítulo se describe el diseño del compañero robótico para niños hospitalizados, detallando las piezas empleadas y la configuración final de articulaciones con el fin de obtener la movilidad requerida. Adicionalmente, se muestra el análisis de elementos finitos para conjuntos de piezas y elementos de sujeción que soportan cargas críticas.

Además, se describe la programación y el control empleado en el sistema a partir de la descripción de la arquitectura desarrollada en ROS y el diseño de controladores para los actuadores, respectivamente. Finalmente, se realiza una descripción breve del proceso de manufactura de las piezas, así como un análisis global de costos.

3.1 Diseño mecánico del robot

El compañero robótico fue diseñado considerando motores, componentes electrónicos, cables de conexión y alimentación, y veinte piezas. Para la unión entre aquellos componentes, a excepción de los cables, se utilizan tres formas de acoplamiento enlistadas a continuación y ejemplificadas desde la Figura 3.1 a la Figura 3.3. En todos los casos se hace uso de tornillos de sujeción M2 o M2.5 según corresponda.

- Sujeción de pieza a un eje de motor, permitiendo el movimiento de aquella pieza.
- Sujeción entre piezas en donde el tornillo pasa libremente a través de la primera pieza y al presionarse contra la segunda forma la rosca en el material.
- Sujeción de un motor a una pieza tal que el motor no tenga movimiento relativo a la pieza. El motor se sujetó en agujeros que no corresponden a su eje de rotación.

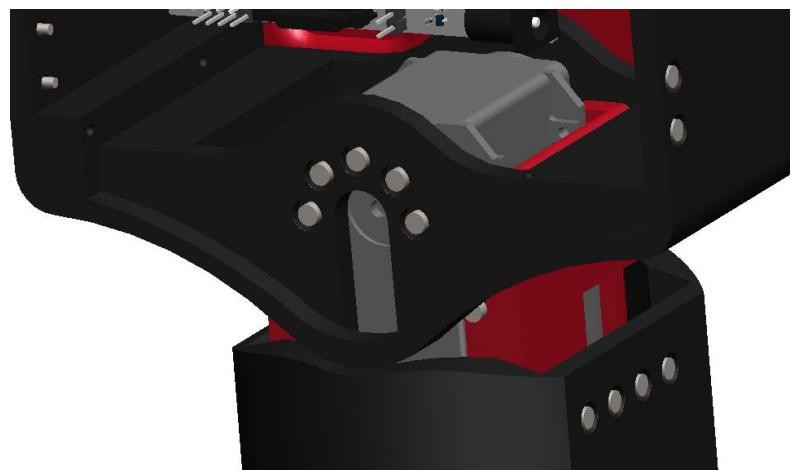


Figura 3.1 Sujeción de pieza móvil con motor

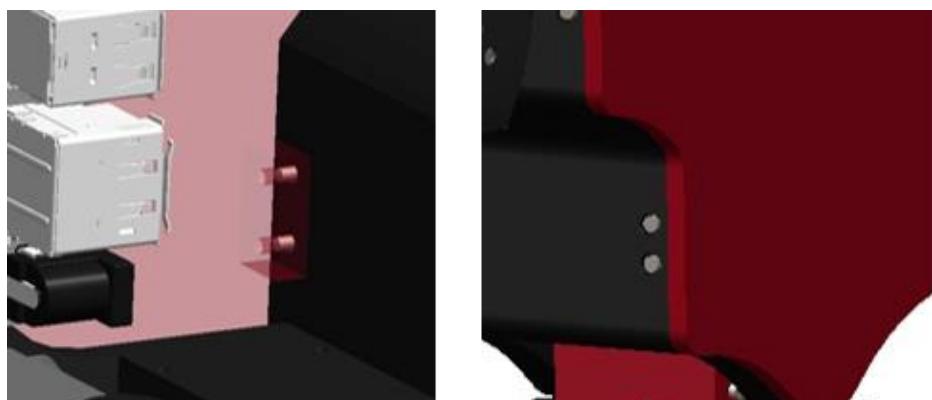


Figura 3.2 Sujeción entre piezas



Figura 3.3 Sujeción de motor fijo respecto a pieza

En la Figura 3.4 se indica la distribución de las diversas piezas diseñadas para el robot. Cabe destacar que las piezas de base inferior y superior, en conjunto con la

batería y un motor, conforman el contrapeso. Aquel conjunto de partes presenta una masa total cercana a los 3 kg.

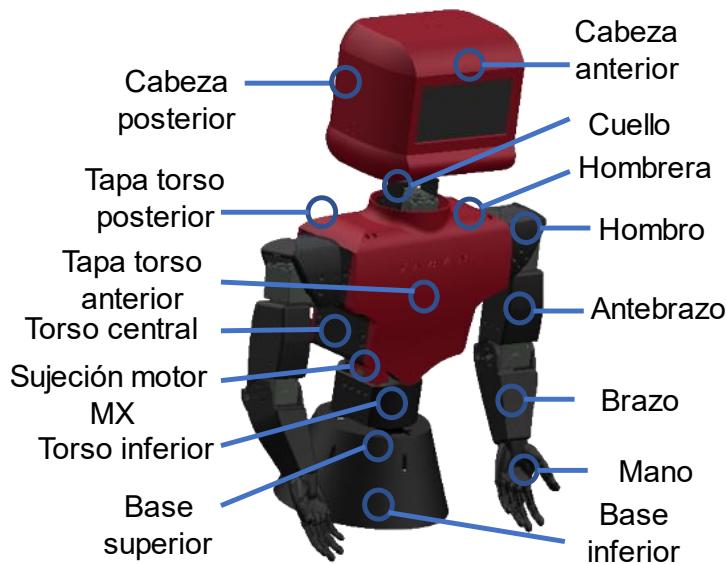


Figura 3.4 Diseño 3D renderizado del robot indicando cada una de sus piezas

Adicionalmente, en la Figura 3.5 se muestra el diseño final del compañero robótico mostrando la ubicación de cada una de las articulaciones en base a los números identificadores definidos en la Tabla 2.6. Se debe considerar que ciertos motores admiten contemplar dos articulaciones en un mismo actuador, por lo que en la ilustración existen números relacionados con un mismo motor.

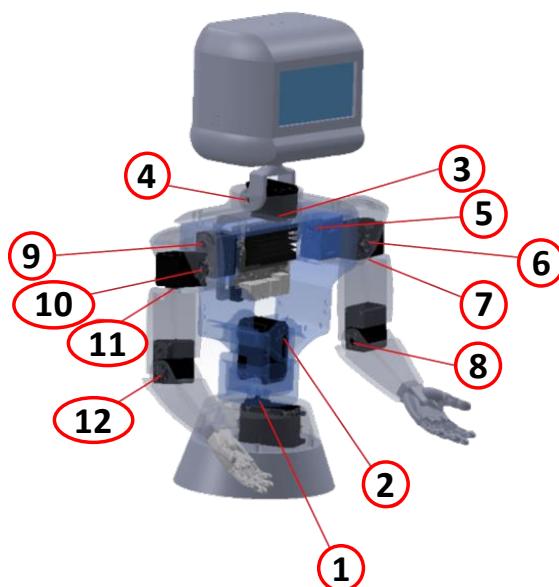


Figura 3.5 Ubicación de las articulaciones en el diseño final

Posteriormente, se realizó la construcción del prototipo del compañero robótico a partir del diseño 3D realizado. El prototipo se muestra en la Figura 3.6.



Figura 3.6 Prototipo del compañero robótico para niños hospitalizados

En la Figura 3.7 se visualiza una rutina de movimiento configurada en el prototipo del compañero robótico con el fin de demostrar su funcionamiento. El video de aquella rutina se puede visualizar en el enlace disponible en el APÉNDICE I. Por otro lado, los planos de las piezas se encuentran en el APÉNDICE E.

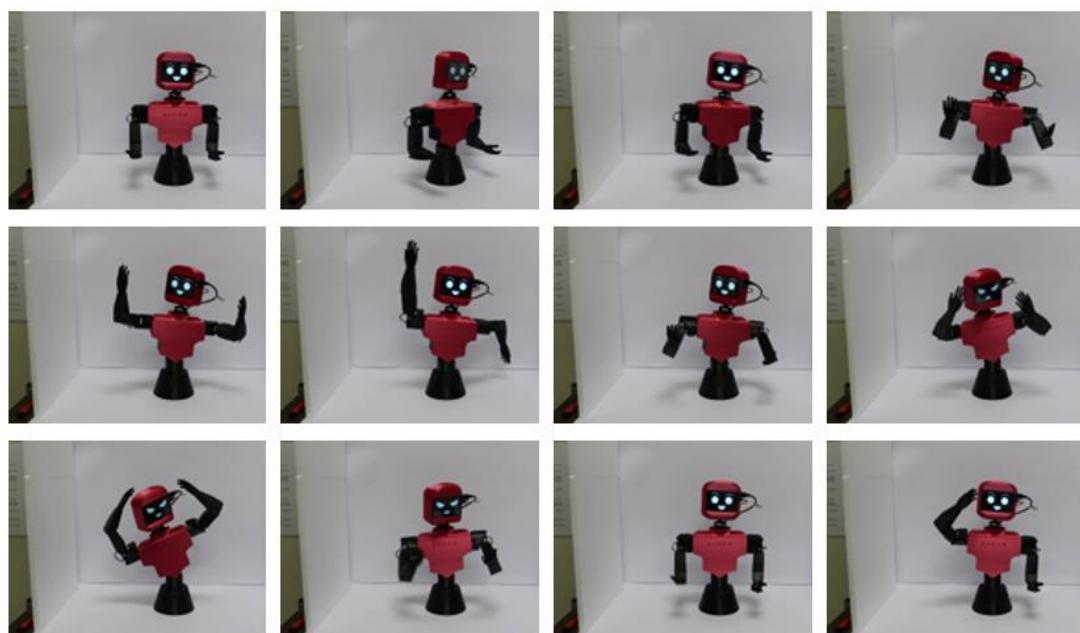


Figura 3.7 Secuencia de movilidad del robot

3.1.1 Análisis de elementos finitos de partes críticas

En la estructura del robot no todos los elementos se someten a las mismas cargas, ya sea por los torques ejercidos por los actuadores adyacentes o el peso de otras piezas. Por ello, el análisis de elementos finitos se realizó en las piezas adyacentes a las articulaciones críticas descritas en la Figura 2.5. Concretamente, las piezas analizadas fueron: torso inferior, torso central, hombro, y cuello; en conjunto con elementos de sujeción relacionados a las articulaciones de interés.

Se consideraron como cargas al peso y el torque asociados con cada articulación analizada, con base en la información presentada en la Tabla 2.8 y la Tabla 2.9. En el análisis se busca determinar si existe falla en algún elemento bajo carga estática, considerando que el material de las piezas es PLA y el de los tornillos es acero de bajo carbono SAE 1010. En el APÉNDICE F se presentan imágenes con información sobre esfuerzos de Von Mises, deformaciones, y factores de seguridad de las piezas analizadas. No obstante, en la Tabla 3.1 se resumen aquellos resultados.

Tabla 3.1 Valores críticos del análisis de elementos finitos

Conjunto de piezas	Menor factor de seguridad	Mayor esfuerzo de Von Mises (MPa)	Mayor deformación (mm)
Hombro	2.0	0.32	0.0047
Cuello	0.57	0.15	0.0050
Torso central	72.9	0.45	0.0070
Torso inferior	4.0	0.08	0.0037

3.1.2 Movilidad del robot

Considerando el análisis cinemático realizado previamente, se determinaron los rangos de movimiento de cada articulación del compañero robótico. Para ello se utilizaron herramientas de simulación, como se muestra en la Figura 3.8, que permitieron manipular el diseño 3D del robot y explorar en cuáles puntos colisionaban las partes, de tal manera que se definan los límites de movimiento.

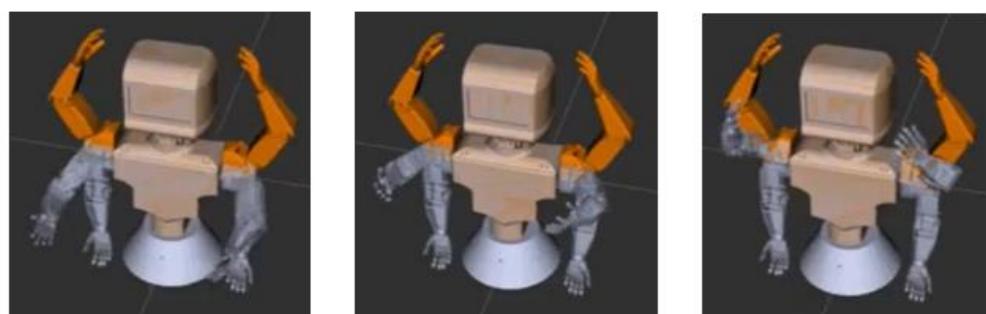


Figura 3.8 Simulación de funcionamiento del compañero robótico

En la Tabla 3.2 se resumen los rangos de movimiento de todas las articulaciones considerando las limitaciones del diseño mecánico.

Tabla 3.2 Rango de movimiento de cada articulación

Cadena Cinemática	Articulación	ID	Rango de Movimiento [°]	
Cadera	Cadera	1	-60	+60
	Torso Inferior	2	-45	+45
Cabeza	Cuello Inferior	3	-25	+25
	Cuello Superior	4	-30	+15
Brazo Derecho	Hombro Superior	5	-30	+90
	Hombro Inferior	6	0	+60
	Antebrazo	7	-90	+90
	Codo Derecho	8	0	+90
Brazo Izquierdo	Hombro Superior	9	-30	+90
	Hombro Inferior	10	0	+60
	Antebrazo	11	-90	+90
	Codo Izquierdo	12	0	+90

3.1.3 Espacio de trabajo del compañero robótico

Desde la Figura 3.9 hasta la Figura 3.11 se indica el espacio de trabajo del compañero robótico. Se muestra en diversas perspectivas de tal manera que se pueda percibir, en ilustraciones de dos dimensiones, todo el conjunto tridimensional de puntos que alcanzan los efectores finales del robot. El espacio de trabajo se define en las imágenes como el área contenida por las curvas de distintos colores.

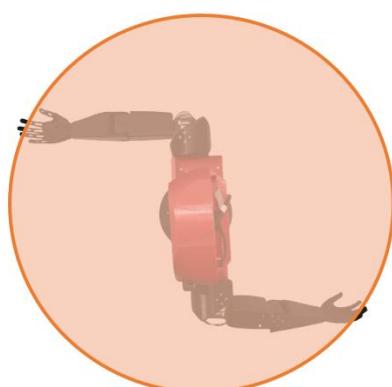


Figura 3.9 Vista superior del espacio de trabajo del robot

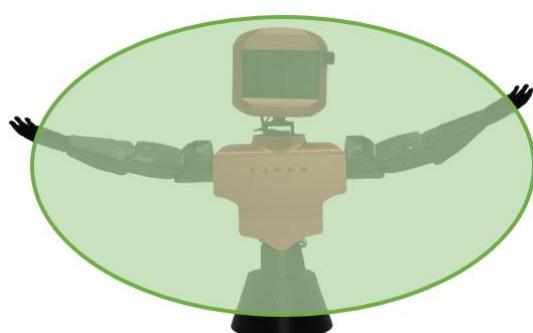


Figura 3.10 Vista frontal del espacio de trabajo del robot

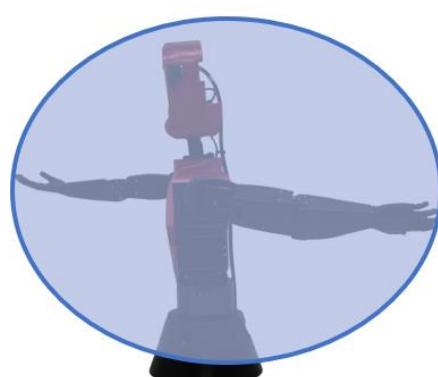


Figura 3.11 Vista lateral del espacio de trabajo del robot

3.2 Programación en ROS

La programación del funcionamiento del compañero robótico se realizó siguiendo la lógica mostrada en el diagrama de flujo de la Figura 3.12. En el APÉNDICE H se detalla información sobre el repositorio en donde se almacena el código desarrollado.

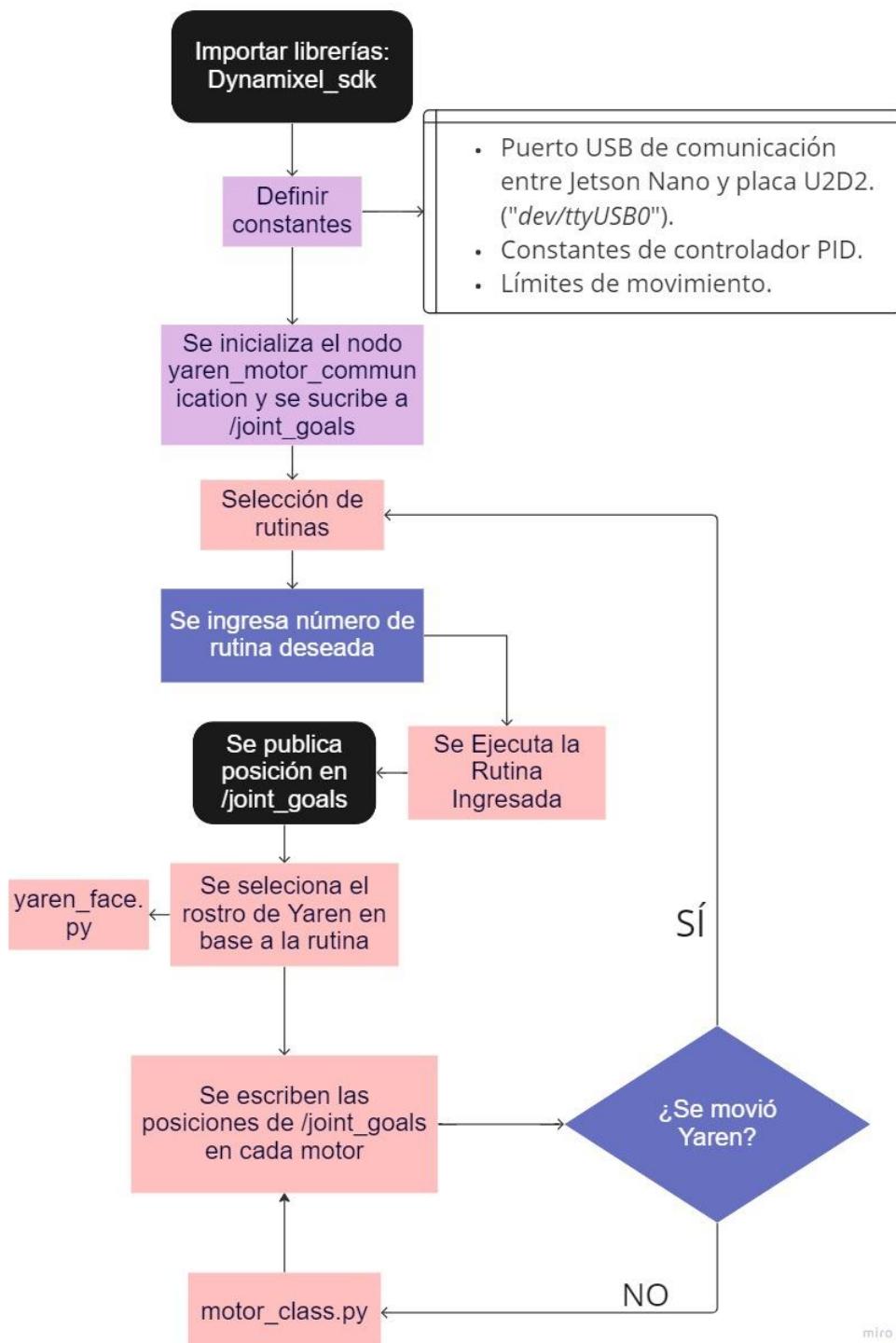


Figura 3.12 Diagrama de flujo de la programación del robot

En la Figura 3.13 se muestran los nodos activos y los tópicos relacionados a aquellos nodos en un instante determinado del funcionamiento del prototipo del compañero robótico.

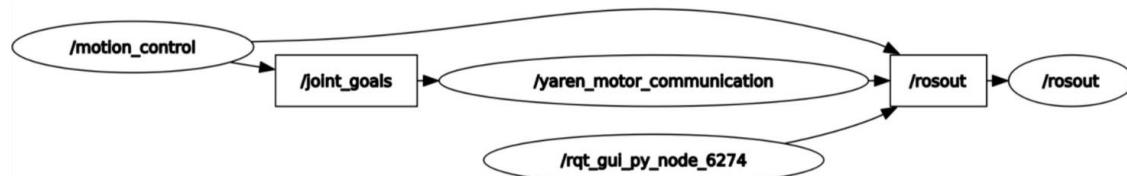


Figura 3.13 Diagrama de nodos activos y tópicos durante el funcionamiento del robot

3.3 Esquema eléctrico del compañero robótico

Considerando la arquitectura de comunicación propuesta y los diversos componentes electrónicos seleccionados se desarrolló el esquemático del compañero robótico, el cual se detalla en el APÉNDICE G.

En la Figura 3.14 se detalla la ubicación de cada uno de los componentes electrónicos seleccionados respecto al modelo del robot. Se indica dentro de cuál pieza se encuentran cada uno de ellos, siendo el torso central la parte en donde la mayor cantidad de componentes residen. Además, se muestra la simbología de las conexiones entre componentes mediante líneas de colores.

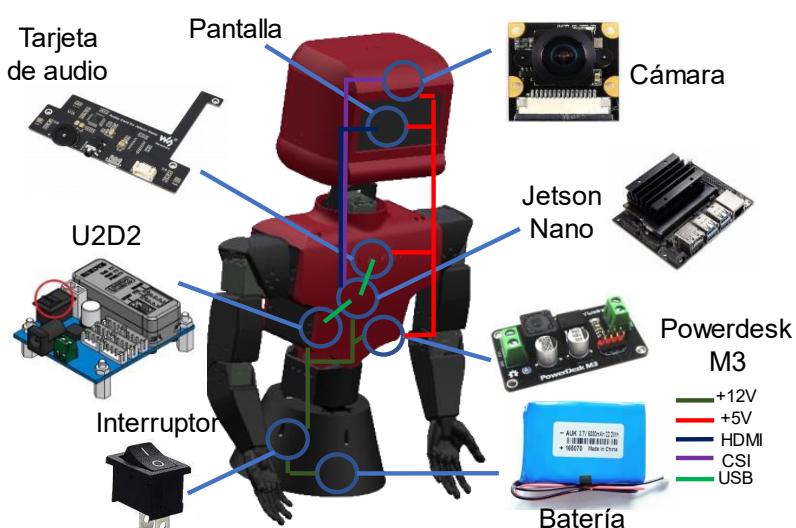


Figura 3.14 Conexiones de componentes considerando su ubicación en el modelo del robot

3.4 Controladores PID de posición para los motores

Para cada articulación empleada en el robot se realizó el diseño de un controlador PID en función de distintos índices de desempeño asociados a las respuestas deseadas de los motores. Debido a que la configuración de las constantes del controlador incluye conversiones internas en el sistema del motor, en la Tabla 3.3 se especifican las constantes de los controladores después de la conversión realizada.

Tabla 3.3 Constantes de controladores

ID de articulación	Motor	Constante proporcional	Constante integral	Constante derivativa
1	MX-106R	1.563	0.0011	187.50
2	MX-106R	2.031	0.0015	875.00
3	2XC430-W250	1.172	0.0031	62.50
4		1.953	0.0015	125.00
5	XC430-W240	2.734	0.0046	312.50
6	2XC430-W250	1.953	0.0015	156.25
7		1.172	0.0011	218.75
8	XC430-W240	1.953	0.0038	312.50
9	XC430-W240	2.734	0.0046	312.50
10	2XC430-W250	1.953	0.0015	156.25
11		1.172	0.0011	218.75
12	XC430-W240	1.953	0.0038	312.50

En las imágenes a continuación se muestran las respuestas al escalón considerando los controladores PID diseñados, de un modelo de motor correspondiente a alguna de las articulaciones citadas en la Tabla 3.3.

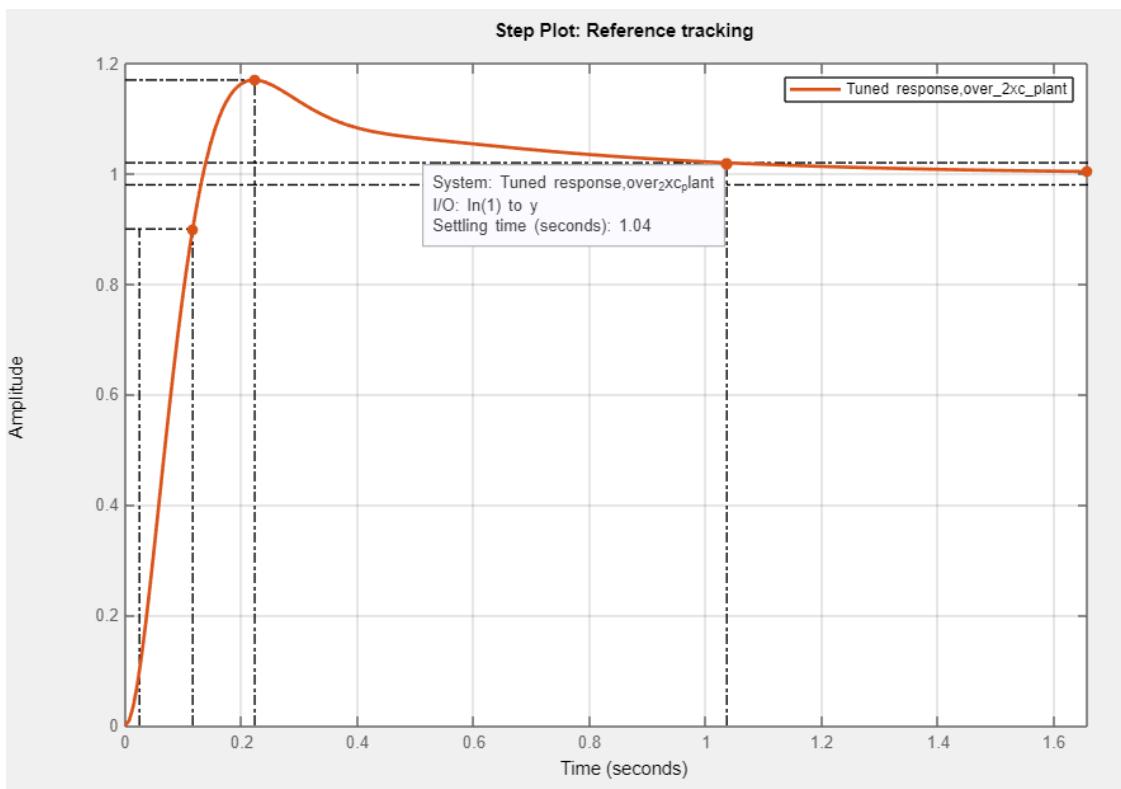


Figura 3.15 Respuesta al escalón del motor 2XC430-W250 en la articulación 7 empleando el controlador PID diseñado

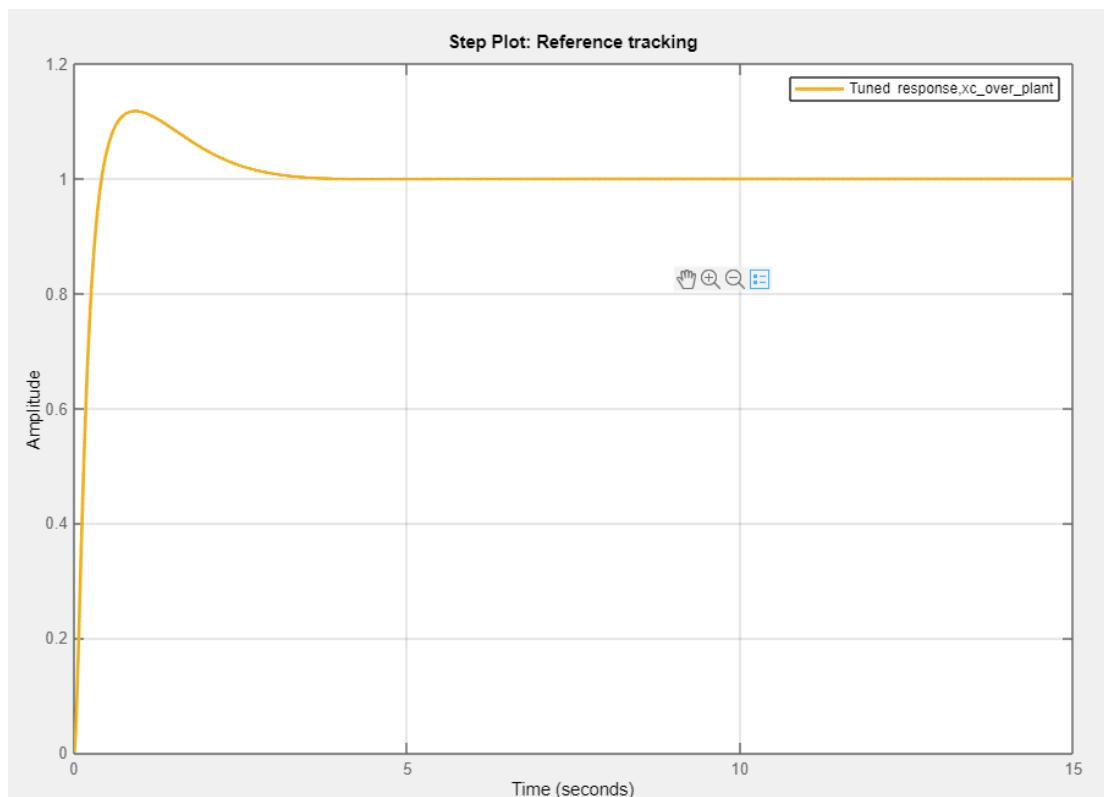


Figura 3.16 Respuesta al escalón del motor XC430-W240 en la articulación 5 empleando el controlador PID diseñado

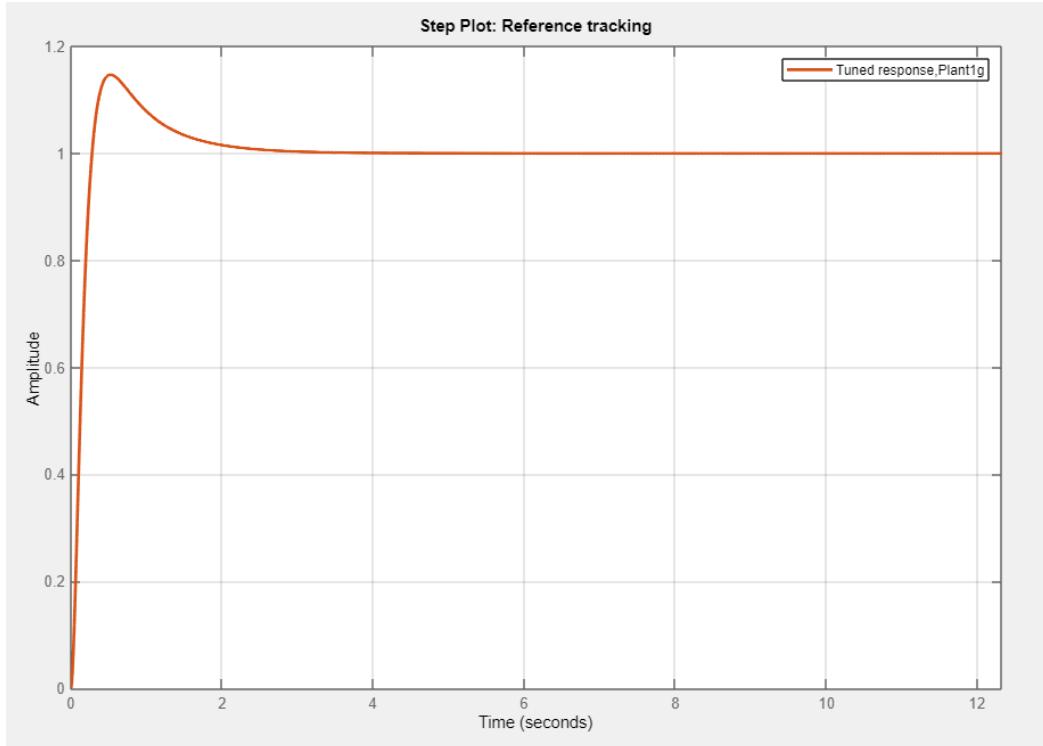


Figura 3.17 Respuesta al escalón del motor MX-106R en la articulación 2 empleando el controlador PID diseñado

En las imágenes se aprecia que existe un pequeño sobrenivel porcentual en las respuestas de todos los motores incluso con los controladores PID. A pesar de que este comportamiento no es deseado, el sobrenivel no excede el 20% del valor final y, considerando que no se requiere de rigurosa exactitud en el movimiento, este factor no desestima a los controladores diseñados.

Por otro lado, se obtienen tiempos de estabilización menores a tres segundos y tiempos de levantamiento cercanos al segundo, por lo que las respuestas se aproximan al comportamiento deseado.

3.5 Manufactura de piezas

Para construir el prototipo del compañero robótico se imprimieron las piezas diseñadas, seleccionando como material al PLA debido a su bajo costo y facilidad de adquisición en el mercado local. Además, el PLA cuenta con propiedades mecánicas suficientes tal que las piezas no fallen bajo las condiciones de trabajo del robot. Se emplearon dos impresoras: Ender-3 Max y Ender-3 V2.

Se implementaron las configuraciones mostradas en la Tabla 3.4 para todas las piezas, según recomendaciones generales para la impresión 3D.

Tabla 3.4 Configuraciones de Impresoras 3D

Boquilla [mm]	Potencia consumida [W]	Temperatura de extrusor [°C]	Temperatura de cama [°C]	Soporte
0.4	350	215	65	Densidad: 5% Estructura: Normal Angulo: 35 °C Líneas de Pared: 2 Adherencia: Falda

En las tablas detalladas a continuación se describen los parámetros específicos para la impresión de cada pieza del compañero robótico. El tiempo de impresión y la cantidad de material son dependientes del porcentaje de relleno, la calidad, y las paredes determinadas.

En las piezas en donde se disminuyen los milímetros de calidad en realidad se mejora el acabado; en aquellos casos se realizan aquellas disminuciones en caso de que la buena calidad de determinada pieza sea un factor de interés en el prototipo. Por otro lado, el porcentaje de relleno es aumentado con el fin de incrementar la densidad de piezas pequeñas que soportan cargas críticas.

En la Tabla 3.5 se indican los parámetros de impresión para las piezas correspondientes a la sección de la cadera del compañero robótico.

Tabla 3.5 Parámetros de impresión para piezas de la cadera

Pieza	Calidad [mm]	Paredes	Relleno [%]	Tiempo de impresión (min)	Cantidad de material [g]
Tapa en cadera	0.2	4	20	595	58
Cadera inferior	0.2	4	20	1083	119
Cadera superior	0.2	4	20	1367	160
Torso inferior	0.2	4	20	619	78
Sujeción motor MX-106T	0.2	4	50	522	67

En la Tabla 3.6 se indican los parámetros de impresión para las piezas correspondientes a la sección del torso central del compañero robótico.

Tabla 3.6 Parámetros de impresión para piezas del torso central

Pieza	Calidad [mm]	Paredes	Relleno [%]	Tiempo de impresión (min)	Cantidad de material [g]
Torso superior	0.2	4	20	2325	267
Tapa delantera	0.2	4	20	745	154
Tapa posterior	0.2	4	20	1457	257
Hombrera	0.2	4	20	794	130
Sujeción para Jetson	0.2	4	50	184	18

En la Tabla 3.7 se indican los parámetros de impresión para las piezas asociadas a la cabeza del compañero robótico.

Tabla 3.7 Parámetros de impresión para piezas de la cabeza

Pieza	Calidad [mm]	Paredes	Relleno [%]	Tiempo de impresión (min)	Cantidad de material [g]
Cuello	0.12	4	100	521	34
Cabeza posterior	0.2	4	20	2703	344
Cabeza anterior	0.2	4	20	2205	282

En la Tabla 3.8 se indican los parámetros de impresión para las piezas correspondientes a los brazos del robot. Se indica la información de forma general ya que los brazos izquierdo y derecho están compuestos de las mismas piezas.

Tabla 3.8 Parámetros de impresión para piezas de los brazos

Pieza	Calidad [mm]	Paredes	Relleno [%]	Tiempo de impresión (min)	Cantidad de material [g]
Hombro	0.2	4	20	542	63
Antebrazo	0.2	4	20	638	73
Brazo	0.2	4	20	448	49
Mano	0.12	4	100	952	56

Con base en la información presentada en las tablas, se aprecia que el torso central y la cabeza son las secciones del cuerpo del compañero robótico que mayor material y tiempo de impresión requieren.

3.6 Análisis de costos

En la Tabla 3.9 se detallan los costos de cada componente considerado para el diseño mecánico, el diseño eléctrico y de control, manufactura de piezas; además de varios gastos asociados a la adquisición de componentes y costo por hora de trabajo en el diseño y ensamble del robot.

Además, se aprecia en la Tabla 3.9 que el tipo de rubro de mayor costo es el mecánico, debido a la cantidad de actuadores seleccionados y sus precios. No obstante, estos resultan convenientes para el proyecto ya que permiten contar con un control robusto del movimiento de las piezas, por lo que se garantiza seguridad en el entorno de trabajo.

Entre los distintos elementos considerados para el costo del proyecto, es preciso describir el cálculo del precio a pagar por concepto de energía eléctrica consumida durante las impresiones de las piezas. En la sección previa se determinó que el tiempo total de impresión es de 338 horas; además, en la Tabla 3.4 se indica que la potencia consumida por las impresoras es de 350 W. En consecuencia, el consumo de energía en kWh se determina con la ecuación (3.1).

$$\text{Consumo kWh} = t_{\text{impresión}} \cdot P_{\text{consumida}} = 338 \text{ h} \cdot 350 \text{ W} = 118.3 \text{ kWh} \quad (3.1)$$

En Ecuador se estipula una tarifa de \$0,1047 por kWh si el consumo no excede los 300 kWh [42]. Por lo tanto, según lo obtenido en la ecuación (3.1), aquella tarifa aplica para el presente caso y se emplea en la ecuación (3.2) para determinar el costo por consumo de energía.

$$\text{Costo}_e = \text{Consumo kWh} \cdot \text{Tarifa} = 118.3 \text{ kWh} \cdot \frac{\$0,1047}{1 \text{ kWh}} = \$12,39 \quad (3.2)$$

Tabla 3.9 Cotización de rubros

Tipo de rubro	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio unitario (USD)	Precio total (USD)
Mecánico	Elementos de sujeción (Tornillos ISO M2 y M2.5)	u	1	\$50,00	\$50,00
	Motor Robotis Dynamixel 2XC430-W250-T	u	3	\$259,90	\$779,70
	Motor Robotis Dynamixel XC430-W240-T	u	4	\$119,90	\$479,60
	Motor Robotis Dynamixel MX-106R	u	2	\$599,90	\$1199,80
Eléctrico y de control	NVIDIA Jetson Nano	u	1	\$149,00	\$149,00
	Dynamixel U2D2	u	1	\$32,10	\$32,10
	Placa para alimentación de U2D2	u	1	\$19,00	\$19,00
	Pantalla IHANFO LCD de 5 pulgadas	u	1	\$32,33	\$32,33
	Cable HDMI de 1.5 m	u	1	\$4,75	\$4,75
	Tarjeta de audio Waveshare para Jetson Nano	u	1	\$25,99	\$25,99
	Cámara IMX219-160	u	1	\$29,15	\$29,15
	Cables de conexión (USB 2.0, TTL, RS485, con distintos puertos), Jack de alimentación, interruptor	u	1	\$30,00	\$30,00
	Batería Li-ion 12 V 5600 mAh	u	1	\$43,45	\$43,45
	Cargador de batería de Li-ion	u	1	\$29,13	\$29,13
Manufactura	Convertidor de voltaje YwRobot PowerDesk M3	u	1	\$1,45	\$1,45
	PLA para impresión de piezas	kg	2.45	\$23,00	\$56,35
	Energía eléctrica consumida por impresoras 3D	kWh	118.3	\$0,1047	\$12,39
Gastos varios	Tiempo para el ensamble del robot	h	6	\$6,00	\$36,00
	Rubro por tiempo de diseño del robot	u	1	\$200,00	\$200,00
	Rubro por envío de componentes	u	1	\$200,00	\$200,00
Costo total					\$3.410,19

Adicionalmente, se consideró incorporar el monto de \$200 en el costo total por motivo de cobro de las horas de diseño dedicadas al proyecto. En la ecuación (3.3) se indica implícitamente que se contempla un total de 800 horas de diseño y,

considerando un pago de \$8,00 por hora para dos diseñadores, se determina el costo total por concepto de diseño del robot.

$$Costo_d = 2 \text{ diseñadores} \cdot 16 \text{ semanas} \cdot \frac{25 \text{ h}}{1 \text{ semana}} \cdot \frac{\$ 8}{1 \text{ h}} = \$ 6.400 \quad (3.3)$$

Por consiguiente, luego de la venta de 32 unidades se cubre el costo de diseño y, a partir de aquel punto, el valor de \$200 representaría parte de la ganancia. Si se establece el 2.5% del costo total (\$85,25) como la ganancia base, luego de recuperar el monto por diseño se obtendría una ganancia fija de \$285,25 por unidad (8.36%) y un precio de venta de \$3.495,44.

El compañero robótico presentado tiene un menor precio de venta respecto a la mayoría de otros robots sociales con entornos de trabajo y problemáticas similares, los cuales se enlistan en la Tabla 3.10. A pesar de que las demás opciones cuentan con más funcionalidades, el diseño y presupuesto del robot propuesto contemplan componentes que le permiten equiparar las capacidades de modelos existentes, de tal manera que se conserva la ventaja económica.

Tabla 3.10 Comparativa con diseños de propósito similar

Nombre de diseño	Número de funcionalidades	Grados de libertad	Precio de venta (USD)
Diseño propuesto	2	12	\$3.495,44
Poppy Torso [43]	2	13	\$6.714,45
iPal [44]	10+	24	\$4.120,00
Sota [45]	6+	8	\$1.566,05
Pepper [46]	10+	20	\$14.000,00

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En esta sección se describen las implicaciones de los resultados obtenidos en relación con los objetivos planteados inicialmente, denotando la importancia del trabajo realizado. Además, se enlistan los aspectos en los que el sistema mecatrónico presentado se puede mejorar o complementar en futuros trabajos.

4.1 Conclusiones

- Se diseñó un sistema mecatrónico que permite el acompañamiento constante de niños hospitalizados en sus procesos de recuperación mediante interacciones a través de movimientos de las diversas partes de su estructura. Invita al usuario al contacto físico o a la imitación de las poses realizadas, disminuyendo de esta manera el aislamiento con el que debe lidiar. Además, a partir de las expresiones mostradas por pantalla, el compañero robótico empatiza con el infante pudiendo imitar su estado de ánimo o mostrar gestos que contribuyan a restablecer su bienestar.
- Se desarrolló un compañero robótico considerando las normativas para la fabricación de dispositivos médicos a partir de una metodología de diseño iterativa tal que se obtuvo un modelo seguro para el uso de infantes y con una apariencia y funcionamiento acorde a su espacio de trabajo. Para ello, se obtuvo un control robusto de movimiento de las partes, priorizando un desplazamiento suave a partir de una correcta sintonización de los controladores PID determinados para cada motor. Adicionalmente, se seleccionaron actuadores que permitieron brindar el torque suficiente para el movimiento de las piezas sin desarrollar comportamientos dinámicos peligrosos en caso de impacto con el infante. Incluso en el proceso de modelado de piezas se garantizó el desarrollo de un diseño que carezca de libre acceso a los componentes electrónicos, ofreciendo una alternativa lúdica que no

atente contra la integridad del infante incluso cuando este pueda realizar acciones peligrosas inconscientemente.

- Se diseñó una estructura humanoide de doce grados de libertad, cuyo dimensionamiento se basó en mediciones antropométricas y el modelado de sus partes se realizó a partir de criterios estéticos de diseño que permitan al robot asemejarse a su usuario sin obviar que su apariencia debe ser amigable para llamar su atención. Además, su alto grado de movilidad le provee la capacidad de interactuar ergonómicamente con el infante y contar con un espacio de trabajo similar a una semiesfera de radio equivalente al largo de los brazos.
- Con el desarrollo de la programación en ROS se estableció un sistema modular, debido a la presencia de paquetes asociados a funcionalidades en específico, y escalable, pues presenta la posibilidad de incorporar nuevos paquetes con tópicos que permitan recopilar información de sensores que aún no han sido considerados en el control y lógica de funcionamiento del compañero robótico.
- Se implementó un diseño electrónico que permite un funcionamiento ágil y facilita la incorporación de nuevos componentes debido a la adecuada selección de un microcomputador con recursos computacionales y número de puertos adecuados, tal que se logra el procesamiento de información proveniente de varios sensores.
- Se validó el desplazamiento adecuado de las partes del robot mediante simulación y análisis de colisiones, además de verificar el correcto desarrollo de la lógica de control y programación a partir de la implementación del prototipo del compañero robótico, el cual desarrolló diversas rutinas de movimiento.
- Se manufacturaron las piezas de la estructura del robot considerando los parámetros de impresión adecuados según la calidad deseada y la resistencia requerida debido a las cargas mecánicas que deben soportar.
- El diseño mecánico fue validado mediante un análisis de elementos finitos de las piezas relacionadas con las articulaciones críticas, las cuales se encuentran

sometidas a cargas mayores. Se determinó que la estructura tiene un factor de seguridad por falla estática de 0.59 en una región específica del cuello, pero para las demás piezas el factor es superior a 2. A pesar de ello, no existen deformaciones considerables y el cuello no presenta falla estática durante el funcionamiento real debido a que las cargas consideradas en el análisis fueron sobredimensionadas. Por lo tanto, el material utilizado, los elementos diseñados, y los elementos de sujeción seleccionados son adecuados para la aplicación.

- Se evidenció la factibilidad de inversión del robot propuesto por parte de las instituciones sanitarias, debido a la ventaja competitiva relacionada con su bajo costo por sobre otros productos sustitutos que presentan funcionalidades y nivel de interacción similares.

4.2 Recomendaciones

- Se plantea la modificación de la articulación del cuello, a partir del diseño de un mecanismo que permita utilizar el mismo actuador con dos ejes de rotación, de tal manera que las piezas correspondientes a la cabeza y el cuello se encuentren cercanas y se mejore el aspecto estético de aquella sección del robot.
- Para el prototipo realizado se contempló desarrollar la programación y control requerido para el movimiento de las partes del robot. No obstante, debido a que en el diseño electrónico se contempla el uso de componentes adicionales para definir el costo total aproximado del diseño final, se plantea a futuro aprovechar aquellos dispositivos para el desarrollo de funcionalidades interactivas adicionales en donde se procesen imágenes y exista comunicación verbal con el infante.
- Se propone realizar una nueva iteración de diseño de las piezas sometidas a cargas críticas, explorando opciones adicionales de geometría y dimensiones de tal manera que se reduzcan los concentradores de esfuerzos y la estructura presente un mayor factor de seguridad. Además, se podría analizar la modificación de parámetros de impresión con el fin de obtener menores esfuerzos.

- Se recomienda implementar un sistema de detección de impacto focalizado en las extremidades superiores del compañero robótico. Para ello se podrían implementar sensores piezoelectricos que, a partir de la alteración de las señales de aceleración o presión percibidas, indique al sistema de control que no prosiga con el movimiento y vuelva lentamente a su posición previa. Esta funcionalidad, a pesar de no ser interactiva y contribuir a la solución de la problemática expuesta, brinda mayor seguridad al infante mientras utiliza al robot.
- En caso de adicionar componentes o baterías al diseño presentado, se recomienda situarlas en la base del robot tal que formen parte del contrapeso y contribuyan a proporcionar estabilidad a la estructura. Además, también se podría situar al compañero robótico sobre una capa de caucho o cualquier otro material que proporcione la fricción suficiente para que cuando ocurran movimientos no existan desplazamientos relativos de su base respecto a la superficie en donde se encuentra situada.
- Se propone mejorar la protección de los componentes internos a partir de modificaciones en las piezas tal que se acoplen de mejor manera entre ellas. En consecuencia, se reducirían los espacios por los que algún líquido o polvo puede acceder, preservando en mayor medida la pulcritud requerida para un dispositivo médico.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. L. Serrano, «Herramientas telemáticas en aulas hospitalarias Una experiencia educativa en la Región de Murcia,» Universitat de les Illes Balears, Murcia, 2013.
- [2] S. Y. Kahana, N. C. Feeny, E. A. Youngstrom y D. Drotar, «Posttraumatic stress in youth experiencing illnesses and injuries: An exploratory meta-analysis,» *Traumatology*, vol. 12, nº 2, pp. 148-161, 2006.
- [3] J. S. Barres y V. N. Rodríguez, «Estudio y diseño de centro de rehabilitación especializado en parálisis cerebral infantil, cantón Santa Elena, Ecuador,» Universidad de Guayaquil, Guayaquil, 2020.
- [4] S. Driggs, A. Díaz, J. Drigg, D. Samón y Y. Arias, «Intervenciones de rehabilitación en el paciente hospitalizado,» *Correo Científico Médico*, vol. 25, nº 4, 2021.
- [5] A. Fernández, «Estudio y diseño de un centro de rehabilitación física y pedagógica para niños, adolescentes y adultos mayores con capacidades especiales, Babahoyo,» Universidad de Guayaquil, Guayaquil, 2019.
- [6] A. C. Macías y E. Zambrano, «Importancia de la lectura infantil en los centros hospitalarios: caso Hospital Verdi Cevallos Balda Portoviejo, Manabí, Ecuador,» *Cognosis*, vol. 5, pp. 153-166, 2020.
- [7] H. H. Potes, «Tiempos de espera y satisfacción de los usuarios del área de terapia física y rehabilitación del hospital de niños Roberto Gilbert Elizalde,» Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Guayaquil, 2019.
- [8] L. Velásquez, Niños hospitalizados. Guía de intervención psicológica en pacientes infantiles, Lima: Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, 2014, pp. 1-35.
- [9] N. Herrero, «Hospitalización infantil: el niño y su familia,» Escuela Universitaria de Enfermería "Casa Salud de Valdecilla", Cantabria, 2014.
- [10] M. J. D. López, «Pedagogía Hospitalaria. Bases para la atención,» *Innovación Educativa*, vol. I, nº 23, p. 192, 2011.
- [11] J. y. M. F. Ortigosa, «Hospitalización Infantil: Repercusiones psicológicas.,» Biblioteca Nueva, Madrid, 2000.
- [12] J. L. Sánchez, «Herramientas Telemáticas en aulas hospitalarias,» Universitat de les Illes Balears, Palma de Mallorca, 2013.

- [13] H. L. Kurman, *La revolución de la impresión 3D*, USA: Ediciones Anaya Multimedia, 2014.
- [14] El Confidencial, «Un niño francés sin mano recibe una prótesis hecha con una impresora 3D,» 18 Agosto 2015. [En línea]. Disponible en: https://www.elconfidencial.com/tecnologia/2015-08-18/un-nino-frances-sin-mano-recibe-una-protesis-hecha-con-una-impresora-3d_974537/. [Último acceso: 14 Enero 2023].
- [15] Agencia Nacional de Regulación, Control y Vigilancia Sanitaria, «Resolución ARCSA-DE-026-2016-YMIH,» Guayaquil, 2016.
- [16] NQA, «ISO 13485: Sistemas de gestión de la calidad en productos sanitarios,» NQA, [En línea]. Disponible en: <https://www.nqa.com/es-ca/certification/standards/iso-13485>. [Último acceso: 1 Noviembre 2022].
- [17] TDV, «¿Qué es la IEC 60601? Equipos médicos eléctricos,» TDV, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.tdvct.com/hot-topics/hot-topics-medicals/que-es-la-iec-60601-equipos-medicos-electricos/>. [Último acceso: 1 Noviembre 2022].
- [18] J. Dawe, C. Sutherland, A. Barco y E. Broadbent, «Can social robots help children in healthcare contexts? A scoping review,» *BMJ Paediatr Open*, vol. 3, nº 1, 2019.
- [19] D. Logan, C. Breazeal, M. Goodwin, S. Jeong, B. O'Connell y D. Smith-Freedman, «Social robots for hospitalized children,» *Pediatrics*, vol. 144, nº 1, 2019.
- [20] S. Gouraguine, M. Qbadou y K. Mansouri, «Handwriting treatment and acquisition in dysgraphic children using a humanoid robot-assistant,» de *IEEE Global Engineering Education Conference, EDUCON*, Túnez, 2022.
- [21] J. Andrade-Altamirano, A. Parra-Astudillo, V. Robles-Bykbaev y N. Almeida-Solíz, «AsiRo-μ: A Multi-purpose Robotic Assistant for Educational Inclusion of Children with Multiple Disabilities,» de *AHFE Conferences on Human Factors in Software and Systems Engineering, Artificial Intelligence and Social Computing, and Energy*, 2021, Virtual, online, 2021.
- [22] M. Ali, A. Minoo, M. Khamooshi y A. Ali, «Conceptual design of a social robot for pediatric hospitals,» de *International Conference on Robotics and Mechatronics*, Teherán, 2016.
- [23] R. Kimura, N. Abe y N. H. A. Matsumura, «Trial of robot assisted activity using robotic pets in children hospital,» de *SICE Annual Conference*, Sapporo, 2004.

- [24] A. Shota, «Sciurus17 - A 17-DOF upper body humanoid robot running on ROS Noetic,» ROS, Noviembre 2021. [En línea]. Disponible en: <https://discourse.ros.org/t/sciurus17-a-17-dof-upper-body-humanoid-robot-running-on-ros-noetic/23064>. [Último acceso: 31 Octubre 2022].
- [25] N. Dávalos, «Primicias,» Primicias, 2 Noviembre 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.primicias.ec/noticias/tecnologia/robots-sociales-importantes-pandemia/>. [Último acceso: 31 Octubre 2022].
- [26] F. T. Movistar, «Noticias,» Fundación Telefónica Movistar, 3 Octubre 2015. [En línea]. Disponible en: <https://fundaciontelefonica.com.ec/noticias/willow-el-robot-terapeuta/>. [Último acceso: 31 Octubre 2022].
- [27] J. Hedberg, A. Soderberg y J. Tegehall, «How to design safe machine control systems - a guideline to EN ISO 13849-1,» SP Technical Research Institute of Sweden, Boras, 2011.
- [28] MTL Instruments Group plc, «An introduction to Functional Safety and IEC 61508,» MTL Instruments Group plc, 2002.
- [29] BSI, «Safety of machinery - General principles for design - Risk assessment and risk reduction (ISO 12100:2010),» BSI, 2011.
- [30] PILZ, «IEC 62061 – Nivel de integridad de la seguridad (SIL),» PILZ, [En línea]. Disponible en: <https://www.pilz.com/es-ES/support/knowhow/law-standards-norms/functional-safety/en-iec-62061>. [Último acceso: 18 Diciembre 2022].
- [31] Intertek, «Ensayos de Protección IP (Ingress Protection) en Productos de Iluminación: Norma IEC 60529,» Intertek, [En línea]. Disponible en: <https://www.intertek.es/iluminacion/ip-ingress-protection-iec-60529/>. [Último acceso: 18 Diciembre 2022].
- [32] D. A. Winter, Biomechanics and Motor Control of Human Movement, Waterloo, Ontario, Canada: University of Waterloo, 2009.
- [33] Robotis, «2XC430-W250,» [En línea]. Disponible en: <https://emanual.robotis.com/docs/en/dxl/x/2xc430-w250/>. [Último acceso: 5 Enero 2023].
- [34] Robotis, «XC430-W150,» [En línea]. Disponible en: <https://emanual.robotis.com/docs/en/dxl/x/xc430-w150/>. [Último acceso: 5 Enero 2023].

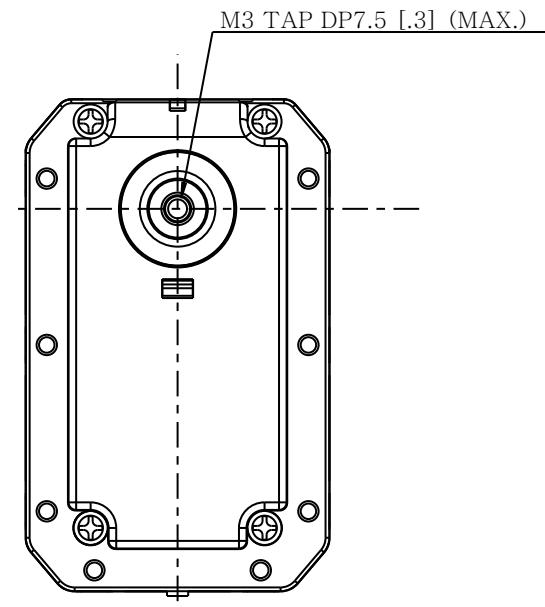
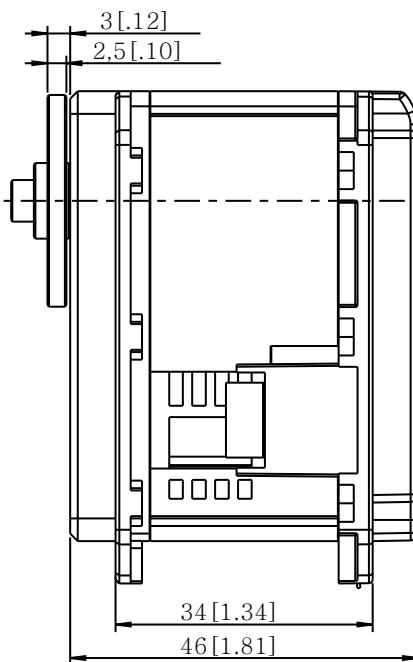
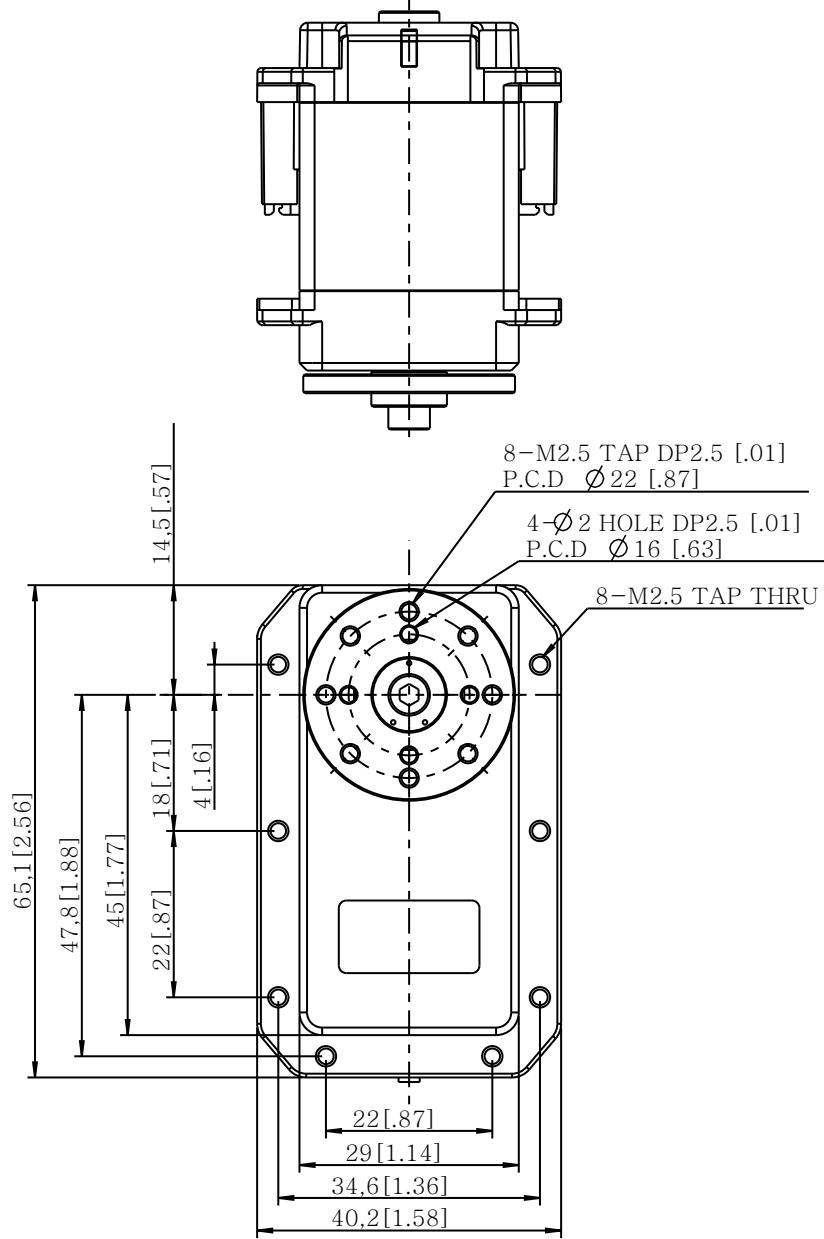
- [35] Robotis, «MX-106R, MX-106T (Protocol 2.0),» [En línea]. Disponible en: <https://emanual.robotis.com/docs/en/dxl/mx/mx-106-2/>. [Último acceso: 5 Enero 2023].
- [36] Waveshare, «IMX219-160 Camera, 160° FOV, Applicable for Jetson Nano,» [En línea]. Disponible en: <https://www.waveshare.com/imx219-160-camera.htm>. [Último acceso: 30 Enero 2023].
- [37] AliExpress, «Pantalla Táctil para Raspberry, Aparato con HDMI, 5 Pulgadas, 800 x 480, Color Negro, AIDA Pi 4, 3B, 3B, 2 BB, Pi JRP5015, Banana Pi,» IHANFO, [En línea]. Disponible en: https://es.aliexpress.com/item/1005004132936105.html?spm=a2g0o.order_list.order_list_main.31.4e50194dYgoJ3Y&gatewayAdapt=glo2esp. [Último acceso: 8 Enero 2023].
- [38] Waveshare, «Audio Card for Jetson Nano,» [En línea]. Disponible en: https://www.waveshare.com/wiki/Audio_Card_for_Jetson_Nano. [Último acceso: 30 Enero 2023].
- [39] NVIDIA Corporation, «Jetson Nano Developer Kit,» [En línea]. Disponible en: <https://developer.nvidia.com/embedded/jetson-nano-developer-kit>. [Último acceso: 8 Enero 2023].
- [40] Robotis, «U2D2 Power Hub,» [En línea]. Disponible en: https://emanual.robotis.com/docs/en/parts/interface/u2d2_power_hub/. [Último acceso: 8 Enero 2023].
- [41] U. Tochukwu, N. Zagorodna y D. Tamunomiebaka, «Effects of a PID Controller in Closed Loop Feedback System,» *International Journal of Scientific & Engineering Research*, vol. 9, nº 4, p. 1255, 2018.
- [42] «Ecuador, sexto en ranking de tarifas eléctricas residenciales, por debajo de Colombia y Perú,» *El Universo*, 21 Junio 2021.
- [43] Poppy Station, «POPPY TORSO: A VARIATION OF THE POPPY HUMANOID ROBOT,» 2016. [En línea]. Disponible en: <https://www.poppy-project.org/en/robots/poppy-torso/>. [Último acceso: 22 Enero 2023].
- [44] AvatarMind Robot Technology, «AvatarMind iPAL® Robot Family,» 2017. [En línea]. Disponible en: <https://www.ipalrobot.com/>. [Último acceso: 22 Enero 2023].

- [45] Vstone, «Sotaを使ったビジネスをお考えの皆様へ,» [En línea]. Disponible en: <https://sota.vstone.co.jp/home/>. [Último acceso: 22 Enero 2023].
- [46] Aldebaran - United Robotics Group, «Pepper,» [En línea]. Disponible en: <https://www.aldebaran.com/es/pepper>. [Último acceso: 22 Enero 2023].

APÉNDICES

APÉNDICE A

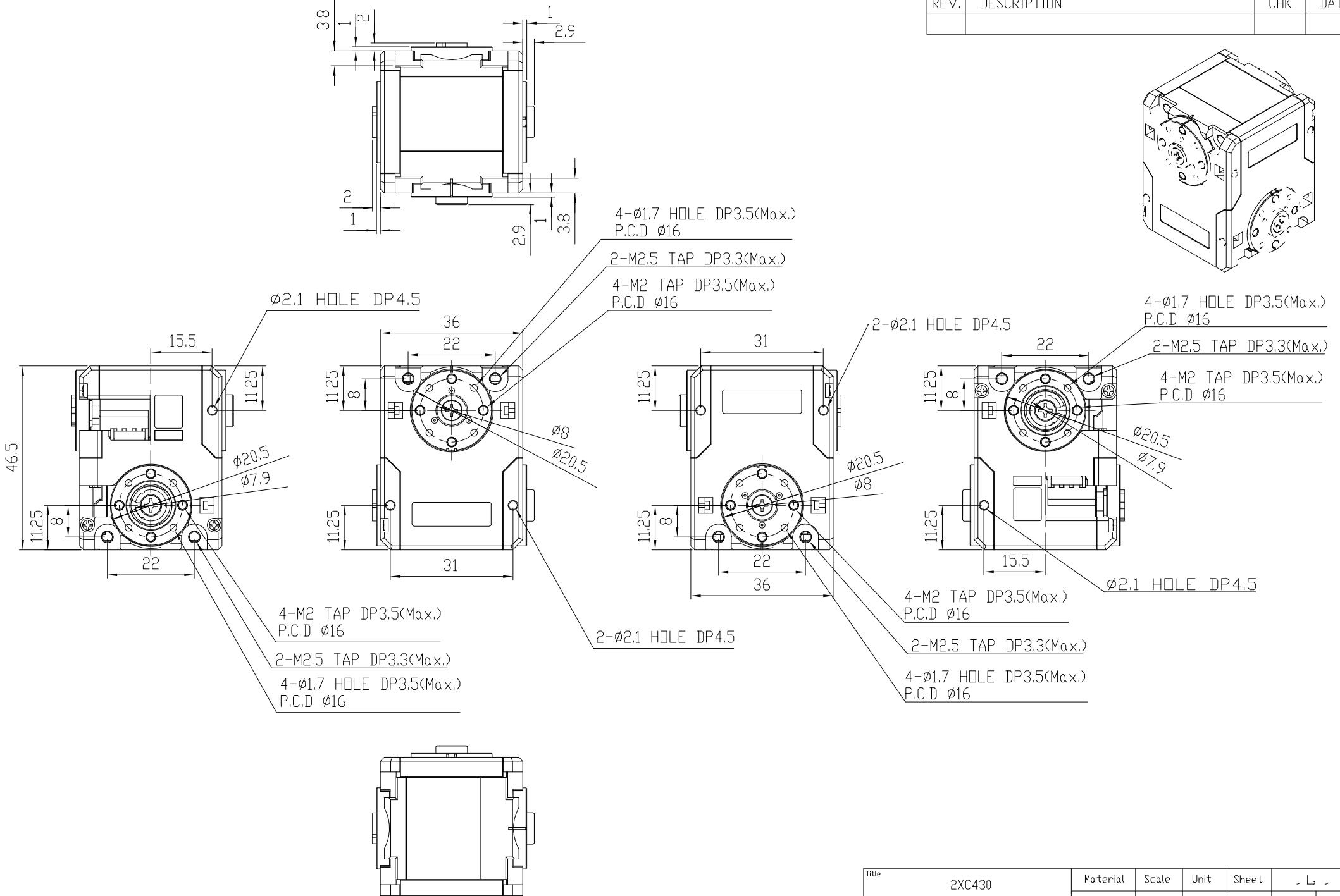
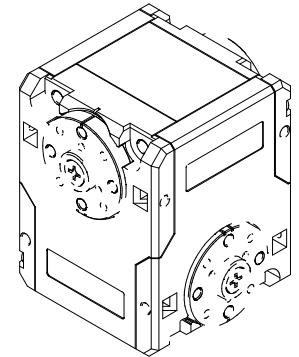
Planos de motores

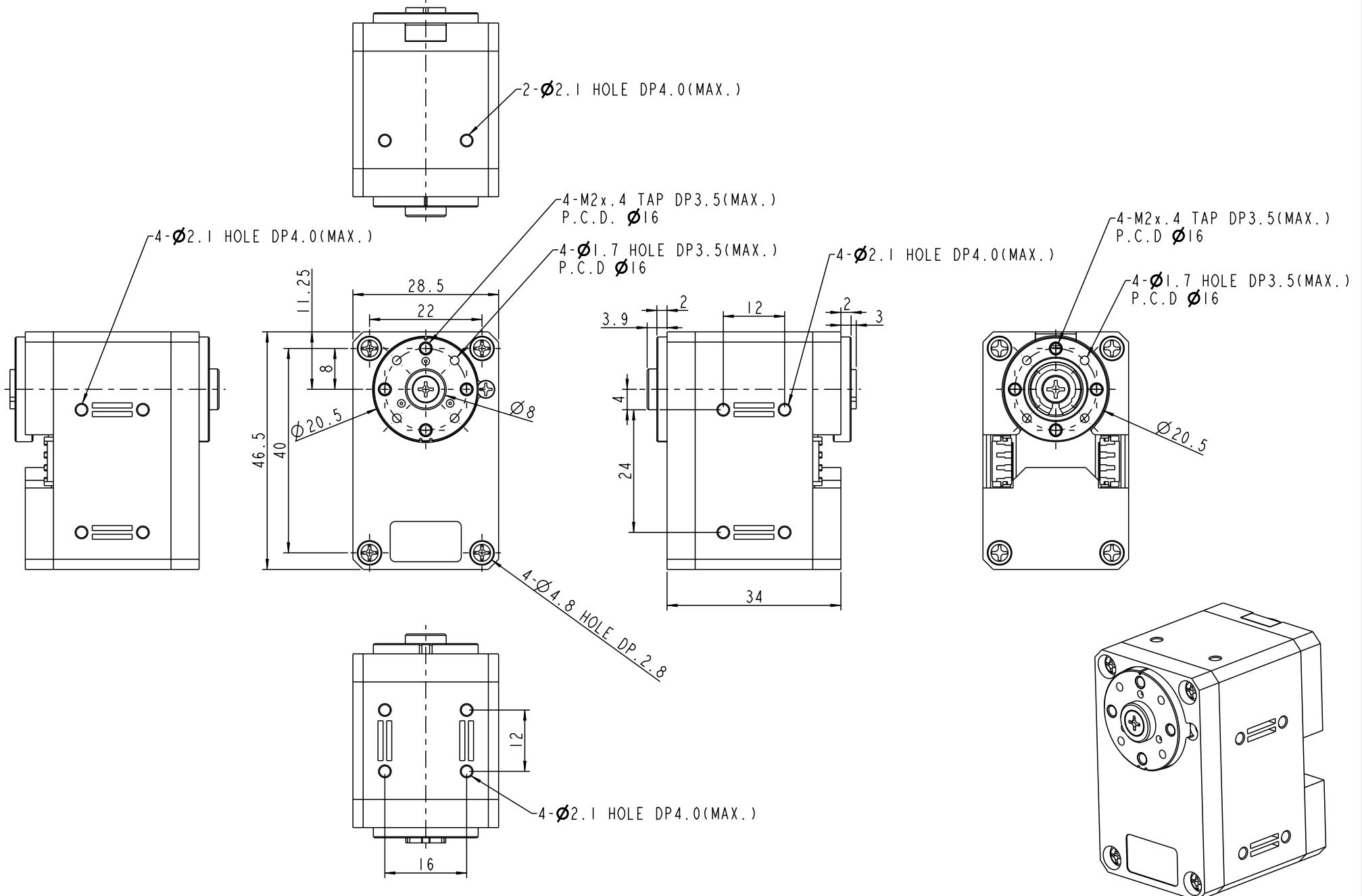


[FOR REFERENCE ONLY]

Title	MX-106T	Material	Scale	Unit	Sheet	ROBOTIS
	04/26/2012	NONSCALE	mm	1 of 3	A4	ROBOTIS

REV.	DESCRIPTION	CHK	DATE





REV.	DESCRIPTION	CHK	DATE

[FOR REFERENCE ONLY]

XC430		Material	Scale	Unit	Sheet	ROBOTS
	07-Mar-19	Nonescale	mm	1 of 1	A4	◎

APÉNDICE B

Cálculo del contrapeso

Con el fin de calcular el contrapeso se determinan los ángulos de interés tal que se puedan calcular las distancias de los centros de gravedad respecto al origen del sistema de referencia. El análisis geométrico y los ángulos utilizados se describen en la Figura B.1, en donde el ángulo crítico considerado es de 50° respecto al eje Y.

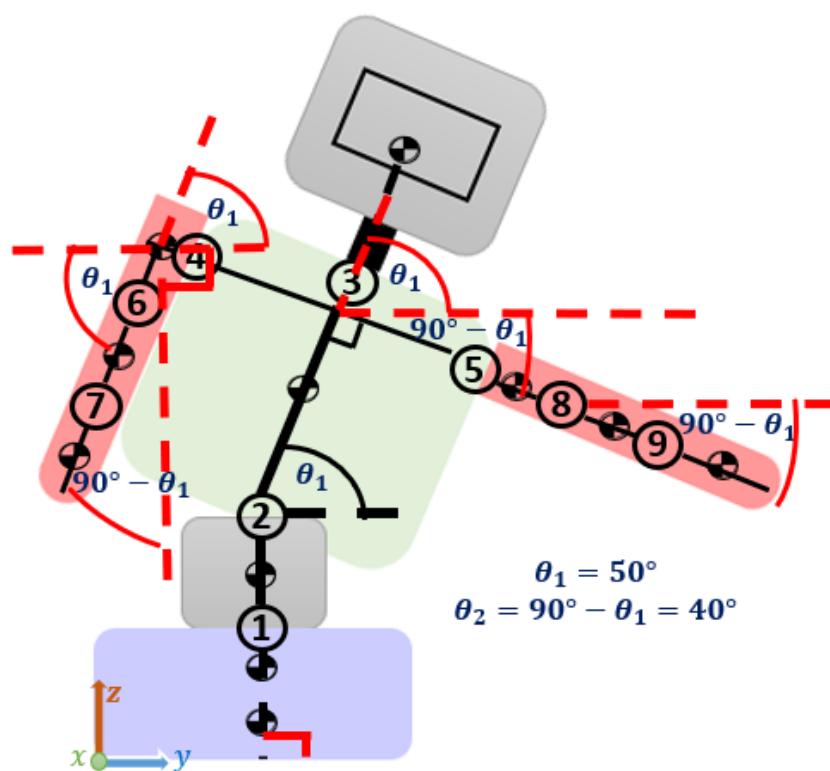


Figura B.1 Análisis geométrico de la estructura del robot en su posición crítica

Se calculan las coordenadas de cada uno de los centros de gravedad de las piezas respecto al plano XY sistema de referencia. Todos los valores se indican en la Tabla B.1, en donde se consideraron las variables mostradas en la Figura 2.9.

Con aquella información se emplea la ecuación (2.5), considerando únicamente el análisis de su componente vectorial asociado al eje Z, debido a que las posiciones en X (0 mm) e Y (80 mm) del contrapeso y la masa total son establecidas de antemano. Por lo tanto, en la ecuación (B.1) se utilizan los componentes en Z para

determinar la masa del contrapeso. Además, en la Tabla B.2 se indica la suma de productos entre las masas y posiciones de los centros de gravedad respecto al eje Z.

$$m_T r_{Tz} = m_C r_{Cz} + \sum_{i=1}^9 m_i r_{iz} \quad (\text{B.1})$$

$$((5 + m_C)kg)(180\text{ mm}) = m_C(25\text{ mm}) + 1506.65\text{ kg} \cdot \text{mm}$$

$$m_C = 3.91\text{ kg}$$

Tabla B.1 Cálculo de coordenadas en el eje Z de los centros de gravedad de cada pieza

Número de la pieza	Coordenada en eje Z
1	$z_1 = l_3 + l_4 = (90 + 40.5)\text{ mm} = 130.5\text{ mm}$
2	$z_2 = l_3 + l_5 + l_6 \sin \theta_1 = (90 + 81)\text{ mm} + (127.5\text{ mm}) \sin 50^\circ$ $z_2 = 268.7\text{ mm}$
3	$z_3 = z_2 + (l_7 + l_{14}) \sin \theta_1$ $z_3 = 268.7\text{ mm} + ((127.5 + 98.3)\text{mm}) \sin 50^\circ = 441.7\text{ mm}$
4	$z_4 = z_3 - l_{14} \sin \theta_1 + (l_8 + l_{12}) \sin \theta_2$ $z_4 = 441.7\text{ mm} - (98.3\text{ mm}) \sin 50^\circ + ((96.8 + 50)\text{mm}) \sin 40^\circ$ $z_4 = 460.8\text{ mm}$
5	$z_5 = z_4 - (l_9 - l_{12} + l_{13}) \sin \theta_1$ $z_5 = 460.8\text{ mm} - ((100 - 50 + 70)\text{ mm}) \sin 50^\circ = 368.9\text{ mm}$
6	$z_6 = z_5 - (l_{10} - l_{13} + l_{11}) \sin \theta_1$ $z_6 = 368.9\text{ mm} - ((140 - 70 + 54.8)\text{ mm}) \sin 50^\circ = 273.3\text{ mm}$
7	$z_7 = z_2 + l_7 \sin \theta_1 - (l_8 + l_{12}) \sin \theta_2$ $z_7 = 268.7\text{ mm} + (127.5\text{ mm}) \sin 50^\circ - ((96.8 + 50)\text{mm}) \sin 40^\circ$ $z_7 = 272.0\text{ mm}$
8	$z_8 = z_7 - (l_9 - l_{12} + l_{13}) \sin \theta_2$ $z_8 = 272.0\text{ mm} - ((100 - 50 + 70)\text{ mm}) \sin 40^\circ = 194.9\text{ mm}$
9	$z_9 = z_8 - (l_{10} - l_{13} + l_{11}) \sin \theta_2$ $z_9 = 194.9\text{ mm} + ((140 - 70 + 54.8)\text{ mm}) \sin 40^\circ = 114.68\text{ mm}$

Tabla B.2 Cálculo de suma de productos entre masas y posición de centro de gravedad de las piezas

Número de pieza	Masa (kg)	Posición en Z (mm)	Masa · Posición Z (kg·mm)
1	0.25	130.5	32.63
2	1.75	268.7	470.23
3	1.00	441.7	441.70
4	0.25	460.8	115.20
5	0.5	368.9	184.45
6	0.25	273.3	68.33
7	0.25	272.0	68.00
8	0.5	194.9	97.45
9	0.25	114.68	28.67
Sumatoria de productos			1506.65

APÉNDICE C

Desarrollo de modelo matemático de un motor BLDC

En la Figura C.1 se define el circuito equivalente de un motor BLDC trifásico operando en conducción de doble fase en conjunto con las cargas mecánicas asociadas al eje del rotor. Además, en la Tabla C.1 se definen los términos a utilizar durante el desarrollo del modelo matemático.

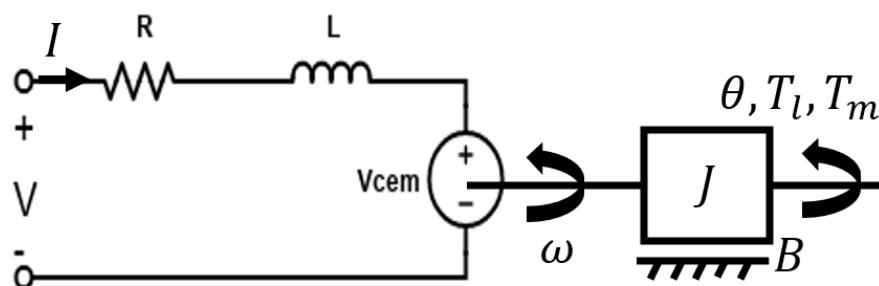


Figura C.1 Circuito equivalente de motor BLDC en conjunto con cargas mecánicas

Tabla C.1 Descripción de variables utilizadas en el modelo matemático

Variable	Descripción	Variable	Descripción
R	Resistencia equivalente de armadura	b	Coeficiente de fricción
L	Inductancia equivalente de armadura	K _E	Coeficiente de fuerza contraelectromotriz
J	Momento de inercia del rotor	K _T	Constante de torque
T _L	Torque de carga	ω	Velocidad angular del rotor
T _M	Torque electromotriz	θ	Posición angular del rotor
i	Corriente de armadura	v	Voltaje de armadura

Se emplea la segunda ley de Kirchhoff para realizar una suma de voltajes en el circuito de armadura del motor y determinar la ecuación (C.2).

$$v(t) = V_R + V_L + V_{cem} \quad (C.1)$$

$$v(t) = R \cdot i(t) + L \cdot \frac{d}{dt} i(t) + K_e \cdot \omega(t) \quad (C.2)$$

En función del análisis mecánico del motor BLDC se define la ecuación (C.4).

$$J \frac{d}{dt} \omega(t) + b \cdot \omega(t) = T_m + T_l \quad (\text{C.3})$$

$$J \frac{d}{dt} \omega(t) + T_l = K_t \cdot i(t) - b \cdot \omega(t) \quad (\text{C.4})$$

Se obtiene la ecuación (C.5) aplicando la transformada de Laplace en la ecuación (C.4), despejando la corriente, y considerando como nulo al torque de la carga.

$$I(S) = \frac{J \cdot S \Omega(S) + b \cdot \Omega(S)}{K_t} \quad (\text{C.5})$$

Se aplica la transformada de Laplace en la ecuación (C.2) y se reemplaza en ella a la ecuación (C.5), obteniendo la ecuación (C.6).

$$V(S) = R \frac{J \cdot S \Omega(S) + b \cdot \Omega(S)}{K_t} + LS \frac{J \cdot S \Omega(S) + b \cdot \Omega(S)}{K_t} + K_e \Omega(S) \quad (\text{C.6})$$

Considerando a la velocidad angular como la señal de salida y al voltaje como la señal de entrada, se despeja la ecuación (C.6) y se determina la función de transferencia en la ecuación (C.7).

$$\frac{\Omega(S)}{V(S)} = \frac{\frac{K_t}{JL}}{S^2 + \left(\frac{R}{L} + \frac{b}{J}\right)S + \left(\frac{Rb + K_t K_e}{JL}\right)} \quad (\text{C.7})$$

Debido a que se desea realizar control de posición, se modifica la ecuación (C.7) tomando en cuenta que la velocidad angular es la derivada de la posición, expresando en la ecuación (C.8) una nueva función de transferencia.

$$\frac{\theta(S)}{V(S)} = \frac{\frac{K_t}{JL}}{S \left(S^2 + \left(\frac{R}{L} + \frac{b}{J}\right)S + \left(\frac{Rb + K_t K_e}{JL}\right) \right)} \quad (\text{C.8})$$

APÉNDICE D

Ejemplo de identificación de planta y sintonización de controlador para un motor BLDC

Para la identificación de la planta se realiza la toma de datos del motor a modelar. En el presente ejemplo se describe el procedimiento para el motor MX106 correspondiente a la articulación que conecta el torso central y el torso inferior. Debido a la información disponible en memoria y al modelado matemático desarrollado previamente se obtienen las señales de posición presente y voltaje de armadura, mostradas en la Figura D.1. Aquellas dos variables fueron consideradas como la entrada y la salida del sistema en la función de transferencia del motor BLDC.

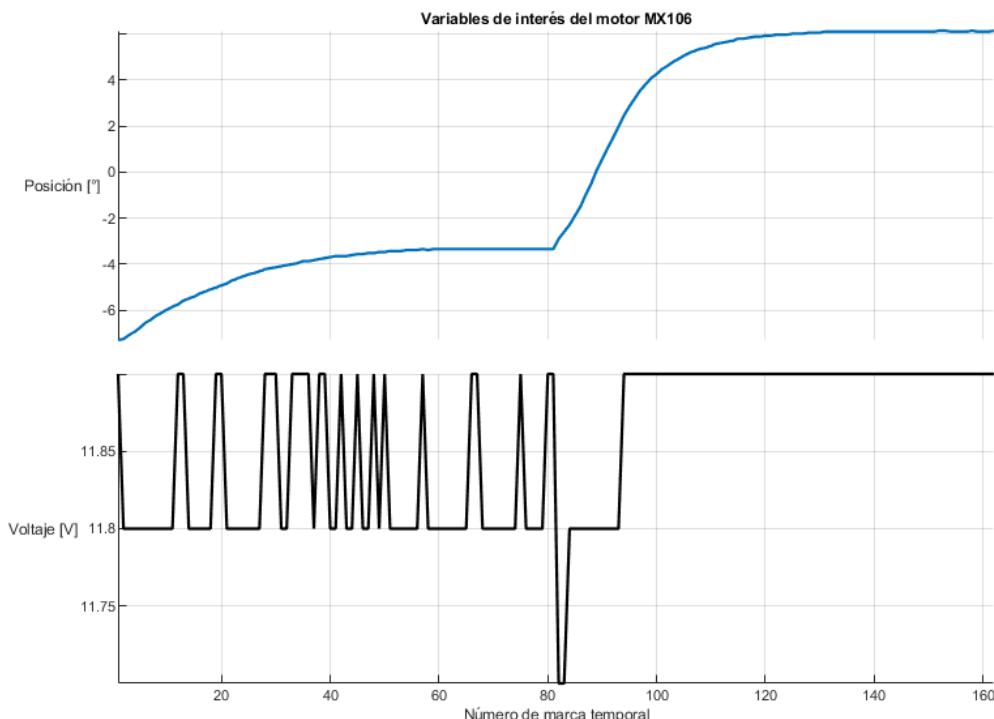


Figura D.1 Lectura de datos del motor MX106 de la articulación 2 durante su funcionamiento

Posteriormente, se dividen por la mitad la secuencia de datos para obtener dos casos de respuesta del sistema, considerando que en el proceso de experimentación y toma de datos el motor realizó dos movimientos consecutivos. Con ello se utiliza

una herramienta de identificación de planta, mostrada en la Figura D.2, en donde un conjunto de señales de posición y voltaje es utilizado para entrenamiento y otro para validación. Se seleccionó la opción de obtener una función de transferencia con tres polos y ningún cero, tal como en el modelo matemático obtenido, a partir de los datos de entrenamiento.

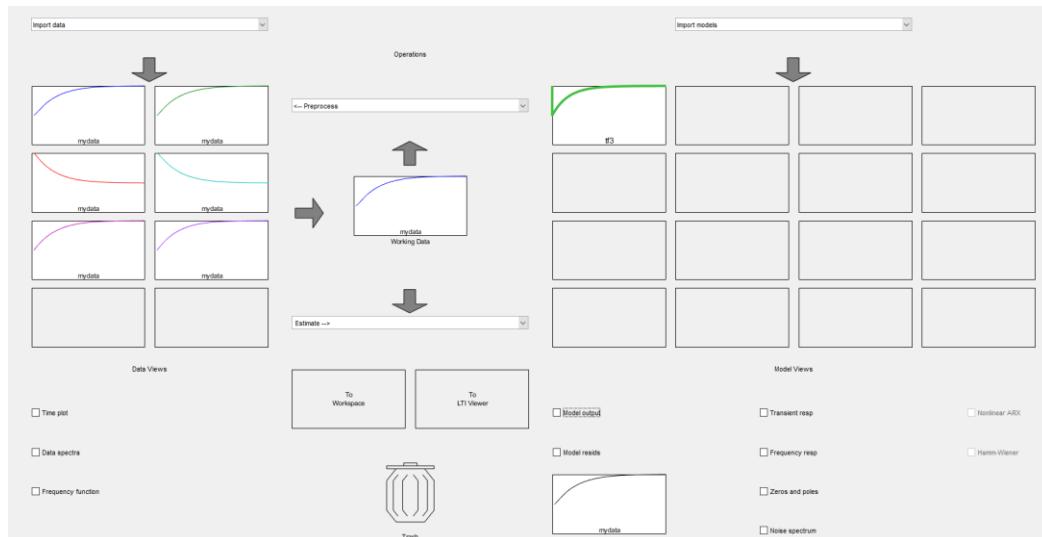


Figura D.2 Herramienta de identificación de planta

En la Figura D.3 se aprecia la función de transferencia obtenida, la cual presenta un porcentaje de ajuste del 97.86% respecto a los datos de estimación.

```

From input "u1" to output "y1":
-1.633e04
-----
s^3 + 7.093 s^2 + 17.3 s + 5.706e-09
Name: tf3
Continuous-time identified transfer function.

Parameterization:
Number of poles: 3 Number of zeros: 0
Number of free coefficients: 4
Use "tfdata", "getpvec", "getcov" for parameters and their uncertainties.

Status:
Estimated using TFEST on time domain data "mydata".
Fit to estimation data: 97.86% (stability enforced)

```

Figura D.3 Función de transferencia obtenida luego de la identificación de planta

Por otro lado, en la Figura D.4 se indica que se obtuvo un ajuste del 95.62% entre la posición de validación y la posición determinada al considerar el voltaje de validación como entrada de la función de transferencia obtenida.

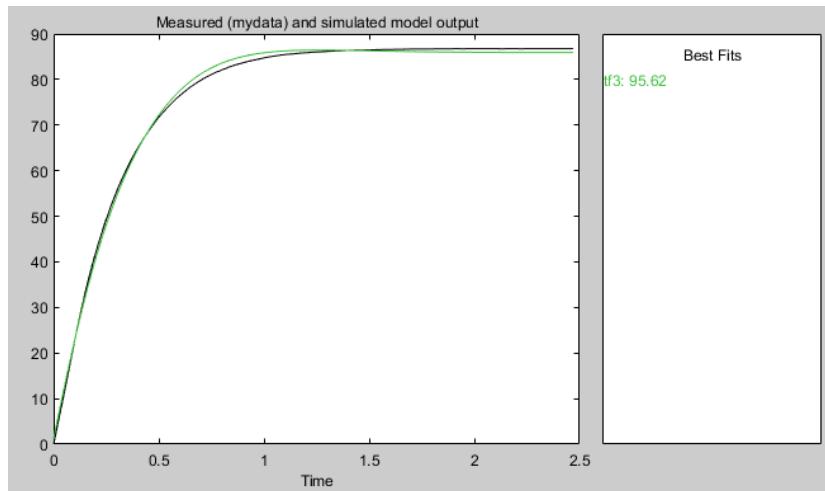


Figura D.4 Comparativa entre la posición de validación y la posición obtenida a partir de la función de transferencia y el voltaje de validación

Finalmente, se utiliza una herramienta para la sintonización de un controlador PID considerando la función de transferencia. La sintonización fue realizada de tal manera que se obtenga una aproximación de los índices de desempeño deseados en la respuesta del sistema mediante la manipulación de las barras de desplazamiento situadas en la parte superior de la Figura D.5. Con aquellas herramientas se puede modificar la rapidez deseada en la respuesta y la robustez del controlador requerido, generando la modificación de las constantes del controlador PID y la respuesta obtenida.

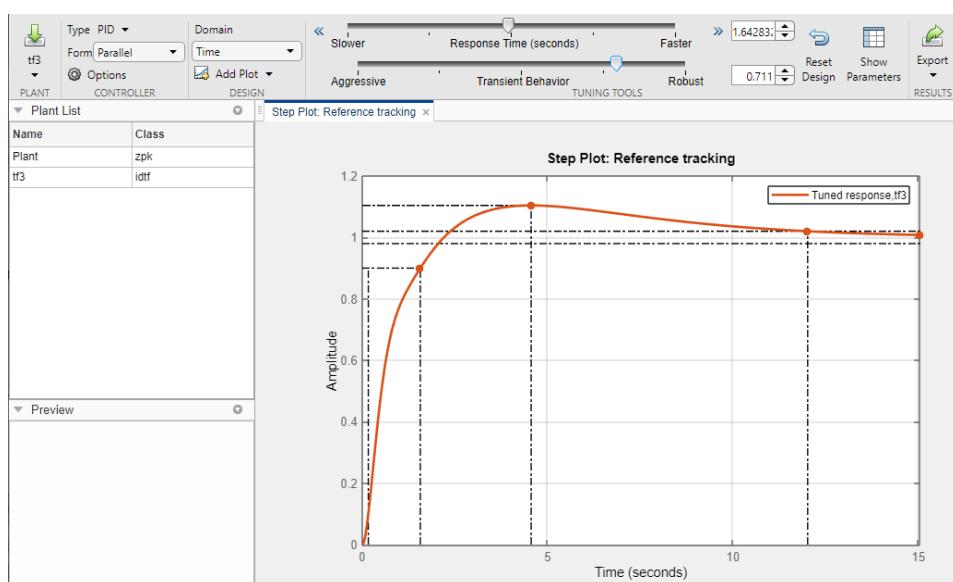
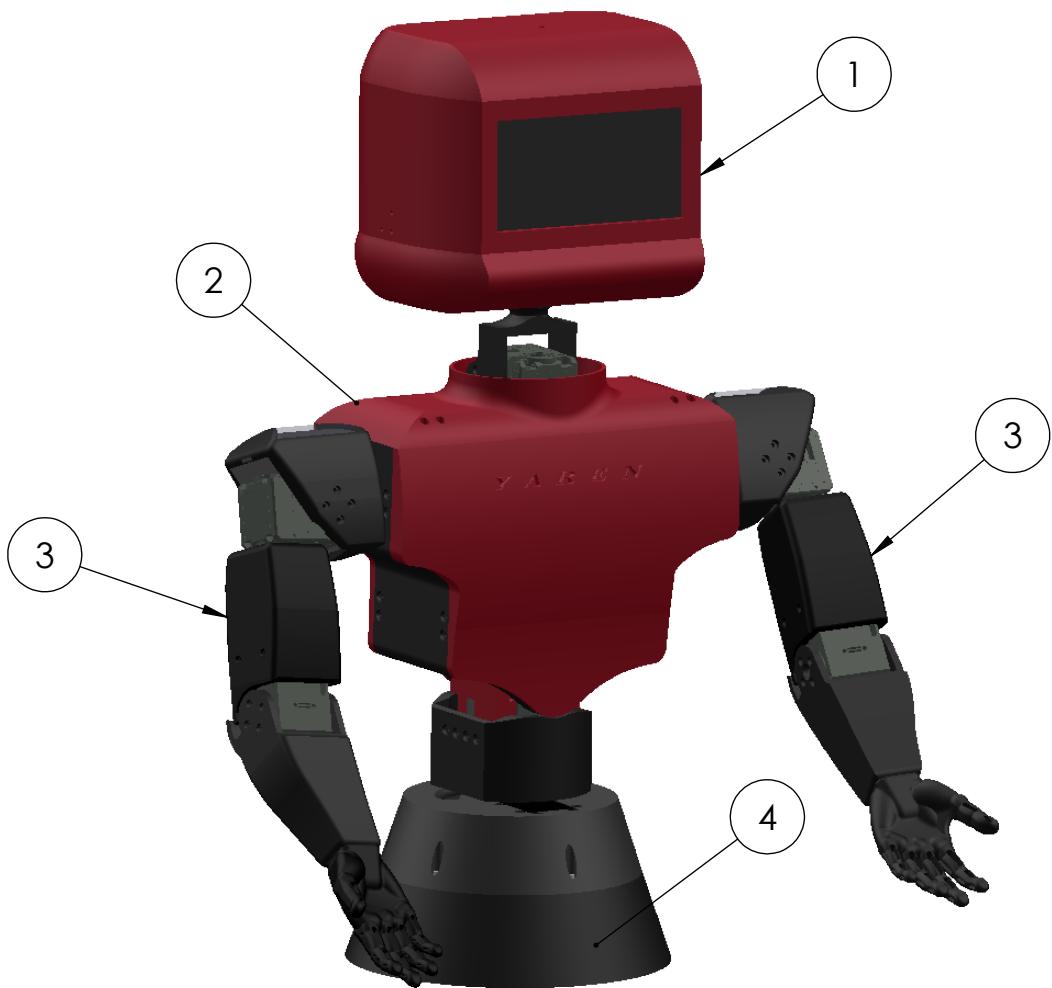


Figura D.5 Sintonización del controlador PID para el motor MX106 de la articulación 2

APÉNDICE E

Planos mecánicos

4 3 2 1



ITEM NO.	CÓDIGO	COMPONENTE
1	YAR-200	Ensamble de Conjunto de la Cabeza
2	YAR-100	Ensamble de Conjunto del Tórso Superior
3	YAR-300	Ensamble de Conjunto de Brazo
4	YAR-400	Ensamble de Conjunto de Cadera

LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
ACABADO SUPERFICIAL:

TOLERANCIAS:

LINEAL: 0.1mm

ANGULAR: 0.1°

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y CIENCIAS DE PRODUCCIÓN
INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

A4

YAREN ROBOT

Dibujado Por: Rhandal Valdez y Yandri Uchuarí

Revisado Por: Francisco Yumbla

ESCALA: 1:4

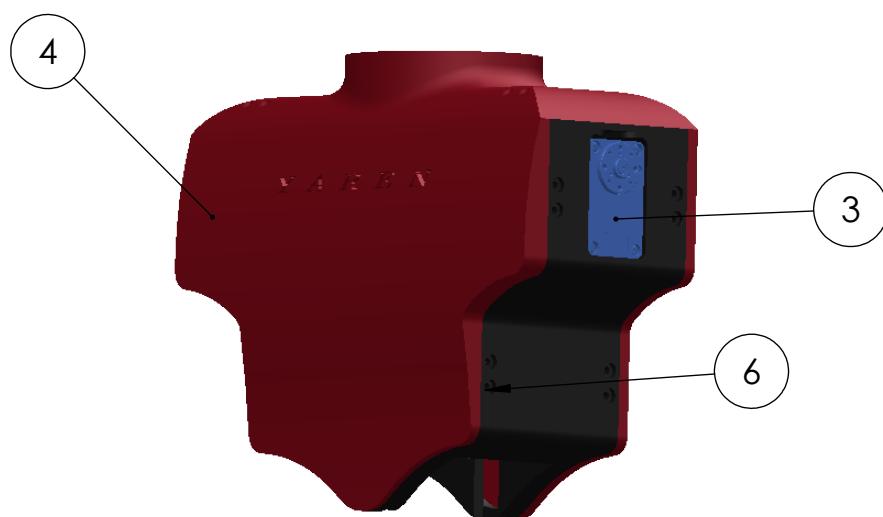
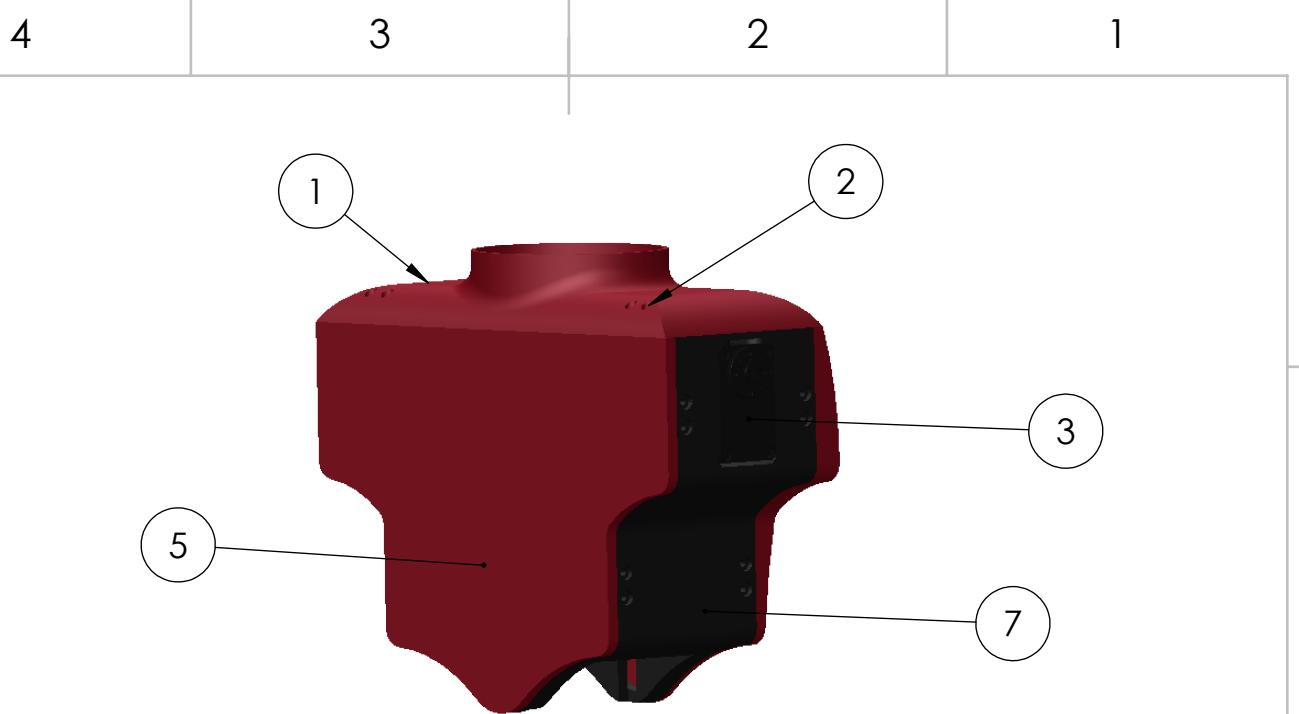
Nº DE DIBUJO:
YAR - 000



TÍTULO:

Ensamble de Conjunto General

4 3 2 1



ITEM NO.	CÓDIGO	COMPONENTE
1	YAR-104	Hombrera
2	-	Tornillo de Sujeción M2x10
3	-	Motor XC-430
4	YAR-102	Tapa Delantera
5	YAR-103	Tapa Posterior
6	-	Tornillo de Sujeción M2.5x10
7	YAR-101	Torso Superior

LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
ACABADO SUPERFICIAL:

TOLERANCIAS:

LINEAL: 0.1mm

ANGULAR: 0.1°

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y CIENCIAS DE PRODUCCIÓN
INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

A4

YAREN ROBOT

Dibujado Por: Rhandal Valdez y Yandri Uchuarí

Revisado Por: Francisco Yumbla

ESCALA:1:3

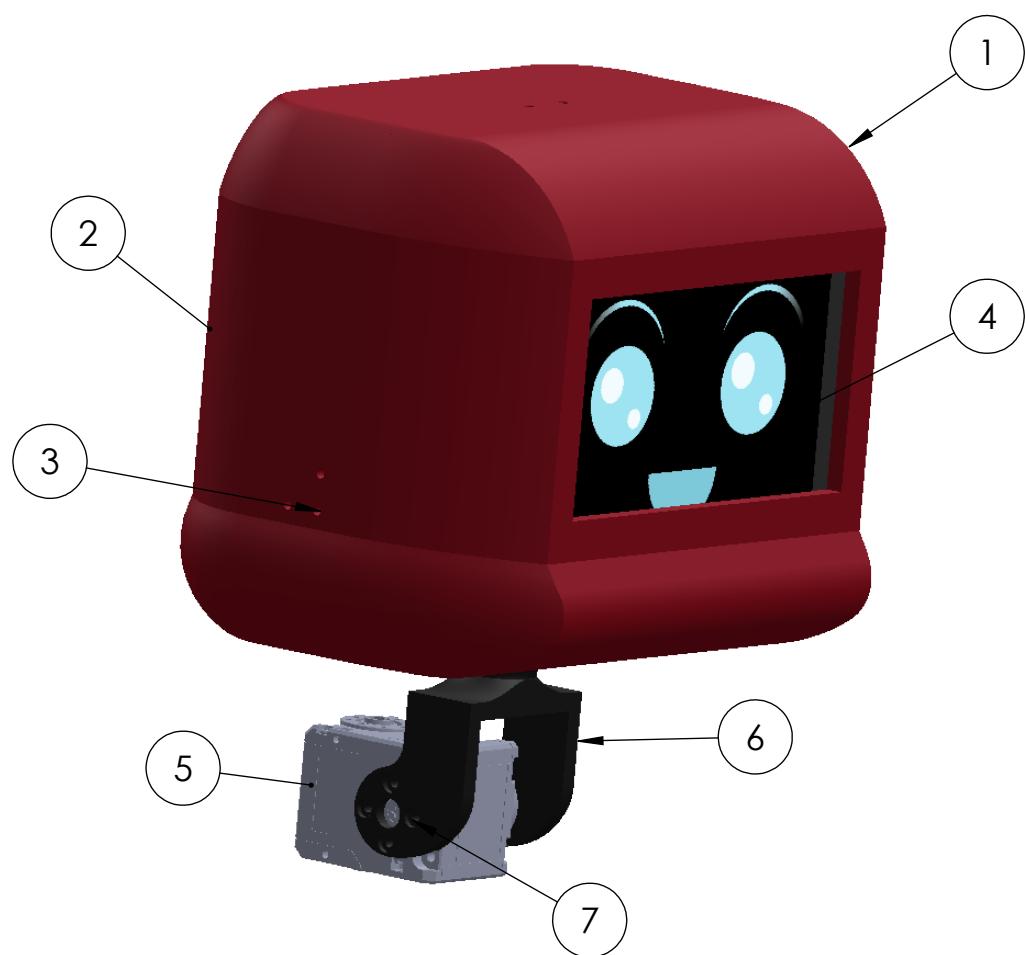
Nº DE DIBUJO:
YAR - 100



TÍTULO:

**Ensamble de Conjunto
de Torso Superior**

4 3 2 1



ITEM NO.	CÓDIGO	COMPONENTE
1	YAR-202	Cabeza Delantera
2	YAR-203	Cabeza Posterior
3	-	Tornillo de Sujeción M2.5x10
4	-	Pantalla
5	-	Motor 2XC-430
6	YAR-201	Cuello
7	-	Tornillo M2x7.5

LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
ACABADO SUPERFICIAL:

TOLERANCIAS:

LINEAL: 0.1mm

ANGULAR: 0.1°

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y CIENCIAS DE PRODUCCIÓN
INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

A4

YAREN ROBOT

Dibujado Por: Rhandal Valdez y Yandri Uchuarí

Revisado Por: Francisco Yumbla

ESCALA:1:2

Nº DE DIBUJO:
YAR - 200

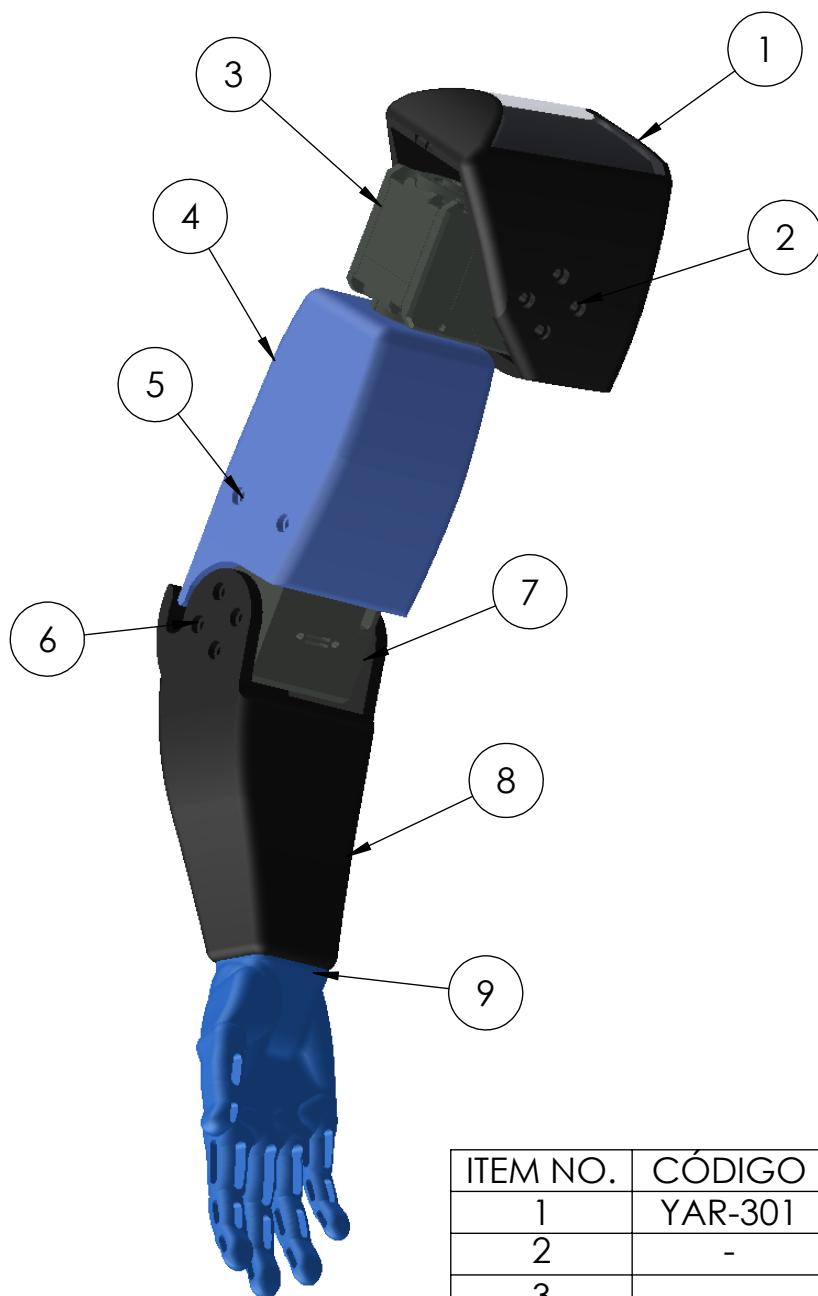


TÍTULO:

**Ensamble de Conjunto
de la Cabeza**

4 3 2 1

4 3 2 1



ITEM NO.	CÓDIGO	COMPONENTE
1	YAR-301	Hombro
2	-	Tornillo de Sujeción M2x7.5
3	-	Motor 2XC-430
4	YAR-302	Antebrazo
5	-	Tornillo de Sujeción M2.5x15
6	-	Tornillo de Sujeción M2x5
7	-	Motor XC-430
8	YAR-303	Brazo
9	YAR-304	Mano

LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
ACABADO SUPERFICIAL:

TOLERANCIAS:

LINEAL: 0.1mm

ANGULAR: 0.1°

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y CIENCIAS DE PRODUCCIÓN
INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

A4

YAREN ROBOT

TÍTULO:

Ensamble de Brazo

Dibujado Por: Rhandal Valdez y Yandri Uchuarí

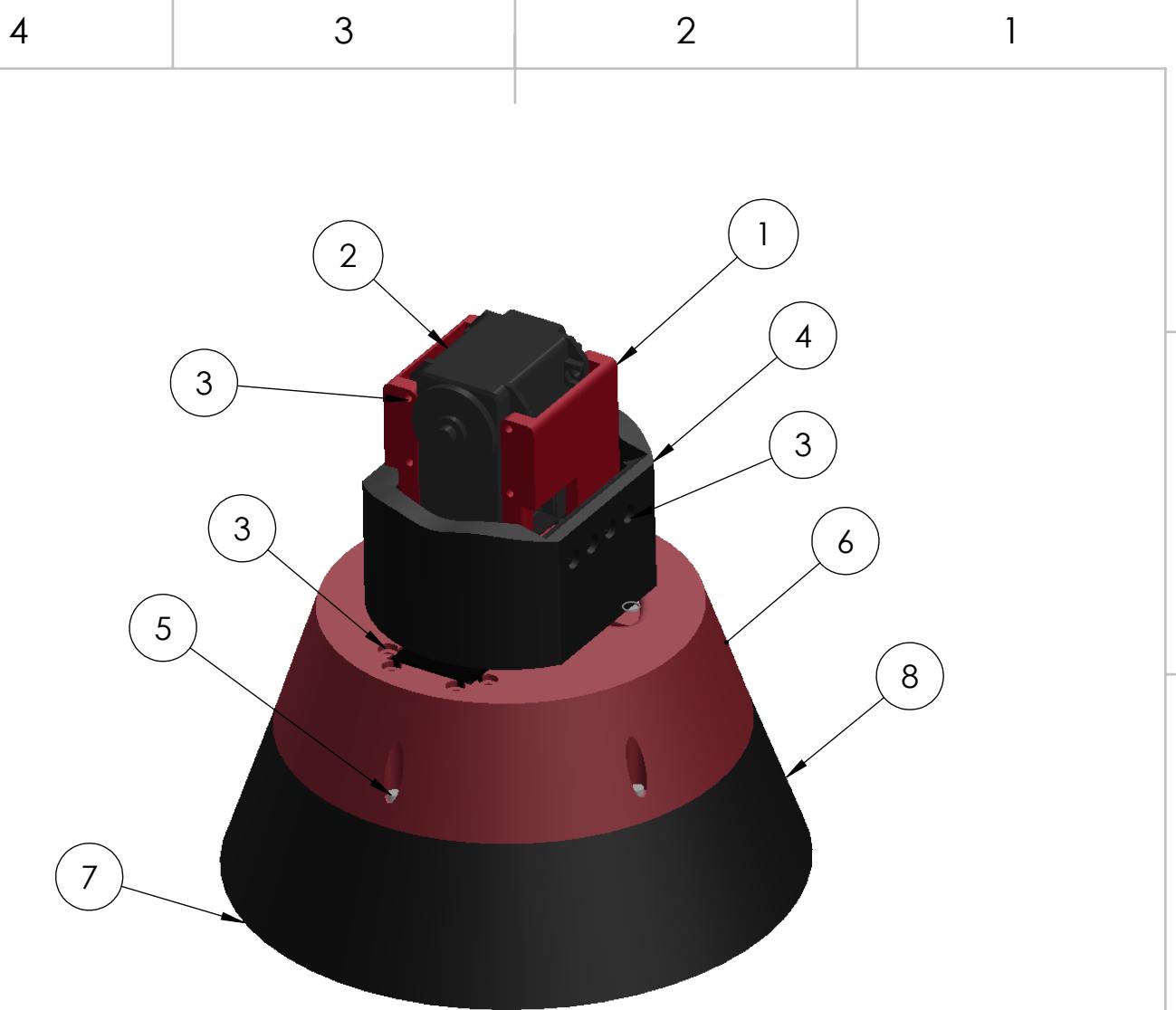
Revisado Por: Francisco Yumbla

ESCALA:1:2

Nº DE DIBUJO:
YAR - 300



4 3 2 1



ITEM NO.	CÓDIGO	COMPONENTE
1	YAR-405	Sujeción de Motor MX-106T
2	-	Motor MX-106T
3	-	Tornillo de Sujeción M2.5x10
4	YAR-404	Torso Inferior
5	-	Tornillo de Sujeción M2x10
6	YAR-403	Cadera Superior
7	YAR-402	Cadera Inferior
8	YAR-401	Tapa de Cadera

LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
ACABADO SUPERFICIAL:

TOLERANCIAS:

LINEAL: 0.1mm

ANGULAR: 0.1°

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y CIENCIAS DE PRODUCCIÓN
INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

A4

YAREN ROBOT

Dibujado Por: Rhandal Valdez y Yandri Uchuarí

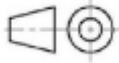
Revisado Por: Francisco Yumbla

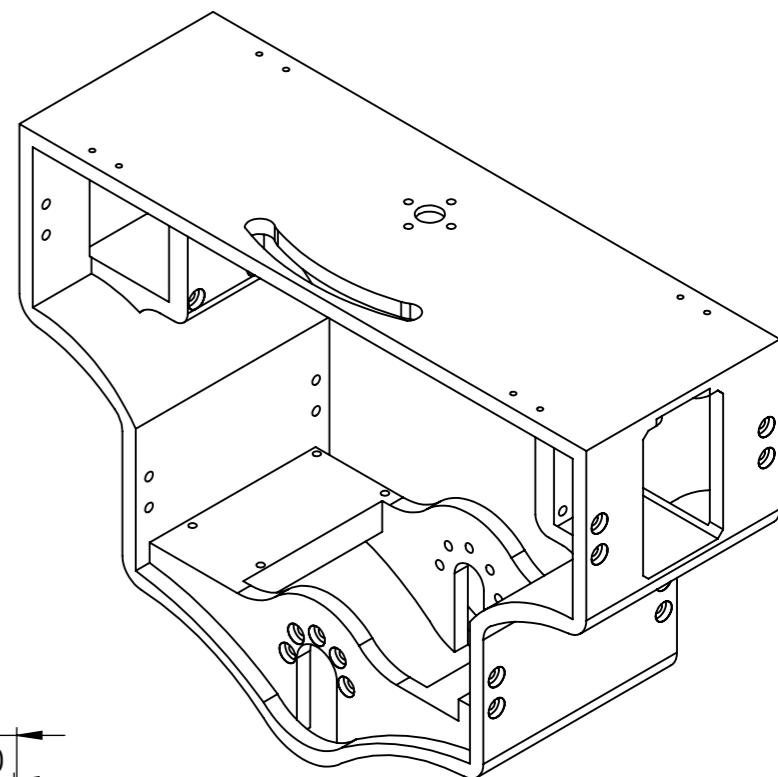
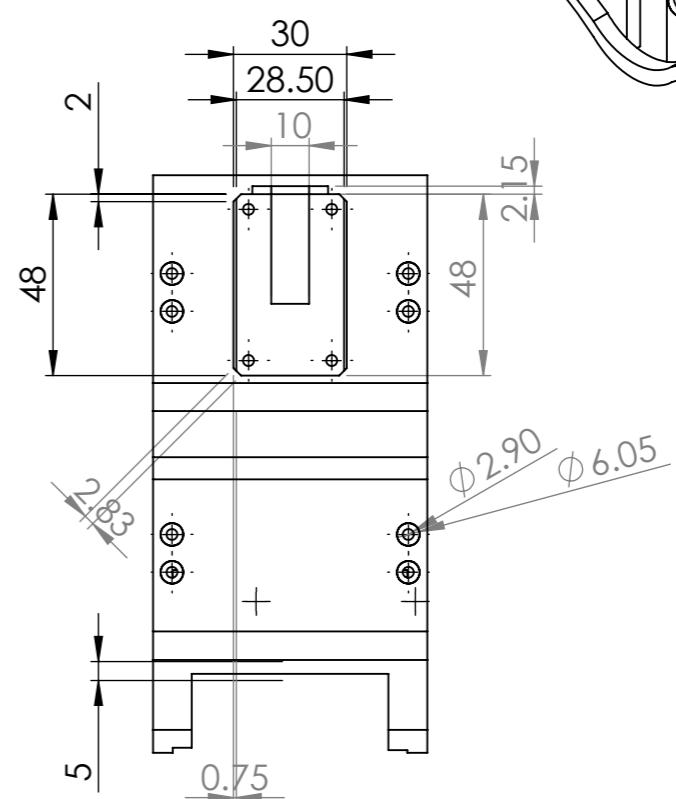
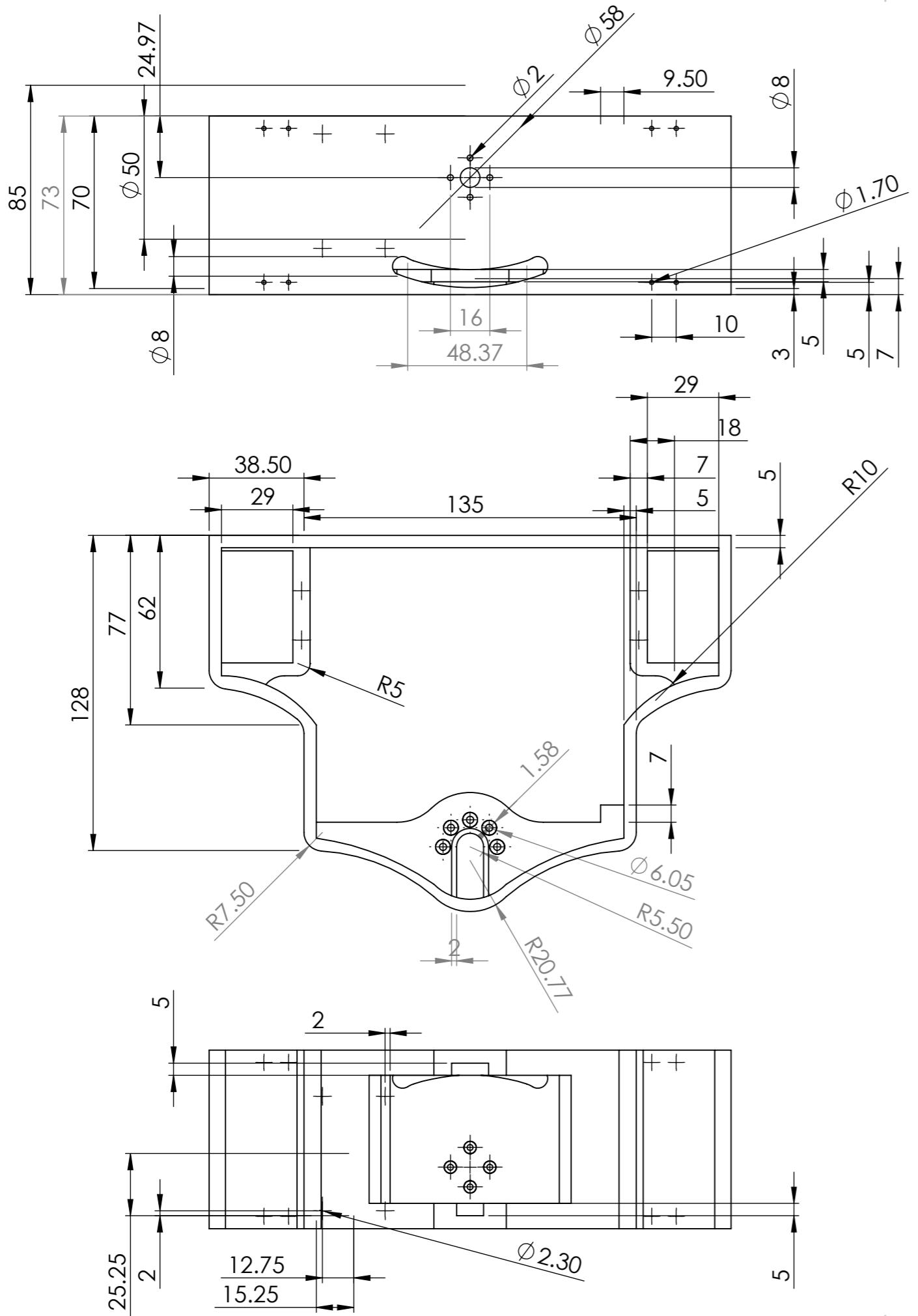
ESCALA:1:2

Nº DE DIBUJO:
YAR - 400

TÍTULO:

**Ensamble de Conjunto
De Cadera**





LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
ACABADO SUPERFICIAL:

TOLERANCIAS:

LINEAL: 0.1mm
ANGULAR: 0.1°

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y CIENCIAS DE PRODUCCIÓN
INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

A3

Dibujado Por: Rhandal Valdez y Yandri Uchuarí

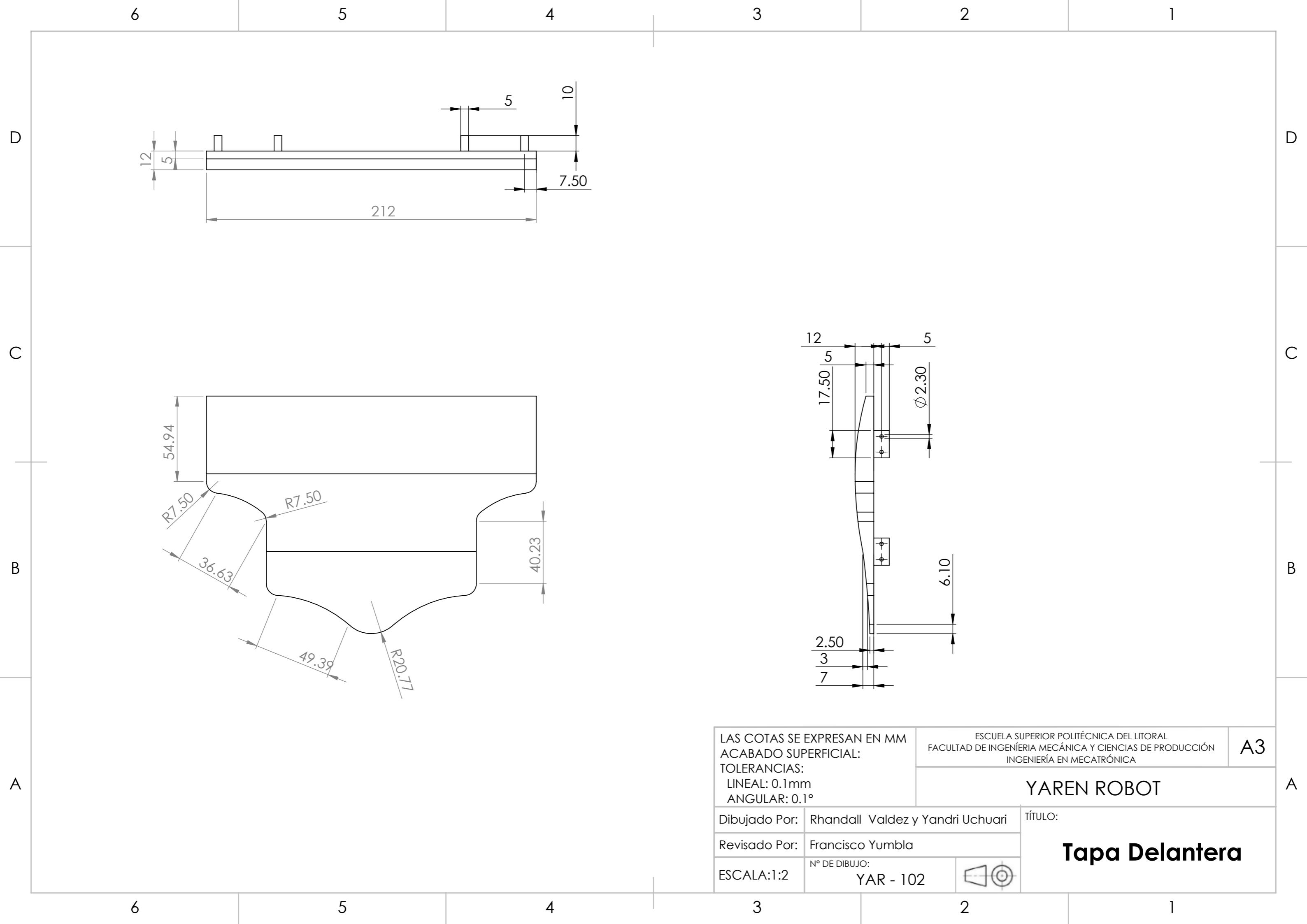
Revisado Por: Francisco Yumbra

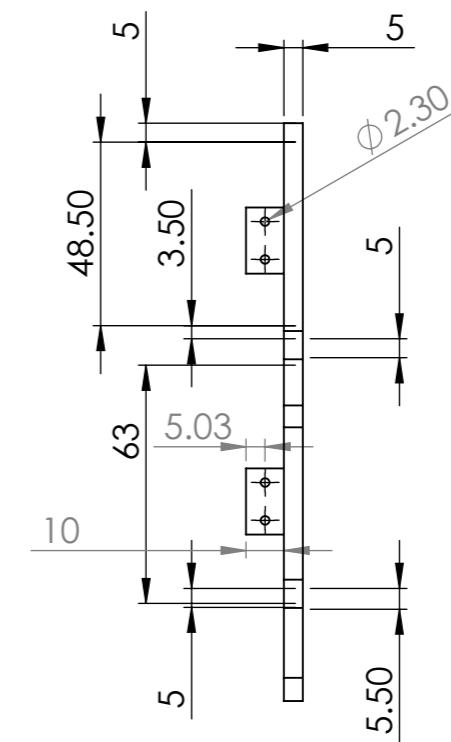
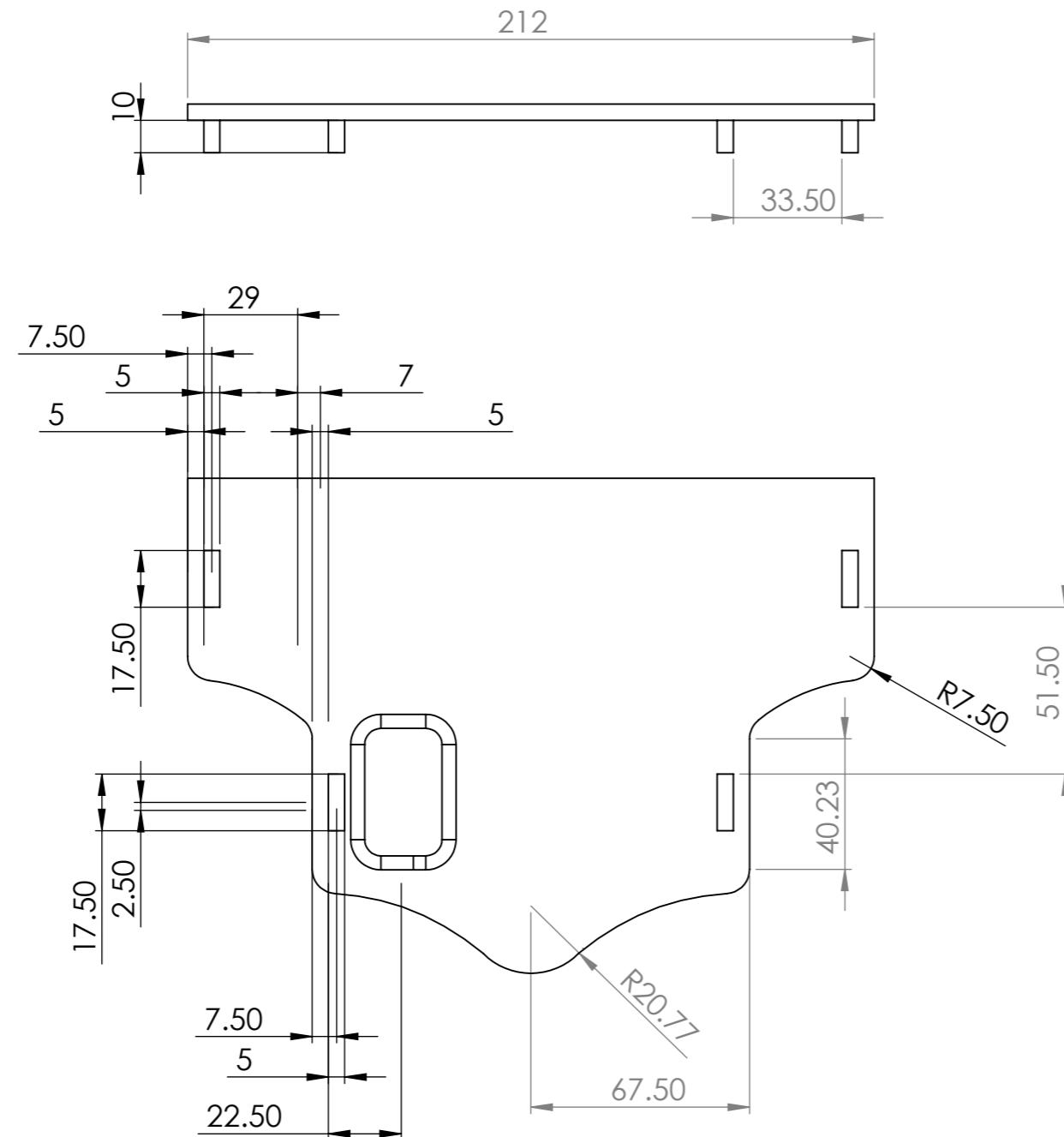
ESCALA: 1:2 N° DE DIBUJO:

YAR - 101

TÍTULO:

Torso Superior





LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
ACABADO SUPERFICIAL:
TOLERANCIAS:
LINEAL: 0.1mm
ANGULAR: 0.1°

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y CIENCIAS DE PRODUCCIÓN
INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

YAREN ROBOT

Dibujado Por:	Rhandall Valdez y Yandri Uchuarí
Revisado Por:	Francisco Yumbla
ESCALA:1:2	Nº DE DIBUJO: YAR - 103

TÍTULO:

Tapa Posterior

6

5

4

3

2

1

D

D

C

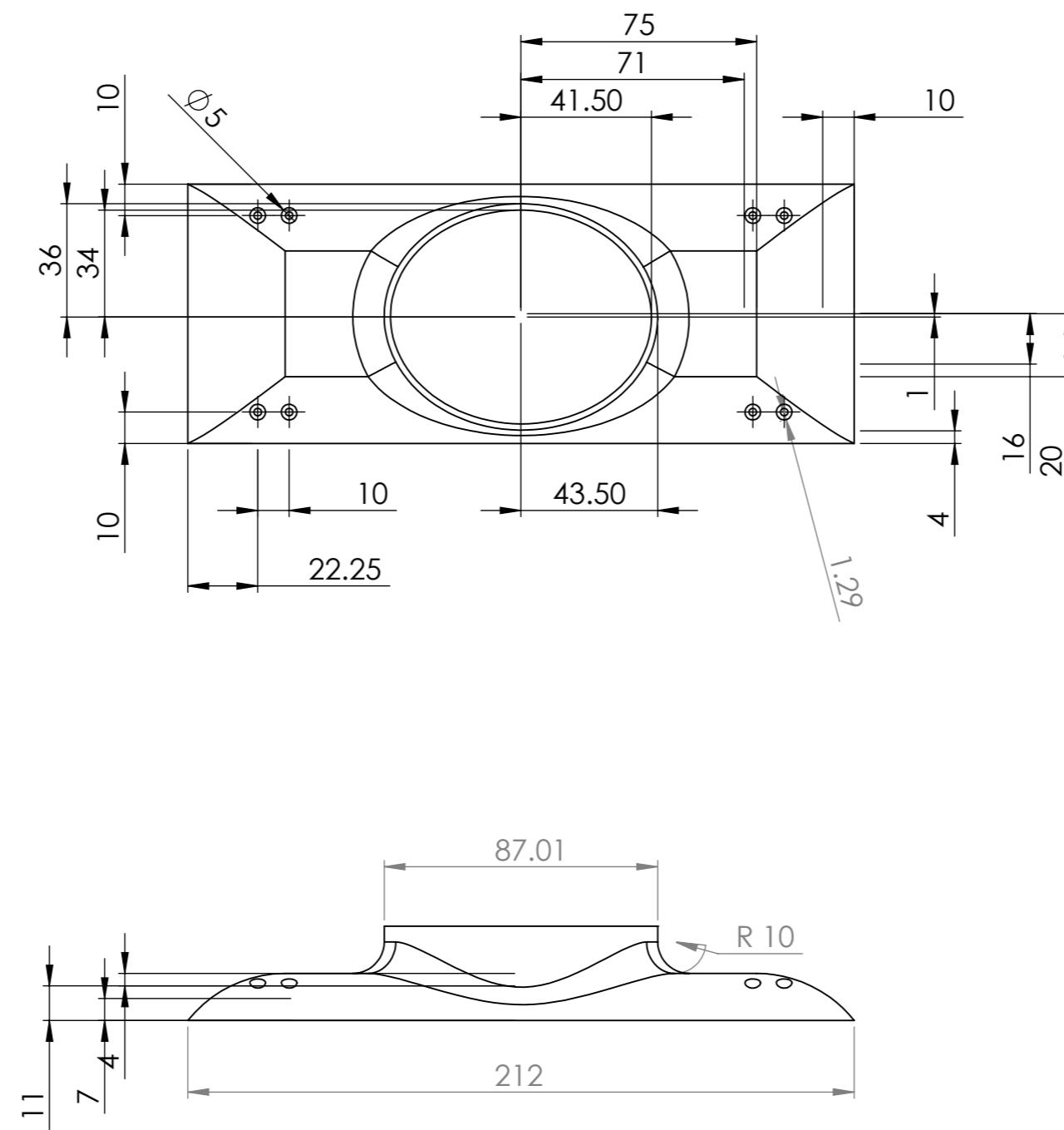
C

B

B

A

A



LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
ACABADO SUPERFICIAL:

TOLERANCIAS:

LINEAL: 0.1mm

ANGULAR: 0.1°

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y CIENCIAS DE PRODUCCIÓN
INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

A3

YAREN ROBOT

Dibujado Por: Rhandal Valdez y Yandri Uchuarí

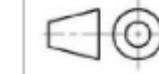
Revisado Por: Francisco Yumbra

ESCALA: 1:2 N° DE DIBUJO:

YAR - 104

TÍTULO:

Hombrera



6

5

4

3

2

1

4

3

2

1

F

E

D

C

B

A

F

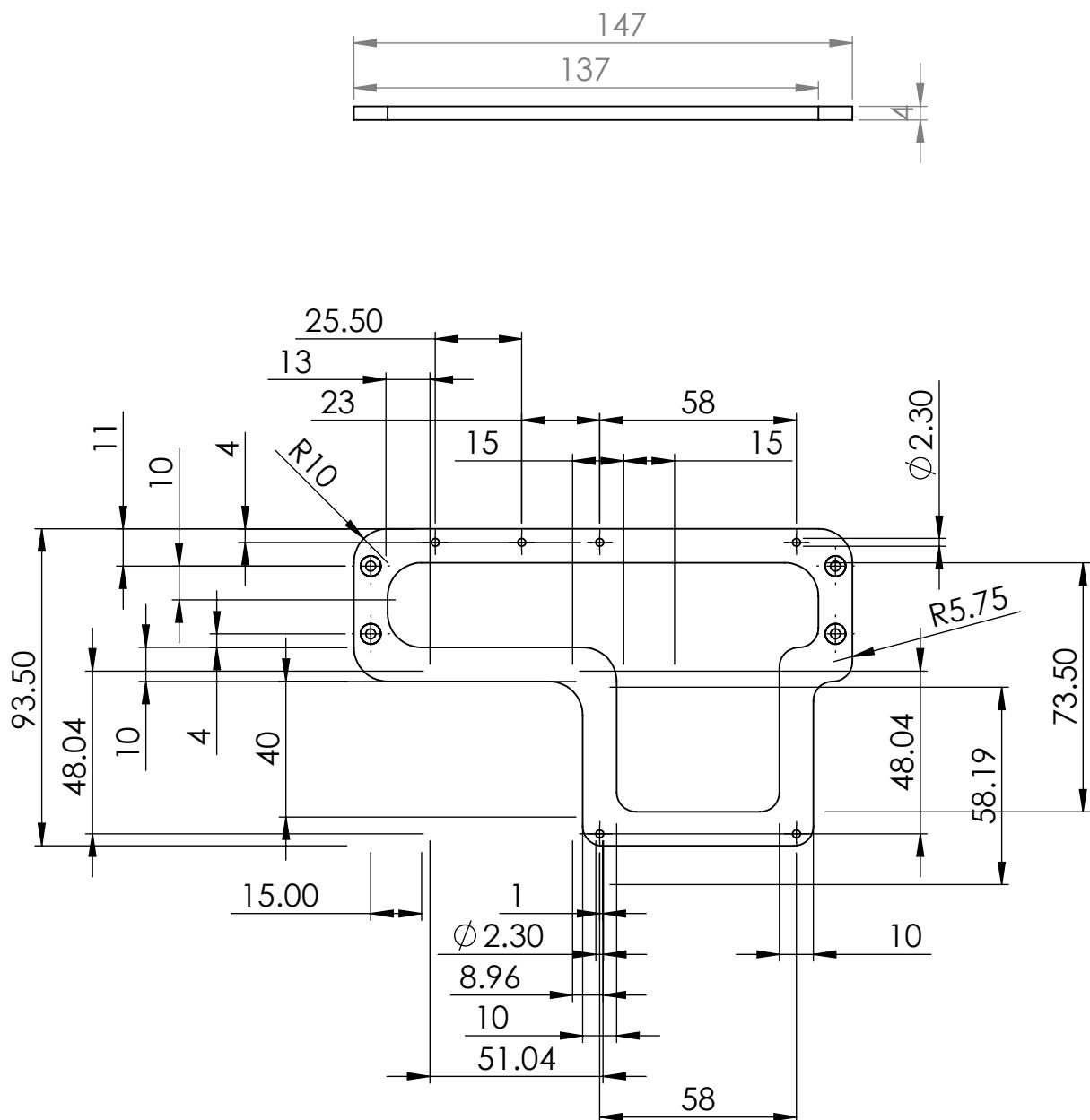
E

D

C

B

A



LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
ACABADO SUPERFICIAL:

TOLERANCIAS:

LINEAL: 0.1mm

ANGULAR: 0.1°

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y CIENCIAS DE PRODUCCIÓN
INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

A4

YAREN ROBOT

Dibujado Por: Rhandal Valdez y Yandri Uchuarí

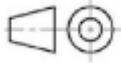
Revisado Por: Francisco Yumbla

ESCALA:1:2

Nº DE DIBUJO:
YAR - 105

TÍTULO:

Sujección para Jetson

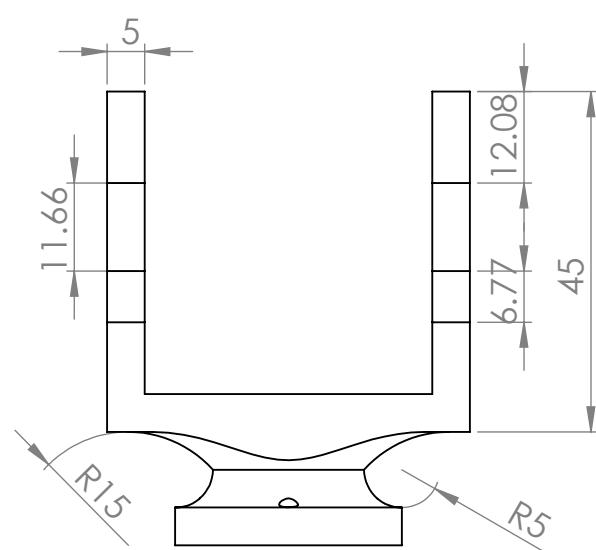
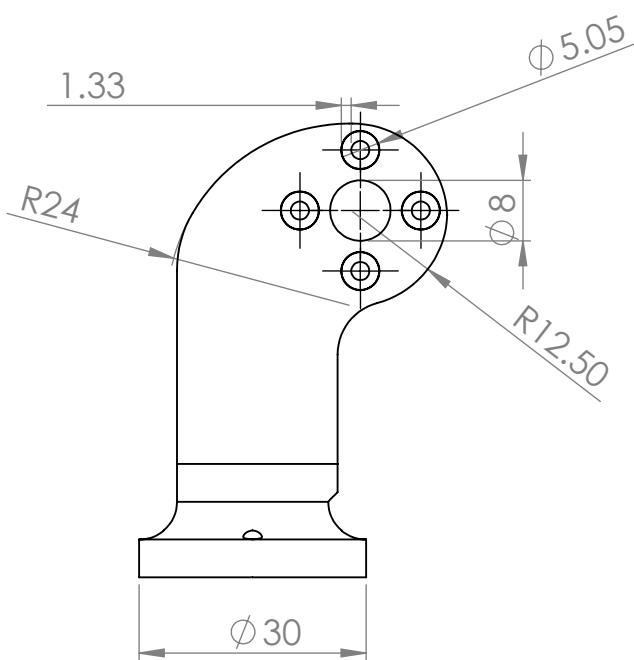
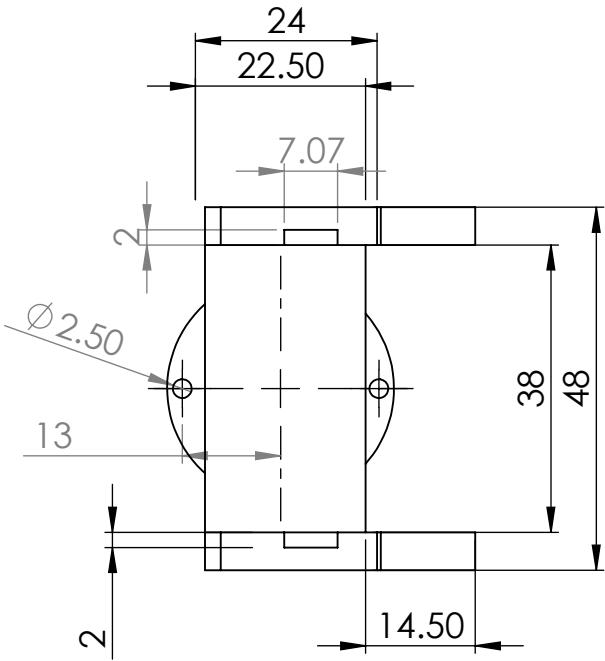


4

3

2

1



LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
ACABADO SUPERFICIAL:

TOLERANCIAS:

LINEAL: 0.1mm

ANGULAR: 0.1°

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y CIENCIAS DE PRODUCCIÓN
INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

A4

YAREN ROBOT

Dibujado Por: Rhandal Valdez y Yandri Uchuarí

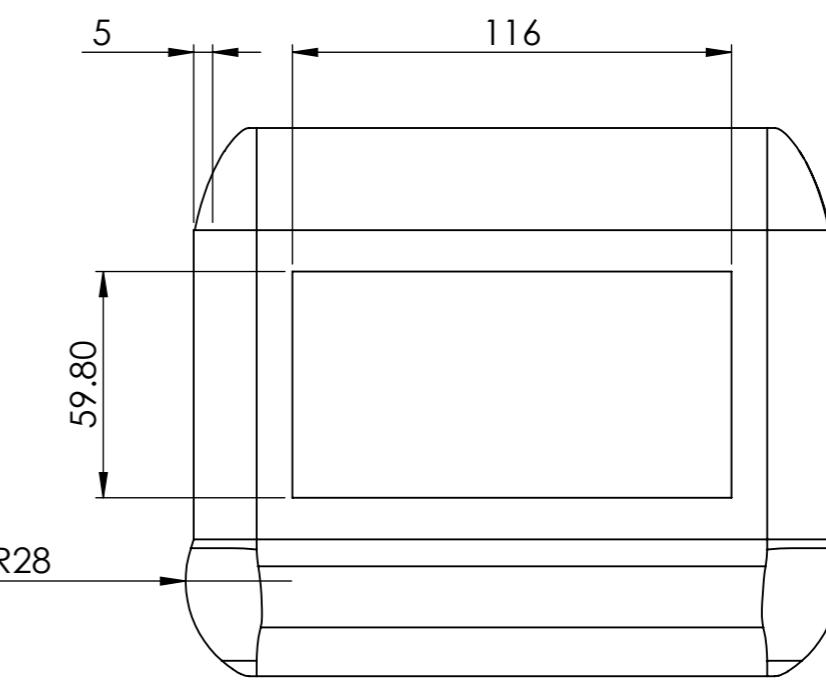
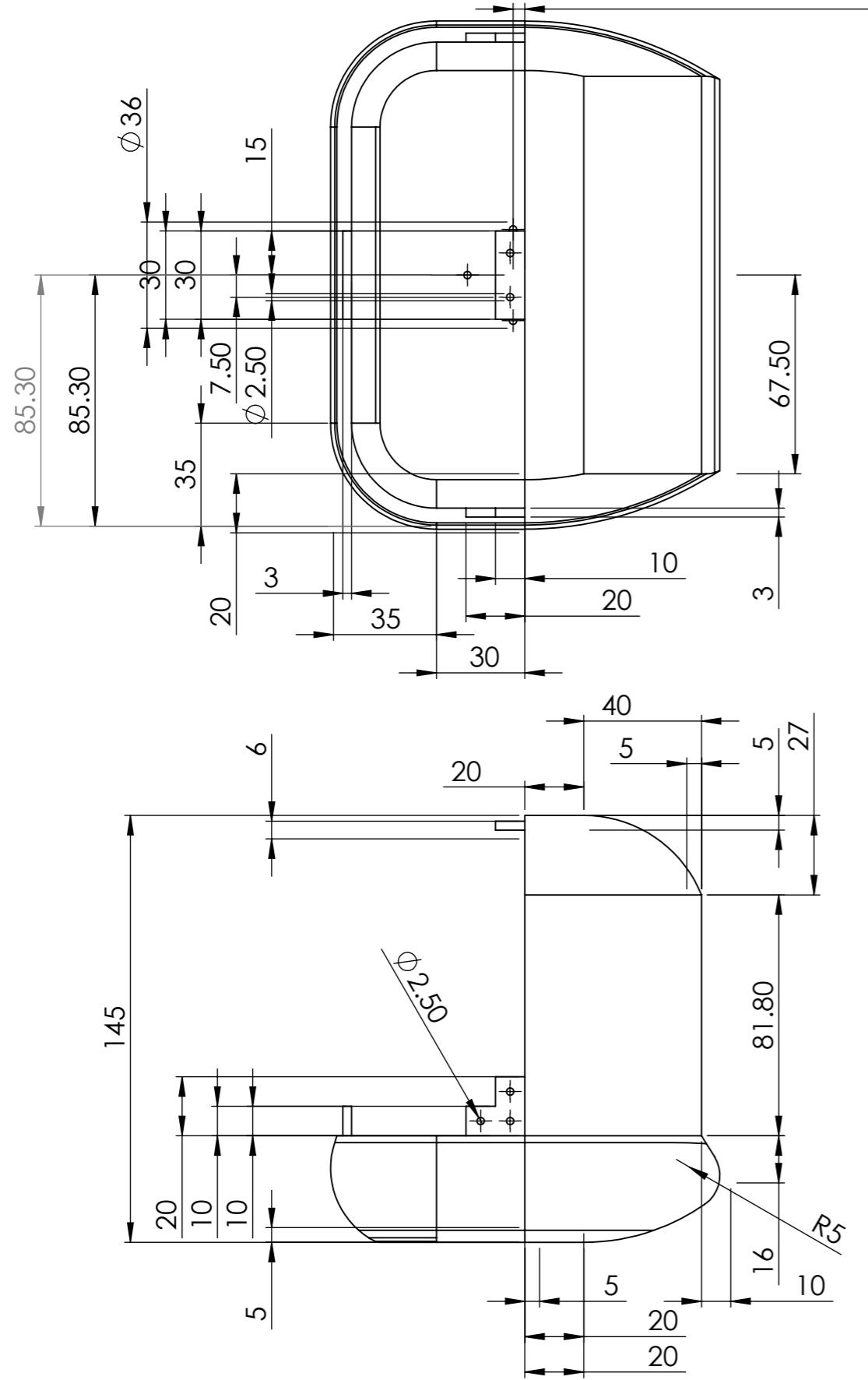
Revisado Por: Francisco Yumbla

ESCALA:1:1

Nº DE DIBUJO:
YAR - 201

TÍTULO:

Cuello



LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
ACABADO SUPERFICIAL:

TOLERANCIAS:

LINEAL: 0.1mm
ANGULAR: 0.1°

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y CIENCIAS DE PRODUCCIÓN
INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

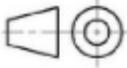
A3

YAREN ROBOT

Dibujado Por: Rhandal Valdez y Yandri Uchuarí

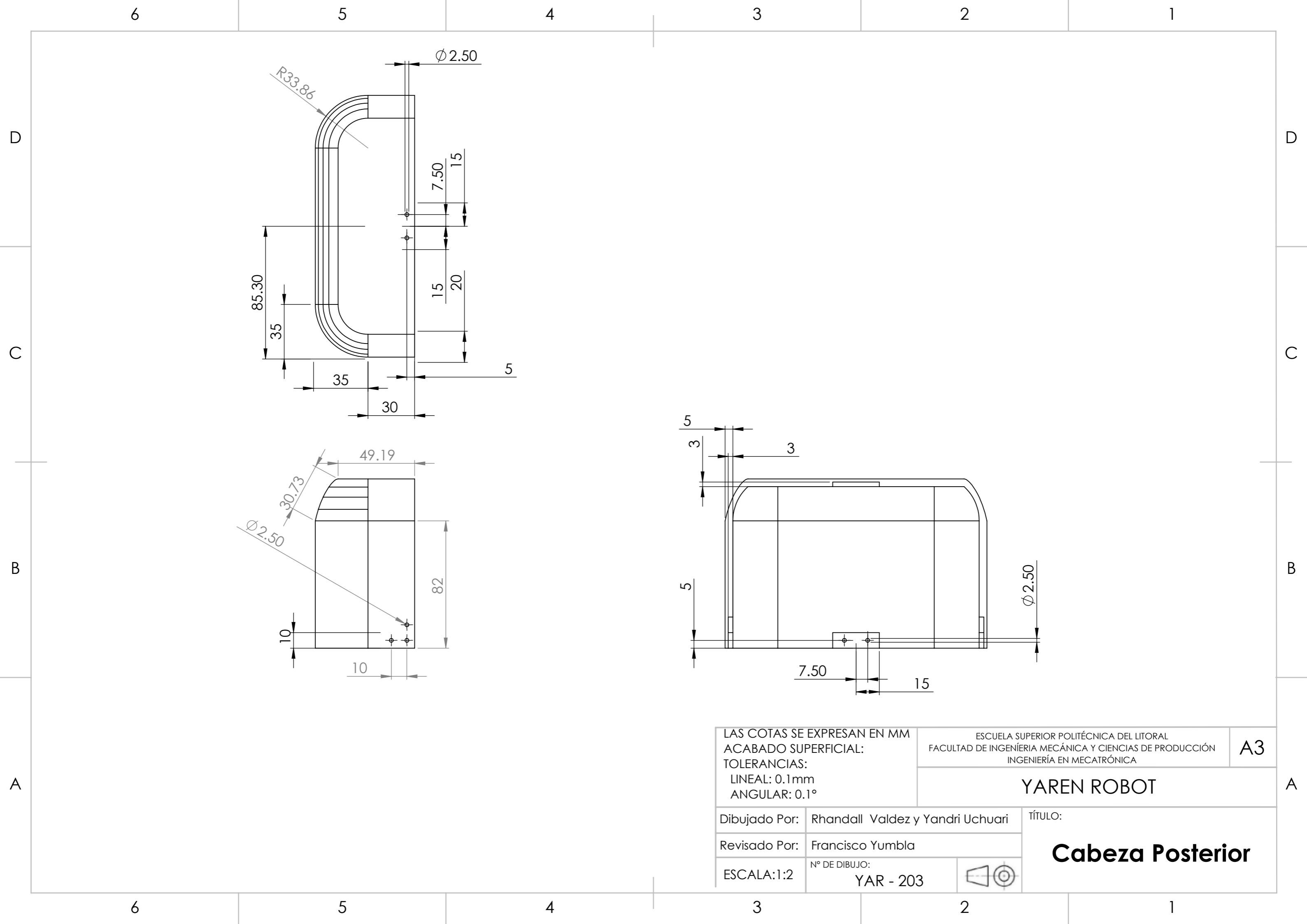
Revisado Por: Francisco Yumbra

ESCALA: 1:2 N° DE DIBUJO:
YAR - 202



TÍTULO:

Cabeza Delantera



4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

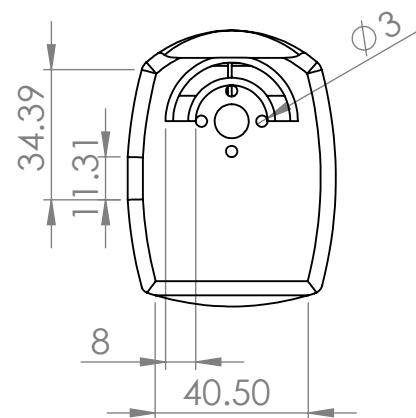
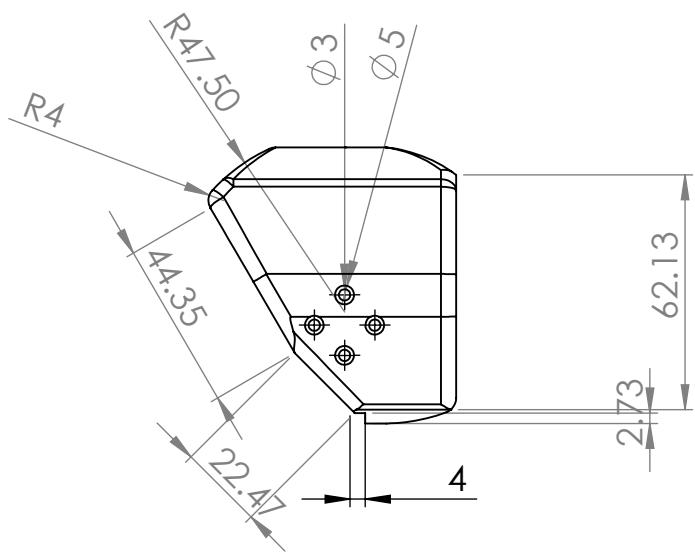
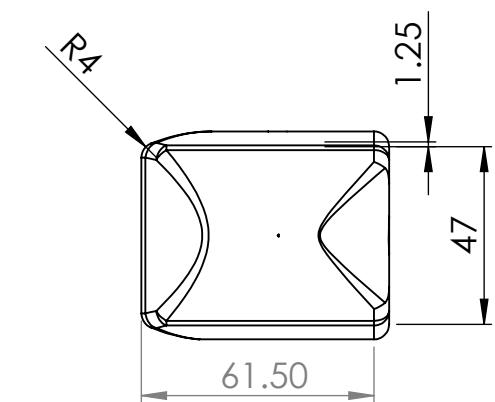
C

B

B

A

A



LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
ACABADO SUPERFICIAL:

TOLERANCIAS:

LINEAL: 0.1mm

ANGULAR: 0.1°

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y CIENCIAS DE PRODUCCIÓN
INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

A4

YAREN ROBOT

Dibujado Por: Rhandal Valdez y Yandri Uchuarí

Revisado Por: Francisco Yumbla

ESCALA:1:2

Nº DE DIBUJO:
YAR - 301

TÍTULO:

Hombro



4

3

2

1

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

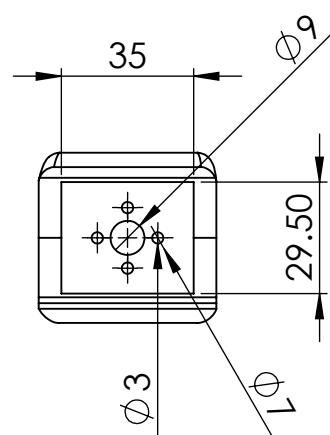
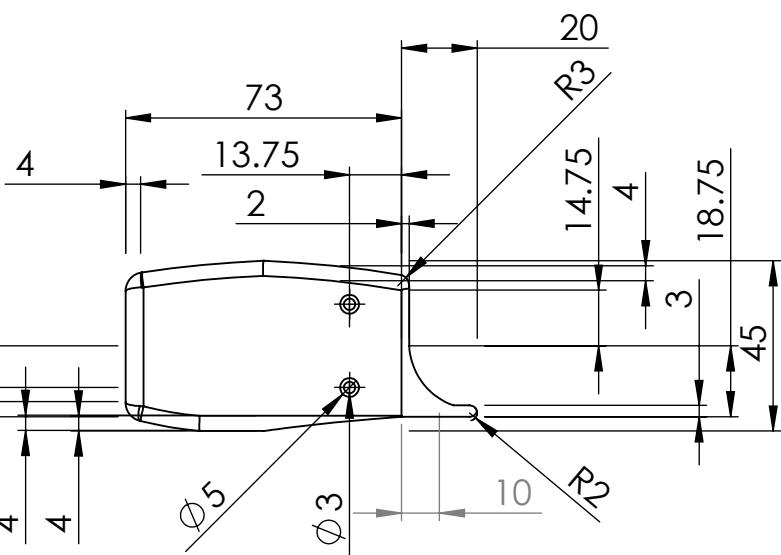
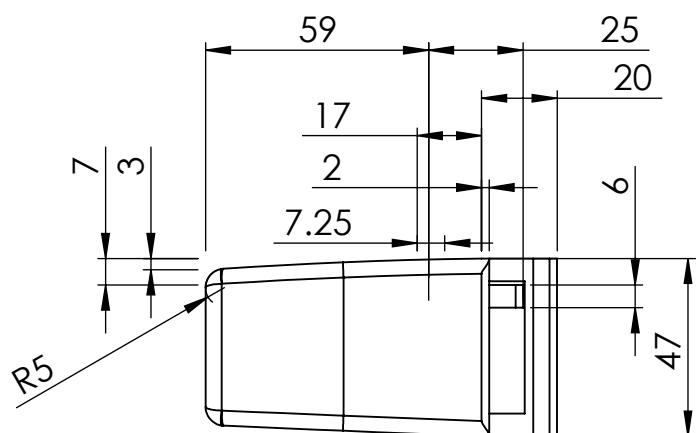
C

B

B

A

A



LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
ACABADO SUPERFICIAL:

TOLERANCIAS:

LINEAL: 0.1mm

ANGULAR: 0.1°

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y CIENCIAS DE PRODUCCIÓN
INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

A4

YAREN ROBOT

Dibujado Por: Rhandal Valdez y Yandri Uchuarí

Revisado Por: Francisco Yumbla

ESCALA:1:2

TÍTULO:

Antebrazo

Nº DE DIBUJO:
YAR - 302



4

3

2

1

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

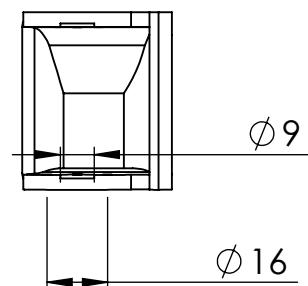
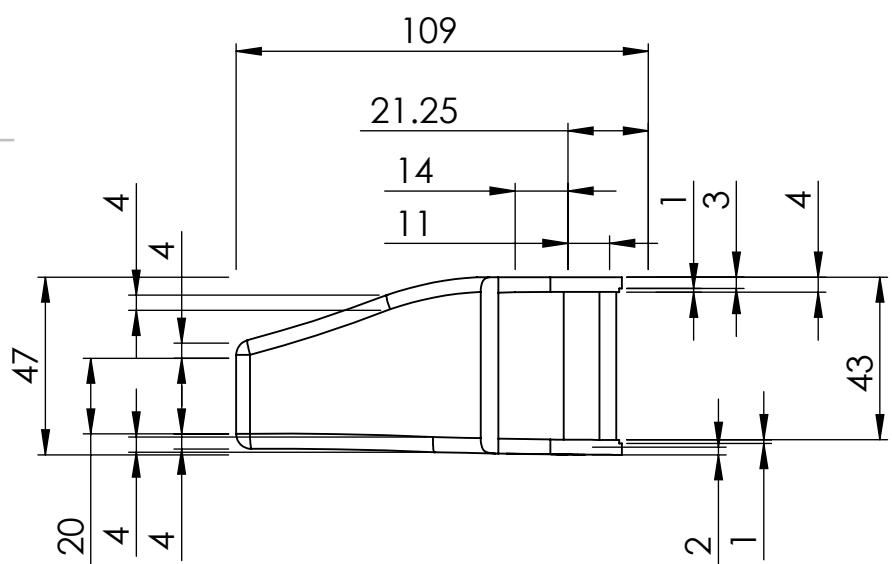
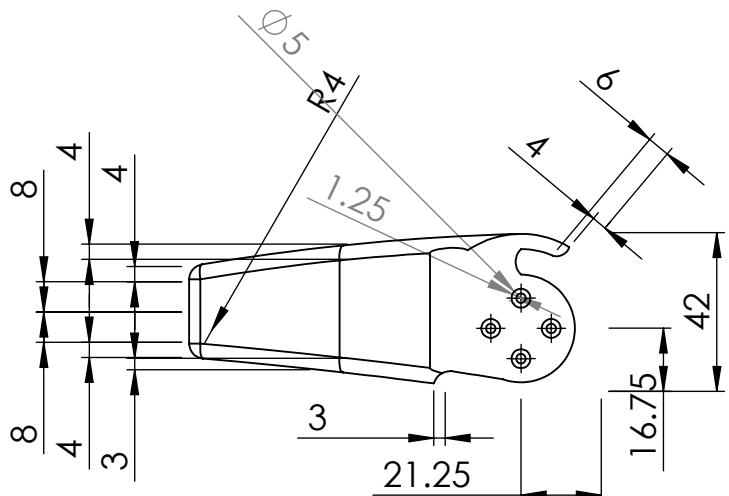
C

B

B

A

A



LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
ACABADO SUPERFICIAL:

TOLERANCIAS:

LINEAL: 0.1mm

ANGULAR: 0.1°

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y CIENCIAS DE PRODUCCIÓN
INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

A4

YAREN ROBOT

Dibujado Por: Rhandal Valdez y Yandri Uchuarí

Revisado Por: Francisco Yumbla

ESCALA:1:2

TÍTULO:

Brazo

Nº DE DIBUJO:
YAR - 303

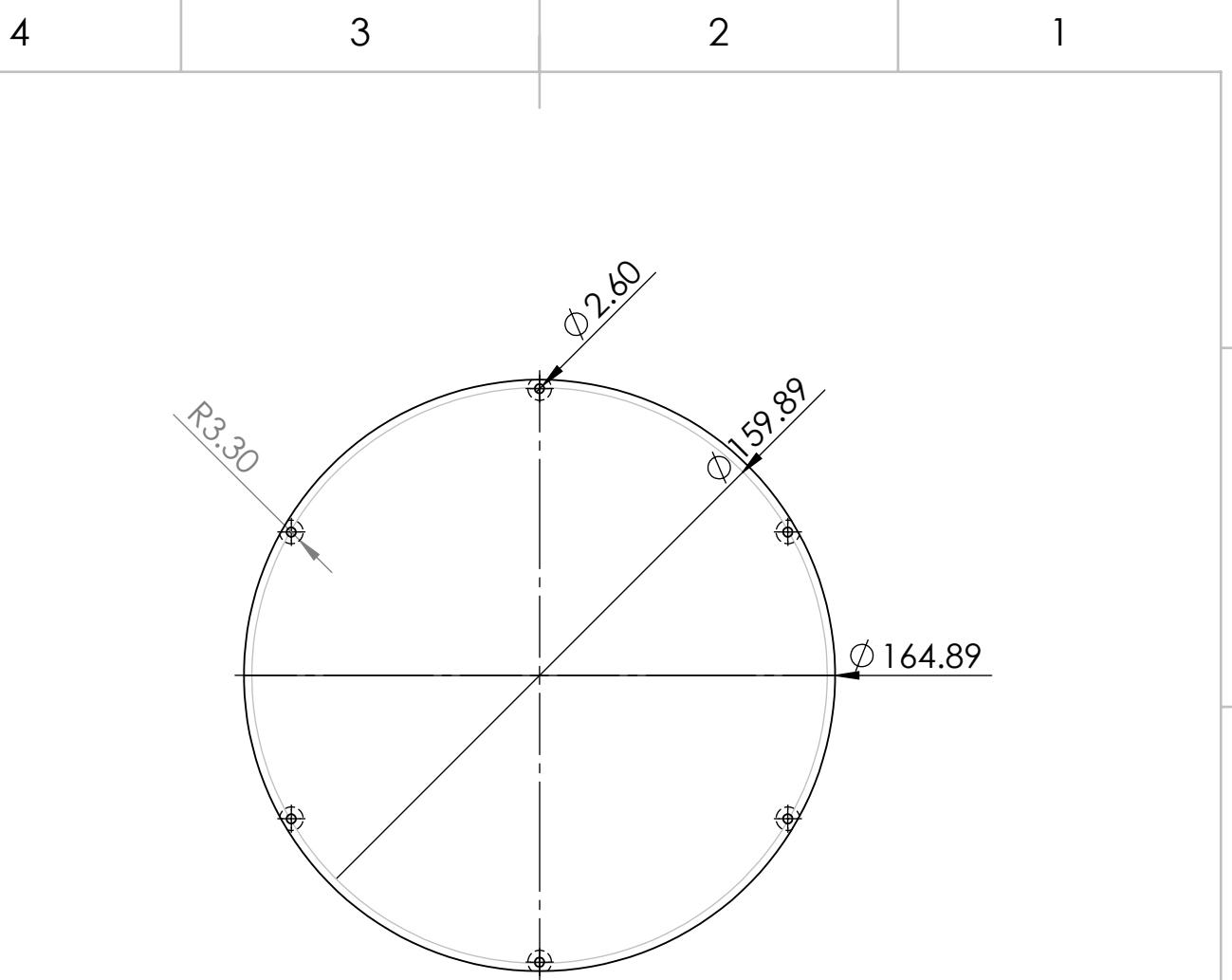


4

3

2

1



LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
ACABADO SUPERFICIAL:
TOLERANCIAS:
LINEAL: 0.1mm
ANGULAR: 0.1°

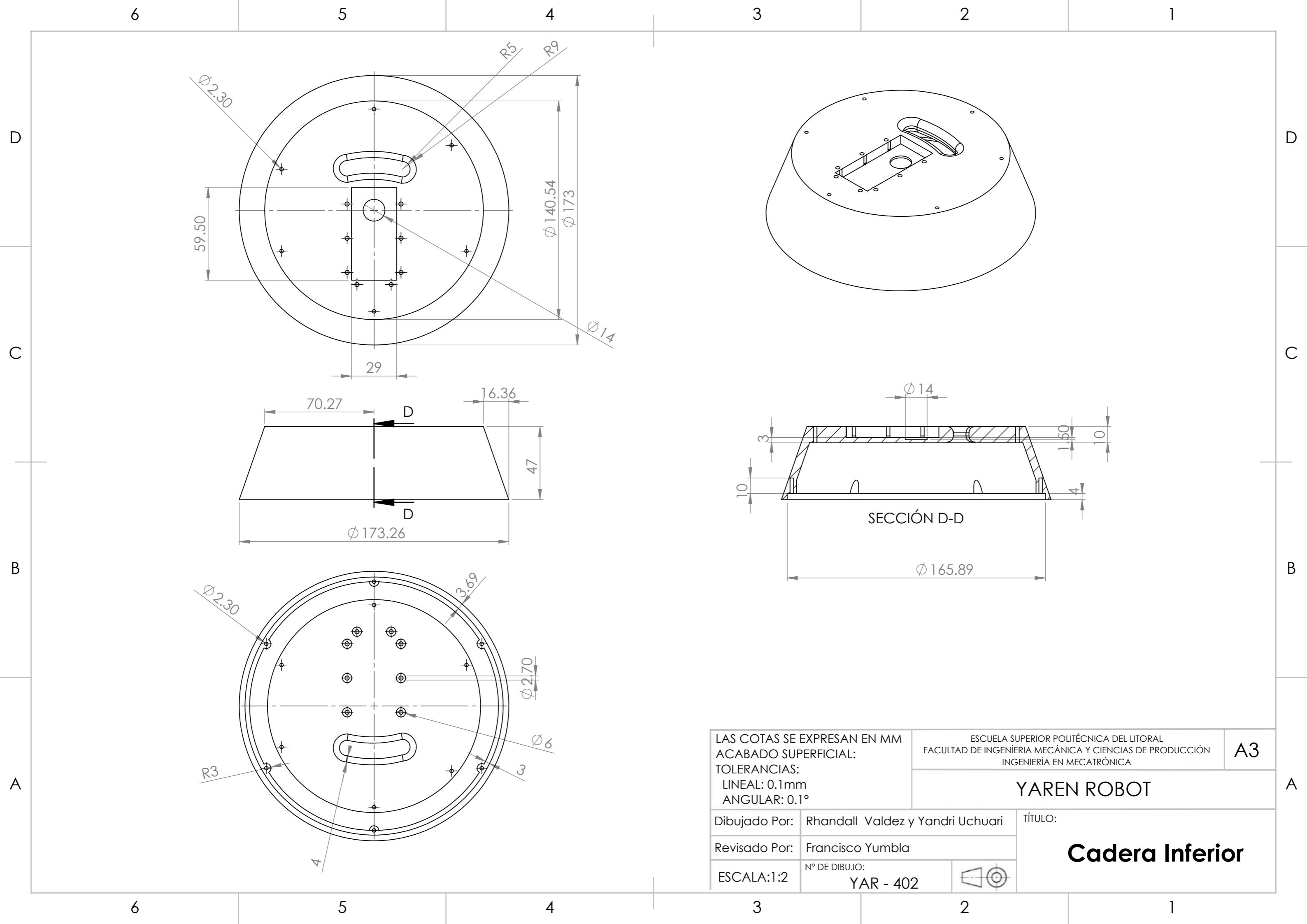
ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y CIENCIAS DE PRODUCCIÓN
INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

A4

YAREN ROBOT

Dibujado Por:	Rhandall Valdez y Yandri Uchuarí	TÍTULO:
Revisado Por:	Francisco Yumbla	
ESCALA:1:2	Nº DE DIBUJO: YAR - 401	

Tapa en Cadera



LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
ACABADO SUPERFICIAL:
TOLERANCIAS:
LINEAL: 0.1mm
ANGULAR: 0.1°

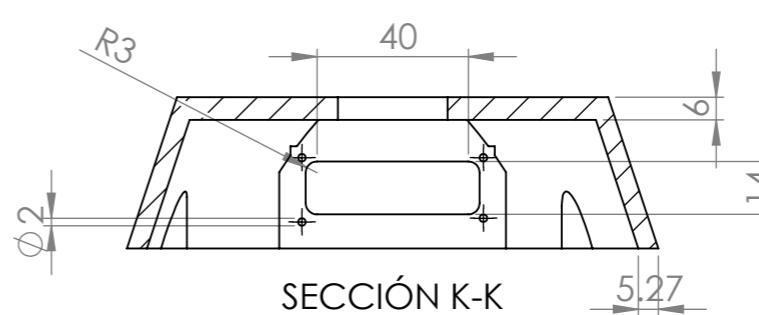
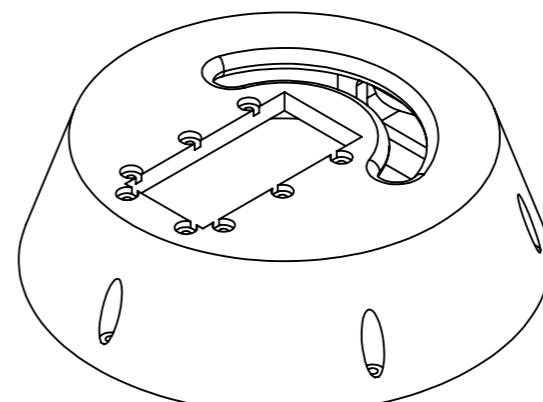
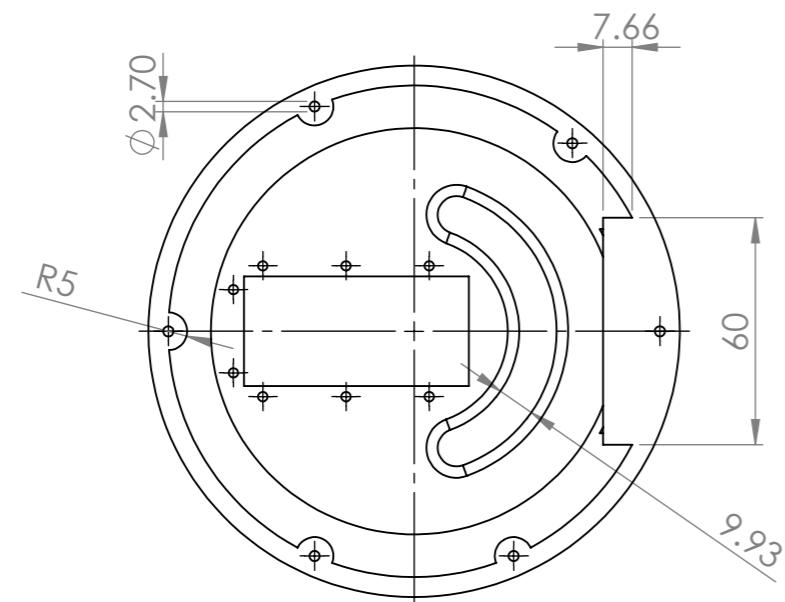
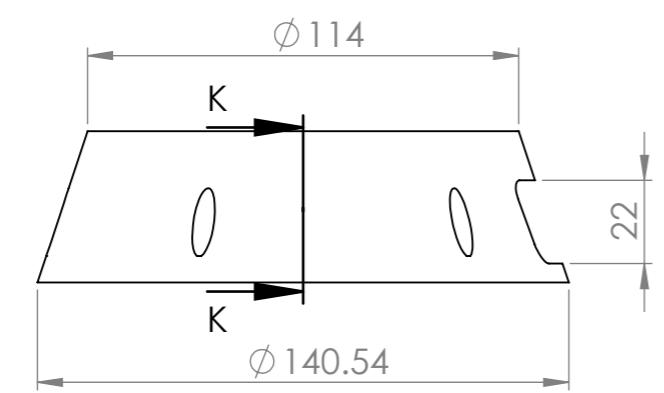
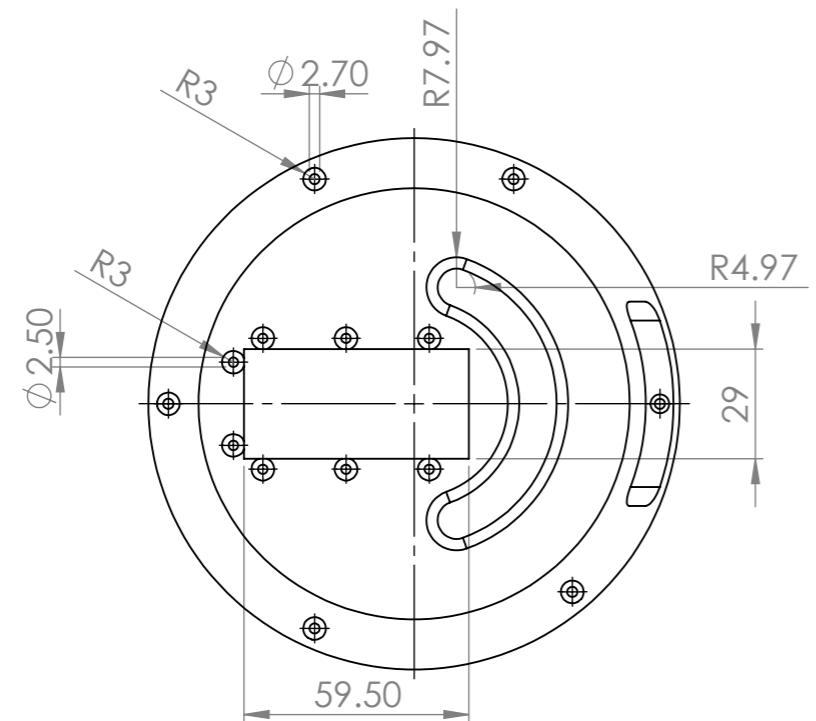
Dibujado Por:	Rhandall Valdez y Yandri Uchuarí	TÍTULO: Cadera Inferior
Revisado Por:	Francisco Yumbla	
ESCALA:1:2	Nº DE DIBUJO: YAR - 402	

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y CIENCIAS DE PRODUCCIÓN
INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

A3

6 5 4 3 2 1

D



LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
ACABADO SUPERFICIAL:
TOLERANCIAS:
LINEAL: 0.1mm
ANGULAR: 0.1°

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y CIENCIAS DE PRODUCCIÓN
INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

A3

YAREN ROBOT

Dibujado Por:	Rholland Valdez y Yandri Uchuarí	TÍTULO: Cadera Superior
Revisado Por:	Francisco Yumbra	
ESCALA:1:2	Nº DE DIBUJO: YAR - 403	

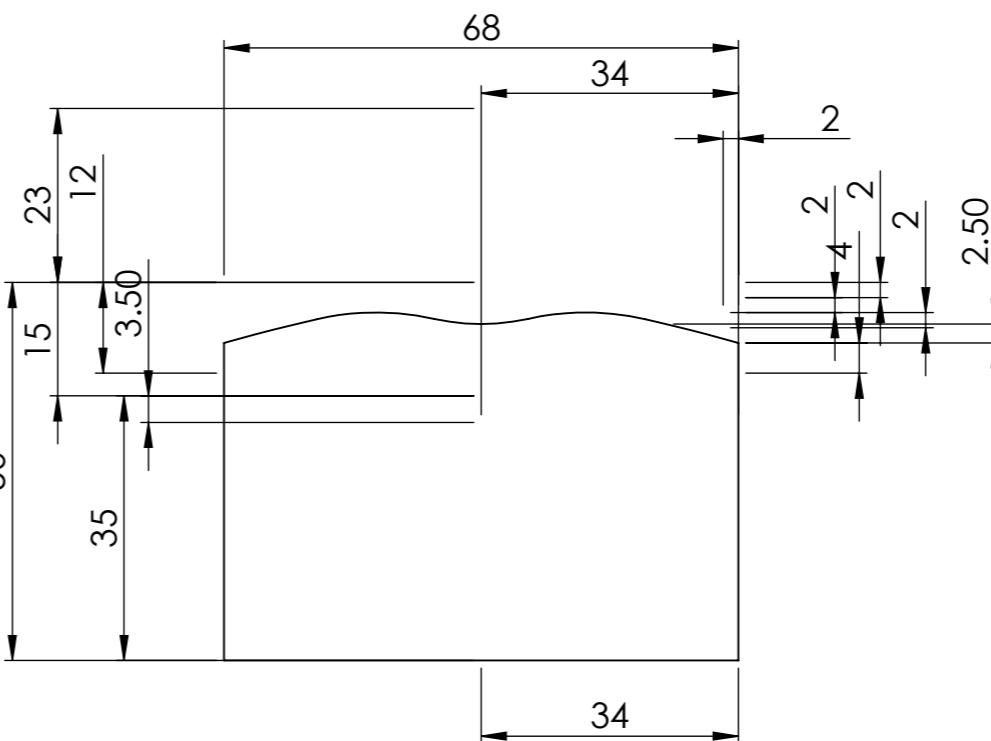
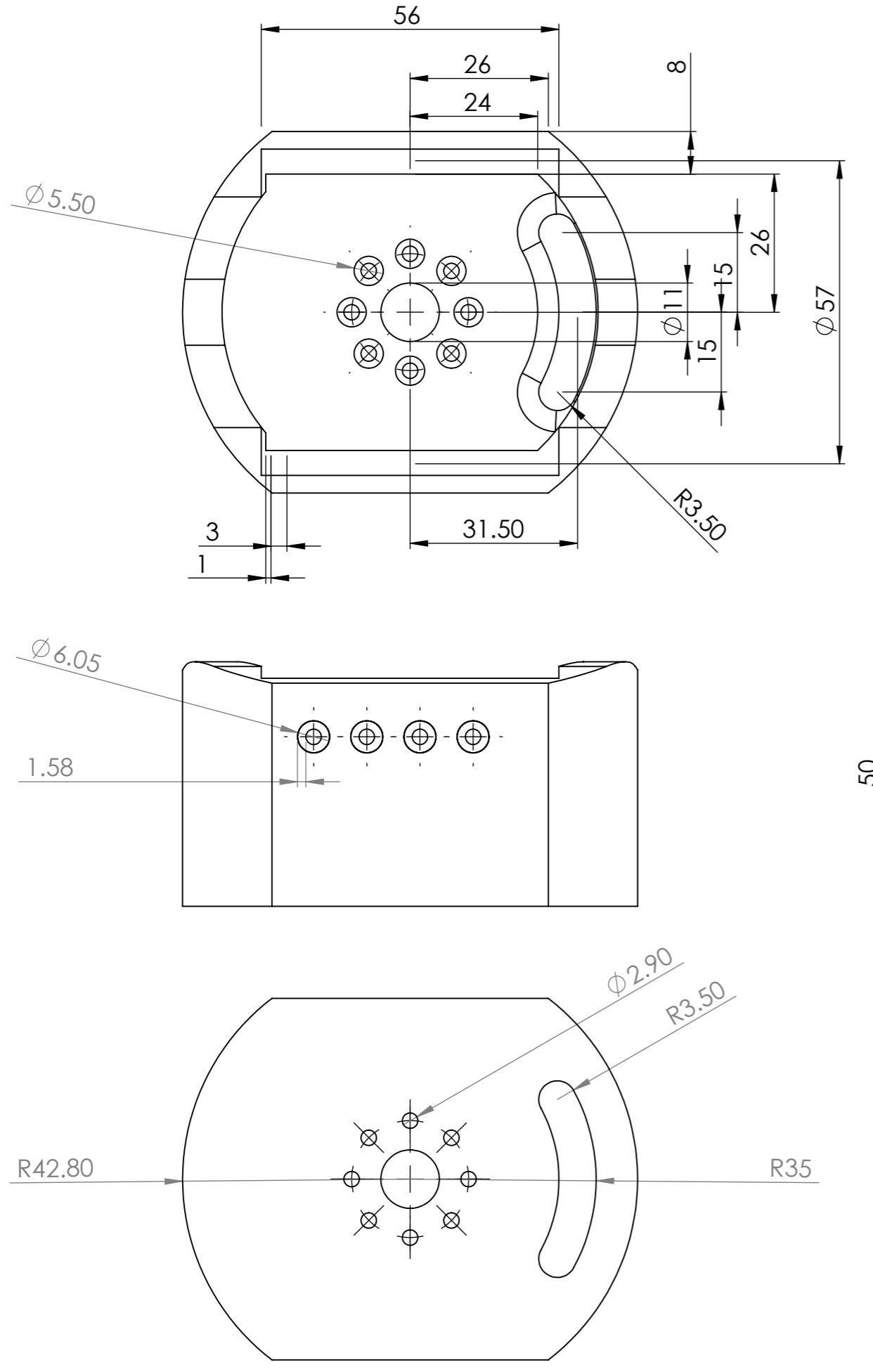
6 5 4 3 2 1

D

C

B

A



LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
ACABADO SUPERFICIAL:
TOLERANCIAS:
LINEAL: 0.1mm
ANGULAR: 0.1°

Dibujado Por: Rhandal Valdez y Yandri Uchuarí
Revisado Por: Francisco Yumbra
ESCALA: 1:1 N° DE DIBUJO: YAR - 404

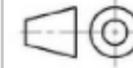
ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y CIENCIAS DE PRODUCCIÓN
INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

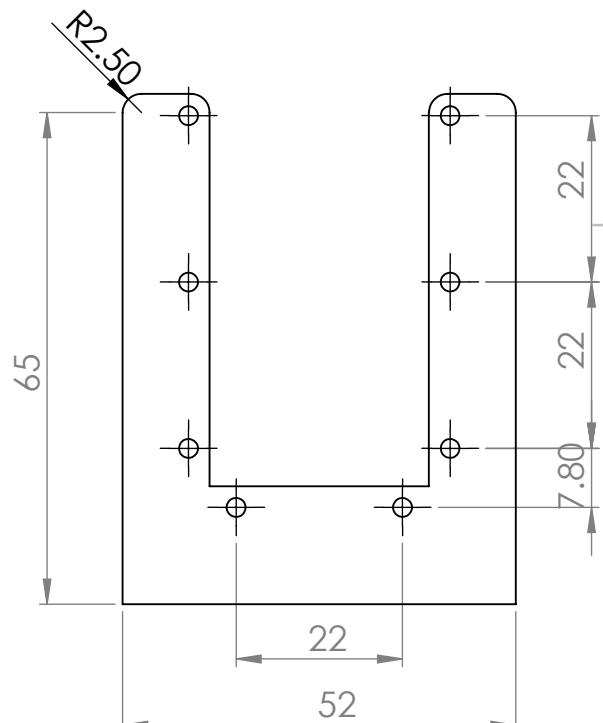
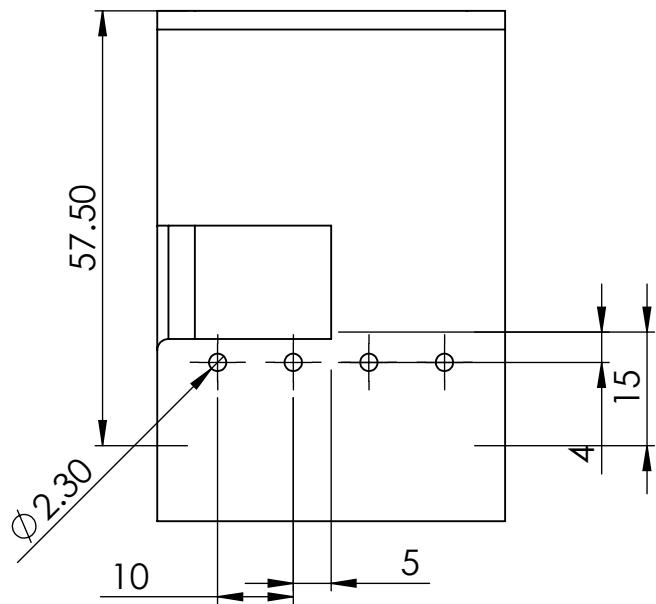
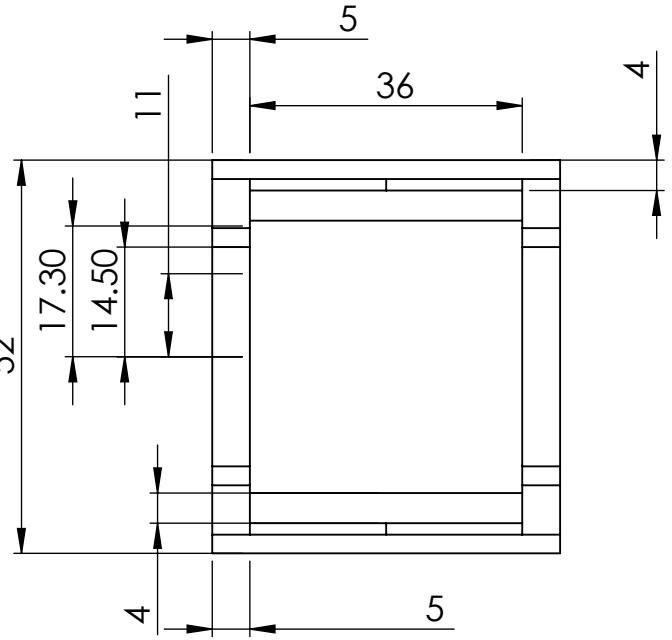
YAREN ROBOT

A3

TÍTULO:

Torso Inferior





LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
ACABADO SUPERFICIAL:
TOLERANCIAS:
LINEAL: 0.1mm
ANGULAR: 0.1°

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y CIENCIAS DE PRODUCCIÓN
INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

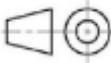
A4

YAREN ROBOT

Dibujado Por:	Rhandall Valdez y Yandri Uchuarí
Revisado Por:	Francisco Yumbla
ESCALA:1:1	Nº DE DIBUJO: YAR - 405

TÍTULO:

Sujección Motor



APÉNDICE F

Capturas del análisis de elementos finitos

A continuación, se presentan diversas capturas asociadas al análisis de elementos finitos de los cuatro ensambles considerados. Se indica información relacionada con el factor de seguridad, deformación, y esfuerzo de Von Mises.

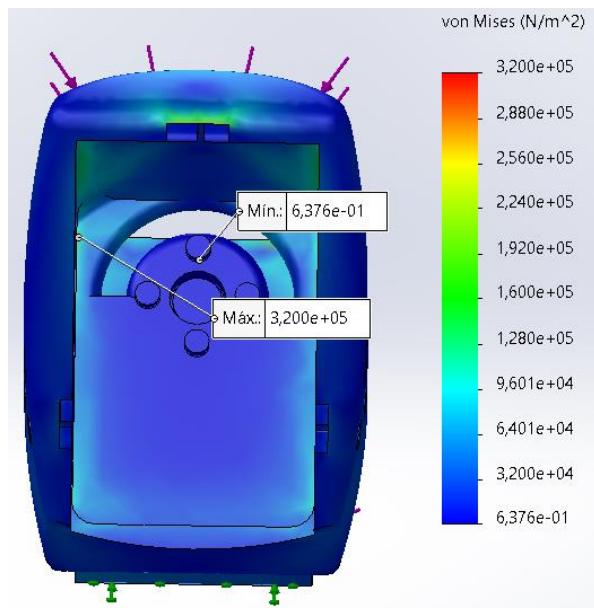


Figura F.1 Esfuerzos de Von Mises en el ensamble del hombro

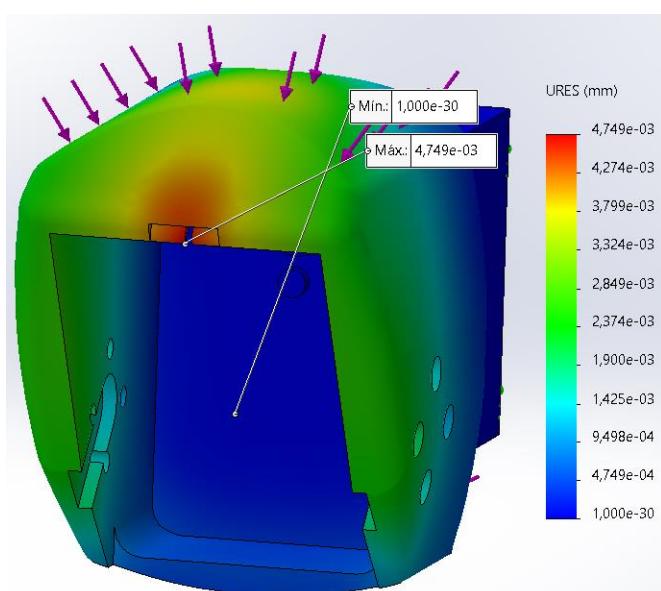


Figura F.2 Deformaciones en el ensamble del hombro

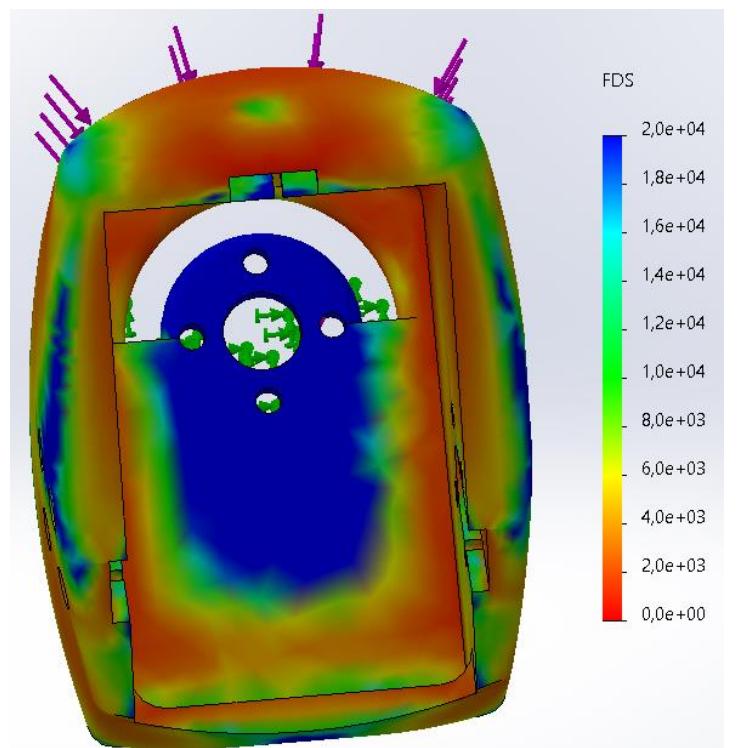


Figura F.3 Factores de seguridad en el ensamble del hombro

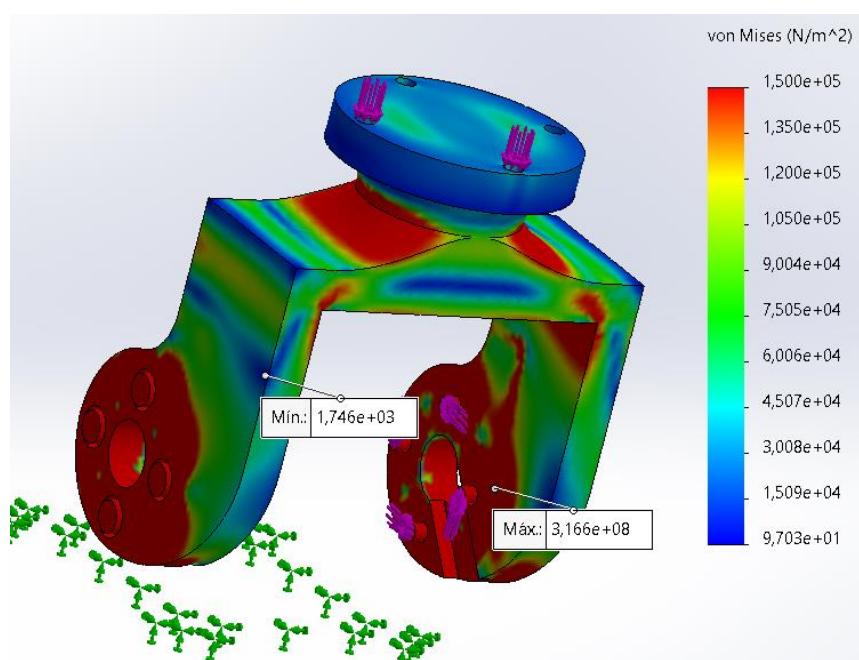


Figura F.4 Esfuerzos de Von Mises en el ensamble del cuello

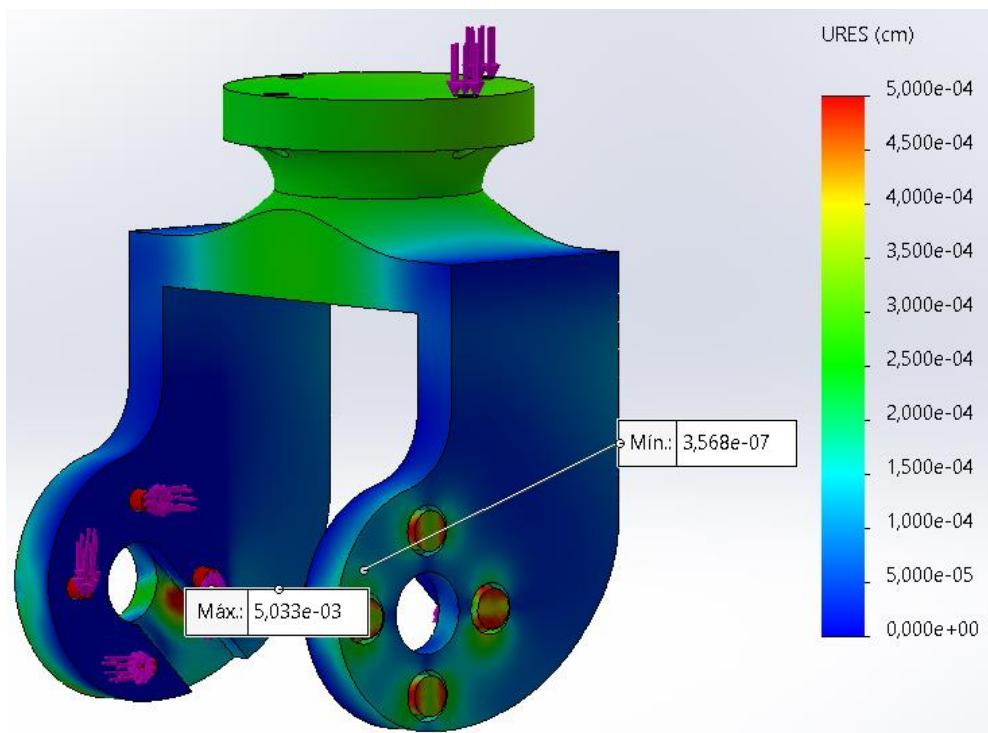


Figura F.5 Deformaciones en el ensamble del cuello

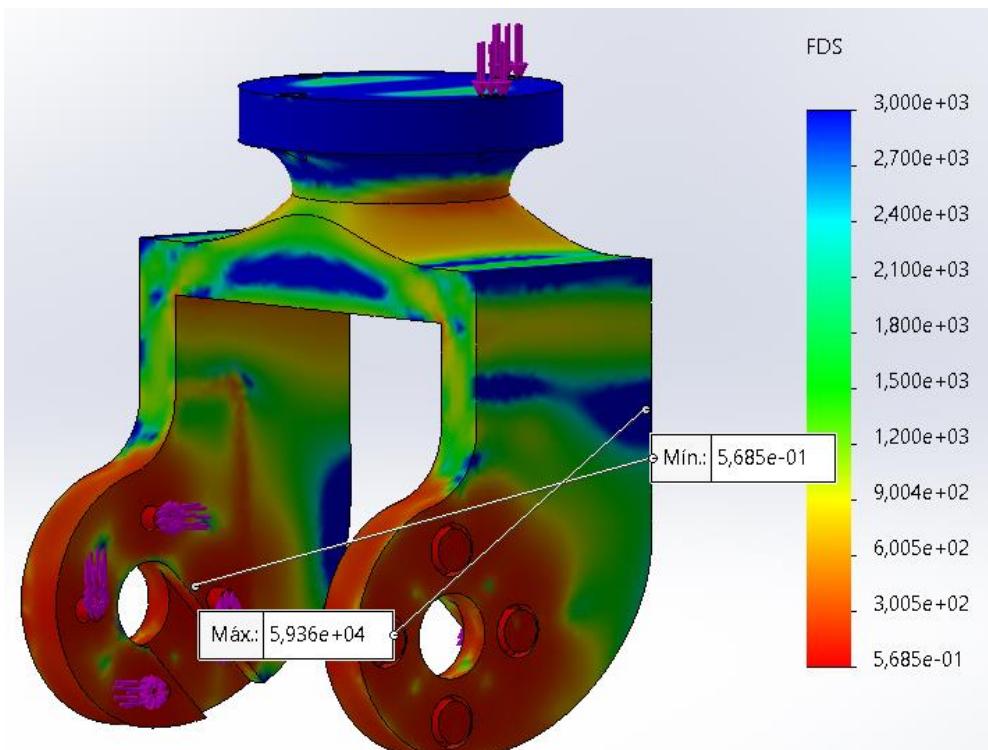


Figura F.6 Factores de seguridad en el ensamble del cuello

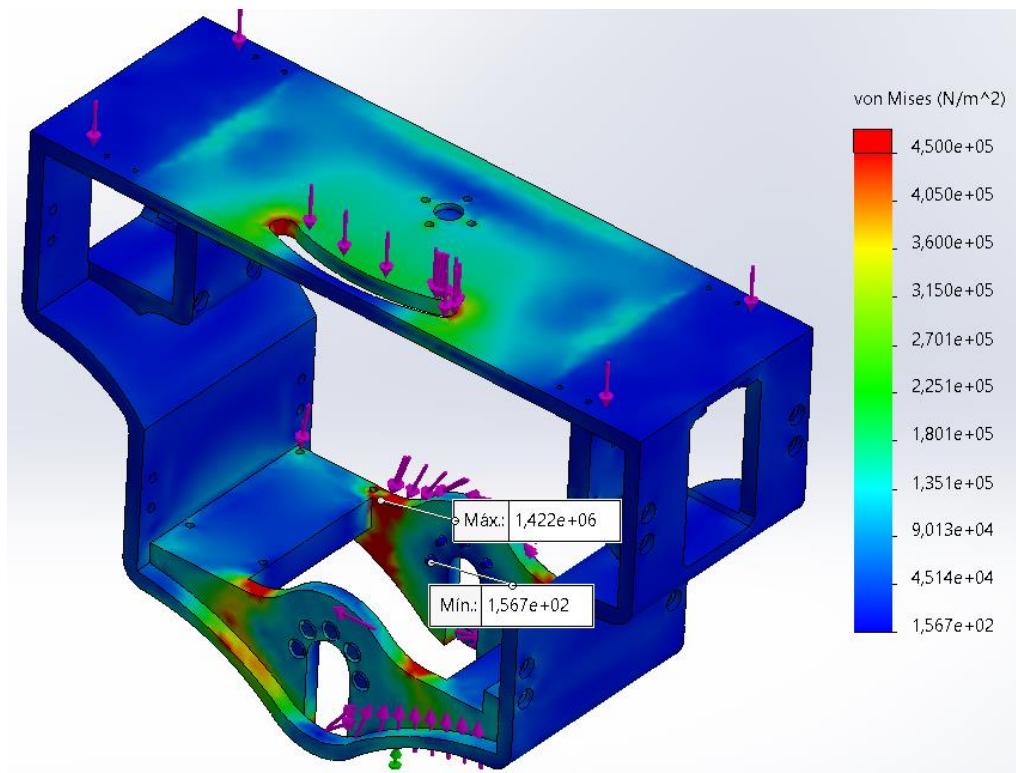


Figura F.7 Esfuerzos de Von Mises en el ensamble del torso

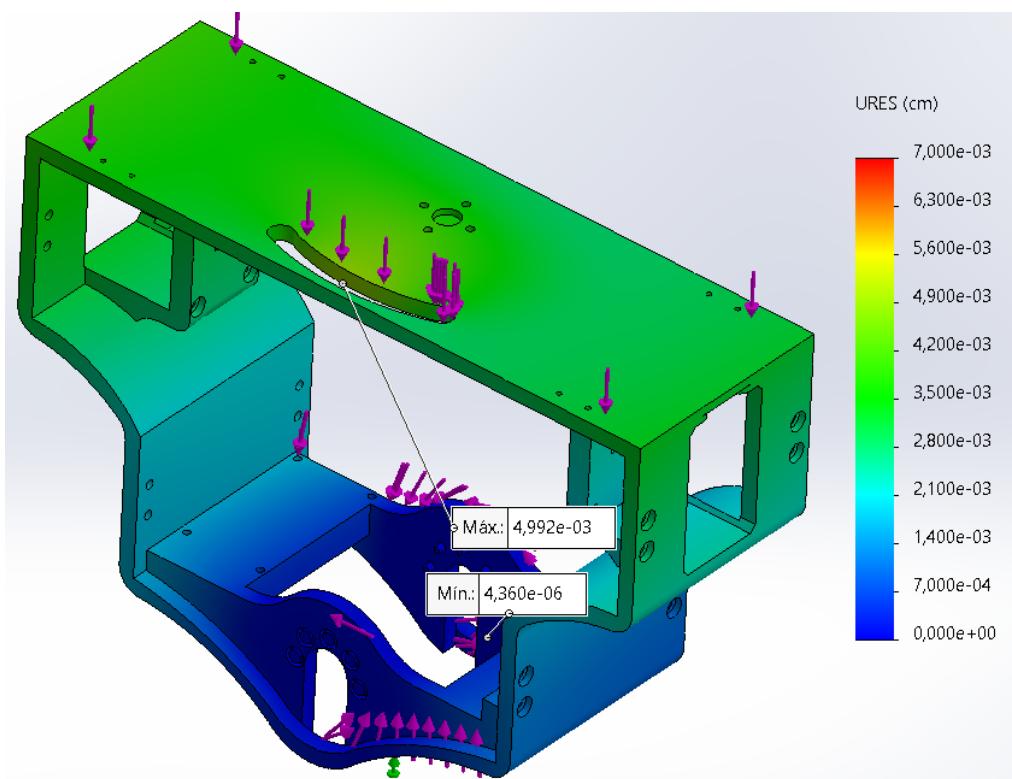


Figura F.8 Deformaciones en el ensamble del torso

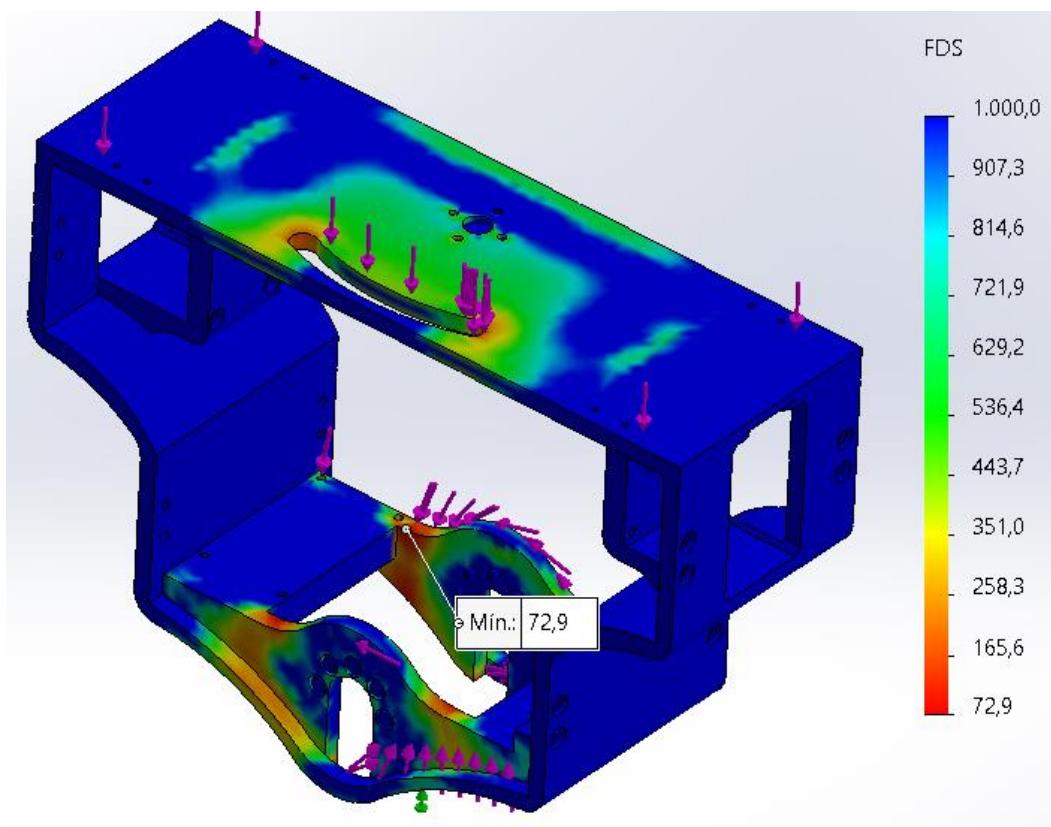


Figura F.9 Factores de seguridad en el ensamble del torso

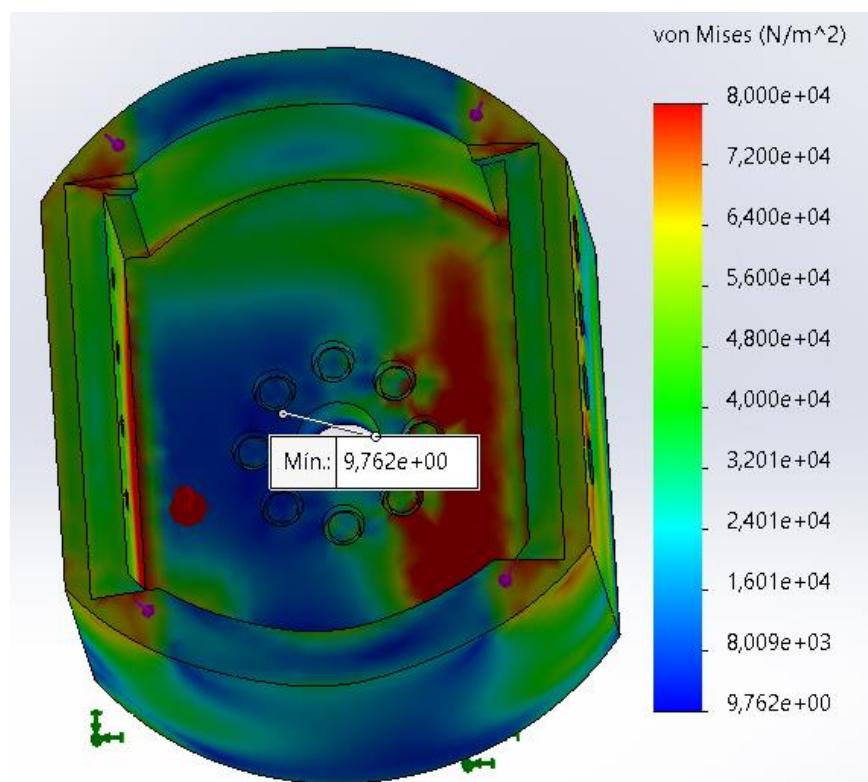


Figura F.10 Esfuerzos de Von Mises en el ensamble del torso inferior

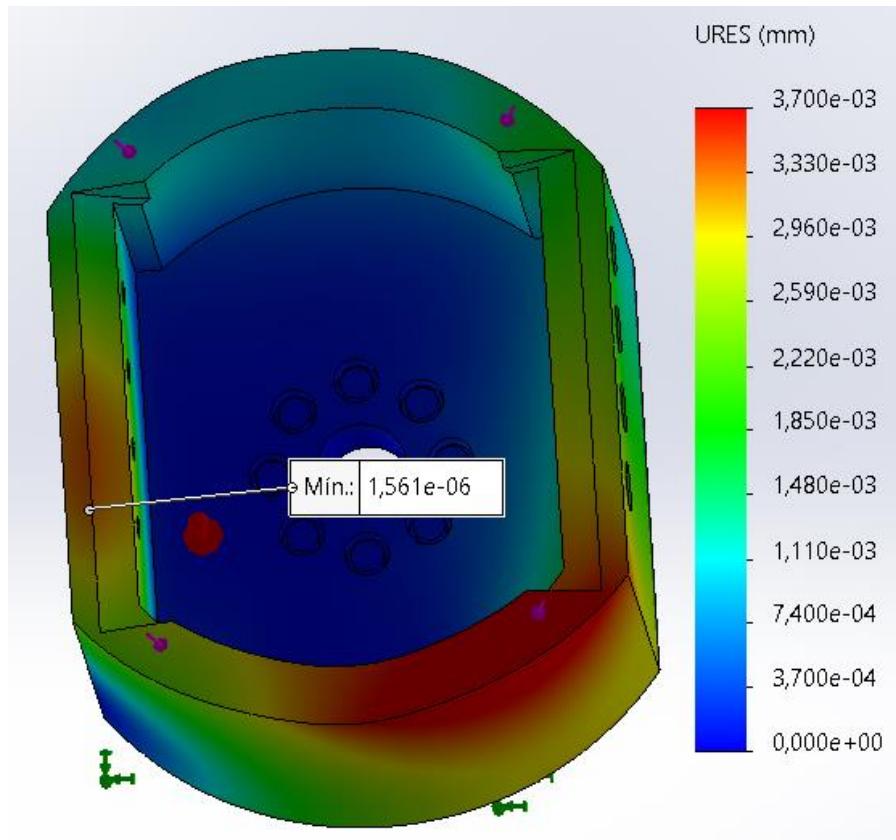


Figura F.11 Deformaciones en el ensamble del torso inferior

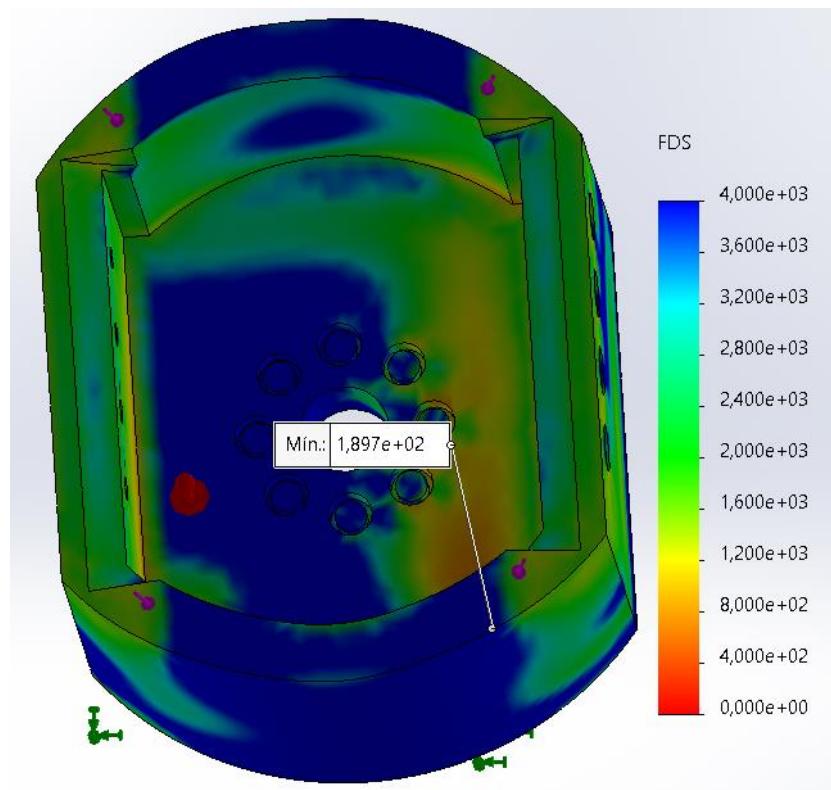


Figura F.12 Factores de seguridad en el ensamble del torso inferior

APÉNDICE G

Plano eléctrico

1

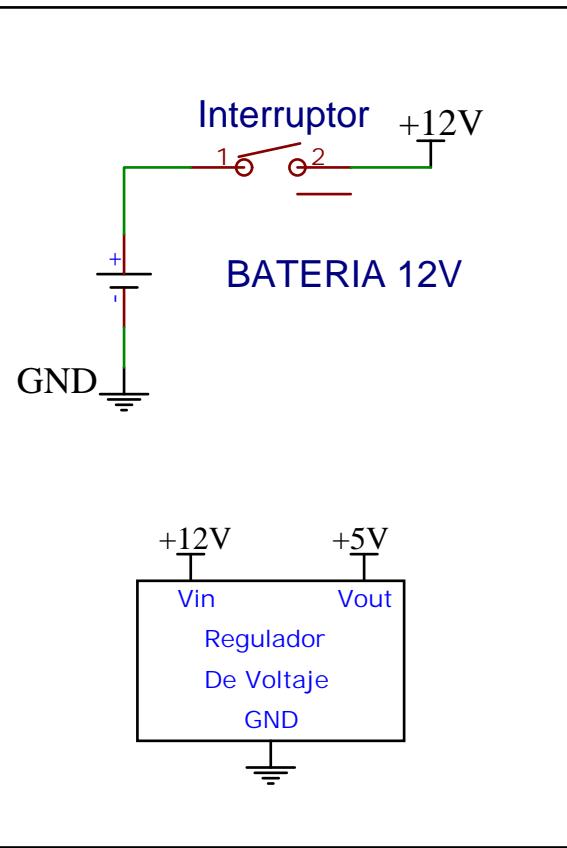
2

3

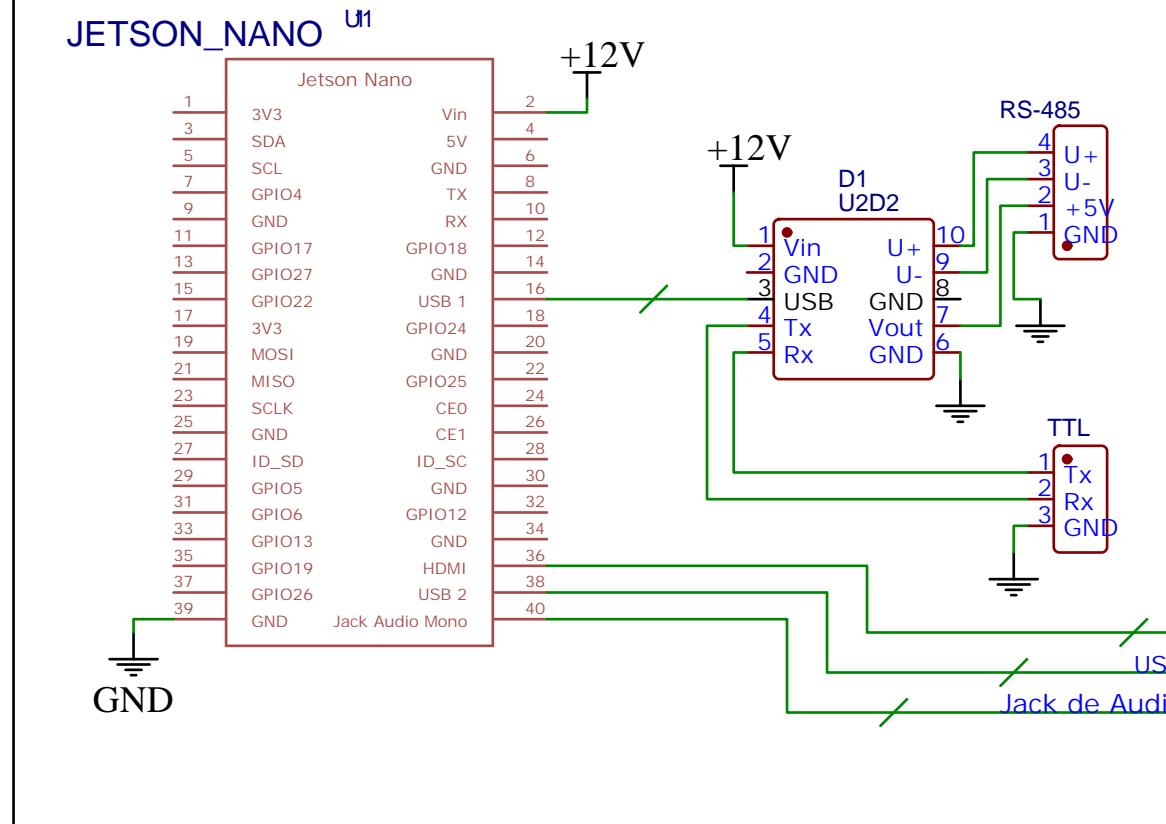
4

5

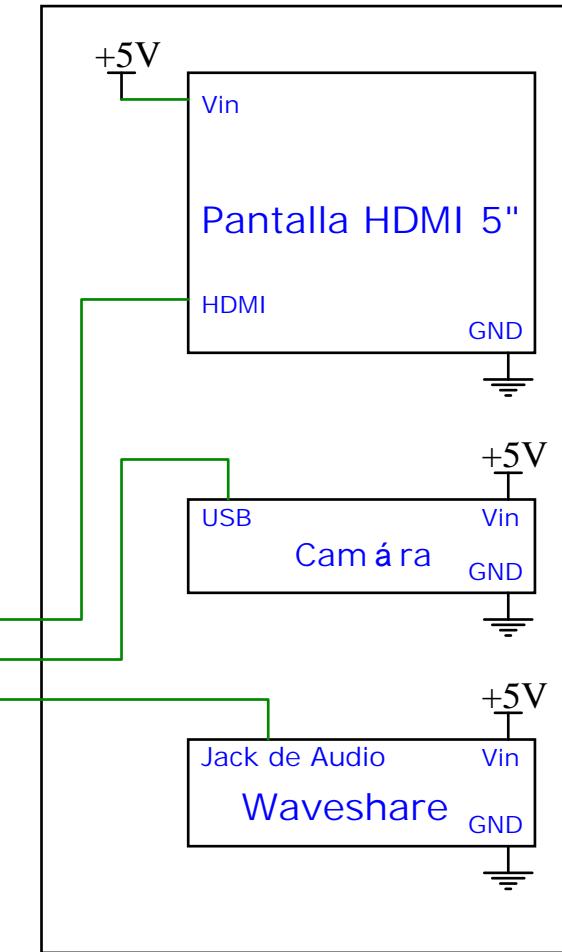
ALIMENTACIÓN



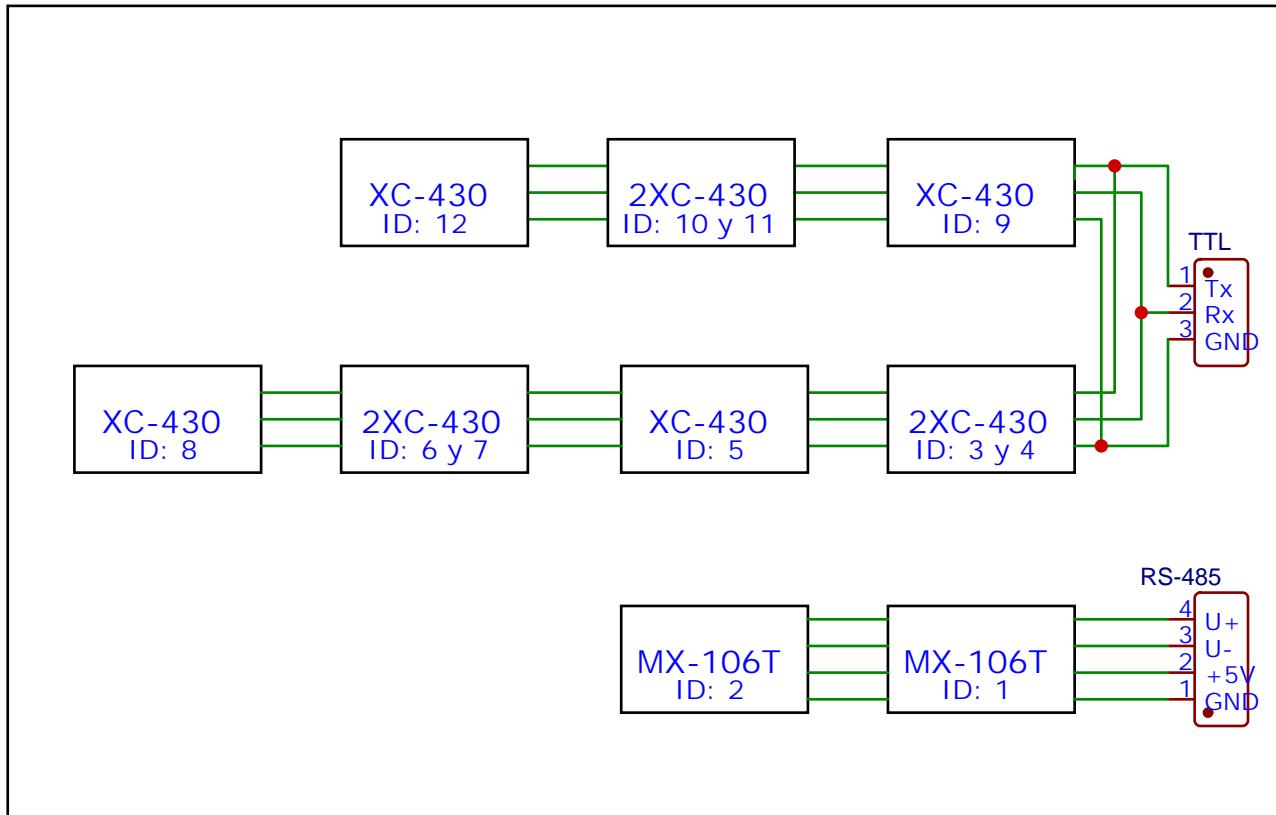
CONTROL



PERIFÉRICOS



ACTUADORES



APÉNDICE H

Repositorio en Github

El código desarrollado en ROS se encuentra subido en un repositorio privado de Github, cuyo directorio se muestra en la Figura H.1.

 RhandallValdez	Time sleep before torque off	9e3d04f 2 weeks ago	8 commits
 object_detection_and_3d_pose_estim...	YU: Add package	3 weeks ago	
 realsense-ros	YU: Add package	3 weeks ago	
 yaren_communication	Time sleep before torque off	2 weeks ago	
 yaren_description	Actualización de Información	last month	
 yaren_master	YU: Add package	3 weeks ago	
 yaren_moveit	Actualización de Información	last month	
 yaren_submodules/DynamixelSDK	Actualización de Información	last month	
 .gitmodules	Actualización de Información	last month	
 CMakeLists.txt	Actualización de Información	last month	
 README.md	Create README.md	last month	
 settings.db	YU: Se agrega Yaren Face	last month	

Figura H.1 Directorio del repositorio en Github

Las primeras dos carpetas contienen código que será utilizado en trabajos futuros para implementar funcionalidades con la cámara contemplada en el diseño electrónico. La tercera carpeta contiene instrucciones que permiten establecer comunicación con los motores a partir de la lectura y escritura de datos.

La carpeta de descripción contiene archivos relacionados con la exportación del modelo 3D a URDF. La carpeta siguiente presenta código sobre las rutinas de movimiento y la cara presentada en la pantalla. En la carpeta de MoveIt se tienen configuraciones para la simulación del robot. Finalmente, la carpeta de Dynamixel SDK es una librería provista por el fabricante de los motores y utilizada para facilitar su control.

En la Figura H.2 se describe la proporción de los lenguajes de programación presentes en el código del repositorio.

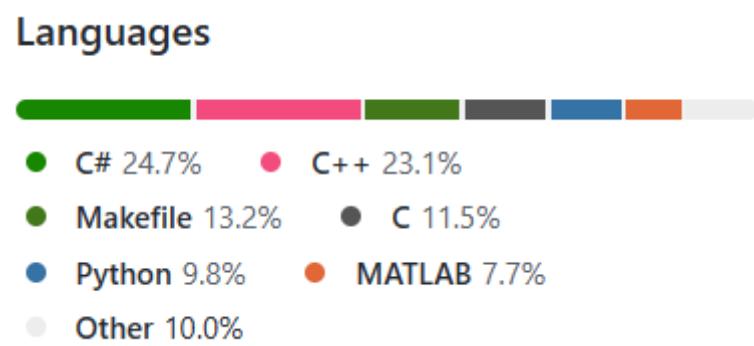


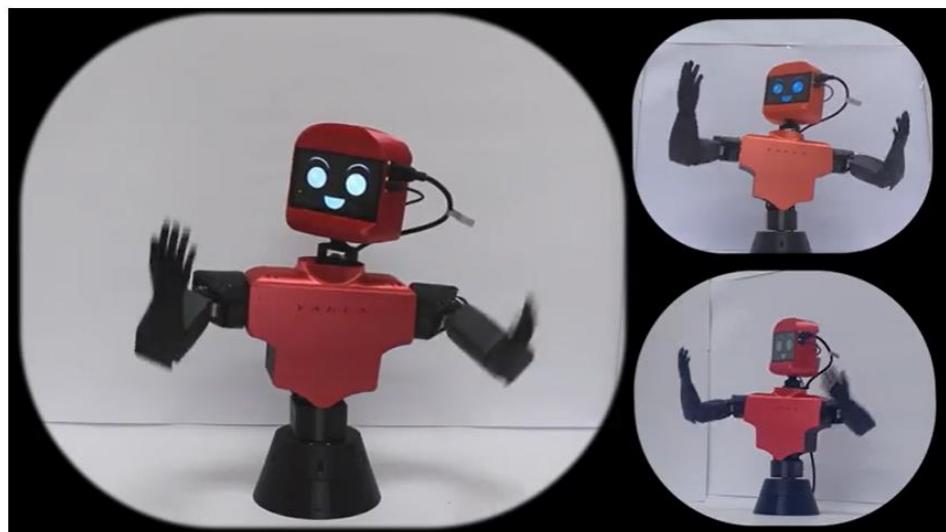
Figura H.2 Lenguajes de programación del código en el repositorio

APÉNDICE I

Enlace a video del funcionamiento del robot

En el siguiente enlace se encuentra un video que describe rutinas de ejemplo que puede realizar el compañero robótico diseñado:

<https://youtu.be/fJEM0S2ZvNg>



Yaren 5min part1

Unlisted

Figura I.1 Captura del video