

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**EXTREMIDADES ROBÓTICAS SUPERNUMERARIAS PARA
ASISTENCIA EN ACTIVIDADES DE COCINA EN RESTAURANTES**

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Mecatrónico

AUTOR:

Bruno Gonzalo Oshiro Kohashikawa

ASESOR:

Renato Alonso Mio Zaldívar

Lima, mayo, 2024

Informe de Similitud

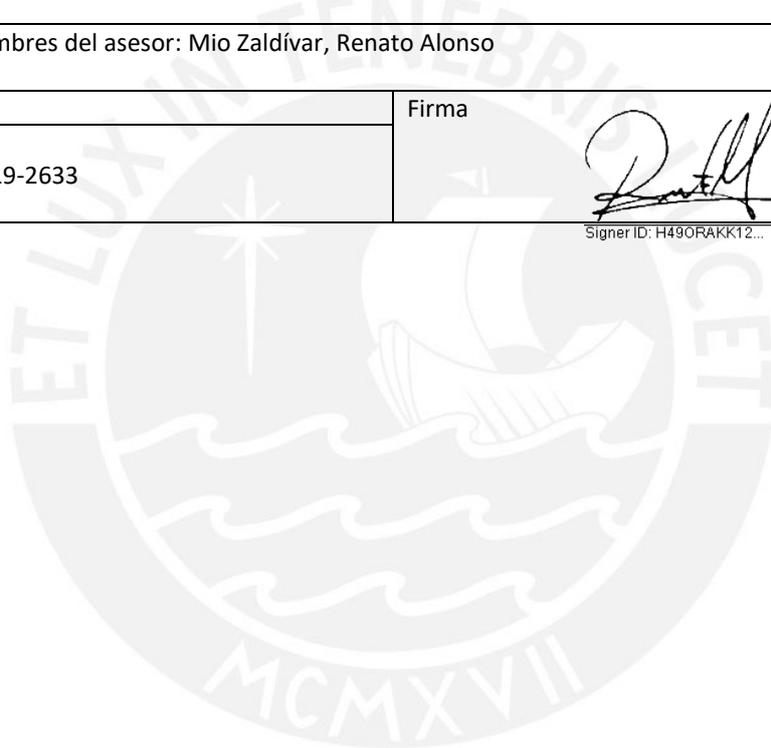
Yo, **Renato Alonso Mio Zaldívar**, docente de la **Facultad de Ciencias e Ingeniería** de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor(a) de la tesis/el trabajo de investigación titulado: **“Extremidades Robóticas Supernumerarias Para Asistencia en Actividades de Cocina en Restaurantes”**, del autor **Bruno Gonzalo Oshiro Kohashikawa**, deo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 13%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 17/05/2024.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis o Trabajo de Suficiencia Profesional, y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha: Bayreuth (Alemania), 17 de mayo del 2024.

Apellidos y nombres del asesor: Mio Zaldívar, Renato Alonso	
DNI: 48117773	Firma 
ORCID: 0000-0001-8419-2633	

Signer ID: H490RAKK12...



RESUMEN

Se sabe que en un restaurante uno de los factores más importantes es el tiempo, tanto para la preparación de los alimentos como la atención a los clientes. En particular, para ayudar a los cocineros a reducir sus tiempos en la cocina se busca el desarrollo de un sistema que realice tareas simples y/o repetitivas en lugar de ellos. Por ello, en este documento se presenta el diseño de un sistema que utiliza extremidades robóticas supernumerarias (*supernumerary robotic limbs*, SRLs por sus siglas en inglés) con la intención de ayudar a los cocineros a reducir sus tiempos en la cocina. El sistema fue diseñado para ayudar en las tareas de mover la cuchara en la olla y secar los platos. Se utilizó la metodología del libro “Design Methodology for Mechatronic Systems: An Approach Using Function/Means Tree and Channel/Agency Net” para el diseño conceptual, diseño mecánico, diseño eléctrico-electrónico y diseño del sistema de control.

El sistema SRLs está compuesto por una interfaz mecánica que se coloca alrededor de la cintura y permite unir dos brazos de 5 GDL cada uno al cuerpo de la persona. Los brazos y partes del soporte de cintura son fabricados de nylon. Los efectores finales de cada brazo son gripper robóticos de tres dedos, a los cuales se les ha colocado sensores de fuerza resistivos en los dedos para medir la fuerza con la que se toman los objetos. Las SRLs son impulsadas por servomotores Dynamixel y una batería de ion de litio se encarga de su alimentación.

El movimiento del sistema se da siguiendo una trayectoria que el usuario grabará previamente utilizando una aplicación de *Smartphone* que se conecta con las SRLs mediante *bluetooth* y moviendo físicamente las SRLs por la trayectoria deseada. Asimismo, el usuario controla el movimiento de las SRLs con una combinación de movimientos del pie y botones e interruptores ubicados sobre la interfaz mecánica. Los movimientos del pie son medidos por un sensor inercial ubicado sobre el empeine.

El diseño planteado en esta tesis se enfoca en una aplicación novedosa de la tecnología SRL y presenta una herramienta con potencial para reducir los tiempos de cocina del usuario. Para un trabajo futuro, se deben considerar características como la versatilidad para realizar más actividades o la autonomía del sistema para no depender enteramente de los comandos del usuario. Las SRLs pueden ser de gran ayuda no solo en el ámbito de la cocina, sino en muchos más sectores.

DEDICATORIA

Esta tesis está dedicada a mi familia: mis padres, Daniel y Cecilia, por darme todo el apoyo, tanto emocional como económico, para poder estudiar una carrera universitaria hasta cumplir el sueño de terminarla. A mi hermana Suemi, por siempre estar a mi lado y animarme en momentos difíciles. A mis tías que me dan siempre su apoyo, a mi perro Haku, y a mis abuelos que, aunque ya no se encuentran conmigo, estoy seguro de que estarían felices de verme con un título universitario.

Quiero dedicar esta tesis también a todos mis amigos. A mis amigos del H-116, en especial a Alessandro y Jose porque hicieron que este largo camino de estudio fuera más divertido e interesante. A mis amigos de Taekwondo PUCP, a mis amigos de LIBRA y a mis amigos del Movi AELU que me dieron todo su apoyo cuando les decía que mi meta es sacar mi título universitario.

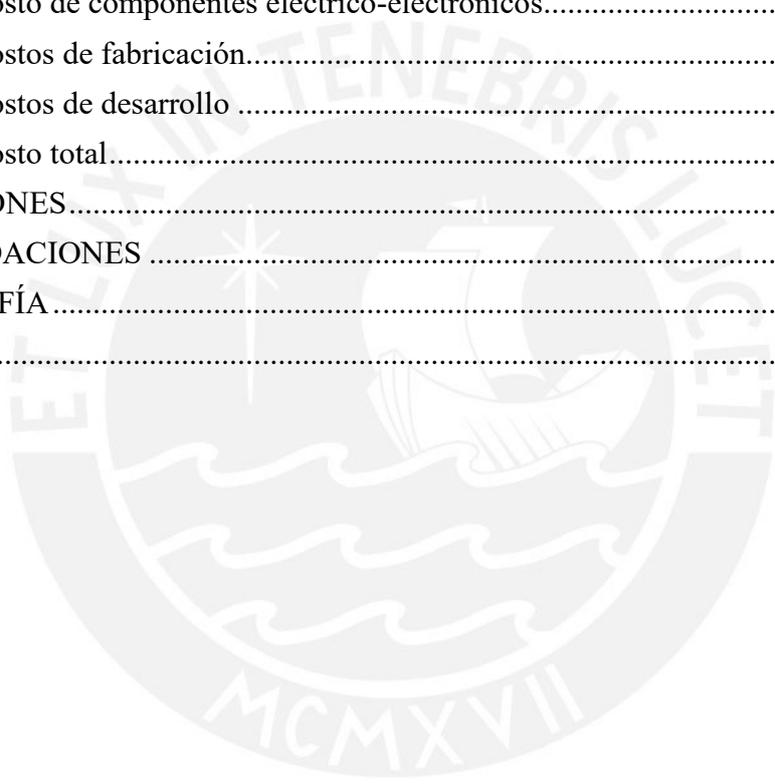
Por último, quiero agradecer a mi asesor Renato Mio por estar siempre dispuesto a ayudarme e introducirme al GIRAB y también agradecer a la profesora Victoria Abarca por animarme a no darme por vencido con mi tesis y enseñarme gran parte de mis conocimientos actuales en investigación durante mi voluntariado en LIBRA.

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN	iii
DEDICATORIA	iv
ÍNDICE DE CONTENIDO	v
ÍNDICE DE TABLAS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	x
CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES	13
1.1. Problemática	13
1.2. Propuesta de solución	16
1.3. Objetivos del trabajo de investigación	16
1.3.1. Objetivo general del proyecto.....	16
1.3.2. Objetivos específicos del proyecto	16
1.4. Alcance	17
1.5. Metodología de trabajo	17
CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE	20
2.1. Conceptos base de las SRLs	20
2.1.1. Definición y clasificación de las SRLs.....	20
2.1.2. Estructura de las SRLs.....	21
2.1.3. Interfaz de control de las SRLs	22
2.1.4. Actuación de las SRLs.....	24
2.2. Seguridad en la cocina.....	25
2.2.1. Peligros en un restaurante.....	25
2.2.2. Ergonomía en un restaurante	26
2.3. Sistemas SRLs existentes	27
2.3.1. Modelos comerciales	27
2.3.2. Trabajos de investigación	28
CAPÍTULO 3: DISEÑO CONCEPTUAL	36
3.1. Requisitos de diseño	36
3.2. Descomposición funcional y síntesis de medios	38
3.3. Síntesis de estructura y comportamiento general	39
3.3.1. Arquitectura del diseño mecatrónico	39
3.3.2. Arquitectura del sistema eléctrico-electrónico	40
3.3.3. Bosquejos del sistema físico.....	40
CAPÍTULO 4: DISEÑO DEL SISTEMA MECÁNICO	41
4.1. Análisis cinemático de los brazos.....	41
4.1.1. Cinemática directa	44
4.1.2. Cinemática inversa	50

4.2. Material y estimación del peso de los brazos	54
4.2.1. Elección del material	54
4.2.2. Estimación de dimensiones y peso de los brazos	55
4.3. Cálculos para la selección de servomotores	56
4.3.1. Cálculo estático de los torques de los motores	56
4.3.2. Cálculo dinámico de los torques de los motores	57
4.3.3. Selección de los servomotores.....	61
4.4. Brazos, uniones de los brazos y soportes de los motores	62
4.4.1. Cálculo de resistencia de los brazos	63
4.4.2. Cálculo de deflexión de los brazos	65
4.4.3. Soportes para los motores.....	67
4.4.4. Eslabones y uniones de los brazos.....	68
4.4.5. Ensamble de los brazos	70
4.5. Selección del gripper	71
4.6. Interfaz mecánica usuario-máquina.....	72
4.6.1. Análisis ergonómico	72
4.6.2. Diseño de la interfaz mecánica.....	73
CAPÍTULO 5: DISEÑO DEL SISTEMA ELÉCTRICO-ELECTRÓNICO.....	75
5.1. Selección de componentes electrónicos	75
5.1.1. Unidad de Medición Inercial (IMU).....	75
5.1.2. Sensores de fuerza resistivos	76
5.1.3. Módulo Bluetooth.....	76
5.1.4. Conexiones para los servomotores	77
5.1.5. <i>Battery Management System</i> (BMS)	78
5.1.6. Interruptores, botones y LEDs de señalización	78
5.1.7. Microcontrolador	79
5.1.8. Reguladores o divisores de voltaje	80
5.2. Cálculo energético	80
5.3. Selección de batería	81
5.4. Soportes para los componentes electrónicos	81
5.5. Diagramas de conexiones de los componentes electrónicos	83
CAPÍTULO 6: MODELADO 3D Y SIMULACIONES.....	86
6.1. Modelado 3D de las SRLs y características	86
6.1.1. Ensamble de las SRLs	86
6.1.2. Características de las SRLs.	88
6.2. Simulación de esfuerzos y deformaciones.....	90
CAPÍTULO 7: DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL	93

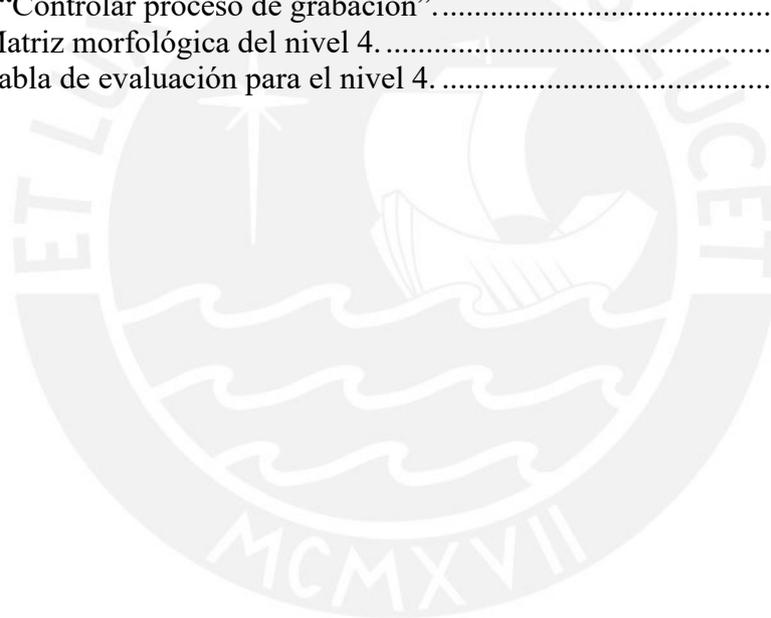
7.1. Diagramas: flujo del sistema y operaciones del usuario.....	93
7.2. Algoritmo de control	101
7.3. Aplicación del smartphone	103
CAPÍTULO 8: FABRICACIÓN Y COSTOS.....	106
8.1. Fabricación del sistema	106
8.1.1. Procesos de fabricación	106
8.1.2. Consideraciones de seguridad	107
8.1.3. Lista de planos del sistema	108
8.2. Costos del proyecto	108
8.2.1. Costo de componentes mecánicos	108
8.2.2. Costo de componentes eléctrico-electrónicos.....	109
8.2.3. Costos de fabricación.....	110
8.2.4. Costos de desarrollo	110
8.2.5. Costo total.....	110
CONCLUSIONES.....	111
RECOMENDACIONES	114
BIBLIOGRAFÍA	115
ANEXOS.....	123



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Ventajas y desventajas de las estructuras rígida y blanda de las SRLs.....	22
Tabla 2.2. Comparación entre los modelos a, b, c, d y e.....	34
Tabla 3.1. Evaluación de los requisitos de diseño.....	37
Tabla 3.2. Medios del sistema SRLs.....	38
Tabla 4.1. Parámetros de Denavit-Hartenberg del brazo izquierdo.....	42
Tabla 4.2. Parámetros de Denavit-Hartenberg del brazo derecho.....	42
Tabla 4.3. Valores de las posiciones iniciales de los brazos.....	43
Tabla 4.4. Valores de las posiciones extendidas y retraídas de los brazos.....	43
Tabla 4.5. Rangos de valores de lo joint angles.....	45
Tabla 4.6. Descripción de la trayectoria de ejemplo para secar los platos.....	49
Tabla 4.7. Equivalencia entre nomenclaturas de MATLAB y cadena cinemática.....	53
Tabla 4.8. Comparación entre posibles materiales para las SRLs.....	54
Tabla 4.9. Dimensiones estimadas para los eslabones de los brazos.....	55
Tabla 4.10. Resultados del cálculo del peso de los eslabones.....	55
Tabla 4.11. Peso estimado de los servomotores de las articulaciones.....	56
Tabla 4.12. Resultados de los cálculos estáticos de los torques.....	57
Tabla 4.13. Inercias con respecto al centro de masa de los eslabones.....	59
Tabla 4.14. Valores máximos de velocidad angular y torque para los motores de las articulaciones.....	60
Tabla 4.15. Características del motor escogido para las articulaciones θ_1 y θ_2	61
Tabla 4.16. Características del motor escogido para las articulaciones θ_3 y θ_4	61
Tabla 4.17. Características del motor escogido para la articulación θ_5	62
Tabla 4.18. Nuevas medidas de los diámetros de los eslabones.....	64
Tabla 4.19. Parámetros calculados para el análisis de esfuerzos.....	64
Tabla 4.20. Valores de fuerzas y momentos de los eslabones.....	65
Tabla 4.21. Casos de deflexión considerados para el cálculo de deflexión de los eslabones.....	66
Tabla 4.22. Valores de deflexión de cada eslabón.....	66
Tabla 4.23. Valores de deflexión de cada eslabón.....	66
Tabla 4.24. Fuerza radial máxima que soportan los motores.....	67
Tabla 4.25. Soportes para los motores utilizados en el ensamble de los brazos.....	67
Tabla 4.26. Modelos de gripper considerados para las SRLs.....	72
Tabla 4.27. Nombres de las piezas del soporte de cintura.....	74
Tabla 5.1. Modelos de IMU's considerados para las SRLs.....	76
Tabla 5.2. Características del sensor FSR400.....	76
Tabla 5.3. Características del módulo bluetooth HC-05.....	77
Tabla 5.4. Modelos de BMS considerados para las SRLs.....	78
Tabla 5.5. Modelos de microcontroladores considerados para las SRLs.....	79
Tabla 5.6. Cálculo energético de los componentes de las SRLs.....	80
Tabla 5.7. Modelos de baterías consideradas para las SRLs.....	81
Tabla 6.1. Pesos de los componentes de un brazo.....	89
Tabla 6.2. Pesos de los componentes del soporte de cintura.....	90
Tabla 8.1. Lista de planos mecánicos.....	108
Tabla 8.2. Lista de precios de los componentes mecánicos de las SRLs.....	109
Tabla 8.3. Lista de precios de los componentes electrónicos de las SRLs.....	109
Tabla 8.4. Costos del proyecto.....	110
Tabla 0.1. Requerimientos y requisitos de los usuarios entrevistados.....	124
Tabla 0.2. Relación entre requisitos de usuario y requisitos de diseño.....	125
Tabla 0.3. Tabla de evaluación para el nivel 1.....	135

Tabla 0.4. Comparación entre los medios del sistema de actuación.	137
Tabla 0.5. Comparación entre los medios de la función “Enviar comando a las SRLs”.	137
Tabla 0.6. Comparación entre los medios de la función “Instalar SRLs”.	138
Tabla 0.7. Comparación entre los medios de la función “Cambiar efector”.	140
Tabla 0.8. Comparación entre los medios de la función “Alcanzar objeto”.	140
Tabla 0.9. Matriz morfológica del nivel 2.	141
Tabla 0.10. Tabla de evaluación para el nivel 2.	142
Tabla 0.11. Comparación entre los medios de la función “Mover articulaciones”. .	143
Tabla 0.12. Comparación entre los medios de la función “Sensor fuerza”.	144
Tabla 0.13. Comparación entre los medios de la función “Proveer energía”.	145
Tabla 0.14. Comparación entre los medios de las funciones “Cambiar de modo” y “Encender sistema”.....	146
Tabla 0.15. Comparación entre los medios de la función “Agarrar cuchara”.	148
Tabla 0.16. Matriz morfológica del nivel 3.	150
Tabla 0.17. Tabla de evaluación para el nivel 3.	151
Tabla 0.18. Comparación entre los medios de la función “Proveer energía.2”.....	152
Tabla 0.19. Comparación entre los medios de las funciones “Indicar estado de grabación” y “Controlar proceso de grabación”.....	154
Tabla 0.20. Matriz morfológica del nivel 4.	154
Tabla 0.21. Tabla de evaluación para el nivel 4.	155



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Principales factores que se consideran al escoger un restaurante.	13
Figura 1.2. Gráfica de tiempos de espera ideales en restaurantes según estudio de Echo Research.....	14
Figura 1.3. Actividades cotidianas clasificadas con riesgo: (a) “Bajo-Moderado” de contagio; y, (b) “Moderado-Alto” de contagio.....	15
Figura 1.4. (a) Robot humanoide. (b) Brazo robótico.	15
Figura 2.1. Tipos de SRLs. (a) SRA, (b) SRLG, (c) SRF.	21
Figura 2.2. Comparación entre estructura rígida y blanda de las SRLs.	22
Figura 2.3. Métodos de control de la SPL.	23
Figura 2.4. (a) Elemento elástico en serie (series elastic actuator), (b) Músculo artificial neumático (pneumatic artificial muscle).	24
Figura 2.5. Brazos (a) y mano (b) robóticos de Moley Kitchen. (Fuente: Moley Robotics, 2021.).....	27
Figura 2.6. (a) Samsung Bot Chef, (b) Samsung Bot Chef en el ecosistema online.	28
Figura 2.7. (a) SRA de 3 GDL. (b) SRA, fuente de energía y brazo miniatura de control.	29
Figura 2.8. Prototipo de SRL usado en la tarea de taladrado.	30
Figura 2.9. Aplicación de las SRLs para trabajo de techo.....	31
Figura 2.10. (a) Montura para hombros, (b) Manipulador.	31
Figura 2.11. (a) Prototipo de fSPL. (b) Pruebas fSPL mediante joystick. (c) Actuadores blandos de tela. (Fuente: Nguyen et al., 2019).....	32
Figura 2.12. Diferentes formas de uso de Orochi.....	33
Figura 2.13. Estructura del Orochi.	33
Figura 2.14. (a) Robot chef humanoide autónomo. (b) Brazo del robot. (c) Gráfica de torque para una de las articulaciones.....	35
Figura 3.1. Arquitectura del diseño mecatrónico de las SRLs.	39
Figura 3.2. Arquitectura del sistema eléctrico-electrónico de las SRLs.....	40
Figura 4.1. Cadena cinemática del brazo izquierdo.....	41
Figura 4.2. Cadena cinemática del brazo derecho.....	42
Figura 4.3. Brazos robóticos en su posición inicial.....	43
Figura 4.4. (a) Brazos robóticos extendidos hacia los lados. (b) Brazos robóticos en su posición retraída.	44
Figura 4.5. Brazos robóticos usando el comando teach de Robotic Toolox de Peter Corke.	45
Figura 4.6. Posible trayectoria del brazo derecho estimada con teach para mover la cuchara.....	46
Figura 4.7. Posible trayectoria del brazo izquierdo estimada con teach para mover la cuchara.....	47
Figura 4.8. Posible trayectoria de los brazos estimada con teach para secar los platos.....	49
Figura 4.9. Diagramas para hallar el vector desplazamiento del brazo izquierdo desde la base hasta el eje de coordenadas 3 (a) y desde el eje 3 hasta el eje 5 (b).....	53
Figura 4.10. Diagramas para hallar el vector desplazamiento del brazo derecho desde la base hasta el eje de coordenadas 3 (a) y desde el eje 3 hasta el eje 5 (b).....	53
Figura 4.11. Diagrama con articulaciones y sus respectivos ejes coordenados del brazo izquierdo.....	53
Figura 4.12. DCL’s para hallar los torques de los servomotores 1 y 2.	56
Figura 4.13. DCL’s para hallar los torques de los servomotores 3 y 4.	57
Figura 4.14. Velocidad angular de las articulaciones con respecto al tiempo en la trayectoria de mover la cuchara de la olla.	60

Figura 4.15. Torques de las articulaciones calculados con respecto al tiempo en la trayectoria de mover la cuchara de la olla.	60
Figura 4.16. Servomotores escogidos para las SRLs.....	62
Figura 4.17. Diagrama de fuerzas internas de un brazo de las SRLs.	63
Figura 4.18. Sección circular de un eslabón de las SRLs.....	63
Figura 4.19. Diagrama de cuerpo libre de un eslabón genérico de las SRLs.	65
Figura 4.20. (a) Soporte para la unión del eslabón a3 con el motor M4. (b) Soporte base para el motor M4 del brazo derecho. (c) Soporte base para el motor M4 del brazo izquierdo.	68
Figura 4.21. Modelos 3D de los eslabones de las SRLs.....	69
Figura 4.22. Soportes para las uniones entre motores y eslabones.....	69
Figura 4.23. (a) Unión a1-M2-a2. (b) Unión a2-M3-a3. (c) Unión a3-M4-a4.....	70
Figura 4.24. Ensamble del brazo derecho de las SRLs.	70
Figura 4.25. Ensamble del brazo izquierdo de las SRLs.	71
Figura 4.26. Almohada escogida para el soporte de cintura.....	73
Figura 4.27. Ensamble del soporte de cintura de las SRLs.	74
Figura 4.28. (a) Piezas que conforman el soporte de cintura. (b) Unión entre pieza (1 o 2), (3) y (4). (c) Unión entre pieza (4) y (5 o 6). (d) Unión entre pieza (1) y (2).....	74
Figura 5.1. Dispositivos para conexión de servomotores.....	77
Figura 5.2. Interruptores, botones y LEDs de las SRLs.	79
Figura 5.3. Diagramas de los divisores de voltaje.....	80
Figura 5.4. (a) Caja para el IMU Pie. (b) Modelo 3D del interior de la caja con el IMU Pie.	82
Figura 5.5. (a) Caja para los componentes. (b) Modelo 3D del interior de la caja con componentes.	82
Figura 5.6. Sección 1 del diagrama de conexiones.....	83
Figura 5.7. Sección 2 del diagrama de conexiones.....	84
Figura 5.8. Sección 3 del diagrama de conexiones.....	84
Figura 5.9. Conexión Daisy Chain Link de los servomotores para la serie MX.	85
Figura 5.10. Sección 4 del diagrama de conexiones.....	85
Figura 6.1. Vista frontal del ensamble de las SRLs.	86
Figura 6.2. Vista posterior del ensamble de las SRLs.	87
Figura 6.3. (a) Soporte M5-Gripper. (b) Unión entre motor M5 y gripper.	87
Figura 6.4. (a) Unión de ángulo pesado. (b) Caja de componentes en el ensamble de SRLs.	88
Figura 6.5. Dummy usando el sistema de SRLs.....	88
Figura 6.6. (a) Análisis de esfuerzos de un brazo. (b) Análisis de deflexiones de un brazo.	91
Figura 6.7. Análisis de factor de seguridad de un brazo.....	91
Figura 6.8. (a) Análisis de FS de las bridas. (b) Análisis de FS de los eslabones.	92
Figura 6.9. Análisis de esfuerzo, deflexión y factor de seguridad del soporte de cintura.	92
Figura 7.1. Diagrama de flujo principal del sistema.....	94
Figura 7.2. Diagrama de flujo de la función "Grabar trayectoria".	96
Figura 7.3. Diagrama de flujo de la función "Mover SRLs".....	96
Figura 7.4. Diagrama de operaciones del usuario.	98
Figura 7.5. Función "Grabar trayectoria" del DF del usuario.	99
Figura 7.6. Función "Escoger modo" del DO del usuario.	100
Figura 7.7. Función "Mover SRLs" del DO del usuario.	100
Figura 7.8. Diagrama de bloques del control de un brazo SRL.	102

Figura 7.9. Controlador de posición en cascada de una articulación.	103
Figura 7.10. Primera sección de la aplicación de Smartphone.	104
Figura 7.11. Segunda sección de la aplicación de Smartphone.	104
Figura 8.1. Proceso de fabricación de una brida.	106
Figura 0.1. Árbol de funciones y medios de las SRLs.	134
Figura 0.2. Spiderman retrayendo sus patas robóticas.	139
Figura 0.3. Interruptor de 3 posiciones.	146
Figura 0.4. (a) Símbolo de interruptor SPDT. (b) Símbolo de interruptor SPST.	146
Figura 0.5. Vista frontal de la SRLs.	156
Figura 0.6. Vista posterior de las SRLs.	156
Figura 0.7. Vista superior de las SRLs.	157
Figura 0.8. Bosquejo del IMU Pie.	158
Figura 0.9. Ejes del pie en posición anatómica.	168
Figura 0.10. Movimientos realizados por el pie.	168



CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES

En el presente capítulo se evalúa la problemática a tratar y se propone una solución. Así mismo, se definen los objetivos tanto generales como específicos del proyecto. Se tratan los alcances del proyecto y la metodología utilizada para su desarrollo.

1.1. Problemática

La cocina puede ser una actividad divertida para algunos, como tediosa para otros. Sin embargo, hay quienes han hecho de la cocina un negocio. Este es el caso de los restaurantes, en donde un factor que suele dificultar esta actividad tan vital para ellos es el tiempo.

Se sabe que para la mayoría de los restaurantes lo más importante son las ganancias y aquellos que aportan con las ganancias de un restaurante son los clientes. Por ello, es relevante saber cuáles son los factores que ellos consideran a la hora de escoger uno. De un estudio global sobre “comida y mente” realizado por la empresa Nielsen en 2016 en donde se encuestó a más de 30.000 personas en línea en 61 países, se obtuvo una gráfica estadística (ver Figura 1.1) en donde se pueden observar los factores que consideran los clientes clasificados por continente a la hora de escoger un restaurante (Nielsen, 2016).

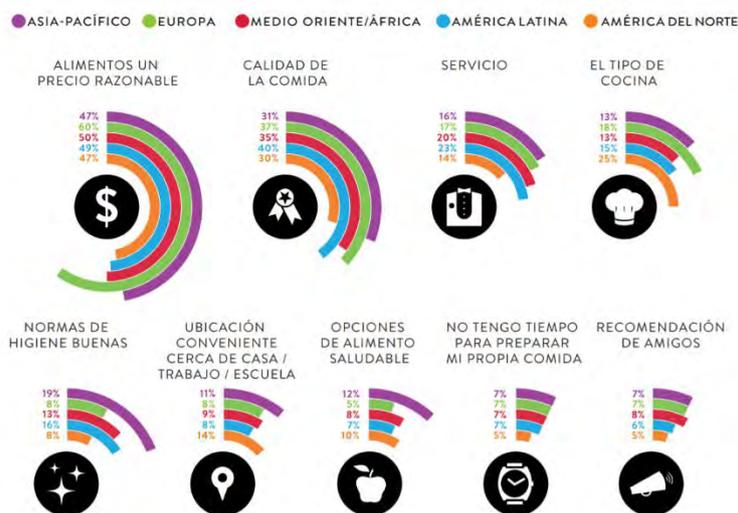


Figura 1.1. Principales factores que se consideran al escoger un restaurante.
(Fuente: Nielsen, 2016)

De la Figura 1.1, se aprecia que los tres factores más importantes que considera un cliente a la hora de escoger un restaurante son que el precio sea razonable, la calidad de la comida y el servicio. Este último, además del trato del personal del restaurante a los clientes,

también considera el tiempo de espera de los clientes hasta la llegada de su plato (Nielsen, 2016). Según un estudio realizado a 1000 personas mayores de 18 años en Estados Unidos por la empresa Echo Research, por encargo de la empresa financiera American Express, el tiempo de espera promedio en un restaurante debería ser de 12 minutos. Pero si se consideran los tres primeros intervalos mostrados en la Figura 1.2, que suman el 73% del total, se asumiría que el tiempo máximo de espera debería ser de 15 minutos (Coquillat, 2012).

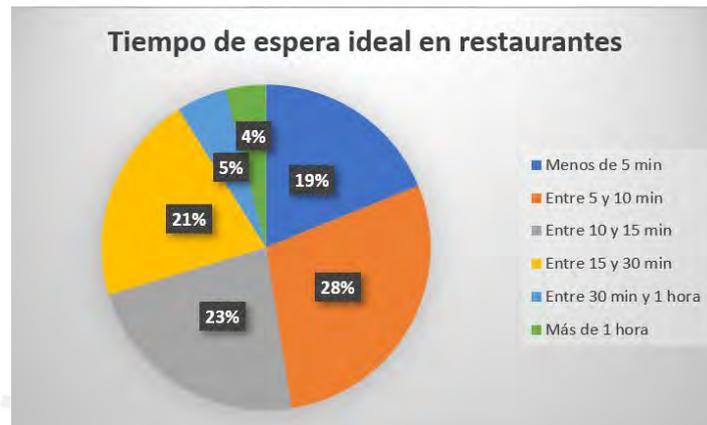


Figura 1.2. Gráfica de tiempos de espera ideales en restaurantes según estudio de Echo Research. (Fuente: Adaptado de Coquillat, 2012)

Entonces, si el restaurante tiene tiempos de espera muy largos, esto podría afectar la satisfacción de sus clientes y la reputación del negocio. Los tiempos largos de espera pueden ser ocasionados por la falta de personal en la cocina, por lo que el restaurante tendrá gastos adicionales si decide contratar personal y capacitarlo. Por ello, sería muy ventajoso para el restaurante si pudieran reducir los tiempos de algunas actividades de la cocina con poco personal a cargo.

Otro factor importante a considerar en los restaurantes es que, en situaciones como la pasada pandemia del COVID-19, es conveniente que tengan un buen rendimiento con poco personal a cargo. La Asociación Médica de Texas (TMA por sus siglas en inglés) reunió un panel de 14 expertos en salud pública, epidemiología y enfermedades infecciosas para diseñar una clasificación de actividades cotidianas según el riesgo de contagio que implicaba realizarlas (Costa & Tombesi, 2020). Como se puede observar en la Figura 1.3a, comer en un restaurante en la parte de afuera se encuentra en el nivel 4 de riesgo con la clasificación de "Bajo-Moderado". Mientras que en la Figura 1.3b, se observa que comer en un restaurante en la parte de adentro se encuentra en el nivel 7 de riesgo con la clasificación de "Moderado-Alto". Por lo tanto, tener menos personal a

cargo implicaría que menos personas estén en el restaurante y considerando también un aforo limitado para los clientes, se puede reducir la posibilidad de contagio y se mantienen las ganancias.



Figura 1.3. Actividades cotidianas clasificadas con riesgo: (a) “Bajo-Moderado” de contagio; y, (b) “Moderado-Alto” de contagio.
(Fuente: Costa & Tombesi, 2020.)

Actualmente ya existen sistemas robóticos que asisten en la cocina como es el caso de un robot humanoide autónomo con dos brazos capaz de preparar platillos como lo haría un chef profesional mostrado en la Figura 1.4a (Zhai et al., 2015), o el caso de la plataforma con brazo robótico capaz de hacer omelettes mostrado en la Figura 1.4b (Junge et al., 2020). Si bien sistemas como los mencionados anteriormente pueden reducir los tiempos de cocina en los restaurantes y son completamente autónomos, la mayoría aún presenta la dificultad de que solo se especializan en preparar ciertos platos. Junge et al. (2020) comenta en su investigación que las demostraciones actuales de chefs robóticos son inferiores en habilidad a los de su contraparte biológica. Tomando esto en cuenta y considerando que los restaurantes necesitan versatilidad para poder ofrecer diversidad de platillos, sería mejor que un humano esté a cargo de la cocina. Sin embargo, esto no elimina la posibilidad de que este pueda recibir asistencia de un sistema robótico que le permita acortar tiempos y con el cuál trabaje cooperativamente.

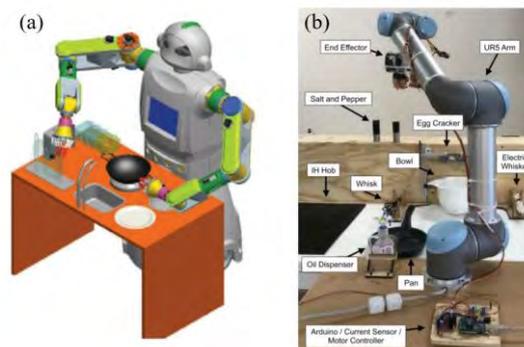


Figura 1.4. (a) Robot humanoide. (b) Brazo robótico.
(Zhai et al., 2015; Junge et al., 2020.)

1.2. Propuesta de solución

Como se pudo observar, el tiempo es un factor muy importante en los restaurantes pues este afecta la satisfacción de los clientes. Por ello, la propuesta de solución es un sistema con extremidades robóticas supernumerarias (SRL, por sus siglas en inglés *supernumerary robotic limbs*) que pueda asistir al cocinero, reducir y optimizar el tiempo que le lleva realizar algunas actividades de cocina. Además, este sistema permitirá a una sola persona hacer el trabajo de dos personas, lo cual tiene doble beneficio porque ayuda a reducir los tiempos de espera utilizando poco personal. La idea de este sistema es que trabaje cooperativamente con la persona y esta use al sistema como una extensión de su cuerpo.

1.3. Objetivos del trabajo de investigación

A continuación, se presentan los objetivos generales y específicos del proyecto.

1.3.1. Objetivo general del proyecto

El objetivo general del proyecto es diseñar un sistema que utilice extremidades robóticas supernumerarias con el potencial de reducir los tiempos de cocina del usuario al ayudar en las actividades de mover la cuchara de la olla y secar platos.

1.3.2. Objetivos específicos del proyecto

Los objetivos específicos del proyecto son:

- Identificar los requisitos de usuario y diseño que ayudarán a formular el diseño conceptual de las SRLs.
- Realizar el diseño conceptual de las SRLs en base a los requisitos de diseño y las soluciones obtenidas mediante el uso de la herramienta del árbol de funciones y medios.
- Diseñar los mecanismos necesarios para el correcto funcionamiento de las articulaciones de las SRLs tanto para los movimientos de los brazos como para el agarre, levante y desplazamiento de objetos que realizan los efectores, obteniendo como resultado los modelos 3D y los planos mecánicos de los brazos.
- Diseñar la interfaz mecánica de las SRLs de tal manera que sea cómoda y segura para los usuarios, obteniendo como resultado el modelo 3D y los planos mecánicos de la interfaz mecánica.

- Realizar el diseño eléctrico-electrónico del sistema que involucra la selección de componentes tanto para la alimentación del sistema como para los circuitos que interconectan al sistema de información con los sensores y actuadores de las SRLs, obteniendo como resultado los esquemas y planos eléctricos-electrónicos del sistema.
- Realizar la integración de los subsistemas mecánico y eléctrico-electrónico del proyecto, la cual involucra el modelado 3D general del sistema y simulaciones de esfuerzo y deformaciones.
- Diseñar el subsistema de control de las SRLs el cual involucra el control de alto nivel con el desarrollo de diagramas de flujo y el control de bajo nivel con el desarrollo de un algoritmo de trayectoria de movimiento.
- Diseñar una interfaz de usuario que permita al usuario transmitir sus comandos o intenciones de movimiento al subsistema de control de las SRLs.
- Evaluar los costos que implicaría el desarrollo del proyecto.

1.4. Alcance

Los alcances que considera el proyecto son que el sistema podrá asistir a las personas en la cocina en restaurantes. Para ello, estará equipado con dos brazos robóticos simétricos los cuales podrán ser controlados por el usuario y desempeñar su función cuando él/ella lo decida. El sistema está pensado para asistir en las tareas de mover la cuchara de la olla y secar los platos, pues ambas actividades tienen movimientos rotatorios repetitivos que no requieren de una trayectoria de movimiento compleja. Aquello que no se está considerando para el presente proyecto es que el sistema no operará de forma independiente, es decir, necesitará algún tipo de comando del usuario para funcionar.

1.5. Metodología de trabajo

La metodología de trabajo empleada para el diseño conceptual de este proyecto será la presente en el libro: “Design Methodology for Mechatronic Systems: An Approach Using Function/Means Tree and Channel/Agency Net”, desarrollada por el profesor Victor De Negri de la Universidad Federal de Santa Catarina (UFSC), la profesora Karol Muñoz de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP) y el Mg. Vinicius Vigolo, también de la UFSC. Esta metodología consiste en hallar el mejor concepto de solución de una problemática utilizando herramientas que permiten la identificación de los requisitos de

diseño, la selección de los medios que formarán parte del sistema para cumplir esos requisitos y la integración de estos medios para generar el diseño conceptual del sistema mecatrónico (De Negri et al., 2021).

Como primer paso, se identifica la problemática, la falta de tiempo en la cocina en restaurantes. Se buscan los antecedentes y estado del arte necesarios para comprender los principios de funcionamiento de las SRLs y otros sistemas robóticos orientados a asistencia en la cocina. Se identifican los requisitos de diseño mediante la información de la literatura y entrevistas a cocineros. Como segundo paso, se realiza una descomposición funcional y una síntesis de medios utilizando la herramienta “árbol de funciones y medios”. Con esta herramienta se pueden obtener los posibles medios que tendrán las SRLs para cumplir con sus funciones en la cocina. Asimismo, se evalúa si estos medios cumplen con los requisitos de diseño mediante una evaluación técnica/económica. Como tercer y último paso para obtener el diseño conceptual, se utilizan herramientas como la “arquitectura de diseño mecatrónico” y la “arquitectura del sistema eléctrico-electrónico” para interrelacionar los componentes que forman parte del diseño. Se realizan bosquejos para generar una idea de cómo se verían las SRLs asistiendo en la cocina.

Para desarrollar la ingeniería de detalle, se divide la investigación en las siguientes secciones: mecánica, electrónica, control, integración y costos. En primer lugar, el diseño mecánico empieza con plantear un modelo cinemático de los brazos robot usando los parámetros de Denavit-Hartenberg y realizar cálculos de torques estáticos y dinámicos. Se utilizan el *software MATLAB 2021b* y la herramienta “*Robotics Toolbox*” de Peter Corke para realizar este análisis. Se seleccionan los servomotores y el *gripper*; y, se diseñan los modelos CAD de las partes del soporte de cintura y brazos utilizando el *software Autodesk Inventor 2022*.

En segundo lugar, el diseño eléctrico-electrónico empieza con la selección de los componentes electrónicos que forman parte del sistema SRLs. Se calcula el consumo de potencia para escoger una batería capaz de proporcionar la energía necesaria. Se diseñan modelos 3D de los soportes para los componentes electrónicos y se realizan los diagramas esquemáticos mediante el *software EasyEDA*. En tercer lugar, el control empieza mostrando la secuencia de pasos que sigue el funcionamiento del sistema mediante diagramas de flujo. Se indican las acciones que debe realizar el usuario y las respuestas del sistema, mostrando valores numéricos y los estados de los componentes. Asimismo,

se plantea el funcionamiento de la aplicación de celular para el *modo grabación* de las RLs en donde solo se muestra la interfaz (*wireframes*) utilizando la herramienta *Moqups*.

En cuarto lugar, la integración del sistema empieza con generar el ensamble de las SRLs. Se realizan simulaciones de esfuerzo, deformación y factor de seguridad para identificar las zonas críticas de los brazos y el soporte de cintura. De igual manera, se dibujan los planos mecánicos de los componentes diseñados. Toda la sección de integración se realiza mediante el *software Autodesk Inventor 2022*. Por último, se genera un costo estimado de un prototipo de las SRLs.



CAPÍTULO 2:

ESTADO DEL ARTE

En el este capítulo se presentan conceptos base de las SRLs; conceptos de los peligros y ergonomía en la cocina; y, sistemas SRLs existentes comercialmente y en la literatura.

2.1. Conceptos base de las SRLs

En esta sección se presentan todos los conceptos teóricos necesarios para desarrollar el proyecto de una mejor manera. Se introducen conceptos base de las SRLs y temas relacionados a la seguridad en los restaurantes y la ergonomía.

2.1.1. Definición y clasificación de las SRLs

Las extremidades robóticas supernumerarias o SRLs, por sus siglas en inglés (*supernumerary robotic limbs*), son un nuevo tipo de robot equipable que se ha estado desarrollando e investigando durante los últimos años para proveer soporte técnico a las personas y para aplicaciones en diferentes campos como rehabilitación médica, manufactura, industria, construcción y agricultura (Tong et al., 2021). El diseño de los robots equipables toma inspiración de la estructura y cinemática de la configuración natural del cuerpo humano. Sin embargo, a diferencia de otros robots equipables como los exoesqueletos o las prótesis que fortalecen extremidades existentes o reemplazan extremidades faltantes respectivamente, las SRLs compensan y fortalecen las habilidades humanas al proveer al usuario con extremidades adicionales. Estas extremidades no necesariamente están sujetas a seguir los movimientos del usuario como en el caso de los exoesqueletos, pero su movimiento independiente debe ser capaz de coordinar con la acción que está realizando el usuario. Además, con una postura apropiada se puede proveer una asistencia óptima en coordinación con los movimientos del usuario sin sobrecargar sus articulaciones (Yang et al., 2021).

Las SRLs incluyen los brazos robóticos supernumerarios (SRAs, *supernumerary robotic arms*, Figura 2.1a), las piernas robóticas supernumerarias (SRLGs, *supernumerary robotic legs*, Figura 2.1b) y los dedos robóticos supernumerarios (SRFs, *supernumerary robotic fingers*, Figura 2.1c). Yang et al. (2021) clasifica las SRLs según su posición de montaje y función, en SRFs, SRA/LGs (brazos y piernas) y SRLs multipropósito. En primer lugar, el objetivo de los primeros es integrarse con la mano para fortalecerla o compensar la capacidad de los dedos biológicos especialmente en sobrevivientes a

accidentes cerebrovasculares. En segundo lugar, las SRA/LGs además de usarse para compensar y mejorar las funciones manuales, también se pueden usar para sostener o manipular objetos; poner objetos fuera del alcance del usuario o mientras sus manos están ocupadas; y equilibrar o estabilizar al usuario. Por último, las SRLs multipropósito pueden ser tanto SRFs o SRA/LGs pero diseñadas con una mayor versatilidad pues están orientadas al uso en actividades cotidianas. Las aplicaciones en actividades cotidianas, a diferencia de la aplicación en el ámbito profesional que usualmente son solo para un uso específico, requieren que el dispositivo se adapte a la variedad de escenarios que se le presenten (Yang et al., 2021).

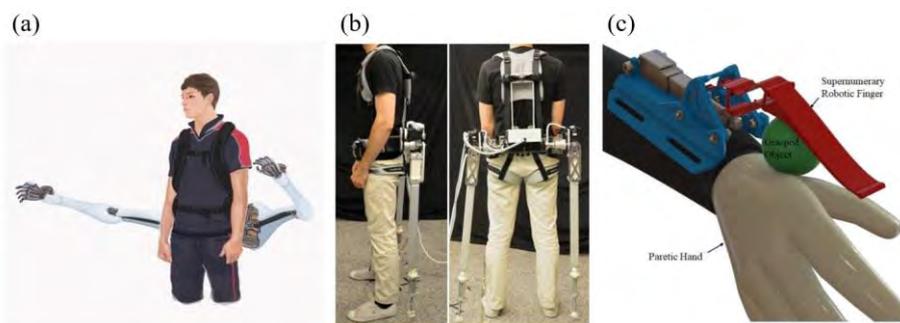


Figura 2.1. Tipos de SRLs. (a) SRA, (b) SRLG, (c) SRF.
(Fuente: Parietti, s.f.; Parietti et al., 2015; Hussain, 2019)

2.1.2. Estructura de las SRLs

La estructura de las SRLs puede ser rígida o blanda. La estructura rígida fue la primera en desarrollarse en las etapas iniciales de las SRLs utilizando motores y transmisiones mecánicas. Si bien aumentaba las capacidades del usuario, aún presentaba ciertos aspectos de mejora. Algunos de estos aspectos eran el peso elevado de las SRLs, lo cual provocaba la pérdida de balance en el usuario; o la rigidez que afectaba el confort del usuario. Debido a esto se desarrolló el segundo tipo de estructura, la blanda, la cual está compuesta usualmente de actuadores neumáticos blandos a base de silicona. En la Figura 2.2 se puede observar a mayor detalle los indicadores de rendimiento de ambos tipos de estructuras según la investigación sobre SRLs realizada por Tong et al. (2021). Además, la Tabla 2.1 muestra las ventajas y desventajas de cada estructura.

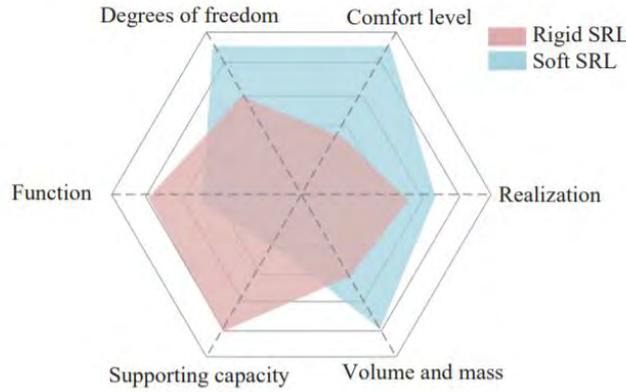


Figura 2.2. Comparación entre estructura rígida y blanda de las SRLs.
(Fuente: Tong et al., 2021)

Tabla 2.1. Ventajas y desventajas de las estructuras rígida y blanda de las SRLs

	SRLs rígidas	SRLs blandas
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> - Puede proveer y mejorar la capacidad humana de carga y descarga. - Es más sencillo diseñar un controlador de fuerza con un gran ancho de banda y mejor rendimiento 	<ul style="list-style-type: none"> - Estructura flexible, se puede adaptar fácilmente a diferentes estados de movimiento o personas. - Manejo flexible, puede proveer una asistencia paralela más coordinada con los músculos y tendones humanos. - Poco peso; y fácil de llevar y usar
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> - Efecto de torque indeseado por falta de alineación entre articulaciones de usuario y SRL - Posibilidad de fatiga en el usuario por la inercia que las extremidades producen. - Incomodidad o inestabilidad en el usuario por el tamaño de la SRL. 	<ul style="list-style-type: none"> - Asistencia en un solo sentido en el caso de accionamiento con cuerda - Incapaz de soportar mucho peso. - Incapaz de realizar trabajos que requieren mucha fuerza.

(Fuente: Adaptado de Tong et al., 2021)

2.1.3. Interfaz de control de las SRLs

Existen diversas formas de control de las SRLs. Véronneau et al. (2020), menciona en su trabajo de investigación que algunas SRLs son controladas por electromiografía (EMG), comandos de voz, movimientos de los pies o expresiones faciales del usuario. Nguyen et al., (2019) probó 3 métodos de control para su prototipo de SPL (*Soft Poly Limb*). Estos eran control por medio de un *joystick* analógico, por una unidad de medición inercial (IMU) y por un sensor EMG (ver Figura 2.3). Yang et al., 2021 por su parte, dividió la interfaz de control de las SRLs en dos tipos dependiendo del grado de participación humana: control indirecto y control directo. Mientras que en el primero no es necesario que el usuario dé comandos explícitos para que el robot realice una acción y coopere para

completar alguna tarea, en el segundo sí es necesario la presencia de comandos explícitos para que el sistema pueda actuar.



Figura 2.3. Métodos de control de la SPL.
(Fuente: Nguyen et al., 2019.)

En el caso del control indirecto, menciona dos métodos: *demonstration-based control* (control basado en demostraciones) y *balance model-based control* (control basado en modelos de equilibrio). En el primero se extrae un algoritmo de control basado en demostraciones de actividades humanas. Este método es un enfoque basado en datos que transfiere movimientos previstos, habilidades y estrategias a las SRLs. El segundo método está basado en un modelo de análisis entre humanos, SRLs y entorno. La posición, el torque y la fuerza de las SRLs son obtenidas a través del modelo de análisis (Yang et al., 2021).

En el caso del control directo, menciona cuatro métodos): control manual, *bioelectrical-based control* (control basado en bioeléctrica), *synergy-based control* (control basado en sinergia) y *action-based control* (control basado en acciones). El control manual utiliza botones o *joysticks* como mencionaron Véronneau et al., (2020) y Nguyen et al., (2019) en sus investigaciones. *Bioelectrical based control* utiliza señales EMG para controlar las SRLs. Las señales EMG son pequeñas señales eléctricas transmitidas por las neuronas motoras para que los músculos se contraigan. Se utilizan dispositivos diminutos llamados electrodos para traducir estas señales (MayoClinic, 2019). El *synergy-based control* se basa en detectar la intención del usuario en base a movimientos no voluntarios. Normalmente este método de control es usado para SRFs. Por último, el *action-based control* obtiene la intención del usuario a partir de acciones voluntarias que él/ella realizó. El controlador genera reglas de control en base a las intenciones y se las transmite a las SRLs. El control por movimiento del pie sería un ejemplo de control basado en acciones (Yang et al., 2021).

2.1.4. Actuación de las SRLs

En cuanto al accionamiento de las SRLs este puede darse con un sistema de actuación convencional por motores eléctricos. Por un lado, si el motor se conecta directamente puede alcanzar altas velocidades y gran ancho de banda de fuerza. Sin embargo, tienen poca densidad de fuerza. Por otro lado, si se usan motores con transmisiones de engranajes se puede obtener una gran densidad de fuerza, pero son muy lentos para compensar los movimientos humanos. Además, tienen una baja capacidad de retroceso por su alto nivel de inercia y fricción reflejadas. También se mencionan los elementos elásticos en serie (ver Figura 2.4a) como alternativa para compensar la falta de capacidad de retroceso, pero estos disminuyen el ancho de banda y la velocidad. (Véronneau et al., 2020).

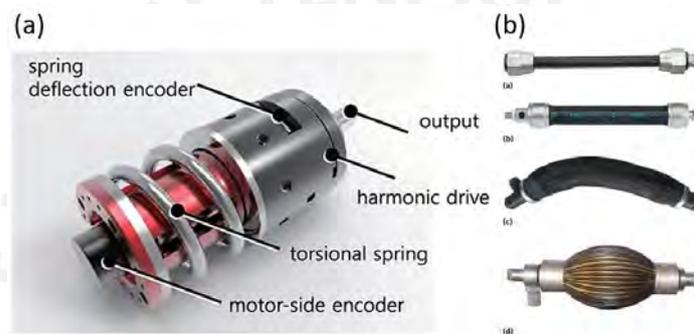


Figura 2.4. (a) Elemento elástico en serie (series elastic actuator), (b) Músculo artificial neumático (pneumatic artificial muscle).

(Fuente: Lee et al., 2019; Takosoglu, 2020)

Otra alternativa es el accionamiento por fluidos. Las articulaciones de este tipo que usualmente son impulsadas por aire comprimido también son conocidas como músculos artificiales neumáticos (ver Figura 2.4b). El accionamiento neumático tiene la ventaja de la alta velocidad de accionamiento si se cuenta con una fuente de aire adecuada y brinda flexibilidad a las articulaciones. Sin embargo, es difícil alcanzar un posicionamiento preciso y un buen control de fuerza. Además, es ruidoso y el sistema de aire comprimido es propenso a oxidarse. Las articulaciones también pueden ser impulsadas por fluidos líquidos. El accionamiento hidráulico tiene una gran potencia y una relación alta entre fuerza e inercia, sin embargo, su compresibilidad es menor que la de un sistema neumático por lo que su flexibilidad se ve reducida. Asimismo, los líquidos hidráulicos pueden contaminar el medio ambiente (Tong et al., 2021).

Por último, otra alternativa es el accionamiento por cuerda, el cual consiste en jalar una cuerda para rotar la articulación. El estiramiento de la cuerda depende de otros actuadores

para manejar la rueda giratoria donde la cuerda está enrollada y lograr un efecto de enrollamiento y soltura. La desventaja de este sistema es que como la cuerda sólo puede jalar en un solo sentido, si se quiere trabajar con múltiples GDL se deben usar resortes u otras cuerdas para la recuperación (Tong et al., 2021).

2.2. Seguridad en la cocina

En esta sección se presentan los peligros que hay que considerar al utilizar un sistema robótico en la cocina y la ergonomía, que es un factor importante para el bienestar del usuario.

2.2.1. Peligros en un restaurante

Es importante identificar los principales peligros que existen en la industria de los restaurantes. De esta manera, se podrá considerar más adelante las características que deben tener las SRLs que van a asistir en los restaurantes para no exponer al usuario a estos peligros y también evitar los posibles accidentes.

Los tres principales peligros en un restaurante son el fuego, los objetos afilados y la exposición a químicos. En primer lugar, el fuego a pesar de ser imprescindible en la cocina, si no se maneja con cuidado puede causar quemaduras, las cuales son la causa principal de lesiones entre los trabajadores de un restaurante. Normalmente las quemaduras son resultado de la inexperiencia del trabajador, cambios frecuentes de trabajo, la presión de trabajar más rápido o la falta de entrenamiento del cocinero. Si el cocinero está utilizando las SRLs, estas no deberían ser las causantes de quemaduras al usuario o a otras personas. En segundo lugar, los objetos afilados como cuchillos pueden causar lesiones severas y dolorosas. Entre estas lesiones se encuentran cortes, laceraciones o amputaciones. Generalmente estos accidentes son causados por un ritmo de trabajo alto, mal estado de equipo de protección personal (EPP) o mangos resbalosos y mal diseñados. Por último, la exposición a químicos se puede dar sobre todo al momento de la limpieza. Estos químicos pueden ser peligrosos o tener efectos nocivos a largo plazo. Por ello el usuario debe usar EPP al manipular estos artículos de limpieza. Si las SRLs se van a encargar de algunas actividades de limpieza, se debe considerar que estas no expongan al usuario a estos químicos (Calderón, s.f.).

2.2.2. Ergonomía en un restaurante

“La ergonomía es la ciencia que busca optimizar la relación entre la persona, la máquina y el ambiente de trabajo. Esto con el fin de adecuar los puestos de trabajo a las capacidades y limitaciones de los trabajadores. Se debe minimizar el estrés y la fatiga y aumentar el rendimiento y la seguridad del trabajador” (Ministerio de Trabajo y Promoción de Empleo, 2008).

En las entrevistas realizadas para este trabajo, las cuales se detallan en el ANEXO A, se mencionó que un cocinero tiene una jornada laboral de aproximadamente 8 a 9 horas, de las cuáles la mayor parte del tiempo se mantiene de pie. Según la Resolución Ministerial N°375-2008-TR, algunos de los requisitos que deben cumplir las tareas que se realicen de pie son evitar que en el desarrollo de tareas se utilicen flexión y torsión del cuerpo combinados; que las tareas no se deberían realizar por encima de los hombros ni por debajo de las rodillas; y los comandos manuales deberán ofrecer buenas condiciones de seguridad, manipulación y agarre (Ministerio de Trabajo y Promoción de Empleo, 2008). Teniendo esto en cuenta, las SRLs que usen los cocineros deben contribuir a que estos requisitos de ergonomía en la posición de pie se cumplan.

Así mismo, se pueden considerar a las SRL como herramientas de trabajo. Según la Resolución Ministerial mencionada en el párrafo anterior, las herramientas deben ser adecuadas para las tareas que se están realizando, se ajustan al espacio disponible en el trabajo, pueden ser utilizadas en una postura cómoda de trabajo y no causan riesgos de salud y seguridad (Ministerio de Trabajo y Promoción de Empleo, 2008).

Además, se sabe que en el trabajo de cocina los movimientos repetitivos son muy usuales. Llámese trabajo repetitivo a movimientos continuos que requieren la acción conjunta de ciertos músculos, huesos y articulaciones que pueden causar fatiga muscular en la zona, sobrecarga, dolor y en el peor de los casos una lesión (Ministerio de Trabajo y Promoción de Empleo, 2008). Se podría considerar trabajo repetitivo a la acción de lavar los platos, mover cucharas de las ollas o cortar ingredientes. Considerando lo antes mencionado, las SRLs podrían ayudar al usuario a no sobrecargar su cuerpo con movimientos repetitivos.

2.3. Sistemas SRLs existentes

En esta sección se presentan modelos de SRLs o robots asistentes en la cocina existentes en el ámbito comercial y académico.

2.3.1. Modelos comerciales

A continuación, se presentarán los modelos comerciales de SRLs o brazos robóticos asistentes en la cocina.

a. *Moley Kitchen*

Moley kitchen es una cocina totalmente automatizada desarrollada por Moley Robotics (ver Figura 2.5a). Esta cocina cuenta con cabinas, brazos y manos robóticas, un sistema de grabado de recetas, una interfaz gráfica de usuario con acceso a una librería de recetas y un set de aplicaciones y equipamiento de cocina optimizado tanto para el robot como para el humano.

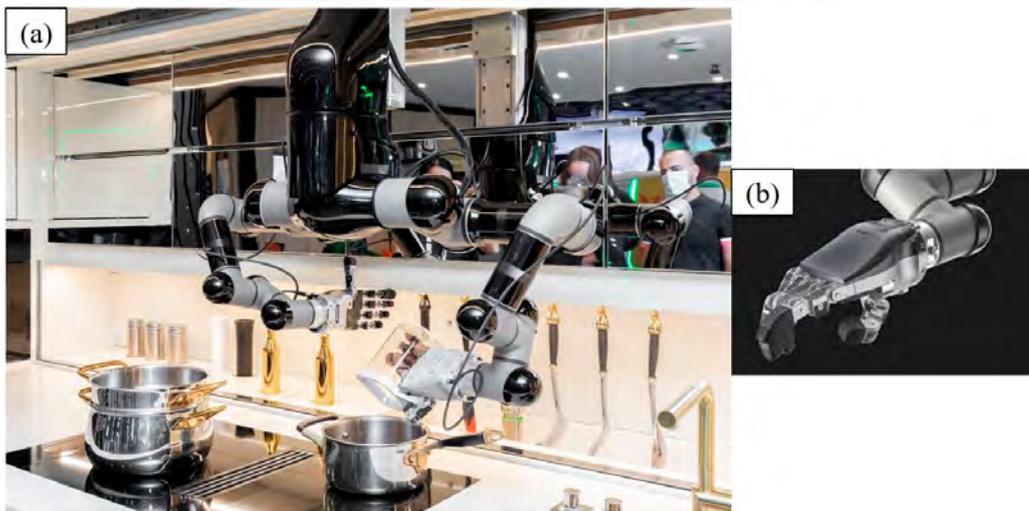


Figura 2.5. Brazos (a) y mano (b) robóticos de Moley Kitchen. (Fuente: Moley Robotics, 2021.)

Los brazos y manos robóticas fueron desarrollados en colaboración con la empresa SCHUNK con la última tecnología de agarre y agilidad mecánica de alta precisión. Las manos robóticas tienen 5 dedos y son totalmente rotacionales (ver Figura 2.5b). Además, el sistema puede sentir la presión en la mano en diferentes direcciones debido a los sensores de presión instalados en los extremos de los brazos. Esto asegura que la mano tenga un correcto agarre tanto de objetos como de ingredientes y le permite manipular una variedad de utensilios como lo haría una persona. Asimismo, la mano fue testeada en 100,000 ciclos de operación lo que aumenta sus niveles de confiabilidad. El precio de Moley Kitchen puede variar según la configuración que se haya pedido a la empresa, pero

aproximadamente tiene un valor de US \$340,000 para el paquete completo el cual incluye los brazos robóticos (Moley Robotics, 2021).

b. KBIS 2019 - Samsung Bot Chef

Samsung Bot Chef es un robot colaborativo desarrollado por la empresa Samsung y mostrado por primera vez en 2019 (ver Figura 2.6a). Este robot fue diseñado para ser fácil de usar y con una alta versatilidad que le permite realizar un amplio rango de tareas en la cocina. Entre las tareas que es capaz de realizar se encuentra cortar, verter ingredientes o limpiar. El sistema cuenta con dos brazos robóticos de bajo peso y 6 GDL para realizar las tareas. Los brazos robóticos tienen el diámetro, el alcance y la seguridad que tendrían unos brazos humanos. Además, tienen la fuerza necesaria para levantar objetos comunes de cocina (Samsung Newsroom, 2019).

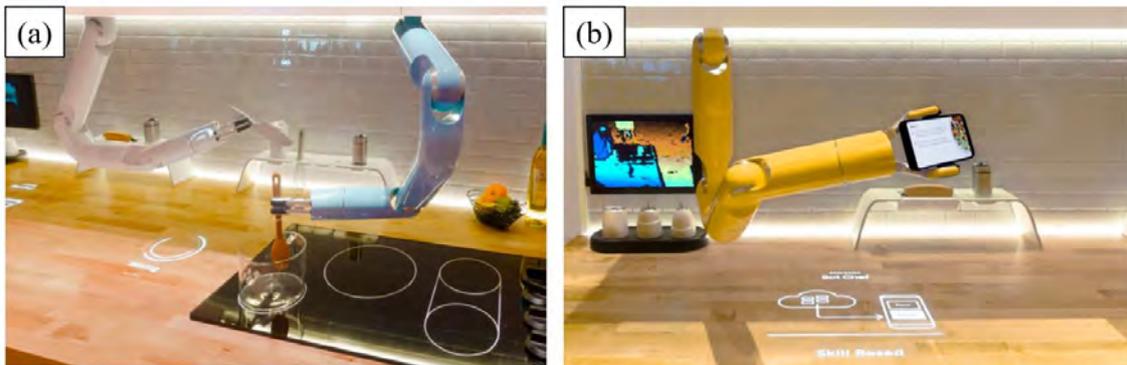


Figura 2.6. (a) Samsung Bot Chef, (b) Samsung Bot Chef en el ecosistema online.
(Fuente: Samsung Newsroom, 2019)

Asimismo, el sistema cuenta con sensores externos e internos y algoritmos de planeación basados en inteligencia artificial (IA) para poder trabajar colaborativa y seguramente con una persona a la par. El usuario puede interactuar con el sistema usando comandos de voz simples e intuitivos. Adicionalmente, existe un ecosistema online en donde el usuario puede descargar, personalizar y compartir “nuevas habilidades” para el *Samsung Bot Chef* con otros usuarios. En la Figura 2.6b se puede observar como el sistema accede al ecosistema online (Samsung Newsroom, 2019).

2.3.2. Trabajos de investigación

A continuación, se presentan los modelos de SRLs en diversas aplicaciones y robots asistentes en la cocina encontrados en trabajos de investigación como *papers* o tesis.

a. *Multifunctional Remotely Actuated 3-DOF Supernumerary Robotic Arm Based on Magnetorheological Clutches and Hydrostatic Transmission Lines*

Véronneau et al. (2020) presenta un brazo robótico supernumerario de 3 grados de libertad (GDL) accionado con embragues magnetoreológicos (MR) y líneas de transmisión hidráulicas el cual se puede observar en la Figura 2.7. El SRA se adjunta a las caderas del usuario y es accionado por un sistema de actuación hidrostático que utiliza fluidos MR. Estos fluidos aumentan su viscosidad al aplicarles un campo eléctrico (Véronneau et al., 2020).

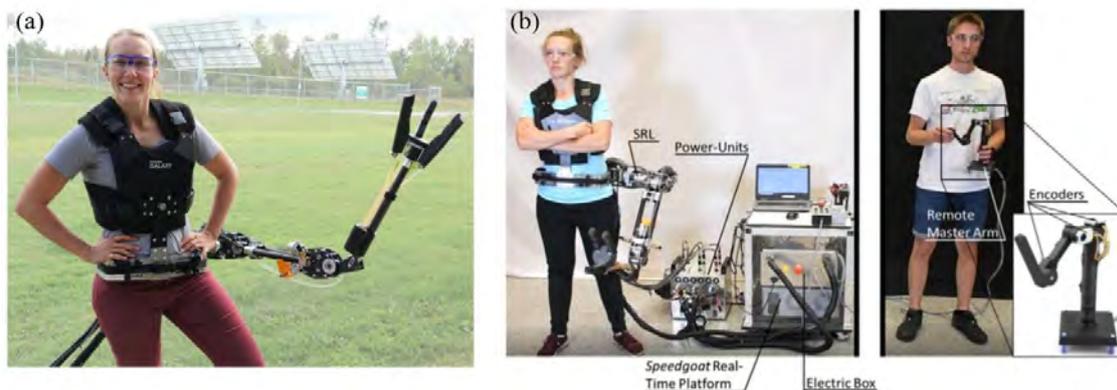


Figura 2.7. (a) SRA de 3 GDL. (b) SRA, fuente de energía y brazo miniatura de control.
(Fuente: Véronneau et al., 2020)

La mayoría de la estructura del brazo está compuesta de fibra de carbono para minimizar el peso cargado por el usuario. El SRA es controlado remotamente por otro usuario que utiliza una versión miniatura del brazo con codificadores rotacionales en las articulaciones para medir las posiciones angulares como se puede observar en la Figura 2.7b. La fuente de energía del SRA permanece en el suelo y la energía es transmitida a través de cables. Para el diseño de este SRA se procuró minimizar el peso cargado por el usuario y maximizar la velocidad, la densidad de fuerza, la fuerza de ancho de banda y la capacidad de retroceso para realizar tareas como coger frutas, agarrar herramientas de mano, pintar o jugar bádminton (Véronneau et al., 2020).

b. *Supernumerary Robotic Limbs for Aircraft Fuselage Assembly: Body Stabilization and Guidance by Bracing*

Parietti et al., (2014) presenta uno de los primeros prototipos de SRLs, el cual fue desarrollado en el MIT d'Arbelloff Laboratory. El prototipo está conformado por un par de brazos robóticos de 4 GDL, un soporte de cintura para asegurar al robot alrededor de ella y efectores finales en la punta de los brazos como se observa en la Figura 2.8.

Además, el sistema de las SRLs cuenta con un sistema de captura de movimiento posicionado en el marco de la mochila. Estas SRLs fueron desarrolladas con la intención de asistir a los operarios en el fuselaje de aviones, ayudando a ejecutar tareas que requieren una alta precisión y/o robustez frente a perturbaciones.



Figura 2.8. Prototipo de SRL usado en la tarea de taladrado.
(Fuente: Parietti et al., 2014)

Las SRLs para esta aplicación en particular tienen dos objetivos principales. El primero es indicar al usuario el lugar correcto para realizar el agujero. Esto se logra colocando una plantilla de taladro contra la estructura del avión. El sistema es capaz de posicionar la plantilla de forma más precisa que las personas utilizando su sistema de captura de movimiento y un control de retroalimentación. El segundo es sostener la plantilla durante el proceso de taladrado. En esta etapa es muy importante el anclaje pues el cojinete central de la plantilla debe estar fijo a la estructura a pesar de la presencia de fuerzas perturbadoras. La configuración robótica de las SRLs debe estar balanceada para minimizar la sobrecarga de trabajo en los operarios, sobre todo en sus caderas que son la base de las SRLs.

c. Ceiling Work Scenario Based Hardware Design and Control Algorithm of Supernumerary Robotic Limbs

Shin et al., (2015) propone el uso de SRLs para ayudar a los operarios de construcción en trabajos de techo (*ceiling work*). La idea es que las SRLs sostengan las placas de techo (600 mm x 300 mm) mientras el trabajador realiza otras tareas como atornillar o pintar la placa por debajo (ver Figura 2.9). Las SRLs consisten de dos partes, las cuales son: montura para los hombros y manipulador. Estos se muestran en la Figura 2.10a y en la Figura 2.10b respectivamente. La montura es usada para instalar el manipulador en los hombros. Fue impresa en 3D y su ancho y alto están especialmente seleccionados para evitar interrupciones del movimiento de los brazos del usuario durante su trabajo. Un

soporte trasero en la montura limita los movimientos horizontales, pero permite el giro del usuario. En cuanto al manipulador, este fue optimizado en base al espacio de trabajo para reducir su peso. El manipulador cuenta con 3 GDL y 3 motores para poder moverse en el espacio tridimensional.

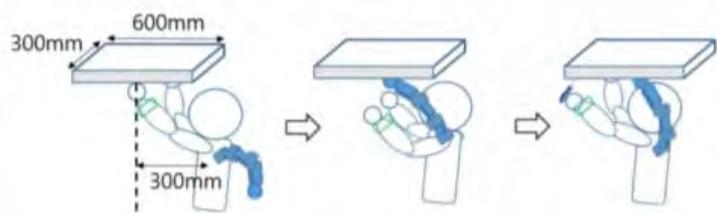


Figura 2.9. Aplicación de las SRLs para trabajo de techo.
(Fuente: Shin et al., 2015)

La interfaz de control de las SRLs cuenta con un interruptor y una unidad de medición inercial (IMU por sus siglas en inglés). El operario debe encender el interruptor para activar el sistema. Luego, el sistema establece la posición deseada cuando las variaciones de la IMU alcanzan un valor menor al designado. Una vez que el efector fue colocado en la posición deseada para sostener la placa de techo, el operario puede empezar a realizar sus tareas. Para compensar los movimientos que realiza el trabajador, el controlador estima el movimiento de la montura y el manipulador actúa para mantener la posición y las fuerzas del efector final para evitar que la placa de techo se caiga.

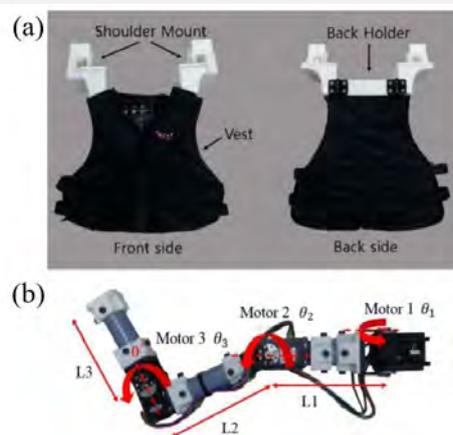


Figura 2.10. (a) Montura para hombros, (b) Manipulador.
(Fuente: Shin et al., 2015)

d. Fabric Soft Poly-Limbs for Physical Assistance of Daily Living Tasks

Nguyen et al., (2019) presenta a un SRL de estructura blanda con el objetivo de asistir al usuario en tareas cotidianas. Los autores denominan fSPL a este brazo por sus siglas en inglés *fabric-based Soft Poly-Limb*. La idea de desarrollar esta SRL con *soft-robotics* es ofrecer al usuario mayor maniobrabilidad y capacidades con su gran número de GDL.

Además, poder interactuar de una manera segura con el usuario y su entorno (Nguyen et al., 2019).



Figura 2.11. (a) Prototipo de fSPL. (b) Pruebas fSPL mediante joystick. (c) Actuadores blandos de tela. (Fuente: Nguyen et al., 2019)

La fSPL tiene la capacidad de reducir su tamaño y guardarse en una bolsa a la altura de la cintura del usuario como se puede observar en la Figura 2.11a. Tiene un peso de 1 kg aproximadamente y puede levantar hasta 1.5 kg con su efector. Asimismo, es capaz de levantar objetos más grandes (de hasta 11.3 kg) enredándose en ellos como si fuera la trompa de un elefante. El brazo está hecho de un arreglo de actuadores blandos, los cuales están conformados por tela de nylon recubiertos con TPU (poliuretano termoplástico) termosellable como se observa en la Figura 2.11c. Su largo es de aproximadamente 590 mm, la cual es la medida promedio del brazo de un hombre adulto. Para poder determinar y optimizar parámetros geométricos y cinemáticos se utilizó el método de elementos finitos (FEM) computacionalmente. Asimismo, para las pruebas de rendimiento de movimiento, los usuarios controlaron la fSPL por medio de un *joystick* y se utilizó un efector succionador para el agarre de objetos como se observa en la Figura 2.11b (Nguyen et al., 2019).

e. Orochi: Investigating Requirements and Expectations for Multipurpose Daily Used Supernumerary Robotic Limbs

Al-Sada et al., (2019) presenta un SRL multipropósito con forma de serpiente, el cual, los autores denominaron Orochi (ver Figura 2.12). Orochi fue diseñado con el objetivo de poder asistir a los usuarios en diversas actividades del día a día. Asimismo, se consideró también que el robot sea fácil de usar, pues con su diseño flexible se puede usar de

múltiples maneras dependiendo de la situación que se presente. Además, su uso no llama mucho la atención, ya que puede pasar como una bufanda o un cinturón.



Figura 2.12. Diferentes formas de uso de Orochi.
(Fuente: Al-Sada et al., 2019)

En cuanto a la estructura de Orochi, está compuesto de una cadena de servomotores Robotis Dynamixel y perfiles extruidos de aluminio, los cuales le otorgan 25 GDL. Esta cadena está cubierta con una capa de goma y una capa de tela para mayor comodidad. Su largo puede variar aumentando o removiendo la cantidad de servomotores, pero el estándar presente en la investigación mide 240 cm, tiene un espesor de 42 mm (con cubierta) y peso aproximadamente 1.4 kg. Este robot se divide en sección media, brazos y efectores como se observa en la Figura 2.13. Los brazos pueden cargar hasta 1 kg de manera estática. El sistema de actuación de Orochi está compuesto por los servomotores mencionados anteriormente y su alimentación está compuesta por una batería de polímero de litio de 11.1 V, la cual le da energía por 20 minutos (Al-Sada et al., 2019).

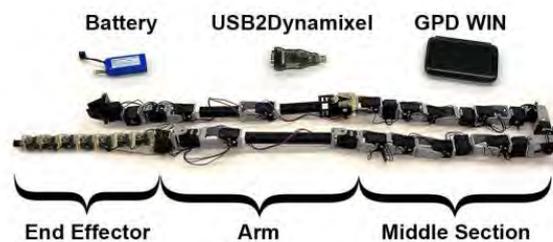


Figura 2.13. Estructura del Orochi.
(Fuente: Al-Sada et al., 2019)

En cuanto al control, este se da mediante una pequeña computadora (GPD WIN, ver Figura 2.13). Asimismo, se desarrolló una interfaz gráfica de usuario para proveer fácil acceso a todos los controles del robot. Esto incluye un generador de movimientos y un

sistema reproductor que permite al usuario crear, guardar y reproducir secuencias de movimientos. Para crear un movimiento, el usuario debe mover a Orochi físicamente hasta la posición deseada y guardar el movimiento (Al-Sada et al., 2019).

A continuación, en la Tabla 2.2 se muestra una comparación entre los trabajos de investigación presentados anteriormente.

Tabla 2.2. Comparación entre los modelos a, b, c, d y e.

Característica	Modelo (a)	Modelo (b)	Modelo (c)	Modelo (d)	Modelo (e)
Aplicación	Múltiple: recoger frutas, sostener herramientas	Asistencia en ensamblaje de aviones.	Asistencia en trabajo de techo	Multipropósito tareas cotidianas	Multipropósito tareas cotidianas
Estructura	Rígida	Rígida	Rígida	Blanda	Rígida-Blanda
Interfaz de control	Control manual remoto: versión miniatura del brazo	Sistema de señales EMG.	Modelo basado en ajuste de fuerza y retención de posición	<i>Joystick</i>	Computadora pequeña para planear y generar movimientos
Accionamiento	Sistema de actuación hidrostático que usa fluidos MR.	<i>Series elastic actuators</i>	-	<i>Fabric actuators</i>	Servomotores Robotis Dynamixel
Nro. de brazos	1	2	1	1	1
Nro. de grados de libertad	3	4 (por brazo)	3	Muchos	25
Fuente de energía	Fuente de energía externa colocada en el suelo.	-	-	Neumática.	Batería de polímero de litio (11.1 V)

f. Dynamic Analysis of a Dual-arm Humanoid Cooking Robot

En la siguiente investigación, se presenta a un robot chef humanoide con dos brazos como se observa en la Figura 2.14a. Este robot tiene la capacidad de preparar platillos como un chef profesional y también de navegar autónomamente por la casa para ayudar a las personas con otras tareas simples del hogar. El robot está compuesto de un cuerpo y dos brazos. El cuerpo se sitúa sobre una plataforma móvil la cual contiene dos ruedas a los costados y dos ruedas giratorias al frente y detrás. Los brazos (ver Figura 2.14b) cuentan con 6 GDL y cada articulación es accionada por un motor de 48 VDC a través de un reductor. Cada brazo puede levantar un máximo de 2 kg. Además, cada brazo cuenta con una pinza de tres dedos y 1 GDL en sus extremos. En las muñecas el robot cuenta con un

sensor de fuerza y torque de 6 GDL para proveer retroalimentación a la pinza. Las ecuaciones de la dinámica de los brazos fueron obtenidas calculando la energía cinética y potencial utilizando el método de Lagrange. Como se observa en la Figura 2.14c, una de las articulaciones del robot requiere más de 40 Nm de torque para ser accionada. Para llegar a esa cantidad de torque se requiere un motor potente y pesado que para el caso de las SRLs no sería adecuado.

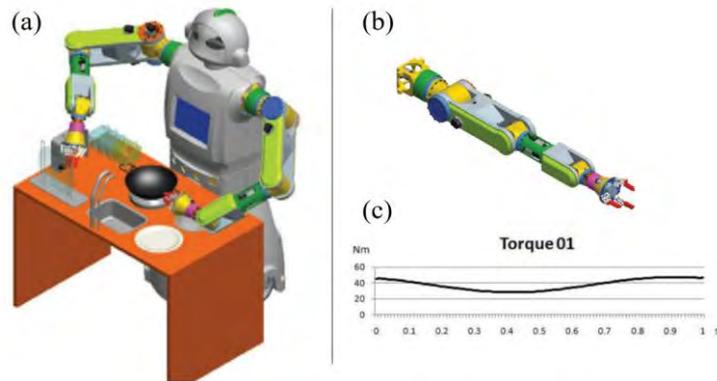


Figura 2.14. (a) Robot chef humanoide autónomo. (b) Brazo del robot. (c) Gráfica de torque para una de las articulaciones.
(Fuente: Zhai et al., 2015)

Continuando con el robot chef, este cuenta con visión estéreo por computadora en la cabeza lo que le permite observar su entorno. Para la interacción con el usuario, una pantalla táctil fue instalada en su pecho. El robot usa una batería recargable de 48 V, la cual le da energía por dos horas.

CAPÍTULO 3:

DISEÑO CONCEPTUAL

En el presente capítulo se determinan los requisitos de diseño y se desarrolla el diseño conceptual de las SRLs. El desarrollo del diseño conceptual se divide en dos secciones: la descomposición funcional y síntesis de medios; y, la síntesis de estructura y comportamiento general.

3.1. Requisitos de diseño

Antes de definir los requisitos de diseño, es muy importante conocer las necesidades de los usuarios objetivos. Por ese motivo, en el ANEXO A se realiza un análisis de los requerimientos y requisitos del usuario a partir de entrevistas a tres gerentes de restaurantes. De los requisitos de usuario se genera una gran parte de los requisitos de diseño. Sin embargo, en la literatura se mencionan algunos aspectos importantes a considerar al diseñar SRLs.

Véronneau et al. (2020) menciona que las SRLs deben ser ligeras y su centro de masa debería estar cerca del centro de gravedad del usuario (a la altura de las caderas) para un buen equilibrio y reducir la inercia total. Además, que los movimientos impredecibles de los humanos generan perturbaciones en la base de las SRLs. Por ello, los efectores deberían ser capaces de compensar esos movimientos para mantener su posición relativa estable con respecto al entorno. Así mismo, las SRLs deben ser más rápidas que los movimientos humanos para mantener la posición de los efectores. Usualmente la velocidad de las caderas de una persona promedio es menor a 3 m/s. Esto quiere decir que la velocidad angular máxima de cada articulación (dependiendo de la configuración del robot) es aproximadamente 400 °/s. También menciona que una buena capacidad de retroceso es de ayuda para minimizar las fuerzas adicionales que se generan sobre el usuario mientras este se mueve. Una buena capacidad de retroceso se logra con bajos niveles de inercia y fricción tanto en la estructura como en el sistema de actuación.

Srinivas et al. (2015) menciona en su trabajo de investigación acerca de SRLs multipropósito que la posibilidad de cambiar los efectores permite que las SRLs tengan más aplicaciones. Además, que un sistema compacto y portable se puede lograr colocando los motores cerca unos de otros para reducir los momentos causados por su peso. Así

mismo, menciona que el peso de un brazo entero está por debajo de los 3 kg y sus dimensiones son de 600 mm x 300 mm x 170 mm (largo, ancho, altura).

Tabla 3.1. Evaluación de los requisitos de diseño.

Requisito de diseño	Demanda (D) o Deseo (W)	Técnico o Económico	Valores (How much)	Método de verificación
Bajo tiempo de respuesta	D	T	Entre 0.5 y 1 segundo	Cronómetro
Sistema liviano	D	T/E	Peso máximo de cada brazo: 4kg	Balanza, sensores de fuerza, sensores de presión
Capacidad de retracción	W	T	Los brazos pueden retraerse hacia el usuario	Realizando un análisis cinemático
Fuerza controlada para la toma de objetos	D	T	Tomar objetos sin romperlos, rangos de fuerza para agarrar cucharas, platos o toallas.	Cálculo de torques en las articulaciones, dinamómetro, galgas extensiométricas, realimentación de posición y/ fuerza
Fuerza controlada para el secado	D	T	Rangos de fuerza para realizar la acción de secado.	Cálculo de torques en las articulaciones, dinamómetro, galgas extensiométricas, realimentación de posición y/ fuerza
Comandos de control sencillos	W	T	Comandos intuitivos, no requieren mucho esfuerzo.	Pruebas con usuarios
Bajo ruido	D	T	Menor a 40 dBA	Sonómetro
Baja vibración	D	T	No sobrepasar los 5 m/s ²	Acelerómetro, Real Decreto 1311/2005
Algoritmo de control preciso de agarre, levante y desplazamiento	D	T	Bajo porcentaje de error	Probar el algoritmo varias veces y sacar el % de aciertos con respecto al total de pruebas.
Peso balanceado	D	T/E	Peso de cada brazo igual.	Balanza, realizando pruebas
Centro de masa del sistema cerca al centro de gravedad del usuario	D	T	Diferencia de distancia entre centros	Cálculos durante el diseño y localización de los centros de masa
Soporte cómodo	D	T/E	Cómodo, que el soporte no dañe al usuario	Encuesta de usabilidad
Dimensiones máximas del sistema	W	T/E	Brazo entre 1000 y 1200 mm de largo	Flexómetro, % de alcance extra para el usuario.
Compensar perturbaciones inesperadas	W	T	Mantener posición relativa del sistema con respecto al entorno	Simulaciones, prueba de las SRLs en control de posición
Fácil de limpiar	W	T/E	Limpieza con un paño de forma rápida durante la cocina	Encuesta de usabilidad
Fuerza máxima de carga	W	T	Capacidad de cargar hasta 2 kg.	Prueba de la fuerza de carga de las SRLs
Autonomía energética	W	T/E	Capacidad de durar mínimo 2 horas en funcionamiento.	Prueba del tiempo de duración de las SRLs en funcionamiento

Del análisis realizado en el ANEXO A, se generó la Tabla 3.1 en la cual se organizaron los requisitos de diseño utilizando la herramienta de la Matriz de Requerimientos como parte de la metodología usada en este proyecto. Esta herramienta calcula la relevancia del requisito clasificándolo como una demanda o un deseo y también evalúa si el requisito es

del tipo técnico, económico o ambos. Por último, muestra valores referenciales correspondientes a cada requisito y su respectivo método de verificación

3.2. Descomposición funcional y síntesis de medios

En esta sección se identifica la función principal y subfunciones del sistema mediante un árbol de funciones y medios. Asimismo, se escogen los medios que satisfacen cada una de las subfunciones. Para un mayor entendimiento de esta sección, revisar el ANEXO B. Como resultado del análisis, los medios que satisfacen cada una de las subfunciones de los niveles del árbol, se procede a asignar a cada uno de los últimos medios escogidos, uno de los seis subsistemas de un sistema mecatrónico. En el árbol de funciones y medios, algunos medios escogidos figuraban con un número para diferenciarlos, sin embargo, en la Tabla 3.2 donde se presentan los medios escogidos con su respectiva categoría se les asignará a algunos medios un nombre más descriptivo para facilitar el entendimiento del lector en el resto del documento.

Tabla 3.2. Medios del sistema SRLs.

Interfaz de entrada	
Botón A/D IMU	Botón A/D REC
Interruptor ON/OFF	Interruptor MODO
Interfaz de salida	
LEDs de señalización	Smartphone
Sistema de información	
Microcontrolador	Módulo bluetooth
Sistema de medición	
Sensores de fuerza resistivos	IMU Pie
IMU Torso	
Sistema de actuación	
Servomotores	
Sistema de energía/materia	
Batería Li-ion	Gripper robótico de 3 dedos C
Gripper robótico de 3 dedos T	Gripper robótico de 3 dedos P
Soporte de cintura	Eslabón brazo
Eslabón antebrazo	

Los grippers robóticos de 3 dedos tienen una C, T o P al final dependiendo de si son usados para agarrar cucharas, toallas o platos, respectivamente. Asimismo, el eslabón brazo y el eslabón antebrazo no figuran en el árbol de funciones y medios, sin embargo, son considerados como medios del sistema de energía/materia de las SRLs porque forman parte de ellas. En la sección “3.3.3. Bosquejos del sistema físico” se pueden observar en los bosquejos a qué hacen referencia los eslabones brazo y antebrazo.

3.3. Síntesis de estructura y comportamiento general

En esta sección, se muestra la relación que existe entre los distintos medios escogidos. Se utilizan herramientas como la arquitectura del diseño mecatrónico y la arquitectura del sistema eléctrico-electrónico para mostrar esta relación. Además, se presentan los bosquejos del sistema físico.

3.3.1. Arquitectura del diseño mecatrónico

La arquitectura del diseño mecatrónico es una herramienta que ayuda a visualizar como se interconectan los medios escogidos. Se separan por categorías y se puede ver el flujo de materia, energía e información, los cuáles se diferencian por la punta de la flecha. En la Figura 3.1 se puede observar la arquitectura del diseño mecatrónico del proyecto.

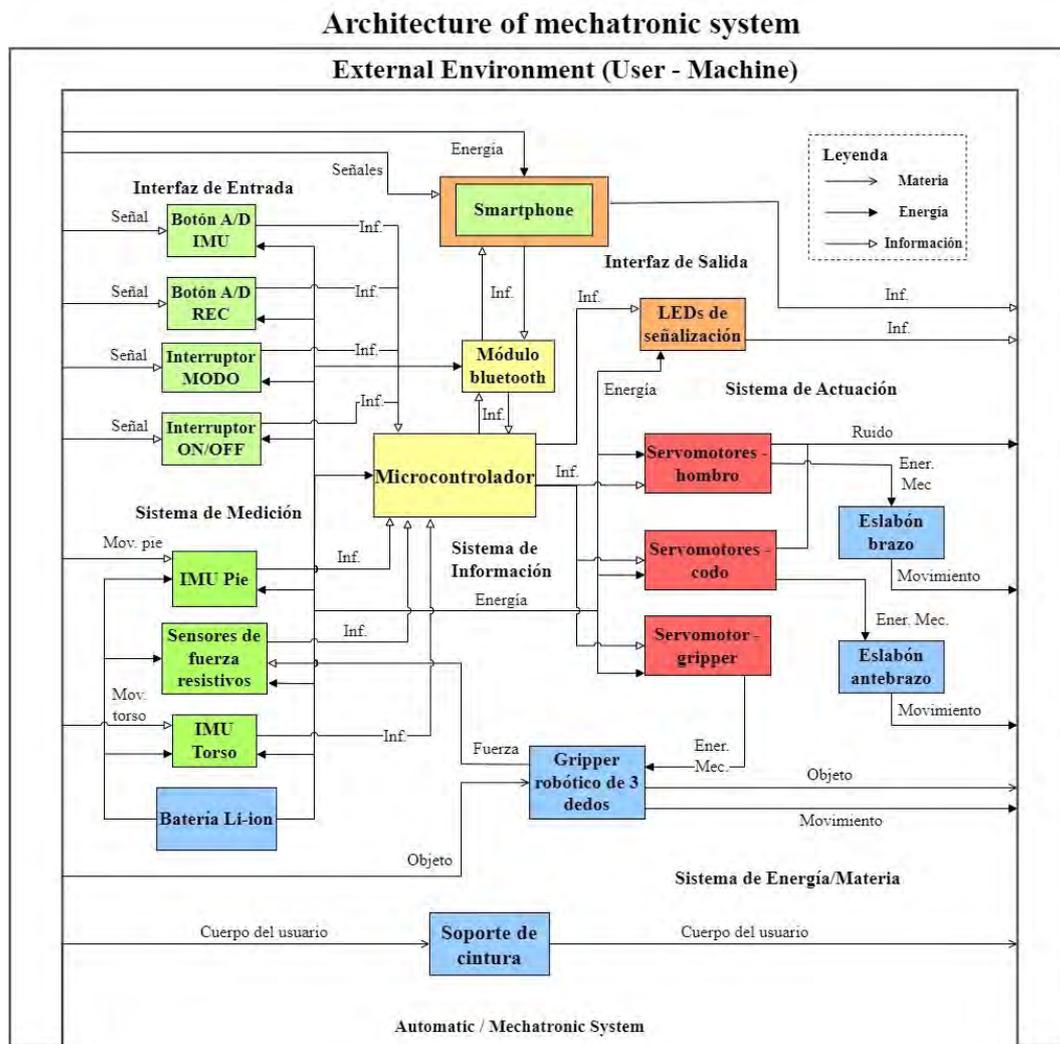


Figura 3.1. Arquitectura del diseño mecatrónico de las SRLs.

3.3.2. Arquitectura del sistema eléctrico-electrónico

Similarmente, la arquitectura del sistema eléctrico-electrónico es otra herramienta que ayuda a visualizar la relación entre los medios escogidos, pero desde una perspectiva eléctrico-electrónica. Esto quiere decir que se consideran las señales eléctricas que representan energía, ya sea corriente continua o alterna, y las que representan información, ya sea analógica o digital. Al igual que en la arquitectura del diseño mecatrónico, los medios se separan según sus categorías. En la Figura 3.2 se puede apreciar la arquitectura del sistema eléctrico-electrónico de las SRLs.

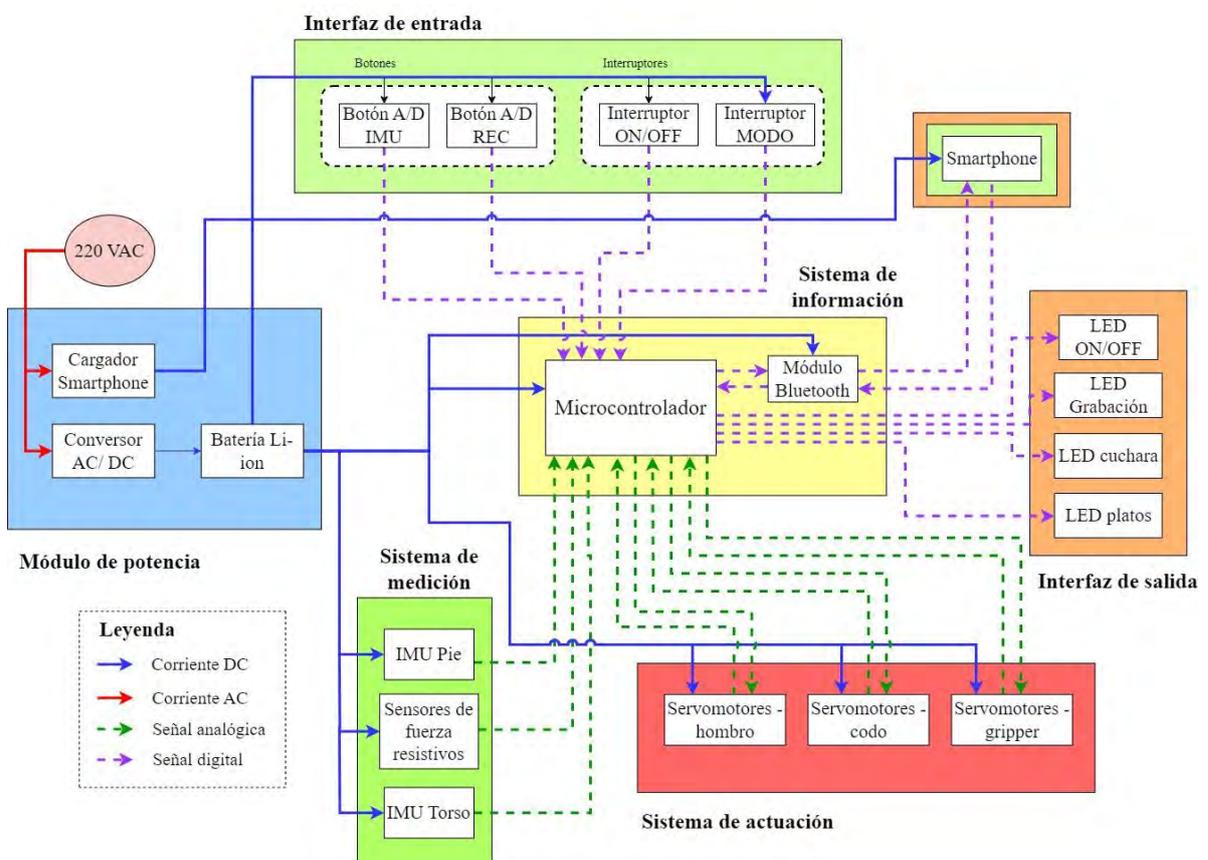


Figura 3.2. Arquitectura del sistema eléctrico-electrónico de las SRLs.

3.3.3. Bosquejos del sistema físico

Los bosquejos del sistema están disponibles en el ANEXO C.

CAPÍTULO 4: DISEÑO DEL SISTEMA MECÁNICO

En este capítulo se presenta todo lo relacionado al diseño mecánico de las SRLs. Se empezará con un análisis cinemático, la elección de material y estimaciones de dimensiones y pesos. Luego se calculan los torques requeridos en las articulaciones para el funcionamiento del sistema y en base a ellos se escogen los servomotores. Posteriormente, se realiza el diseño y modelado 3D de los brazos, uniones de los brazos y soportes de los motores. Se selecciona un gripper adecuado para que funcione como efector final de los brazos. Finalmente se muestra el diseño y modelado 3D de la interfaz mecánica o soporte de cintura. El código de MATLAB que se utilizó para la cinemática y el cálculo de torque dinámico está disponible en el ANEXO D.

4.1. Análisis cinemático de los brazos

En esta sección se realiza un análisis cinemático de ambos brazos robóticos utilizando cinemática directa y cinemática inversa. Para ello, se plantean las cadenas cinemáticas mostradas en la Figura 4.1 y la Figura 4.2.

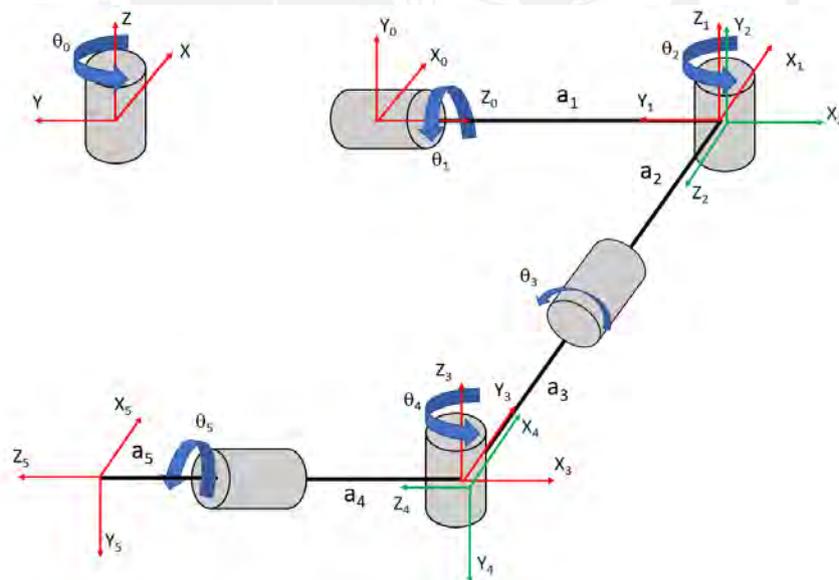


Figura 4.1. Cadena cinemática del brazo izquierdo.

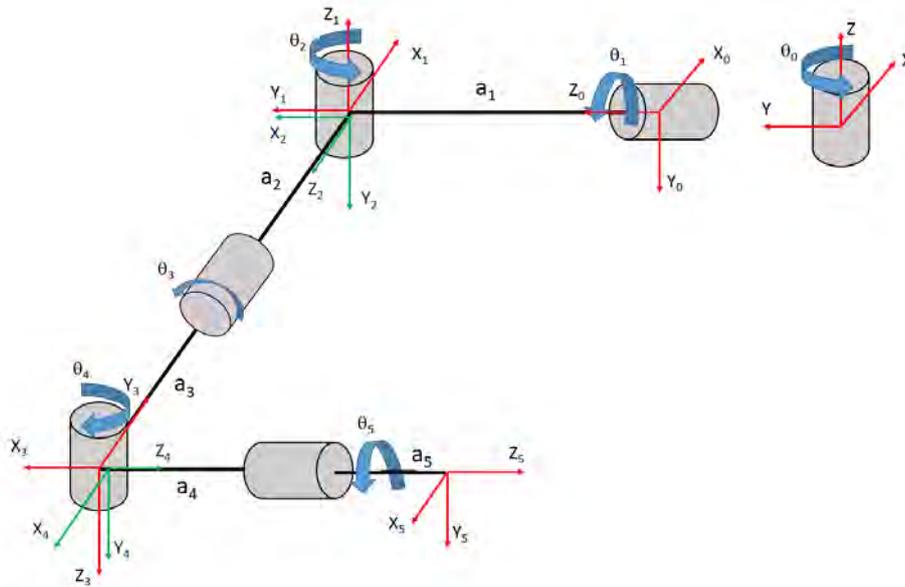


Figura 4.2. Cadena cinemática del brazo derecho.

Nótese que los ejes coordenados ‘2’ y ‘4’ no están sobre su debida articulación. Se tomó esta consideración para que se pueda cumplir la regla de los parámetros de Denavit-Hartenberg de que el eje X_n debe intersectar al eje Z_{n-1} y ser perpendicular tanto a Z_n como a Z_{n-1} . Luego, utilizando las cadenas cinemáticas planteadas se hallaron los parámetros de Denavit-Hartenberg mostrados en la Tabla 4.1 y Tabla 4.2.

Tabla 4.1. Parámetros de Denavit-Hartenberg del brazo izquierdo.

n	θ	d	a	α
0 (extra)	θ_0	0	0	90°
1	θ_1	a_1	0	-90°
2	θ_2	0	0	90°
3	θ_3	$a_2 + a_3$	0	-90°
4	θ_4	0	0	-90°
5	θ_5	$a_4 + a_5$	0	0

Tabla 4.2. Parámetros de Denavit-Hartenberg del brazo derecho.

n	θ	d	a	α
0 (extra)	θ_0	0	0	-90°
1	θ_1	a_1	0	90°
2	θ_2	0	0	-90°
3	θ_3	$a_2 + a_3$	0	-90°
4	θ_4	0	0	90°
5	θ_5	$a_4 + a_5$	0	0

Los parámetros de Denavit-Hartenberg se pueden utilizar para modelar de forma más sencilla un manipulador robótico en computadoras. En este caso, con ayuda de la “*Robotics Toolbox*” desarrollada por Peter Corke, se pueden modelar los brazos en el software *MATLAB* como se muestra en la Figura 4.3. Un aspecto importante a tomar en cuenta es que por cuestiones de visualización se ha considerado en cada brazo un grado

de libertad extra denominado '0' en la Tabla 4.1 y Tabla 4.2. Sin embargo, los brazos cuentan solo con 5 grados de libertad cada uno ($n = [1,5]$). En la Figura 4.3, los brazos se encuentran en su posición inicial y los valores de los ángulos de sus articulaciones se muestran en la Tabla 4.3. Para generar este gráfico, se deben correr la sección de la línea 1 y la de la línea 45 del código de MATLAB.

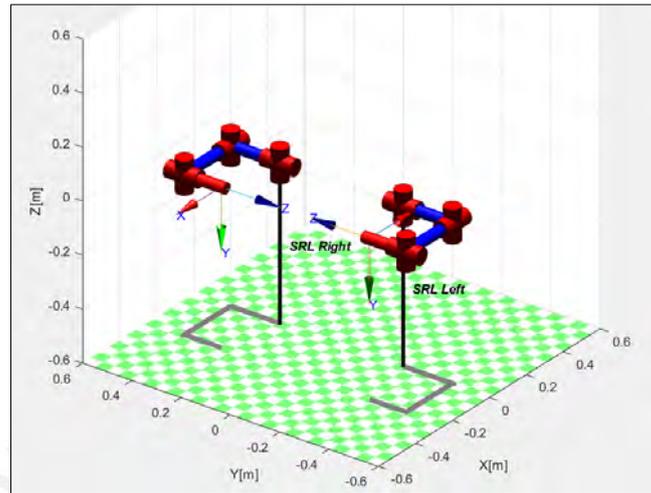


Figura 4.3. Brazos robóticos en su posición inicial.

Tabla 4.3. Valores de las posiciones iniciales de los brazos.

Brazo	θ_0	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5
Izquierdo	0	0	-90°	0	90°	0
Derecho	0	0	90°	0	-90°	0

Otras posiciones que también se consideraron importantes son las de ambos brazos extendidos y la posición que tomarían los brazos al estar retraídos. La posición de los brazos extendidos hacia los lados se muestra en la Figura 4.4a (correr sección de la línea 54 del código) y la posición de los brazos retraídos se muestra en la Figura 4.4b (correr sección de la línea 62 del código). Los valores que toman los ángulos de las articulaciones se muestran de la Tabla 4.4.

Tabla 4.4. Valores de las posiciones extendidas y retraídas de los brazos.

Posición	Brazo	θ_0	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5
Extendido	Izquierdo	0	0	0	0	180°	0
	Derecho	0	0	0	0	0	0
Retraído	Izquierdo	0	90°	-90°	0	45°	0
	Derecho	0	-90°	90°	0	-135°	0

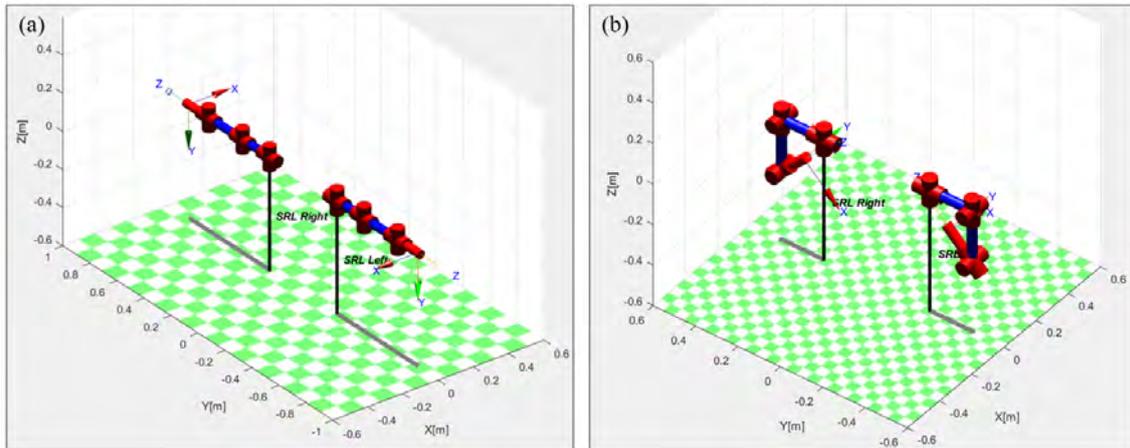


Figura 4.4. (a) Brazos robóticos extendidos hacia los lados. (b) Brazos robóticos en su posición retraída.

4.1.1. Cinemática directa

La cinemática directa permite hallar la posición y orientación del efector final a partir de los ángulos de las articulaciones o *joint angles*. En el caso del proyecto, el efector final es el gripper robótico de tres dedos. Anteriormente, se mencionó que en el “modo grabación” el usuario va a tener que mover físicamente las SRLs por la trayectoria a la que quiere que se muevan. Se plantea utilizar un programa que reciba como entrada los ángulos de las articulaciones medidas por los *encoder* de los servomotores y calcule la posición y orientación del efector final con respecto a la base (articulación extra θ_0). Asimismo, se guardarían las posiciones de los *joint angles* cada cierto tiempo durante la grabación para luego generar una trayectoria en el “modo acción” a partir de las posiciones guardadas.

Sin embargo, al no contar con un prototipo o sistema físico para realizar pruebas, como alternativa se está utilizando la *toolbox* de Peter Corke para realizar simulaciones. Primero se estiman las posiciones que conformarían las trayectorias utilizando la función *teach* como se observa en la Figura 4.5. Con el recuadro de la izquierda se puede cambiar el valor de los *joint angles* y simultáneamente los modelos de los brazos van cambiando. Una vez que se registraron algunas posiciones, se genera la trayectoria. Cabe resaltar que la función *teach* se está utilizando como una simulación del hecho de mover físicamente los brazos por la trayectoria deseada en el “modo grabación”.

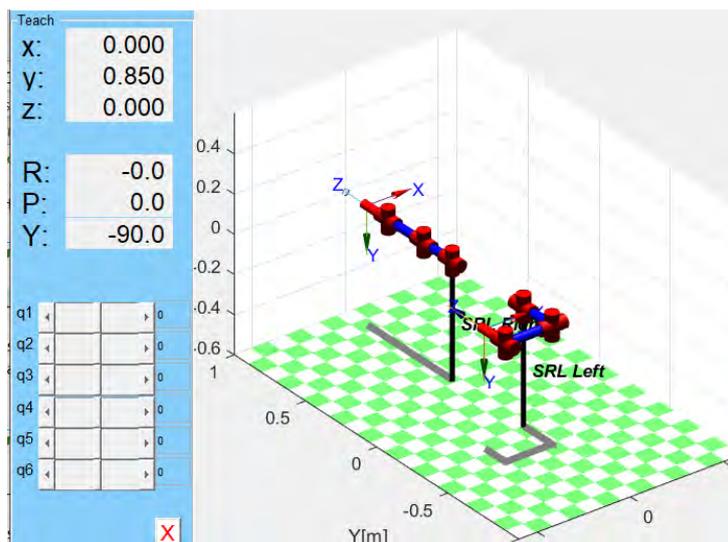


Figura 4.5. Brazos robóticos usando el comando teach de Robotic Toolox de Peter Corke.

Para seleccionar las posiciones se ha tomado en cuenta que los servomotores están a 0° en la posición inicial (Figura 4.3). A partir de esa posición podrían girar 90° en sentido horario o antihorario. Pero considerando que, en MATLAB, los ángulos de las articulaciones en la posición inicial no necesariamente son 0° y que en ciertas posiciones los brazos podrían colisionar con el usuario se muestra en la Tabla 4.5 los rangos de valores de los ángulos de cada articulación tanto en MATLAB como para los servomotores de cada brazo robótico.

Tabla 4.5. Rangos de valores de lo joint angles.

Brazo	Joint Angle	Rango MATLAB	Rango Servomotor
Izquierdo	$\theta_0 = q_1$	-	-
	$\theta_1 = q_2$	$[-90; 90]^\circ$	$[-90; 90]^\circ$
	$\theta_2 = q_3$	$[-130; 0]^\circ$	$[-65; 65]^\circ$
	$\theta_3 = q_4$	$[-90; 90]^\circ$	$[-90; 90]^\circ$
	$\theta_4 = q_5$	$[40; 180]^\circ$	$[-70; 70]^\circ$
	$\theta_5 = q_6$	$[-90; 90]^\circ$	$[-90; 90]^\circ$
Derecho	$\theta_0 = q_1$	-	-
	$\theta_1 = q_2$	$[-90; 90]^\circ$	$[-90; 90]^\circ$
	$\theta_2 = q_3$	$[0; 130]^\circ$	$[-65; 65]^\circ$
	$\theta_3 = q_4$	$[-90; 90]^\circ$	$[-90; 90]^\circ$
	$\theta_4 = q_5$	$[-140; 0]^\circ$	$[-70; 70]^\circ$
	$\theta_5 = q_6$	$[-90; 90]^\circ$	$[-90; 90]^\circ$

Considerando los rangos de valores de los ángulos, se propone el ejemplo de la Figura 4.6 en donde se observa una posible trayectoria que podría tomar el brazo derecho de la SRLs para mover la cuchara de la olla. Para esta secuencia de movimientos se consideró el caso de que la olla se encuentra al lado derecho del usuario. Se colocó una imagen

referencial de una cuchara de cocina y unas líneas punteadas para visualizar mejor la trayectoria que está siguiendo el brazo. El movimiento de 4.6a hacia 4.6b es para posicionar el brazo sobre la olla. Las posiciones 4.6b, 4.6c, 4.6d y 4.6e son las que se usan para formar la trayectoria circular para mover la cuchara. La secuencia se repetirá hasta que el usuario detenga la trayectoria. La sección de la línea 69 del código es la que genera a la Figura 4.6.

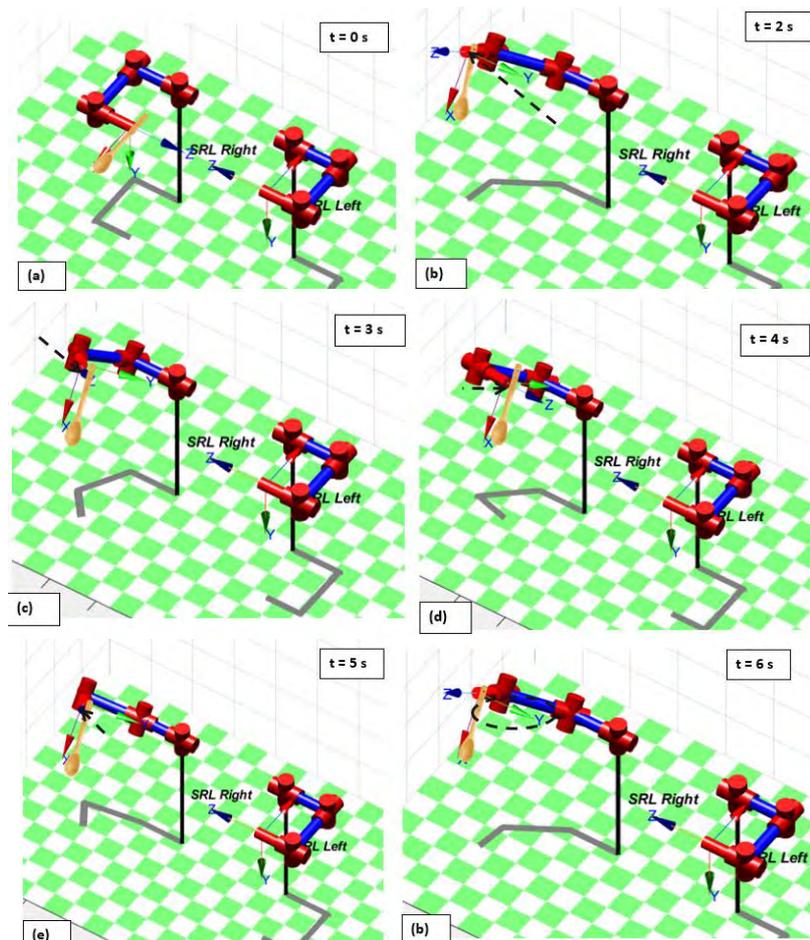


Figura 4.6. Posible trayectoria del brazo derecho estimada con teach para mover la cuchara.

Análogamente en el caso en el que la olla se encuentre en el lado izquierdo del usuario se propone el ejemplo mostrado en la Figura 4.7 en donde se observa otra posible trayectoria para mover la cuchara de la olla, pero esta vez con el brazo izquierdo. La sección de la línea 99 del código es la que genera a la Figura 4.7.

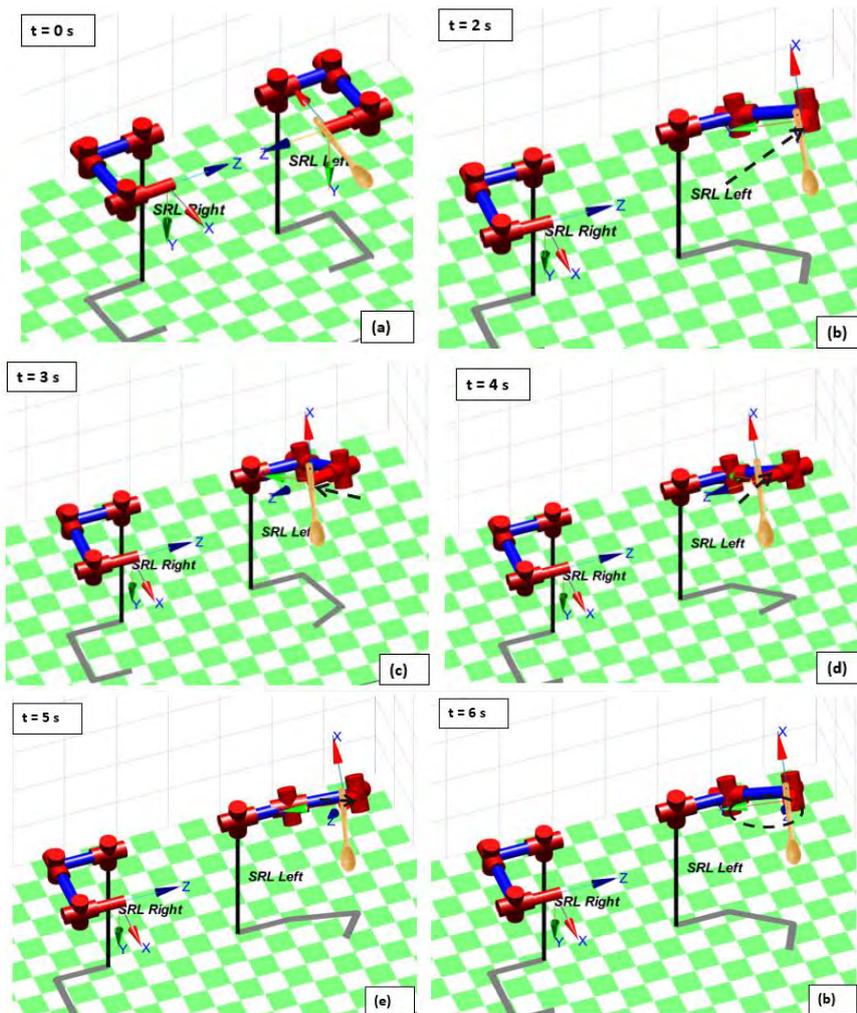
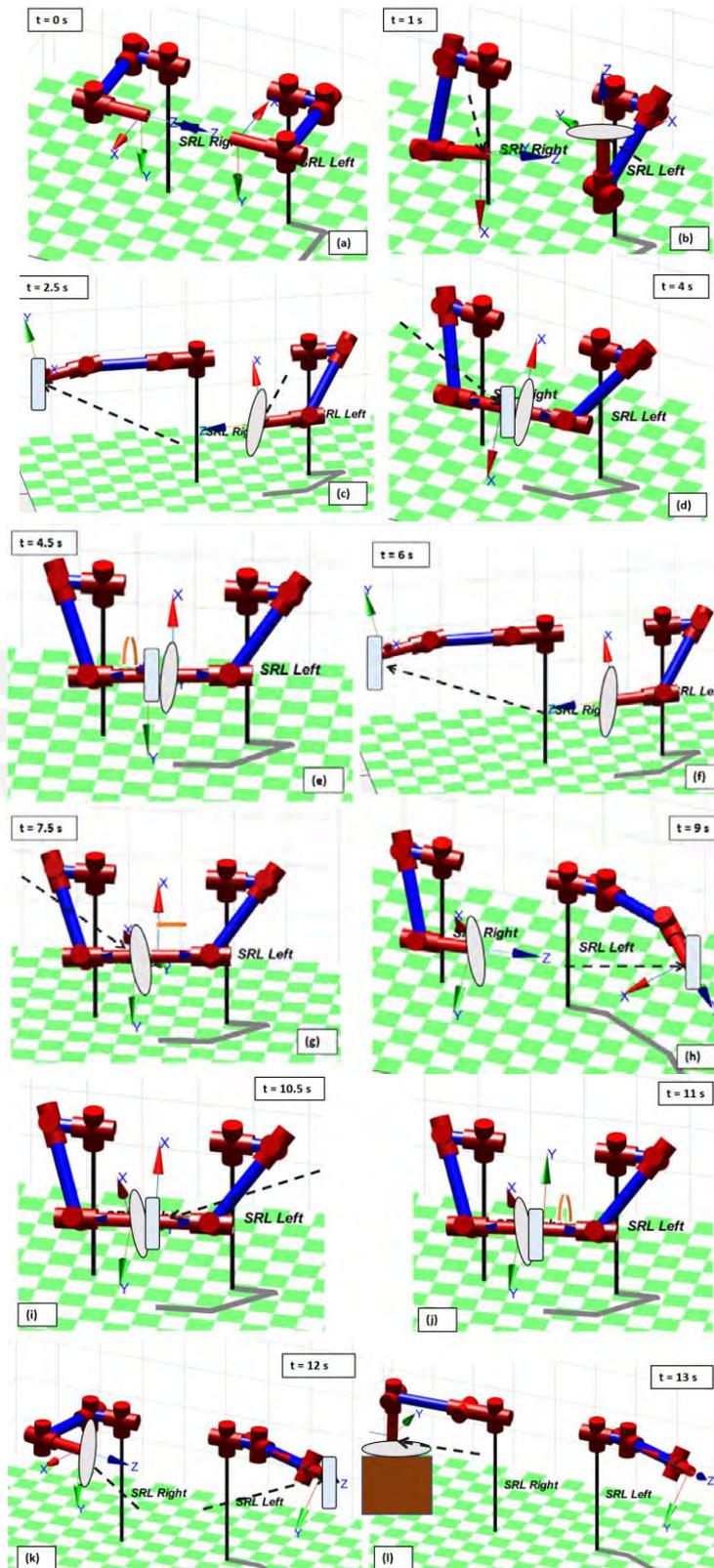


Figura 4.7. Posible trayectoria del brazo izquierdo estimada con teach para mover la cuchara.

Por último, se muestra un ejemplo de una posible trayectoria para el caso de secado de platos. En esta actividad necesariamente se usan los dos brazos, pues un brazo sostiene el plato y el otro plato sostiene la toalla. El brazo que sostiene el plato pone en posición para recibir el plato mientras el otro brazo realiza movimientos circulares para secar el plato. Luego el brazo que sostiene el plato deja el plato seco a un costado y se prepara para recibir otro plato.

A continuación, se presenta en la Figura 4.8 el caso en el que el brazo izquierdo recibe el plato primero y el brazo derecho seca. Luego, para secar el otro lado del plato, el brazo derecho toma el plato y el brazo izquierdo toma una toalla para secar el plato. Finalmente, el brazo derecho deja el plato sobre un mueble a un costado, coge la toalla y se reinicia el ciclo. Se está asumiendo que hay dos toallas uno a cada lado de los brazos y un mueble al lado derecho del usuario para que el brazo derecho deje los platos. Una descripción más detallada de lo que se presenta en la Figura 4.8 se muestra en la Tabla 4.6. Para estimar los tiempos de las 3 trayectorias de ejemplo mostradas en esta sección, se realizaron

pruebas de animación de las trayectorias y se determinaron los tiempos adecuados empíricamente. La sección de código correspondiente a este movimiento es la que se presenta en la línea 151.



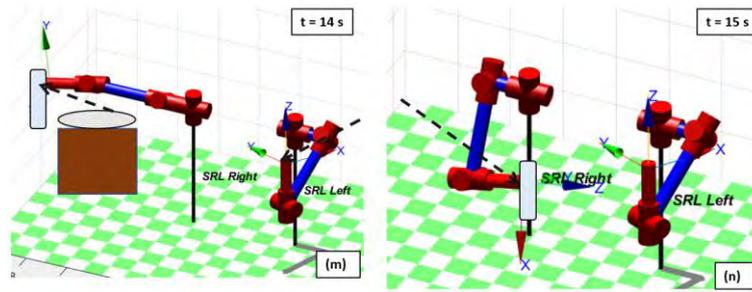


Figura 4.8. Posible trayectoria de los brazos estimada con teach para secar los platos.

Tabla 4.6. Descripción de la trayectoria de ejemplo para secar los platos.

Ítem	Tiempo	Descripción
(a)	0 s	Posición inicial de los brazos robóticos.
(b)	1 s	Brazo izquierdo a la espera de un plato y brazo derecho baja para que el usuario pueda empezar a lavar platos.
(c)	2.5 s	Brazo derecho va a recoger la toalla.
(d)	4 s	Brazo derecho regresa con la toalla a la posición de secado.
(e)	4.5 s	Brazo derecho gira el gripper sobre su propio eje para secar el plato.
(f)	6 s	Brazo derecho regresa la toalla a su lugar.
(g)	7.5 s	Brazo derecho regresa y toma el plato para que el brazo izquierdo seque el otro lado.
(h)	9 s	Brazo izquierdo va a recoger otra toalla.
(i)	10.5 s	Brazo izquierdo regresa con la toalla a la posición de secado.
(j)	11 s	Brazo izquierdo gira el gripper sobre su propio eje para secar el plato.
(k)	12 s	Brazo izquierdo regresa la toalla a su lugar y brazo derecho empieza a moverse para dejar el plato en una mesa.
(l)	13 s	Brazo derecho deja el plato en la mesa y brazo izquierdo deja la toalla.
(m)	14 s	Brazo derecho va por la toalla y brazo izquierdo se posiciona para recibir otro plato.
(n)	15 s	Brazo derecho regresa con la toalla listo para secar otro plato.

Es importante destacar que en un contexto en donde se cuente con el sistema físico de las SRLs se utilizaría la técnica conocida como guiado pasivo directo. Esta consiste en llevar manualmente al robot haciendo que su efector final pase por la trayectoria deseada mientras que el sistema de control registra automáticamente las señales de los sensores de posición en las articulaciones del robot en todos los puntos recorridos (Barrientos, 1997). Se limitaría la cantidad de corriente en los motores para que estos solo generen el torque necesario para contrarrestar el efecto de la gravedad y los brazos de las SRLs puedan ser movidos por el usuario. Asimismo, existe la opción de crear una pequeña maqueta de la estructura de las SRLs con las mismas funciones cinemáticas para que el

usuario pueda grabar la trayectoria de una manera más ligera y fácil. Esta técnica se llama guiado pasivo por maniquí (Barrientos et al., 1997).

4.1.2. Cinemática inversa

La cinemática inversa, de manera contraria a la cinemática directa, permite hallar los valores de los ángulos de las articulaciones a partir de la matriz homogénea de transformación del efector final (orientación y posición). En caso se tuviera acceso a un sistema físico, se podrían medir los ángulos de las articulaciones directamente de las lecturas de los *encoder* de los servomotores. Sin embargo, al no contar con un sistema físico se puede utilizar la cinemática inversa como una segunda alternativa para calcular los ángulos de los servomotores en base a la posición y orientación del efector final.

En primer lugar, se calculan las matrices de rotación desde la base hasta el efector final utilizando las cadenas cinemáticas mostradas en la Figura 4.1 y Figura 4.2 para los brazos izquierdo y derecho respectivamente. Para calcular la matriz de rotación desde la base (*joint* extra) hasta el efector final (eje de coordenadas 5) se van calculando las matrices de rotación de base a 0, de 0 a 1 y así sucesivamente hasta llegar a de 4 a 5 y por la propiedad de las matrices de rotación se pueden multiplicar todas para obtener como resultado la matriz de base hasta 5 como se muestra en la Ecuación 4.1. Como todos los ejes coordenados giran alrededor de Z por la notación de Denavit-Hartenberg, se utiliza la rotación base de Z la cuál es mostrada en la Ecuación 4.2.

$$R_5^{base} = R_0^{base} \cdot R_1^0 \cdot R_2^1 \cdot R_3^2 \cdot R_4^3 \cdot R_5^4 \dots (4.1)$$

$$Rotación\ en\ Z = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots (4.2)$$

Para los cálculos matriciales se utilizó el *software MATLAB R2021B*. A continuación, se muestran las matrices de rotación de los brazos izquierdo y derecho en la Ecuación 4.3 y Ecuación 4.4, respectivamente. Se está considerando a los cosenos como “C” y a los senos como “S” para mayor entendimiento y facilidad pues los términos son extensos.

$$R_{izquierdo}_5^{base} = \begin{bmatrix} RI_{11} & RI_{12} & RI_{13} \\ RI_{21} & RI_{22} & RI_{23} \\ RI_{31} & RI_{32} & RI_{33} \end{bmatrix} \dots (4.3)$$

Donde,

$$RI_{11} = C(\theta_5) * (S(\theta_4)S(\theta_1)S(\theta_3) - C(\theta_1)C(\theta_3)S(\theta_2)) + C(\theta_1)C(\theta_2)C(\theta_4) + S(\theta_5) \\ * (C(\theta_3)S(\theta_1) + C(\theta_1)S(\theta_2)S(\theta_3))$$

$$RI_{12} = C(\theta_5) * (C(\theta_3)S(\theta_1) + C(\theta_1)S(\theta_2)S(\theta_3)) - S(\theta_5) * (S(\theta_4) \\ * (S(\theta_1)S(\theta_3) - C(\theta_1)C(\theta_3)S(\theta_2)) + C(\theta_1)C(\theta_2)C(\theta_4))$$

$$RI_{13} = C(\theta_4) * (S(\theta_1)S(\theta_3) - C(\theta_1)C(\theta_3)S(\theta_2)) - C(\theta_1)C(\theta_2)S(\theta_4)$$

$$RI_{21} = C(\theta_5) * (C(\theta_4)S(\theta_2) + C(\theta_2)C(\theta_3)S(\theta_4)) - C(\theta_2)S(\theta_3)S(\theta_5)$$

$$RI_{22} = -S(\theta_5) * (C(\theta_4)S(\theta_2) + C(\theta_2)C(\theta_3)S(\theta_4)) - C(\theta_2)C(\theta_5)S(\theta_3)$$

$$RI_{23} = C(\theta_2)C(\theta_3)C(\theta_4) - S(\theta_2)S(\theta_4)$$

$$RI_{31} = -C(\theta_5) * (S(\theta_4) * (C(\theta_1)S(\theta_3) + C(\theta_3)S(\theta_1)S(\theta_2)) - C(\theta_2)C(\theta_4)S(\theta_1)) - S(\theta_5) \\ * (C(\theta_1)C(\theta_3) - S(\theta_1)S(\theta_2)S(\theta_3))$$

$$RI_{32} = S(\theta_5) * (S(\theta_4)C(\theta_1)S(\theta_3) + C(\theta_3)S(\theta_1)S(\theta_2)) - C(\theta_2)C(\theta_4)S(\theta_1) - C(\theta_5) \\ * (C(\theta_1)C(\theta_3) - S(\theta_1)S(\theta_2)S(\theta_3))$$

$$RI_{33} = -C(\theta_4) * (C(\theta_1)S(\theta_3) + C(\theta_3)S(\theta_1)S(\theta_2)) - C(\theta_2)S(\theta_1)S(\theta_4)$$

$$R_{derecho}_5^{base} = \begin{bmatrix} RD_{11} & RD_{12} & RD_{13} \\ RD_{21} & RD_{22} & RD_{23} \\ RD_{31} & RD_{32} & RD_{33} \end{bmatrix} \dots (4.4)$$

Donde,

$$RD_{11} = -C(\theta_5) * (S(\theta_4) * (S(\theta_1)S(\theta_3) + C(\theta_1)C(\theta_3)S(\theta_2)) + C(\theta_1)C(\theta_2)C(\theta_4)) - S(\theta_5) \\ * (C(\theta_3)S(\theta_1) - C(\theta_1)S(\theta_2)S(\theta_3))$$

$$RD_{12} = S(\theta_5) * (S(\theta_4) * (S(\theta_1)S(\theta_3) + C(\theta_1)C(\theta_3)S(\theta_2)) + C(\theta_1)C(\theta_2)C(\theta_4)) - C(\theta_5) \\ * (C(\theta_3)S(\theta_1) - C(\theta_1)S(\theta_2)S(\theta_3))$$

$$RD_{13} = C(\theta_4) * (S(\theta_1)S(\theta_3) + C(\theta_1)C(\theta_3)S(\theta_2)) - C(\theta_1)C(\theta_2)S(\theta_4)$$

$$RD_{21} = -C(\theta_5) * (C(\theta_4)S(\theta_2) - C(\theta_2)C(\theta_3)S(\theta_4)) - C(\theta_2)S(\theta_3)S(\theta_5)$$

$$RD_{22} = S(\theta_5) * (C(\theta_4)S(\theta_2) - C(\theta_2)C(\theta_3)S(\theta_4)) - C(\theta_2)C(\theta_5)S(\theta_3)$$

$$RD_{23} = -S(\theta_2)S(\theta_4) - C(\theta_2)C(\theta_3)C(\theta_4)$$

$$RD_{31} = -C(\theta_5) * (S(\theta_4) * (C(\theta_1)S(\theta_3) - C(\theta_3)S(\theta_1)S(\theta_2)) - C(\theta_2)C(\theta_4)S(\theta_1)) - S(\theta_5) \\ * (C(\theta_1)C(\theta_3) + S(\theta_1)S(\theta_2)S(\theta_3))$$

$$RD_{32} = S(\theta_5) * (S(\theta_4)C(\theta_1)S(\theta_3) - C(\theta_3)S(\theta_1)S(\theta_2)) - C(\theta_2)C(\theta_4)S(\theta_1) - C(\theta_5) \\ * (C(\theta_1)C(\theta_3) + S(\theta_1)S(\theta_2)S(\theta_3))$$

$$RD_{33} = C(\theta_4) * (C(\theta_1)S(\theta_3) - C(\theta_3)S(\theta_1)S(\theta_2)) + C(\theta_2)S(\theta_1)S(\theta_4)$$

En segundo lugar, se calculó el vector posición del efector final para ambos brazos. En ambos casos se dividió el procedimiento en dos partes. Para la primera parte se calculó la posición de las articulaciones 3 y 4 (que es la misma) con respecto a la base la cual se

muestra en la Ecuación 4.5 y Ecuación 4.7 para los brazos izquierdo y derecho, respectivamente. Para la segunda parte se calculó la posición de la articulación 5 con respecto a los ejes 3 y 4 la cual se muestra en la Ecuación 4.6 y Ecuación 4.8 para los brazos izquierdo y derecho, respectivamente. Luego para obtener el vector desplazamiento desde la base hasta el eje 5 se suman los vectores de la Ecuación 4.5 y Ecuación 4.6 para obtener el resultado del brazo izquierdo; y la Ecuación 4.7 y Ecuación 4.8 para obtener el resultado del brazo derecho. En la Figura 4.9 (brazo izquierdo) y en la Figura 4.10 (brazo derecho) se muestran los diagramas que se usaron para obtener los resultados. La sección de código que corresponde al cálculo de las matrices de rotación y vectores de desplazamiento se encuentra en la línea 244. Para un mayor entendimiento de la nomenclatura de las articulaciones, ver la Figura 4.11 en donde se muestra un diagrama con las posiciones de las articulaciones del brazo izquierdo. En la Tabla 4.7 se pueden observar las equivalencias entre q_n (nomenclatura que aparece en la función *teach* de MATLAB) y θ_n (nomenclatura definida en las cadenas cinemáticas).

$$P_{Izq_3}^{base} = \begin{bmatrix} xI_3^{base} \\ yI_3^{base} \\ zI_3^{base} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (a2 + a3) * S(\theta2) * C(\theta1) \\ -0.25 - (a1 + (a2 + a3) * C(\theta2)) \\ (a2 + a3) * S(\theta2) * S(\theta1) \end{bmatrix} \dots (4.5)$$

$$P_{Izq_5^3} = \begin{bmatrix} xI_5^3 \\ yI_5^3 \\ zI_5^3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(a4 + a5) * S(180 - \theta4) * C(\theta3 - 180) \\ (a4 + a5) * C(180 - \theta4) \\ -(a4 + a5) * S(180 - \theta4) * S(\theta3 - 180) \end{bmatrix} \dots (4.6)$$

$$P_{Der_3}^{base} = \begin{bmatrix} xD_3^{base} \\ yD_3^{base} \\ zD_3^{base} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(a2 + a3) * S(\theta2) * C(\theta1) \\ 0.25 + a1 + (a2 + a3) * C(\theta2) \\ (a2 + a3) * S(\theta2) * S(\theta1) \end{bmatrix} \dots (4.7)$$

$$P_{Der_5^3} = \begin{bmatrix} xD_5^3 \\ yD_5^3 \\ zD_5^3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(a4 + a5) * S(\theta4) * C(\theta3) \\ (a4 + a5) * C(-\theta4) \\ (a4 + a5) * S(-\theta4) * S(\theta3) \end{bmatrix} \dots (4.8)$$

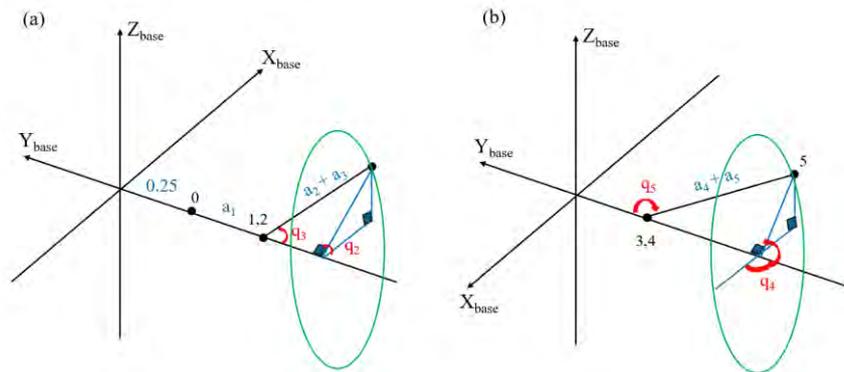


Figura 4.9. Diagramas para hallar el vector desplazamiento del brazo izquierdo desde la base hasta el eje de coordenadas 3 (a) y desde el eje 3 hasta el eje 5 (b).

Tabla 4.7. Equivalencia entre nomenclaturas de MATLAB y cadena cinemática.

Articulación 0 (joint extra)	Articulación 1	Articulación 2	Articulación 3	Articulación 4	Articulación 5
$\theta_0 = q_1$	$\theta_1 = q_2$	$\theta_2 = q_3$	$\theta_3 = q_4$	$\theta_4 = q_5$	$\theta_5 = q_6$

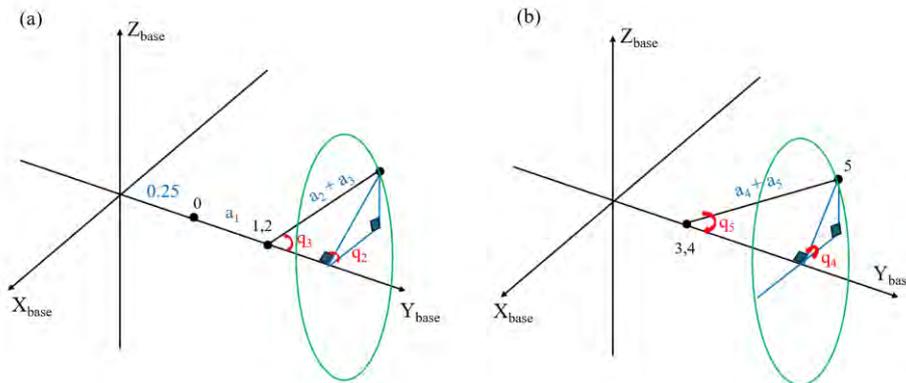


Figura 4.10. Diagramas para hallar el vector desplazamiento del brazo derecho desde la base hasta el eje de coordenadas 3 (a) y desde el eje 3 hasta el eje 5 (b).

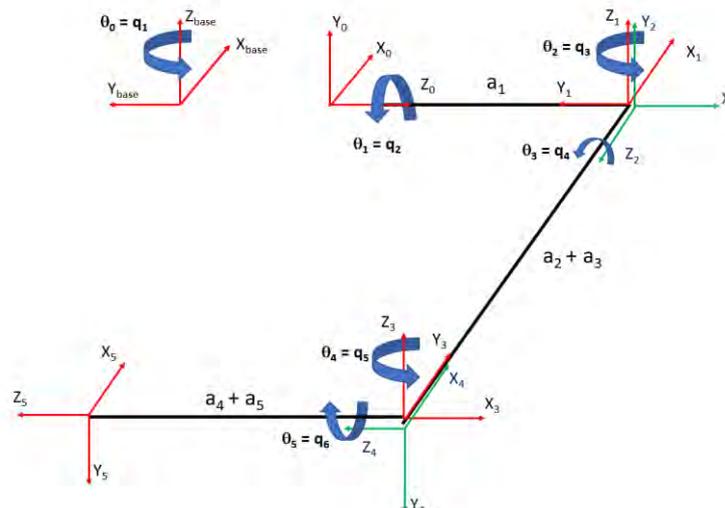


Figura 4.11. Diagrama con articulaciones y sus respectivos ejes coordenados del brazo izquierdo.

Finalmente, ahora que se han hallado las matrices de rotación y los vectores desplazamiento de cada brazo desde la base hasta el eje de coordenadas 5 (efector final), se puede hallar la matriz homogénea de transformación de cada brazo, cuya forma genérica se muestra en la Ecuación 4.9 y para hallarla se deben reemplazar los términos calculados anteriormente. En vista de que los elementos de las matrices de rotación y los vectores de desplazamiento son muy extensos, sólo se indicará la forma genérica de la matriz homogénea de transformación representada por la letra T.

$$T_5^{base} = \begin{bmatrix} R_{3x3} & P \\ 0 & 1 \end{bmatrix}_5^{base} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & x \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & y \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_5^{base} \dots (4.9)$$

4.2. Material y estimación del peso de los brazos

En esta sección se evalúa cuál sería el mejor material para los brazos robóticos y en base una estimación de sus dimensiones considerando los requisitos de diseño, se estima el peso de los eslabones.

4.2.1. Elección del material

La elección de un material de baja densidad y de buena resistencia mecánica es un factor importante a tomar en cuenta a la hora de diseñar SRLs. En el estado del arte, pudo observar que usualmente se utilizan materiales compuestos como la fibra de carbono, el kevlar o la fibra de nylon. También se utilizan aleaciones de baja densidad como la aleación de magnesio-aluminio (Yang et al., 2021; Parietti 2016).

Entre los materiales mencionados en el estado del arte, se encontró que el nylon (poliamida) y la fibra de carbono son ambas buenas opciones debido a su buena resistencia mecánica y baja densidad. Además, ambos materiales tienen presentaciones como varillas comerciales y también se pueden utilizar como material para impresión 3D (Formslab, s.f.; Susana, 2023; Corporación Emacin, 2021). A continuación, en la Tabla 4.8 se presenta una comparación entre ambos materiales.

Tabla 4.8. Comparación entre posibles materiales para las SRLs.

Material	Ventajas	Desventajas
Nylon (Poliamida)	-Menor densidad que la fibra de carbono -Biocompatible	-Fácil de mecanizar
Fibra de carbono	-Mayor resistencia mecánica que el nylon	-Costo elevado

(Fuente: Adaptado de Formslabs, s.f.; Susana, 2020)

Luego de comparar las propiedades de ambos materiales, se considera que el nylon es el material más adecuado para la fabricación de las SRLs porque cuenta con una densidad menor que la de la fibra de carbono, lo cual permite que el sistema sea más ligero. Si bien la resistencia mecánica es menor que la de la fibra de carbono, para la aplicación que se le quiere dar es alta, en primera instancia. Sin embargo, una de las características más importantes del nylon es que sea biocompatible, dado que el sistema trabajará en una cocina.

4.2.2. Estimación de dimensiones y peso de los brazos

Antes de calcular el peso de los brazos, se debe realizar una estimación de las dimensiones de estos. Por temas de simplicidad se modelarán los eslabones de los brazos como cilindros. Dicho esto, se muestran las medidas de los diámetros y longitudes de cada eslabón a_n en la Tabla 4.9. Cabe resaltar que los brazos son simétricos por lo que sus dimensiones y pesos son iguales. Las longitudes de los eslabones se han distribuido de tal manera que sumen 0.7 m (700 mm) tal como se había propuesto anteriormente en los requisitos de diseño. Los diámetros se estimaron con las medidas de diámetros de un brazo y antebrazo promedio.

Tabla 4.9. Dimensiones estimadas para los eslabones de los brazos.

Medida	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
Longitud (m)	0.15	0.20	0.15	0.15	0.05
Diámetro (m)	0.06	0.05	0.05	0.04	0.04

Con las dimensiones estimadas en la Tabla 4.9 se puede hallar un volumen estimado de cada eslabón utilizando la ecuación 4.10. Considerando que la densidad del nylon PA6 es 1.14 g/cm^3 se puede hallar la masa estimada de cada eslabón con la Ecuación 4.10 y la Ecuación 4.11 (Corporación Emacin, 2021). Y finalmente, considerando a la gravedad con un valor de 9.81 m/s^2 se puede estimar el peso de cada eslabón. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 4.10.

$$Volumen = \pi \times \frac{Diámetro^2}{2} \times Altura \quad \dots (4.10)$$

$$masa = Densidad \times Volumen \quad \dots (4.11)$$

Tabla 4.10. Resultados del cálculo del peso de los eslabones.

Característica	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
Volumen (m3)	4.241×10^{-4}	3.927×10^{-4}	2.945×10^{-4}	1.885×10^{-4}	6.283×10^{-5}
Masa (kg)	0.483	0.448	0.336	0.215	0.072
Peso (N)	4.743	4.392	3.294	2.108	0.703

4.3. Cálculos para la selección de servomotores

En esta sección, se realizan los cálculos estáticos y dinámicos de los torques requeridos para mover los brazos robóticos. Posteriormente, se evalúan alternativas de servomotores que puedan brindar el torque requerido y se selecciona uno en base a requisitos de diseño como el peso o las dimensiones.

4.3.1. Cálculo estático de los torques de los motores

En el caso del cálculo de los torques estáticos, se realizan diagramas de cuerpo libre (DCL) de uno de los brazos en las posiciones críticas. Solo es necesario calcular los torques en uno de los brazos porque al ser simétricos, las cargas que soportan ambos brazos son equivalentes. Antes de realizar los DCLs, se debe estimar el peso de los servomotores que irían en cada articulación. En la Tabla 4.11 se muestra unos valores de peso estimados para cada motor tomando de referencia modelos de la marca Robotis (Robotis, 2022).

Tabla 4.11. Peso estimado de los servomotores de las articulaciones.

	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5
Masa del motor (kg)	0.8	0.8	0.35	0.35	0.35
Peso del motor (N)	7.848	7.848	3.434	3.434	3.434

Fuente: Adaptado de Robotis, 2022.

A continuación, se muestran los DCLs de las posiciones críticas de los servomotores en la Figura 4.12 y en la Figura 4.13. Hay cuatro DCL en donde el brazo está posicionado de tal forma que el servomotor correspondiente tiene que levantar la mayor cantidad de carga posible. No se realiza el DCL del servomotor 5 pues este solo se encarga de la rotación del efector final.

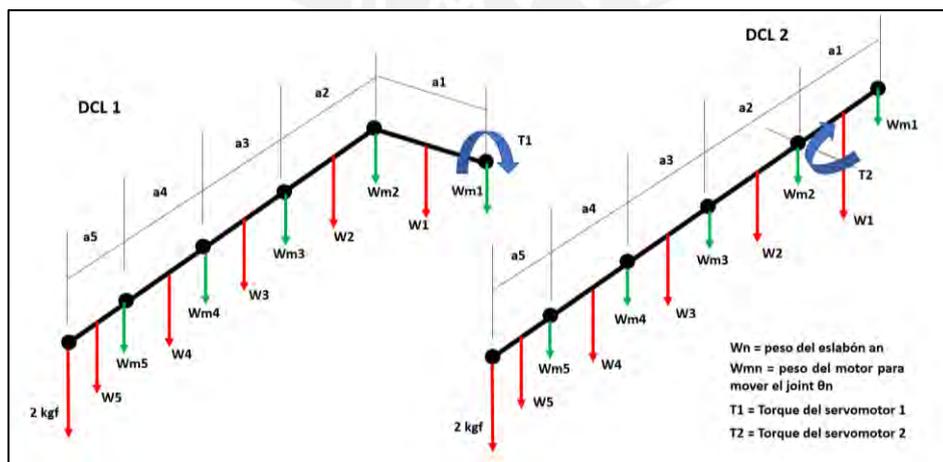


Figura 4.12. DCL's para hallar los torques de los servomotores 1 y 2.

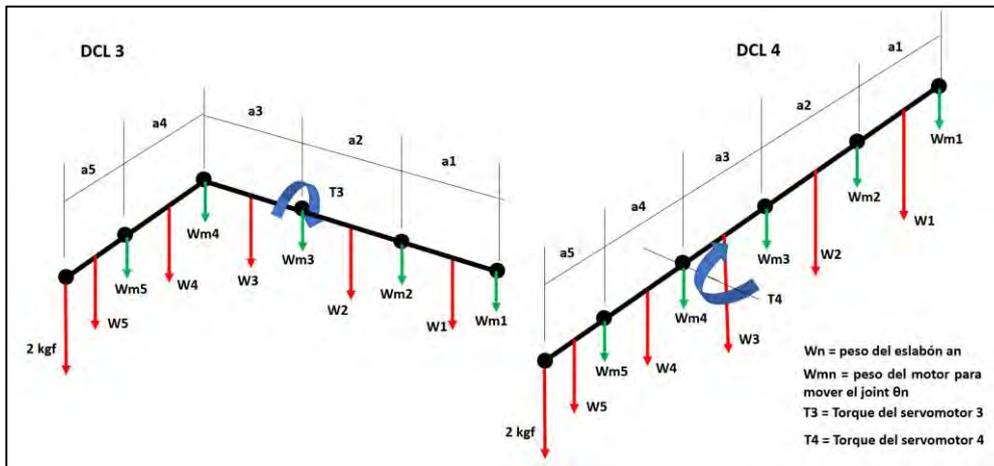


Figura 4.13. DCL's para hallar los torques de los servomotores 3 y 4.

Para el cálculo de los torques se utiliza la Ecuación 4.12 y los DCL's mostrados anteriormente. Luego se muestran los resultados en la Tabla 4.12. Se está considerando en el efector final una carga de 2kg que es la capacidad de carga de cada brazo robótico según lo establecido en los requisitos de diseño. Asimismo, al torque resultante se le multiplica por un factor de seguridad de 1.2.

$$\sum T = 0 \dots (4.12)$$

Tabla 4.12. Resultados de los cálculos estáticos de los torques.

	Motor 1	Motor 2	Motor 3	Motor 4
Torque solo eslabones (Nm)	13.40	13.40	4.21	4.21
Torques solo motores (Nm)	4.49	4.49	0.52	0.52
Torque resultante (Nm)	17.89	17.89	4.72	4.72
Torque x FS (Nm)	21.47	21.47	5.66	5.66

De los resultados obtenidos en la Tabla 4.12 se puede concluir que las articulaciones θ_1 y θ_2 requieren el mismo torque por lo que podrían usar el mismo modelo de servomotor. De igual manera las articulaciones θ_3 y θ_4 requieren el mismo torque por lo que podrían usar el mismo modelo de servomotor. Para la articulación θ_5 , al mover cargas menores que las otras articulaciones, se puede utilizar el mismo modelo que las articulaciones θ_3 y θ_4 , o uno con menor torque.

4.3.2. Cálculo dinámico de los torques de los motores

En el caso del cálculo de los torques dinámicos, se usa como base la teoría de dinámica inversa en donde se obtienen las fuerzas y torques requeridos para mover las articulaciones dadas la posición, velocidad y aceleración de las articulaciones. La

ecuación que describe la dinámica de un manipulador es la formulación de Newton-Euler, la cual se muestra en la Ecuación 4.13.

$$\tau = M(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) \dots (4.13)$$

Donde,

τ = Vector de torques requeridos

M = Matriz de masas o inercias

C = Matriz de coriolis y fuerzas centrífugas

G = Matriz de gravedad

θ = Ángulos de las articulaciones de las SRLs

Para hallar los torques dinámicos de cada articulación se utilizó la función 'rne' de la toolbox de Peter Corke, la cual recibe como entradas la posición, velocidad angular y aceleración de las articulaciones del manipulador y da como salidas los torques requeridos para ese instante de tiempo. Esta función también tiene la opción de colocar trayectorias, por ello se utilizan las trayectorias mostradas en la sección "4.1.1. Cinemática directa". Sin embargo, antes de utilizar esta función, se tuvo que configurar algunos parámetros.

Se está utilizando el brazo derecho para el cálculo de torques como en la sección anterior ("4.3.1. Cálculo estático de los torques de los motores"). Se consideró la masa del motor ' m_n ' correspondiente para cada eslabón ' a_n ' como parte de la masa de ese eslabón y se generaron las matrices de inercia con respecto al centro de masa de cada eslabón las cuáles tienen la forma de la Ecuación 4.14. Para el cálculo de cada elemento se utilizaron la Ecuación 4.15 y la Ecuación 4.16 las cuales representan la inercia de un cilindro con respecto a su eje longitudinal y la inercia de un cilindro con respecto a el eje transversal a su centro de masa. Los valores de inercia obtenidos se presentan en la Tabla 4.13. Cabe resaltar que se ha considerado a los productos de inercia (I_{xy} , I_{zx} , I_{zy}) como 0.

$$I = \begin{bmatrix} I_{xx} & I_{xy} & I_{xz} \\ I_{yx} & I_{yy} & I_{yz} \\ I_{zx} & I_{yz} & I_{zz} \end{bmatrix} \dots (4.14)$$

$$I_{long.} = \frac{1}{2}MR^2 \dots (4.15)$$

$$I_{trans.} = \frac{1}{4}MR^2 + \frac{1}{12}ML^2 \dots (4.16)$$

Donde,

M: masa del cilindro

R: Radio del cilindro

L: Largo del cilindro

Tabla 4.13. Inercias con respecto al centro de masa de los eslabones.

Inercia	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅
I _{xx} (kg.m ²)	1.607 x 10 ⁻⁴	8.744 x 10 ⁻⁶	1.607 x 10 ⁻⁴	6.558 x 10 ⁻⁶	6.922 x 10 ⁻⁶
I _{yy} (kg.m ²)	1.607 x 10 ⁻⁴	3.774 x 10 ⁻⁴	1.607 x 10 ⁻⁴	1.607 x 10 ⁻⁴	6.922 x 10 ⁻⁶
I _{zz} (kg.m ²)	6.558 x 10 ⁻⁶	3.774 x 10 ⁻⁴	6.558 x 10 ⁻⁶	1.607 x 10 ⁻⁴	2.186 x 10 ⁻⁶

Asimismo, se consideró a la velocidad angular como constante y se utilizó la Ecuación 4.17 para calcularla. Como se mencionó anteriormente, se utilizaron las trayectorias presentadas en la sección “4.1.1. Cinemática directa” y se calculó la velocidad angular en rad/s para cada tramo de la trayectoria.

$$w_{\theta n} = \frac{pos_{final} - pos_{inicial}}{tiempo\ del\ tramo} \dots (4.17)$$

A continuación, se presenta el caso de la trayectoria de ejemplo para mover la cuchara de la olla. En la Figura 4.14 se puede observar una gráfica en donde se muestran los valores de las velocidades angulares de cada articulación con respecto al tiempo durante toda la trayectoria. Utilizando esas velocidades y la función ‘rne’ se obtuvieron los torques necesarios para mover las articulaciones durante la trayectoria. En la Figura 4.15 se muestra la gráfica de los torques obtenidos de cada articulación con respecto al tiempo. Asimismo, en la Tabla 4.14 se muestran los valores absolutos máximos de velocidad y torque para cada articulación. Al igual que en la sección “4.3.1. Cálculo estático de los torques de los motores”, también se muestra una fila en donde se muestra el valor del torque máximo multiplicado por un factor de seguridad (FS) de 1.2. Las secciones de código correspondientes al cálculo de la velocidad y el torque se encuentran en las líneas de la 299 a la 435.

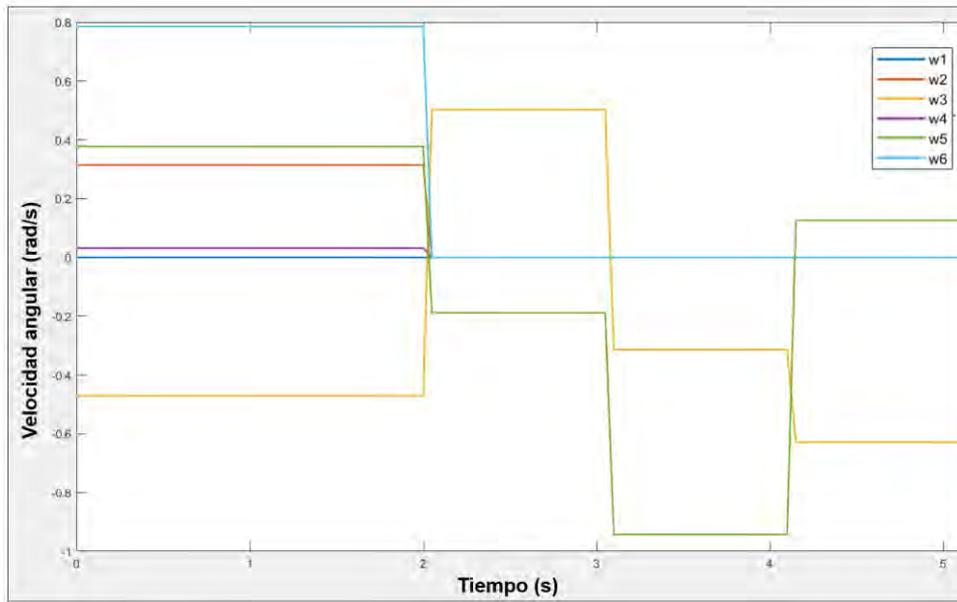


Figura 4.14. Velocidad angular de las articulaciones con respecto al tiempo en la trayectoria de mover la cuchara de la olla.

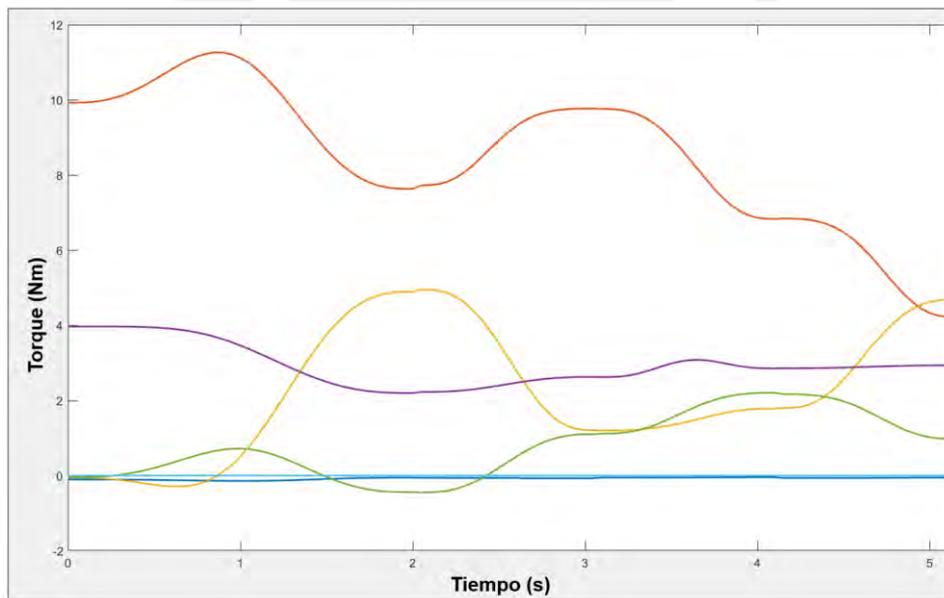


Figura 4.15. Torques de las articulaciones calculados con respecto al tiempo en la trayectoria de mover la cuchara de la olla.

Tabla 4.14. Valores máximos de velocidad angular y torque para los motores de las articulaciones.

	Motor 1 (q2)	Motor 2 (q3)	Motor 3 (q4)	Motor 4 (q5)	Motor 5 (q6)
Velocidad angular máxima (rad/s)	0.3142	0.6283	0.0314	0.9425	0.7854
Torque máximo (Nm)	11.260	4.951	3.967	2.204	5.92 x10 ⁻⁷
Torque x FS	13.512	5.941	4.760	2.645	7.10 x10 ⁻⁷

4.3.3. Selección de los servomotores

Para la selección de los servomotores se va a tener en consideración que pueda brindar el torque máximo requerido los cuales se mostraron en la Tabla 4.12 y la Tabla 4.14, y que pueda girar a la velocidad angular máxima la cual se mostró en la Tabla 4.14. Adicionalmente, se considerará que la masa de los motores tenga un valor similar a los estimados en la Tabla 4.11 y que su rango angular sea de mínimo 180°.

Se ha considerado utilizar modelos de la marca Robotis pues esta marca esta especialmente diseñada para proyectos de robótica. Sus motores tienen un peso considerablemente bajo con respecto al resto de marcas que tienen una perspectiva más industrial (Robotis, 2022). Para el caso de las articulaciones θ_1 y θ_2 se ha escogido el modelo presentado en la Tabla 4.15 pues es el único modelo que ofrece el torque requerido para las articulaciones en sus estados críticos. En el caso de las articulaciones θ_3 , θ_4 y θ_5 hay más opciones que se han considerado y se muestran en la Tabla 4.16 (θ_3 y θ_4) y en la Tabla 4.17 (θ_5).

Tabla 4.15. Características del motor escogido para las articulaciones θ_1 y θ_2 .

Característica	Articulaciones θ_1 y θ_2
Serie	DYNAMIXEL -P
Modelo	PH54-100-S500-R
Torque (Nm) (operación continua)	25.3
Velocidad angular (rad/s) (operación continua)	3.06
Peso (kg)	0.740
Dimensiones (mm) (W x H x D)	54 x 108 x 54
Voltaje de operación (V)	24
Corriente de operación (A)	5.5
Rango angular (°)	360

(Fuente: Robotis, 2022)

Tabla 4.16. Características del motor escogido para las articulaciones θ_3 y θ_4 .

Característica	Articulaciones θ_3 y θ_4	
Serie	DYNAMIXEL -P	DYNAMIXEL MX
Modelo	PM54-060-S250-R	MX-106R
Torque (Nm)	10.1 (operación continua)	8.40 (<i>stall torque</i>)
Velocidad angular (rad/s) (operación continua)	2.96	4.71 (sin carga)
Peso (kg)	0.855	0.153
Dimensiones (mm) (W x H x D)	54 x 126 x 54	40.2 x 65.1 x 46
Voltaje de operación (V)	24	12
Corriente de operación (A)	3	5.2
Rango angular (°)	360	360

(Fuente: Robotis, 2022)

Tabla 4.17. Características del motor escogido para la articulación 05.

Característica	Articulación 05	
	DYNAMIXEL -XD	DYNAMIXEL MX
Serie	DYNAMIXEL -XD	DYNAMIXEL MX
Modelo	XD430-T350-R	MX-64R
Torque (Nm)	3.40 (<i>stall torque</i>)	6 (<i>stall torque</i>)
Velocidad angular (rad/s) (operación continua)	3.14 (sin carga)	6.6 (sin carga)
Peso (kg)	0.085	0.126
Dimensiones (mm) (W x H x D)	28.5 x 46.5 x 34	40.2 x 61.1 x 41
Voltaje de operación (V)	12	12
Corriente de operación (A)	1.3	4.1
Rango angular (°)	360	360

(Fuente: Robotis, 2022)

Luego de analizar las características de los motores, se escoge el modelo PH54-100-S500-R para las articulaciones θ_1 y θ_2 , pues es el único modelo que cumple con el torque requerido. Para las articulaciones θ_3 y θ_4 se escoge el modelo MX-106R pues a diferencia del PH54-100-S500-R, este cuenta con menor peso, menores dimensiones y cumple con los requisitos de torque y velocidad angular. Por último, para el caso de la articulación θ_5 se escoge el modelo MX-64R, pues cuenta con mayor torque que el modelo XD430-T350-R, lo cual asegura que no habrá problemas para mover el *gripper*. El valor del torque de este modelo es un similar al modelo escogido para las articulaciones θ_3 y θ_4 , sin embargo, el MX-64R tiene un menor peso. Los 3 modelos escogidos se muestran en la Figura 4.16.



Figura 4.16. Servomotores escogidos para las SRLs.
(Fuente: Robotis, 2022)

4.4. Brazos, uniones de los brazos y soportes de los motores

Esta sección está dedicada al diseño 3D de los brazos y sus respectivas uniones entre eslabones y motores. Antes del diseño, se realizan cálculos de resistencia y deflexión para verificar que el diseño pensado cumple con soportar las fuerzas y torques requeridos, y su deflexión no afecta al desempeño del sistema.

4.4.1. Cálculo de resistencia de los brazos

Para empezar, se realizó un diagrama de fuerzas cortantes y un diagrama de momentos flectores para determinar la zona crítica de los brazos, los cuáles se muestran en la Figura 4.17. Además, se realizó un diagrama genérico de la sección circular de un eslabón de las SRLs (ver Figura 4.18). Una vez hecho esto, se utiliza la Ecuación 4.18 para poder calcular el esfuerzo de tracción y compresión (σ) de los brazos en la zona crítica.

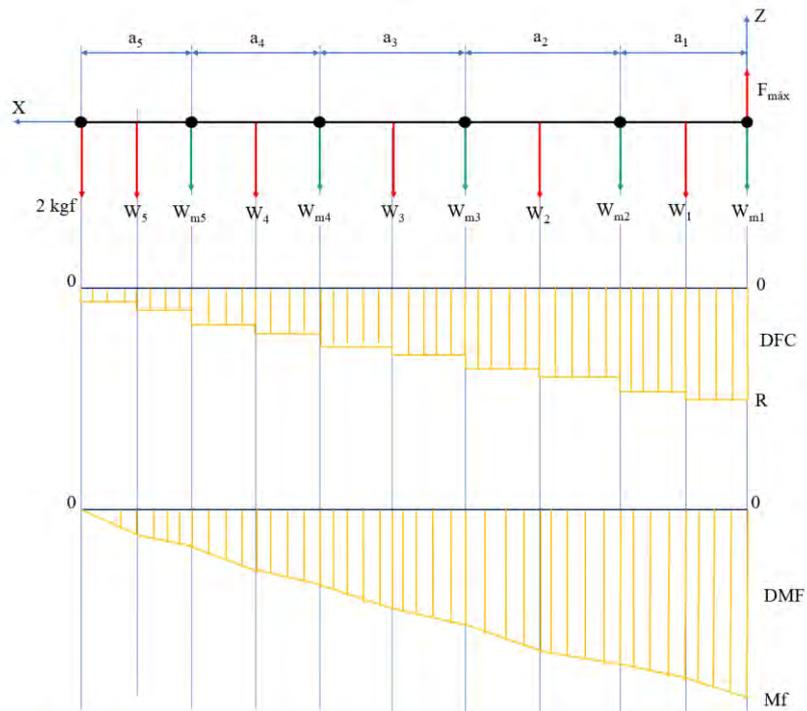


Figura 4.17. Diagrama de fuerzas internas de un brazo de las SRLs.

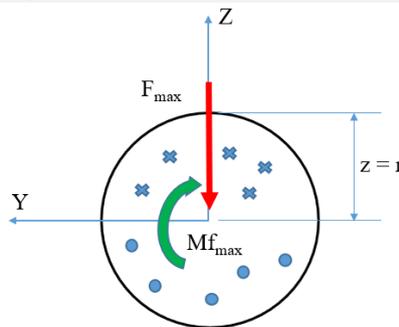


Figura 4.18. Sección circular de un eslabón de las SRLs.

$$\sigma = \frac{-Mz \cdot y}{Iz} + \frac{My \cdot z}{Iy} \dots (4.18)$$

Donde,

Mz: Momento con respecto al eje Z

My: Momento con respecto al eje y

Iz: Inercia con respecto al eje Z

Iy: Inercia con respecto al eje Y

Al solo haber fuerzas en el eje z y momentos con respecto al eje Y, el primer término de la Ecuación 4.18 se anula. Además, como la sección de los brazos es circular, la inercia es la misma con respecto a cualquier eje y se representa por la Ecuación 4.19. Para calcular la inercia se consideró la sección del eslabón más pequeño. El valor de ‘z’ es igual al valor del radio de la sección circular.

$$I_z = I_y = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot r^4 \dots (4.19)$$

Cabe resaltar que para este punto se realizó una reducción en el tamaño del diámetro de todos los eslabones dado que estaban sobredimensionados. De esta forma, los valores finales de los diámetros de los eslabones se muestran en la Tabla 4.18. Asimismo, en la Tabla 4.19 se muestran los valores calculados de la fuerza máxima, el momento flector máximo, la inercia de la sección más pequeña y el esfuerzo resultante (σ) en la zona crítica. Al esfuerzo resultante se le consideró un factor de seguridad (FS) igual a 5, pues se realizaron muchas simplificaciones al momento de calcular.

Tabla 4.18. Nuevas medidas de los diámetros de los eslabones.

Eslabón	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅
Diámetro (m)	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025

Tabla 4.19. Parámetros calculados para el análisis de esfuerzos.

Parámetro	Valor
Fuerza máxima (F _{max})	53.874 N
Momento flector máximo (M _{fmax})	22 951.49 N.mm
Inercia (I)	306 796.2 mm ⁴
Esfuerzo resultante (σ)	0.935 N/mm ²
Esfuerzo con factor de seguridad ($\sigma \times FS$)	4.676 N/mm ²

Para poder determinar si los brazos aguantan el esfuerzo resultante considerando el factor de seguridad aplicado, se realiza una comparación con el esfuerzo admisible (σ_{adm}) del Nylon PA 6SA, material con el cuál se fabricarán los eslabones de los brazos. El valor del esfuerzo admisible del PA 6SA es igual a 82 MPa en su caso más crítico (Corporación Emacin, 2021). Considerando el valor calculado en la Tabla 4.19 se observa que el esfuerzo resultante es menor al admisible ($4.676 < 82$ MPa), con un factor de seguridad real igual a 87.69. Por lo tanto, los brazos si van a resistir las cargas a los que estarán sometidos.

4.4.2. Cálculo de deflexión de los brazos

En primer lugar, para el cálculo de deflexión de los brazos se consideró calcular individualmente las deflexiones de cada uno de los 5 eslabones que conforman un brazo. En la Figura 4.19 se muestra el DCL de un eslabón en general. Se ha considerado a los eslabones como vigas empotradas con un extremo libre por la forma en la que serán ensamblados (ver Figura 4.24 y Figura 4.25).

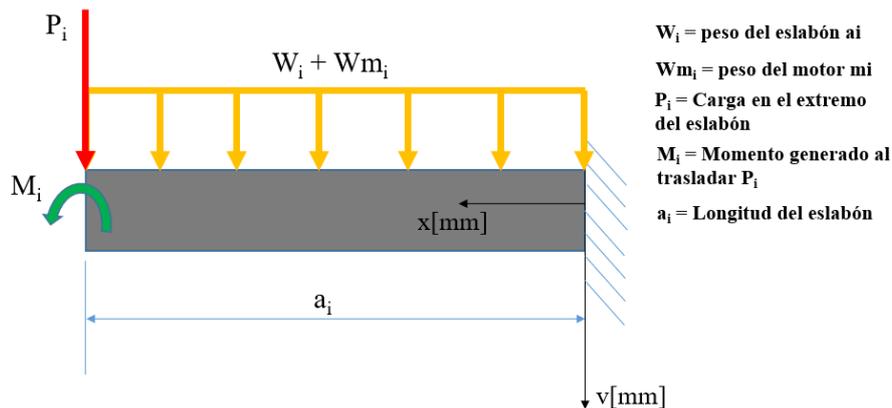


Figura 4.19. Diagrama de cuerpo libre de un eslabón genérico de las SRLs.

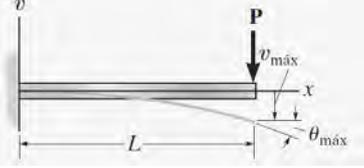
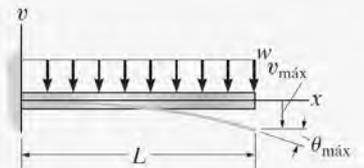
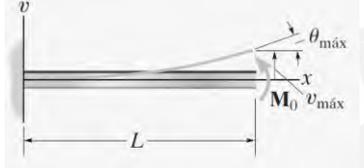
Considerando que el DCL mostrado es de un eslabón del brazo derecho, la fuerza P_i es igual a la suma de todas las cargas que están a la derecha del extremo libre del eslabón a_i . Por ejemplo, si se trata del eslabón a_1 , la fuerza P_1 será igual a la suma de los pesos de los eslabones a_2 , a_3 , a_4 y a_5 ; más, la suma de los motores m_2 , m_3 , m_4 y m_5 ; más, la carga de 2 kg. Por otro parte, el momento M_i será igual a la suma de momentos que se producen al trasladar todas esas cargas al extremo del eslabón a_i . En la Tabla 4.20 se muestran los valores calculados de las fuerzas P_i , los momentos flectores M_i y las fuerzas distribuidas W_i y W_{m_i} .

Tabla 4.20. Valores de fuerzas y momentos de los eslabones.

Característica	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
P_i (N)	45.202	36.256	27.585	23.328	19.620
M_i (N.mm ²)	16109.4	8748.3	4548.8	987.9	0
$W_i + W_{m_i}$ (N/mm)	0.058	0.045	0.058	0.028	0.074

Se puede observar en el DCL de la Figura 4.19, que la deflexión total de cada eslabón se puede desglosar en la suma de 3 casos particulares los cuales nos pueden dar la deflexión total del eslabón utilizando el método de superposición. Estos casos se muestran en la Tabla 4.21 (Hibbeler, 2011). Asimismo, para poder calcular las deflexiones se consideraron las propiedades mostradas en la Tabla 4.22.

Tabla 4.21. Casos de deflexión considerados para el cálculo de deflexión de los eslabones.

Caso	Deflexión
	$v_{m\acute{a}x} = \frac{-PL^3}{3EI}$
	$v_{m\acute{a}x} = \frac{-wL^4}{8EI}$
	$v_{m\acute{a}x} = \frac{M_0L^2}{2EI}$

(Fuente: Adaptado de Hibbeler, 2011)

Tabla 4.22. Valores de deflexión de cada eslabón.

Parámetro	Valor
Módulo de elasticidad del Nylon PA 6SA (E)	2760 MPa
Inercia para d = 25 mm	306 796.2 mm ⁴

(Fuente: Adaptado de Corporación Emacin, 2021)

Tabla 4.23. Valores de deflexión de cada eslabón.

Eslabón	Deflexión	Valor (mm)
Eslabón a ₁	v_{P1}	0.060
	v_{W1}	0.004
	v_{M1}	0.214
	v_{tot1}	0.278
Eslabón a ₂	v_{P2}	0.114
	v_{W2}	0.011
	v_{M2}	0.207
	v_{tot2}	0.331
Eslabón a ₃	v_{P3}	0.037
	v_{W3}	0.004
	v_{M3}	0.060
	v_{tot3}	0.101
Eslabón a ₄	v_{P4}	0.031
	v_{W4}	0.0021
	v_{M4}	0.0131
	v_{tot4}	0.0462
Eslabón a ₅	v_{P5}	0.0010
	v_{W5}	0.0001
	v_{M5}	0
	v_{tot5}	0.0011
Total	v_{tot}	0.758

Finalmente, los valores de deflexión calculados para cada eslabón se muestran en la Tabla 4.23. Considerando que las SRLs no requieren de una posición extremadamente precisa para el efector final, se considera que la deflexión total de 0.758 mm no afectará en el desempeño de las SRLs.

4.4.3. Soportes para los motores

Antes de escoger o diseñar los soportes para los motores, se realizó una rápida verificación de la fuerza radial máxima que soportan los ejes de estos. En la Tabla 4.24 se muestran los valores de fuerza radial que soportaría cada motor y la fuerza radial máxima que soporta cada motor según su hoja de datos.

Tabla 4.24. Fuerza radial máxima que soportan los motores.

Fuerza radial máxima	M1	M2	M3	M4	M5
Admisible (N)	370	370	40	40	40
Soportada (N)	46.03	37.36	28.41	24.15	19.89

(Fuente: Adaptado de Robotis, 2022)

Tabla 4.25. Soportes para los motores utilizados en el ensamble de los brazos.

Motor	Modelo	Cantidad
M1 y M2	FRP54-I110K (tipo 1) 	1
	FRP54-H121K (tipo 2) 	1
M3 y M4	FR08-B101 (tipo 1) 	1
	FR08-H101 (tipo 2) 	1
M5	FR05-B101 	1

(Fuente: Adaptado de Robotis, 2022)

Ahora que se comprobó que los motores soportan las cargas radiales, se identificó que la marca Robotis cuenta con accesorios especialmente diseñados para sus motores. Por ello, se utilizaron algunos de estos accesorios como soportes para los motores de los brazos. Aquellos accesorios se muestran en la Tabla 4.25. Se les ha colocado “tipo 1” y “tipo 2” a los soportes para poder diferenciarlos en las secciones posteriores del documento.

Sin embargo, hubo dos soportes que tuvieron que ser diseñado tomando como guía los accesorios mostrados en la Tabla 4.25. El primer soporte se utiliza para unir el eslabón a3 con el motor M4. El soporte será fabricado por impresión 3D utilizando nylon. Sus dimensiones generales son 40 x 52 x 18 mm y sus agujeros son de diámetro M2.5 para que puedan encajar con los agujeros de los motores y sus accesorios. El diseño de este soporte se muestra en la Figura 4.20a. Por otro lado, el segundo soporte se utiliza como base para unir el motor M4 y su soporte tipo 2. Este fue diseñado a semejanza con los soportes tipo 1. Sus dimensiones generales son 35 x 39 x 9 mm. Esta pieza también será fabricada mediante impresión 3D utilizando nylon. Cabe resaltar que el diseño de la pieza para el brazo derecho y el brazo izquierdo varía un poco en la altura de los laterales, sin embargo, la pieza es, en esencia, la misma. En la Figura 4.20b se muestra el diseño para de la pieza para el brazo derecho y en la Figura 4.20c se muestra para el brazo izquierdo.

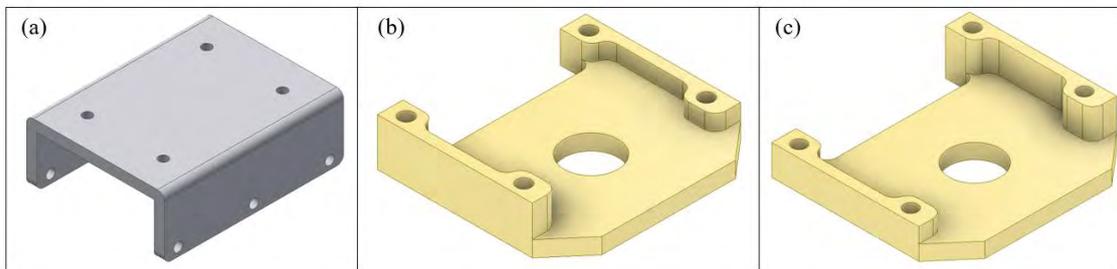


Figura 4.20. (a) Soporte para la unión del eslabón a3 con el motor M4. (b) Soporte base para el motor M4 del brazo derecho. (c) Soporte base para el motor M4 del brazo izquierdo.

4.4.4. Eslabones y uniones de los brazos

En el caso de los eslabones, el diámetro y la longitud ya estaban definidos desde antes para los cálculos previos (ver Tabla 4.9 y Tabla 4.18). En la Figura 4.21 se observan los diseños CAD de los eslabones. En la parte inferior de cada eslabón se ha colocado su designador correspondiente.

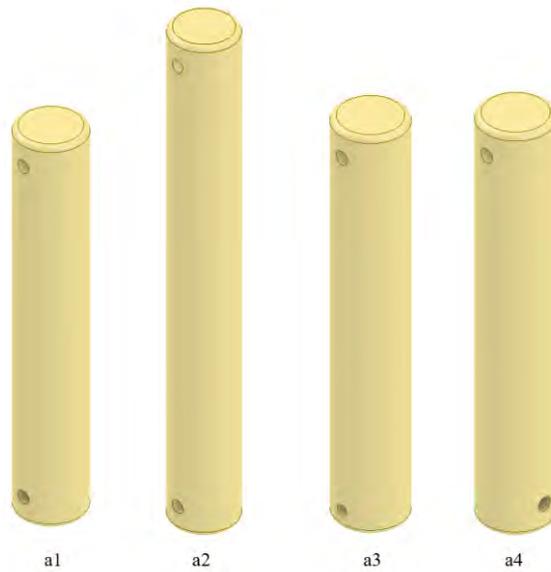


Figura 4.21. Modelos 3D de los eslabones de las SRLs.

En el caso de las uniones, estas fueron diseñadas con forma de bridas para que puedan ensamblarse con los soportes de los motores ya existentes y con los eslabones. Los modelos CAD de las uniones se muestran en la Figura 4.22. El número en la parte superior izquierda indica el designador de cada brida y en la parte inferior de cada brida se muestran las uniones en las que forman parte cada una.

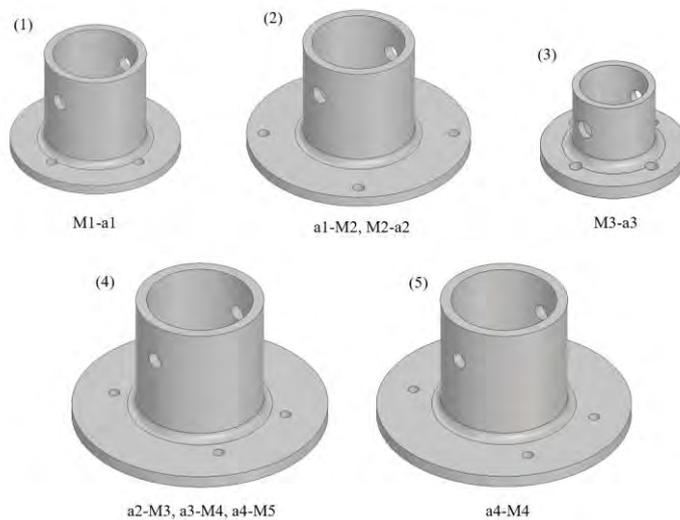


Figura 4.22. Soportes para las uniones entre motores y eslabones.

Para unir los eslabones con las uniones se utilizará un perno cabeza redonda y una tuerca. Asimismo, para unir las uniones a los soportes de los servomotores se utilizarán pernos con rosca métrica que varían desde M2.5 hasta M5 dependiendo de la unión. En la Figura 4.23 se muestra cómo se unirían los eslabones con los motores.

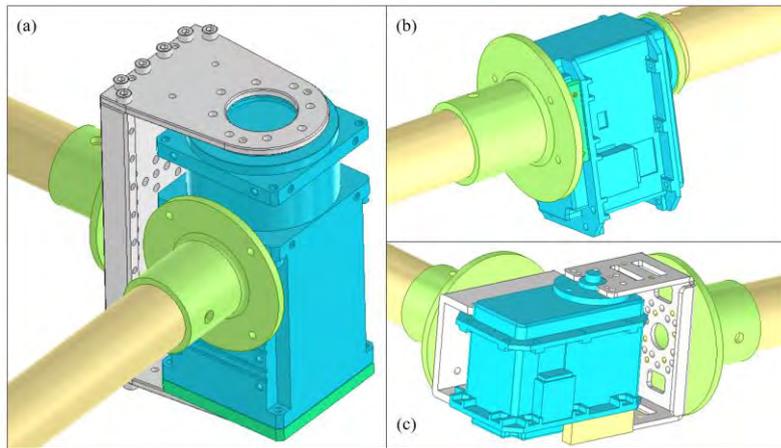


Figura 4.23. (a) Unión a1-M2-a2. (b) Unión a2-M3-a3. (c) Unión a3-M4-a4.

4.4.5. Ensamble de los brazos

Finalmente, se ensamblaron los eslabones, las uniones, los soportes y los motores para poder formar los brazos de las SRLs. En la Figura 4.24 se muestra el modelo 3D del ensamble del brazo derecho y en la Figura 4.25 se muestra el ensamble del brazo izquierdo.

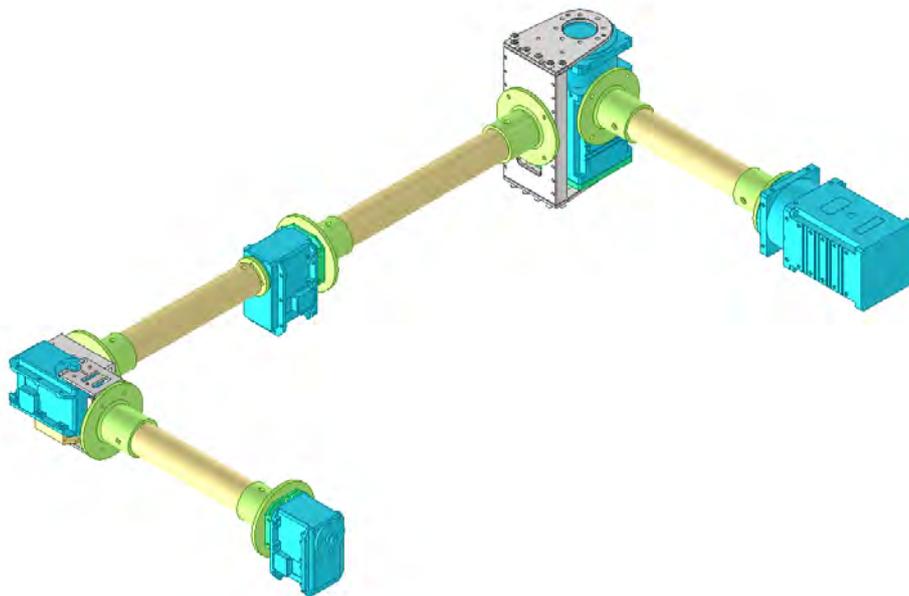


Figura 4.24. Ensamble del brazo derecho de las SRLs.

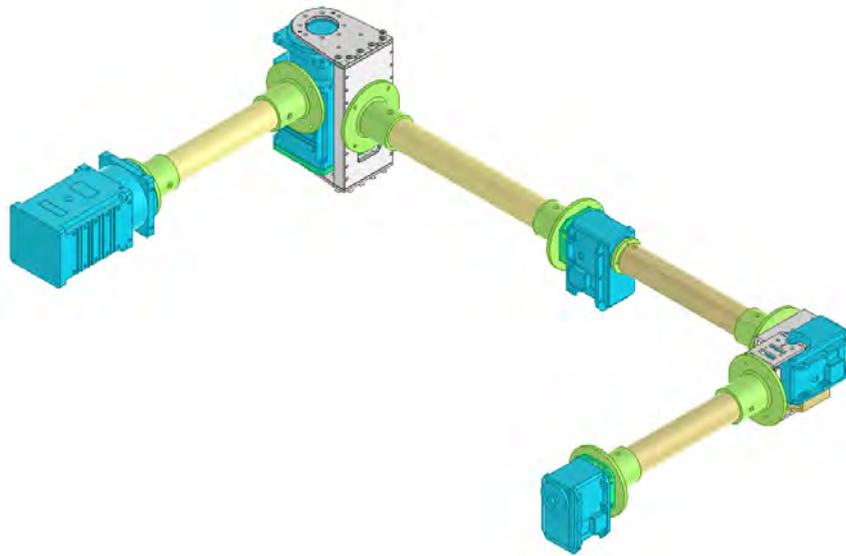


Figura 4.25. Ensamble del brazo izquierdo de las SRLs.

4.5. Selección del gripper

Como se vio en la sección 3.2. Descomposición funcional y síntesis de medios, un gripper robótico de 3 dedos sería el más adecuado como efector final para poder agarrar una cuchara, una toalla o un plato. El gripper debe poder soportar temperaturas relativamente altas debido al trabajo en la cocina. Además, hay que considerar también el peso y que tenga pads de silicona o algún material que evite que se resbalen los objetos al tomarlos. La mayoría de los grippers que se encontraron son para aplicaciones industriales y cuentan con funciones complejas, sin embargo, se encontró un prototipo de un gripper impreso en 3D en un documento académico. A continuación, en la Tabla 4.26 se hace una comparación entre los modelos que se han considerado para este proyecto.

De las cuatro opciones presentadas, se descarta la opción de *SoftGripping* de *UnchainedRobotics* debido a que utiliza un accionamiento neumático, lo cual necesita todo un equipo extra para la alimentación y va a aumentar el peso general de las SRLs. Entre las opciones de *RobotIQ*, *OnRobot* y *Telegenov et al.*, se escoge la última puesto que tiene un menor peso y soporta temperaturas altas. A pesar de no ser un modelo comercial, *Telegenov et al. (2015)* explica el funcionamiento y ensamble del gripper en su documento. Además, facilita los modelos 3D de las piezas para que puedan ser impresas y ensambladas. La punta de los dedos de este gripper cuenta con un material antideslizante. Al tener solo un motor (*Dynamixel MX-28*) para accionar el gripper, el control se vuelve más sencillo y para fines de este proyecto no se necesitan

funcionalidades tan complejas como las de los otros grippers. En la Tabla 4.26 se muestra el gripper escogido.

Tabla 4.26. Modelos de gripper considerados para las SRLs

Característica	Gripper robótico de 3 dedos			
	SG.GB.3F.C1	3-Finger Adaptive Robot Gripper	3FG15	Low Cost 3-Finger Gripper
Modelo	SG.GB.3F.C1	3-Finger Adaptive Robot Gripper	3FG15	Low Cost 3-Finger Gripper
Empresa/Personas desarrolladora(s)	UnchainedRobotics	RobotIQ	OnRobot	Telegenov et al.
Peso (kg)	0.242	2.3	1.15	0.5
Dimensiones (Ancho x Largo x ϕ)	92 x 103 x 47	130 x 218 x 80	156x158x180	170x190x100
Tipo de accionamiento	Neumático	Eléctrico	Eléctrico	Eléctrico
Carga máxima (kg)	0.3	10	8	
Máxima fuerza de agarre (N)	10.5	70	140	9
Voltaje de operación (V)	-	24 VDC	20 – 25 VDC	12 VDC
Corriente máxima de funcionamiento (A)	-	2	1.5	1.4
Presión de funcionamiento	-0.5 ... 1 bar	-	-	-
Temperatura de operación (°C)	No especifica	-10 ... +50	-5 ... +50	-10 ... +50 (plástico ABS)
Imagen				

(Fuente: Adaptado de UnchainedRobotics, 2022; RobotIQ, s.f.; OnRobot, s.f.; Telegenov et al., 2015)

4.6. Interfaz mecánica usuario-máquina

Esta sección está dedicada a la interfaz mecánica usuario-máquina, conocida también como el soporte de cintura. Se realizará un análisis ergonómico para identificar los aspectos que se deben tomar en cuenta con respecto al diseño. Luego se diseñará la estructura del soporte de cintura.

4.6.1. Análisis ergonómico

En la sección “2.2.2. Ergonomía en un restaurante”, se habló acerca de la ergonomía en un restaurante. De esa sección se identificaron algunos requisitos que deberían tener las SRLs para que puedan cumplir con la ergonomía del usuario. A continuación, se realiza un pequeño análisis sobre algunas consideraciones que debería cumplir la interfaz mecánica usuario-máquina para que pueda ser cómoda para el usuario.

En primer lugar, así como se habían estimado el peso de los brazos en los requisitos de diseño, también se debe estimar un peso adecuado para el soporte de cintura. La empresa japonesa Cyberdyne ha desarrollado un exoesqueleto que actúa como un soporte de cintura para evitar problemas en la lumbar y ayudar al usuario a realizar tareas repetitivas sin lesionarse (Cyberdyne, 2022). Este producto pesa aproximadamente 3.1 kg con batería por lo que se podría estimar que el soporte de cintura junto con la batería debería pesar máximo 4 kg.

En segundo lugar, considerando que los interruptores y botones se encuentran sobre el soporte de cintura en la parte delantera estos deben de estar posicionados de manera que sea fácil para el usuario alcanzarlos. Asimismo, se debe de capacitar al usuario previamente al uso de las SRLs pues el sistema tiene cierta complejidad y esas instrucciones de trabajo son indispensables para evitar incidentes y consecuencias graves. En cuanto al montaje y desmontaje deberá realizarse de manera segura, es decir, el usuario debe poder colocarse y retirarse las SRLs de manera que no cause daños sobre su persona u otros (Bestratén et al., 2008).

4.6.2. Diseño de la interfaz mecánica

Considerando los aspectos mencionados en la sección “4.6.1. Análisis ergonómico”, se realiza el diseño de la interfaz mecánica usuario-máquina. Se diseñó la estructura del soporte de cintura del mismo material que los brazos, es decir de Nylon mediante impresión 3D. Se estiman las dimensiones generales entre 450 a 550 mm de ancho, entre 150 a 200 mm de alto; y entre 200 mm y 300 mm de profundidad. Asimismo, se consideró instalar una almohada especialmente diseñada para la zona de la espalda baja en la parte interna del soporte de cintura. Esta almohada será adquirida de una empresa calificada. La almohada en cuestión es para sillas de escritorio y se muestra en la Figura 4.26.



Figura 4.26. Almohada escogida para el soporte de cintura.
Fuente: Amazon, 2022.

El modelo 3D del soporte de cintura se muestra en la Figura 4.27. Asimismo, las piezas que lo conforman se muestran en la Figura 4.28a, cuyos nombres se detallan en la Tabla 4.27. La Figura 4.28b, c y d muestran cómo se unen las piezas entre sí. Las piezas (4) y (5 o 6) se fijan usando pernos M10 mientras que el resto de las uniones usa pernos M5.

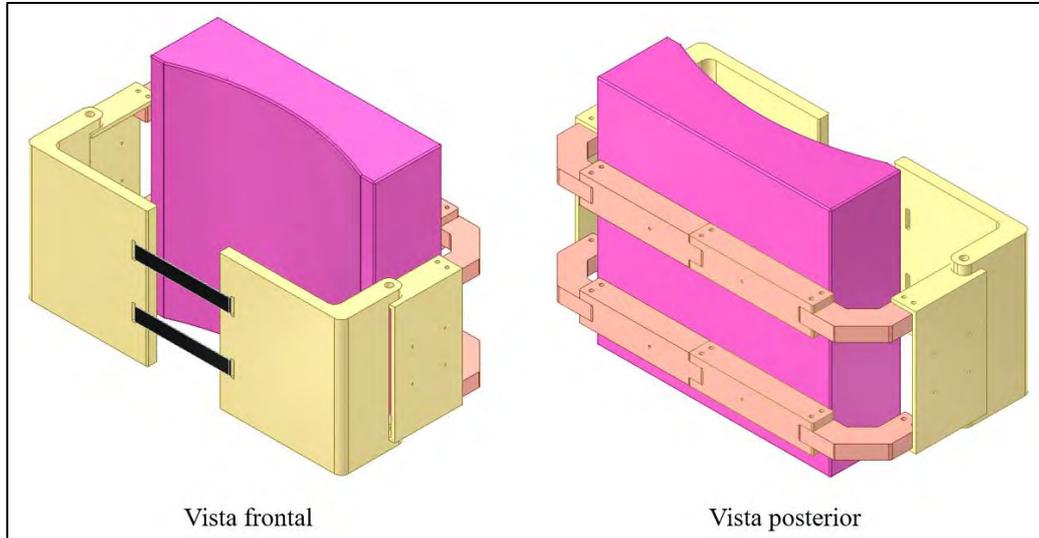


Figura 4.27. Ensamble del soporte de cintura de las SRLs.

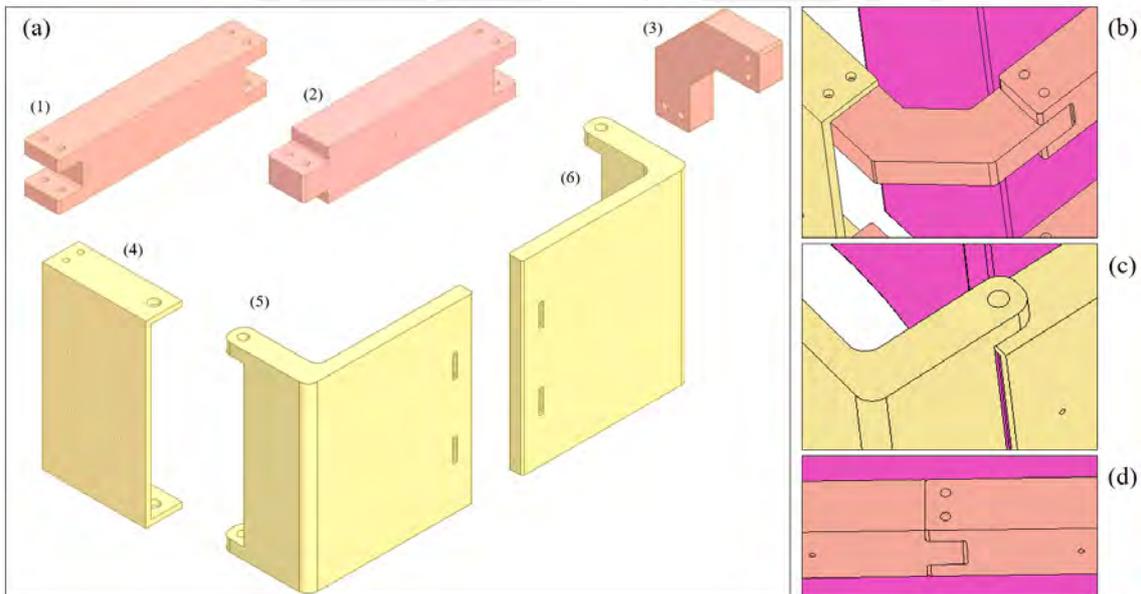


Figura 4.28. (a) Piezas que conforman el soporte de cintura. (b) Unión entre pieza (1 o 2), (3) y (4). (c) Unión entre pieza (4) y (5 o 6). (d) Unión entre pieza (1) y (2).

Tabla 4.27. Nombres de las piezas del soporte de cintura.

Número	Nombre de la pieza
1	Pieza espalda tipo 1
2	Pieza espalda tipo 2
3	Unión entre pieza espalda y soporte cintura-M1
4	Soporte cintura-M1
5	Parte delantera derecha
6	Parte delantera izquierda

CAPÍTULO 5:

DISEÑO DEL SISTEMA ELÉCTRICO-ELECTRÓNICO

En el presente capítulo se muestra todo lo relacionado al diseño eléctrico y electrónico de las SRLs. Se empieza con la selección de los componentes electrónicos adecuados para el sistema. Luego se realiza un cálculo energético para poder seleccionar una batería que pueda proveer de energía a todo el sistema. Finalmente se diseñan los soportes necesarios para los componentes escogidos y se realiza un diagrama esquemático que muestra las interconexiones entre cada componente.

5.1. Selección de componentes electrónicos

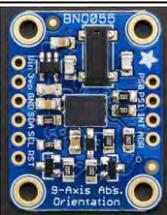
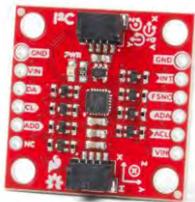
En esta sección se escogen los componentes electrónicos que forman parte del sistema eléctrico-electrónico de las SRLs. Entre ellos se encuentran los sensores inerciales o IMU, los sensores de fuerza resistivos, el microcontrolador, el módulo bluetooth, los drivers para los servomotores, el *battery management system* y los interruptores, botones y LEDs de señalización.

5.1.1. Unidad de Medición Inercial (IMU)

Como se explicó anteriormente en la sección “3.2. Descomposición funcional y síntesis de medios”, una unidad de medición inercial (*Inertial Measurement Unit*) es un sensor ampliamente usado en reconocimiento de actividades humanas y navegación. En este caso, las SRLs necesitan dos IMU's, uno para detectar los movimientos del pie del usuario; y otro para monitorear los movimientos del torso del usuario y detectar perturbaciones. Para ambos casos, el IMU no tiene que ser tan preciso pues solo se usa para detectar cambios de orientación o aceleración tanto del pie como del torso del usuario. Se debe considerar que el sensor debe poder soportar temperaturas altas relativas al ambiente de la cocina. A continuación, en la Tabla 5.1 se presentan las alternativas a considerar.

Se escoge el IMU ICM-20948 debido a que consume menos corriente y tiene un menor precio aproximado. Las dimensiones son muy similares y la temperatura de operación es la misma. Además, como se mencionó anteriormente, no se requiere de tanta precisión para la aplicación de este proyecto.

Tabla 5.1. Modelos de IMU's considerados para las SRLs

Características	IMU	
	BNO055	ICM-20948
Modelo	BNO055	ICM-20948
Empresa desarrolladora	Adafruit	Sparkfun
Voltaje de alimentación	3.3 – 5V	1.95 – 3.6 V
Corriente máxima de funcionamiento	12.3 mA	3.11 mA
Dimensiones (A x L x P)	20.3 x 26.7 x 4 mm	19 x 19 x 4 mm (aprox.)
Tipo de comunicación	I ² C	I ² C, SPI
Temperatura de operación	-40 ... +85 °C	-40 ... +85 °C
Precio referencial	\$ 34.95	\$ 18.50
Imagen		

(Fuente: Adaptado de Townsend, 2015; Sparkfun, s.f)

5.1.2. Sensores de fuerza resistivos

Los sensores de fuerza resistivos (FSR) son usados para medir la fuerza de agarre que el gripper está aplicando para sostener un objeto. Por ello, estos sensores se colocan en los dedos de ambos gripper. La empresa Interlink Electronics es la que diseñó este tipo de sensores y tiene una familia con diferentes tamaños y formas. Para el caso del proyecto se utiliza el modelo FSR400 debido a que su tamaño se adapta mejor a las dimensiones del gripper escogido. En la Tabla 5.2 se muestran las características del componente y una imagen del modelo.

Tabla 5.2. Características del sensor FSR400

Característica	Sensor de fuerza resistivo	Imagen
Modelo	FSR400	
Tamaño	7.62 mm diámetro	
Espesor	0.2 – 1.25 mm	
Rango sensible de fuerza	0.1 – 100 N	
Resistencia inicial	> 10 M ohms	
Temperatura de operación	-30 ... + 70 °C	
Precio aproximado	\$ 7.50	

(Fuente: Adaptado de SparkFun, s.f)

5.1.3. Módulo Bluetooth

Se sabe que existen dos tipos de módulos *bluetooth* lo cuales son el HC-05 y el HC-06. La diferencia radica en que el HC-06 solo puede configurarse como esclavo (*slave*), mientras que el HC-05 puede configurarse tanto como maestro o esclavo (*master, slave*)

(Naylamp Mechatronics, 2017). Para este proyecto se utiliza el módulo bluetooth para poder establecer una comunicación entre el microcontrolador y el smartphone, pues se usa una aplicación para las configuraciones en el “modo grabación”. Por ello, se escoge el modelo HC-05 para tener la posibilidad de configurarlo tanto como maestro como esclavo. En la Tabla 5.3 se muestran sus características y una imagen.

Tabla 5.3. Características del módulo bluetooth HC-05

Característica	Módulo <i>Bluetooth</i>	Imagen
Modelo	HC-05	
Voltaje de operación	3.6 – 6 VDC	
Corriente máxima consumida	50 mA	
Alcance	10 m	
Tipo de comunicación	Serial TTL	
Temperatura de operación	-20 ... + 75 °C	
Velocidad de transmisión	1200 bps – 1.3 Mbps	
Dimensiones	37 x 16 mm	
Peso	3.6 g	

(Fuente: Adaptado de Naylamp Mechatronics, 2021)

5.1.4. Conexiones para los servomotores

Dado que se están utilizando en total 12 motores para las SRLs, 10 para ambos brazos y 2 que vienen instalados con los gripper, se debe encontrar una forma para poder alimentarlos y controlarlos. Considerando que todos los motores son de la marca Robotis Dynamixel, se vio conveniente utilizar los accesorios que provee la misma empresa para facilitar la comunicación entre motores. Existen dos dispositivos que se utilizan en conjunto para poder alimentar y controlar los motores Dynamixel, los cuales son el U2D2 y el U2D2 Power Hub, mostrados en la Figura 5.1. El primero, es un dispositivo USB que permite la comunicación entre los motores y una PC o un microcontrolador. El segundo permite la distribución adecuada de energía a los motores. La comunicación que se da entre el U2D2 y los motores es del tipo RS-485.

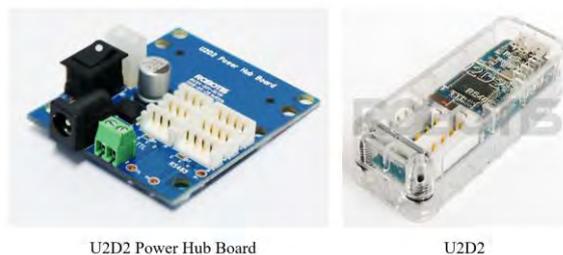


Figura 5.1. Dispositivos para conexión de servomotores.

(Fuente: Robotis, 2022)

5.1.5. Battery Management System (BMS)

Un *Battery Management System* se encarga de asegurar un uso óptimo de la batería. Los BMS protegen a las baterías de sobrecargas o descargas completas. Asimismo, monitorean la temperatura y evalúa el estado actual de la batería (Infineon, s.f.). A continuación, en la Tabla 5.4 se comparan algunos modelos de BMS que se toman en cuenta para el proyecto.

Tabla 5.4. Modelos de BMS considerados para las SRLs.

Características	Battery Management System		
Modelo	BMS Mini 3	BMS1102S	BMS1040A
Empresa desarrolladora	EMUS BMS	STAFL Systems	RoboteQ
Voltaje de entrada	5 – 72.8 VDC	7 – 32 VDC	Máximo 40 VDC
Número de celdas	6 – 16 celdas	12 celdas	6 – 10 celdas
Corriente máxima	1.25 A	22 mA	50 A
Temperatura de operación	-40 ... +85 °C	-40 ... +80 °C	-20 ... + 55 °C
Tipo de comunicación	USB, RS232, CAN, RS485	CAN 2.0B	RS485, USB, CANbus
Peso	154 g	24.3 g	250 g
Dimensiones	118.4 x 78.7 x 20.9 mm	95 x 61 x 8.5 mm	145 x 115 x 23 mm
Imagen			

Fuente: EMUS BMS, 2022; STAFL System, 2022; RoboteQ, 2020.

Se escoge el BMS Mini 3 debido a que puede soportar mayor número de celdas, tiene un mayor soporte de temperaturas y su peso es relativamente bajo. Además, cuenta con varias opciones de comunicación.

5.1.6. Interruptores, botones y LEDs de señalización

Las SRLs utilizan interruptores, botones y LEDs de señalización como interfaces de entrada y salida, respectivamente. En total se requerirá un interruptor SPST el encendido y apagado del sistema, un interruptor SPDT para el cambio de modo, dos botones latch (para activar/desactivar el IMU Pie y para activar/desactivar modo grabación), y 4 LEDs de señalización (rojo, amarillo, verde y azul). Debido a que estos son componentes comunes en tiendas de electrónica, no se coloca un modelo específico. En el caso de interruptores y botones solo se debería considerar que puedan trabajar a un voltaje de 5 VDC y soporten una corriente de 5A aproximadamente. En la Figura 5.2 se muestran estos componentes.



Interruptor ON-OFF

Botón Latch

Interruptor MODO

LEDs

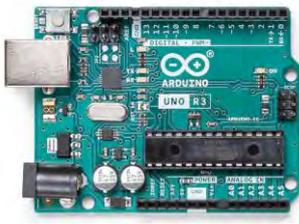
Figura 5.2. Interruptores, botones y LEDs de las SRLs.

(Fuente: ElectroComponentes, 2021; Nomada, 2022; RobotShop, s.f.; HWAXTU, 2022)

5.1.7. Microcontrolador

El microcontrolador es el sistema de información de las SRLs. Este dispositivo se encarga de recibir la información de las IMUs, los FSR y demás sensores; y mandar señales a los U2D2 de los servomotores. El microcontrolador debe contar con los puertos de entrada y pines necesarios para poder conectar todos demás componentes previamente seleccionados. Por ello, en la Tabla 5.5 se realiza una comparación entre algunos modelos de microcontroladores.

Tabla 5.5. Modelos de microcontroladores considerados para las SRLs.

Característica	Microcontrolador	
Modelo	Raspberry Pi 4 B	Arduino UNO
Voltaje de entrada	-0.5 ... +6 V, (typ. 5V)	+2.7 ... +5.5 V
Procesador	Quad core 64-bit ARM-Cortex A72	ATMega328P
Frecuencia del procesador	1.5 GHz	16 MHz
Pines I/O	28 GPIO (UART, I2C, PWM, etc.)	14 GPIO (digital) 6 GPIO (analog.)
Memoria RAM	4 GB	512 B
Corriente máxima	3A	0.5 A
Temperatura de operación	0 ... + 50 °C	-40 ... 85 °C
Dimensiones	85 x 56 mm	66.04 x 50.8 mm
Imagen		

(Fuente: Raspberry Pi, 2019; Arduino, 2022)

Se escoge el microcontrolador Raspberri Pi 4 B debido a que tiene más entradas GPIO y tiene un procesador más rápido. Además, al ubicarse en la zona posterior del soporte de cintura, su temperatura de operación es adecuada para el ambiente donde trabajan las SRLs.

5.1.8. Reguladores o divisores de voltaje

Dado que la batería de todo el sistema es de 24V y algunos componentes operan con voltajes de 12V, como algunos motores, o 5V, como el microcontrolador, se requiere de alguna forma de reducir el voltaje. Por ello, se utiliza un divisor de voltaje con resistencias de 10kΩ y voltaje total 24V para obtener un voltaje de 12V que alimente algunos motores. Asimismo, se utilizan resistencias de 10kΩ y 15kΩ para armar otro divisor de voltaje con voltaje total igual a 12V y voltaje de salida de 5.5V, para energizar al microcontrolador y otros componentes. Se consideró utilizar valores estándares de resistencias. Los diagramas de los divisores de voltaje se muestran en la Figura 5.3 y la Ecuación 5.1 muestra la relación entre el voltaje total (V_T) y el voltaje de salida (V_{sal}).



Figura 5.3. Diagramas de los divisores de voltaje.

5.2. Cálculo energético

Ahora que se han definido los componentes electrónicos que se utilizan para el diseño eléctrico-electrónico de las SRLs, se realiza el cálculo energético de todo el sistema. Para ello, se calcula la corriente consumida por hora de cada componente utilizando la Ecuación 5.2.

Tabla 5.6. Cálculo energético de los componentes de las SRLs.

Componente	Cantidad	Voltaje (V)	Corriente (A)	% de uso x hora	Corriente usada x hora [unit.] (Ah)	Corriente total usada x hora (Ah)
Motor 1 y 2	4	24	5.5	0.4	2.2	8.8
Motor 3 y 4	4	12	5.2	0.4	2.08	8.32
Motor 5	2	12	4.1	0.4	1.64	3.28
Motor gripper	2	12	1.4	0.4	0.56	1.12
IMU	2	3.6	0.00311	1	0.00311	0.00622
Módulo Bluetooth	1	5	0.05	1	0.05	0.05
Microcontrolador	1	5	3	1	3	3
Total						24.58

$$\text{Corriente consumida } x \text{ hora (Ah)} = \text{Corriente (A)} \times \% \text{ de uso (h)} \dots (5.2)$$

Asimismo, se está tomando en cuenta que los motores no van a estar activos todo el tiempo sino estarán funcionando aproximadamente 24 minutos en 1 hora (40 %). Por otro lado, los sensores y el microcontrolador siempre estarán funcionando. Ahora, en la Tabla 5.6 se muestra el cálculo energético de cada componente del sistema.

5.3. Selección de batería

El tipo de batería que se escogió para las SRLs en la sección “3.2. Descomposición funcional y síntesis de medios” es una batería de ion de litio o Li-ion. Para la selección de la batería se debe considerar el peso y que tenga la capacidad de alimentar a todos los componentes, es decir que tenga una capacidad mayor o igual a 24.58Ah. Además, la batería debe ser de 24 VDC. A continuación, en la Tabla 5.7 se realiza una comparación entre algunos modelos de baterías considerados para el proyecto. Se escoge el modelo *Power Brick +* debido a que cuenta con una capacidad relativamente alto y es el modelo que cuenta con menor peso.

Tabla 5.7. Modelos de baterías consideradas para las SRLs

Características	Baterías		
Modelo	CX2425	Power Brick +	Dakota Lithium
Empresa desarrolladora	Chargex	PowerTech	Dakota Lithium
Voltaje nominal	25.6 V	25.6 V	26.6 V
Capacidad	25Ah	32Ah	52.5Ah
Peso	7.94 kg	7.8 kg	14.5 kg
Dimensiones	197 x 166 x 172 mm	197 x 166 x 169 mm	330 x 172 x 220 mm
Imagen			

(Fuente: Adaptado de Chargex, 2022; PowerTech, 2022; Dakota Lithium, s.f)

5.4. Soportes para los componentes electrónicos

En esta sección se muestran los soportes que resguardan los componentes electrónicos del sistema. Básicamente, estos serían tres: el del IMU Pie, el soporte para el resto de los componentes electrónicos que se ubica en la parte posterior del soporte de cintura, y el soporte de la batería. En primer lugar, para el soporte del IMU se consideró una caja especial para proyectos de electrónica hecha de plástico ABS y con protección IP65. Sus

dimensiones son 89 x 59 x 35 mm. En la Figura 5.4a se puede apreciar la caja cerrada con sus dimensiones y en la Figura 5.4b se aprecia la caja con el IMU Pie en su interior.

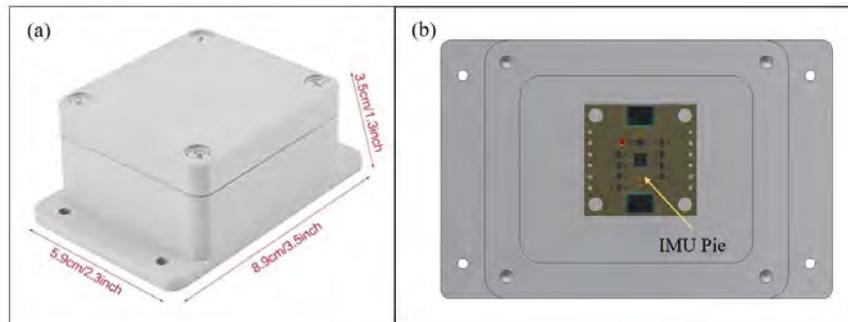


Figura 5.4. (a) Caja para el IMU Pie. (b) Modelo 3D del interior de la caja con el IMU Pie.
(Fuente: Amazon, s.f.; Elaboración propia)

En segundo lugar, para el soporte ubicado en la parte posterior del soporte de cintura se utilizó otra caja especial para proyectos de electrónica. Al igual que en el caso del IMU Pie, la caja está hecha de plástico ABS y tiene protección IP65. Sin embargo, sus dimensiones son de 200 x 120 x 75 mm (Figura 5.5a). En esta caja están ubicados el microcontrolador, el módulo *bluetooth*, el IMU Torso, el módulo U2D2 y el U2D2 *Power Hub*. Asimismo, habrá un *protoboard* para poder armar los reguladores de voltaje y poder colocar el módulo *bluetooth*. En la Figura 5.5b se puede apreciar la caja con los componentes mencionados. Se utilizan pernos para fijar los componentes a la pared de la caja.

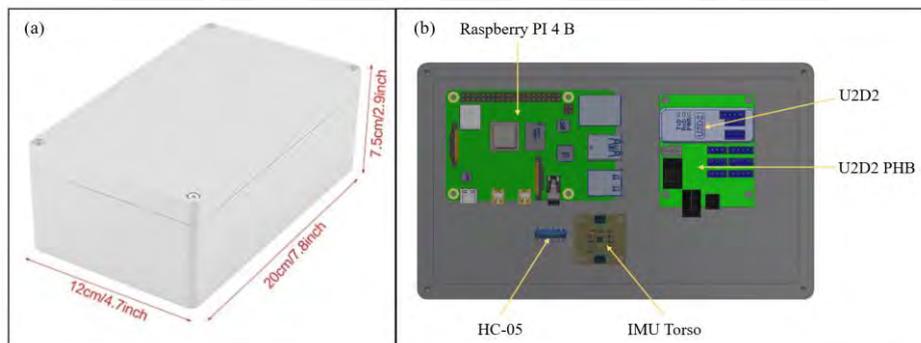


Figura 5.5. (a) Caja para los componentes. (b) Modelo 3D del interior de la caja con componentes.
(Fuente: (a) Amazon, s.f.; Elaboración propia)

Por último, para el caso de la batería, al tener un peso moderado (7.8 kg), no se ha considerado como una opción viable colocarla sobre el soporte de cintura puesto que generaría una carga muy alta para el usuario. Por ello, se ha optado por colocar la batería en el suelo sobre un carrito para permitir que el usuario se desplace con la batería.

5.5. Diagramas de conexiones de los componentes electrónicos

Como ya se seleccionaron todos los componentes electrónicos, en esta sección se muestra el diagrama de conexiones. En el ANEXO E se puede observar el diagrama completo, el cual se ha dividido por partes para un mayor entendimiento de las conexiones de cada componente. A continuación, se explica cada parte.

En la Figura 5.6 se observan las conexiones del IMU, módulo *bluetooth*, la forma general de un pin RS485 y la tierra. Los sensores IMU se conectan a pines SDA y SCL del microcontrolador debido a que utilizan una comunicación I2C. El módulo *bluetooth*, por su parte, se conecta a los pines TXD0 y RXD0 del microcontrolador, ya que utiliza una comunicación tipo UART. La sección de tierra es solo para indicar que la etiqueta GND es equivalente al símbolo de tierra. La última sección muestra la conexión RS485 que usan los motores, la cual cuenta con cuatro pines: VDD, GND, D+ y D-.

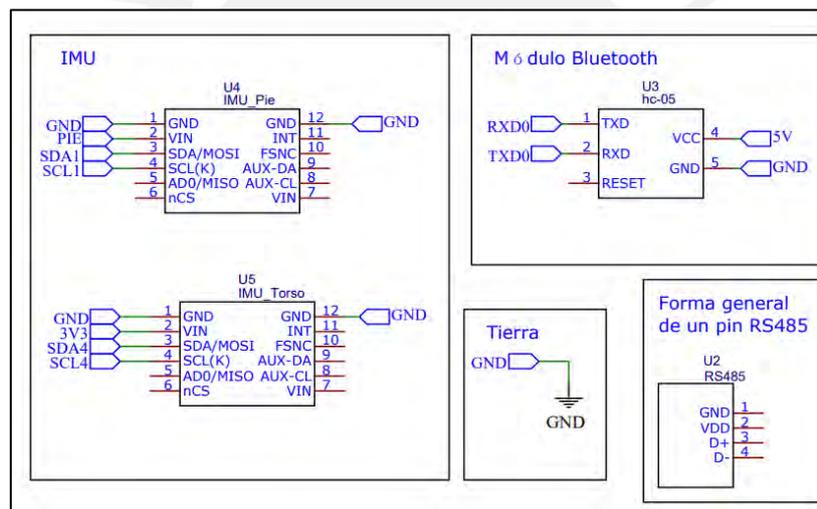


Figura 5.6. Sección 1 del diagrama de conexiones.

En la Figura 5.7 se muestran las conexiones de los sensores de fuerza resistivos (FSR) y las conexiones de los interruptores, botones y LEDs. Por un lado, en la sección de los FSR se muestra una conexión típica, la cual se asemeja a un divisor de voltaje. Estos sensores funcionan como resistencias variables que van cambiando su valor de resistencia según la cantidad de fuerza que se les aplique. Por ello se puede relacionar el voltaje de salida del divisor de voltaje con la fuerza aplicada sobre el sensor. Por otro lado, en la sección de interruptores y botones se muestra la lógica de qué led se encendería para indicar el estado. Se enciende un led rojo si se presiona el botón de activar “modo grabación”. Se enciende el led amarillo si el sistema está en modo “mover la cuchara” y se enciende el led azul si el sistema está en modo “secar los platos”.

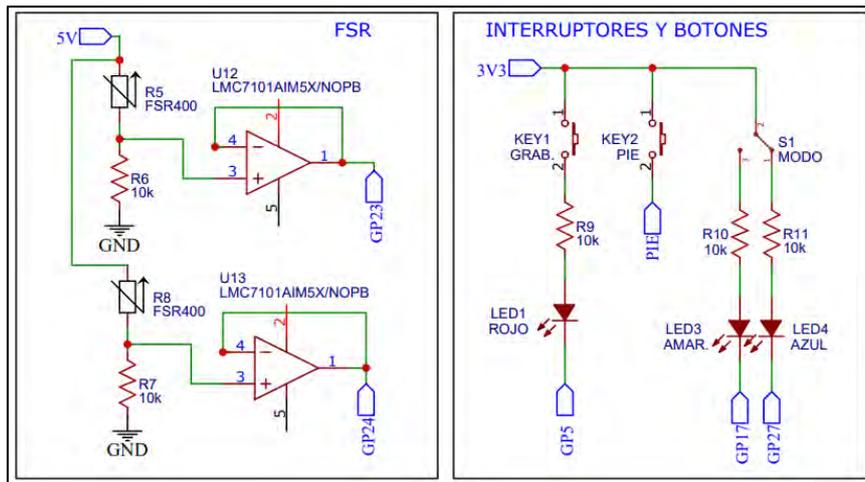


Figura 5.7. Sección 2 del diagrama de conexiones.

En la Figura 5.8 se muestra la conexión de los servomotores. Se mencionó anteriormente que los servomotores utilizan un tipo de comunicación RS485. Este protocolo de comunicación es muy utilizado en aplicaciones de adquisición y control de datos. Permite incluir varios dispositivos RS485 en el mismo bus. Su principal función es transmitir una señal a través de dos cables, uno transmite la señal original y el otro la copia inversa (Weis, 2021).

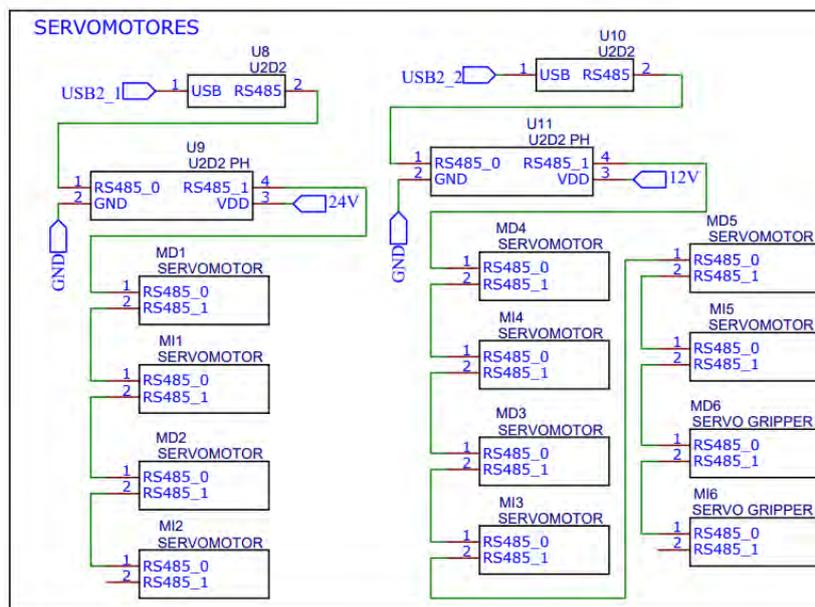


Figura 5.8. Sección 3 del diagrama de conexiones.

Para poder comunicar a los servomotores con el microcontrolador se utilizan los dispositivos U2D2 y U2D2 Power Hub. El U2D2 tiene una entrada tipo USB que se puede conectar al microcontrolador. Los servomotores se conectan en bus como en la Figura 5.9 y así se forma lo que la empresa desarrolladora Dynamixel conoce como “Daisy Chain Link”. Esta es una forma particular de conectar los servomotores Dynamixel para que la

señal pase a través de todos ellos. Cada servomotor cuenta con un identificador y de esta manera pueden saber cuándo es su turno de actuar. Como hay servomotores Dyanamixel de la serie P y de la serie MX, se separaron los motores por tipo.

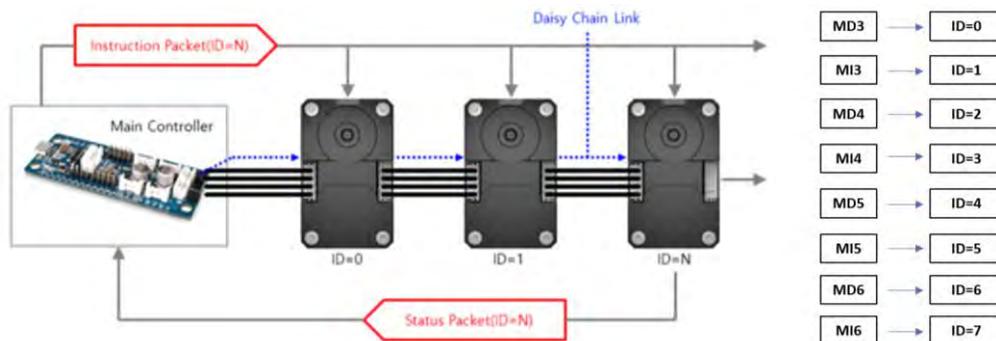


Figura 5.9. Conexión Daisy Chain Link de los servomotores para la serie MX.
(Fuente: Dynamixel, s.f.)

Finalmente, en la Figura 5.10 se muestran la alimentación del sistema y las conexiones del microcontrolador. Se observan los divisores de voltaje que se usaron para obtener 12V y 5V de la batería de 24 V. Asimismo, todos los pines que se utilizan para interconectar los componentes electrónicos del sistema.

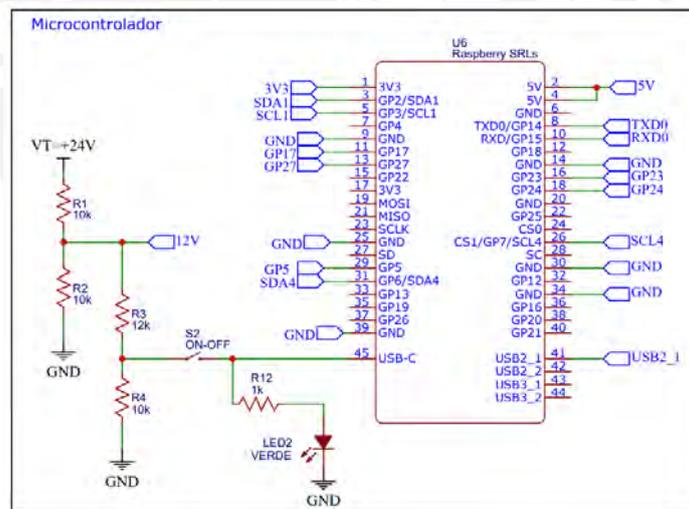


Figura 5.10. Sección 4 del diagrama de conexiones.

CAPÍTULO 6: MODELADO 3D Y SIMULACIONES

En el presente capítulo se muestra el ensamblaje completo del sistema de las SRLs y algunas características de este. Asimismo, se realiza una simulación de esfuerzos, deformaciones y factor de seguridad a un brazo para confirmar que las partes resistirán las cargas y comparar los resultados con los cálculos de las secciones “4.4.1. Cálculo de resistencia de los brazos” y “4.4.2. Cálculo de deflexión de los brazos”. De igual manera, se realizarán las mismas simulaciones al soporte de cintura.

6.1. Modelado 3D de las SRLs y características

En esta sección se presenta el modelo 3D del ensamblaje completo de las SRLs y como se vería un usuario utilizando el sistema. Además, se presentan algunas características del ensamblaje en general como su masa y sus dimensiones.

6.1.1. Ensamblaje de las SRLs

El ensamblaje final de las SRLs está compuesto por el soporte de cintura, los dos brazos robóticos y una caja para los componentes electrónicos ubicada en la parte posterior del soporte de cintura. En la Figura 6.1 se muestra la vista frontal y en la Figura 6.2 se muestra la vista posterior del ensamblaje.

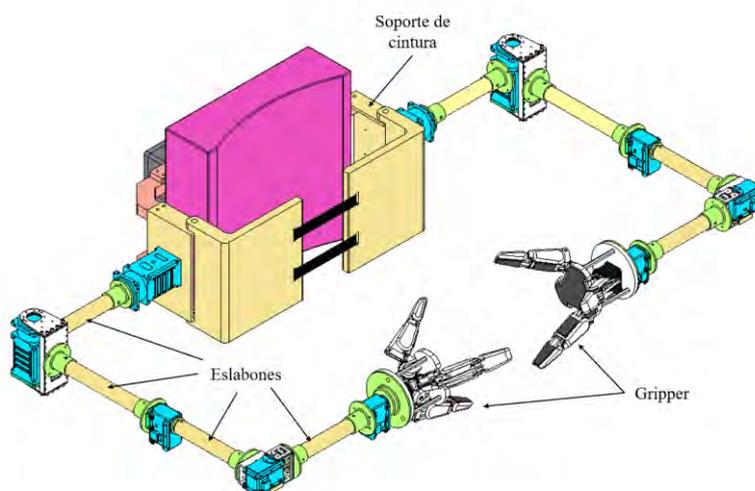


Figura 6.1. Vista frontal del ensamblaje de las SRLs.

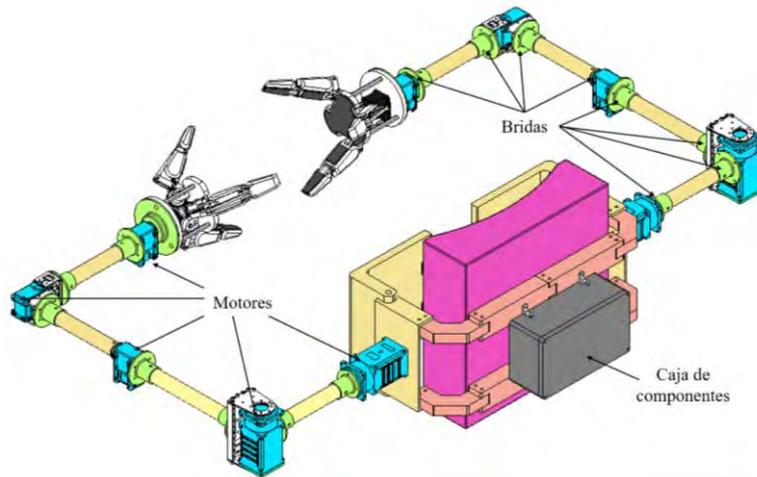


Figura 6.2. Vista posterior del ensamblaje de las SRLs.

Con la finalidad de unir el motor M5 y el gripper se utiliza el soporte mostrado en la Figura 6.3a. Este soporte está hecho de nylon mediante impresión 3D y tiene agujeros M2.5 para las uniones con el motor y agujeros de 8 mm de diámetro para las uniones con el gripper. Para el ensamblaje final de los brazos se consideró como una mejor opción no colocar el eslabón a5 y unir el soporte y el gripper directamente al motor como en la Figura 6.3b.

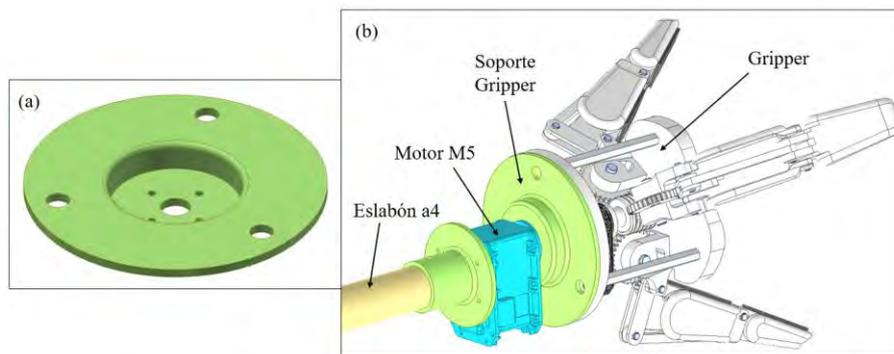


Figura 6.3. (a) Soporte M5-Gripper. (b) Unión entre motor M5 y gripper.

Como se mencionó anteriormente, en la parte posterior del soporte de cintura está ubicada la caja de componentes. Esta caja se une al soporte de cintura mediante uniones de ángulo pesado hechos de acero zincado (ver Figura 6.4a). Finalmente, la caja de componentes en el ensamblaje de SRLs queda como se muestra en la Figura 6.4b.

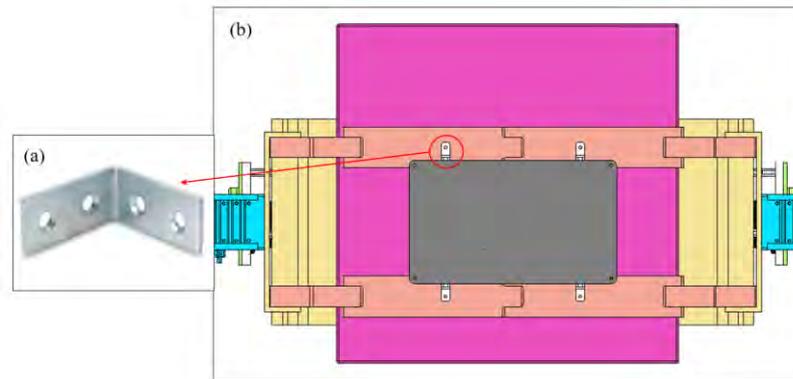


Figura 6.4. (a) Unión de ángulo pesado. (b) Caja de componentes en el ensamble de SRLs.
(Fuente: Shopstar, s.f.; Elaboración propia)

Por último, en la Figura 6.5 se tiene un modelo 3D de un *dummy* utilizando las SRLs, el cual representa como se vería un usuario utilizando el sistema de SRLs. Se puede observar que en el pie derecho cuenta con la caja que contiene al IMU Pie para poder enviar comandos al sistema. Asimismo, la batería está ubicada en el suelo a un lado del usuario sobre un carrito (que no está mostrado en el modelo 3D) para permitir que el usuario pueda desplazarse.

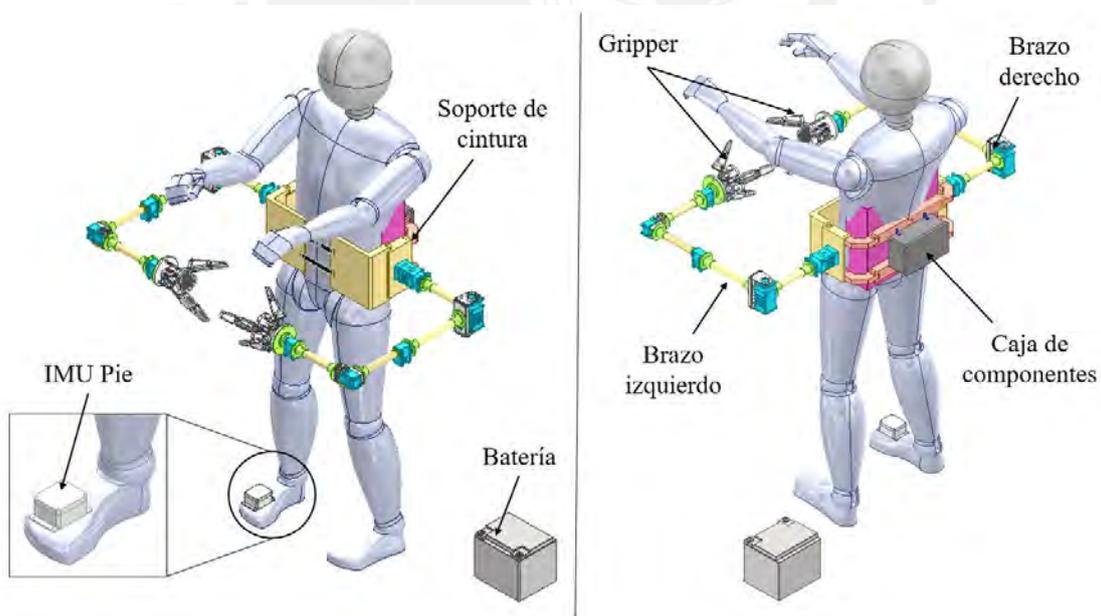


Figura 6.5. Dummy usando el sistema de SRLs.

6.1.2. Características de las SRLs.

Ahora que ya se cuenta con el diseño 3D de las SRLs y su ensamble, se puede calcular de manera más precisa cuáles son sus dimensiones generales y el peso real de sus componentes. En cuanto a las dimensiones generales del sistema de SRLs en su posición

inicial (ver Figura 6.1), se ha calculado que miden aproximadamente 740 x 1166 x 330 mm (ancho x largo x alto). Asimismo, un brazo extendido sin considerar al gripper tiene una extensión de aproximadamente 1115 mm.

Para calcular el peso estimado en kgf de todo el sistema se tiene la Tabla 6.1 la cual detalla los pesos de los componentes pertenecientes a un brazo de las SRLs y la Tabla 6.2 que detalla los pesos de los componentes que pertenecen al soporte de cintura. Cabe resaltar que no se está considerando aquellos componentes que tienen un peso despreciable como los botones o interruptores.

Tabla 6.1. Pesos de los componentes de un brazo

Componente	Cantidad	Peso unit (kg)	Peso total (kg)
Motor 1 y 2	2	0.740	1.48
Motor 3 y 4	2	0.153	0.306
Motor 5	1	0.126	0.126
Gripper	1	0.500	0.5
Eslabón a1	1	0.082	0.082
Eslabón a2	1	0.11	0.11
Eslabón a3	1	0.078	0.078
Eslabón a4	1	0.082	0.082
Soporte M1M2 tipo 1	1	0.453	0.453
Soporte M1M2 tipo 2	1	0.181	0.1812
Soporte M3M4 tipo 1	1	0.091	0.0906
Soporte M3M4 tipo 2	1	0.091	0.0906
Soporte M5	1	0.091	0.0906
Brida tipo 1	1	0.012	0.012
Brida tipo 2	2	0.015	0.03
Brida tipo 3	3	0.003	0.003
Brida tipo 4	1	0.015	0.045
Brida tipo 5	1	0.015	0.015
Soporte a3 – M4	1	0.012	0.012
Soporte base M4	1	0.004	0.004
Soporte Gripper	1	0.031	0.031
Total			3.822

Luego de calcular las dimensiones y pesos del diseño 3D final de las SRLs, se observa que la longitud de los brazos, la cual es de 1115 mm aproximadamente, cumple con el rango establecido en los requisitos de diseño el cuál era de 1000 a 1200 mm. Asimismo, el peso máximo de cada brazo estaba en los requisitos de diseño como 4 kg y se puede observar que el peso calculado de un brazo se encuentra dentro del rango con un valor de 3.791 kg. En cuanto al soporte de cintura se había establecido que debería pesar como máximo 4.5 kg. Se puede apreciar que el peso calculado del soporte de cintura es de 4.054 kg, por lo que aún se encuentra dentro del rango.

Tabla 6.2. Pesos de los componentes del soporte de cintura

Componente	Cantidad	Peso unit (kg)	Peso total (kg)
Pieza espalda tipo 1	2	0.208	0.416
Pieza espalda tipo 2	2	0.208	0.416
Unión entre pieza espalda y soporte cintura-M1	4	0.087	0.348
Soporte cintura-M1	2	0.131	0.262
Parte delantera derecha	1	0.931	0.931
Parte delantera izquierda	1	0.931	0.931
Almohada	1	0.680	0.680
Caja de componentes	1	0.070	0.070
Total			4.054

6.2. Simulación de esfuerzos y deformaciones

Las simulaciones de esfuerzos y deformaciones se realizaron utilizando el *software* Inventor 2022. Se realizaron dos simulaciones: una simulación para el brazo derecho de las SRLs y una simulación para el soporte de cintura. Se configuró como material al Nylon 6 para los eslabones, las bridas y las piezas del soporte de cintura. En ambas simulaciones se generó una fuerza de gravedad de 9.81 m/s^2 (flecha roja). En el caso de la simulación del brazo, se generó una fuerza remota (flecha amarilla) correspondiente al peso del gripper sumado a una carga de 2 kgf. Esta fuerza representa la carga máxima que debería ser capaz de soportar un brazo; y, con un valor de 24.52 N, está ubicada a aproximadamente 70 mm de la cara plana del soporte del gripper. Por otro lado, en la simulación del soporte de cintura se generó, en ambos lados laterales del soporte de cintura, un momento y una fuerza remota que representan la carga que origina el peso de cada brazo sumada a una carga adicional de 2 kgf. El valor de la fuerza es de 53.87 N y el valor del momento es de 22 951 N mm.

En la Figura 6.6a se muestran los resultados del análisis de esfuerzos de Von Mises. El esfuerzo máximo es de 42.88 MPa y está ubicado en la pieza “soporte M3M4 tipo 2”. Este esfuerzo es menor al esfuerzo admisible del Nylon el cual es 82 MPa. En la Figura 6.6b se muestra el análisis de deformaciones o deflexiones del brazo. Se puede observar que la zona crítica se presenta entre el motor M4 y el motor M5. En la zona del efector final se genera un desplazamiento máximo de 31.04 mm. Este desplazamiento no es tan relevante considerando las dimensiones del sistema.

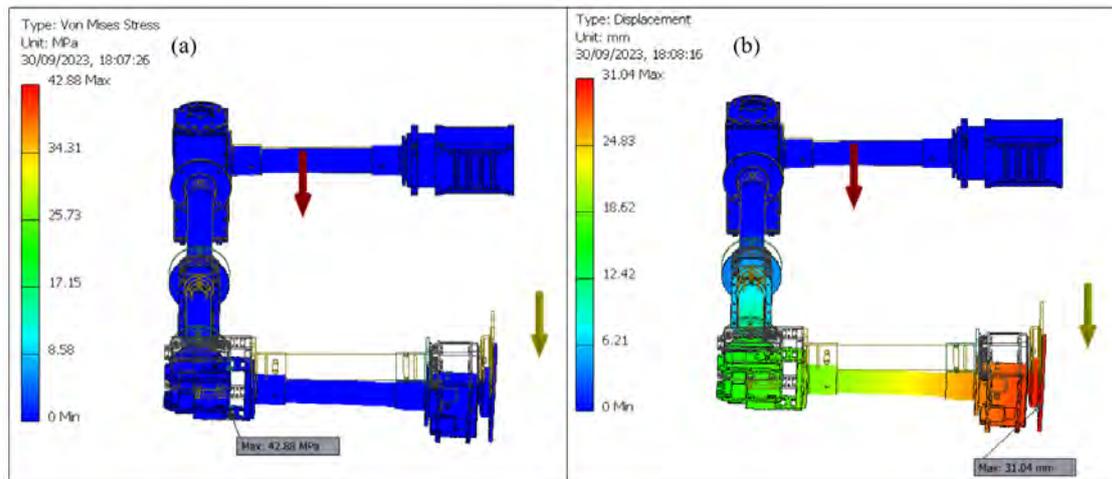


Figura 6.6. (a) Análisis de esfuerzos de un brazo. (b) Análisis de deflexiones de un brazo.

De igual forma se realizó un análisis de factor de seguridad del brazo. Como resultado se obtuvo que el factor de seguridad mínimo en general es de 1.27 y corresponde a la pieza “soporte M3M4 tipo 2” ubicada en la unión del motor M4 y el eslabón a4. Esto se puede apreciar en la Figura 6.7. Sin embargo, también se analizó el mínimo factor de seguridad de las bridas y de los eslabones. Se obtuvo como resultado que el mínimo FS de las bridas es 1.99. Este valor corresponde a la brida ubicada entre la unión del eslabón a4 y el motor M5. El mínimo FS de los eslabones es 3.5 y corresponde al eslabón a4. Estos dos últimos resultados se pueden apreciar en la Figura 6.8a y Figura 6.8b, respectivamente. Todos los resultados de factor de seguridad obtenidos son mayores a 1, por lo que se puede concluir que el brazo robot soporta el peso de sus componentes sumado a la carga de 2 kgf.

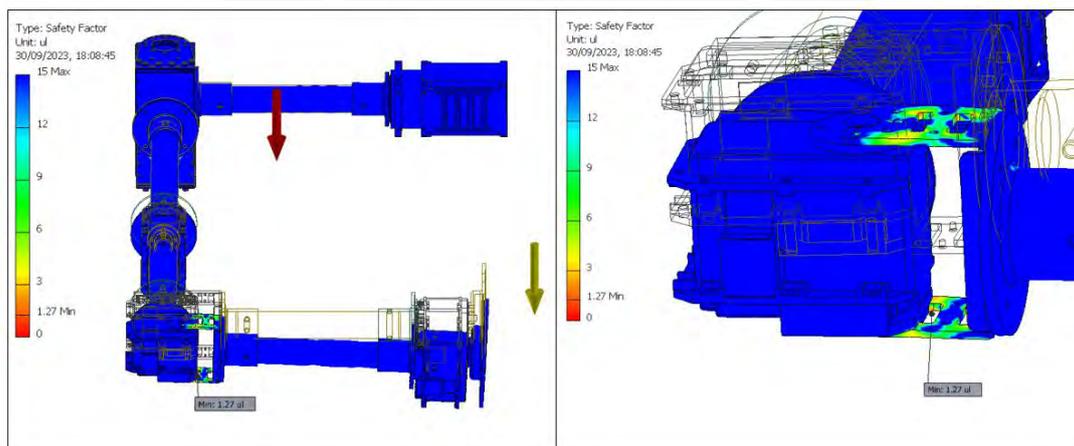


Figura 6.7. Análisis de factor de seguridad de un brazo.

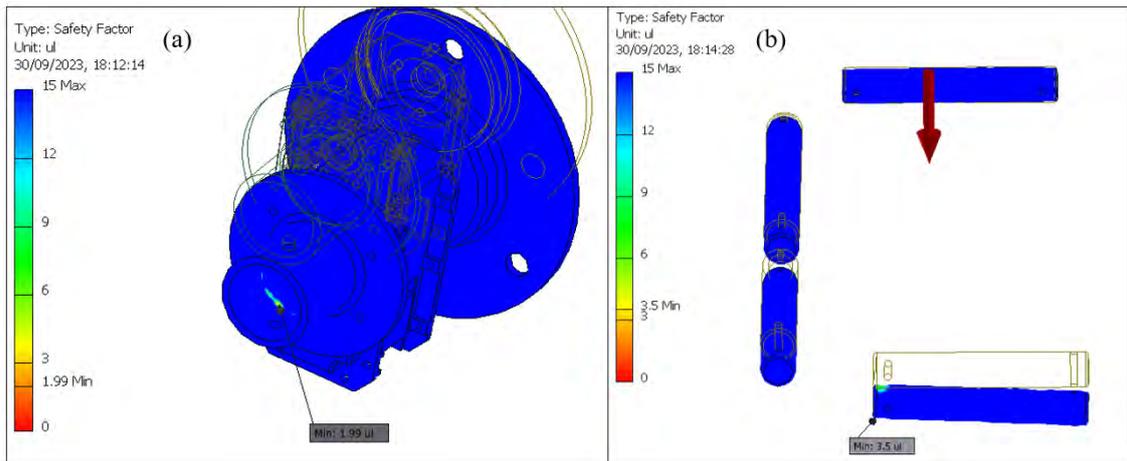


Figura 6.8. (a) Análisis de FS de las bridas. (b) Análisis de FS de los eslabones.

Por otro lado, en la Figura 6.9 se muestran los análisis del soporte de cintura. Del análisis de esfuerzos se obtuvo que el esfuerzo máximo es de 8.341 MPa. Del análisis de deformaciones y deflexiones se obtuvo que la deflexión máxima es de 1.952 mm. Finalmente del análisis de factor de seguridad se obtuvo que el mínimo es de 9.92. Este factor de seguridad es bastante elevado por lo que se concluye que el soporte de cintura puede resistir el peso de ambos brazos levantando su carga máxima cada uno.

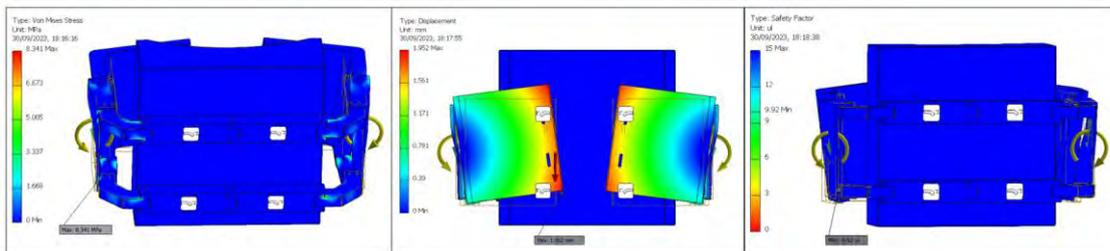


Figura 6.9. Análisis de esfuerzo, deflexión y factor de seguridad del soporte de cintura.

CAPÍTULO 7: DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL

En el presente capítulo se explica de manera más profunda el flujo de control del sistema mediante diagramas de flujo. Asimismo, se explica brevemente el protocolo de comunicación que usan los servomotores y la lógica de control de algunos componentes electrónicos. Adicionalmente, se muestran los *wireframes* que tendría la aplicación del *smartphone* que se usa para el “modo grabación”. Por último, se presenta la arquitectura del algoritmo de control de posición de un brazo SRL.

7.1. Diagramas: flujo del sistema y operaciones del usuario

Por un lado, los diagramas de flujo (DF) son herramientas que ayudan a visualizar la secuencia de pasos que se realizan para el funcionamiento del sistema. Por otro lado, los diagramas de operaciones (DO) son algo similar a los diagramas de flujo, pero indican la secuencia de pasos que debe seguir el usuario para el buen funcionamiento del sistema.

Cabe resaltar que, dado que el usuario utilizará un IMU en el pie para mandarle comandos a las SRLs, es necesario conocer cuáles son los movimientos que puede realizar con esa parte del cuerpo. Por ello, en el ANEXO F se detallan los movimientos que se pueden realizar con el pie.

El funcionamiento general del sistema se puede observar en el diagrama de flujo principal mostrado en la Figura 7.1. Este empieza con el interruptor ON/OFF encendido y un LED verde que indica si el sistema se ha encendido correctamente. Asimismo, se enciende el IMU Torso. Luego, el sistema verifica si el modo grabación está activado; es decir, si se ha presionado el botón latch correspondiente a activar este modo. Si ese es el caso, se enciende un LED rojo y se pone en alta el pin 29 correspondiente al GP5. Se ingresa a la subfunción “Grabar trayectoria” la cual se explica más adelante. En caso de que no se haya presionado el botón para activar el modo grabación, el sistema verifica si existe una trayectoria grabada antes de entrar al “modo acción” y mover las SRLs. Si no existe una trayectoria grabada, el sistema entra en un estado de espera hasta que se grabe una trayectoria. En caso de que ya exista una trayectoria grabada, se puede entrar al modo acción.

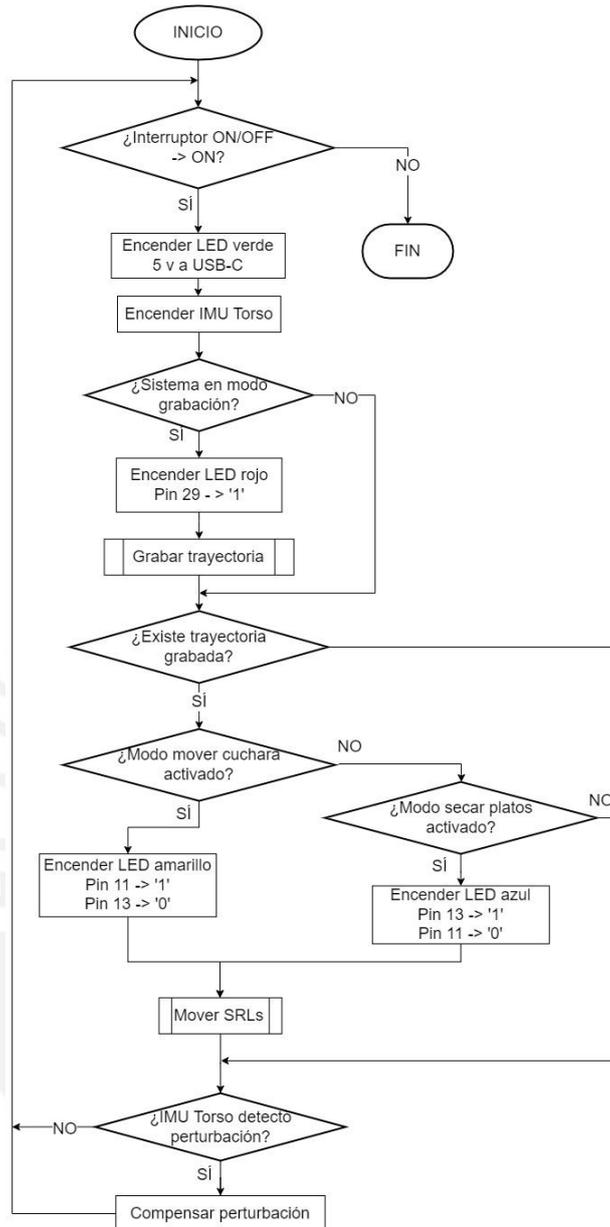


Figura 7.1. Diagrama de flujo principal del sistema

El sistema enciende un LED amarillo si está en modo “Mover cuchara” o un LED azul si está en modo “Secar platos” dependiendo de la posición del interruptor MODO. Cuando el sistema está en modo “Mover Cuchara” el pin 11 se pone en alta y el pin 13 en baja. Los valores de estos dos pines se invierten en el modo “Secar Platos”. Posteriormente, se ingresa a la subfunción “Mover SRLs” la cual se explica más adelante. Adicionalmente, el sistema siempre está verificando si el IMU Torso ha detectado alguna perturbación causada por movimientos del usuario para corregir la posición de las SRLs.

En cuanto a la función “Grabar trayectoria” su diagrama de flujo es mostrado en la Figura 7.2. Primero, se envían las señales RS485 a los motores para que generen un torque

mínimo que pueda compensar el peso de los brazos y permita al usuario poder mover los brazos físicamente. Asimismo, se activa el módulo bluetooth HC-05. Luego, el sistema verifica si el *Smartphone* se ha vinculado correctamente con el HC-05. Se ingresa a un modo espera hasta que la conexión se haya establecido o se desactive el modo grabación. Una vez que ya se estableció la conexión, el sistema está constantemente verificando si se ha recibido una señal de inicio/continuar, detener o borrar. Si se ha recibido una señal de inicio/continuar, el sistema empieza a grabar la trayectoria y le manda una señal al *Smartphone* para que indique que la grabación ha comenzado.

Mientras se está grabando la trayectoria, el sistema está verificando si se recibe una señal de pausa o de detener. En caso se reciba una señal de pausa, el sistema pausa la grabación y le manda una señal al *Smartphone* para indicarle al usuario que el sistema está en pausa. El sistema espera hasta que se reanude la grabación o se reciba una señal de detener. Si se recibe una señal de detener, el sistema detiene la grabación y guarda la trayectoria de las SRLs que fueron movidas físicamente por el usuario.

En caso se reciba una señal de borrar, el sistema borra la trayectoria grabada. Asimismo, el sistema está constantemente verificando si el sistema grabación sigue activo y si la conexión con el *Smartphone* se mantiene. En caso se corte la conexión y siga en modo grabación, se entra en un modo de espera hasta que se reconecte con el *Smartphone* o se desactive el modo grabación presionando el botón *latch*.

En el caso de la función “Mover SRLs” (ver Figura 7.3), esta empieza con el sistema verificando si el usuario presionó el botón Latch A/D IMU, es decir si el IMU Pie está activo. En caso el IMU Pie esté desactivado, las SRLs no recibirán los comandos del usuario. Si el usuario presionó el botón Latch A/D IMU, el sistema activará el IMU Pie y tomará la posición actual del pie del usuario como el origen. Mientras el IMU Pie esté activo, el sistema estará constantemente verificando si el movimiento del pie del usuario ha superado un determinado umbral para realizar una acción. Se ha considerado un umbral para evitar que el sistema capte una rotación pequeña del tobillo o movimiento no intencional como si fuera una intención de movimiento del usuario. De esta manera se superará el umbral cuando el usuario mueva su pie con la intención de mandarle un comando a las SRLs.

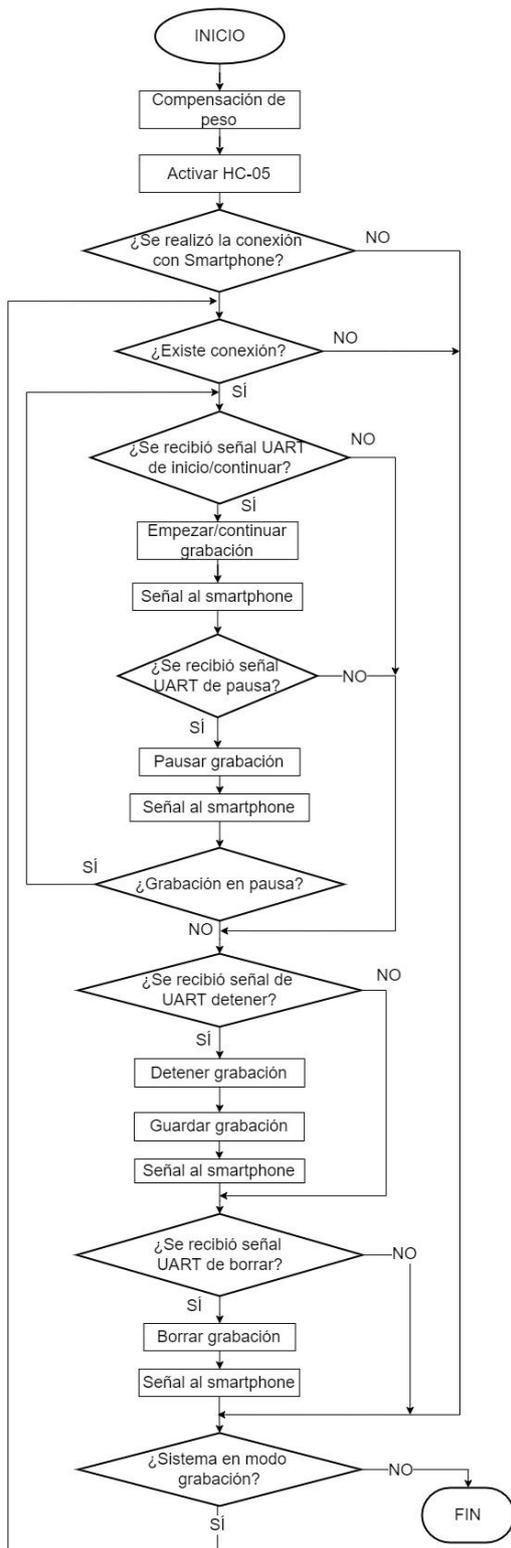


Figura 7.2. Diagrama de flujo de la función "Grabar trayectoria".

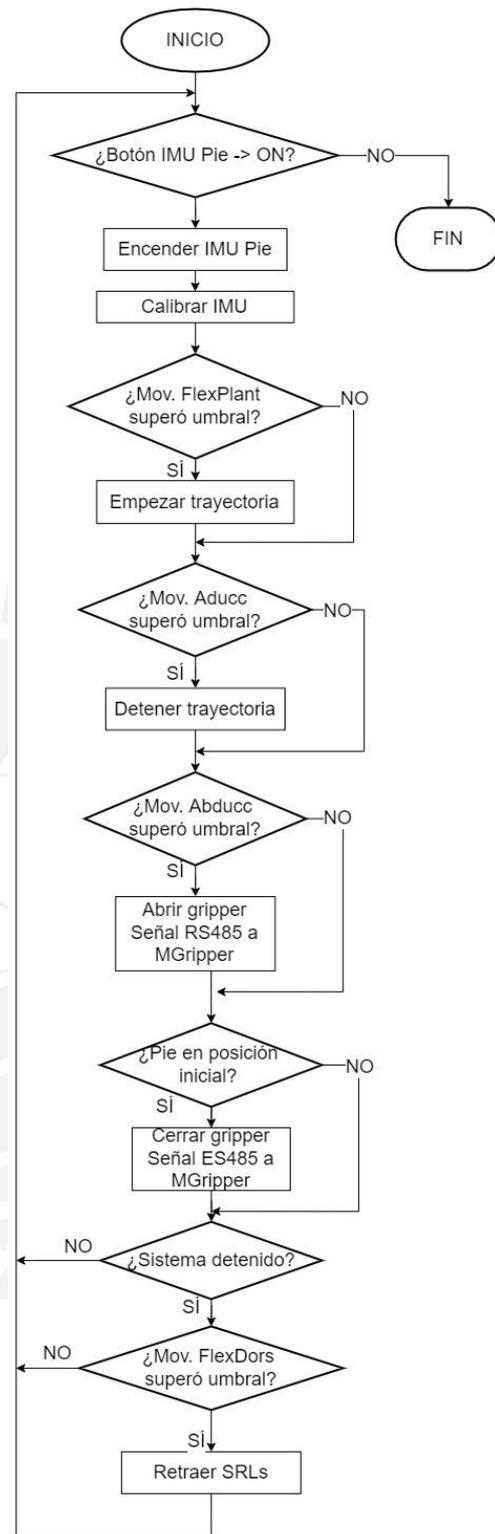


Figura 7.3. Diagrama de flujo de la función "Mover SRLs".

Los movimientos del pie son flexión plantar (FlexPlant) para empezar el movimiento de las SRLs siguiendo la trayectoria grabada anteriormente, aducción (Aducc) para detener

la trayectoria, abducción (Abducc) para abrir el gripper; y, retornar el pie a la posición inicial para cerrar el gripper. Cabe resaltar que el gripper está normalmente cerrado. Si el sistema está detenido, el usuario tiene la posibilidad de retraer las SRLs haciendo un movimiento de flexión dorsal (FlexDors). La frecuencia de muestreo con la que el IMU Pie estará verificando los datos será de 102.3 Hz, que es la ratio de actualización del giroscopio del IMU.

En cuanto al diagrama de operaciones del usuario, este se muestra en la Figura 7.4. Asimismo, en la Figura 7.5, Figura 7.6 y Figura 7.7 se muestran las funciones “Grabar trayectoria”, “Escoger modo” y “Mover Pie” correspondientes al DO del usuario.

Para empezar, el usuario debe encender el sistema colocando el interruptor ON/OFF en la posición ON. Luego, debe verificar si se ha encendido el LED verde. En caso no se haya encendido, es posible que las SRLs necesiten recargar su batería. Una vez se verificó que se encendió el LED verde, el usuario debe decidir si desea grabar una trayectoria para el sistema o entrar en modo acción. En caso desee grabar una trayectoria, entra a la función “Grabar trayectoria” la cual se explicará más adelante. En caso desee entrar al modo acción, primero debe escoger un modo de funcionamiento y luego mover el pie según corresponda. Las funciones de “Escoger modo” y “Mover pie” también se explican más adelante. Finalmente, si el usuario ya no desea usar las SRLs, deberá apagar el sistema cambiando la posición del interruptor ON/OFF a OFF.

Desde la perspectiva del usuario, la forma de grabar una trayectoria se explica a continuación. Primero debe activar el modo grabación presionando el botón Latch A/D REC. Luego, debe verificar si se ha encendido el LED rojo que indica que está en modo grabación. En caso no se encienda, debe desactivar el modo grabación y volverlo a activar. Una vez que se encendió el LED rojo, el usuario debe realizar la conexión del *Smartphone* con las SRLs mediante *bluetooth* y esperar a que el *Smartphone* le indique que la conexión se realizó exitosamente.

Ahora, el usuario deberá decidir entre iniciar la grabación o borrar la grabación si es que ya había una existente. Si decide iniciar la grabación, debe mandar la señal de inicio/continuar a través de la aplicación del *Smartphone*. Al recibir la indicación de que la grabación ya inició, el usuario deberá mover físicamente las SRLs procurando que sigan la trayectoria deseada (*grabación por demostración*). Los servomotores de las SRLs generarán un torque mínimo para mantener su posición y permitir que el usuario las

nueva. En caso el usuario desee pausar la grabación, debe mandar una señal desde el *Smartphone* y será el mismo caso cuando quiera reanudar. Cuando el usuario considere que ya grabó la trayectoria deseada, deberá mandar una señal de detener por medio de la aplicación. El sistema se encargará del guardado de la trayectoria. Finalmente, si el usuario desea salir del modo grabación, deberá presionar nuevamente el botón Latch A/D REC.

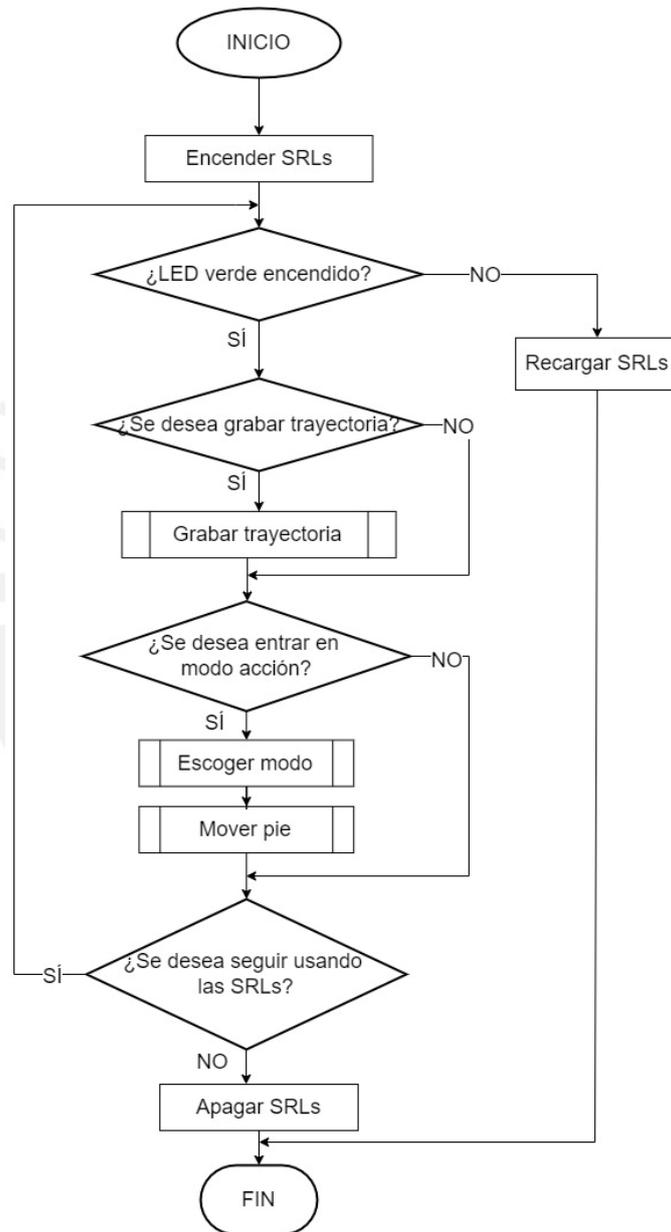


Figura 7.4. Diagrama de operaciones del usuario.

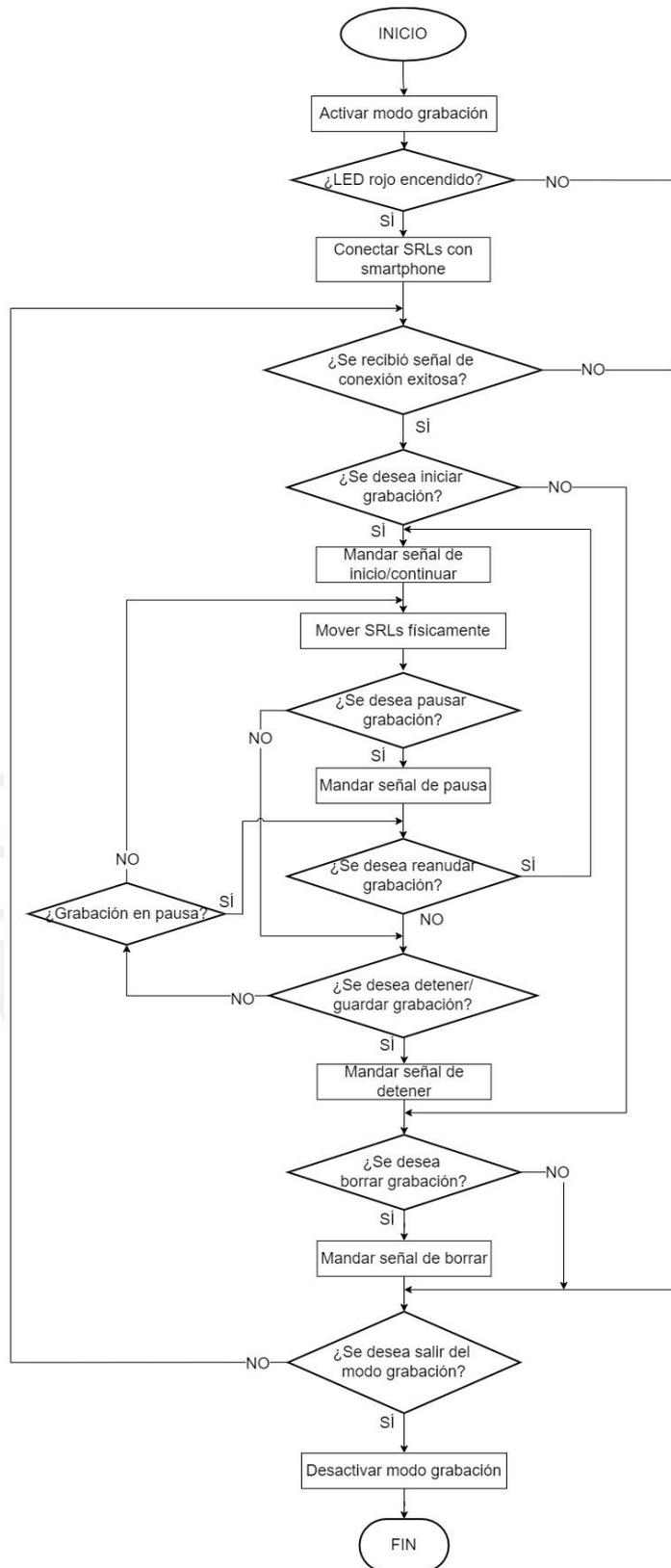


Figura 7.5. Función “Grabar trayectoria” del DF del usuario.

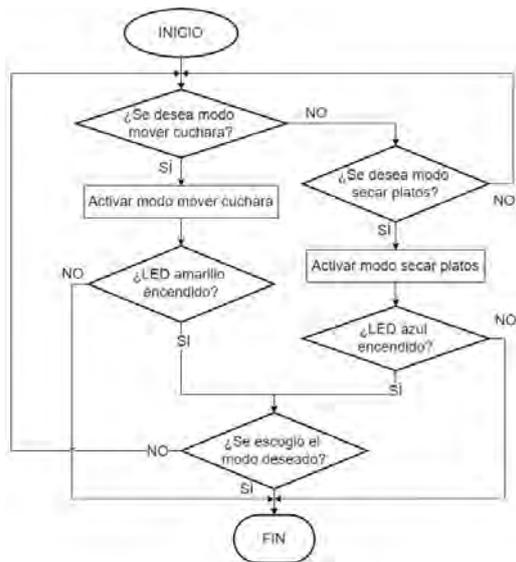


Figura 7.6. Función "Escoger modo" del DO del usuario.

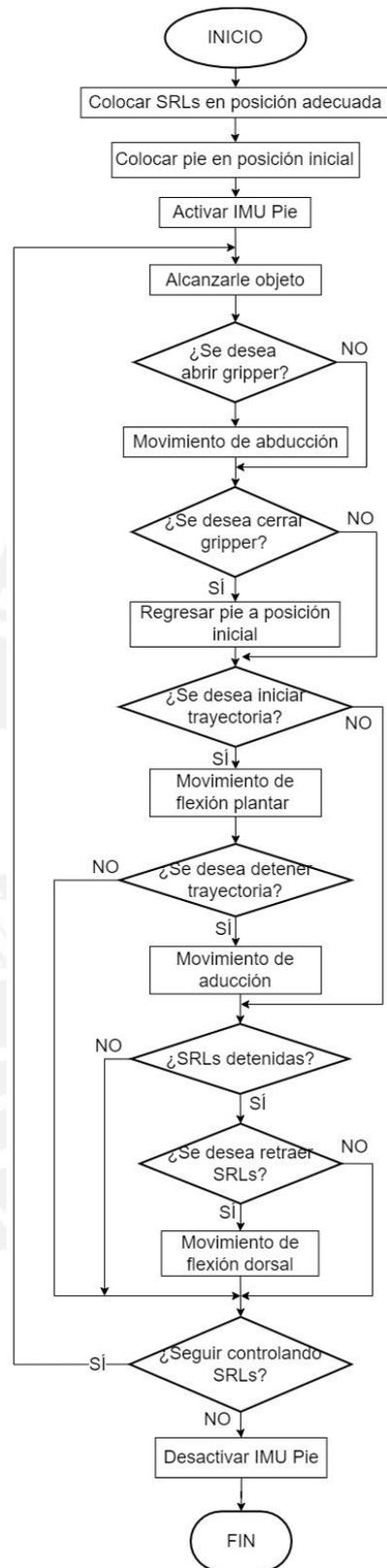


Figura 7.7. Función "Mover SRLs" del DO del usuario.

Para escoger un modo, el usuario deberá tener el sistema de grabación desactivado y colocar el interruptor de modo en la actividad que desea que las SRLs realicen. El usuario deberá verificar que el LED amarillo está encendido si es que se encuentra en modo “mover cuchara” o el LED azul esté encendido si se encuentra en modo “secar platos”.

Ahora, para el caso de la función “Mover el pie”, antes de activar el IMU Pie con el botón IMU, el usuario deberá colocar manualmente las SRLs en una posición adecuada y colocar su pie en una posición cómoda o neutral. Una vez hecho esto, se presiona el botón IMU y el usuario procede a alcanzarle el objeto correspondiente, abrir el gripper con un movimiento de abducción y cerrarlo con regresando su pie a la posición inicial. Cuando desee empezar la trayectoria, deberá realizar un movimiento de flexión plantar y cuando desee detener la trayectoria, deberá realizar un movimiento de aducción. Si el sistema está detenido, el usuario tiene la posibilidad de retraer las SRLs realizando un movimiento de flexión dorsal.

7.2. Algoritmo de control

Puiu et al. (2009) presenta en su trabajo de investigación el control distribuido para un brazo robot de 4 GDL y 5 servomotores. Los servomotores están conectados a dos servos drives inteligentes los cuáles son controlados y sincronizados por un controlador de trayectoria. El sistema de control utiliza el protocolo de comunicación RS232. Cada servomotor cuenta con su propio control de posición en lazo cerrado. El control distribuido se encarga de generar la trayectoria de posición adecuada para cada servomotor. El diseño del proyecto y las pruebas prácticas probaron la efectividad de una arquitectura de control distribuida. Esto permite que el diseñador pueda crear y probar pequeñas partes del proyecto y luego ensamblarlas.

Strasser et al (2011) se enfoca principalmente en la arquitectura de control distribuido para un brazo robot reconfigurable de 6 GDL. El brazo está compuesto por *PowerCubes* de la empresa SCHUNK, los cuáles son componentes mecatrónicos inteligentes. Cada *PowerCube* tiene integrado un servomotor, un encoder incremental y otros componentes que permiten el movimiento de una articulación del brazo, similar a los *Dynamixel* en el caso del sistema SRLs. Asimismo, se implementó el control distribuido usando la norma IEC 61499. Se observó que con el hardware modular del brazo robot y el control distribuido es relativamente más fácil realizar modificaciones a la configuración del brazo robot.

Tomando como referencia los trabajos de investigación mencionados, se ha considerado utilizar un control distribuido para el sistema de las SRLs. Este tipo de control consiste en utilizar un controlador para cada grado de libertad; es decir, un total de 5 controladores por brazo. En la Figura 7.8 se muestra el diagrama de bloques del control de un brazo. Se puede observar que el arreglo de posiciones deseadas pasa a través de un demultiplexor para separar sus componentes y dirigirlos como entradas de referencia a los controladores de posición. Cada controlador de posición se encarga de mover su respectiva articulación hacia la posición deseada. El movimiento coordinado en conjunto de cada articulación es lo que genera el movimiento del brazo. El arreglo de posiciones deseadas se va actualizando según los datos capturados en el “modo grabación” a medida que el brazo sigue la trayectoria deseada. Cabe resaltar que el algoritmo de control para mover la cuchara de la olla y para el secado de platos es el mismo; sin embargo, lo que varía son los datos del arreglo de posiciones deseadas según la tarea que el usuario desee realizar.

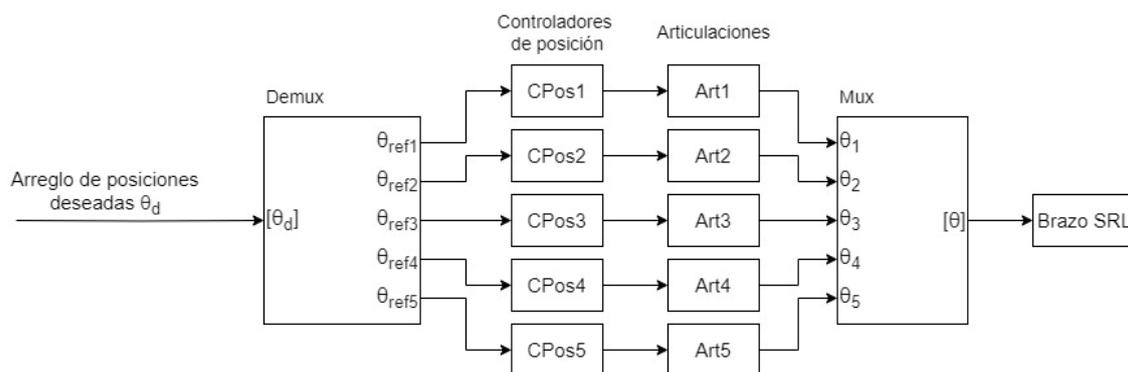


Figura 7.8. Diagrama de bloques del control de un brazo SRL.

En la Figura 7.9, se muestra el controlador de posición en cascada de lazo cerrado de uno de los motores. Es importante destacar que la estructura del controlador es la misma para los 5 controladores de posición mostrados en la Figura 7.8. La variable de control es el ángulo de cada articulación. Internamente, el controlador de posición cuenta con un controlador de velocidad PID que manda una señal de control ‘u’ hacia un conversor de señales al protocolo RS485 para que el motor Dynamixel pueda interpretarlas. Cada motor cuenta con un *encoder* incremental incorporado que se encarga de medir la velocidad angular $\dot{\theta}$ punto y retroalimentarla al controlador de velocidad. La velocidad angular también pasa por un integrador para obtener la posición θ , la cuál se replica en la articulación correspondiente. La posición de referencia θ_{ref} y la posición medida θ se restan para obtener el error ‘e’ el cual se multiplica con una ganancia ‘K’ para luego servir como entrada al controlador de velocidad.

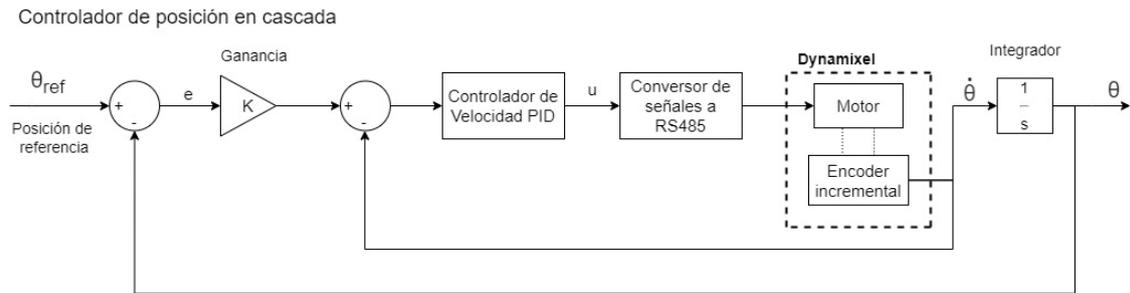


Figura 7.9. Controlador de posición en cascada de una articulación.

La simplicidad de este tipo de control es una de las principales ventajas, ya que permite controlar cada articulación de manera independiente, lo cual simplifica enormemente el complejo mecanismo de 5 GDL del brazo. Asimismo, su modularidad también es una ventaja importante, pues permite modificar los parámetros del sistema de control sin modificaciones en el hardware. De igual manera, se puede mejorar individualmente cada controlador al añadir o eliminar componentes de control sin afectar al resto del sistema (Puiu et al., 2009).

7.3. Aplicación del smartphone

Como se mencionó anteriormente, el sistema de las SRLs cuenta con un “modo grabación”, el cual es necesario para que el usuario pueda programar los movimientos que harán las SRLs tanto en el “modo mover cuchara” como en el “modo secar platos”. Para poder iniciar, pausar, detener o borrar la grabación se usará una aplicación de *smartphone*. Se utilizó el programa Moqups para diseñar las wireframes cuyo diagrama completo está disponibles en el ANEXO G. A continuación, se explica la secuencia en dos partes.

En la Figura 7.10 se aprecia la primera secuencia de la aplicación de *smartphone*. Esta empieza en la pantalla 1 con un mensaje de bienvenida y al presionar el botón “Buscar SRLs” se pasa a la pantalla 2 en donde el dispositivo busca establecer una conexión con las SRLs. En caso no encontrar una conexión, aparecerá la pantalla 4 y habrá un botón de “Ir a Configuraciones” para poder revisar la conexión *bluetooth*. En caso la conexión se haya establecido correctamente, aparecerá la pantalla 3 y al presionar el botón “Comenzar” se pasará a la siguiente secuencia.

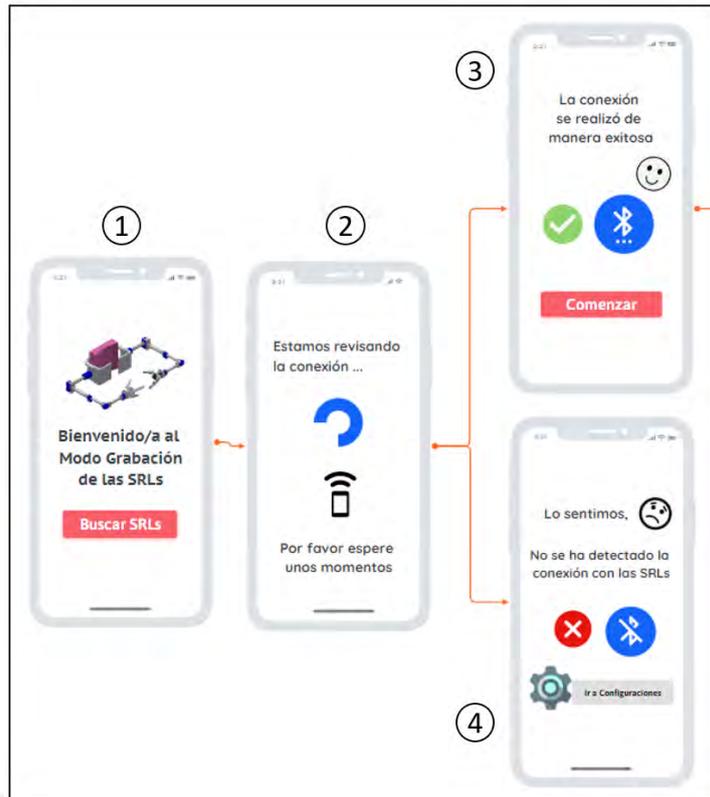


Figura 7.10. Primera sección de la aplicación de Smartphone.

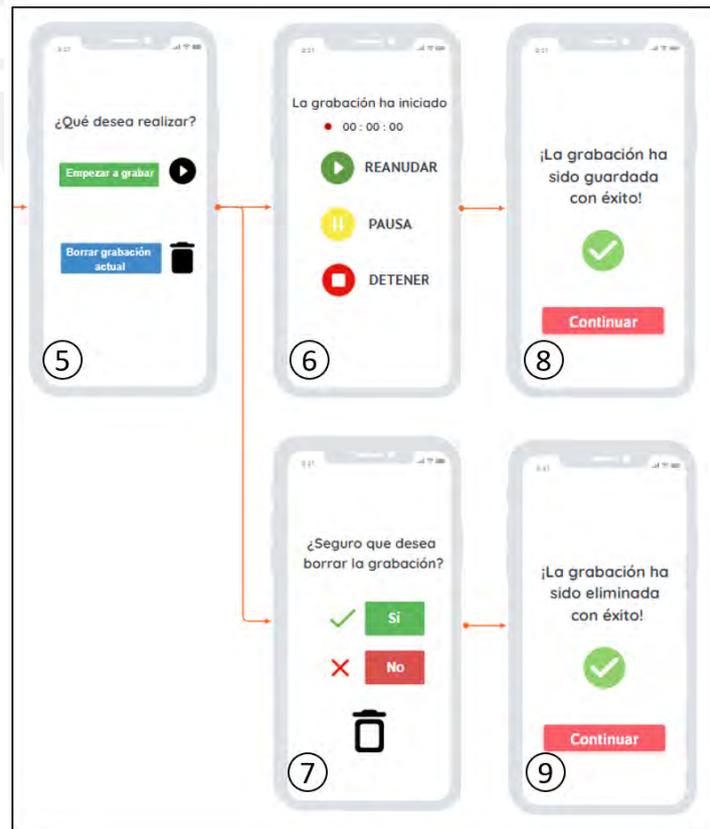


Figura 7.11. Segunda sección de la aplicación de Smartphone.

En la Figura 7.11 se muestra la segunda secuencia de la aplicación de las SRLs. La pantalla 5 aparece después de haber presionado el botón “Comenzar” de la secuencia anterior. Esta pantalla ofrece dos opciones: “Empezar a grabar” y “Borrar grabación actual”. De ser presionado la primera opción, aparecerá la pantalla 6, en donde se indica que la grabación se ha iniciado, se muestra un cronómetro y hay 3 botones para reanudar, pausar o detener/guardar la grabación. Al presionar el botón de “Detener”, se guarda la grabación y aparece la pantalla 8. En el caso de presionar “Borrar grabación actual”, aparecerá la pantalla 7 con un mensaje de confirmación (parte inferior de la pantalla). Al presionar “Sí”, la grabación se borra y aparece la pantalla 9. Al presionar “No” se regresa a la pantalla anterior. El botón continuar de la pantalla 9 regresa al usuario a la pantalla 5.



CAPÍTULO 8: FABRICACIÓN Y COSTOS

En el presente capítulo se explican los procesos de fabricación que requieren algunas partes del sistema, se mencionan algunas consideraciones de seguridad y se muestra la lista de planos mecánicos. Además, se muestran estimaciones de los costos de los principales componentes del sistema, los procesos de fabricación y el desarrollo. Finalmente se da un estimado de cuánto costaría implementar un prototipo del proyecto.

8.1. Fabricación del sistema

En esta sección se explican los procesos necesarios para fabricar las piezas diseñadas del sistema de SRLs. Además, se muestra una lista de los planos mecánicos de las piezas diseñadas.

8.1.1. Procesos de fabricación

Como se mencionó en la sección “4.2.1. Elección del material”, en el sistema se pueden identificar dos tipos de piezas: las que tienen formas geométricas conocidas y las que tienen formas complejas. Las primeras se refieren a los eslabones y a las bridas. Dado que tienen una forma cilíndrica se pueden fabricar a partir de varillas comerciales de nylon PA 6SA de 25 y 60 mm de diámetro, respectivamente. Como se muestra en la Figura 8.1, se utilizarán los procesos de manufactura de corte, para obtener la longitud requerida de cada pieza; torneado y mandrinado, para dar la forma a las bridas; y, taladrado, para realizar los agujeros correspondientes.

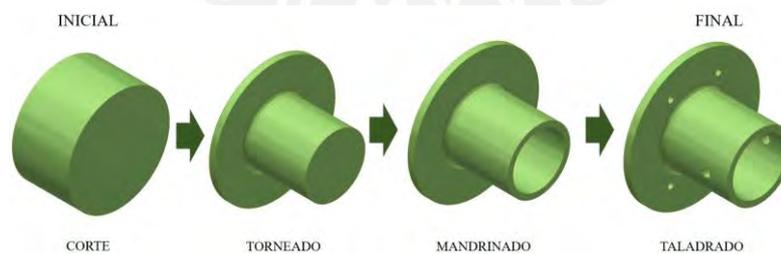


Figura 8.1. Proceso de fabricación de una brida.

Las piezas con formas complejas se refieren a las piezas del soporte de cintura, el soporte a3-M4, el soporte base M4 y el soporte gripper. Estas piezas se fabricarán mediante impresión 3D de sinterizado selectivo por láser (SLS) debido a que es el más común y apropiado para imprimir piezas de nylon (poliamidas) (Formlabs, s.f.). Sin embargo,

existen tres tipos de nylon los cuáles son PA6, PA11 y PA12. A continuación, en la Tabla 8.1 se muestra una comparación entre estos tres tipos de nylon.

Tabla 8.1. Comparación entre tipos de nylon.

PA6	PA11	PA12
<ul style="list-style-type: none"> -Es uno de los tipos de nylon más comunes en la industria. - Debido a su alta absorción de humedad no es un buen candidato para material de impresión 3D 	<ul style="list-style-type: none"> - Mayor flexibilidad que el PA12. - Resistencia química - Bajo impacto ambiental - Es el más caro de los 3. - Baja absorción de agua. 	<ul style="list-style-type: none"> - Fuerte, rígida, resistente y duradera. -Más rígido que el PA11. - Resistencia química - Excelente resistencia al calor - Atenúa ruido y vibraciones.

(Fuente: Adaptado de Formlabs, s.f.; Weerg, 2020; CNClathing, 2022)

Luego de realizar una comparación entre los tipos de nylon que se usan para impresión 3D, se ha optado por utilizar el nylon PA12. Si bien su impacto ambiental es mayor al del PA11 y sus propiedades mecánicas son similares, el PA12 tiene una excelente resistencia al calor, atenúa el ruido y vibraciones que puedan causar los motores, y, su costo es menos elevado.

8.1.2. Consideraciones de seguridad

El sistema SRLs calza con la definición de robot colaborativo de la norma UNE-EN ISO 10218-2, la cual es el robot diseñado para trabajar con una persona dentro de un espacio de trabajo colaborativo. Dadas las condiciones del sistema SRL, se observa una relación totalmente colaborativa, en donde el robot y la persona coinciden en espacio y tiempo (Sanz, 2018). La norma UNE-EN ISO 10218-2 especifica los requisitos de seguridad para robots industriales. A pesar de que el sistema SRLs no es precisamente un robot industrial, la información presentada en la norma se puede extrapolar para generar algunas consideraciones de seguridad para tener en cuenta al momento del uso del sistema.

En primer lugar, el lugar de trabajo será delimitado. Esto principalmente para que tanto el usuario como sus compañeros de trabajo tengan presente el alcance de los brazos robots y la zona de trabajo. De esta manera, las personas tendrán cuidado de no invadir la zona de trabajo de las SRLs mientras están activas. En segundo lugar, la velocidad y fuerza de trabajo serán limitadas. Mover la cuchara de la olla y secar platos son tareas que no requieren de una mayor fuerza o velocidad por lo que limitar estos valores no tendrá a priori un gran impacto en el desempeño del sistema. Por último, el usuario que va a utilizar el sistema SRLs será previamente capacitado para tener un manejo adecuado y responsable del sistema.

8.1.3. Lista de planos del sistema

La lista de planos mecánicos del sistema se puede apreciar en la Tabla 8.1. Los planos se muestran en el ANEXO J.

Tabla 8.1. Lista de planos mecánicos.

Código de plano	Nombre
SRL-PE-A2	Ensamble de las SRLs
SC-PSE-A2	Ensamble del soporte de cintura
BRA-PSE-A2	Ensamble del brazo
SC-PD1-A3	Pieza espalda tipo 1
SC-PD2-A3	Pieza espalda tipo 2
SC-PD3-A4	Unión entre pieza espalda y soporte cintura-M1
SC-PD4-A3	Soporte cintura-M1
SC-PD5-A3	Parte delantera derecha
SC-PD6-A3	Parte delantera izquierda
BRA-PD1-A4	Eslabón a1
BRA-PD2-A4	Eslabón a2
BRA-PD3-A4	Eslabón a3
BRA-PD4-A4	Eslabón a4
BRA-PD5-A4	Brida tipo 1
BRA-PD6-A4	Brida tipo 2
BRA-PD7-A4	Brida tipo 3
BRA-PD8-A4	Brida tipo 4
BRA-PD9-A4	Brida tipo 5
BRA-PD10-A4	Soporte a3-M4
BRA-PD11-A4	Soporte gripper
BRA-PD12-A4	Soporte M4

En esta tabla se muestran los elementos con nombre y código de plano. Se ha optado por clasificar los planos como planos de despiece (PD), de subensamble (PSE) y de ensamble (PE). El tipo “subensamble” se coloca para no saturar el plano de ensamble. Asimismo, aquellos planos con las siglas “SC” pertenecen al soporte de cintura y los planos con las siglas “BRA” pertenecen a los brazos.

8.2. Costos del proyecto

En esta sección se evalúan los costos de los componentes mecánicos y electrónicos. Asimismo, se evalúa el costo que conlleva la fabricación de las piezas diseñadas para las SRLs y el costo del desarrollo de todo el sistema. Para aquellos costos que se encuentran en dólares estadounidenses (\$) se considerará un cambio a soles (S/.) de 3.80. Y para los costos que se encuentren en euros (€) se considerará un cambio a soles (S/.) de 3.98.

8.2.1. Costo de componentes mecánicos

En cuanto a los componentes mecánicos, se ha considerado a los motores, sus soportes, el *gripper* y los accesorios de sujeción. Cabe resaltar que en el documento de Telegenov

et al., 2015 se puede observar con mayor detalle el costo de cada pieza. Asimismo, el costo de los accesorios de sujeción como pernos, tuercas y arandelas es un estimado. El detalle de los costos se puede apreciar en la Tabla 8.2.

Tabla 8.2. Lista de precios de los componentes mecánicos de las SRLs.

Componente	Cantidad	Precio original unitario	Precio unitario (S/.)	Precio total
Motor 1 y 2	4	\$ 2 599.90	S/. 9 879.62	S/. 39 518.48
Motor 3 y 4	4	\$ 599.90	S/. 2 279.62	S/. 9118.48
Motor 5	2	\$ 369.90	S/. 1 405.62	S/. 2 478.26
Gripper	2	\$ 327.92	S/. 1 246.10	S/. 2 426.61
FRP54-I110K Set	2	\$ 78.70	S/. 299.06	S/. 531.32
FRP54-H121K Set	2	\$ 97.90	S/. 372.02	S/. 660.82
FR08-B101K Set	2	\$ 38.10	S/. 144.78	S/. 257.52
FR08-H101K Set	2	\$ 35.70	S/. 135.66	S/. 241.24
FR05-B101K Set	2	\$ 38.10	S/. 144.78	S/. 257.52
Almohada	1	\$ 37.99	S/. 144.36	S/. 144.36
Accesorios varios (pernos, tuercas, etc)	2	\$ 100	S/. 380.00	S/. 760.00
Total				S/. 57 037.35

(Fuente: Amazon, 2022; SmartRobotWorks, s.f.; Robotis, 2022; Telegenov et al., 2015)

8.2.2. Costo de componentes eléctrico-electrónicos

En cuanto a los componentes eléctrico-electrónicos, se ha considerado a todos los componentes mencionados en la sección “5.1. Selección de componentes electrónicos”. De igual manera a los componentes mecánicos, se ha considerado un costo estimado para componentes de reserva y otros accesorios electrónicos como cables, resistencias, etc. En la Tabla 8.3 se puede apreciar el detalle de los costos.

Tabla 8.3. Lista de precios de los componentes electrónicos de las SRLs.

Componente	Cantidad	Precio original unitario	Precio unitario	Precio total
IMU	2	\$ 18.50	S/. 70.30	S/. 140.60
FSR	6	\$ 7.50	S/. 28.50	S/. 171.00
Módulo Bluetooth	1	S/. 28	S/. 28.00	S/. 28.00
U2D2	2	\$ 32.10	S/. 121.98	S/. 243.96
U2D2 Power Hub	2	\$ 19.00	S/. 72.20	S/. 144.40
BMS	1	\$ 449	S/. 1 706.20	S/. 1 706.20
Microcontrolador	1	\$ 55	S/. 209.00	S/. 209.00
Batería	1	1 078.80 €	S/. 4 293.62	S/. 4 293.62
Otros accesorios de conexión	1	\$ 200	S/. 760.00	S/. 760.00
Total				S/. 7 696.78

(Fuente: RobotShop, s.f.; SparkFun, s.f.; Naylamp Mechatronics, 2021; Robotis, 2022; ElectricMotorSport, s.f.; Pilch, 2021; MyLithiumBattery s.f.)

8.2.3. Costos de fabricación

Se cotizaron varillas de nylon PA6SA con la empresa local Corporación Emacin para la fabricación de los eslabones y las bridas. El precio total del material a utilizar es de S/.177.00. Asimismo, los procesos de manufactura necesarios para fabricar los eslabones y las bridas fueron cotizados con un taller de manufactura local. El precio total de los procesos de manufactura es de S/.1 270. Para un mayor detalle de los costos de fabricación de los eslabones y las bridas, revisar el ANEXO H.

Por otro lado, se cotizaron las piezas que se van a imprimir en 3D con la empresa Hubs. Todas las piezas se configuraron con material PA12 y serán impresas con SLS. El precio total en dólares es de \$ 1787.41 considerando un 40% adicional al costo total de la impresión por costos de envío. Lo que se traduce a un costo total de S/.6 792.15. Para un mayor detalle de los costos de fabricación de las piezas impresas en 3D, revisar el ANEXO I.

8.2.4. Costos de desarrollo

Considerando un sueldo de S/.1 200 mensuales y considerando 30 horas de trabajo semanales se llegó a un costo por hora de S/. 10. Puesto que se trabajó un aproximado de 15 horas semanales por 36 semanas, el costo de desarrollo se puede estimar a un monto de S/.5 400.00.

8.2.5. Costo total

Ahora que se han calculado los costos de los componentes mecánicos, componentes eléctricos-electrónicos, costos de fabricación y costos de desarrollo, se puede calcular el costo total del proyecto. En la Tabla 8.4 se muestra un resumen de los costos del proyecto y el costo total.

Tabla 8.4. Costos del proyecto.

Costo	Valor
Costo de los componentes mecánicos	S/. 57 037.35
Costo de los componentes eléctrico-electrónicos	S/. 7 696.78
Costo de fabricación	S/. 8 062.15
Costo de desarrollo	S/. 5 400.00
Total	S/. 78 196.28

CONCLUSIONES

Las SRLs son una tecnología nueva que aún está en desarrollo y todavía no se han presentado investigaciones en la literatura para su aplicación en la cocina. Sin embargo, se considera que estas herramientas tienen un alto potencial para ayudar a los cocineros a reducir sus tiempos en actividades de cocina en restaurantes, en donde el tiempo es muy importante para las ganancias de la empresa. El sistema SRLs presentado en este proyecto tiene el potencial de reducir los tiempos de cocina del usuario ayudando en las actividades de mover la cuchara de la olla y secar los platos.

Al revisar la literatura e identificar los requisitos de usuario se consideró que las SRLs deben ser ligeras, cómodas, no deben sobrecargar al usuario y deben tener bajo riesgo de accidentes. Además, deben ser precisas y deben tener una rápida capacidad de respuesta. Teniendo en cuenta esos requisitos y con ayuda de las herramientas brindadas por la metodología usada, se llegó a un diseño conceptual que se consideró óptimo en primera instancia. Sin embargo, al realizar la cinemática del sistema y las pruebas de trayectoria en MATLAB, se pudo notar que se necesitaban realizar algunos cambios en el diseño conceptual para que pueda realizar las tareas propuestas. Algunos de esos cambios son que no solo se necesitaban dos eslabones (eslabón brazo y eslabón antebrazo) para cada brazo sino 4 eslabones que permitirían al efector final desplazarse por el espacio como se desea.

Para el cálculo de los torques y el cálculo de la resistencia y deformaciones, se realizaron aproximaciones de forma y de velocidad angular. En consecuencia, se ha considerado tener un factor de seguridad alto para poder contrarrestar los posibles errores que se podrían producir debido a las aproximaciones. Después de realizar los análisis cinemáticos, dinámicos y de resistencia; y la selección de motores, se logró diseñar los mecanismos necesarios para el correcto funcionamiento de las articulaciones.

Tomando en cuenta que los cocineros suelen trabajar 8 horas diarias, se consideró que el sistema sea ligero y cómodo. De esta manera, se llegó a diseñar la interfaz mecánica o soporte de cintura y como resultado se obtuvo su modelo 3D y planos mecánicos. Asimismo, cuando se escogieron los componentes del sistema, se tomó mucho en cuenta el peso de cada componente. Sin embargo, al ser tantos los motores del sistema, se consume mucha energía (24.58 Ah). Esto genera que las baterías que pueden proveer esta energía tengan un peso muy elevado. Si bien se escogió la batería más ligera con un peso

de 7.8 kg, esta batería aún sigue siendo muy pesada para que el usuario la lleve en la espalda. Por consiguiente, se optó por la opción de colocarla en el suelo con un carrito para permitir que el usuario pueda desplazarse. Con la selección de componentes, cálculo energético y esquemas eléctricos se realizó satisfactoriamente el diseño eléctrico-electrónico del sistema.

Se realizó la integración de los subsistemas mecánico y eléctrico-electrónico de las SRLs al realizar el modelado 3D general. Asimismo, a partir del análisis de esfuerzos para un brazo se obtuvo como resultados que el esfuerzo resultante máximo es de 4.67 MPa (con FS de 5) y no sobrepasa el esfuerzo máximo de 82 MPa del nylon PA6 SA. Asimismo, del análisis de deflexión se obtuvo que la máxima deflexión del brazo es de 0.76 mm. Posteriormente, estos resultados fueron corroborados mediante las simulaciones de esfuerzo y deflexión. El esfuerzo máximo en la simulación de esfuerzos es de 42.88 MPa, dando como resultado un FS mínimo de 1.27. Este esfuerzo pertenece a un accesorio diseñado por el fabricante de los motores, por lo cual, al tener un FS mayor que 1, significa que la pieza resistirá. Por otro lado, la deflexión máxima en la simulación resultó ser mucho mayor que en el cálculo con un valor de 31 mm. Sin embargo, una deflexión de 3.1 cm se puede considerar despreciable considerando las dimensiones del sistema. En cuanto a la simulación del soporte de cintura, no hubo ningún problema pues su FS mínimo es de 9.92. Por lo tanto, se puede concluir que el nylon es un material adecuado para prototipar el sistema de SRLs.

Se diseñó el subsistema de control al presentar el funcionamiento del sistema de alto nivel mediante los diagramas de flujo y de operaciones. Asimismo, se presentó la arquitectura del algoritmo de control de bajo nivel utilizando un control distribuido para el desarrollo de trayectorias. Este tipo de control simplifica el complejo control que involucra el sistema SRLs por la cantidad de grados de libertad que tiene. De igual manera, se desarrollaron los wireframes de la aplicación de smartphone que servirá como una interfaz que permita al usuario transmitir sus comandos a las SRLs durante el “modo grabación”.

Cabe resaltar que el manejo del sistema de las SRLs requiere un cierto grado de conocimientos y capacitación del usuario pues entender el funcionamiento del modo grabación y el modo acción puede resultar un poco confuso al inicio. Se requiere coordinación con el pie y estar atento al modo en el que se encuentra.

Luego de evaluar los costos del proyecto, se observa que su implementación tiene un costo moderadamente elevado (S/. 78 196 aprox.). Esto se debe principalmente a que el sistema requiere de varios motores especializados que les otorguen a los brazos los GDL, velocidad angular y torque necesarios para funcionar adecuadamente. Por ello este sistema está dirigido a restaurantes grandes que tengan la capacidad económica para poder adquirir este sistema.

Aún existen muchas características que se podrían considerar para las SRLs en un trabajo futuro como la versatilidad para realizar más actividades o una forma de actuar más autónoma que no dependa enteramente de los comandos del usuario. Por ese motivo, la tecnología en desarrollo de las SRLs puede ser de gran ayuda no solo en el ámbito de la cocina en restaurantes sino en muchos más sectores.



RECOMENDACIONES

Al momento de diseñar las piezas se debe tomar en cuenta que el material se pueda adquirir; y que tenga la resistencia necesaria y las propiedades para que la aplicación pueda funcionar de manera óptima. Asimismo, siempre es bueno realizar cálculos y simulaciones porque los resultados pueden no ser similares como en el caso de este proyecto.

Hay ocasiones en las que es mejor sacrificar la capacidad del sistema para velar por la seguridad del usuario que va a usarlo. El diseño final del sistema de las SRLs tiene algunos aspectos de mejora. En cuanto al diseño mecánico, al ver el modelo 3D con un dummy se puede observar que ocupa un espacio considerable por lo que no se podría usar en cocinas pequeñas.

En el caso del diseño eléctrico-electrónico, el hecho de utilizar muchos motores aumenta el consumo del sistema en general, lo que genera que se requiera una batería más potente y por ende más pesada. Colocar la batería en el piso no es la mejor solución puesto que aún sigue siendo peligroso para el usuario y las demás personas en la cocina. Lo ideal sería llevarla en la espalda, junto al resto de componentes de la caja ubicada en el soporte de cintura, pero con un peso no tan elevado.

En un trabajo futuro, para mejorar la seguridad del usuario y personas que trabajen cerca al sistema SRLs, se pueden implementar sensores de proximidad en los efectores finales y las articulaciones para que detecten la presencia de personas u objetos que se crucen en su camino. También se desarrollaría un algoritmo que interprete las señales de los sensores y pause temporalmente la trayectoria del sistema o realice un movimiento alternativo para evitar la colisión.

BIBLIOGRAFÍA

- Ada, L. (2012 Julio 29). *Force Sensitive Resistor (FSR) – Overview*. Adafruit. Recuperado de: <https://learn.adafruit.com/force-sensitive-resistor-fsr>
- Al-Sada, M., Höglund, T., Khamis, M., Urbani, J. & Nakajima, T. (2019). *Orochi: Investigating Requirements and Expectations for Multipurpose Daily Used Supernumerary Robotic Limbs*. Recuperado de: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3311823.3311850>
- Amazon (2022). *Everlasting Comfort Lumbar Support Pillow for Office Chair Back*. Recuperado de: <https://www.amazon.com/dp/B01IJNJAZ0?th=1>
- Amazon (2021). *Interruptor basculante de 3 pines SPDT ON-Off-ON de 3 posiciones de CA 16 A/250 V 20 A/125 V, color negro*. Amazon. Recuperado de: <https://www.amazon.com/-/es/Interruptor-basculante-pines-Off-posiciones/dp/B01DZ8AE00>
- Amazon (s.f.). *Caja de Conexiones Eléctricas Plástico, IP65 ABS (200 * 120 * 75mm)*. Recuperado de: <https://www.amazon.es/Conexiones-Instrumentos-El%C3%A9ctricas-Resistente-Interiores/dp/B08B1RJ51S?th=1>
- Amazon (s.f.). *IP65 Resistente al agua ABS Proyecto eléctrico Caja Caja Caja de instrumentos (89 * 59 * 35mm)*. Recuperado de: <https://www.amazon.es/Conexiones-Instrumentos-El%C3%A9ctricas-Resistente-Interiores/dp/B08B1QRV29?th=1>
- Arduino (2022). *Arduino® UNO R3*. Recuperado de: <https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/A000066-datasheet.pdf>
- Balderrama, P. (2018 Noviembre). *Prototipo para la asistencia en la rehabilitación de los movimientos de flexión y extensión del pie*. Universidad Nacional de Córdoba. Recuperado de: <https://rdu.unc.edu.ar/bitstream/handle/11086/11400/Proyecto%20Integrador%20-%20Balderrama%20Surroca%20Pablo.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Barrientos, A., Peñin, L., Balaguer, C. & Aracil, R. (1997). *Fundamentos de robótica*. Madrid. McGraw-Hill. Recuperado de: <https://eltrasteroloco.wordpress.com/wp-content/uploads/2017/03/267380685-fundamentos-de-robotica.pdf>
- Bestratén, M., Hernández, A., Luna P., Nogareda, C., Nogareda S., Oncins, M. & Solé, M. (2008). *Ergonomía*. Madrid. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. Recuperado de: <https://www.insst.es/documents/94886/710902/Ergonom%C3%ADa+-+A%C3%B1o+2008.pdf/18f89681-e667-4d15-b7a5-82892b15e1fa>
- Calderón, S. (s.f.). *Salud y Seguridad en la Industria de Restaurantes*. ACADEMIA. Recuperado de

<https://cutt.ly/gEdSU62>

Cavallo, C. (s.f.). *DC Motors vs. Servo Motors - What's the Difference?* Thomas. Recuperado de: <https://www.thomasnet.com/articles/machinery-tools-supplies/dc-motors-vs-servo-motors/>

Chargex (2022). *24V 25Ah Lithium Ion Battery*. Recuperado de:

<https://www.lithiumion-batteries.com/products/24-volt-lithium-batteries/24v-25ah-lithium-ion-battery>

CNCIathing (2022). *Nylon PA6 Vs PA11 Vs PA12 For 3D Printing: What's The Difference Between Them*. Recuperado de:

<https://www.cnclathing.com/guide/nylon-pa6-vs-pa11-vs-pa12-for-3d-printing-whats-the-difference-between-them>

Corke, P. (2011). *Robotics, Vision and Control: Fundamental Algorithms in MATLAB*. Brisbane. Springer. [PDF]

Corporación Emacin (2021). *Poliamida 6 SA – (PA)*. Recuperado de:

<https://www.emacin.com.pe/productos-plasticos-tecnicos-poliamida-6-sa-nylon.php>

Costa, C. & Tombesi, C. (2020 Septiembre 07). *Covid-19: el gráfico que muestra el riesgo de contagio de coronavirus según la actividad que hagas*. BBC News. Recuperado de

<https://www.bbc.com/mundo/noticias-54014422>

Coquillat, D. (2012 Diciembre 18). *El 66% de los clientes está dispuesto a pagar más por un servicio al cliente excelente*. DiegoCoquillat. Recuperado de

<https://www.diegocoquillat.com/el-66-de-los-clientes-esta-dispuesto-pagar-mas-por-servicio-al-cliente-excelente/>

Cyberdyne (2022). *Hal Lumbar Type for Labor Support*. Recuperado de:

https://www.cyberdyne.jp/english/products/Lumbar_LaborSupport.html

Dakota Lithium (s.f.). *Dakota Lithium 24V 50Ah Deep Cycle Lifepo4 Single Battery*. Recuperado de:

<https://dakotalithium.com/product/dakota-lithium-24v-50ah-deep-cycle-marine-trolling-motor-solar-energy-rv-single-battery/>

De Negri, V., Muñoz, K. & Vigolo, V. (2021 Mayo). *Design Methodology for Mechatronic Systems: an Approach Using Function/Means Tree and Channel/Agency net*. Universidad Federal de Santa Catarina (UFSC) & Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP). Recuperado de

<http://laship.ufsc.br/site/wp-content/uploads/2021/08/Mechatronic-design-methodology-Digital-Ebook.pdf>

Dynamixel (s.f.). *What is Dynamixel?* Recuperado de:

<http://www.dynamixel.com/whatisdxi.php>

ElectricMotorSport. (s.f.). *EMUS BMS Mini 3*. Recuperado de:

<https://www.electricmotorsport.com/bms-mini-3.html>

ElectroComponentes (2021). *Interruptor Palanca SPDT ON - ON 6A conmutador*. Recuperado de: <https://www.electrocomponentes.es/palanca/661-interruptor-palanca-spdt-on-on-6a-conmutador.html>

EMUS BMS (2022). *BMS Mini 3*. Recuperado de:

<https://emusbms.com/product/bms-mini-3>

Engineers Edge (s.f.). *ABS Plastic Filament Engineering Information*. Recuperado de:

https://www.engineersedge.com/3D_Printing/abs_plastic_filament_engineering_information_14211.htm

Formlabs (s.f.). *Guía de materiales de impresión 3D: Tipos, aplicaciones y propiedades*.

Recuperado de:

<https://formlabs.com/latam/blog/materiales-impresion-3d/>

García, A. (2016 Diciembre 02). *¿Qué es y cómo funciona un servomotor?* Panamahitek.

Recuperado de:

<http://panamahitek.com/que-es-y-como-funciona-un-servomotor/>

Hall-Geisler, K. (2010 Diciembre 20). *How can lithium-ion batteries improve hybrids?*

Howstuffworks. Recuperado de:

<https://auto.howstuffworks.com/lithium-ion-batteries-improve-hybrids1.htm>

Hernández, S. (2014). *1. ¿Qué es un microcontrolador?* Sherlin.Xbot. Recuperado de:

<http://sherlin.xbot.es/microcontroladores/introduccion-a-los-microcontroladores/que-es-un-microcontrolador>

Hibbeler, R. (2011). *Mecánica de Materiales*. 8va edición. Pearson Education. México. [PDF]

Hussain, I., Anwar, M., Iqbal, Z., Muthusamy, R., Malvezzi, M., Seneviratne, L., Gan, D., Renda.,

F. & Praticchizzo, D. (2019 Abril). *Design and Prototype of Supernumerary Robotic Finger (SRF)*

Inspired by Fin Ray R Effect for Patients Suffering from Sensorimotor Hand Impairment. [2019

2nd IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft)]. Recuperado de

<https://ieeexplore.ieee.org/document/8722748>

HWAXTU (2022). *Green Ring LED Light Stainless Steel Lock Button Switch INO INC, 19 mm,*

24V DC. Recuperado de:

https://www.hwaxtuto.com/index.php?main_page=product_info&products_id=289404

Infineon (s.f.). *Battery Management System (BMS)*. Recuperado de:

<https://www.infineon.com/cms/en/applications/solutions/battery-management-system/>

Jarema, R. (2018 Abril 12). *Batteries — choose the right power source for your robot*. Husarion.

Recuperado de:

<https://medium.com/husarion-blog/batteries-choose-the-right-power-source-for-your-robot-5417a3ec19ca>

Junge, K., Hughes, J., Thurutel, T. & Iida, F. (2020 Abril 02). *Improving Robotic Cooking Using Batch Bayesian Optimization*. IEEE Robotics and Automation Letters. Recuperado de <https://ieeexplore.ieee.org/document/8954776>

Kleckers, T. (s.f.). *Spoilt for choice: piezoelectric or strain gauge based force transducers?* HBM. Recuperado de: <https://www.hbm.com/en/3719/piezoelectric-or-strain-gauge-based-force-transducers/>

Lad, N., Ballal, Y. & Kulkarni, P. (2015 Octubre). *Study of End Effectors – A Review*. International Journal of Trend in Research and Development, 2(5). Recuperado de: <http://www.ijtrd.com/papers/IJTRD201.pdf>

Lee, C. & Oh, S. (2019 Mayo 07). *Development, Analysis, and Control of Series Elastic Actuator-Driven Robot Leg*. Neurobot. Recuperado de <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fnbot.2019.00017/full>

Masferreteria (2018). *Diferencias entre maquinaria hidráulica, neumática y eléctrica: aprende a distinguirlas*. Recuperado de: <https://www.masferreteria.com/blog/diferencias-maquinaria-hidraulica-neumatica-electrica-aprende-distinguirlas/>

Mayo Clinic (2019 Mayo 21). *Electromiografía*. Mayo Clinic. Recuperado de <https://www.mayoclinic.org/es-es/tests-procedures/emg/about/pac-20393913>

Ministerio de Trabajo y Promoción de Empleo. (2008 Noviembre 28). *Resolución Ministerial N° 375-2008-TR: Norma Básica de Ergonomía y de Procedimiento de Evaluación de Riesgo Disergonómico*. Gobierno del Perú. Recuperado de <https://www.gob.pe/institucion/mtpe/normas-legales/394457-375-2008-tr>

Moley Robotics (2021). *The future is served*. Moley. Recuperado de <https://moley.com/>

MyLithiumBattery (s.f.). *Lithium-Ion battery 24V 50Ah – LiFePO4 – PowerBrick®*. Recuperado de: <https://www.mylithiumbattery.com/shop/12v-lithium-ion-battery-packs/lithium-battery-24v/lithium-ion-battery-24v-50ah-lifepo4-powerbrick/>

Nachazel, T. (2020 Agosto 13). *What is a Strain Gauge and How Does it Work?* Michigan Scientific Corporation. Recuperado de: <https://www.michsci.com/what-is-a-strain-gauge/>

Naylamp Mechatronics (2021). *Módulo Bluetooth HC05*. Recuperado de: <https://naylampmechatronics.com/inalambrico/43-modulo-bluetooth-hc05.html>

Naylamp Mechatronics (2021). *Raspberry Pi 4 B 4GB*. Recuperado de: <https://naylampmechatronics.com/raspberry-pi/742-raspberry-pi-4-b-4gb.html>

Naylamp Mechatronics (2017). *Tutorial Básico De Uso Del Módulo Bluetooth HC-06 Y HC-05*. Recuperado de:

https://naylorlampmechatronics.com/blog/12_tutorial-basico-de-uso-del-modulo-bluetooth-hc-06-y-hc-05.html

Nguyen, P., Mohd, I., Sparks, C., Arellano, F., Zhang, W. & Polygerinos, P. (2019 Mayo). *Fabric Soft Poly-Limbs for Physical Assistance of Daily Living Tasks*. [2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)]. IEEE Xplore. Recuperado de <https://ieeexplore.ieee.org/document/8794294>

Nguyen, P., Sparks, C., Nuthi, S., Vale, M. & Polygerinos, P. (2019). *Soft Poly-Limbs: Toward a New Paradigm of Mobile*. SOFT ROBOTICS, 6(1). Recuperado de: <https://par.nsf.gov/servlets/purl/10088810>

Nielsen (2016 Agosto). *¿Qué hay en nuestra comida y en nuestra mente? Ingredientes y tendencias de comida fuera de casa alrededor del mundo*. Nielsen. Recuperado de https://www.nielsen.com/wp-content/uploads/sites/3/2019/04/EstudioGlobal_NuestraComidaYMente.pdf

Nomada (2022). *Interruptor ON-OFF tipo Rocker*. Recuperado de: <https://nomada-e.com/store/robotica/385-interruptor-on-off-tipo-rocker.html>

OnRobot (s.f.). *Flexible, Large-Stroke 3-Finger Gripper*. Recuperado de: <https://onrobot.com/us/products/3fg15-three-finger-gripper>

Or, B. (2021 Julio 31). *What is IMU?* Towards Data Science. Recuperado de: <https://towardsdatascience.com/what-is-imu-9565e55b44c>

Parietti, F., Chan, K., Hunter, B. & Asada, H. (2015 Mayo). *Design and Control of Supernumerary Robotic Limbs for Balance Augmentation*. [2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)]. Recuperado de <https://ieeexplore.ieee.org/document/7139896>

Parietti, F., Asada, H. (2014 Mayo). *Supernumerary Robotic Limbs for Aircraft Fuselage Assembly: Body Stabilization and Guidance by Bracing*. [2014 IEEE International Conference on Robotics & Automation (ICRA)]. IEEE Xplore. Recuperado de <https://ieeexplore.ieee.org/document/6907002>

Parietti, F. (s.f.). *Supernumerary Robotic Limbs (SRL)*. MIT d'Arbeloff Lab. Recuperado de <http://darbelofflab.mit.edu/robotics-research/supernumerary-robotic-limbs-srl/>

Piltch, A., (2021 Octubre 11). *Which Raspberry Pi Should I Buy?* Tomshardware. Recuperado de: <https://www.tomshardware.com/how-to/raspberry-pi-buying-guide>

PowerTech (2022). *Lithium-Ion Battery 24V – 32Ah – 819Wh – PowerBrick+*. Recuperado de: <https://www.powertechsystems.eu/home/products/24v-lithium-battery-pack-powerbrick/32ah-24v-lithium-ion-battery-pack-819wh-powerbrick-lithium/>

Puiu, D., Moldoveanu, F. & Cernat, M. (2009). *The Distributed Control of an Articulated Arm Robot*. [2009, 6th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)]. IEEE Xplore. Recuperado de:

<https://ieeexplore.ieee.org/document/5355322>

Raspberry Pi (2019). *Raspberry Pi 4 Model B*. Recuperado de:

<https://datasheets.raspberrypi.com/rpi4/raspberry-pi-4-datasheet.pdf>

RoboteQ (2020). *BMS1040A*. Recuperado de:

<https://www.roboteq.com/products/power-managment/products-battery-management-systems/bms1040a-detail>

ROBOTIQ (s.f.). *3-Finger Adaptive Robot Gripper*. Recuperado de:

https://robotiq.com/products/3-finger-adaptive-robot-gripper?ref=nav_product_new_button

Robotis (2022). *Compatibility*. Recuperado de:

http://en.robotis.com/service/compatibility_table.php?cate=d

Robotis (2022). *Dynamixel*. Recuperado de:

<https://www.robotis.us/dynamixel/>

Robotis (2022). *DYNAMIXEL MX-106R*. Recuperado de:

https://www.robotis.us/dynamixel-mx-106r/?_ga=2.85157776.804300137.1650896276-1105625338.1647694420

Robotis (2022). *DYNAMIXEL MX-64R*. Recuperado de:

<https://www.robotis.us/dynamixel-mx-64r/>

Robotis (2022). *DYNAMIXEL PH54-100-S500-R*. Recuperado de:

<https://www.robotis.us/dynamixel-ph54-100-s500-r/>

Robotis (2022). *U2D2 Power Hub Board Set*. Recuperado de:

<https://www.robotis.us/u2d2-power-hub-board-set/>

Robotis (2022). *U2D2*. Recuperado de:

<https://www.robotis.us/u2d2/>

RobotShop (s.f.). *5mm Colored LED Pack (50pk)*. Recuperado de:

<https://www.robotshop.com/en/5mm-colored-led-pack-50pk.html>

RobotShop (s.f.). *SparkFun ICM-20948 9DoF IMU Breakout (Qwiic)*. Recuperado de:

<https://www.robotshop.com/en/sparkfun-icm-20948-9dof-imu-breakout-qwiic.html>

Russo, A. & Russo, J. (Director). (2018). *Avengers: Infinity War* [Film]. Marvel Studios.

Samadikhoshkho, Z., Zareinia, K. & Janabi-Sharifi, F. (2019) A Brief Review on Robotic Grippers Classifications. [2019 IEEE Canadian Conference of Electrical and Computer Engineering (CCECE)]. IEEE Xplore. Recuperado de:

<https://ieeexplore.ieee.org/document/8861780>

Samsung Newsroom (2019 Febrero 20). *Get a Glimpse of the Next-generation Innovations on Display at Samsung's Technology Showcase*. Samsung. Recuperado de

<https://news.samsung.com/global/get-a-glimpse-of-the-next-generation-innovations-on-display-at-samsungs-technology-showcase>

- Sanz, J. (2018 Julio). *Robots industriales colaborativos: una nueva forma de trabajo*. Recuperado de:
<https://documentacion.fundacionmapfre.org/documentacion/publico/es/media/group/1098734.d>
[o](#)
- Shin, C., Bae, J. & Hong, D. (2015 Octubre). *Ceiling Work Scenario Based Hardware Design and Control Algorithm of Supernumerary Robotic Limbs*. [2015 15th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2015)]. IEEE Xplore. Recuperado de:
<https://ieeexplore.ieee.org/document/7364817>
- Shopstar (s.f.). *Unión Ángulo Pesado Zincado 2" x 2 unidades*. Recuperado de:
<https://www.shopstar.pe/union-angulo-pesado-zincado-2--x-2-unidades-15741/p>
- SmartRobotWorks (s.f.). *ROBOTIS Dynamixel PH54-100-S500-R*. Recuperado de:
<https://www.smartrobotworks.com/PH54-100-S500-R.asp>
- Sparkfun (s.f.). *Force Sensitive Resistor – Small*. Recuperado de:
<https://www.sparkfun.com/products/9673>
- Sparkfun (s.f.). *SparkFun 9DoF IMU Breakout - ICM-20948 (Qwiic)*. Recuperado de:
<https://www.sparkfun.com/products/15335>
- Srinivas, S., Singh, G. & Haider, U. (2015). *Multipurpose Supernumerary Robotic Limbs for Industrial and Domestic Applications*. IEEE Xplore. Recuperado de:
<https://ieeexplore.ieee.org/document/7283889>
- Susana, S. (2020 Junio 17). *Guía completa: plásticos en la impresión 3D*. 3Dnatives. Recuperado de: <https://www.3dnatives.com/es/plasticos-impresion-3d-22072015/#!>
- STAFSL SYSTEMS (2022). *BMS1102S, Battery Management System Monitor Unit*. Recuperado de: <https://stafslsystems.com/product/bms1102s/>
- Strasser, T., Rooker, M., & Ebenhofer, G. (2011). *An IEC 61499 distributed control concept for reconfigurable robots*. International Journal of Computer Aided Engineering and Technology, 3(3/4), 344. Recuperado de:
<https://www.inderscienceonline.com/doi/abs/10.1504/IJCAET.2011.040052>
- Takosoglu, J. (2020 Julio 11). *Angular position control system of pneumatic artificial muscles*. Open Engineering. Recuperado de
<https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/eng-2020-0077/html>
- Teja, R. (2021 Mayo 03). *What is a Switch? What are the Different Types of Switches?* Electronics Hub. Recuperado de:
<https://www.electronicshub.org/switches/>
- Telegenov, K., Tlegenov, Y. & Shintemirov, A. (2015 Enero). *A Low-Cost Open-Source 3-D-Printed Three-Finger Gripper Platform for Research and Educational Purposes*. [2015 20th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR), 289–293]. IEEE Xplore. Recuperado de:

<https://ieeexplore.ieee.org/document/7109102>

Modelo CAD disponible en:

<https://www.alaris.kz/research/open-source-3d-printed-underactuated-robotic-gripper/>

Thorat, S. (s.f.). *Strain Gauge | Working, Types, Diagram, Applications*. LearnMech. Recuperado de:

<https://learnmech.com/strain-gauge-advantages-and-disadvantages-application/>

Tong, Y. & Liu, J. (2021 Mayo). *Review of Research and Development of Supernumerary Robotic Limbs*. IEEE/CAA JOURNAL OF AUTOMATICA SINICA, 8(5). Recuperado de

<https://ieeexplore.ieee.org/document/9395536>

Townsend, K. (2015). *Adafruit BNO055 Absolute Orientation Sensor*. Adafruit. Recuperado de:

<https://learn.adafruit.com/adafruit-bno055-absolute-orientation-sensor>

Unchained Robotics (2022). *SoftGripping 3 Finger Centric Gripper*. Recuperado de:

<https://unchainedrobotics.de/en/products/end-of-arm-effectors/grippers/soft-grippers-en/softgripping-3-finger-zentrischgreifer/>

Véronneau, C., Denis, J., Lebel, L., Denninger, M., Blanchard, V., Girard, A. & Plante, J. (2020 Abril). *Multifunctional Remotely Actuated 3-DOF Supernumerary Robotic Arm Based on Magnetorheological Clutches and Hydrostatic Transmission Lines*. IEEE ROBOTICS AND AUTOMATION LETTERS, 5(2). Recuperado de

<https://ieeexplore.ieee.org/document/8962256>

Weerg staff (2020). *¿Cuáles son las diferencias entre el PA12 y el PA11?* Recuperado de:

<https://www.weerg.com/es/guias/cuales-son-las-diferencias-entre-el-pa12-y-el-pa11>

Weis O. (2021 Octubre 20). *Guía de la comunicación RS485*. Electronic Team, Inc. Recuperado de: <https://www.eltima.com/es/article/rs485-communication-guide/>

Yang, B., Huang, J., Chen, X., Xiong, C. & Hasegawa, Y. (2021 Agosto). *Supernumerary Robotic Limbs: A Review and Future Outlook*. IEEE TRANSACTIONS ON MEDICAL ROBOTICS AND BIONICS, 3(3). Recuperado de

<https://ieeexplore.ieee.org/document/9446590>

Zhai, J., Pan, G., Yan, W., Fu, Z. & Zhao, Y. (2015). *Dynamic Analysis of a Dual-arm Humanoid Cooking Robot*. [10th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)]. IEEE Xplore. Recuperado de

<https://ieeexplore.ieee.org/document/7334226>

ANEXOS

ANEXO A: Análisis de los requerimientos y requisitos de usuario.

En este proyecto, los usuarios objetivo-directos son los chef o cocineros de restaurantes, quienes usarían las SRLs como ayuda en las actividades de cocina. Sin embargo, los gerentes de los restaurantes también son usuarios, pues el buen funcionamiento de las SRLs afecta en cierta medida a las ganancias de su restaurante. Para poder tener una perspectiva más amplia acerca de las necesidades de los cocineros en los restaurantes, se entrevistaron a tres usuarios, los cuales se detallarán a continuación.

- Usuario 1: Patricia Yamamoto - Dueña y chef del restaurante de comida japonesa K'tana.
- Usuario 2: Sergio Galla - Gerente general y dueño del restaurante café Chelo's.
- Usuario 3: Tony Moromisato - Gerente general y dueño del restaurante parrillero Baco y Vaca; y del café Dulanto.

(Las transcripciones de las entrevistas se encuentran al final de este ANEXO).

Posteriormente, se realizó la Tabla 0.1 en donde se muestran los requerimientos de cada usuario divididos por categorías. Asimismo, se muestran los requisitos del usuario que derivan de los requerimientos. Los requisitos de usuario son considerados para la generación de los requisitos de diseño que los satisfarán.

Teniendo en cuenta lo revisado en el marco teórico, el estado del arte y considerando lo mencionado en las entrevistas, se generó la Tabla 0.2. En esta tabla se muestran las relaciones que existen entre los requisitos de usuario y los requisitos de diseño. Cabe resaltar que a la derecha de cada requisito de diseño se ha colocado un (1) o un (2), en donde un (1) significa que existe una relación y un (2) significa que esta relación entre requisitos es más fuerte. Además, a la derecha de cada requisito de usuario, hay un número del 1 al 4 que representa su factor de importancia.

Tabla 0.1. Requerimientos y requisitos de los usuarios entrevistados.

Usuario	Categoría	Requerimientos	Requisitos
Usuario 1	Funcionalidad	Los brazos robóticos pueden ayudar a colocar los platos para servir la comida o alcanzar objetos al cocinero.	Capacidad de mover objetos
	Confiabilidad	El sistema debe ser preciso para que no se choque con las personas de los alrededores.	Alta precisión
	Seguridad	Los brazos no deben chocar con las personas de los alrededores	Bajo riesgo de accidentes
	Portabilidad	Los brazos no deben ocupar mucho espacio.	Sistema compacto
Usuario 2	Ergonomía	Los brazos no deben sobrecargar al cocinero porque ellos trabajan parados casi 8 horas al día.	Peso ligero
			No sobrecargar al usuario
	Seguridad	Considerar que se trabaja con flamas y cosas calientes.	Bajo riesgo de accidentes
	Funcionalidad	Los brazos no deberían botar las cosas si el cocinero realiza movimientos bruscos	Posición estable
Tiempo	El tiempo de espera es muy importante en un restaurante, mientras más rápido salga el producto, más rápido se va la gente y se puede atender a más personas.	Operación rápida	
Usuario 3	Ergonomía	El peso es muy importante y debe ser lo más ligero posible para que el cocinero pueda trasladarse de manera rápida y ágil porque en la cocina hay que moverse con rapidez	Peso ligero
			No interferir con movimientos del usuario
	Confiabilidad	El sistema debe tener la precisión del caso para que cumpla con todas las órdenes.	Alta precisión
	Funcionalidad	Los brazos deben obedecer rápida y efectivamente. Los brazos deben tener una amplia gama de funciones para ayudar en múltiples tareas.	Rápida capacidad de respuesta
			Versatilidad
Usabilidad	El sistema debe ser fácil y amigable de usar para que cualquier persona lo pueda controlar.	Operación fácil	

Tabla 0.2. Relación entre requisitos de usuario y requisitos de diseño.

Requisitos de usuario	Requisitos de diseño	
Capacidad de mover la cuchara (3)	Capacidad de retracción (2) Cambio de efectores (1)	Fuerza controlada para toma de objetos (1) Fuerza máxima de carga (2)
Capacidad de secar los platos (3)	Capacidad de retracción (2) Fuerza controlada para el secado (2)	Fuerza controlada para toma de objetos (1) Cambio de efectores (1) Fuerza máxima de carga (2)
Alta precisión (4)	Fuerza controlada para toma de objetos (1) Compensar perturbaciones inesperadas (1)	Algoritmo de control preciso de agarre, levante y desplazamiento (2) Fuerza controlada para el secado (1)
Bajo riesgo de accidentes (4)	Fuerza controlada para la toma de objetos (2) Compensar perturbaciones inesperadas (1) Centro de masa del sistema cerca al centro de gravedad del usuario (1)	Algoritmo de control preciso de agarre, levante y desplazamiento (1) Fuerza controlada para el secado (2)
Sistema compacto (2)	Centro de masa del sistema cerca al centro de gravedad del usuario (1)	Dimensiones máximas del sistema (2)
Peso ligero (4)	Sistema liviano (2) Dimensiones máximas del sistema (1)	Peso balanceado (1)
No sobrecargar al usuario (4)	Sistema liviano (2) Bajo ruido (2) Peso balanceado (2) Dimensiones máximas del sistema (1) Centro de masa del sistema cerca al centro de gravedad del usuario (2)	Capacidad de retracción (1) Baja vibración (2) Soporte cómodo (2) Fácil de limpiar (1)
Operación rápida (2)	Bajo tiempo de respuesta (2)	Dimensiones máximas del sistema (1) Fácil de limpiar (1)
No interferir con los movimientos del usuario (3)	Bajo tiempo de respuesta (2) Dimensiones máximas del sistema (1)	Capacidad de retracción (2) Compensar perturbaciones inesperadas (1)
Rápida capacidad de respuesta (4)	Bajo tiempo de respuesta (2)	Compensar perturbaciones inesperadas (1)
Versatilidad (2)	Capacidad de retroceso (1) Fuerza controlada para la toma de objetos (1) Fuerza máxima de carga (1)	Algoritmo de control preciso de agarre, levante y desplazamiento (2) Cambio de efectores (2)

Operación fácil (2)	Comandos de control sencillos (2)	
Sistema estable (3)	Fuerza controlada para la toma de objetos (1)	Algoritmo de control preciso de agarre, levante y desplazamiento (2)
	Peso balanceado (1)	Fuerza controlada para el secado (1)
	Compensar perturbaciones inesperadas (2)	Fuerza máxima de carga (1)
	Centro de masa del sistema cerca al centro de gravedad del usuario (2)	

Cabe resaltar que el requisito de usuario de “Capacidad para mover objetos” se alineó con lo establecido en el alcance del proyecto y se dividió en los requisitos “Capacidad para mover la cuchara” y “Capacidad para secar los platos” pues estas dos actividades serían las que van a realizar las SRLs.

Entrevistas con los usuarios:

Entrevista con Patricia Yamamoto – K’tana

- ¿Cuál es su cargo?
Soy la dueña y chef del restaurante
- ¿Alguna vez ha sentido que le falta tiempo en la cocina?
Cuando empezamos y abrimos, tenía que estar en la cocina más tiempo, pero ahora me dedico más a controlar, ver que los platos salgan bien, pero ya tenemos 13 años entonces ya llegamos a un punto en el que la cocina está organizada con el personal suficiente para que funcione bien.
- ¿Cuáles son las actividades que considera que le demandan más tiempo en la cocina (incluye cocinar y la limpieza de los utensilios)?
Limpieza, producción, eso, sobre todo.
- ¿Cuál considera que le demandaba más tiempo?
La parte del lavado es un tema complicado a veces porque tienes que tener una persona que se encargue de eso. La parte de producción, eso también demora, es demandante, porcionar, pesar los alimentos, el “*mise and place*”.
- ¿Considera que le hubieran sido de ayuda un par de brazos extra para secar los platos o lavarlos cuando se encargaba de la cocina?

Creo que con lo que teníamos, no es que faltara manos pero sí había bastante trabajo. De hecho, teníamos una máquina lavaplatos también, no tan industrial o grande, pero ayudaba bastante.

- ¿Cree que hubiera necesitado un par de brazos extra para mover la cuchara de las ollas cuando usted realizaba otras actividades?

Brazos extra no, pero hacer esas labores como que tienes que tener una persona ahí permanente en los puestos para que puedan realizar esa labor. Por eso quizá si uno no cuenta con suficiente personal, de todas maneras, van a faltar manos, pero si se cuenta con las personas suficientes para que pueda realizar bien su función, entonces se puede hacer bien, no es que falten manos.

Ahora en la pandemia, hemos tenido que reducir personal en la cocina, ahora hay menos gente. Los chicos que se han quedado ahora se dedican a hacer varias cosas, no solamente algo específico.

[Después de explicarle el proyecto y mostrarle la imagen de las SRLs]

- ¿En qué otra actividad cree que los brazos robot pudieran asistir?

De repente colocar los platos para servir la comida, a veces tú estás ocupado y tienes que poner un plato que no está a tu alcance, está a dos o tres pasos. Poner el plato en la mesa para poder servir la comida.

También, a la hora que saltean o hacen un plato con arroz, hay una persona que se encarga de pasarle el plato a la persona que está salteando. Otra aplicación sería alcanzar objetos que no están al alcance del cocinero en ese momento. Básicamente, mover cosas, no creo que pueda hacer un tema de cortar o picar. También, habría que ver el espacio que ocupa o si es que la cocina no es tan grande y hay personas un poco cerca, que se pueda manipular en ese momento en esa área. Que sea preciso para que no se choque con otras personas de los alrededores.

Entrevista con Sergio Galla – Chelo's

- ¿Cuál es su cargo?

Soy gerente general del restaurante café Chelo's

- ¿Alguna vez ha sentido que le falta tiempo en la cocina (cocinar y limpieza)?

Sí, siempre falta tiempo. Siempre dice (los empleados) que les falta tiempo pero ya uno por la experiencia que tiene como que no se le da mucha importancia a eso no porque a veces “te amarran macho”: una cosa que lo puede hacer 1 persona quieren que lo hagan 3.

- ¿Qué tan importante considera que es el tiempo en un restaurante, en particular al cocinar?

El tiempo de espera es importantísimo. El secreto es que mientras más rápido salga el producto, que es lo que el cliente quiere, también más rápido se va la gente y pueden entrar otras personas, estamos hablando de rotación. Esto también incluye que tan rápido cocinan los cocineros, todo eso es un circuito.

- ¿Cuáles son las actividades que considera que le demandan más tiempo en la cocina (incluye producción de cocina y la limpieza de los utensilios)?

Lo que demanda más tiempo es la parte de preparar los productos del día. Tener los productos cortados, lavados, su limpieza y la limpieza del sitio a la hora que se termina porque preparar el plato es un poco más rápido.

Ahora, a pesar de que casi no paro mucho en la tienda porque tengo personas encargadas. Pero al comienzo si estaba ahí. Lo que pasa es que antes no solo era uno (el local) sino tenía 4 locales más, no podía estar en todos lados

Ahora con la pandemia, comenzó a sobrar gente y ahora ya tengo encargados que hacen las cosas.

- ¿Considera que a sus cocineros les vendrían bien un par de brazos extra para mover la cuchara de la olla mientras realizan otras actividades de cocina?

No, no, yo creo que no porque imagínate que antes la producción era 4 veces más que la de ahora, si antes funcionaba, ¿por qué ahora necesitaría más gente?

- Entonces en el caso de la limpieza, ¿Tampoco necesitaría un par de brazos extra?

En limpieza si necesito gente de todas maneras, hay personal para eso. Lo que te digo es la Limpieza general que antes se hacía más seguido

[Después de explicarle el proyecto y mostrarle la imagen de las SRLs]

- ¿En qué otra actividad cree que los brazos robot pudieran asistir?

¿Pero, esos brazos como es que van a funcionar, tendrían que tener una inteligencia o algo así?

[Explicación del alcance de las SRLs según la literatura leída hasta ese momento]

Yo lo vería más factible en el lavado, pero no en la cocina porque acuérdate que trabajas con cosas calientes, con flama, con aceite y es peligrosísimo eso.

Tendríamos que ver si es que esos brazos ayudarían o estorbarían en la cocina. Ahora por como veo donde están los brazos y donde está la persona, lo vería más factible en el tema del lavado porque es más estático.

Pero, en la cocina el “*pata*” está cocinando y se va a traer una verdura que se le olvido u otra cosa que se le olvidó y esos brazos van a estar botando todas las cosas.

La idea es que no pese nada, acuérdate que ellos trabajan casi 8 horas parados.

[Se menciona la aplicación de soporte de las SRLG]

Eso está bacán.

No pensaba que sería una combinación con la persona porque así es peligroso, yo pensaba que era un ente preparándolo exactamente.

La idea es que ese aparato haga algo sencillo, por ejemplo, hace sopas. A la hora que sale el pedido, si es que es una porción le echa tanto de agua un polvito de algo, o internamente lo bate y sale un “*fuchifú*” (sopa de chifa) por ejemplo. Bota un gramaje de sal, un gramaje de pimienta y así, eso es lo que pensaba de lo que había visto allá en Japón.

Entonces, considerar la seguridad, trabajas con agua caliente de todas maneras, que no bote las cosas, el peso es importante. Eso que me decías que tenga un cuerpo metálico para sostener su cuerpo eso me parece bacán para que el “*pata*” (el cocinero) no esté en una posición incómoda.

Entrevista con Tony Moromisato – Baco & Vaca y Dulanto

- ¿Cuál es su nombre? ¿Cuál es el nombre del restaurante donde trabaja? ¿Cuál es su cargo?

Soy gerente general del restaurante Bako & Baka, y el restarante Dulanto.

- ¿Alguna vez ha sentido que le falta tiempo en la cocina (cocinar y limpieza)?
Por supuesto, sobre todo fines de semana y feriados
- ¿Qué tan importante considera que es el tiempo en un restaurante, en particular al cocinar?

El tiempo es muy importante porque cuando tú te preparas, por ejemplo ¿has escuchado del *mise and place*? Es preparar todos los insumos antes de la apertura del local, eso consume tiempo.

Tener mayor tiempo para eso significa que a la hora que lleguen los pedidos y sobre todo en las horas punta porque podría ser en la hora del desayuno o en la hora del almuerzo, tener tiempo suficiente es importante para que salgan (los platos) de una forma rápida y bien elaborados.

- ¿Cuáles son las actividades que considera que le demandan más tiempo en la cocina (incluye cocinar y la limpieza de los utensilios)?

El tiempo tanto de preparación de los insumos como de la limpieza es importante. Yo creo que donde más demanda tiempo es en la producción por la cantidad de platos y la cantidad de artículos que tienes. El tiempo que se dedica a la preparación es importante porque involucra la recepción de los alimentos, limpieza, porcionamiento, la precocción y la elaboración de los distintos platos y alimentos que vengan. La limpieza se simplifica si la realizan de una manera continua, diaria, se realiza en un menor tiempo

- ¿Considera que le vendría bien un par de brazos extra para mover la cuchara de la olla mientras realiza otras actividades de cocina?

Claro, si se podrían simplificar esos pasos, obviamente el personal de cocina, llámese el cocinero, estaría más enfocado en la preparación del plato. Lo que si demanda mucho tiempo es hacer los preparativos, el porcionamiento las precocciones de los insumos.

- Y en el caso de la limpieza ¿Considera que le vendría bien un par de brazos extra para que solamente una persona lave y los brazos extra sequen los platos?

Si por supuesto también es importante. Optimizar ese tiempo para dedicarle más a la producción, eso ayudaría a que los platos salgan más rápidos y mejor preparados

[Después de explicarle el proyecto y mostrarle la imagen de las SRLs]

- ¿En qué otra actividad cree que los brazos robot pudieran asistir?

Me parece muy interesante. Por ejemplo, podría ser que mientras que el cocinero está emplatando, está preparando el plato para salir, los brazos pueden ayudar para el siguiente plato a picar cebolla o hacer una crema o una sopa; o moviendo la canastilla de la freidora para que el producto no se queme, o ayudar en un salteado en una sartén mientras el cocinero va este preparando otra cosa como una ensalada, por ejemplo.

El peso es muy importante. Más o menos la jornada de un cocinero es de 8 a 9 horas en el área de cocina y considerando este rango, tener un aparato que este dependiendo de sujetarse de su cuerpo, tendría que ser lo más ligero posible para que sea más llevadero, más cómodo, para que el cocinero pueda trasladarse de una manera más rápida, más ágil porque dentro de una cocina hay que moverse con rapidez.

Los brazos tienen que ser seguros, que obedezcan rápidamente, eficientemente. Rápida y sobre todo precisa para evitar accidentes porque cuando uno se mueve con rapidez, de repente gira, y el brazo (robótico) no reacciona y puede botar una sartén o un plato.

Deben ser ligeros para que no generen un desgaste físico y precisos por ejemplo a la hora de cortar para evitar accidentes. Se deben manejar bien, con precisión.

Hay que considerar la seguridad porque imagínate una olla con una sopa caliente, a la hora que gira, puede botar la olla y generar quemaduras al personal que esté en ese momento

Tendría que tener la precisión del caso para que cumpla todas las ordenes tanto en la preparación como en la limpieza. Imagina el cocinero va terminando de acomodar platos, vajillas o sartenes, el brazo robótico puede ir limpiando mesas, superficies o áreas de trabajo.

La idea me parece muy buena porque alivia el trabajo del cocinero y el trabajo del cocinero demanda mucha rapidez, precisión, y hasta desgaste físico en algunos casos porque hay que cargar ollas, cargar productos. Tener la ayuda de los brazos robóticos puede aligerar el estrés que hay en las cocinas, sobre todo en las horas punta.

En resumen, la idea es que los brazos puedan aliviar en parte y agilizar el trabajo como si fueran un ayudante extra y hacer múltiples tareas para las que estén diseñados.

Yo pienso que el equipo debe ser fácil y amigable de uso para que cualquier persona lo pueda controlar. De repente la capacitación o los comandos o la forma de orden que se le da a los brazos sea la más simple posible. Que tenga la mayor gama de funciones para que pueda asistir en varias actividades.

ANEXO B: Desarrollo del árbol de funciones y medios.

El “Árbol de funciones y medios” es una herramienta que tiene como objetivo encontrar los medios más adecuados para un diseño, que en este caso es el de las SRLs. El árbol cuenta con 4 niveles y su estructura se puede observar en la Figura 0.1.

En general, los niveles 1 y 2 muestran la función principal y subfunciones de carácter genérico respectivamente. Los niveles 3 y 4 muestran subfunciones cuyos medios ya podrían clasificarse como uno de los seis subsistemas de un sistema mecatrónico. A continuación, se presenta un listado de las funciones del sistema divididas por nivel. Cabe resaltar que más adelante se explican de qué tratan cada una de ellas y sus respectivos medios potenciales.

Nivel 1:

- Asistir en la cocina de restaurantes en las tareas de mover la cuchara y secar los platos mediante SRLs.

Nivel 2:

- Accionar sistema
- Enviar comando a las SRLs
- Instalar SRLs
- Mover la cuchara
- Secar los platos
- Retraerse hacia el usuario
- Cambiar efector
- Alcanzar objeto

Nivel 3:

- Mover articulaciones
- Sensor fuerza
- Detectar movimiento del pie
- Proveer energía
- Cambiar modo (actividad)
- Encender sistema
- Activar/desactivar modo grabación
- Grabar trayectoria
- Agarrar cuchara

- Agarrar plato
- Agarrar toalla
- Controlar SRLs
- Activar/desactivar IMU
- Monitorear movimiento del torso

Nivel 4:

- Proveer energía.2
- Indicar estado del sistema



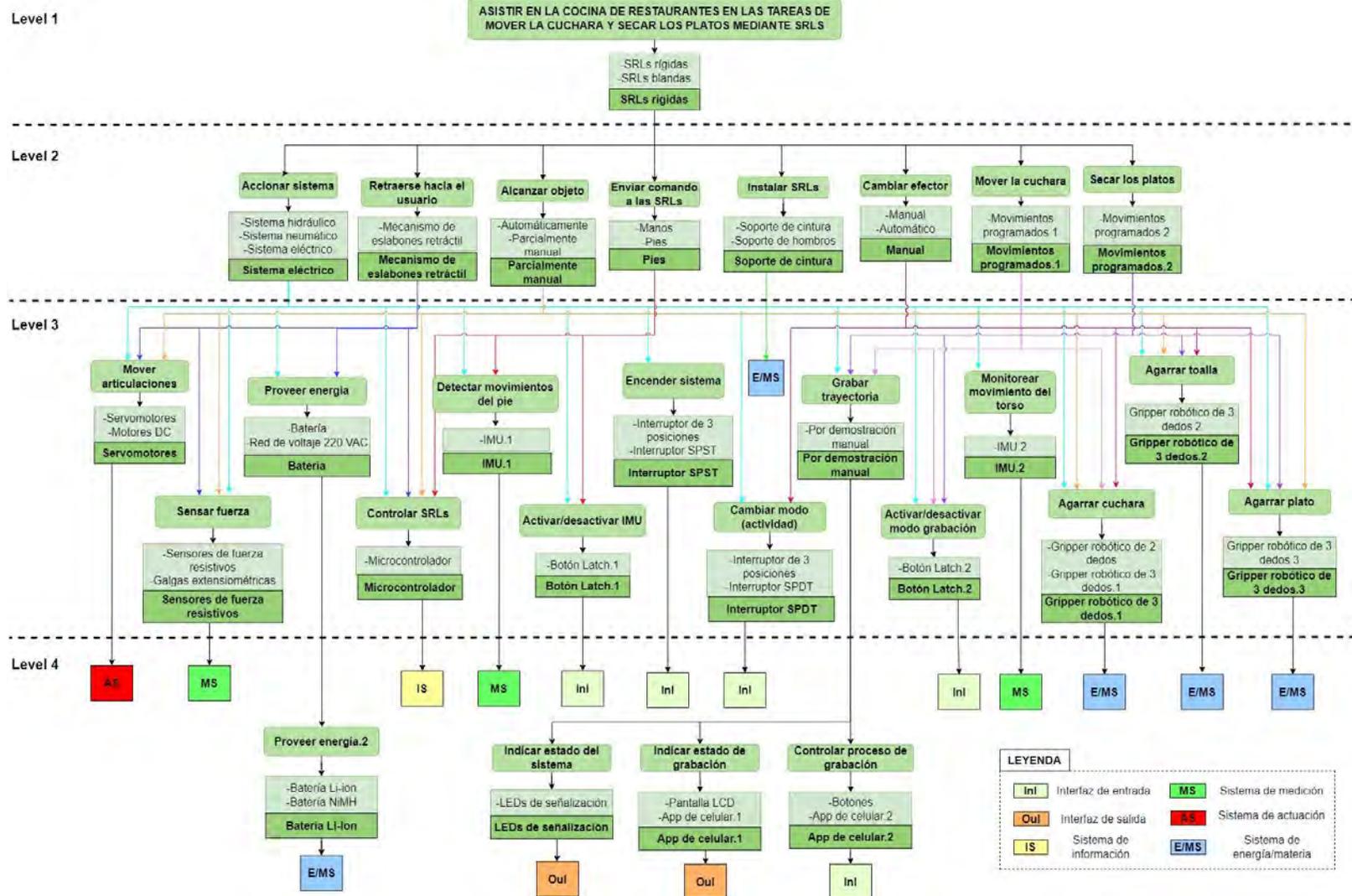


Figura 0.1. Árbol de funciones y medios de las SRLs.

Nivel 1

La función principal que deben cumplir las SRLs es asistir en la cocina de restaurantes en las tareas de mover la cuchara de las ollas y secar los platos. Los medios que se tomaron en consideración para esta función son los siguientes:

- SRL rígida: Estas SRLs cuentan con elementos rígidos y usualmente se usan para aplicaciones específicas.
- SRL blanda: Estas SRLs están compuestas de elementos blandos, cuentan con una estructura flexible. Usualmente se usan para aplicaciones multipropósito.

En la sección “2.1.2. Estructura de las SRLs” se detalló más acerca de estos dos medios. Además, en la Tabla 2.1 se pueden observar las ventajas y desventajas que presenta cada una. Para poder determinar cuál era la mejor opción, se realizó una evaluación en base a los requisitos de diseño cuyos resultados se presentan en la Tabla 0.3.

Tabla 0.3. Tabla de evaluación para el nivel 1.

Evaluation Chart									
Design Criteria	j=	1		2		o			
		SRLs rígidas		SRLs blandas		Optimal			
		W_{s1}	$W_{s1} \cdot W_r$	W_{s2}	$W_{s2} \cdot W_r$	W_o	$W_o \cdot W_r$		
Technical analysis									
1	Bajo tiempo de respuesta	3	3	9	2	6	4	12	
2	Sistema liviano	3	2	6	4	12	4	12	
3	Capacidad de retracción	4	3	12	2	8	4	16	
4	Fuerza controlada para la toma de objetos	4	4	16	3	12	4	16	
5	Fuerza controlada para el secado	4	4	16	3	12	4	16	
6	Comandos de control sencillos	1	3	3	3	3	4	4	
7	Bajo ruido	1	2	2	3	3	4	4	
8	Baja vibración	1	2	2	3	3	4	4	
9	Algoritmo de control preciso de agarre, levante y desplazamiento	4	4	16	3	12	4	16	
10	Peso balanceado	3	3	9	3	9	4	12	
11	Cambio de efectores	2	3	6	3	6	4	8	
12	Centro de masa del sistema cerca al centro de gravedad del usuario	3	2	6	3	9	4	12	
13	Soporte cómodo	1	2	2	4	4	4	4	
14	Dimensiones máximas del sistema	3	4	12	3	9	4	12	
15	Compensar perturbaciones inesperadas	4	3	12	2	8	4	16	
16	Fácil de limpiar	1	3	3	2	2	4	4	
17	Fuerza máxima de carga	3	4	12	2	6	4	12	
18	Autonomía energética	1	3	3	3	3	4	4	
Total technical value		T_{t1}	147		T_{t2}	127		T_{t0}	184
Relative technical value		R_{t1}	0.80		R_{t2}	0.69		R_{t0}	1.00
Economic analysis									
19	Sistema liviano	3	3	9	4	12	4	12	
20	Peso balanceado	3	3	9	3	9	4	12	
21	Soporte cómodo	1	2	2	4	4	4	4	
22	Dimensiones máximas del sistema	3	4	12	3	9	4	12	
23	Fácil de limpiar	1	3	3	2	2	4	4	
24	Autonomía energética	1	3	3	3	3	4	4	
Total economic value		T_{e1}	38		T_{e2}	39		T_{e0}	48
Relative economic value		R_{e1}	0.79		R_{e2}	0.81		R_{e0}	1.00
Hyperbolic rating		H_{r1}	0.80		H_{r2}	0.75		H_{r0}	1.00

Como se pudo observar, el medio con mayor calificación son las SRLs rígidas (0.80). Si bien las SRLs rígidas pueden pesar más que las SRLs blandas y tienen menos versatilidad, es más sencillo controlar su movimiento y su peso se puede controlar escogiendo los materiales adecuados. Se pueden utilizar materiales de espuma o goma para las partes en contacto con el usuario. Para el alcance de este proyecto, unas SRLs rígidas podrían cumplir con las tareas de mover la cuchara de las ollas y secar los platos.

Nivel 2

A continuación, se presentan las subfunciones que se consideraron para el nivel 2 del árbol de funciones y medios.

Accionar sistema

Esta función se basa en el principio de funcionamiento para el sistema de actuación de las SRLs. Los posibles medios son los siguientes:

- Sistema hidráulico: Es un sistema de actuación que utiliza la compresión de líquidos como medio de funcionamiento. Generalmente se usan cuando se requiere potencia en la tarea a realizar.
- Sistema neumático: Es un sistema de actuación que utiliza la compresión de gases como medio de funcionamiento. Generalmente se usa aire comprimido. Este tipo de sistema es común en las SRLs blandas para el funcionamiento de actuadores inflables o músculos neumáticos artificiales.
- Sistema eléctrico: Es un sistema de actuación que utiliza electricidad como medio de funcionamiento, común entre las SRLs. Usualmente utiliza elementos como motores, servomotores o elementos elásticos en serie.

En la sección “2.1.4. Actuación de las SRLs” se detalla un poco más acerca de los diferentes sistemas de actuación de las SRLs. Asimismo, en la sección “2.3. Sistemas SRLs existentes” también se pueden apreciar los diversos sistemas de actuación que utilizan las SRLs. A continuación, en la Tabla 0.4 se realiza una comparación entre estos tres medios.

Tabla 0.4. Comparación entre los medios del sistema de actuación.

Medios	Ventajas	Desventajas
Sistema hidráulico	-Provee de grandes cantidades de potencia	-Necesita de equipamiento auxiliar complejo -Alto consumo de energía -Fluido contamina el medio ambiente -Costos moderados
Sistema neumático	-Tienen respuesta rápida -Bajo costo -Configuración flexible	-Ruido alto -No brinda mucha potencia -Alto consumo de energía
Sistema eléctrico	-Fácil de controlar -Uso eficiente de la energía. -Relativamente sencillo de instalar	-Costos moderados -Se puede sobrecalentar

(Fuente: Adaptado de Tong et al, 2021; Véronneau et al., 2020; Masferreteria, 2018)

Enviar comando a las SRLs

Esta función explica a través de qué parte del cuerpo el usuario le mandará los comandos a las SRLs. Los posibles medios son los siguientes:

- Manos: El usuario usará las manos para mandarle comandos a las SRLs. Este es el método más usado y está presente en los *modelos a* y *d* de los trabajos de investigación de la sección “2.3.2. Trabajos de investigación”. Además, en la sección “2.1.3. Interfaz de control de las SRLs”, se hace mención del uso de las manos para el caso de control con joysticks o guantes con IMUs.
- Pies: El usuario usará los pies para mandarle comandos a las SRLs. Este método no es muy mencionado en la literatura; sin embargo, Véronneau et al. 2020 hace referencia al uso de los pies para el control de las SRLs en su trabajo de investigación.

A continuación, se presenta una comparación entre estos dos posibles medios en la Tabla 0.5.

Tabla 0.5. Comparación entre los medios de la función “Enviar comando a las SRLs”.

Medios	Ventajas	Desventajas
Manos	-Control es más preciso	-Limita las manos del usuario al control de las SRLs.
Pies	-Permite al usuario tener las manos libres	-Control no tan preciso. -Incapacidad de moverse (caminar) durante el control.

Instalar SRLs

Esta función tiene relación con la interfaz mecánica del sistema. Explica en qué parte del cuerpo del usuario se colocarán las SRLs. Los posibles medios para esta subfunción son los siguientes:

- Soporte de cintura: Las SRLs estarían adjuntas a la cintura del usuario. Esto se puso observar en los *modelos a, b y d* de los trabajos de investigación mostrados en la sección “2.3.2. Trabajos de investigación”.
- Soporte de hombros: Las SRLs estarían adjuntas a los hombros del usuario. Esto se puso observar en los *modelos c y f* de los trabajos de investigación mostrados en la sección “2.3.2. Trabajos de investigación”.

A continuación, se presenta una comparación entre estos dos medios en la Tabla 0.6.

Tabla 0.6. Comparación entre los medios de la función “Instalar SRLs”.

Medios	Ventajas	Desventajas
Soporte de cintura	-Cerca del centro de gravedad de una persona.	-Desde esa posición, los brazos pueden interferir con los movimientos del usuario.
Soporte de hombros	-Útiles para trabajos que se hacen por encima de la cabeza.	-Pueden causar mayor fatiga en el usuario.

Mover la cuchara

Esta función explica la forma en la que las SRLs ejecutarán la acción de mover la cuchara.

- Movimientos programados (1): El usuario programa la secuencia de movimientos que harán las SRLs en base a demostración, moviéndolas físicamente a posiciones deseadas y guardando las posiciones en el sistema. Similar al *modelo e, Orochi*, de la sección “2.3.2. Trabajos de investigación”. Las SRLs harán esos movimientos cuando sostengan la cuchara en la olla.

Secar los platos

Esta función explica la forma en la que las SRLs ejecutarán la acción de secar los platos.

- Movimientos programados (2): El usuario programa la secuencia de movimientos que harán las SRLs en base a demostración, moviéndolas físicamente a posiciones deseadas y guardando las posiciones en el sistema. Similar al *modelo e, Orochi*, de la sección “2.3.2. Trabajos de investigación”. Las SRLs harán esos movimientos cuando sostengan el plato con un brazo y la toalla con el otro brazo.

Para el caso de las funciones de “Mover la cuchara” y “Secar los platos” se consideró solo el medio de “Movimientos programados” porque resulta conveniente para el usuario que los movimientos que realizan las SRLs se puedan adaptar y cambiar según las necesidades del entorno de trabajo, pues no todas las cocinas son iguales.

Cabe resaltar, que los números (1) y (2) de los medios “Movimientos programados” son solo para distinguirlos en el árbol de funciones y medios, pues pertenecen a funciones diferentes.

Retraerse hacia el usuario

Esta función explica la forma en la que las SRLs se retraerán hacia el usuario cuando no se estén usando o cuando el usuario se desplace.

- Mecanismo de eslabones retráctil: Cada brazo del sistema estará compuesto de tres eslabones. El sistema podrá retraer los brazos hacia el usuario realizando un movimiento giratorio similar a la secuencia de movimientos de la Figura 0.2.



Figura 0.2. Spiderman retrayendo sus patas robóticas.
(Fuente: Russo et al., 2018)

Cambiar efector

Esta función explica la forma en la que se cambiarán los efectores de las SRLs. Los posibles medios son los siguientes:

- Manual: El mismo usuario deberá ser quien cambie los efectores manualmente dependiendo de la tarea que desea que las SRLs realicen (mover la cuchara o secar los platos).
- Automático: Los efectores se cambian automáticamente luego de que el usuario mande algún comando (botón, voz, etc.).

A continuación, en la

Tabla 0.7 se realiza una comparación entre estos dos posibles medios.

Tabla 0.7. Comparación entre los medios de la función “Cambiar efector”.

Medios	Ventajas	Desventajas
Manual	-El diseño del sistema es más sencillo	-Limita a las SRLs a realizar un solo tipo de tarea por uso.
Automático	-Ahorra tiempo -Permite realizar ambas tareas en un mismo uso.	-Hace al sistema más complejo de diseñar

Alcanzar objeto

Esta función explica de qué manera las SRLs llevarán sus efectores finales hacia el objeto que se quiere alcanzar. Los posibles medios son los siguientes:

- Automáticamente: Las SRLs buscan el objeto que se quiere alcanzar (cuchara, plato, toalla) en su entorno, lo identifican y desplazan sus brazos hacia este para que los efectores finales lo puedan tomar.
- Parcialmente manual: El usuario identifica el objeto según el modo en el que se encuentre (“mover la cuchara” o “secar platos”) y se lo alcanza a las SRLs. Luego le manda un comando a las SRLs para que el sistema sepa que el objeto ya se encuentra a su alcance y los efectores finales tomen el objeto.

A continuación, en la Tabla 0.8 se realiza una comparación entre estos dos posibles medios.

Tabla 0.8. Comparación entre los medios de la función “Alcanzar objeto”.

Medios	Ventajas	Desventajas
Automáticamente	-El usuario no se tiene que preocupar por alcanzarle el objeto a las SRLs.	-Diseño del sistema más complejo y costoso.
Parcialmente manual	-Diseño del sistema más sencillo y menos costoso.	-El usuario le debe alcanzar los objetos a las SRLs.

Ahora que se han presentado las subfunciones del nivel 2 y sus respectivos medios potenciales, se realiza una serie de combinaciones las cuáles se presentan en la Tabla 0.9 mediante la herramienta de la matriz morfológica.

Tabla 0.9. Matriz morfológica del nivel 2.

Functions	Working principle 1	Working principle 2	Working principle 3	Solution 1	Solution 2	Solution 3	Solution 4
Accionar sistema	 Sistema hidráulico	 Sistema neumático	 Sistema eléctrico	 Sistema hidráulico	 Sistema neumático	 Sistema eléctrico	 Sistema eléctrico
Enviar comando a las SRLs	 Manos	 Pies		 Manos	 Pies	 Pies	 Manos
Instalar SRLs	 Soporte de cintura	 Soporte de hombros		 Soporte de cintura	 Soporte de hombros	 Soporte de cintura	 Soporte de hombros
Mover la cuchara	 Movimientos programados 1			 Movimientos programados 1	 Movimientos programados 1	 Movimientos programados 1	 Movimientos programados 1
Secar los platos	 Movimientos programados 2			 Movimientos programados 2	 Movimientos programados 2	 Movimientos programados 2	 Movimientos programados 2
Retraerse hacia el usuario	 Mecanismo de eslabones retráctil			 Mecanismo de eslabones retráctil	 Mecanismo de eslabones retráctil	 Mecanismo de eslabones retráctil	 Mecanismo de eslabones retráctil
Cambiar efector	 Manual	 Automático		 Automático	 Manual	 Manual	 Automático
Alcanzar objeto	 Automáticamente	 Parcialmente manual		 Parcialmente manual	 Automáticamente	 Parcialmente manual	 Automáticamente

Cada columna de la matriz morfológica representa una posible solución para este nivel. Para poder determinar la mejor solución, se realiza una evaluación técnica económica tomando como base los requisitos de diseño. Los resultados de esta evaluación son presentados en la Tabla 0.10.

Tabla 0.10. Tabla de evaluación para el nivel 2.

Evaluation Chart												
Design Criteria	j=	1		2		3		4		o		
		Solution 1		Solution 2		Solution 3		Solution 4		Optimal		
		W _{s1}	W _{s1} ·W _r	W _{s2}	W _{s2} ·W _r	W _{s3}	W _{s3} ·W _r	W _{s4}	W _{s4} ·W _r	W _o	W _o ·W _r	
ii												
Technical analysis												
1	Bajo tiempo de respuesta	3	2	6	4	12	3	9	3	9	4	12
2	Sistema liviano	3	2	6	4	12	3	9	3	9	4	12
3	Capacidad de retracción	4	3	12	2	8	3	12	3	12	4	16
4	Fuerza controlada para la toma de objetos	4	3	12	3	12	4	16	4	16	4	16
5	Fuerza controlada para el secado	4	3	12	3	12	4	16	4	16	4	16
6	Comandos de control sencillos	1	3	3	2	2	2	2	3	3	4	4
7	Bajo ruido	1	3	3	2	2	4	4	4	4	4	4
8	Baja vibración	1	3	3	2	2	4	4	4	4	4	4
9	Algoritmo de control preciso de agarre, levante y desplazamiento	4	2	8	2	8	3	12	4	16	4	16
10	Peso balanceado	3	3	9	3	9	4	12	3	9	4	12
11	Centro de masa del sistema cerca al centro de gravedad del usuario	3	4	12	3	9	4	12	3	9	4	12
12	Soporte cómodo	1	3	3	2	2	3	3	2	2	4	4
13	Dimensiones máximas del sistema	3	2	6	4	12	4	12	4	12	4	12
14	Compensar perturbaciones inesperadas	4	2	8	2	8	4	16	4	16	4	16
15	Fácil de limpiar	1	3	3	3	3	4	4	2	2	4	4
16	Fuerza máxima de carga	3	4	12	2	6	3	9	3	9	4	12
Total technical value			T _{t1}	118	T _{t2}	119	T _{t3}	152	T _{t4}	148	T _{to}	172
Relative technical value			R _{t1}	0.69	R _{t2}	0.69	R _{t3}	0.88	R _{t4}	0.86	R _{to}	1.00
iii												
Economic analysis												
17	Sistema liviano	3	2	6	4	12	3	9	3	9	4	12
18	Peso balanceado	3	2	6	3	9	3	9	3	9	4	12
19	Soporte cómodo	1	3	3	2	2	3	3	2	2	4	4
20	Dimensiones máximas del sistema	3	2	6	3	9	2	6	2	6	4	12
21	Fácil de limpiar	1	3	3	3	3	4	4	2	2	4	4
Total economic value			T _{e1}	24	T _{e2}	35	T _{e3}	31	T _{e4}	28	T _{eo}	44
Relative economic value			R _{e1}	0.55	R _{e2}	0.80	R _{e3}	0.70	R _{e4}	0.64	R _{eo}	1.00
Hyperbolic rating			H _{r1}	0.61	H _{r2}	0.74	H _{r3}	0.79	H _{r4}	0.74	H _{ro}	1.00

Como se pudo observar, luego de haber analizado las cuatro soluciones presentadas en la matriz morfológica en base a los requisitos de diseño, la solución con el mayor puntaje fue la número 3 con 0.79. A continuación, se presenta un resumen de las subfunciones con sus medios óptimos.

- Accionar sistema → Sistema eléctrico
- Enviar comando a las SRLs → Pies
- Instalar SRLs → Soporte de cintura
- Mover la cuchara → Movimientos programados
- Secar los platos → Movimientos programados
- Retraerse hacia el usuario → Mecanismo de eslabones retráctil
- Cambiar de efector → Manual
- Alcanzar objeto → Parcialmente manual

Nivel 3

A continuación, se presentan las subfunciones que se consideraron para el nivel 3 del árbol de funciones y medios.

Mover articulaciones

Esta función explica los tipos de actuadores que se usarán para el movimiento de las articulaciones de las SRLs. Los posibles medios son los siguientes:

- Servomotores: Son motores especiales que permiten controlar la posición del eje en un momento dado. Puede realizar movimientos precisos y mantener posiciones fijas. Generalmente se usan para aplicaciones intermitentes. Su relación entre torque y velocidad de giro es alta (García, 2016; Cavallo, s.f.).
- Motores DC: Son los motores clásicos que tienen la particularidad de girar sin detenerse hasta que se corte el suministro de energía. No son capaces de dar una determinada cantidad de vueltas. Generalmente se utilizan para aplicaciones que requieren movimiento continuo. Su relación entre torque y velocidad de giro es moderada (García, 2016; Cavallo, s.f.).

A continuación, en la Tabla 0.11 se realiza una comparación entre ambos medios.

Tabla 0.11. Comparación entre los medios de la función “Mover articulaciones”.

Medios	Ventajas	Desventajas
Servomotores	-Son altamente precisos y fáciles de controlar. -Alta eficiencia energética.	-Más costosos tanto en adquisición como mantenimiento.
Motores DC	-Son de bajo costo. -Fácil mantenimiento.	-Eficiencia energética moderada. -Requiere que se le implemente un mecanismo adicional.

(Fuente: Adaptado de García, 2016; Cavallo, s.f.)

Sensar fuerza

Esta función muestra los posibles medios con los que se va a medir la fuerza que están generando los efectores finales de las SRLs durante el agarre de objetos.

- Sensores de fuerza resistivos: También conocidos como FSR por sus siglas en inglés *force sensitive resistors*, estos sensores permiten detectar presiones físicas, fuerzas de apriete o pesos. Estos cuentan con 2 capas de material semiconductor separadas por un espaciador. Este sensor va descendiendo su resistencia eléctrica a medida que se le va aplicando presión. Con esta variación es posible calcular la fuerza aplicada (Ada, 2012).

- Galgas extensiométricas: Estos sensores están compuestos de un elemento tipo resorte al que se le aplica una fuerza. La fuerza deforma el material en el que están ubicadas y las galgas extensiométricas miden esa deformación como una variación en la resistencia eléctrica. De esta manera pueden convertir la presión o fuerza aplicada en señales eléctricas medibles (Nachazel, 2020; Kleckers, s.f.).

A continuación, en la Tabla 0.12 se presenta una comparación entre estos dos posibles medios.

Tabla 0.12. Comparación entre los medios de la función “Sentar fuerza”.

Medios	Ventajas	Desventajas
Sensores de fuerza resistivos	-Bajo costo. -Fáciles de usar -Espesor delgado y sección relativamente pequeña. -Facilidad de montaje.	-No son muy precisos para dar valores exactos.
Galgas extensiométricas	-Alta precisión -No se desgastan tan rápido. -Pequeños y de bajo costo.	-Sensibles a la temperatura -Necesitan ser calibradas regularmente. -Necesitan pegamentos especiales.

(Adaptado de Ada, 2012; Thorat, s.f.)

Detectar movimiento del pie

Esta función explica el sensor que realizará la detección de la intención del usuario de mover las SRLs cuando él/ella mueva su pie.

- IMU (1): Una unidad de medida inercial (*Inertial Measurement Unit*) es un dispositivo de bajo costo y confiable muy utilizado en reconocimiento de actividades humanas. Este cuenta con un acelerómetro para medir las aceleraciones, un giroscopio para medir las velocidades angulares y un magnetómetro para medir los campos magnéticos (Or, 2021). Una IMU sería bastante útil para monitorear los movimientos del pie del usuario y detectar su intención de movimiento de las SRLs.

Proveer energía

Esta función se relaciona directamente con la alimentación del sistema, es decir, la forma en la que se le entregará energía para que pueda funcionar.

- Batería: Las SRLs contarían con una batería que les otorgará energía por una determinada cantidad de tiempo.
- Red de voltaje 220 VAC: Las SRLs se conectaría directamente al tomacorriente mediante un cable.

A continuación, en la Tabla 0.13 se presentará una comparación entre estos dos medios.

Tabla 0.13. Comparación entre los medios de la función “Proveer energía”.

Medios	Ventajas	Desventajas
Batería	-Permite al usuario moverse libremente. -No depende directamente de la red de voltaje.	-Puede hacer que el sistema sea más pesado. -Se debe estar atento a la cantidad de batería restante.
Red de voltaje 220 VAC	-El usuario no se tiene que preocupar por el tiempo de energía.	-Limita al usuario a moverse por una zona determinada. -El cable puede estorbar.

En el caso de la actividad de secar los platos, la red de voltaje 220 VAC resulta más conveniente pues es una actividad que se realiza generalmente mientras el usuario lava los platos. Ya que ambas actividades son estáticas, no hay que preocuparse por la extensión del cable. En el caso de mover la cuchara de la olla, puede que el usuario realice actividades que requieran que se desplace, por lo que habría que tener cuidado con los accidentes como tropezarse con el cable.

Cambiar modo (actividad)

Esta función muestra los posibles elementos con los que se podría cambiar el modo de las SRLs entre “modo mover cuchara” o “modo secar platos”.

- Interruptor de 3 posiciones: Este es un interruptor con 3 posiciones como se muestra en la Figura 0.3. Este medio está ligado con la función de encender el sistema pues al tener 3 posiciones, la posición central sería “apagado” y las otras dos serían “modo mover la cuchara” o “modo secar los platos”.
- Interruptor SPDT: Este es un interruptor *single pole double throw* cuyo símbolo se muestra en la Figura 0.4a. Como se puede apreciar, tiene solo dos posiciones para cambiar a uno de los dos modos.



Figura 0.3. Interruptor de 3 posiciones.
Fuente: Amazon, 2021.

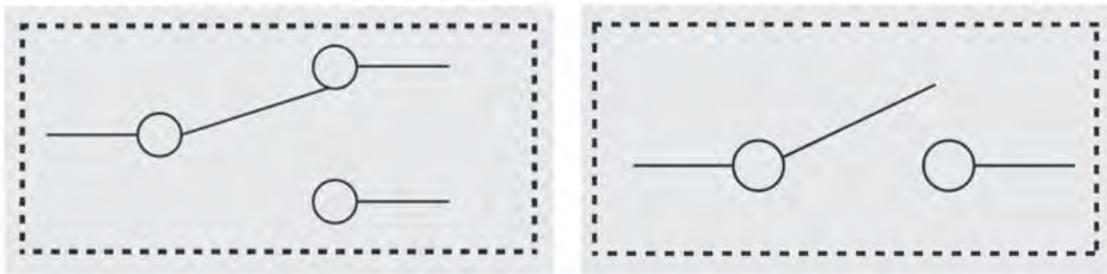


Figura 0.4. (a) Símbolo de interruptor SPDT. (b) Símbolo de interruptor SPST.
Fuente: Teja, 2021.

Encender sistema

Esta función muestra los posibles elementos con los que se podría encender el sistema.

- Interruptor de 3 posiciones: Como se mencionó en la función de “Cambiar modo (actividad)”, este medio sería el mismo tanto para encender el sistema como para cambiar de modo.
- Interruptor SPST: Este es un interruptor *single pole single throw* cuyo símbolo se muestra en la Figura 0.4b. Como se puede apreciar, este interruptor solo tiene modo encendido y apagado. Este medio va ligado con el interruptor SPDT de la función “Cambiar de modo”.

Como se mencionó anteriormente, las funciones “Cambiar modo (actividad)” y “Encender sistema” están ligadas. Por ello a continuación se presenta una sola tabla comparativa (Tabla 0.14) en donde las opciones serían usar el mismo interruptor para ambas o usar interruptores separados.

Tabla 0.14. Comparación entre los medios de las funciones “Cambiar de modo” y “Encender sistema”.

Medios	Ventajas	Desventajas
Un mismo interruptor	-Se realizan dos funciones con el mismo interruptor.	-Más difícil de reemplazar en caso de averío.
Dos interruptores diferentes	-Los interruptores usados son más comunes que los de 3 posiciones.	-El usuario se puede confundir de interruptor.

Activar/desactivar modo grabación

Esta función explica la manera en que el sistema sabrá si se encuentra en el modo de grabación de trayectoria o modo acción (realizar actividad: mover cuchara o secar platos).

- Botón *Latch*: También conocido como botón *push on push off*, es un tipo de botón que mantiene su posición una vez presionado y para devolverlo a su posición original se le debe presionar nuevamente. Así, el usuario debe presionar el botón cuando quiera activar el modo grabación y presionarlo nuevamente cuando haya terminado.

Grabar trayectoria

Esta función explica la forma en que las SRLs aprenderán la trayectoria de movimiento que deben seguir.

- Por demostración manual: El sistema se encuentra en modo grabación de trayectoria. Los motores de las articulaciones de las SRLs generarían un torque mínimo para que estas mantengan su posición. El usuario deberá mover manualmente los efectores finales de las SRLs a la posición que desea. El sistema se encargará de grabar la trayectoria que realizaron las SRLs. La trayectoria grabada quedará para “mover la cuchara” o “secar los platos” dependiendo de la posición del interruptor de “Cambiar modo (actividad)”.

Agarrar cuchara

En esta función se muestran los tipos de efectores finales que se pueden usar para que las SRLs agarren la cuchara.

- Gripper robótico de 2 dedos: Este es un manipulador o gripper con dos dedos o garras. Es considerado uno de los más básicos. Es usado en varias aplicaciones en la industria, generalmente para ensamblar o recoger objetos (Samadikhoshkho et al., 2019).
- Gripper robótico de 3 dedos: Este tipo de manipulador cuenta con tres dedos o garras y no es tan usado como el de dos dedos. Generalmente se usa cuando se requiere una mayor precisión (Samadikhoshkho et al., 2019).

A continuación, en la Tabla 0.15 se realiza una comparación entre estos dos posibles medios.

Tabla 0.15. Comparación entre los medios de la función “Agarrar cuchara”.

Medios	Ventajas	Desventajas
Gripper robótico de 2 dedos	-Es menos costoso. -Es más común, más reemplazable.	-Puede que no agarre la cuchara firmemente.
Gripper robótico de 3 dedos	-Tiene un mejor agarre de la cuchara. -Es más preciso.	-Es más complejo de programar. -Es más costoso.

Agarrar plato

En esta función se muestran los tipos de efectores finales que se pueden usar para que las SRLs agarren el plato.

- Gripper robótico de 3 dedos: Este gripper es más apropiado para agarrar los platos porque cuenta con una buena precisión en el agarre, en particular para objetos frágiles como los platos (Samadikhoshkho et al., 2019). Este gripper debe contar con un pad (generalmente hechos de poliuretano) en los dedos para generar un efecto antideslizante y poder agarrar el plato (Lad et al., 2015). Con un gripper de dos dedos sería peligroso agarrar los platos debido a su forma y material.

Agarrar toalla

En esta función se muestran los tipos de efectores finales que se pueden usar para que las SRLs agarren la toalla.

- Gripper robótico de 3 dedos: Este gripper es apropiado para el agarre de la toalla porque como se mencionó anteriormente cuenta con precisión de agarre y con sus tres dedos podría agarrar firmemente la toalla desde el centro para poder realizar el secado de platos.

Como las funciones de “Agarrar el plato” y “Agarrar la toalla” están ambas ligadas al secado de platos, sería ideal utilizar un mismo tipo de gripper en ambas funciones para que los manipuladores de ambos brazos sean capaces tanto de agarrar platos como de agarrar toallas. Considerando que los platos se deben secar por ambos lados, esa configuración sería bastante útil.

Controlar SRLs

Esta función se relaciona con el sistema de control. Se trata del medio que usará el sistema para procesar las señales de los sensores y mandar señales a los actuadores.

- Microcontrolador: Es un circuito integrado digital y programable que se puede utilizar para múltiples aplicaciones. Al igual que una computadora, cuenta con una unidad de procesamiento central (CPU), memorias (ROM y RAM) y líneas de entrada y salida (periféricos) (Hernández, 2014). El microcontrolador se encargaría de procesar las señales de los sensores y mandar comandos a los actuadores.

Activar/desactivar IMU

Esta función considera que el IMU no debería estar siempre activado por la seguridad del usuario, ya que, sin querer, él o ella puede mover su pie y generar un accidente con las SRLs. Por ello, en esta función se explican los posibles medios para activar la IMU.

- Botón Latch: Este medio se explicó en la función “Activar/desactivar modo grabación”. En este caso, el usuario presionaría el botón cuando desee que el IMU esté activo y lo presionaría nuevamente cuando quiere desactivarlo.

Monitorear movimiento del torso

Esta función considera que las personas tienden a realizar movimientos involuntarios que en algunos casos podrían derivarse a perturbaciones para las SRLs. Por ello, se consideran los posibles medios para monitorear los movimientos del torso y avisarle al sistema de información para compensar esas perturbaciones.

- IMU (2): Conocida también como unidad de medida inercial, este dispositivo puede detectar los movimientos del torso del usuario utilizando su acelerómetro y giroscopio.

El número (2) a la derecha del IMU es solo para diferenciarlo del IMU de la función “Detectar movimientos del pie”.

Ahora que se han presentado las subfunciones del nivel 3 y sus respectivos medios potenciales, se procede a realizar una serie de combinaciones las cuáles se presentan en la Tabla 0.16 mediante la herramienta de la matriz morfológica.

Tabla 0.16. Matriz morfológica del nivel 3.

Funcións	Working principle 1	Working principle 2	Solution 1	Solution 2	Solution 3	Solution 4	Solution 5
Mover articulaciones	 Servomotores	 Motores DC	 Motores DC	 Servomotores	 Servomotores	 Motores DC	 Servomotores
Sensar fuerza	 Sensores de fuerza resistivos	 Galgas extensiométricas	 Galgas extensiométricas	 Sensores de fuerza resistivos	 Galgas extensiométricas	 Sensores de fuerza resistivos	 Sensores de fuerza resistivos
Detectar movimientos del pie	 IMU (1)		 IMU (1)	 IMU (1)	 IMU (1)	 IMU (1)	 IMU (1)
Activar/desactivar IMU	 Botón Latch.1		 Botón Latch.1	 Botón Latch.1	 Botón Latch.1	 Botón Latch.1	 Botón Latch.1
Encender sistema	 Interruptor de 3 posiciones	 Interruptor SPST	 Interruptor de 3 posiciones	 Interruptor SPST	 Interruptor SPST	 Interruptor de 3 posiciones	 Interruptor SPST
Agarrar cuchara	 Gripper robótico de 2 dedos	 Gripper robótico de 3 dedos.1	 Gripper robótico de 2 dedos	 Gripper robótico de 3 dedos.1	 Gripper robótico de 2 dedos	 Gripper robótico de 3 dedos.1	 Gripper robótico de 2 dedos
Grabar trayectoria	 Por demostracion manual		 Por demostracion manual	 Por demostracion manual	 Por demostracion manual	 Por demostracion manual	 Por demostracion manual
Activar/desactivar modo grabación	 Botón Latch.2		 Botón Latch.2	 Botón Latch.2	 Botón Latch.2	 Botón Latch.2	 Botón Latch.2
Agarrar toalla	 Gripper robótico de 3 dedos.2		 Gripper robótico de 3 dedos.2	 Gripper robótico de 3 dedos.2	 Gripper robótico de 3 dedos.2	 Gripper robótico de 3 dedos.2	 Gripper robótico de 3 dedos.2
Agarrar plato	 Gripper robótico de 3 dedos.3		 Gripper robótico de 3 dedos.3	 Gripper robótico de 3 dedos.3	 Gripper robótico de 3 dedos.3	 Gripper robótico de 3 dedos.3	 Gripper robótico de 3 dedos.3
Proveer energía	 Batería	 Red de voltaje 220 VAC	 Red de voltaje 220 VAC	 Batería	 Red de voltaje 220 VAC	 Batería	 Batería
Cambiar modo (actividad)	 Interruptor de 3 posiciones	 Interruptor SPDT	 Interruptor de 3 posiciones	 Interruptor SPDT	 Interruptor SPDT	 Interruptor de 3 posiciones	 Interruptor SPDT
Controlar SRLs	 Microcontrolador		 Microcontrolador	 Microcontrolador	 Microcontrolador	 Microcontrolador	 Microcontrolador
Monitorizar movimiento del torso	 IMU (2)		 IMU (2)	 IMU (2)	 IMU (2)	 IMU (2)	 IMU (2)

Possible solutions

Cada columna de la matriz morfológica representa una posible solución para este nivel. Para poder determinar la mejor solución, se realiza una evaluación técnica económica tomando como base los requisitos de diseño. Los resultados de esta evaluación son presentados en la Tabla 0.17.

Tabla 0.17. Tabla de evaluación para el nivel 3.

Evaluation Chart														
Design Criteria	j=	1		2		3		4		5		o		
		Solution 1		Solution 2		Solution 3		Solution 4		Solution 5		Optimal		
		W ₁₁	W ₁₁ ·Wr	W ₁₂	W ₁₂ ·Wr	W ₁₃	W ₁₃ ·Wr	W ₁₄	W ₁₄ ·Wr	W ₁₅	W ₁₅ ·Wr	W _{1o}	W _{1o} ·Wr	
Technical analysis														
i=		3	6	3	9	2	6	3	9	3	9	4	12	
1	Bajo tiempo de respuesta	3	2	6	3	9	2	6	3	9	3	9	4	12
2	Sistema liviano	3	4	12	3	9	4	12	3	9	3	9	4	12
3	Capacidad de retracción	4	2	8	4	16	4	16	2	8	4	16	4	16
4	Fuerza controlada para la toma de objetos	4	2	8	4	16	3	12	3	12	3	12	4	16
5	Fuerza controlada para el secado	4	2	8	4	16	3	12	3	12	3	12	4	16
6	Comandos de control sencillos	1	3	3	4	4	3	3	4	4	4	4	4	4
7	Bajo ruido	1	3	3	2	2	2	2	3	3	2	2	4	4
8	Baja vibración	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4	4
9	Algoritmo de control preciso de agarre, levante y desplazamiento	4	2	8	4	16	4	16	2	8	4	16	4	16
10	Cambio de efectores	2	3	6	4	8	3	6	4	8	3	6	4	8
11	Soporte cómodo	1	3	3	4	4	3	3	4	4	3	3	4	4
12	Dimensiones máximas del sistema	3	3	9	3	9	3	9	3	9	3	9	4	12
13	Compensar perturbaciones inesperadas	4	2	8	3	12	3	12	2	8	3	12	4	16
14	Fácil de limpiar	1	2	2	3	3	2	2	2	2	3	3	4	4
15	Fuerza máxima de carga	3	2	6	3	9	3	9	3	9	2	6	4	12
16	Autonomía energética	1	2	2	4	4	2	2	4	4	4	4	4	4
Total technical value			T_{t1}	95	T_{t2}	140	T_{t3}	125	T_{t4}	112	T_{t5}	126	T_{to}	160
Relative technical value			R_{t1}	0.59	R_{t2}	0.88	R_{t3}	0.78	R_{t4}	0.70	R_{t5}	0.79	R_{to}	1.00
Economic analysis														
i=		3	9	2	6	3	9	2	6	2	6	4	12	
17	Sistema liviano	3	3	9	2	6	3	9	2	6	2	6	4	12
18	Soporte cómodo	1	2	2	4	4	2	2	4	4	2	2	4	4
19	Dimensiones máximas del sistema	3	3	9	2	6	2	6	2	6	3	9	4	12
20	Fácil de limpiar	1	2	2	3	3	3	3	2	2	3	3	4	4
21	Autonomía energética	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4	4
Total economic value			T_{e1}	25	T_{e2}	22	T_{e3}	23	T_{e4}	21	T_{e5}	23	T_{eo}	36
Relative economic value			R_{e1}	0.69	R_{e2}	0.61	R_{e3}	0.64	R_{e4}	0.58	R_{e5}	0.64	R_{eo}	1.00
Hyperbolic rating			H₁	0.64	H₂	0.73	H₃	0.71	H₄	0.64	H₅	0.71	H_o	1.00

Como se pudo observar, luego de haber analizado las cinco soluciones presentadas en la matriz morfológica en base a los requisitos de diseño, la solución con el mayor puntaje fue la número 2 con 0.73. A continuación, se presenta un resumen de las subfunciones con sus medios óptimos.

- Mover articulaciones → Servomotores
- Sensar Fuerza → Sensores de fuerza resistivos
- Detectar movimientos del pie → IMU (1)
- Activar/desactivar IMU → Botón Latch (1)
- Encender sistema → Interruptor SPST
- Agarrar cuchara → Gripper robótico de 3 dedos (1)
- Agarrar toalla → Gripper robótico de 3 dedos (2)
- Agarrar plato → Gripper robótico de 3 dedos (3)
- Grabar trayectoria → Por demostración manual

- Activar/desactivar modo grabación → Botón Latch (2)
- Proveer energía → Batería
- Cambiar modo (actividad) → Interruptor SPDT
- Controlar SRLs → Microcontrolador
- Monitorear movimiento del torso → IMU (2)

Cabe resaltar que los números a la derecha de algunos medios con el mismo nombre son solo para diferenciarlos en el árbol de funciones y medios.

Nivel 4

A continuación, se presentan las subfunciones que se consideraron para el nivel 4 del árbol de funciones y medios, el último nivel de este proyecto.

Proveer energía.2

Esta función muestra los posibles tipos de batería que se podrían utilizar para energizar el sistema.

- Batería Li-ion: También conocida como batería de ion de litio o *lithium ion battery* en inglés. Esta batería utiliza carbón (ánodo) y litio altamente reactivo (cátodo) para almacenar energía (Hall-Geisler, 2010).
- Batería NiMH: También conocida como batería de níquel-metalhidruro o *nickel metal hybrid battery* en inglés. Esta batería utiliza hidrógeno para almacenar energía mientras que el níquel (ánodo) y otro metal (aleación de hidruro metálico -cátodo) mantienen tapados los iones de hidrógeno (Hall-Geisler, 2010).

Ambas baterías son las más usadas en el ámbito de la robótica (Jarema, 2018). A continuación, en la Tabla 0.18 se realiza una comparación entre estos dos tipos de batería.

Tabla 0.18. Comparación entre los medios de la función “Proveer energía.2”.

Medios	Ventajas	Desventajas
Batería Li-ion	-No son tan afectadas por el “ <i>memory effect</i> ”	-No aguantan altas temperaturas.
Batería NiMH	-Menos costosas. -Son más seguras	-Son más grandes y pesadas.

(Fuente: Adaptado de: Hall-Geisler, 2010; Jarema, 2018)

*El “*memory effect*” es una disminución en la capacidad de la batería cuando es recargada y aún le queda energía o no ha sido completamente descargada.

Indicar estado del sistema

Esta función explica la forma en la que se le indicará al usuario en qué estado se encuentra el sistema, es decir, si se encuentra encendido/apagado, modo grabación/actuación, modo mover cuchara/secar platos.

- LEDs de señalización: Son fuentes luminosas que cuentan con un gran ahorro energético. Existen LEDs de diferentes colores, los cuáles para este caso, se usarán para indicarle al usuario en qué estado se encuentra el sistema.

Indicar estado de grabación

Esta función explica la forma en la que se le mostrará el estado de grabación al usuario. Esto quiere decir que se le mostrará si es que ya existe o no una trayectoria grabada y si se ha iniciado la grabación o no.

- Pantalla LCD: Conocida también como pantalla de cristal líquido, se utilizaría esta pantalla para mostrarle al usuario la información relacionada al proceso de grabación de trayectoria.
- App de celular: Este medio se podría utilizar tanto para indicar el estado de grabación como para controlarlo. La idea sería utilizar una app de celular diseñada particularmente para esta aplicación del sistema. El *hardware* de este medio involucra un *smartphone* como “interfaz de entrada y salida” y un módulo *bluetooth* como parte del sistema de información que se comunicará con el microcontrolador.

Controlar proceso de grabación

Esta función explica la forma en la que el usuario le mandará los comandos de grabación al sistema. Estos comandos podrían ser empezar a grabar trayectoria, pausar grabación, detener grabación o borrar grabación.

- Botones: Se utilizarían los clásicos botones de “*play*”, “*pause*”, “*stop*” y “*erase*” para controlar el proceso de grabación del sistema. Los botones trabajarían en conjunto con la pantalla LCD.
- App de celular: Como se indicó en la función “Indicar estado de grabación”, este medio serviría tanto como para indicar el estado como para controlar el proceso de grabación.

A continuación, en la Tabla 0.19 se realiza una comparación conjunta entre los medios de las funciones “Indicar estado de grabación” y “Controlar proceso de grabación” pues ambas funciones están estrechamente relacionadas.

Tabla 0.19. Comparación entre los medios de las funciones “Indicar estado de grabación” y “Controlar proceso de grabación”.

Medios	Ventajas	Desventajas
Botones y pantalla LCD	-Bajo consumo de energía. -Instalación sencilla.	-Aumentaría la cantidad de botones del sistema. -Podría resultar incómodo visualizar la pantalla por la posición.
App de celular	-Más cómodo de utilizar. -Se puede mostrar más información.	-Necesidad de contar con un <i>smartphone</i> y un módulo <i>bluetooth</i> .

Ahora que se han presentado las subfunciones del nivel 4 y sus respectivos medios potenciales, se procede a realizar una serie de combinaciones las cuales serán mostradas en la Tabla 0.20 mediante la herramienta de la matriz morfológica.

Tabla 0.20. Matriz morfológica del nivel 4.

Functions	Working principle 1	Working principle 2	Possible solutions	Solution 1	Solution 2	Solution 3	Solution 4
Proveer energía.2	 Batería Li-ion	 Batería NiMH		 Batería Li-ion	 Batería NiMH	 Batería Li-ion	 Batería NiMH
Indicar estado del sistema	 LEDs de señalización			 LEDs de señalización	 LEDs de señalización	 LEDs de señalización	 LEDs de señalización
Indicar estado de grabación	 Pantalla LCD	 App de celular.1		 App de celular.1	 Pantalla LCD	 Pantalla LCD	 App de celular.1
Controlar proceso de grabación	 Botones	 App de celular.2		 App de celular.2	 Botones	 Botones	 App de celular.2

Para poder determinar la mejor solución, se realiza una evaluación técnica económica tomando como base los requisitos de diseño. Los resultados de esta evaluación son presentados en la Tabla 0.21.

Tabla 0.21. Tabla de evaluación para el nivel 4.

Evaluation Chart												
Design Criteria	j=	1		2		3		4		o		
		Solution 1		Solution 2		Solution 3		Solution 4		Optimal		
		W _{s1}	W _{s1} .W _r	W _{s2}	W _{s2} .W _r	W _{s3}	W _{s3} .W _r	W _{s4}	W _{s4} .W _r	W _o	W _o .W _r	
Technical analysis												
3	Sistema liviano	3	4	12	3	9	4	12	3	9	4	12
3	Peso balanceado	3	4	12	3	9	4	12	3	9	4	12
1	Soporte cómodo	1	3	3	4	4	3	3	4	4	4	4
1	Autonomía energética	1	4	4	3	3	4	4	3	3	4	4
1	Comandos de control sencillos	1	3	3	3	3	3	3	3	3	4	4
1	Soporte cómodo	1	4	4	3	3	3	3	4	4	4	4
Total technical value		T_{t1}	38	T_{t2}	31	T_{t3}	37	T_{t4}	32	T_{to}	40	
Relative technical value		R_{t1}	0.95	R_{t2}	0.78	R_{t3}	0.93	R_{t4}	0.80	R_{to}	1.00	
Economic analysis												
3	Sistema liviano	3	3	9	3	9	3	9	3	9	4	12
3	Peso balanceado	3	3	9	3	9	3	9	3	9	4	12
1	Soporte cómodo	1	3	3	4	4	3	3	4	4	4	4
1	Autonomía energética	1	3	3	3	3	3	3	3	3	4	4
1	Soporte cómodo	1	3	3	3	3	3	3	3	3	4	4
Total economic value		T_{e1}	27	T_{e2}	28	T_{e3}	27	T_{e4}	28	T_{eo}	36	
Relative economic value		R_{e1}	0.75	R_{e2}	0.78	R_{e3}	0.75	R_{e4}	0.78	R_{eo}	1.00	
Hyperbolic rating		H₁₁	0.84	H₁₂	0.78	H₁₃	0.83	H₁₄	0.79	H_{1o}	1.00	

Como se pudo observar, luego de haber analizado las dos soluciones presentadas en la matriz morfológica en base a los requisitos de diseño, la solución con el mayor puntaje fue la número 1 con 0.84. A continuación, se presenta un resumen de las subfunciones con sus medios óptimos.

- Proveer energía.2 → Batería Li-ion
- Indicar estado del sistema → LEDs de señalización
- Indicar estado de grabación → App de celular.1
- Controlar proceso de grabación → App de celular.2

Cabe resaltar que los números ‘1’ y ‘2’ del medio “App de celular” son solo para que el programa del árbol de funciones y medios en Excel funcione correctamente. “App de celular.1” y “App de celular.2” son el mismo medio. Además, se mencionó en la descripción de las funciones “Indicar estado de grabación” y “Controlar proceso de grabación” que los medios que conforman su *hardware* serían un *smartphone* tanto como “Interfaz de entrada” como “Interfaz de salida” y un módulo *bluetooth* como “Sistema de información”, el cual se comunicará con el microcontrolador.

ANEXO C: Bosquejos del diseño conceptual

Se presentan los bosquejos del sistema físico los cuáles muestran el diseño preliminar que tendrían las SRLs.

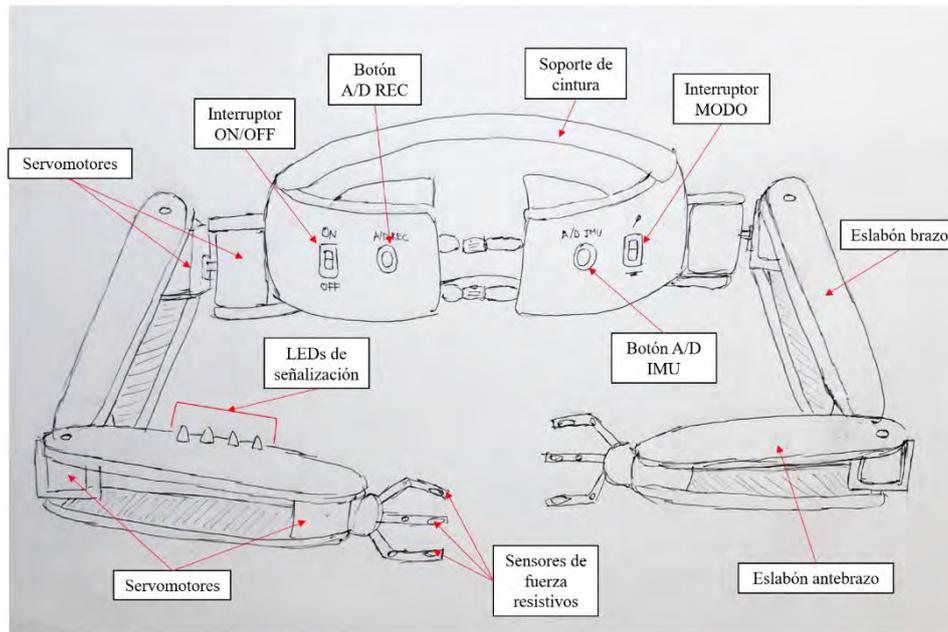


Figura 0.5. Vista frontal de la SRLs.

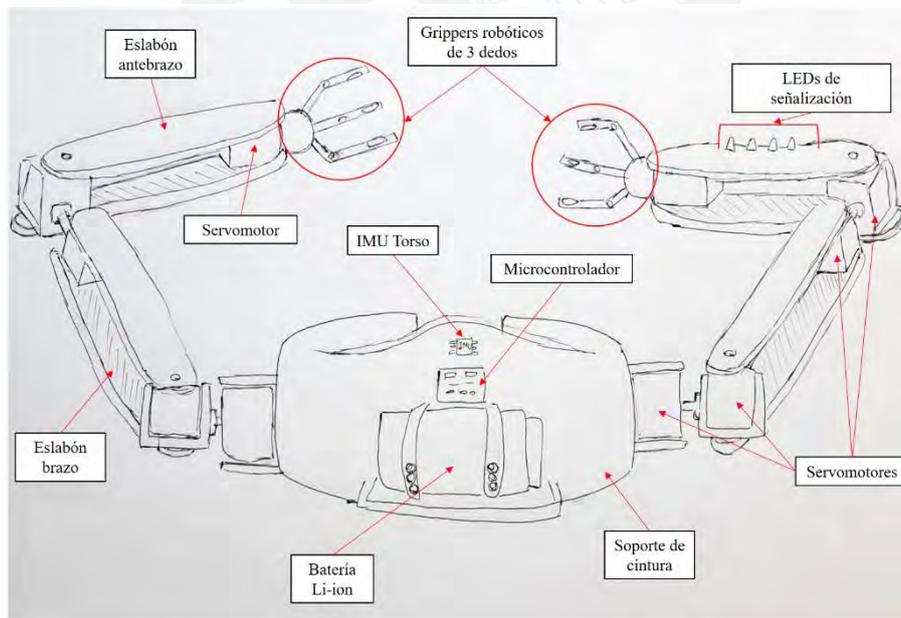


Figura 0.6. Vista posterior de las SRLs.

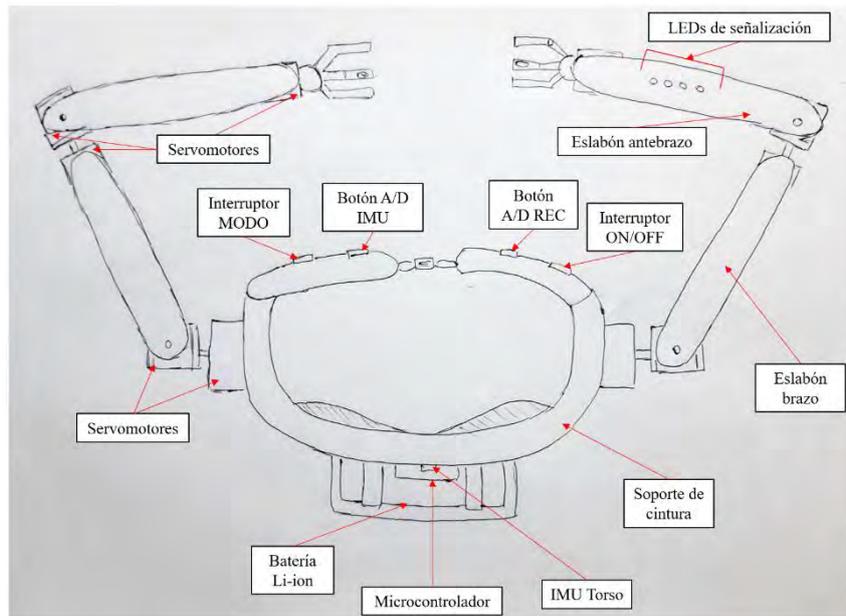


Figura 0.7. Vista superior de las SRLs

En la Figura 0.5, Figura 0.6 y Figura 0.7 se muestran las SRLs en la vista frontal, posterior y superior respectivamente. Se puede observar que se cuenta con un soporte de cintura, el cual tendrá una carcasa por fuera y por dentro tendrá un material suave para comodidad del usuario. En la parte frontal del soporte de cintura se encuentran los interruptores para encendido/apagado y cambio de modo del sistema. Además, se encuentran los botones para activar/desactivar el IMU Pie y activar/desactivar el modo grabación.

En la parte posterior de las SRLs hay un soporte para sostener la batería Li-ion, la cual se ajusta al soporte de cintura mediante correas. Sobre la batería, se coloca el microcontrolador del sistema y el IMU Torso el cual se encarga de detectar las perturbaciones causadas por los movimientos del usuario. El módulo *Bluetooth* para la conexión con el *Smartphone* está instalado en la misma zona del microcontrolador.

A los lados del soporte de cintura, están adjuntos los brazos de las SRLs. Cada brazo está conformado por un eslabón-brazo, un eslabón antebrazo y un gripper robótico de 3 dedos como efector final. Asimismo, tanto en la articulación del hombro como en la del codo hay dos servomotores conectados en serie y en la articulación de la muñeca hay un servomotor que permite la rotación axial del gripper. En total hay 5 GDL por brazo que permiten que el gripper se desplace y rote adecuadamente por el espacio de la cocina.

En cada dedo de los grippers está instalado un sensor de fuerza resistivo para medir la fuerza con la que se toman los objetos. Adicionalmente, en la parte superior del eslabón-

antebrazo derecho se han colocado los 4 LEDs que sirven como indicadores de estado del sistema.

En la Figura 0.8, se muestra la disposición del IMU Pie sobre el pie del usuario. La conexión entre el IMU y el controlador será mediante cables. Los cables irían a lo largo de la pierna desde el IMU Pie hasta el microcontrolador. Se puede observar que el IMU se sostiene con un soporte que se coloca sobre el empeine del usuario y se ajusta con una cinta que va alrededor de la zapatilla.

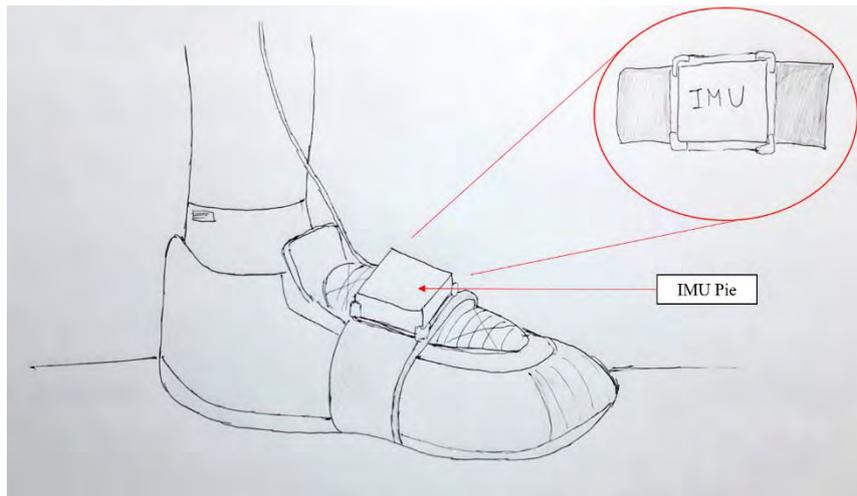


Figura 0.8. Bosquejo del IMU Pie

ANEXO D: Códigos de MATLAB

```
1   %% Parámetros de Denavit Hartenberg usando toolbox de Peter Corke
2   a1 = 0.15; a2=0.2; a3= 0.15; a4=0.15; a5=0.05;
3   deg=pi/180;
4
5   % Modelando brazo izquierdo
6   LL(1)= Revolute('d',0,'a',0,'alpha',pi/2); %Joint extra para que se
7   vea echado
8   LL(2)= Revolute('d',a1,'a',0,'alpha',-pi/2);
9   LL(3)= Revolute('d',0,'a',0,'alpha',pi/2);
10  LL(4)= Revolute('d',a2+a3,'a',0,'alpha',-pi/2);
11  LL(5)= Revolute('d',0,'a',0,'alpha',-pi/2);
12  LL(6)= Revolute('d',a4+a5,'a',0,'alpha',0);
13
14  SRL_Left = SerialLink (LL,'name','SRL Left', 'base', transl(0, -0.25,
15  0));
16
17  % Estableciendo posición inicial
18  pos_ini_L = [0 0 -pi/2 0 pi/2 0];
19
20  % Modelando brazo derecho
21  LR(1)= Revolute('d',0,'a',0,'alpha',-pi/2); %Joint extra para que se
22  vea echado
23  LR(2)= Revolute('d',a1,'a',0,'alpha',pi/2);
24  LR(3)= Revolute('d',0,'a',0,'alpha',-pi/2);
25  LR(4)= Revolute('d',a2+a3,'a',0,'alpha',-pi/2);
26  LR(5)= Revolute('d',0,'a',0,'alpha',pi/2);
27  LR(6)= Revolute('d',a4+a5,'a',0,'alpha',0);
28
29  SRL_Right = SerialLink (LR,'name','SRL Right', 'base', transl(0, 0.25,
30  0));
31
32  % Estableciendo posición inicial
33  pos_ini_R = [0 0 pi/2 0 -pi/2 0]
34
35  %Otras posiciones
36  pos_ret_L = [0 pi/2 -pi/2 0 45*deg 0]; % posición retraída Left
37  pos_ret_R = [0 -pi/2 pi/2 0 -135*deg 0]; % posición retraída Right
38  pos_ext_L = [0 0 0 0 pi 0]; % posición extendida Left
39  pos_ext_R = [0 0 0 0 0 0]; % posición extendida Right
40
41  % Cinemática directa
42  H_ini_L= SRL_Left.fkine(pos_ini_L)
43  H_ini_R= SRL_Right.fkine(pos_ini_R)
44
45  %% Mostrar SRLs en su posición inicial
46  figure(1)
47  SRL_Left.plot(pos_ini_L, 'workspace', [-0.6, 0.6, -1, 1, -0.6, 0.6])
48  hold on
49  SRL_Right.plot(pos_ini_R)
50  xlabel('X[m]'),ylabel('Y[m]'), zlabel('Z[m]')
51  %SRL_Right.teach
52
53
54  %% Mostrar SRLs en su posición extendida
55  figure(1)
56  SRL_Left.plot(pos_ext_L, 'workspace', [-0.6, 0.6, -1, 1, -0.6, 0.6])
```

```

57 hold on
58 SRL_Right.plot(pos_ext_R)
59 xlabel('X[m]'),ylabel('Y[m]'), zlabel('Z[m]')
60
61
62 %% Mostrar SRLs en su posición retraída
63 figure(1)
64 SRL_Left.plot(pos_ret_L)
65 hold on
66 SRL_Right.plot(pos_ret_R)
67 xlabel('X[m]'),ylabel('Y[m]'), zlabel('Z[m]')
68
69 %% Prueba trayectorias sacadas con teach
70 % Mover la cuchara brazo derecho
71 t_05 = (0:0.05:0.5)';
72 t_1 = (0:0.05:1)';
73 t_2 = (0:0.05:2)';
74
75 %Linea = ('r', 'LineWidth', 2)
76
77 q1= [0 36*deg 36*deg 3.6*deg -46.8*deg 90*deg];
78 q2= [0 36*deg 64.8*deg 3.6*deg -57.6*deg 90*deg];
79 q3= [0 36*deg 46.8*deg 3.6*deg -111.6*deg 90*deg];
80 q4= [0 36*deg 10.8*deg 3.6*deg -104.4*deg 90*deg];
81
82 traj_ret1 = jtraj(pos_ini_R, q1, t_2);
83 traj_ret2 = jtraj(q1, q2, t_1);
84 traj_ret3 = jtraj(q2, q3, t_1);
85 traj_ret4 = jtraj(q3, q4, t_1);
86 traj_ret5 = jtraj(q4, q1, t_1);
87
88 figure(1)
89 SRL_Left.plot(pos_ini_L, 'workspace', [-0.6, 0.6, -1, 1, -0.6, 0.6])
90 hold on
91 SRL_Right.plot(pos_ini_R)
92 xlabel('X[m]'),ylabel('Y[m]'), zlabel('Z[m]')
93 SRL_Right.plot(traj_ret1, 'trail', 'r')
94 SRL_Right.plot(traj_ret2, 'trail', 'r')
95 SRL_Right.plot(traj_ret3, 'trail', 'r')
96 SRL_Right.plot(traj_ret4, 'trail', 'r')
97 SRL_Right.plot(traj_ret5, 'trail', 'r')
98
99 %% Prueba trayectorias sacadas con teach
100 % Mover la cuchara brazo izquierdo
101 t_05 = (0:0.05:0.5)';
102 t_1 = (0:0.05:1)';
103 t_15 = (0:0.05:1.5)';
104 t_2 = (0:0.05:2)';
105
106 %Linea = ('r', 'LineWidth', 2)
107
108 q1= [0 -32.4*deg -39.6*deg -3.6*deg 108*deg -90*deg];
109 q2= [0 -32.4*deg -72*deg -3.6*deg 104.2*deg -90*deg];
110 q3= [0 -32.4*deg -39.6*deg -3.6*deg 57.6*deg -90*deg];
111 q4= [0 -32.4*deg -14.4*deg -3.6*deg 72*deg -90*deg];
112
113 traj_ret1 = jtraj(pos_ini_L, q1, t_2);
114 traj_ret2 = jtraj(q1, q2, t_1);
115 traj_ret3 = jtraj(q2, q3, t_1);

```

```

116 traj_ret4 = jtraj(q3, q4, t_1);
117 traj_ret5 = jtraj(q4, q1, t_1);
118
119 figure(1)
120 SRL_Right.plot(pos_ini_R, 'workspace', [-0.6, 0.6, -1, 1, -0.6, 0.6])
121 hold on
122 SRL_Left.plot(pos_ini_L)
123 xlabel('X[m]'),ylabel('Y[m]'), zlabel('Z[m]')
124 SRL_Left.plot(traj_ret1, 'trail', 'r')
125 SRL_Left.plot(traj_ret2, 'trail', 'r')
126 SRL_Left.plot(traj_ret3, 'trail', 'r')
127 SRL_Left.plot(traj_ret4, 'trail', 'r')
128 SRL_Left.plot(traj_ret5, 'trail', 'r')
129
130
131 %% Probando para secado de plato
132 %teach brazo derecho
133 figure(1)
134 SRL_Left.plot([0 -7.2*deg -28.8*deg -28.8*deg 154.8*deg 0],
135 'workspace', [-0.6, 0.6, -1, 1, -0.6, 0.6])
136 hold on
137 SRL_Right.plot(pos_ini_R)
138 xlabel('X[m]'),ylabel('Y[m]'), zlabel('Z[m]')
139 SRL_Right.teach
140
141
142 %% Probando para secado de plato
143 %teach brazo izquierdo
144 figure(1)
145 SRL_Left.plot(pos_ini_L, 'workspace', [-0.6, 0.6, -1, 1, -0.6, 0.6])
146 hold on
147 SRL_Right.plot([0 -61.2*deg 0*deg 3.6*deg -10.8*deg -90])
148 xlabel('X[m]'),ylabel('Y[m]'), zlabel('Z[m]')
149 SRL_Left.teach
150
151 %% Trayectorias secando platos
152 % El caso presente es el de primero izquierdo recibe plato y derecho
153 seca
154 % Derecho agarra el plato del izquierdo e izquierdo seca
155 % Derecho deja plato a un lado y ambos brazos vuelven a posición
156 inicial.
157
158 % Posiciones brazo derecho
159 q1_r = [0 -64.8*deg 90*deg 7.2*deg -100.8*deg 0]; %inicial
160 q2_r = [0 -61.2*deg 0 3.6*deg -10.8*deg -90*deg]; %Agarrar toalla
161 q3_r = [0 -54*deg 111.6*deg 3.6*deg -72*deg 0]; % posicion de secar
162 q4_r = [0 -54*deg 111.6*deg 3.6*deg -72*deg 90*deg]; %secado girado
163 q5_r = [0 -54*deg 111.6*deg 3.6*deg -72*deg -90*deg]; %secado girado
164 q6_r = [0 -61.2*deg 0 3.6*deg -10.8*deg -90*deg]; %Dejar toalla
165 q7_r = [0 -54*deg 111.6*deg 3.6*deg -72*deg -90*deg]; %agarrar plato
166 q8_r = [0 3.6*deg 75.6*deg 0 -90*deg 0]; %Transicion
167 q9_r = [0 0 0 -90*deg -90*deg 0]; %Dejar plato
168 % Transicion
169 % Posicion inicial
170
171 % Posiciones brazo izquierdo
172 q1_l = [0 46.8*deg -104.4*deg -64.8*deg 39.6*deg 0]; %Esperando
173 recibir plato
174 q2_l = [0 54*deg -122.4*deg -3.6*deg 126*deg 0]; %posicion secar, se

```

```

175 queda ahí hasta q5_r
176 q3_l = [0 -7.2*deg -28.8*deg 28.8*deg 154.8*deg 0]; %agarrar toalla
177 q4_l = [0 54*deg -122.4*deg -3.6*deg 126*deg 0]; %posicion secar
178 q5_l = [0 54*deg -122.4*deg -3.6*deg 126*deg 90*deg]; %secado girado
179 q6_l = [0 54*deg -122.4*deg -3.6*deg 126*deg -90*deg]; %secado girado
180 q7_l = [0 -7.2*deg -28.8*deg 28.8*deg 154.8*deg 0]; %Dejar toalla
181 q8_l = [0 46.8*deg -104.4*deg -64.8*deg 39.6*deg 0]; %Posicion inicial
182
183 %Definimos vectores de tiempo
184 t_05 = (0:0.05:0.5)';
185 t_1 = (0:0.05:1)';
186 t_15 = (0:0.05:1.5)';
187 t_2 = (0:0.05:2)'
188
189 %Se definen las trayectorias
190 trajLeft1 = jtraj(pos_ini_L, q1_l, t_1); %Posicion de recibir plato
191 trajLeft2 = jtraj(q1_l, q2_l, t_1); %Recibio plato, posicion de secado
192 trajLeft3 = jtraj(q2_l, q3_l, t_15); %Ir a agarrar toalla
193 trajLeft4 = jtraj(q3_l, q4_l, t_15); %Posicion de secado
194 trajLeft5 = jtraj(q4_l, q5_l, t_05); %Girar para secar
195 trajLeft6 = jtraj(q5_l, q6_l, t_1); %Girar para secar
196 trajLeft7 = jtraj(q6_l, q7_l, t_15); %Dejar toalla
197 trajLeft8 = jtraj(q7_l, q8_l, t_15); %Retorno a posicion inicial
198
199
200 trajRight1 = jtraj(pos_ini_R, q1_r, t_1);
201 trajRight2 = jtraj(q1_r, q2_r, t_15); %Agarrar toalla
202 trajRight3 = jtraj(q2_r, q3_r, t_15); %Posicion de secar
203 trajRight4 = jtraj(q3_r, q4_r, t_05); %Girar efector final para secado
204 trajRight5 = jtraj(q4_r, q5_r, t_05);
205 trajRight6 = jtraj(q5_r, q6_r, t_15); %Dejar toalla
206 trajRight7 = jtraj(q6_r, q7_r, t_15); %Ir a agarrar el plato
207 trajRight8 = jtraj(q7_r, q8_r, t_1); %Transicion
208 trajRight9 = jtraj(q8_r, q9_r, t_1); %Dejar plato
209 trajRight10 = jtraj(q9_r, q6_r, t_15); %Transicion
210 trajRight11 = jtraj(q6_r, q1_r, t_15); %retorno a inicial
211
212
213 figure(1)
214 SRL_Right.plot(pos_ini_R, 'workspace', [-0.6, 0.6, -1, 1, -0.6, 0.6])
215 hold on
216 SRL_Left.plot(pos_ini_L)
217 xlabel('X[m]'),ylabel('Y[m]'), zlabel('Z[m]')
218 SRL_Left.plot(trajLeft1, 'trail', 'r')
219
220 SRL_Right.plot(trajRight1, 'trail', 'r')
221 SRL_Right.plot(trajRight2, 'trail', 'r')
222 SRL_Right.plot(trajRight3, 'trail', 'r')
223
224 SRL_Left.plot(trajLeft2, 'trail', 'r') %Izquierdo tiene el plato
225
226 SRL_Right.plot(trajRight4, 'trail', 'r')
227 SRL_Right.plot(trajRight5, 'trail', 'r')
228 SRL_Right.plot(trajRight6, 'trail', 'r')
229 SRL_Right.plot(trajRight7, 'trail', 'r') %Derecho tiene el plato
230
231 SRL_Left.plot(trajLeft3, 'trail', 'r')
232 SRL_Left.plot(trajLeft4, 'trail', 'r')
233 SRL_Left.plot(trajLeft5, 'trail', 'r')

```

```

234 SRL_Left.plot(trajLeft6, 'trail', 'r')
235 SRL_Left.plot(trajLeft7, 'trail', 'r')
236 SRL_Left.plot(trajLeft8, 'trail', 'r')
237
238 SRL_Right.plot(trajRight8, 'trail', 'r')
239 SRL_Right.plot(trajRight9, 'trail', 'r')
240 SRL_Right.plot(trajRight10, 'trail', 'r')
241 SRL_Right.plot(trajRight11, 'trail', 'r')
242
243
244 % Matriz de rotación brazo izquierdo
245 syms theta1 theta2 theta3 theta4 theta5
246
247 Rbase_0_L = [1 0 0; 0 1 0; 0 0 1]*[1 0 0; 0 0 -1; 0 1 0];
248 R0_1_L = [cos(theta1) -sin(theta1) 0; sin(theta1) cos(theta1) 0;
249 0 0 1]*[1 0 0; 0 0 1; 0 -1 0];
250 R1_2_L = [cos(theta2) -sin(theta2) 0; sin(theta2) cos(theta2) 0;
251 0 0 1]*[0 0 -1; -1 0 0; 0 1 0];
252 R2_3_L = [cos(theta3) -sin(theta3) 0; sin(theta3) cos(theta3) 0;
253 0 0 1]*[1 0 0; 0 0 1; 0 -1 0];
254 R3_4_L = [cos(theta4) -sin(theta4) 0; sin(theta4) cos(theta4) 0;
255 0 0 1]*[0 0 -1; 1 0 0; 0 -1 0];
256 R4_5_L = [cos(theta5) -sin(theta5) 0; sin(theta5) cos(theta5) 0;
257 0 0 1]*[1 0 0; 0 1 0; 0 0 1];
258
259 Rbase_5_L = Rbase_0_L*R0_1_L*R1_2_L*R2_3_L*R3_4_L*R4_5_L
260
261 % Desplazamiento brazo izquierdo
262 % Los valores de q son de prueba
263 q2 = -43.2*deg;
264 q3 = -43.2*deg;
265 q4 = 54*deg;
266 q5 = 140.4*deg;
267
268 x = (a2+a3)*sin(q3)*cos(q2) - (a4+a5)*sin(pi-q5)*cos(q4-pi)
269 y = (-0.25 -(a1 + (a2+a3)*cos(q3))) + (a4+a5)*cos(pi-q5)
270 z = (a2+a3)*sin(q3)*sin(q2) - (a4+a5)*sin(pi-q5)*sin(q4-pi)
271
272 xbase3 = (a2+a3)*sin(q3)*cos(q2)
273 ybase3 = (-0.25 -(a1 + (a2+a3)*cos(q3)))
274 zbase3 = (a2+a3)*sin(q3)*sin(q2)
275
276 x35 = - (a4+a5)*sin(pi-q5)*cos(q4-pi)
277 y35 = (a4+a5)*cos(pi-q5)
278 z35 = - (a4+a5)*sin(pi-q5)*sin(q4-pi)
279
280 % Desplazamiento brazo derecho
281 % Los valores de q son de prueba
282 q2 = -18*deg;
283 q3 = 28.8*deg;
284 q4 = -28.8*deg;
285 q5 = -46.8*deg;
286
287 x = -(a2+a3)*sin(q3)*cos(q2) - (a4+a5)*sin(-q5)*cos(q4)
288 y = 0.25 +a1 + (a2+a3)*cos(q3) + (a4+a5)*cos(-q5)
289 z = (a2+a3)*sin(q3)*sin(q2) + (a4+a5)*sin(-q5)*sin(q4)
290
291 xbase3 = -(a2+a3)*sin(q3)*cos(q2)
292 ybase3 = 0.25 +a1 + (a2+a3)*cos(q3)

```

```

293 zbase3 = (a2+a3)*sin(q3)*sin(q2)
294
295 x35 = -(a4+a5)*sin(-q5)*cos(q4)
296 y35 = (a4+a5)*cos(-q5)
297 z35 = (a4+a5)*sin(-q5)*sin(q4)
298
299 %% Colocarle masas a los eslabones
300 % Considerando masa del motor
301 SRL_Right.links(2).m = 0.084+0.8;
302 SRL_Right.links(3).m = 0.112+0.8;
303 SRL_Right.links(4).m = 0.084+0.35;
304 SRL_Right.links(5).m = 0.084+0.35;
305 SRL_Right.links(6).m = 0.028+0.35;
306
307 I2= diag([0.000160665 0.000160665 6.55777E-06]);
308 I3= diag([8.74369E-06 0.000377436 0.000377436]);
309 I4= diag([0.000160665 0.000160665 6.55777E-06]);
310 I5= diag([6.55777E-06 0.000160665 0.000160665]);
311 I6= diag([6.92209E-06 6.92209E-06 2.18592E-06]);
312
313 SRL_Right.links(2).I = I2;
314 SRL_Right.links(3).I = I3;
315 SRL_Right.links(4).I = I4;
316 SRL_Right.links(5).I = I5;
317 SRL_Right.links(6).I = I6;
318
319 SRL_Right.payload(2, [0 0 0]); % masa de 2 kg en el efector final
320 % SRL_Right.gravload(pos_ini_R)
321
322
323 %% Pruebas para hallar la velocidad angular de los eslabones
324 % Trayectoria de mover la cuchara, brazo derecho
325 % Asumiendo w constante y alpha 0
326 % w = (posfinal - pos inicial) / t en rad/s
327 %Compilar denavit-hertenberg
328 %Compilar colocar masas
329 %Compilar sección de trayectoria de mover la cuchara de la olla brazo
330 %derecho antes
331
332 % traj_ret1 dura 2 seg
333 w2t1 = (traj_ret1(length(traj_ret1), 2) - traj_ret1(1,2)) / 2;
334 w3t1 = (traj_ret1(length(traj_ret1), 3) - traj_ret1(1,3)) / 2;
335 w4t1 = (traj_ret1(length(traj_ret1), 4) - traj_ret1(1,4)) / 2;
336 w5t1 = (traj_ret1(length(traj_ret1), 5) - traj_ret1(1,5)) / 2;
337 w6t1 = (traj_ret1(length(traj_ret1), 6) - traj_ret1(1,6)) / 2;
338
339 % armando matriz
340 w2_vect1 = ones(length(traj_ret1),1)*w2t1;
341 w3_vect1 = ones(length(traj_ret1),1)*w3t1;
342 w4_vect1 = ones(length(traj_ret1),1)*w4t1;
343 w5_vect1 = ones(length(traj_ret1),1)*w5t1;
344 w6_vect1 = ones(length(traj_ret1),1)*w6t1;
345
346 w_traj_ret1 = [zeros(length(traj_ret1),1) w2_vect1 w3_vect1 w4_vect1
347 w5_vect1 w6_vect1];
348
349 % traj_ret2 dura 1 seg
350 w2t2 = (traj_ret2(length(traj_ret2), 2) - traj_ret2(1,2)) / 1;
351 w3t2 = (traj_ret2(length(traj_ret2), 3) - traj_ret2(1,3)) / 1;

```

```

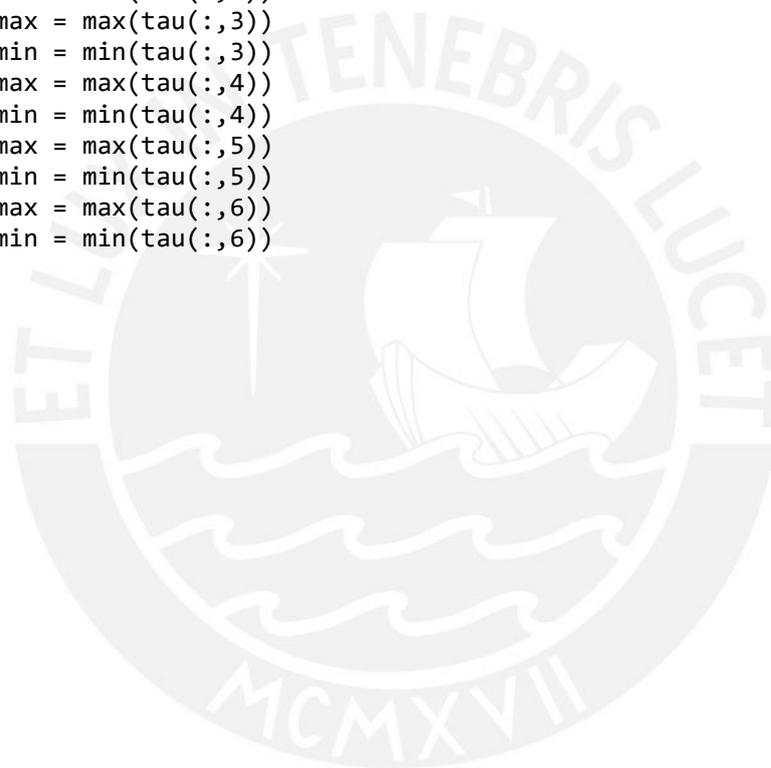
352 w4t2 = (traj_ret2(length(traj_ret2), 4) - traj_ret2(1,4)) / 1;
353 w5t2 = (traj_ret2(length(traj_ret2), 5) - traj_ret2(1,5)) / 1;
354 w6t2 = (traj_ret2(length(traj_ret2), 6) - traj_ret2(1,6)) / 1;
355
356 % armando matriz
357 w2_vect2 = ones(length(traj_ret2),1)*w2t2;
358 w3_vect2 = ones(length(traj_ret2),1)*w3t2;
359 w4_vect2 = ones(length(traj_ret2),1)*w4t2;
360 w5_vect2 = ones(length(traj_ret2),1)*w5t2;
361 w6_vect2 = ones(length(traj_ret2),1)*w6t2;
362
363 w_traj_ret2 = [zeros(length(traj_ret2),1) w2_vect2 w3_vect2 w4_vect2
364 w5_vect2 w6_vect2];
365
366 % traj_ret3 dura 1 seg
367 w2t3 = (traj_ret3(length(traj_ret3), 2) - traj_ret3(1,2)) / 1;
368 w3t3 = (traj_ret3(length(traj_ret3), 3) - traj_ret3(1,3)) / 1;
369 w4t3 = (traj_ret3(length(traj_ret3), 4) - traj_ret3(1,4)) / 1;
370 w5t3 = (traj_ret3(length(traj_ret3), 5) - traj_ret3(1,5)) / 1;
371 w6t3 = (traj_ret3(length(traj_ret3), 6) - traj_ret3(1,6)) / 1;
372
373 % armando matriz
374 w2_vect3 = ones(length(traj_ret3),1)*w2t3;
375 w3_vect3 = ones(length(traj_ret3),1)*w3t3;
376 w4_vect3 = ones(length(traj_ret3),1)*w4t3;
377 w5_vect3 = ones(length(traj_ret3),1)*w5t3;
378 w6_vect3 = ones(length(traj_ret3),1)*w6t3;
379
380 w_traj_ret3 = [zeros(length(traj_ret3),1) w2_vect3 w3_vect3 w4_vect3
381 w5_vect3 w6_vect3];
382
383 % traj_ret4 dura 1 seg
384 w2t4 = (traj_ret4(length(traj_ret4), 2) - traj_ret4(1,2)) / 1;
385 w3t4 = (traj_ret4(length(traj_ret4), 3) - traj_ret4(1,3)) / 1;
386 w4t4 = (traj_ret4(length(traj_ret4), 4) - traj_ret4(1,4)) / 1;
387 w5t4 = (traj_ret4(length(traj_ret4), 5) - traj_ret4(1,5)) / 1;
388 w6t4 = (traj_ret4(length(traj_ret4), 6) - traj_ret4(1,6)) / 1;
389
390 % armando matriz
391 w2_vect4 = ones(length(traj_ret4),1)*w2t4;
392 w3_vect4 = ones(length(traj_ret4),1)*w3t4;
393 w4_vect4 = ones(length(traj_ret4),1)*w4t4;
394 w5_vect4 = ones(length(traj_ret4),1)*w5t4;
395 w6_vect4 = ones(length(traj_ret4),1)*w6t4;
396
397 w_traj_ret4 = [zeros(length(traj_ret4),1) w2_vect4 w3_vect4 w4_vect4
398 w5_vect4 w6_vect4];
399
400 tray_movRight = [traj_ret1; traj_ret2; traj_ret3; traj_ret4];
401 w_movRight = [w_traj_ret1; w_traj_ret2; w_traj_ret3; w_traj_ret4];
402 t_movRight = [t_2 ; t_1+2.05; t_1+3.10 ;t_1+4.15]
403
404 tau = SRL_Right.rne(tray_movRight, w_movRight, tray_movRight*0)
405 figure(2)
406 plot(t_movRight, tau)
407 legend('q1', 'q2', 'q3', 'q4', 'q5', 'q6')
408
409 figure(3)
410 plot(t_movRight, w_movRight)

```

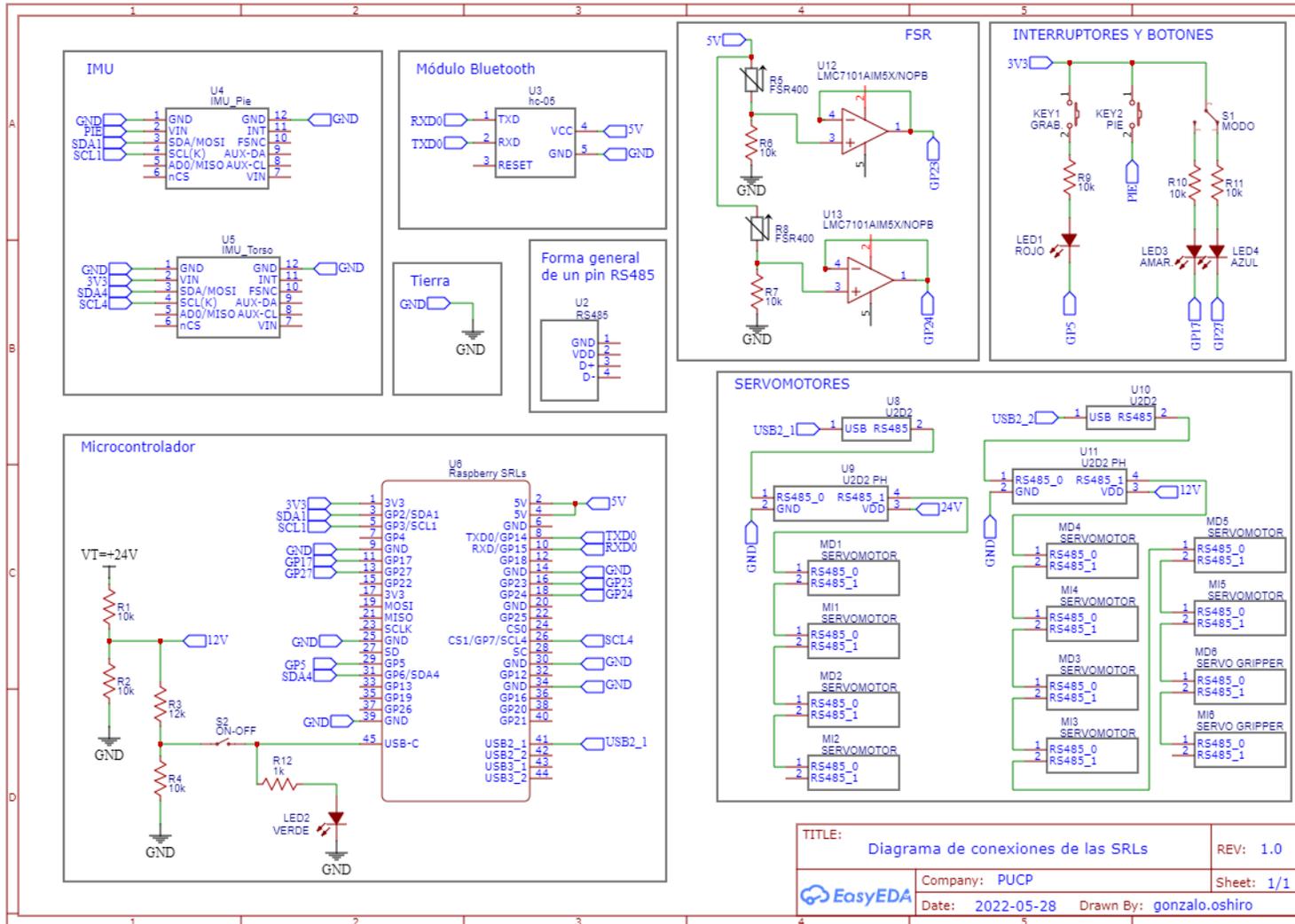
```

411 legend('w1', 'w2', 'w3', 'w4', 'w5', 'w6')
412 %% VALORES MÁXIMOS Y MÍNIMOS (ABSOLUTOS) DE VELOCIDAD ANGULAR
413
414 w2_max = max(w_movRight(:,2))
415 w2_min = min(w_movRight(:,2))
416 w3_max = max(w_movRight(:,3))
417 w3_min = min(w_movRight(:,3))
418 w4_max = max(w_movRight(:,4))
419 w4_min = min(w_movRight(:,4))
420 w5_max = max(w_movRight(:,5))
421 w5_min = min(w_movRight(:,5))
422 w6_max = max(w_movRight(:,6))
423 w6_min = min(w_movRight(:,6))
424
425 %% VALORES MÁXIMOS Y MÍNIMOS (ABSOLUTOS) DE TORQUE
426 tau2_max = max(tau(:,2))
427 tau2_min = min(tau(:,2))
428 tau3_max = max(tau(:,3))
429 tau3_min = min(tau(:,3))
430 tau4_max = max(tau(:,4))
431 tau4_min = min(tau(:,4))
432 tau5_max = max(tau(:,5))
433 tau5_min = min(tau(:,5))
434 tau6_max = max(tau(:,6))
435 tau6_min = min(tau(:,6))

```



ANEXO E: Diagrama esquemático



ANEXO F: Movimientos del pie.

El pie está conformado por un conjunto de articulaciones que, junto con la rotación axial de la rodilla, equivalen a una sola articulación con tres grados de libertad. Este complejo articular tiene tres ejes principales que se cortan en la parte posterior del pie y son perpendiculares entre sí por referencia anatómica como se puede observar en la Figura 12.9 (Balderrama, 2018).

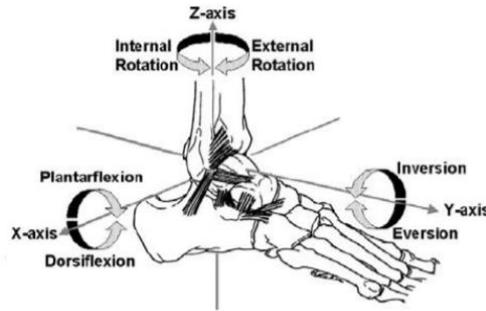


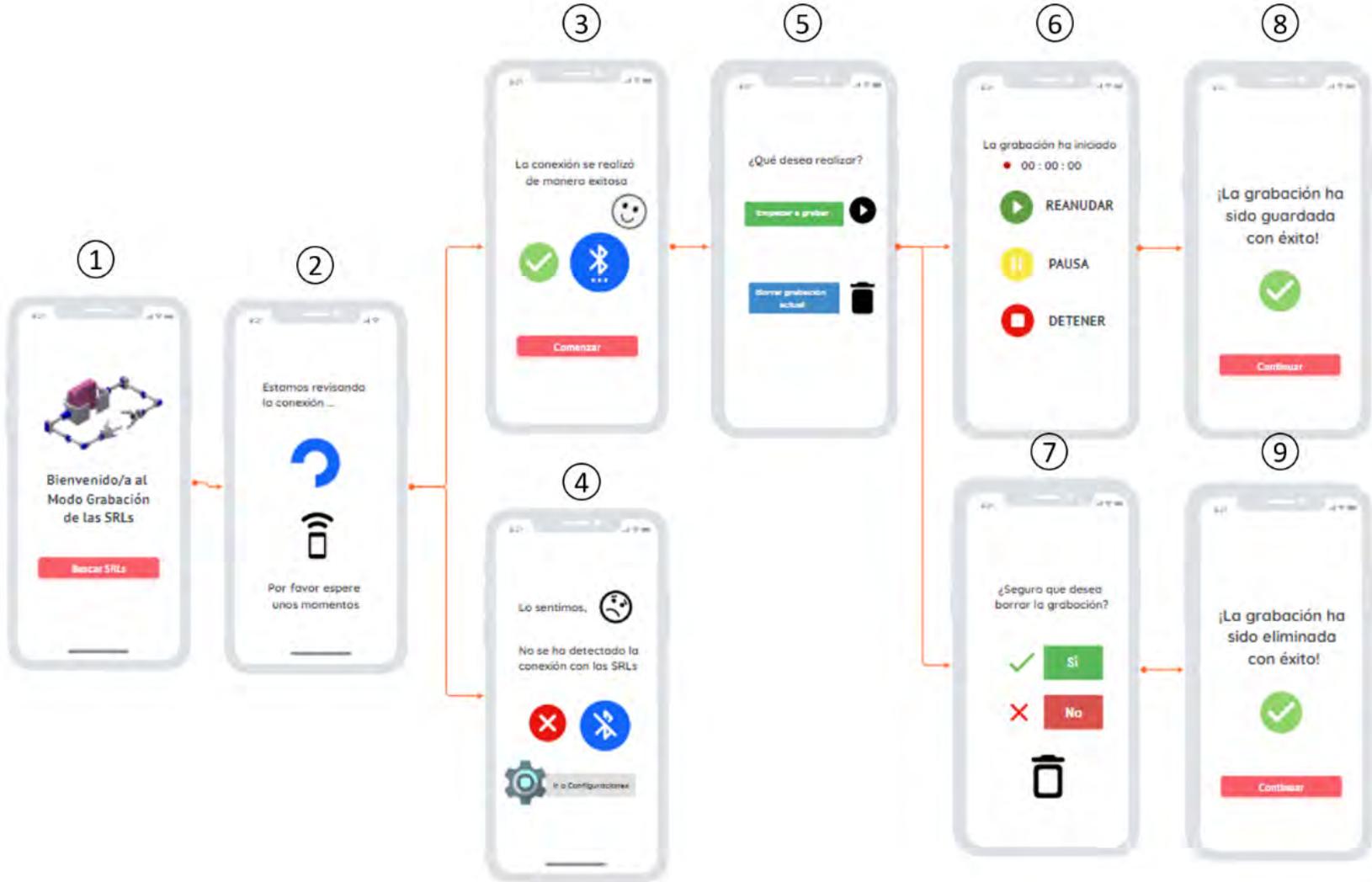
Figura 0.9. Ejes del pie en posición anatómica.
(Fuente: Balderrama, 2018)

Los movimientos del pie son rotaciones alrededor de los ejes mencionados anteriormente. Alrededor del eje X, se dan los movimientos de flexión-extensión del pie que se efectúan en un plano sagital (divide al cuerpo en izquierda y derecha). Alrededor del eje Z, el cual corresponde al eje longitudinal de la pierna, se dan los movimientos de aducción-abducción del pie. Por último, alrededor del plano Y, el cual es longitudinal al pie, se dan los movimientos de pronación-supinación del pie. En la Figura 12.10 se pueden apreciar los seis movimientos mencionados anteriormente (Balderrama, 2018).



Figura 0.10. Movimientos realizados por el pie.
(Fuente: Balderrama, 2018)

ANEXO G: Aplicación de Smartphone



ANEXO H: Cotización de fabricación de eslabones y bridas



CORPORACION EMACIN S.A.C.
 AV. RAMÓN CARCAMO 540 N° 542 | CERCAJO DE LIMA
 RUC N° 20505557477
 TELÉFONOS: 715 - 0297 | 715 - 0298
 CELULAR: 992 106 215
 E-MAIL: comercial@emacin.com.pe
 WEB: www.emacin.com.pe

COTIZACIÓN N° 0000002580-00

SEÑORES: PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU	FECHA: 26/07/2023
RUC: 20155945860	MONEDA: NUEVOS SOLES
DIRECCIÓN: AV. UNIVERSITARIA NRO. 1801 URB. PANDO SAN MIGUEL - LIMA - LIMA	
ATENCIÓN:	TELÉFONO:
E-MAIL: diego.vera@pucp.pe	

DE NUESTRA MAYOR CONSIDERACIÓN REMITIMOS A USTED LO SIGUIENTE:

#	CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	U/M	CANTIDAD	P.UNIT. S/	P.VENTA S/
1	ALD1000015	BARRA NYLÓN 6SA BLANCO D-25MM	MTR	2.00	24.00000	48.00
2	ALD1000022	BARRA NYLÓN 6SA BLANCO D-60MM 1PZA D:60MM X 80CM	MTR	0.80	161.25000	129.00

SUB TOTAL	S/	150.00
IGV 18%	S/	27.00
TOTAL	S/	177.00

CONDICIONES COMERCIALES	
TIEMPO DE ENTREGA:	INMEDIATO
CONDICIÓN DE PAGO:	CONTADO
VALIDEZ DE LA OFERTA:	SOÍAS
LUGAR DE ENTREGA:	LIMA-EN NUESTROS ALMACENES
OBSERVACIONES:	

CUENTA CORRIENTE EMPRESA

BANCO CREDITO «BCP» CUENTA EN SOLES: 191 - 1793557 - 0 - 35
 BANCO CREDITO «BCP» CUENTA EN DOLARES: 191 - 1791467 - 1 - 34
 BANCO CONTINENTAL «BBVA» CUENTA EN SOLES: 0011 - 0161 - 01000400 - 57
 BANCO CONTINENTAL «BBVA» CUENTA EN DOLARES: 0011 - 0161 - 01000420 - 41

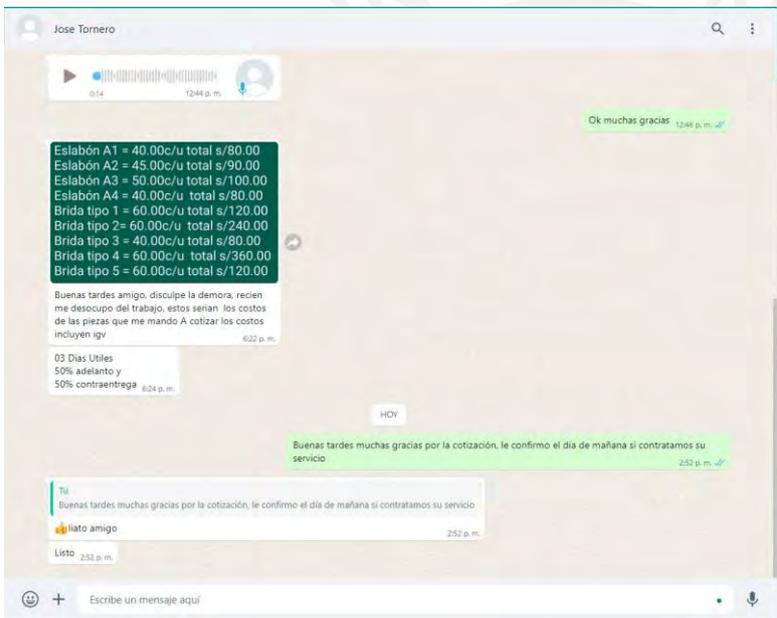
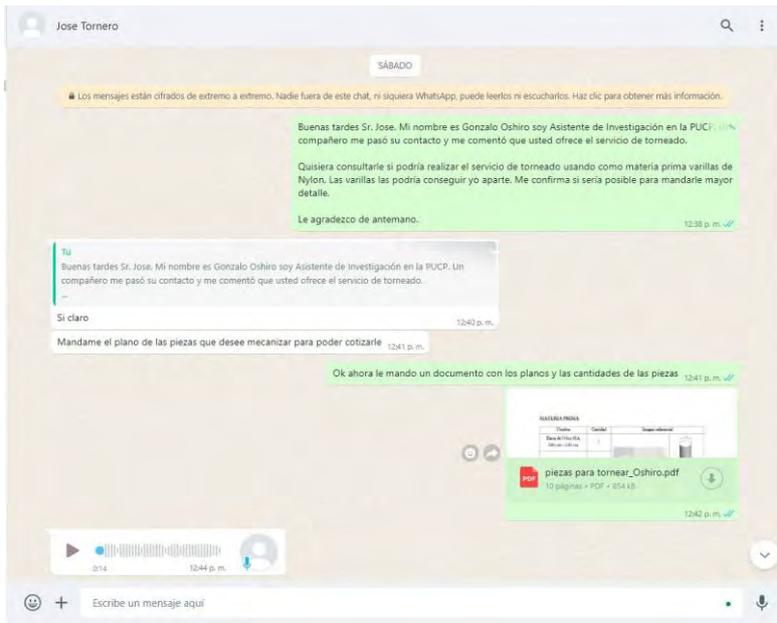
CODIGO CUENTA INTERBANCARIA

BANCO CREDITO «BCP» CUENTA EN SOLES: 002 - 191 - 001793557035 - 52
 BANCO CREDITO «BCP» CUENTA EN DOLARES: 002 - 191 - 001791467134 - 56
 BANCO CONTINENTAL «BBVA» CUENTA EN SOLES: 011 - 161 - 000100040057 - 70
 BANCO CONTINENTAL «BBVA» CUENTA EN DOLARES: 011 - 161 - 000100042041 - 72

CUENTA DETRACCIÓN

00042002917

ATENTAMENTE:
 MIRANZA ZAPATA, ISABEL
 EJECUTIVO COMERCIAL



Eslabón A1 = 40.00c/u total s/80.00
Eslabón A2 = 45.00c/u total s/90.00
Eslabón A3 = 50.00c/u total s/100.00
Eslabón A4 = 40.00c/u total s/80.00
Brida tipo 1 = 60.00c/u total s/120.00
Brida tipo 2 = 60.00c/u total s/240.00
Brida tipo 3 = 40.00c/u total s/80.00
Brida tipo 4 = 60.00c/u total s/360.00
Brida tipo 5 = 60.00c/u total s/120.00

ANEXO I: Cotización de la impresión 3D

Parts & specifications		3D printing	Change technology	
<input type="checkbox"/> Select all parts	Specifications		Quantity	Price
<input type="checkbox"/>  <p>CinturaM1.stl 100,0 × 175,0 × 35,0 mm 117,196.235 mm³</p> <p>View DFM analysis</p>	3D printing PA 12 (SLS) As printed Color: Dyed Black (default) Layer height: 100µm	2	US\$108.66 US\$54.33p/part	
<input type="checkbox"/>  <p>parteDelanteDerecha.stl 95.0 × 200.0 × 180.0 mm 825,147.784 mm³</p> <p>View DFM analysis</p>	3D printing PA 12 (SLS) As printed Color: Dyed Black (default) Layer height: 100µm	1	US\$358.58 US\$358.58p/part	
<input type="checkbox"/>  <p>parteDelanteraIzquierda.stl 95.0 × 200.0 × 180.0 mm 825,720.972 mm³</p> <p>View DFM analysis</p>	3D printing PA 12 (SLS) As printed Color: Dyed Black (default) Layer height: 100µm	1	US\$360.30 US\$360.30p/part	

 <p>parteEspalda_2.1.stl 30.0 × 40.0 × 175.0 mm 185,067.194 mm³</p>	<p>3D printing PA 12 (SLS) As printed Color: Dyed Black (default) Layer height: 100µm</p>	<p>2 US\$140.04 US\$70.02p/part</p> <p>View DFM analysis</p>
 <p>parteEspalda_2.2.stl 30.0 × 40.0 × 175.0 mm 184,535.899 mm³</p>	<p>3D printing PA 12 (SLS) As printed Color: Dyed Black (default) Layer height: 100µm</p>	<p>2 US\$139.74 US\$69.87p/part</p> <p>View DFM analysis</p>
 <p>ParteM4.stl 39.0 × 9.0 × 35.0 mm 3,880.417 mm³</p>	<p>3D printing PA 12 (SLS) As printed Color: Dyed Black (default) Layer height: 100µm</p>	<p>2 US\$9.14 US\$4.57p/part</p> <p>View DFM analysis</p>
 <p>soporte_a3_M4.stl 40.0 × 18.0 × 52.0 mm 10,785.224 mm³</p>	<p>3D printing PA 12 (SLS) As printed Color: Dyed Black (default) Layer height: 100µm</p>	<p>2 US\$14.48 US\$7.24p/part</p> <p>View DFM analysis</p>

	<p>3D printing PA 12 (SLS) As printed Color: Dyed Black (default) Layer height: 100µm</p>	<p>2</p>	<p>US\$32.62 US\$16.31p/part</p>
<p>View DFM analysis</p>			
<p>soporteGripper.stl 100,0 × 13,0 × 100,0 mm 27,443.77 mm³</p>			
	<p>3D printing PA 12 (SLS) As printed Color: Dyed Black (default) Layer height: 100µm</p>	<p>4</p>	<p>US\$113.16 US\$28.29p/part</p>
<p>View DFM analysis</p>			
<p>union_espalda.stl 90,0 × 90,0 × 20,0 mm 77,543.904 mm³</p>			

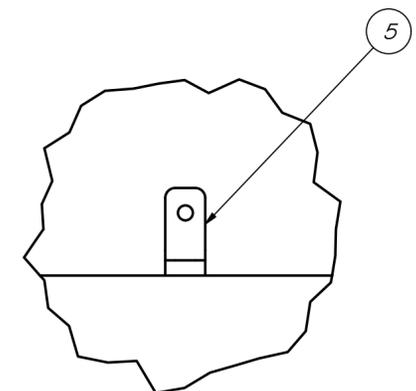
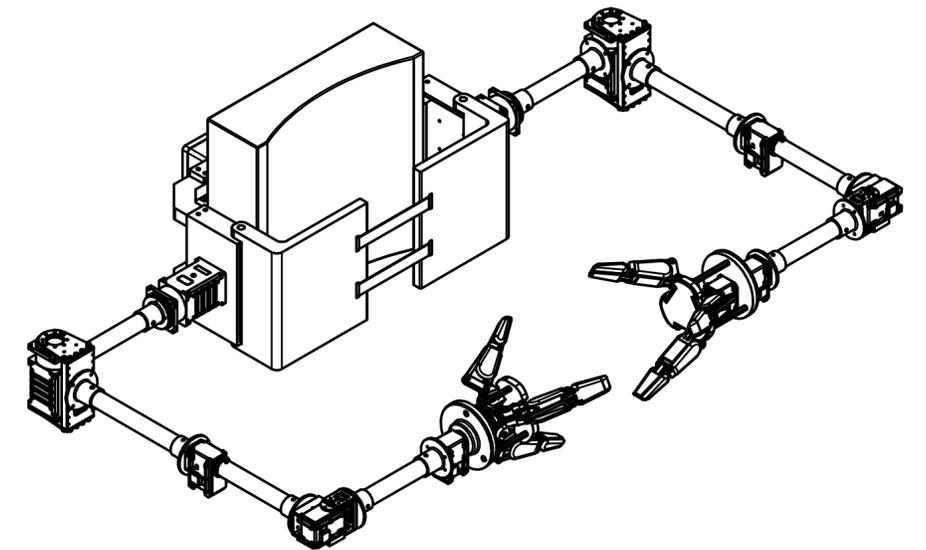
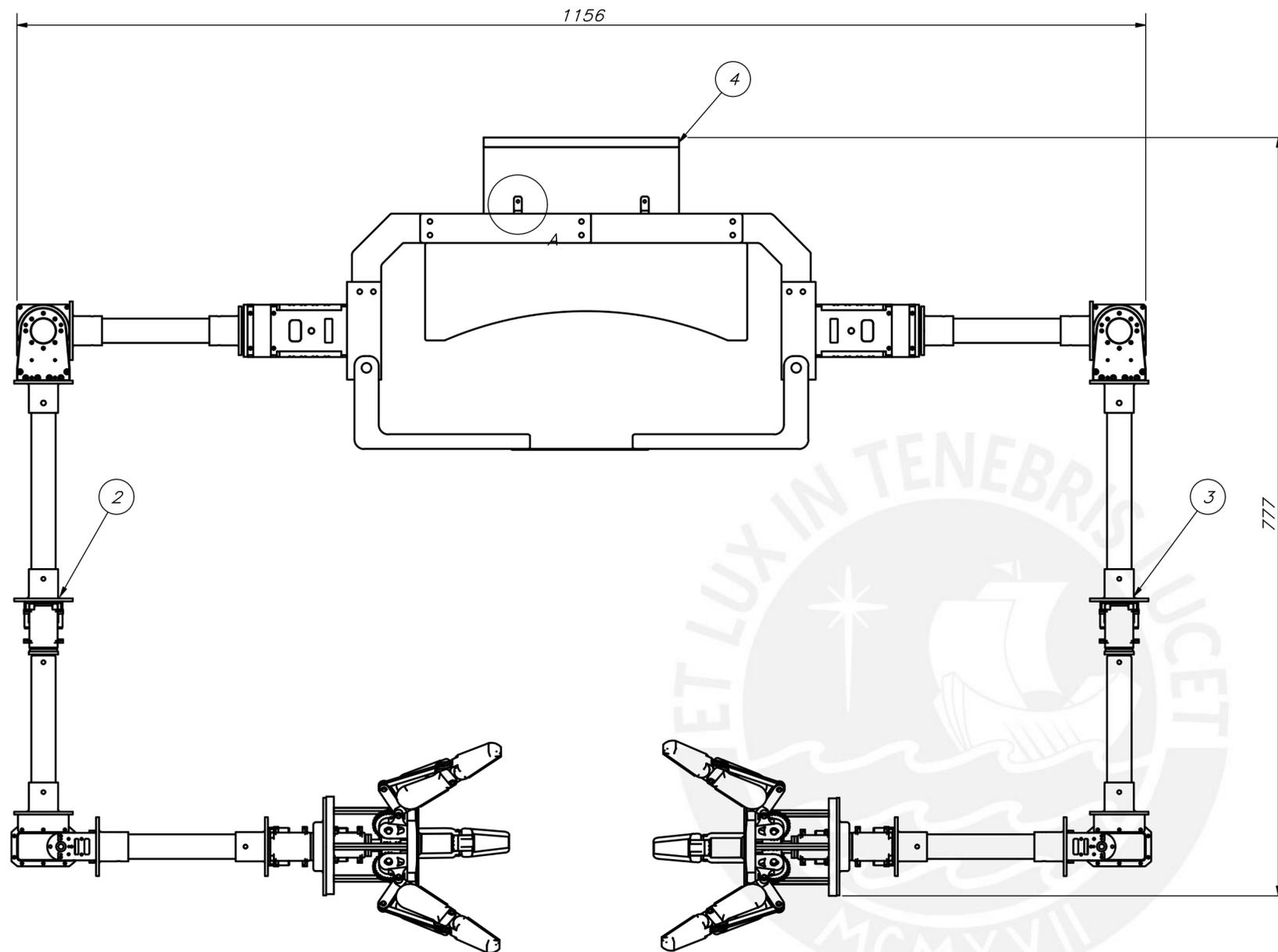
Lead time

<p>Economy</p>	<p>5 business days</p>	<p>US\$1,276.72</p>
-----------------------	------------------------	----------------------------

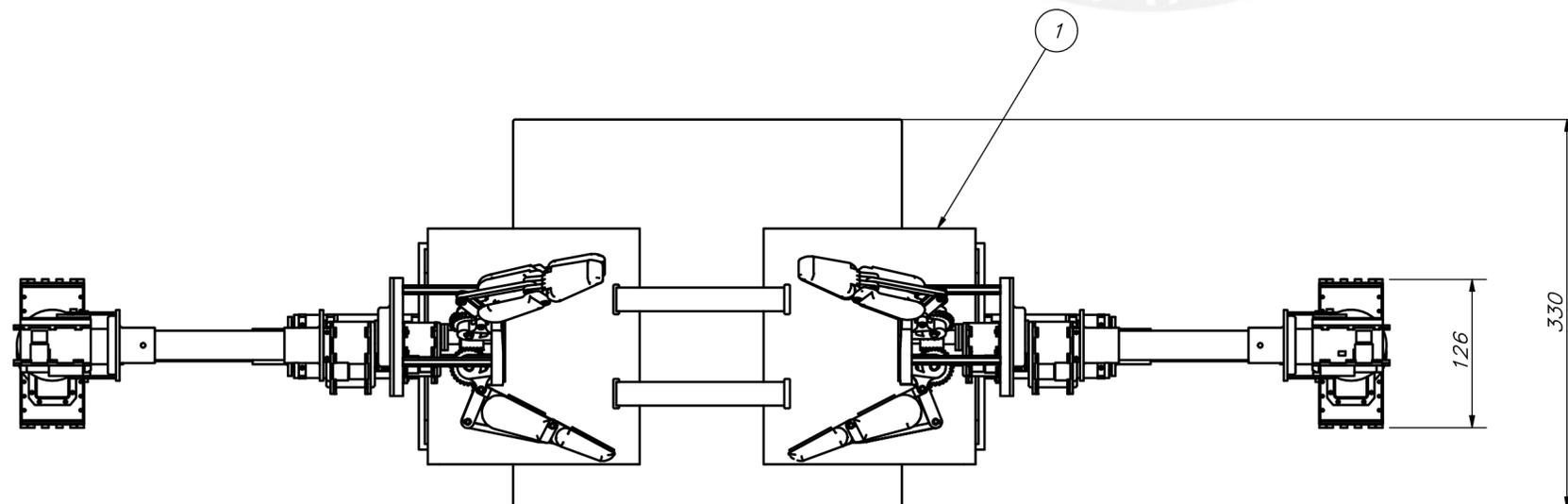


ANEXO J: Planos mecánicos del sistema

Código de plano	Nombre
SRL-PE-A2	Ensamble de las SRLs
SC-PSE-A2	Ensamble del soporte de cintura
BRA-PSE-A2	Ensamble del brazo
SC-PD1-A3	Pieza espalda tipo 1
SC-PD2-A3	Pieza espalda tipo 2
SC-PD3-A4	Unión entre pieza espalda y soporte cintura-M1
SC-PD4-A3	Soporte cintura-M1
SC-PD5-A3	Parte delantera derecha
SC-PD6-A3	Parte delantera izquierda
BRA-PD1-A4	Eslabón a1
BRA-PD2-A4	Eslabón a2
BRA-PD3-A4	Eslabón a3
BRA-PD4-A4	Eslabón a4
BRA-PD5-A4	Brida tipo 1
BRA-PD6-A4	Brida tipo 2
BRA-PD7-A4	Brida tipo 3
BRA-PD8-A4	Brida tipo 4
BRA-PD9-A4	Brida tipo 5
BRA-PD10-A4	Soporte a3-M4
BRA-PD11-A4	Soporte gripper
BRA-PD12-A4	Soporte M4



DETALLE A
ESCALA 1 : 1

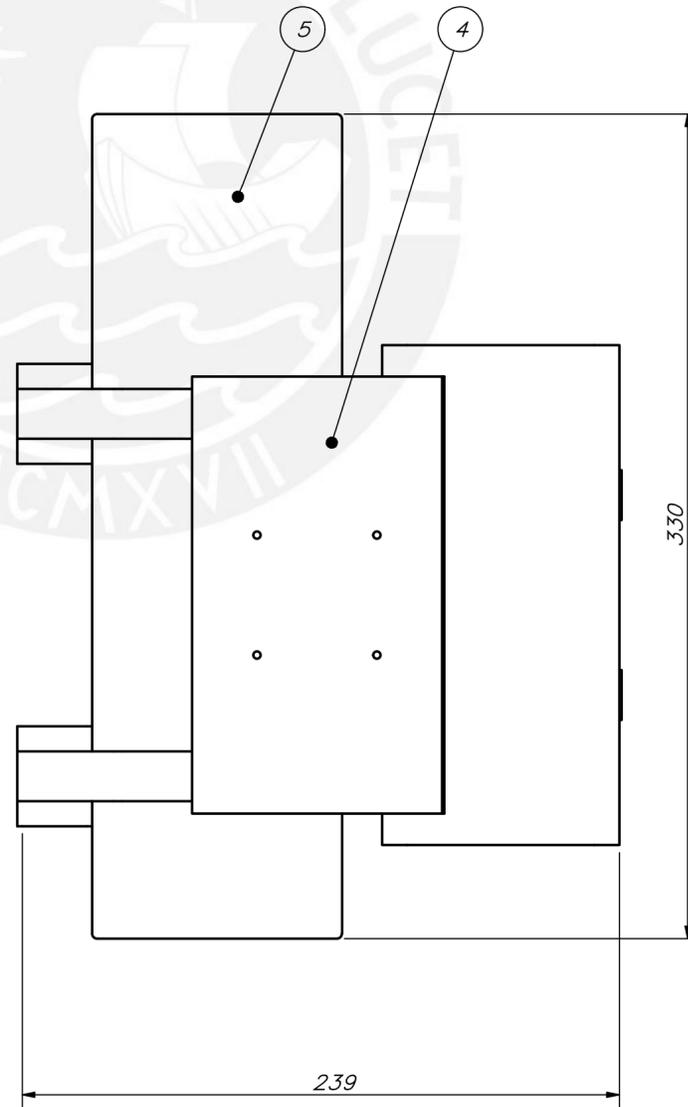
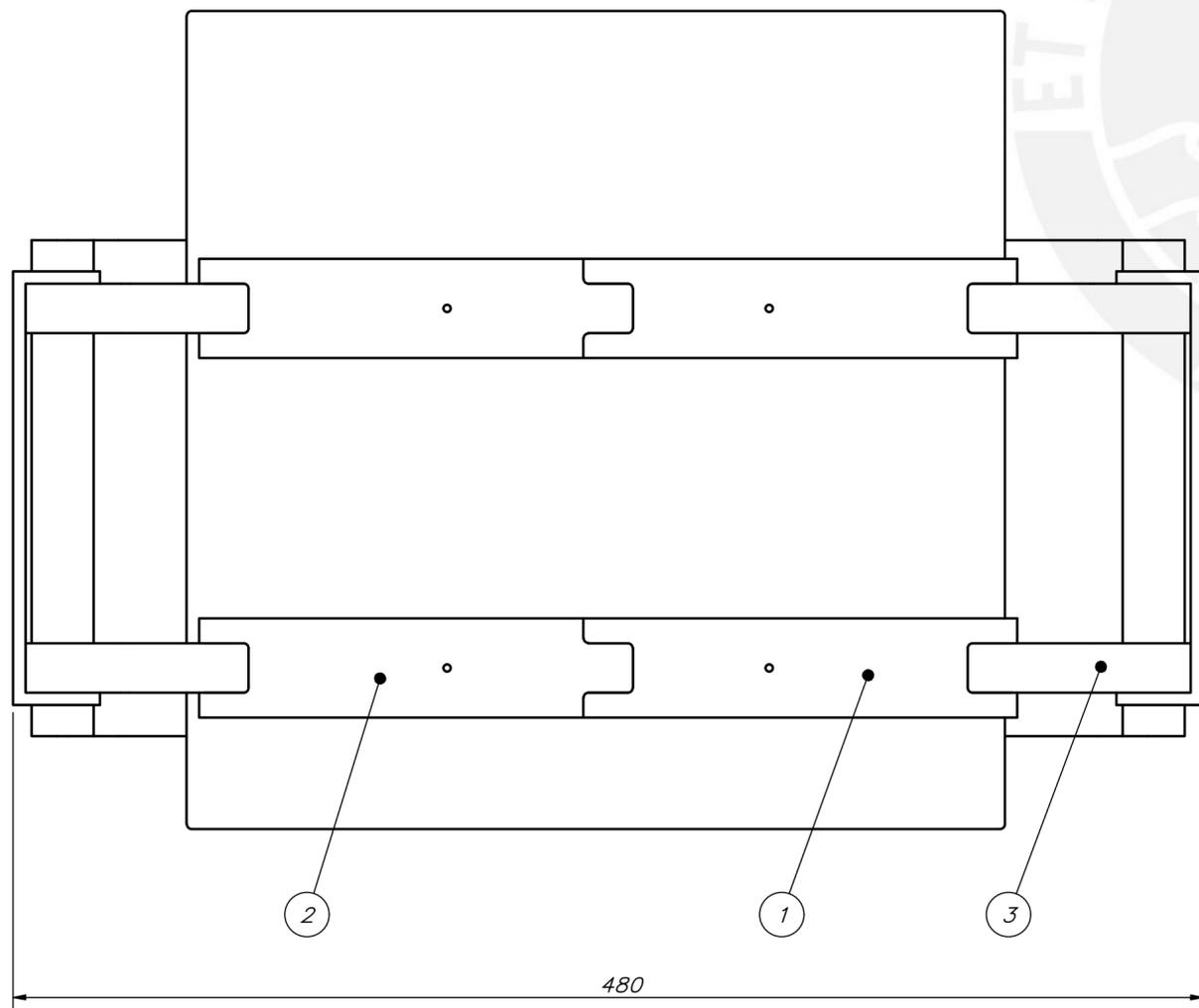
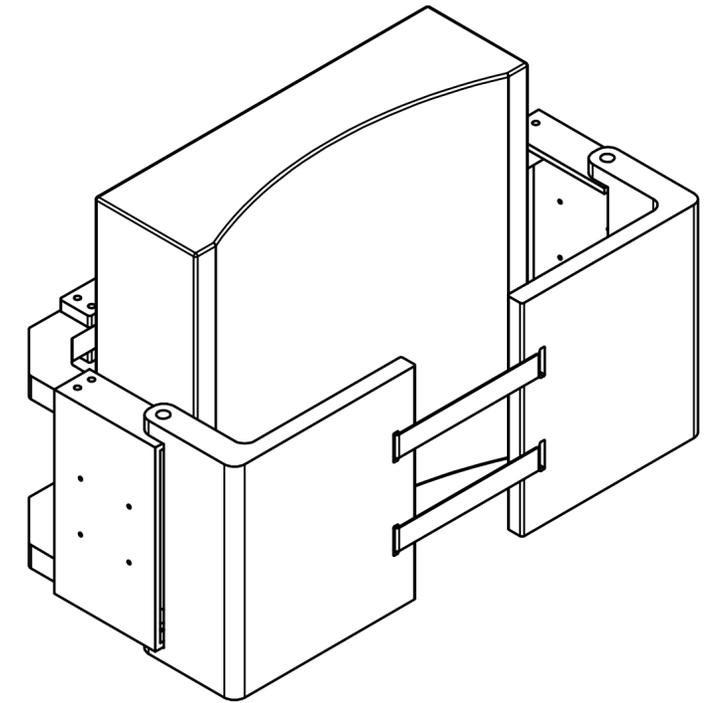
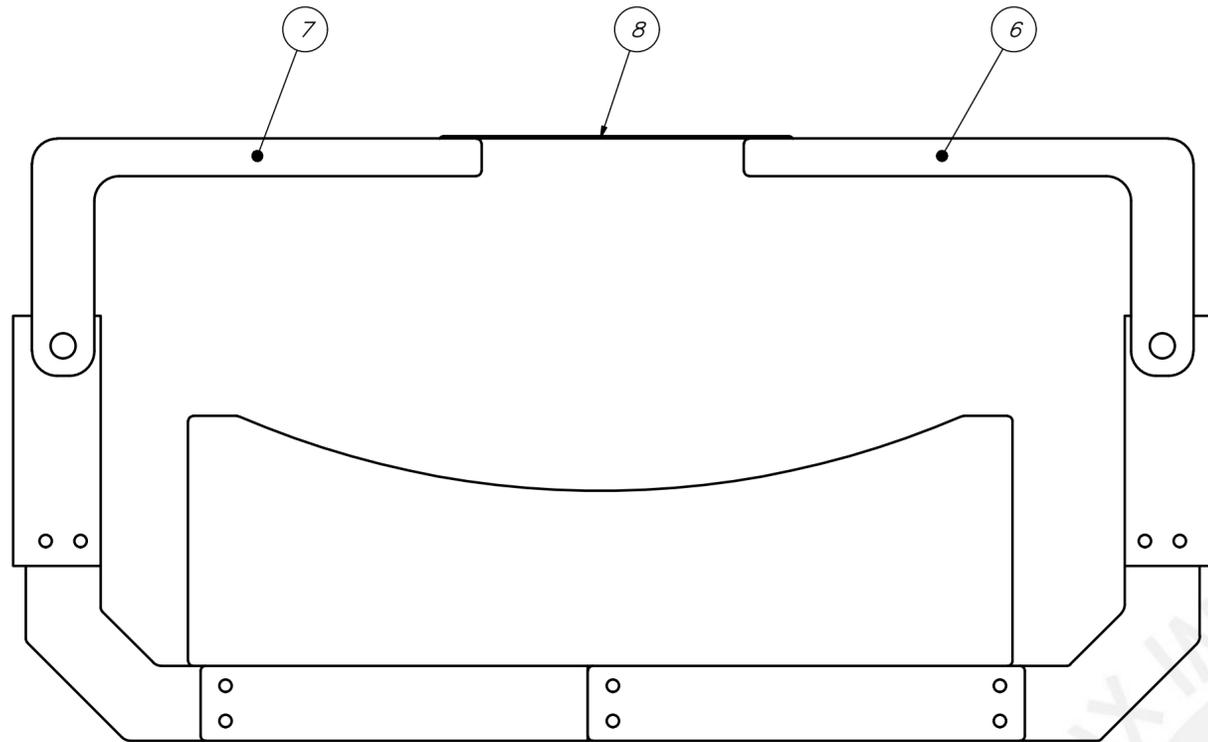


PARTS LIST					
POS.	CANT.	DESCRIPCIÓN	NORMA	MATERIAL	OBSERVACIONES
5	4	UNIÓN DE ÁNGULO PESADO		Acero Zincado	
4	1	CAJA DE COMPONENTES			
3	1	ENSAMBLE DEL BRAZO IZQUIERDO			
2	1	ENSAMBLE DEL BRAZO DERECHO			
1	1	ENSAMBLE DEL SOPORTE DE CINTURA			

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
CIENCIAS E INGENIERÍA – ING. MECATRÓNICA

MÉTODO DE PROYECCIÓN	ENSAMBLE DE LAS SRLS	ESCALA
		1 : 6
20171073	OSHIRO KOHASHIKAWA, BRUNO GONZALO	FECHA: 2023.10.20
		LÁMINA: SRL-PE-A2

COTA NOMINAL	COTA MÁXIMA	COTA MÍNIMA
--------------	-------------	-------------

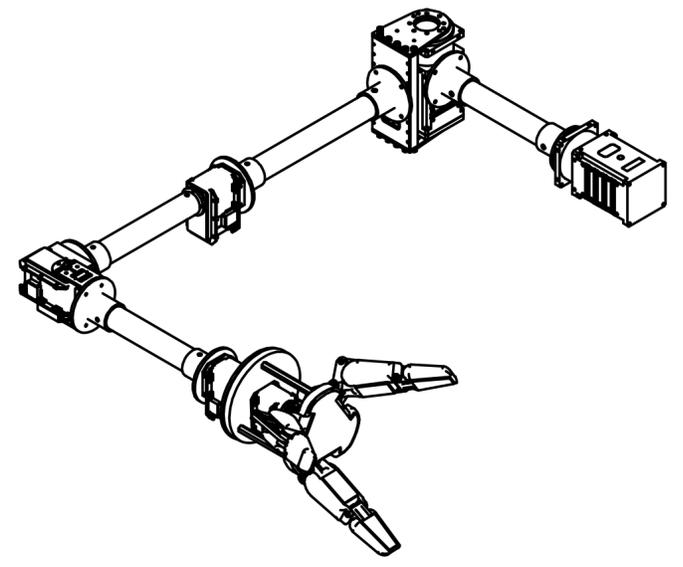
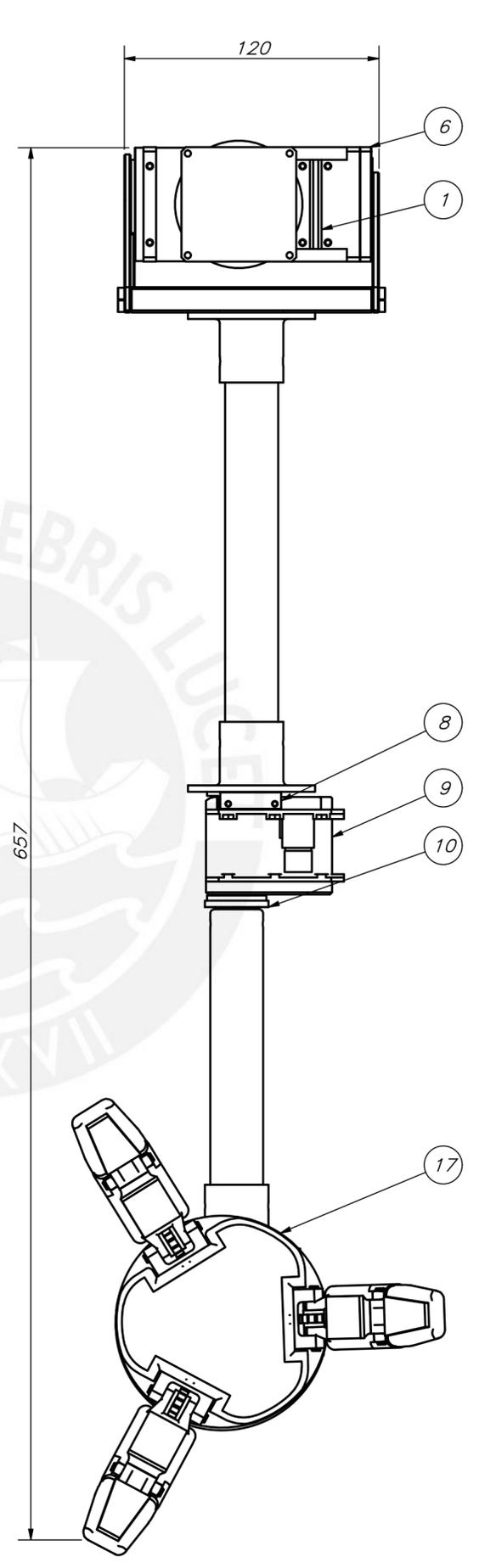
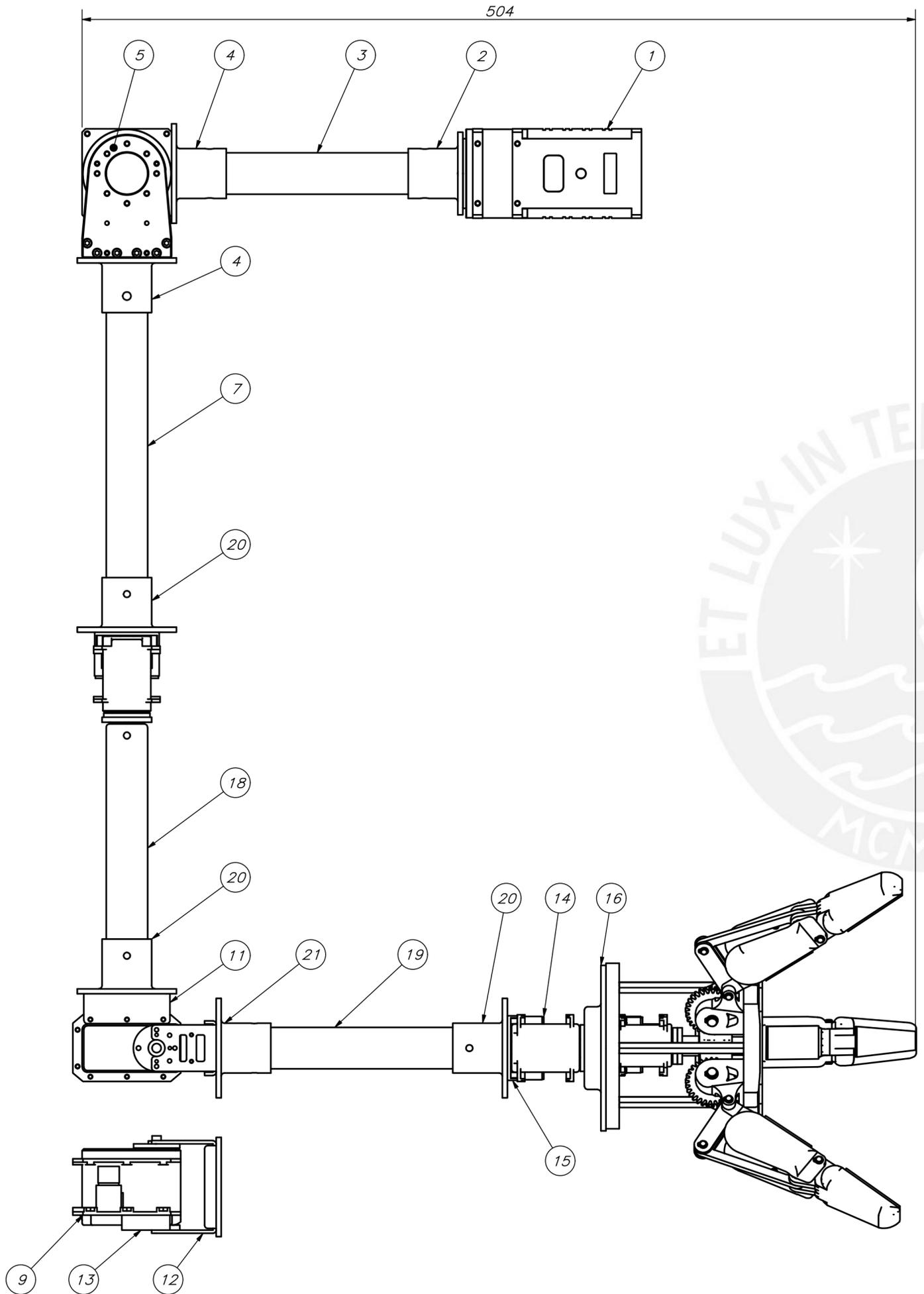


PARTS LIST					
POS.	CANT.	DESCRIPCIÓN	NORMA	MATERIAL	OBSERVACIONES
8	2	CINTURÓN		-	
7	1	PARTE DELANTERA IZQUIERDA		Nylon PA12	
6	1	PARTE DELANTERA DERECHA		Nylon PA12	
5	1	ALMOHADA		-	
4	2	SOPORTE CINTURA-M1		Nylon PA12	
3	4	UNIÓN PIEZA ESPALDA - SOPORTE CINTURA-M1		Nylon PA12	
2	2	PIEZA ESPALDA TIPO 2		Nylon PA12	
1	2	PIEZA ESPALDA TIPO 1		Nylon PA12	

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
CIENCIAS E INGENIERÍA - ING. MECATRÓNICA

MÉTODO DE PROYECCIÓN	ESCALA
	1 : 2
20171073	OSHIRO KOHASHIKAWA, BRUNO GONZALO
	FECHA: 2023.10.17
	LÁMINA: SC-PSE-A2

COTA NOMINAL	COTA MÁXIMA	COTA MÍNIMA
--------------	-------------	-------------

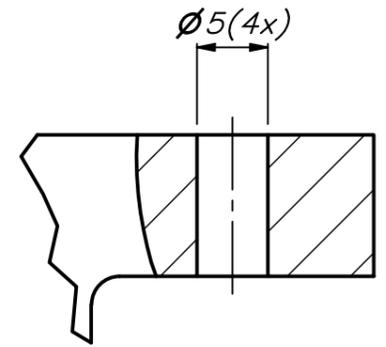
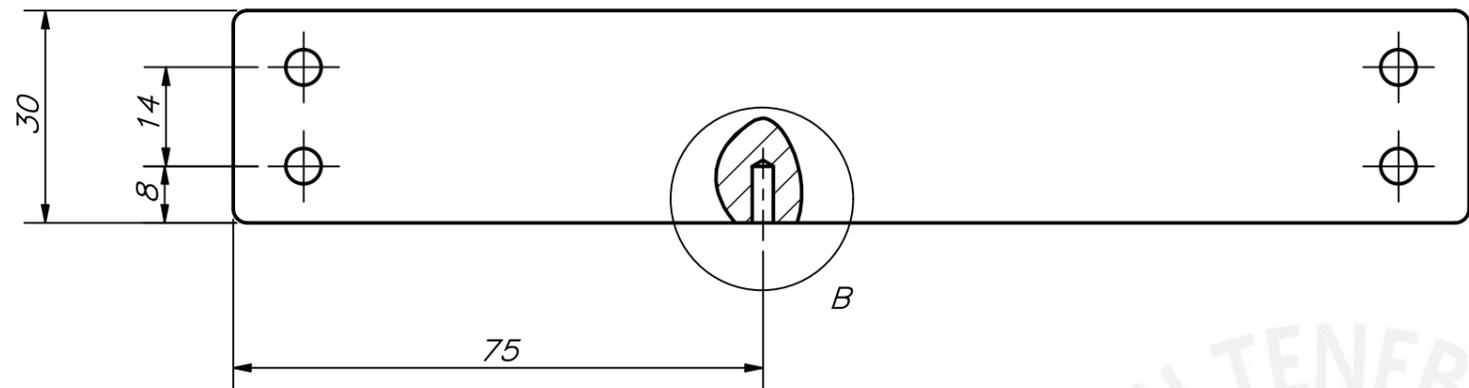


PARTS LIST					
POS.	CANT.	DESCRIPCIÓN	NORMA	MATERIAL	OBSERVACIONES
21	1	BRIDA TIPO 5		Nylon 6SA	
20	3	BRIDA TIPO 4		Nylon 6SA	
19	1	ESLABÓN α4		Nylon 6SA	
18	1	ESLABÓN α3		Nylon 6SA	
17	1	Gripper		Plástico ABS	
16	1	SOPORTE GRIPPER		Nylon PA12	
15	1	SOPORTE M5		PC/ABS Plastic	FR05-B101
14	1	SERVOMOTOR M5		PC/ABS Plastic	MX-64R
13	1	SOPORTE BASE M4		Nylon PA12	
12	1	SOPORTE M3M4 TIPO 2		PC/ABS Plastic	FR08-H101
11	1	SOPORTE α3-M4		Nylon PA12	
10	1	BRIDA TIPO 3		Nylon 6SA	
9	2	SERVOMOTOR M3, M4		PC/ABS Plastic	MX-106R
8	1	SOPORTE M3M4 TIPO 1		PC/ABS Plastic	FR08-B101
7	1	ESLABÓN α2		Nylon 6/6	
6	1	SOPORTE M1M2 TIPO 1		PC/ABS Plastic	FRP54-H110K
5	1	SOPORTE M1M2 TIPO 2		PC/ABS Plastic	FRP54-H121K
4	2	BRIDA TIPO 2		Nylon 6SA	
3	1	ESLABÓN α1		Nylon 6SA	
2	1	BRIDA TIPO 1		Nylon 6SA	
1	2	SERVOMOTOR M1, M2		PC/ABS Plastic	H54P-100_M54P-040

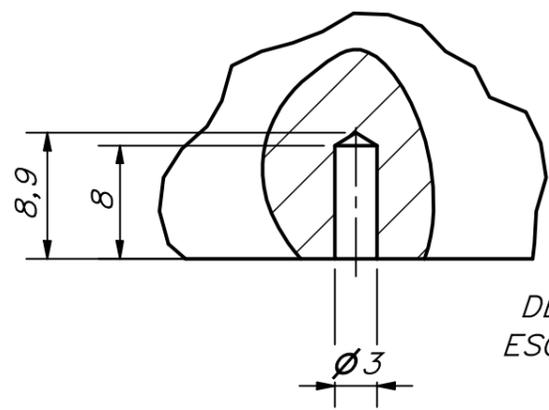
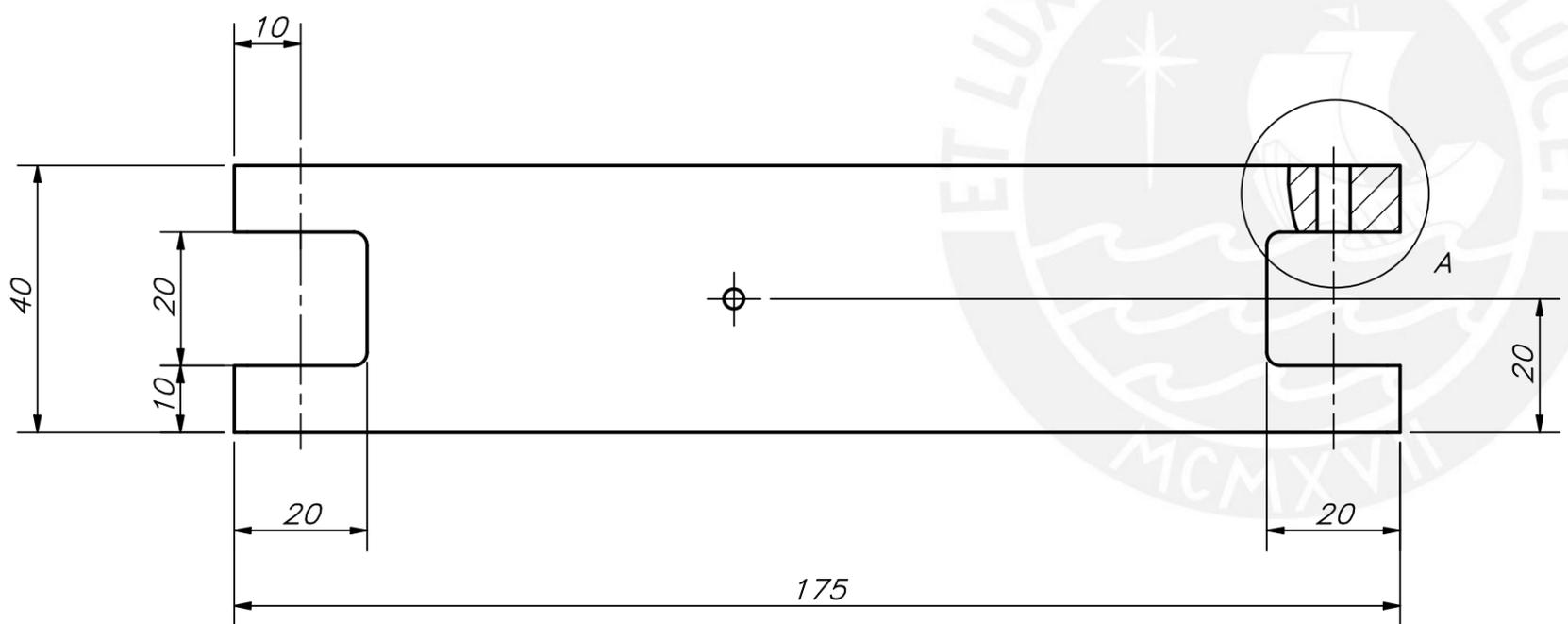
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
CIENCIAS E INGENIERÍA – ING. MECATRÓNICA

MÉTODO DE PROYECCIÓN	ESCALA
	ENSAMBLE DEL BRAZO 1 : 2
20171073	OSHIRO KOHASHIKAWA, BRUNO GONZALO
	FECHA: 2023.10.20
	LÁMINA: BRA-PSE-A2

COTA NOMINAL	COTA MÁXIMA	COTA MÍNIMA
--------------	-------------	-------------



DETALLE A
ESCALA 2 : 1

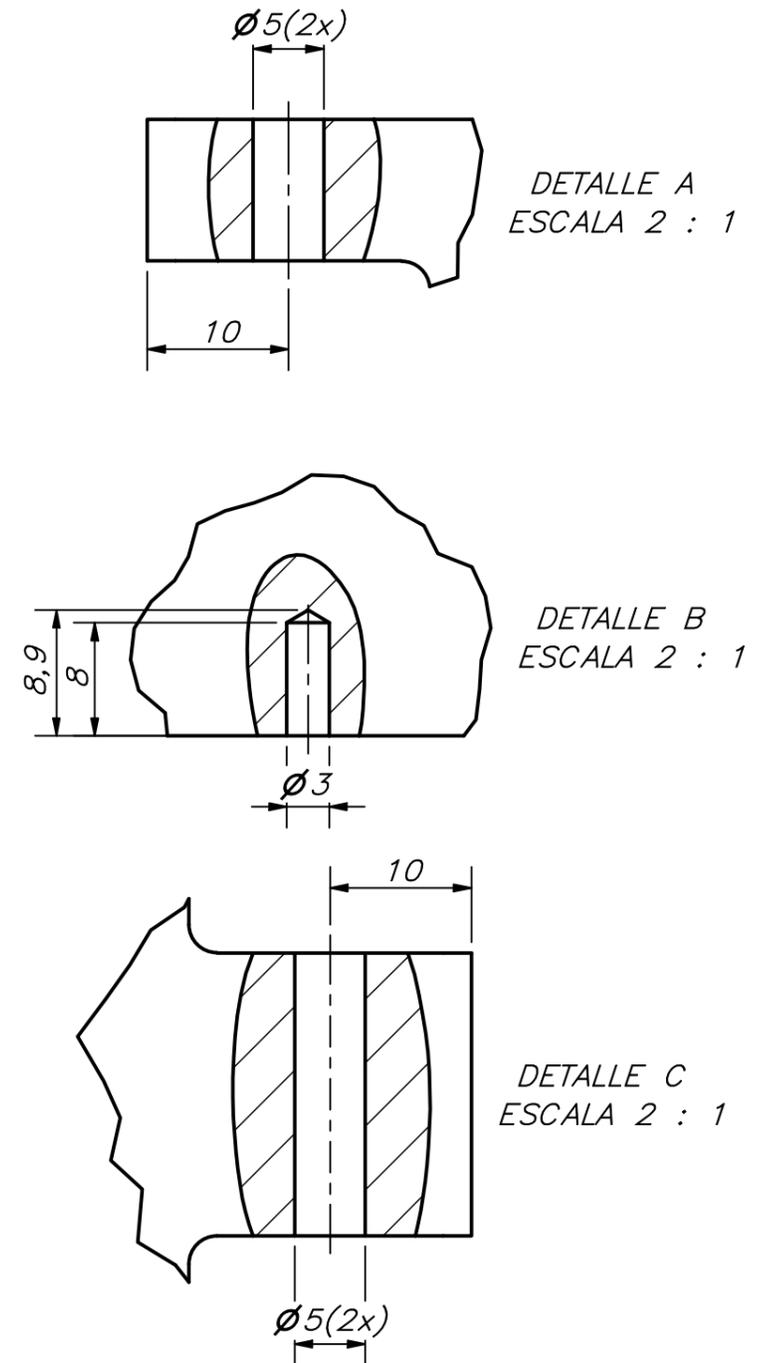
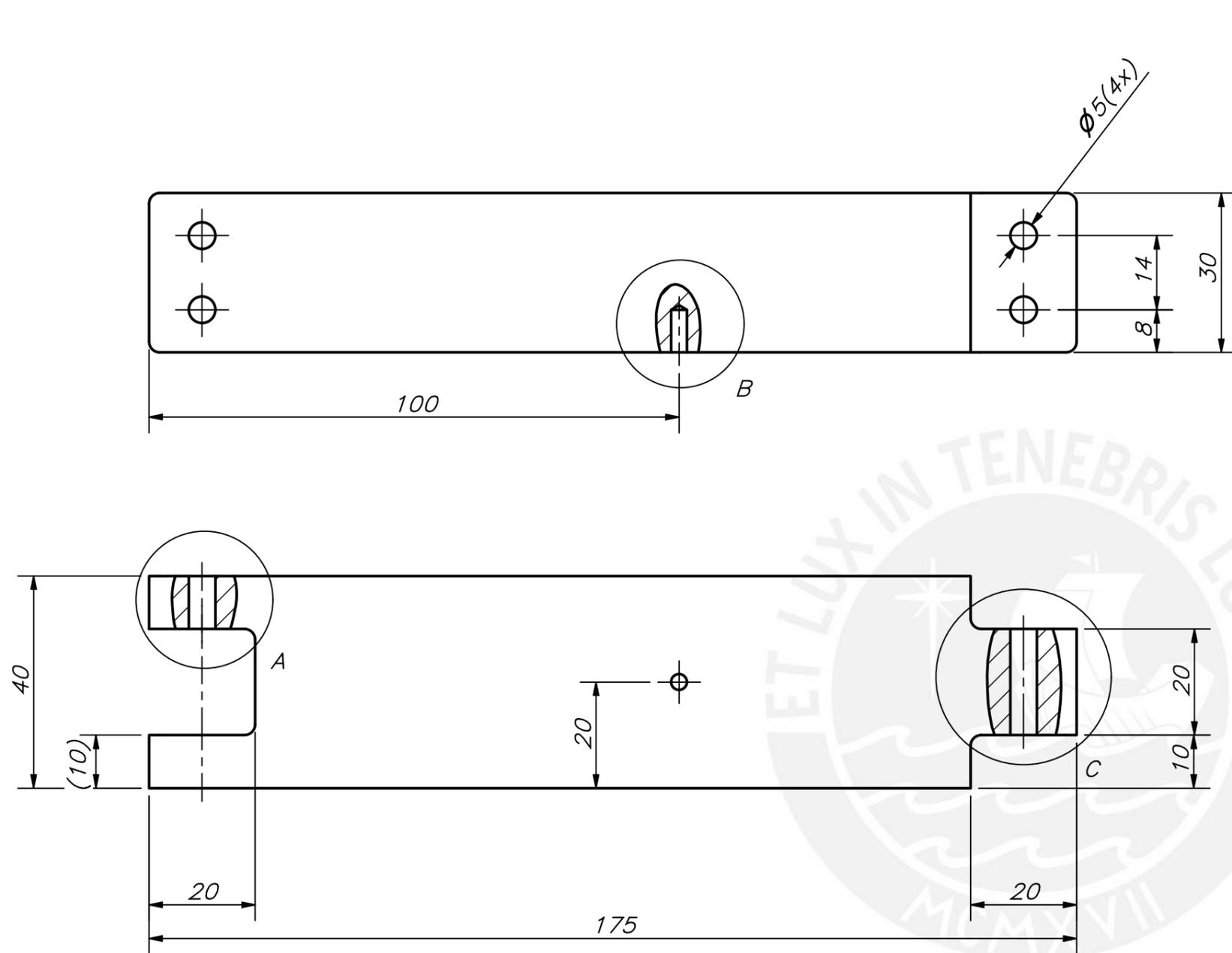


DETALLE B
ESCALA 2 : 1

REDONDEOS NO INDICADOS R2

ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL	MATERIAL
		NYLON PA12
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ CIENCIAS E INGENIERÍA – ING. MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	PIEZA ESPALDA TIPO 1	ESCALA
		1 : 1
20171073	OSHIRO KOHASHIKAWA, BRUNO GONZALO	FECHA: 2023.08.08
		LÁMINA: SC-PD1-A3

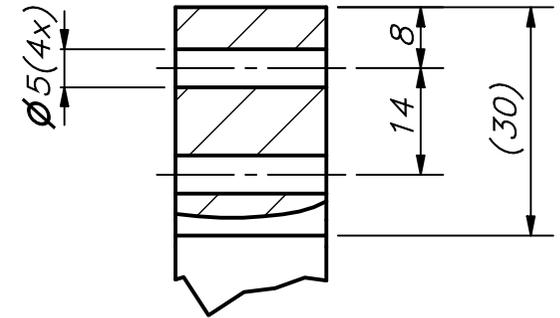
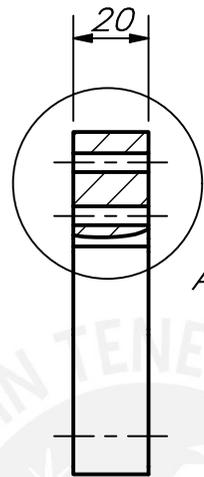
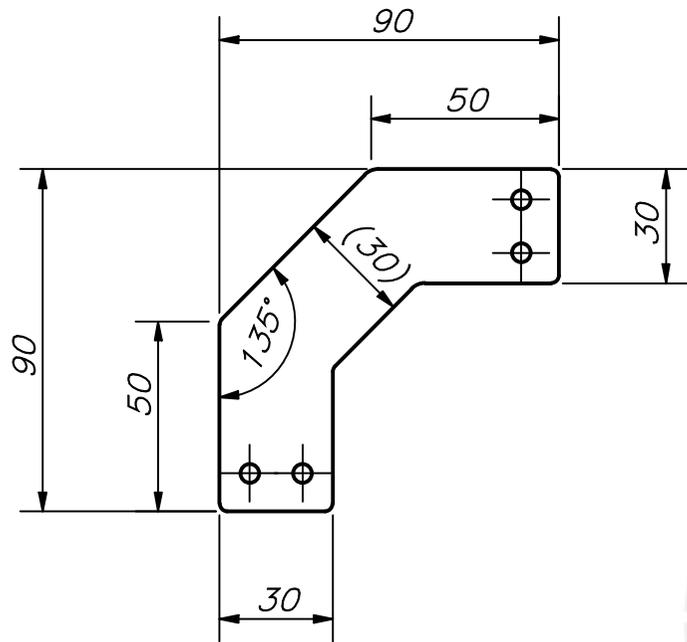
COTA NOMINAL	COTA MÁXIMA	COTA MÍNIMA



REDONDEOS NO INDICADOS R2

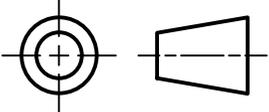
ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL	MATERIAL
		NYLON PA12
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ CIENCIAS E INGENIERÍA – ING. MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	PIEZA ESPALDA TIPO 2	ESCALA
		1 : 1
20171073	OSHIRO KOHASHIKAWA, BRUNO GONZALO	FECHA: 2023.08.08
		LÁMINA: SC-PD2-A3

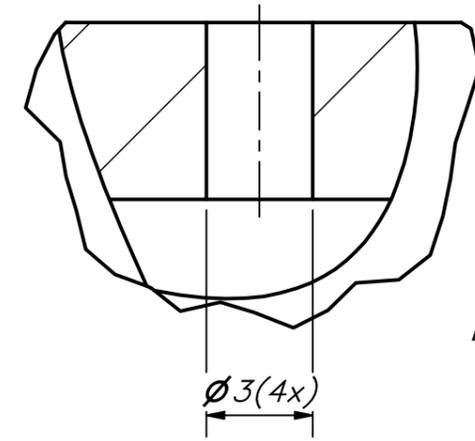
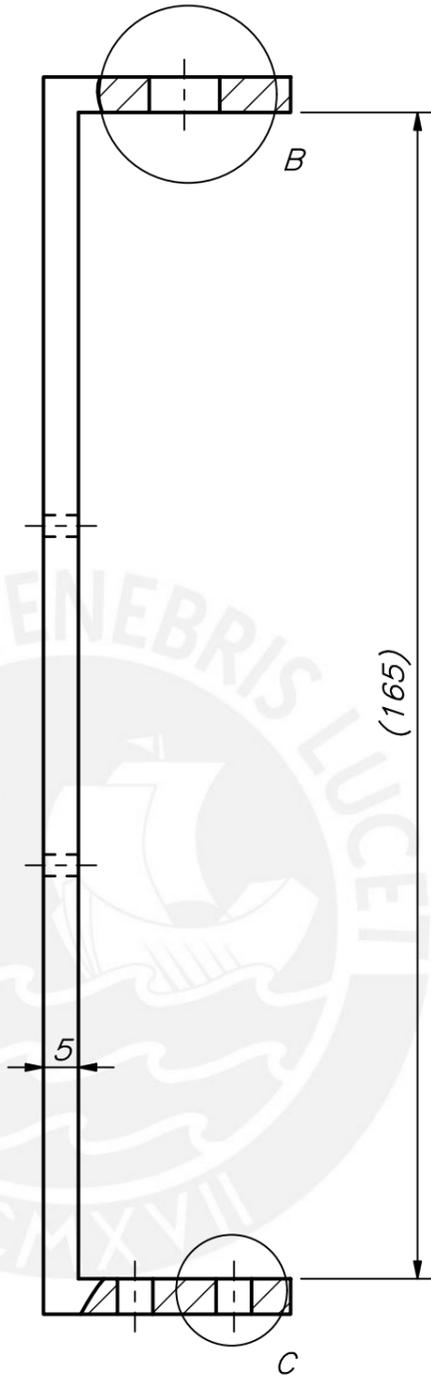
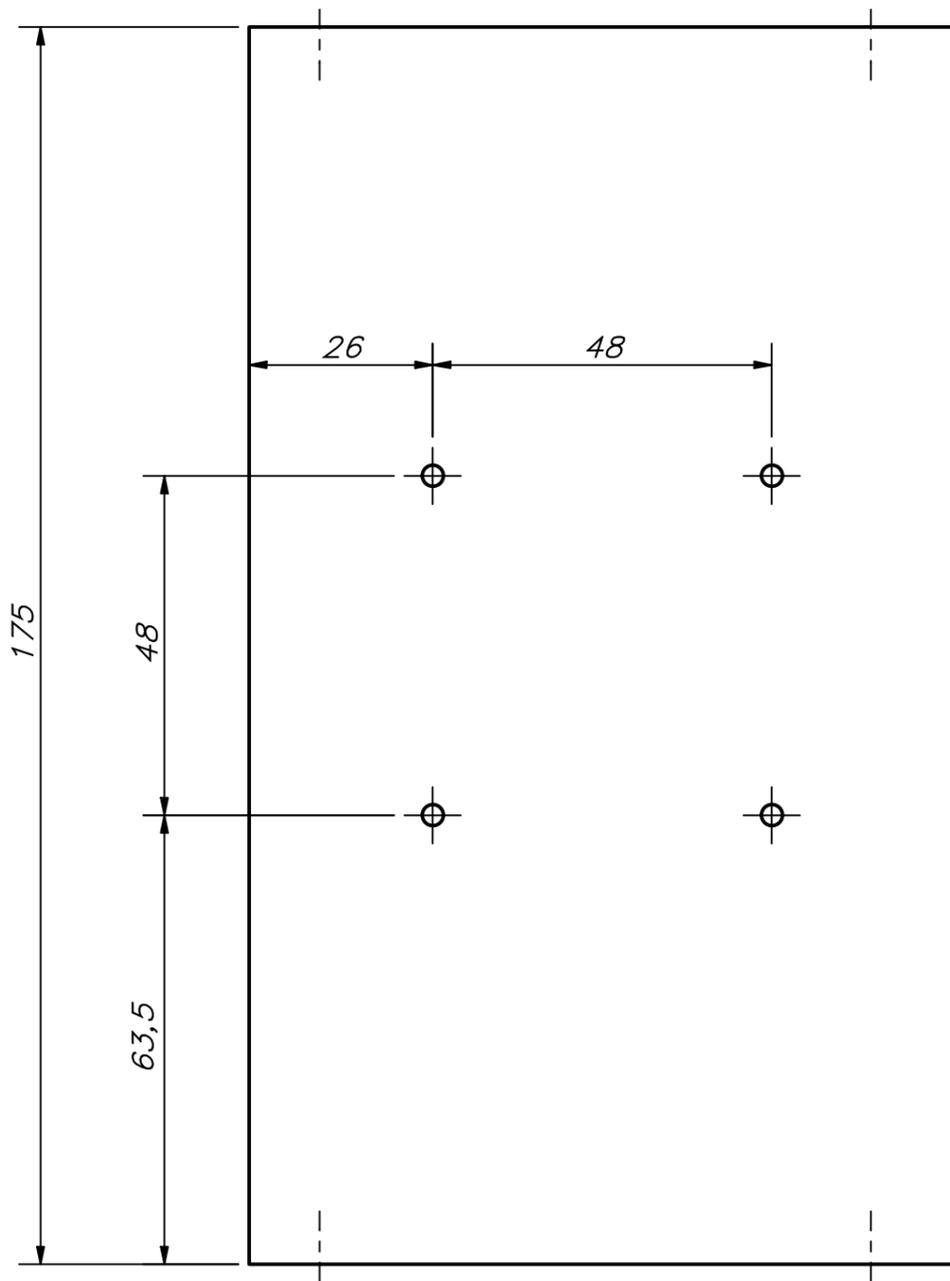
COTA NOMINAL	COTA MÁXIMA	COTA MÍNIMA



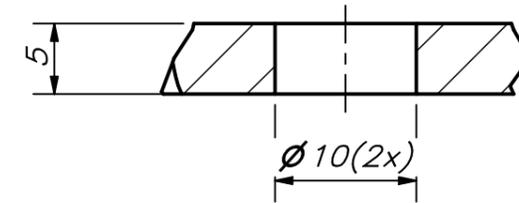
DETALLE A
ESCALA 1 : 1

REDONDEOS NO INDICADOS R2

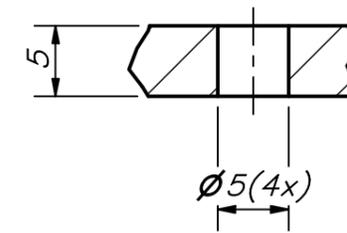
ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL	MATERIAL NYLON PA12
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ CIENCIAS E INGENIERÍA – ING. MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	UNIÓN PIEZA ESPALDA – CINTURA M1	ESCALA 1 : 2
20171073	OSHIRO KOHASHIKAWA, BRUNO GONZALO	FECHA: 2023.08.12
COTA NOMINAL	COTA MÁXIMA	COTA MÍNIMA
		LÁMINA: SC – PD3 – A4



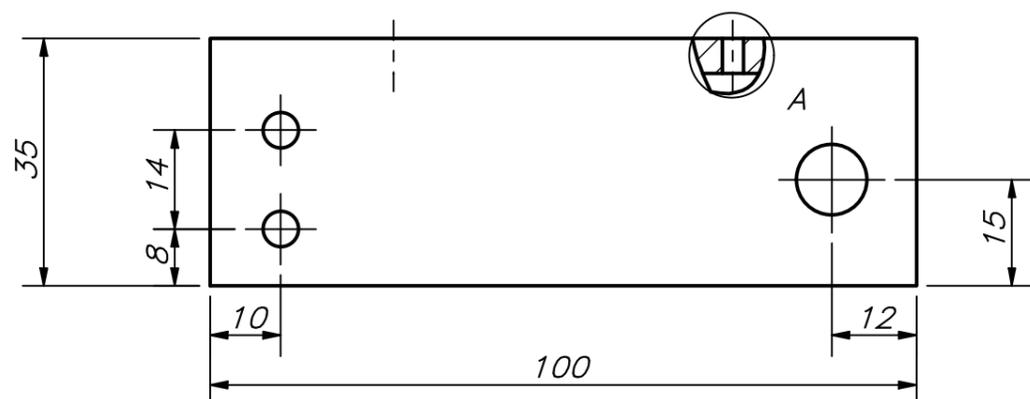
DETALLE A
ESCALA 5 : 1



DETALLE B
ESCALA 2 : 1

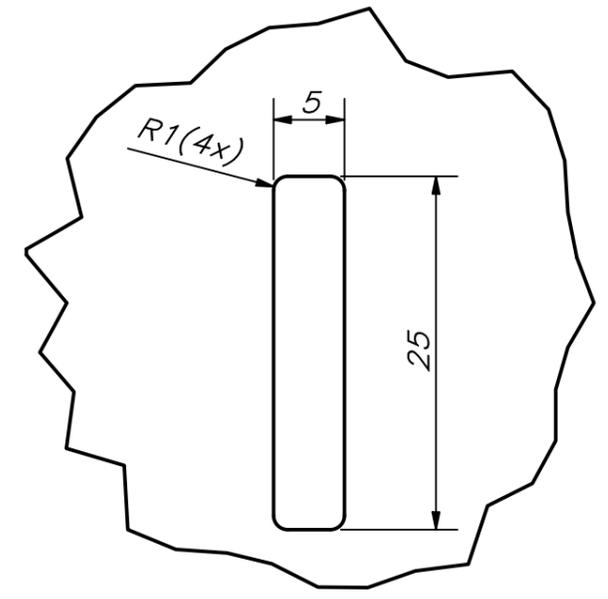
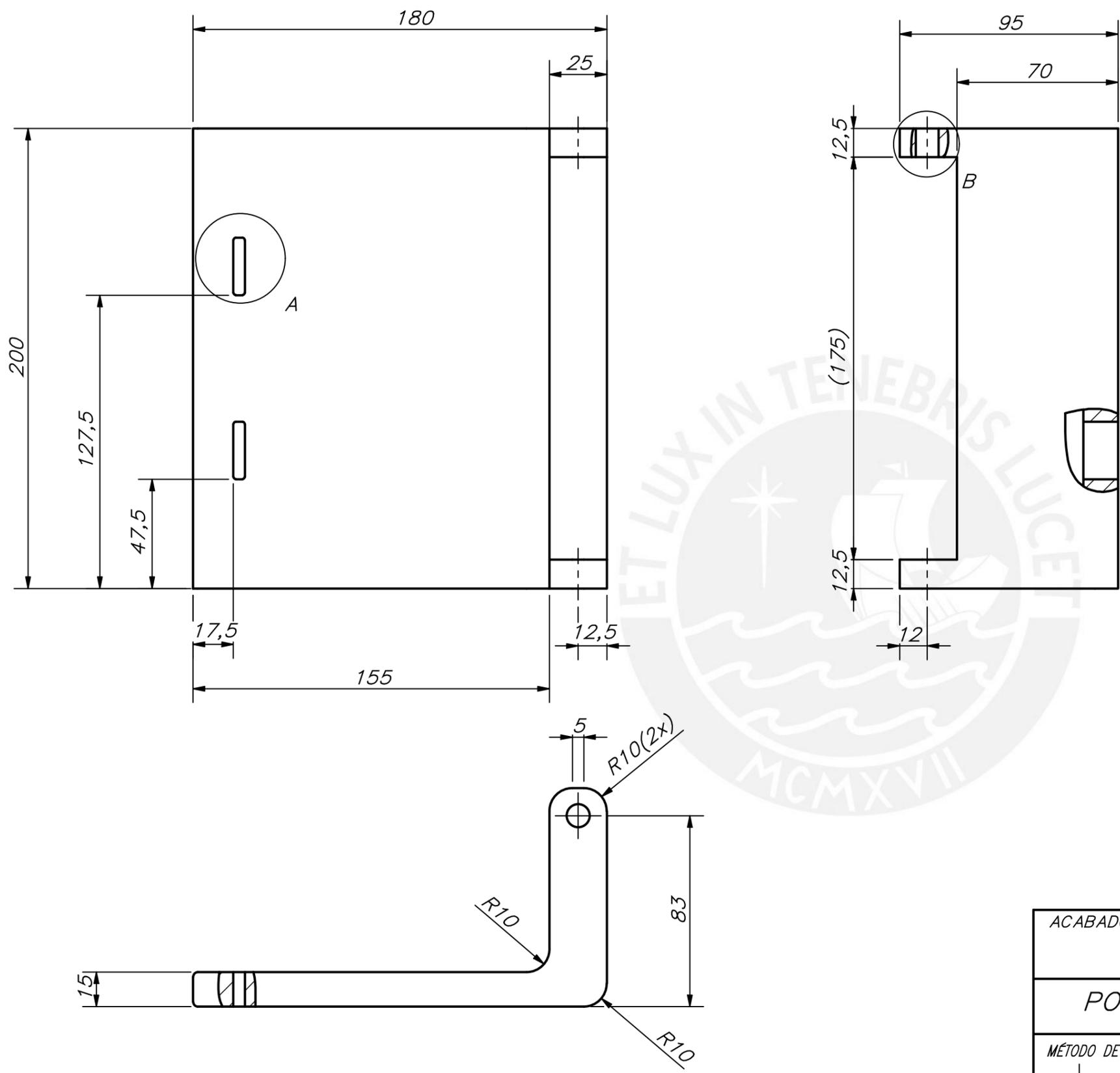


DETALLE C
ESCALA 2 : 1

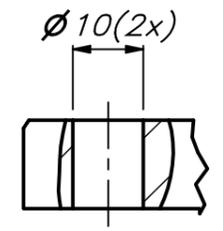


COTA NOMINAL	COTA MÁXIMA	COTA MÍNIMA

ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL	MATERIAL
		NYLON PA12
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ CIENCIAS E INGENIERÍA – ING. MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN		ESCALA
	SOPORTE CINTURA-M1	1 : 1
20171073	OSHIRO KOHASHIKAWA, BRUNO GONZALO	FECHA: 2023.08.12
		LÁMINA: SC-PD4-A3



DETALLE A
ESCALA 2 : 1

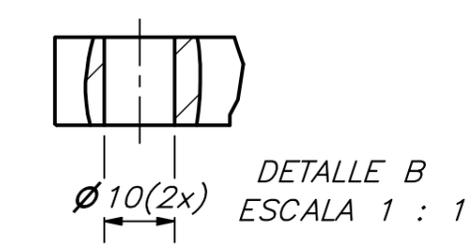
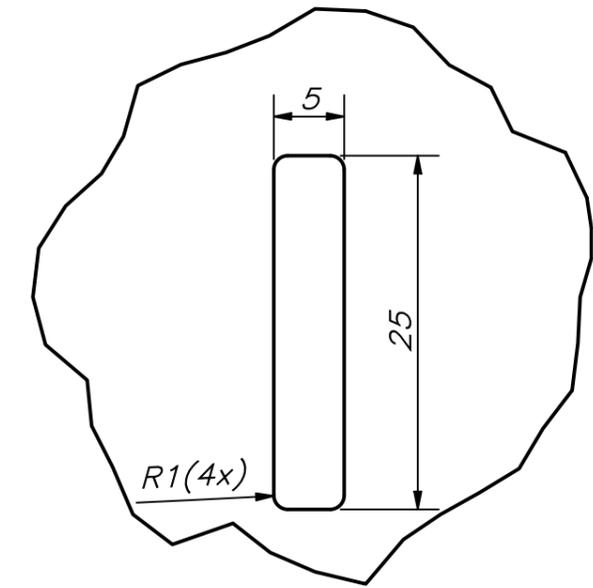
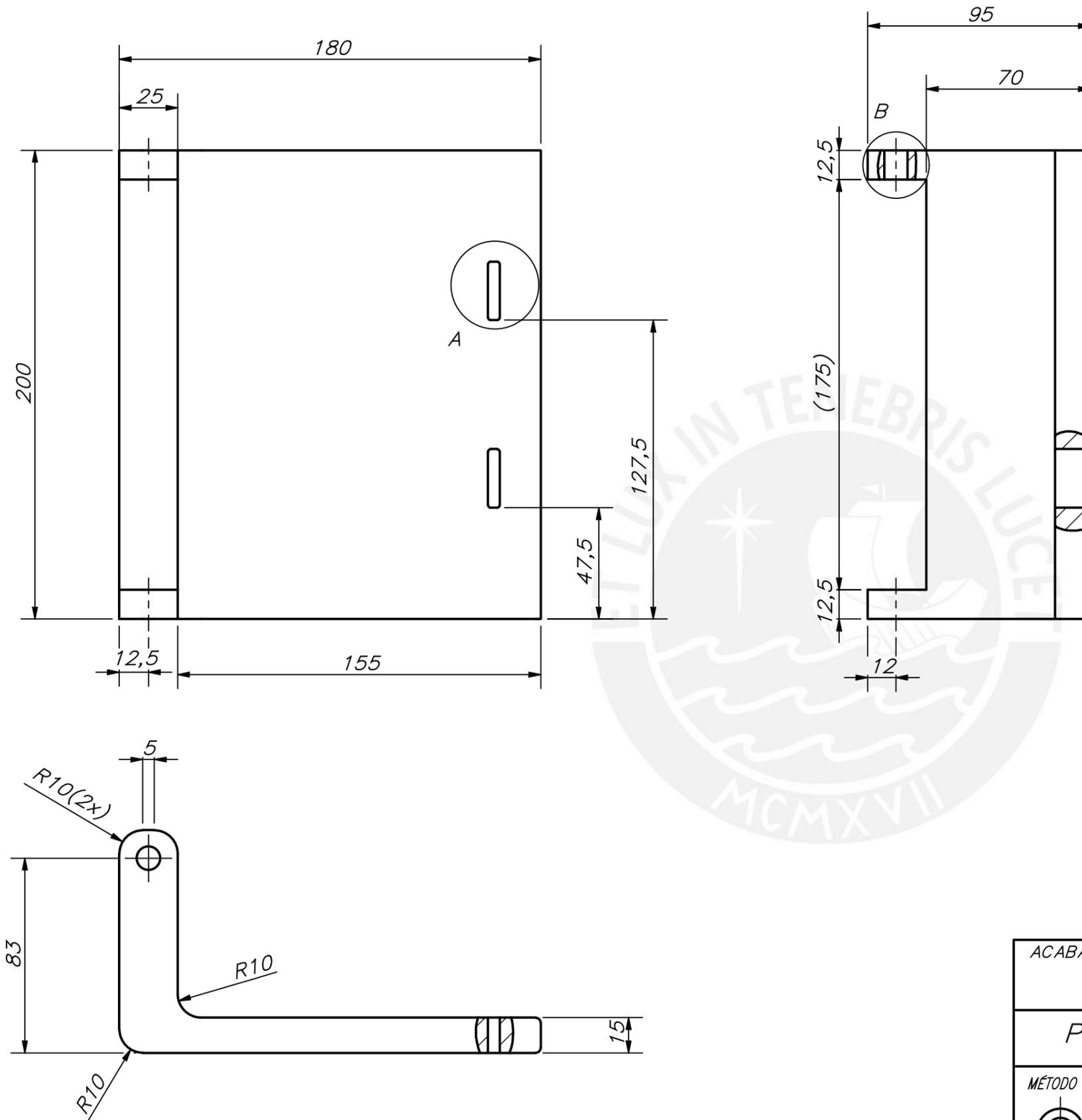


DETALLE B
ESCALA 1 : 1

REDONDEOS NO INDICADOS R2

ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL	MATERIAL
		NYLON PA12
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ CIENCIAS E INGENIERÍA – ING. MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	PARTE DELANTERA DERECHA	ESCALA 1 : 2
20171073	OSHIRO KOHASHIKAWA, BRUNO GONZALO	FECHA: 2023.08.12
		LÁMINA: SC-PD5-A3

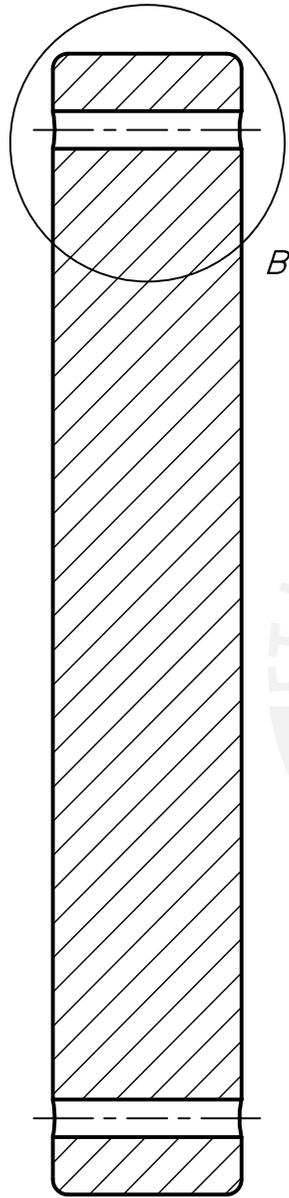
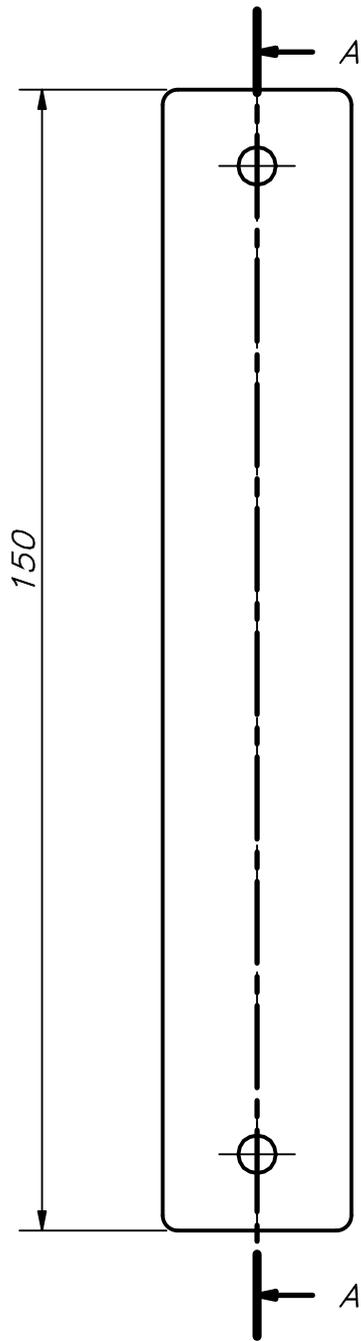
COTA NOMINAL	COTA MÁXIMA	COTA MÍNIMA



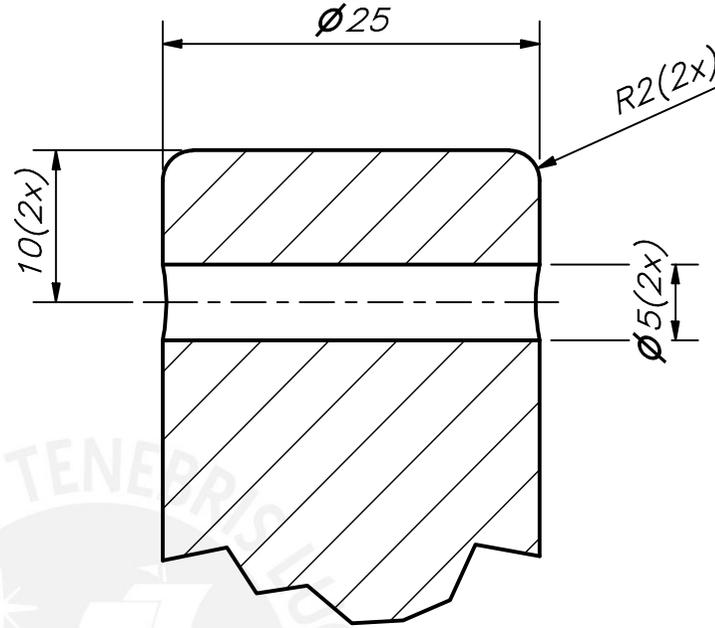
REDONDEOS NO INDICADOS R2

ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL	MATERIAL
		NYLON PA12
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ CIENCIAS E INGENIERÍA – INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	PARTE DELANTERA IZQUIERDA	ESCALA 1 : 2
20171073	OSHIRO KOHASHIKAWA BRUNO GONZALO	FECHA: 2023.08.12
		LÁMINA: SC-PD6-A3

COTA NOMINAL	COTA MÁXIMA	COTA MÍNIMA



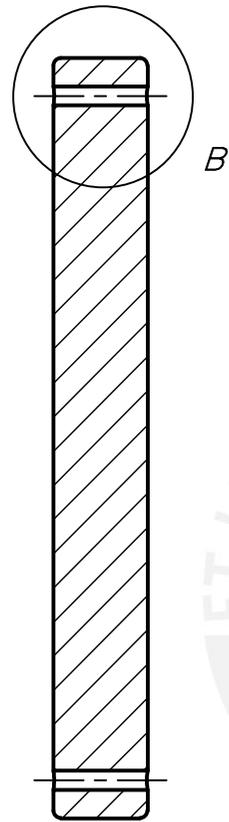
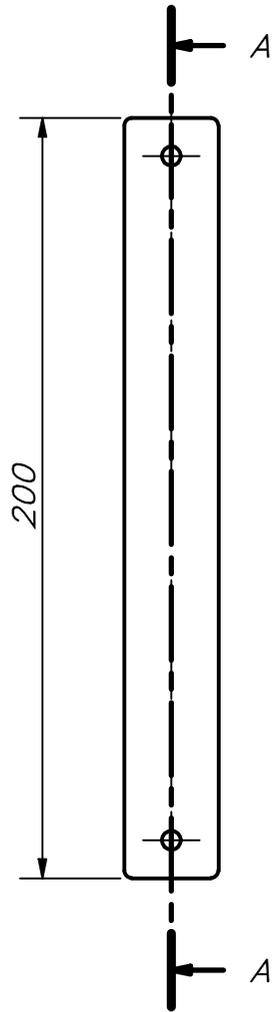
CORTE A-A



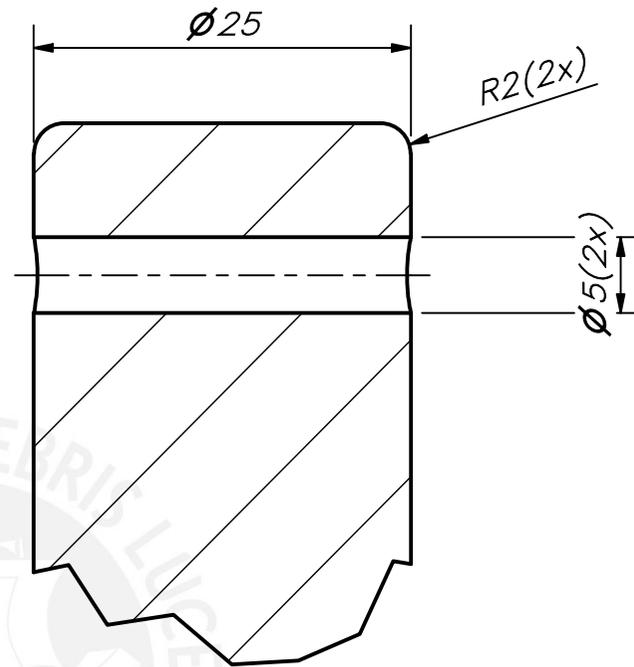
DETALLE B
ESCALA 2 : 1

ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL	MATERIAL NYLON 6SA
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ CIENCIAS E INGENIERÍA - ING. MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	ESLABÓN a1	ESCALA 1 : 1
		FECHA: 2023.08.06
20171073	OSHIRO KOHASHIKAWA, BRUNO GONZALO	LÁMINA: BRA-PD1-A4

COTA NOMINAL	COTA MÁXIMA	COTA MÍNIMA
-----------------	----------------	----------------



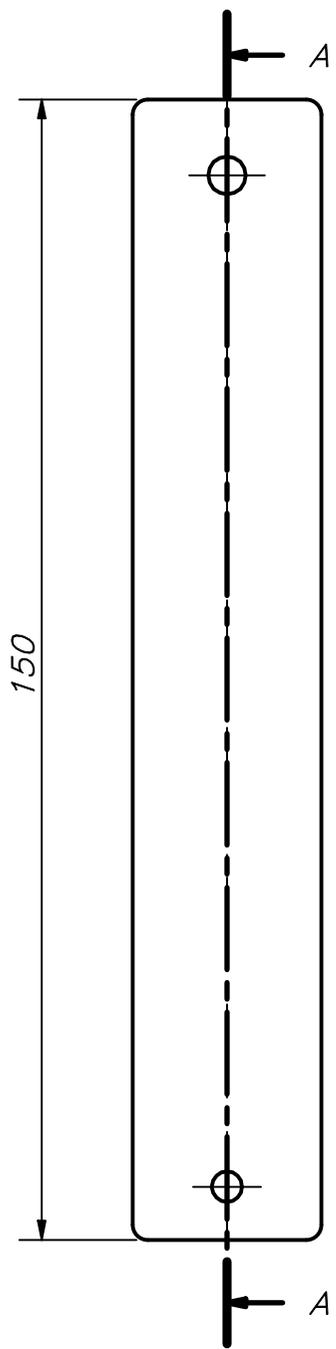
CORTE A-A



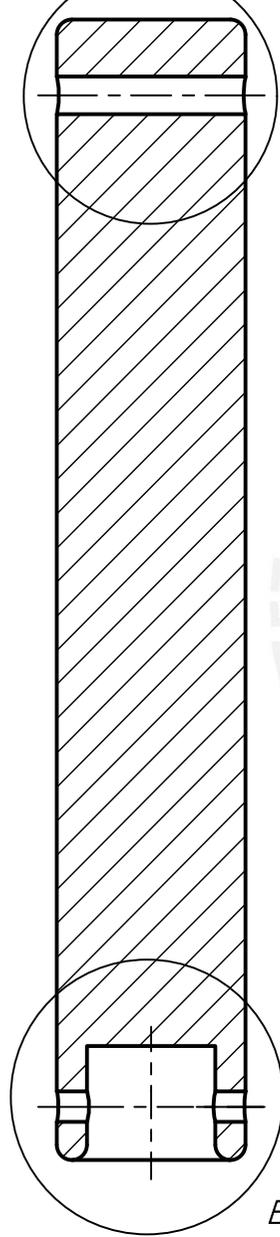
DETALLE B
ESCALA 2 : 1

ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL	MATERIAL NYLON 6SA
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA – ING. MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	ESLABÓN a2	ESCALA 1 : 2
		FECHA: 2023.08.06
20171073	OSHIRO KOHASHIKAWA, BRUNO GONZALO	LÁMINA: BRA-PD2-A4

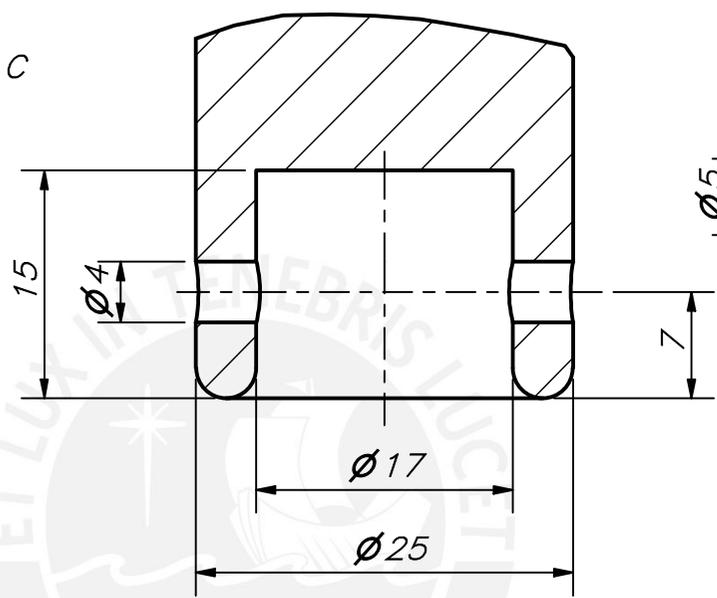
COTA NOMINAL	COTA MÁXIMA	COTA MÍNIMA
-----------------	----------------	----------------



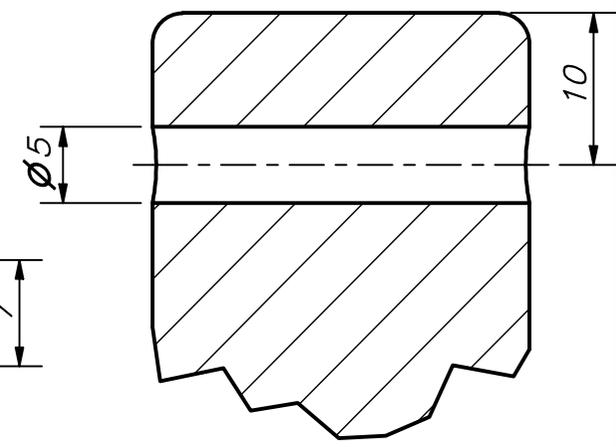
CORTE A-A



DETALLE B
ESCALA 2 : 1



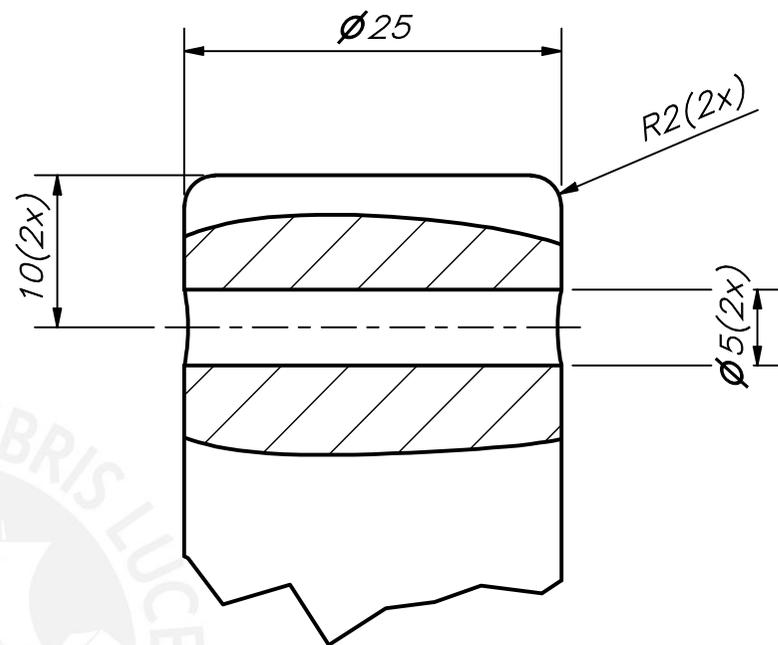
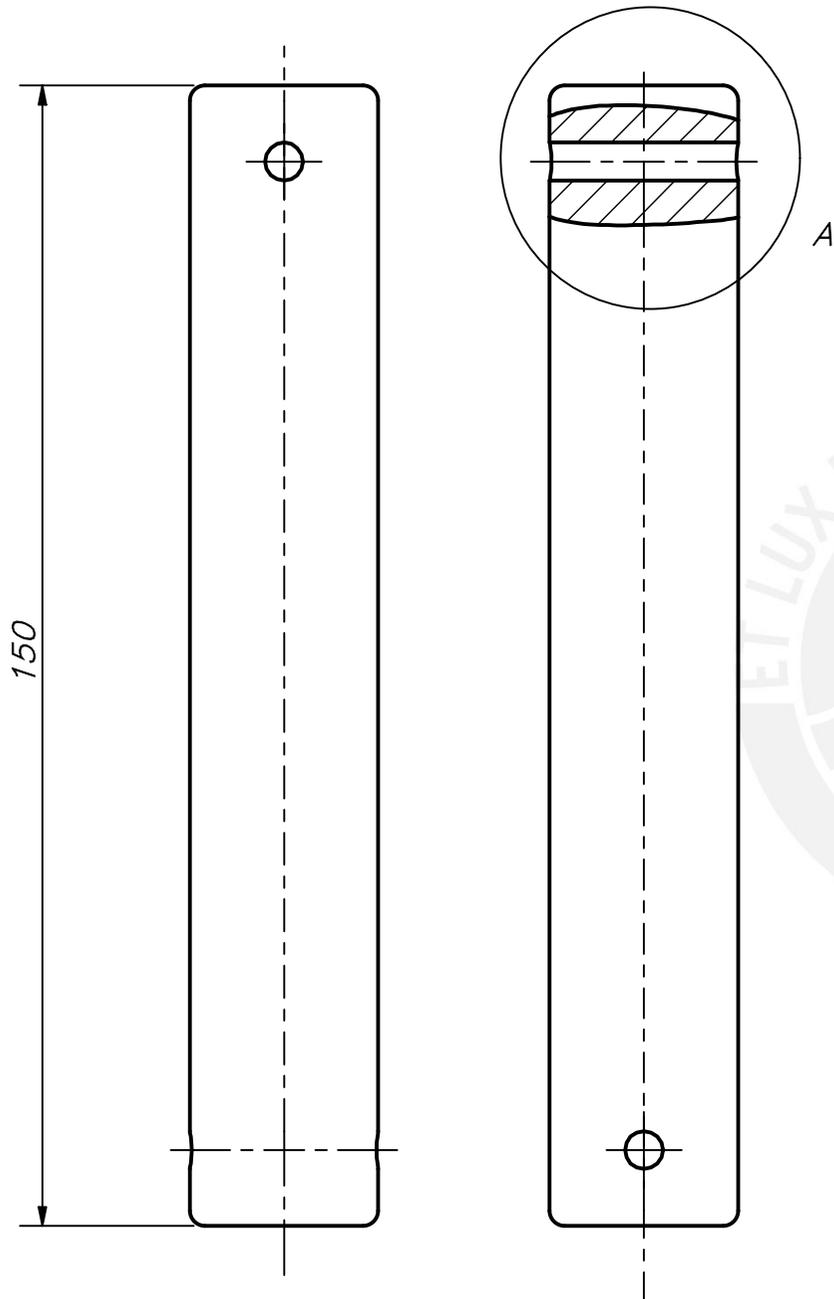
DETALLE C
ESCALA 2 : 1



REDONDEOS NO INDICADOS R2

COTA NOMINAL	COTA MÁXIMA	COTA MÍNIMA
-----------------	----------------	----------------

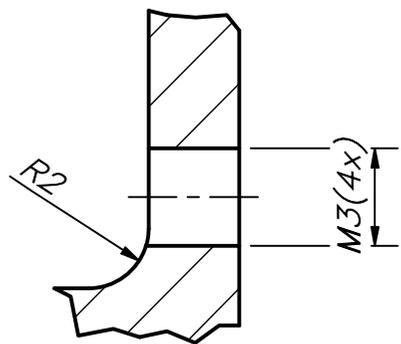
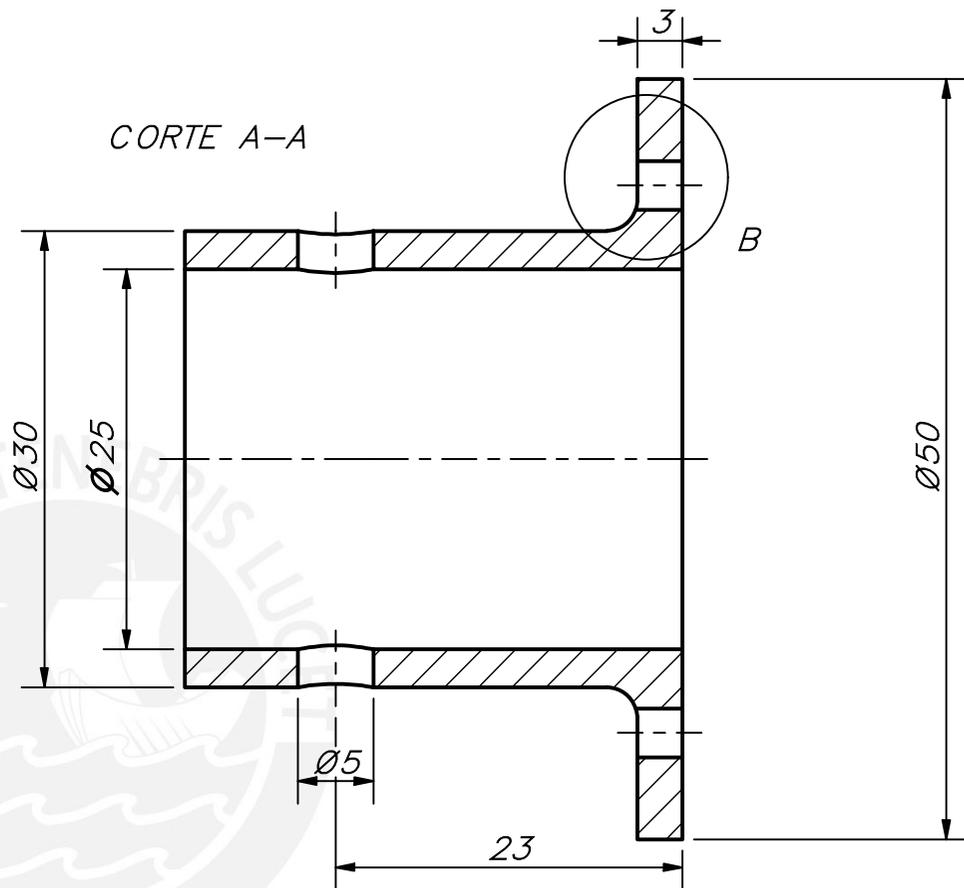
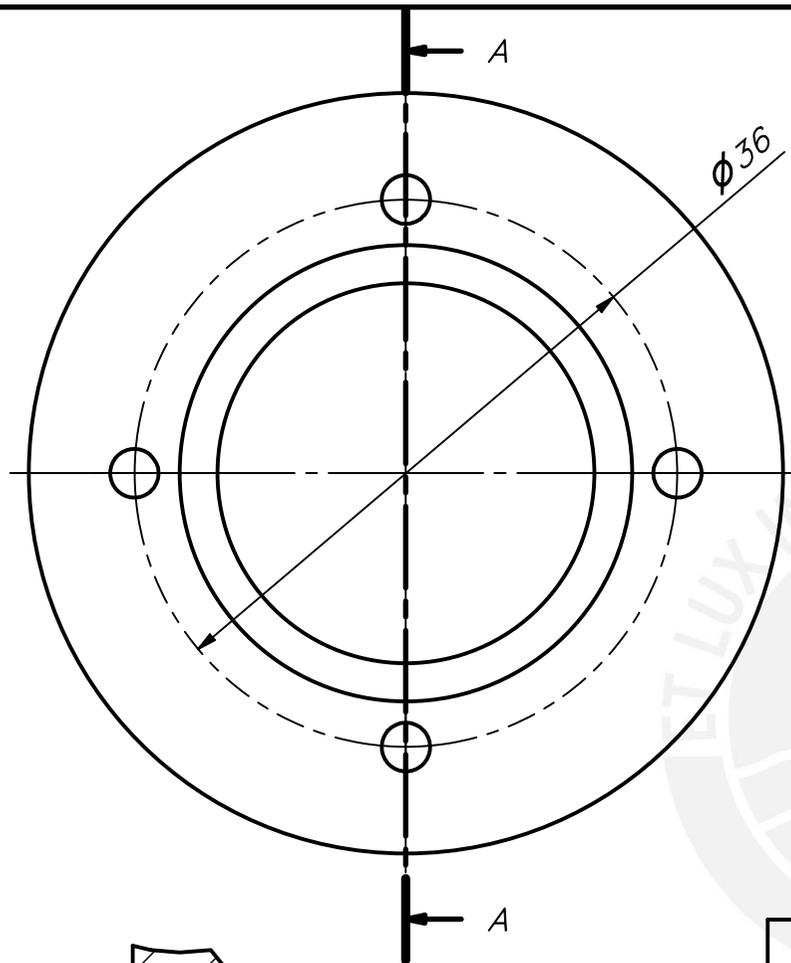
ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL	MATERIAL NYLON 6SA
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ CIENCIAS E INGENIERÍA - ING. MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	ESCALA 1 : 1	
20171073	OSHIRO KOHASHIKAWA, BRUNO GONZALO	FECHA: 2023.08.06
		LÁMINA: BRA-PD3-A4



DETALLE A
ESCALA 2 : 1

ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL	MATERIAL NYLON 6SA
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ CIENCIAS E INGENIERÍA – ING. MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	ESLABÓN a4	ESCALA 1 : 1
20171073	OSHIRO KOHASHIKAWA, BRUNO GONZALO	FECHA: 2023.08.06
		LÁMINA: BRA-PD4-A4

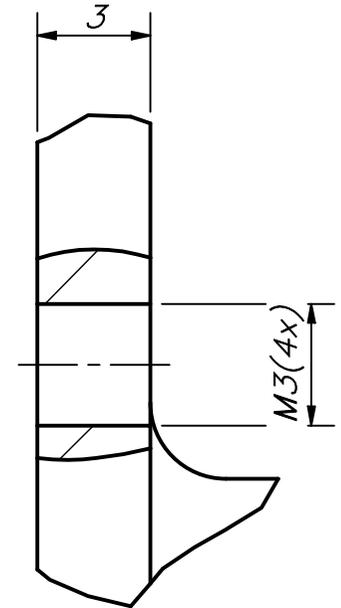
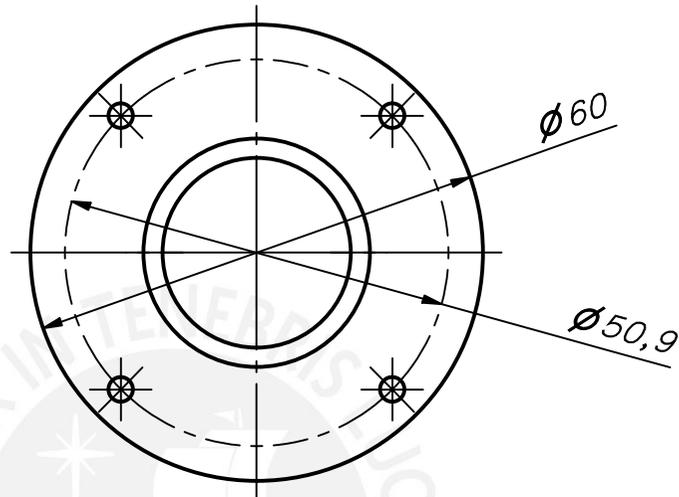
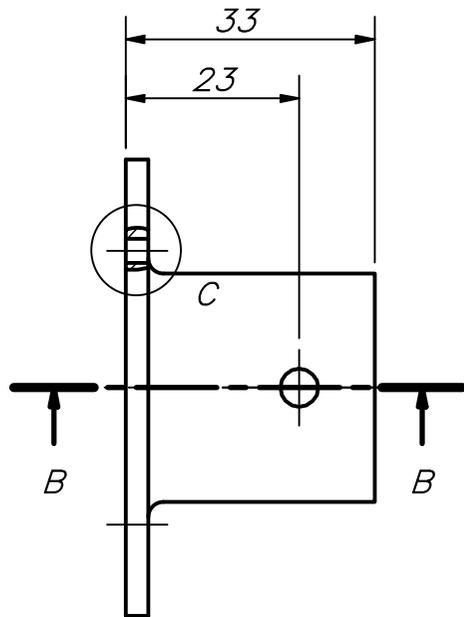
COTA NOMINAL	COTA MÁXIMA	COTA MÍNIMA
-----------------	----------------	----------------



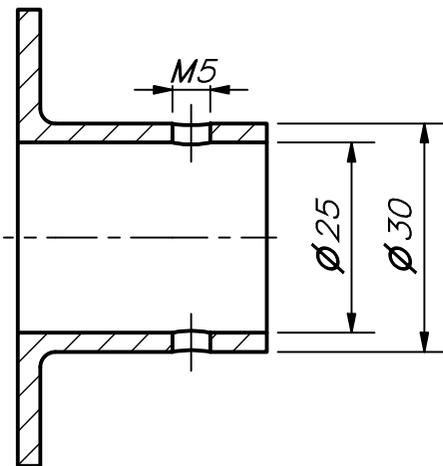
DETALLE B
ESCALA 4 : 1

COTA NOMINAL	COTA MÁXIMA	COTA MÍNIMA

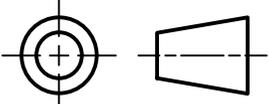
ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL	MATERIAL NYLON 6SA
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ CIENCIAS E INGENIERÍA - ING. MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	BRIDA TIPO 1	ESCALA 2 : 1
		FECHA: 2023.08.05
20171073	OSHIRO KOHASHIKAWA, BRUNO GONZALO	LÁMINA: BRA-PD5-A4



DETALLE C
ESCALA 5 : 1

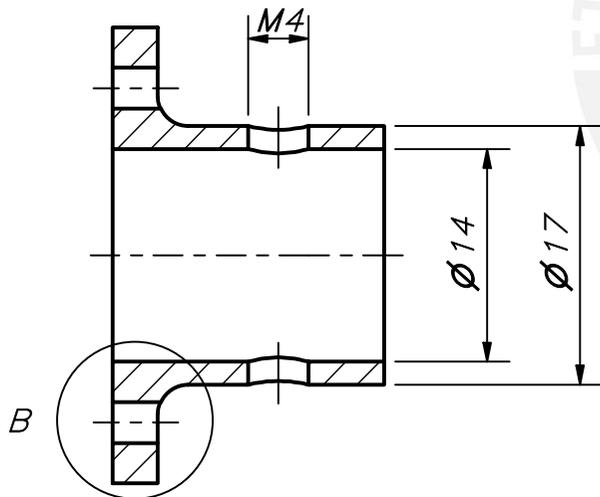
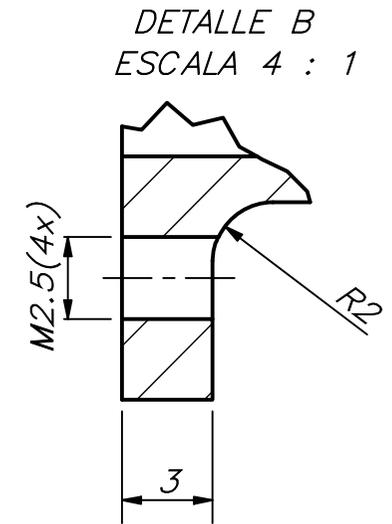
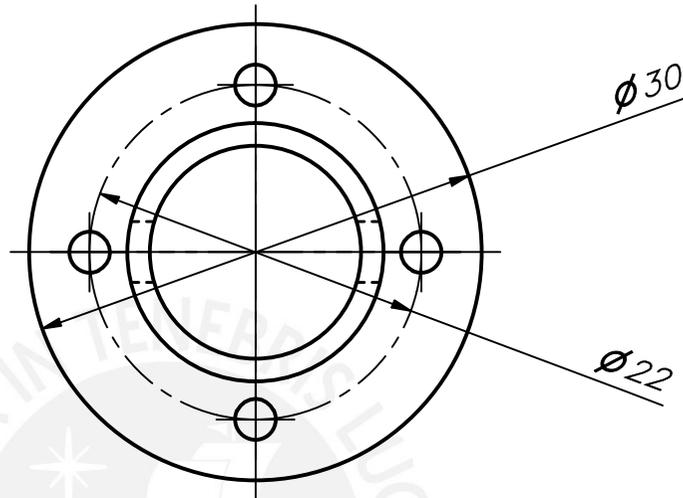
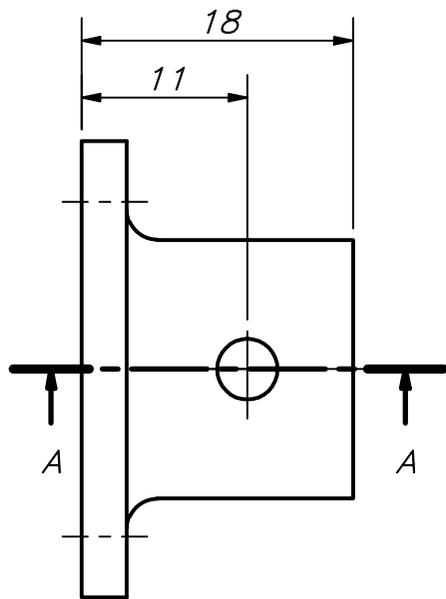


CORTE B-B

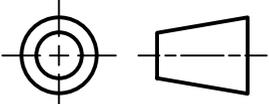
ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL	MATERIAL NYLON 6SA
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ CIENCIAS E INGENIERIA – ING. MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	BRIDA TIPO 2	ESCALA 1 : 1
20171073	OSHIRO KOHASHIKAWA, BRUNO GONZALO	FECHA: 2023.08.05

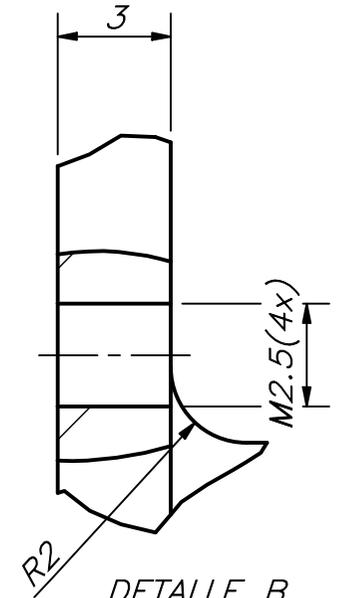
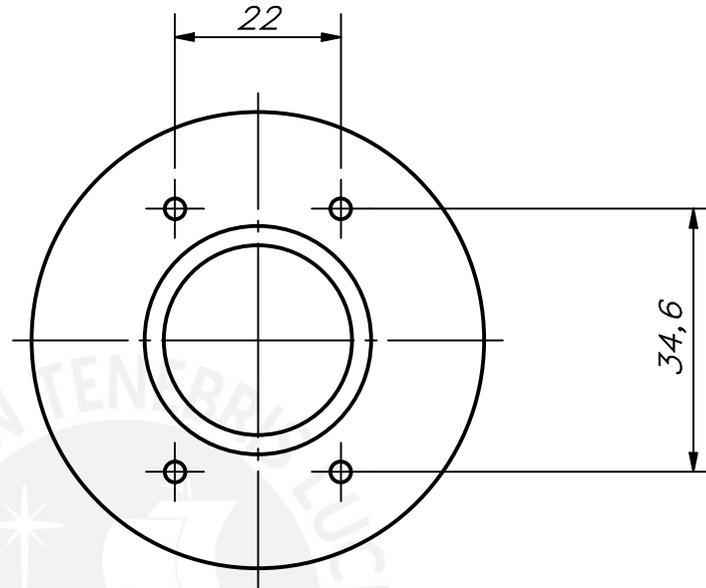
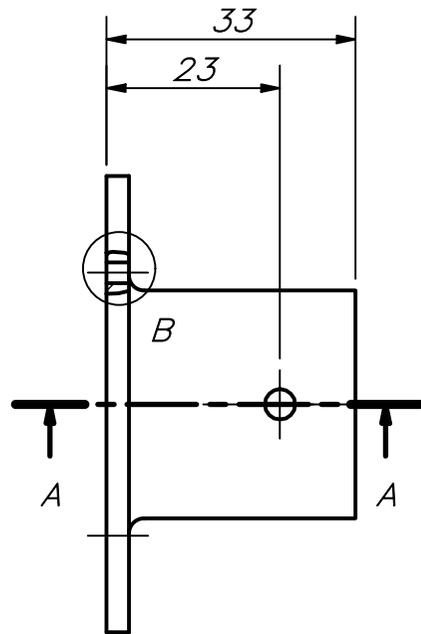
COTA NOMINAL	COTA MÁXIMA	COTA MÍNIMA
-----------------	----------------	----------------

LÁMINA:
BRA-PD6-A4

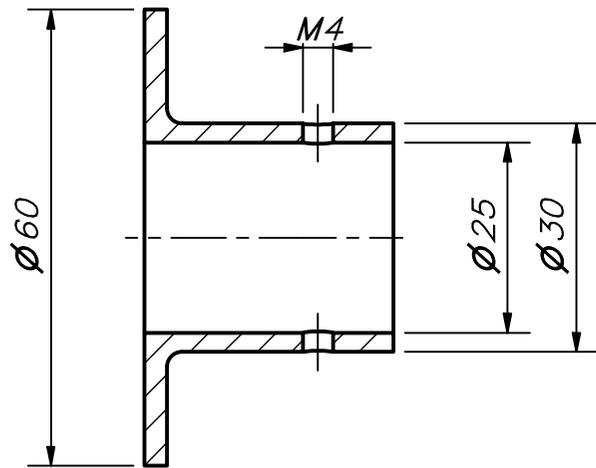


CORTE A-A

ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL	MATERIAL NYLON 6SA
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ CIENCIAS E INGENIERÍA - ING. MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	BRIDA TIPO 3	ESCALA 2 : 1
20171073	OSHIRO KOHASHIKAWA, BRUNO GONZALO	FECHA: 2023.08.05
COTA NOMINAL	COTA MÁXIMA	COTA MÍNIMA
		LÁMINA: BRA-PD7-A4



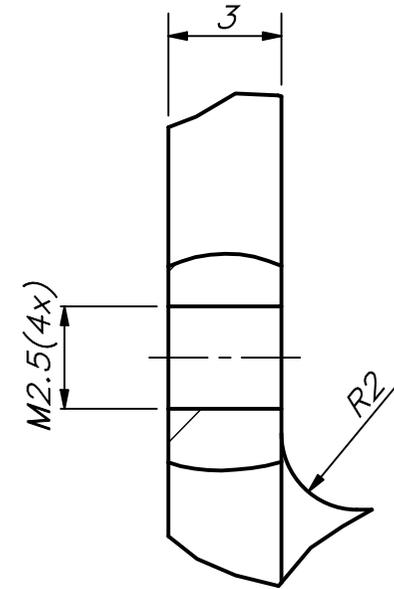
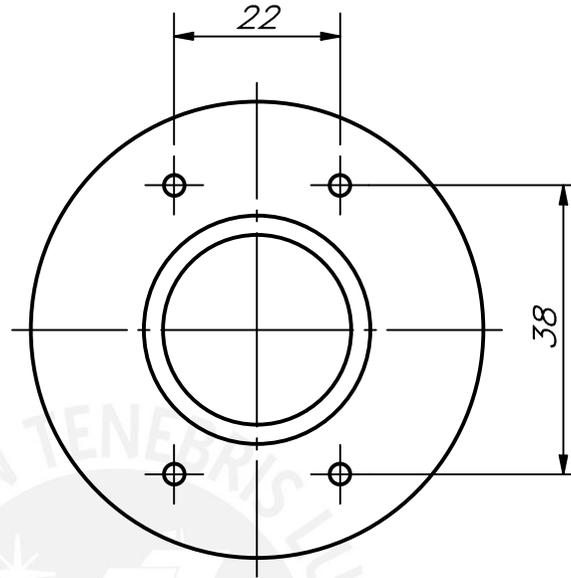
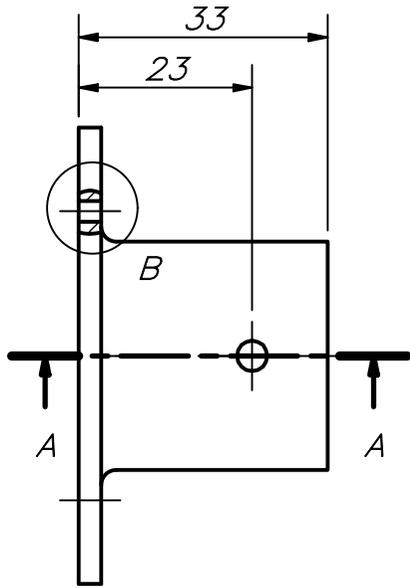
DETALLE B
ESCALA 5 : 1



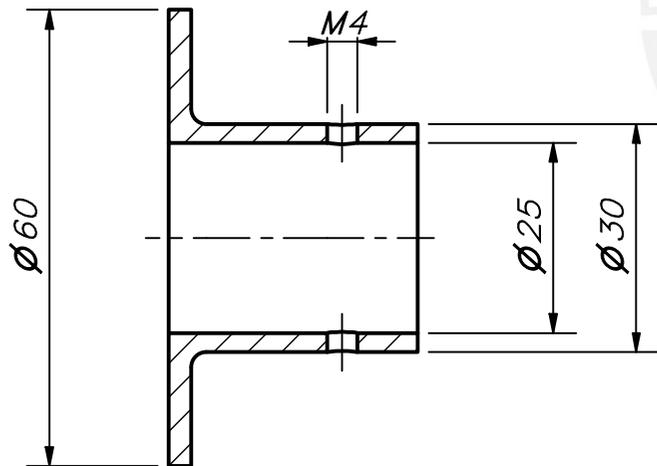
CORTE A-A

ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL	MATERIAL NYLON 6SA
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ CIENCIAS E INGENIERÍA – ING. MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	BRIDA TIPO 4	ESCALA 1 : 1
		FECHA: 2023.08.05
20171073	OSHIRO KOHASHIKAWA, BRUNO GONZALO	LÁMINA: BRA-PD8-A4

COTA NOMINAL	COTA MÁXIMA	COTA MÍNIMA
-----------------	----------------	----------------



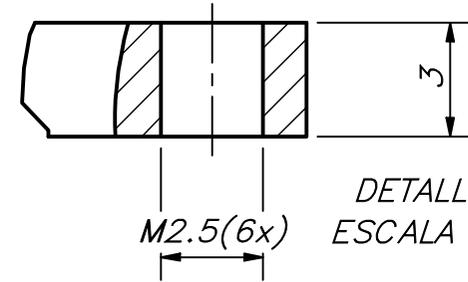
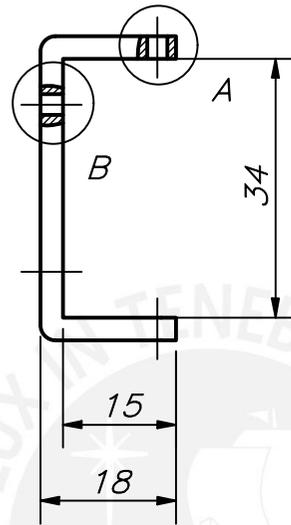
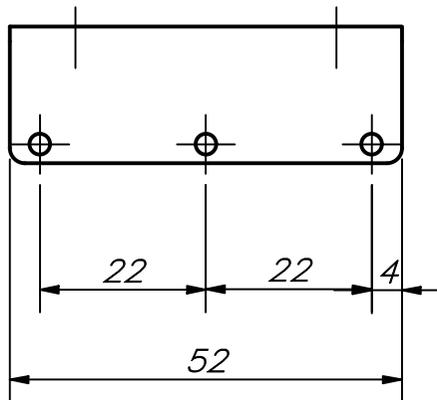
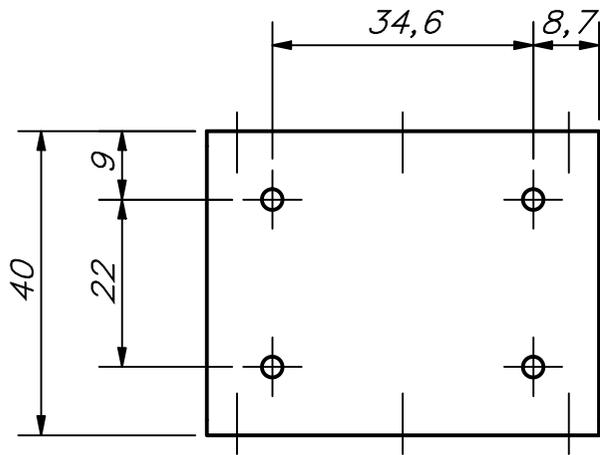
DETALLE B
ESCALA 5 : 1



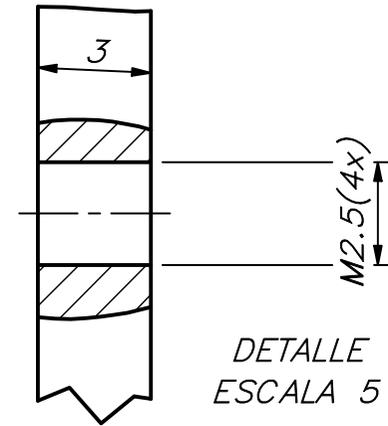
CORTE A-A

ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL	MATERIAL NYLON 6SA
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ CIENCIAS E INGENIERÍA – ING. MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	BRIDA TIPO 5	ESCALA 1 : 1
20171073	OSHIRO KOHASHIKAWA, BRUNO GONZALO	FECHA: 2023.08.05
COTA NOMINAL	COTA MÁXIMA	COTA MÍNIMA
		LÁMINA: BRA-PD9-A4

COTA NOMINAL	COTA MÁXIMA	COTA MÍNIMA
--------------	-------------	-------------

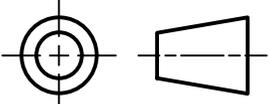


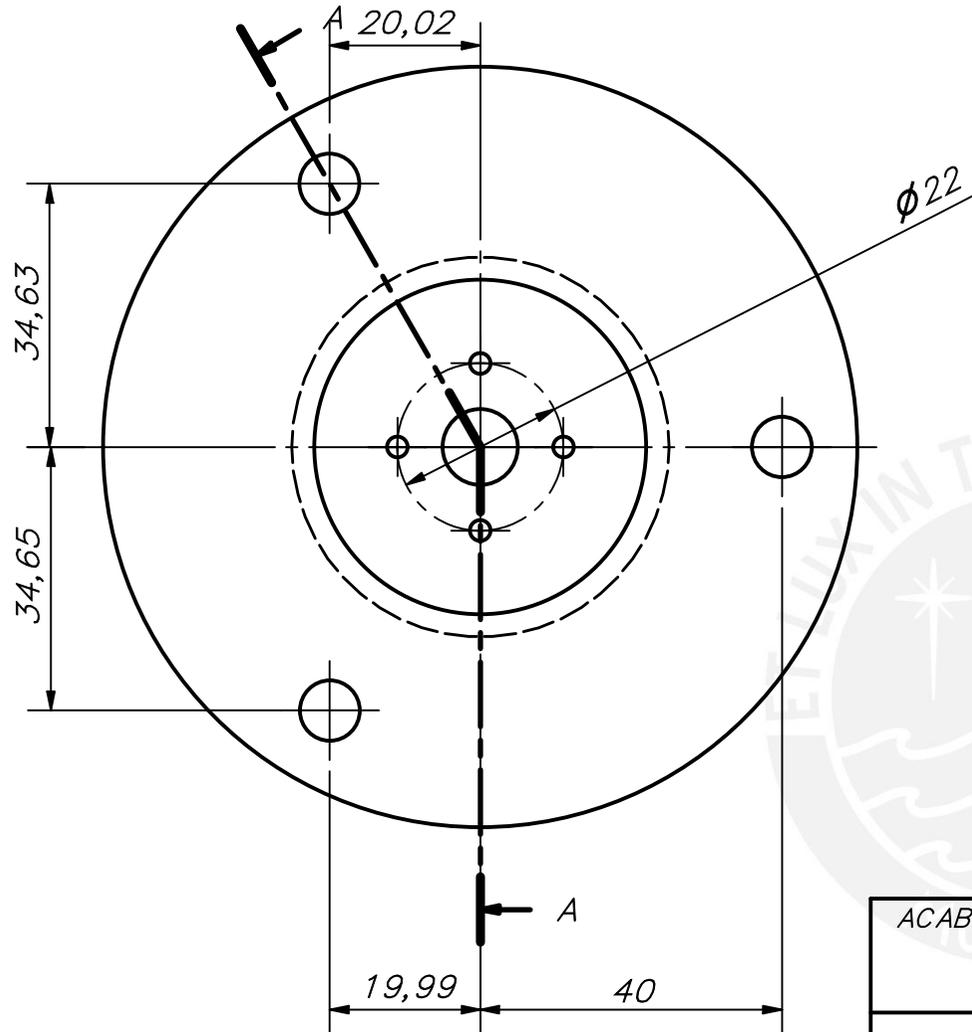
DETALLE A
ESCALA 5 : 1



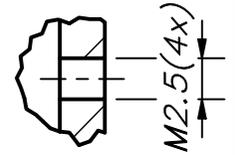
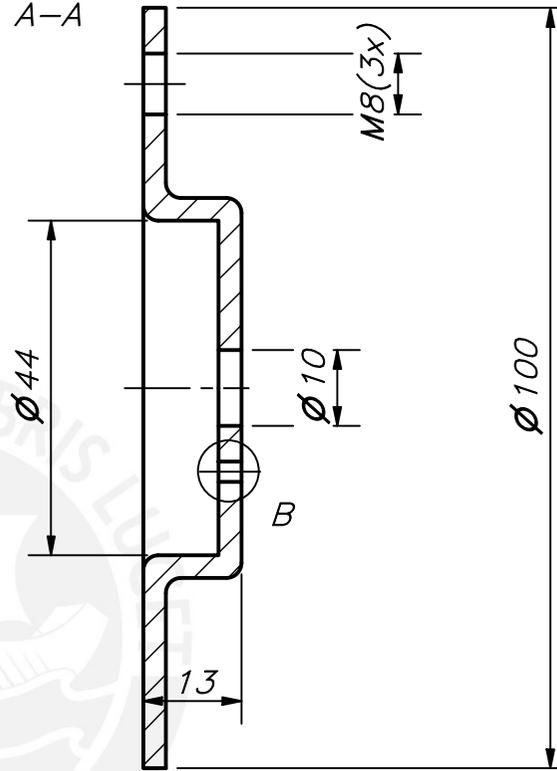
DETALLE B
ESCALA 5 : 1

REDONDEOS NO INDICADOS R2

ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL	MATERIAL NYLON PA12
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ CIENCIAS E INGENIERÍA – ING. MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	SOPORTE a3-M4	ESCALA 1 : 1
20171073	OSHIRO KOHASHIKAWA, BRUNO GONZALO	FECHA: 2023.08.06
COTA NOMINAL	COTA MÁXIMA	COTA MÍNIMA
		LÁMINA: BRA-PD10-A4

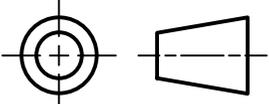


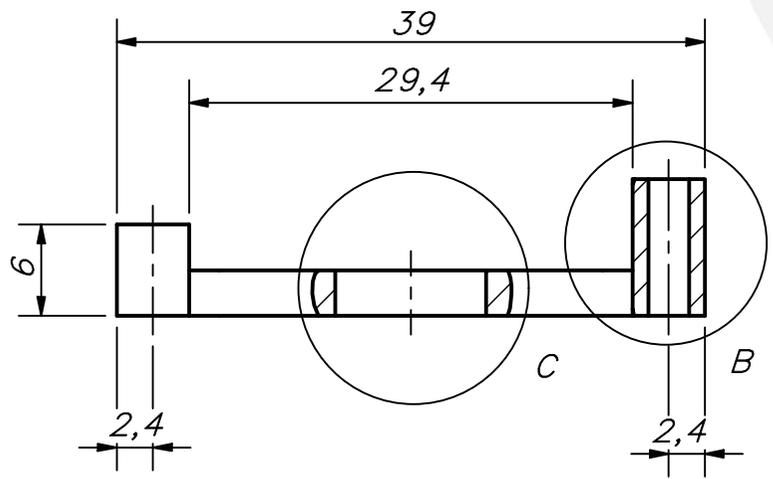
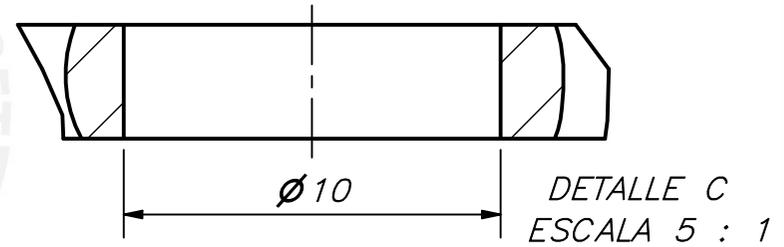
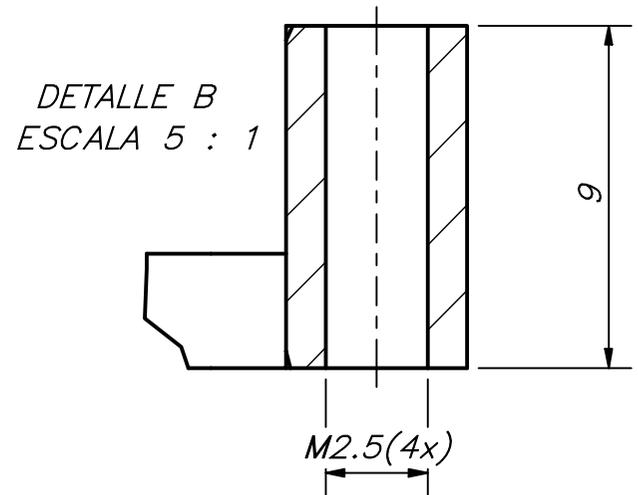
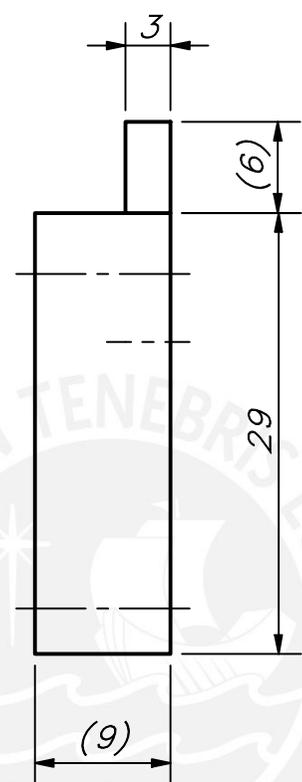
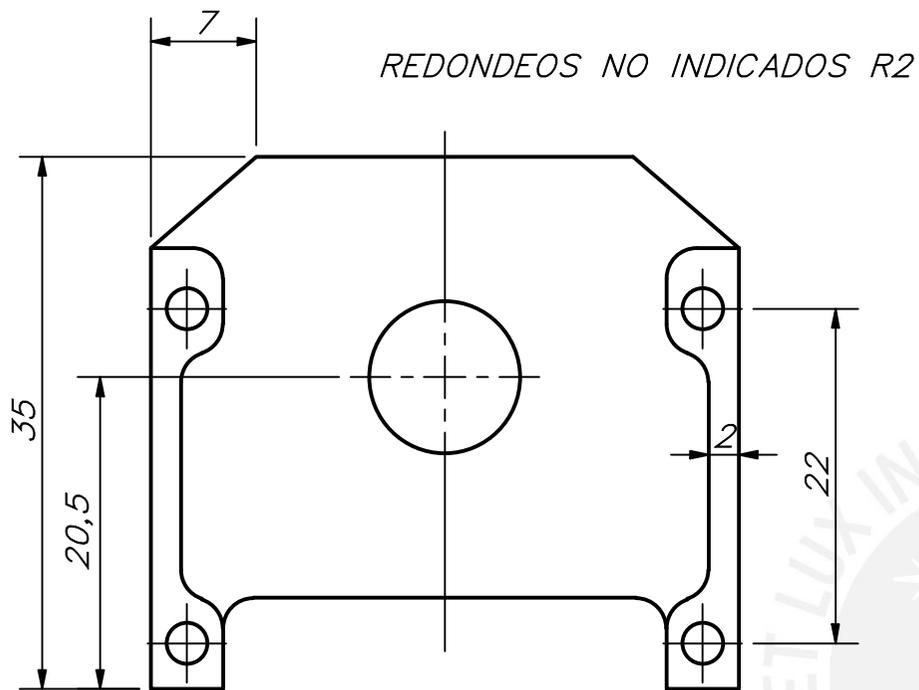
CORTE A-A



DETALLE B
ESCALA 2 : 1

ESPESOR 3 MM
REDONDEOS NO INDICADOS 2 MM

ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL	MATERIAL NYLON PA12
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ CIENCIAS E INGENIERÍA – ING. MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	SOPORTE GRIPPER	ESCALA 1 : 1
20171073	OSHIRO KOHASHIKAWA, BRUNO GONZALO	FECHA: 2023.08.05
COTA NOMINAL	COTA MÁXIMA	COTA MÍNIMA
		LÁMINA: BRA-PD11-A4



ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL	MATERIAL
		NYLON PA12

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
CIENCIAS E INGENIERÍA - ING. MECATRÓNICA

MÉTODO DE PROYECCIÓN	SOPORTE M4	ESCALA
		2 : 1

20171073	OSHIRO KOHASHIKAWA, BRUNO GONZALO	FECHA: 2023.08.06
----------	--------------------------------------	----------------------

COTA NOMINAL	COTA MÁXIMA	COTA MÍNIMA

LÁMINA:
BRA-PD12-A4