

Universidad de Costa Rica  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Eléctrica

TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN  
LICENCIATURA

Integración del hardware y software del robot  
humanoide del ARCOS-LAB de la EIE

Por:

Félix David Suárez Bonilla

Ciudad Universitaria “Rodrigo Facio”, Costa Rica

Febrero de 2017

# Integración del hardware y software del robot humanoide del ARCOS-LAB de la EIE

Por:

Félix David Suárez Bonilla

Sometida a la Escuela de Ingeniería Eléctrica  
de la Facultad de Ingeniería  
de la Universidad de Costa Rica  
como requisito parcial para optar por el grado de:

LICENCIADO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

Aprobada por el Tribunal:

---

M. Sc. Fabián Abarca Calderón  
Representante del Director, Escuela de Ingeniería Eléctrica

---

Dr. rer. nat. Federico Ruiz Ugalde    M. Sc. Luis A. Golcher Barguil  
Director, Comité Asesor                    Miembro del Tribunal

---

Lic. Luis Federico Gómez Salazar    Lic. Jose Carlos Herrera Espinoza  
Miembro, Comité asesor                    Miembro, Comité asesor

# Dedicatoria

En lo personal, le dedico este proyecto a mi novia Andrea y mi madre Lily, gracias por el apoyo en todos estos años.

# Reconocimientos

Un agradecimiento especial a todas las personas que de una u otra forma han contribuido a este proyecto:

- Greivin Oviedo Villalobos
- Jose Carlos Herrera
- Israel Chávez Arbaiza
- Elvis Aguilar Céspedes
- Jose Daniel Pérez
- Federico Gómez Salazar
- Mauricio Rodríguez Calvo
- Luis Jiménez
- Alexander Marín
- Kathleen Orellana
- Ariel Mora Jiménez
- Katherine Rojas
- Carlos Mesén
- Luis Castillo
- Carolina Araúz Villegas

# Índice general

<b>Nomenclatura</b>	<b>XI</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Alcances	1
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Objetivo general	2
1.2.2. Objetivos específicos	2
1.3. Justificación	2
1.4. Planteamiento del problema	3
1.5. Solución propuesta	3
1.6. Metodología	4
1.7. Contribuciones	6
1.7.1. General	6
1.7.2. Cabeza	6
1.7.3. Torso robótico	7
1.7.4. Base Móvil	7
<b>2. Marco Teórico</b>	<b>8</b>
2.1. Introducción	8
2.2. Robots humanoides	9
2.2.1. Introducción	9
2.2.2. Mano robótica	10
2.2.3. Cabeza robótica	11
2.2.4. Torso robótico	12
2.3. Bases omnidireccionales	13
2.3.1. Ruedas tipo Mecanum	13
2.4. Software de integración robótica	13
2.4.1. YARP	14
2.4.2. ROS	15
2.4.3. OROCOS	15
2.5. Control por impedancia	15

<b>3. Administración del proyecto</b>	<b>18</b>
3.1. Organización	18
3.2. Costo del proyecto	20
3.3. Recurso humano	21
3.4. Financiamiento y patrocinios	21
3.5. Cronograma	23
<b>4. Cabeza</b>	<b>25</b>
4.1. Cráneo	25
4.1.1. Introducción	25
4.1.2. Sensores	26
4.1.3. Construcción	28
4.2. Cara emocional	30
4.2.1. Competencias emocionales	30
4.2.2. Establecimiento de requerimientos	30
4.2.3. Diseño de la cara emocional	31
4.2.4. Construcción	34
4.3. Cuello	37
4.3.1. Diseño	37
4.4. Integración	38
4.4.1. Integración de datos	39
4.4.2. Integración mecánica	39
4.4.3. Integración software	40
<b>5. Torso robótico</b>	<b>46</b>
5.1. Sistema de manipulación	46
5.1.1. Brazo robótico KUKA Lightweight LWR4+	46
5.1.2. Mano robótica DLR HIT Hand II	47
5.2. Estructura de soporte	50
5.2.1. Establecimiento de requerimientos	50
5.2.2. Diseño del torso	52
5.2.3. Ensamblaje final	56
5.3. Integración	56
5.3.1. Integración mecánica	56
5.3.2. Integración de datos	62
5.3.3. Integración software	66
<b>6. Base móvil omnidireccional</b>	<b>68</b>
6.1. Establecimiento de requerimientos	68
6.2. Diseño de la base móvil	69
6.3. Construcción y ensamblaje	71
6.4. Integración	74

<b>7. Alimentación</b>	<b>77</b>
7.1. Establecimiento de requerimientos . . . . .	77
7.1.1. Baterías . . . . .	77
7.1.2. Cabeza . . . . .	78
7.1.3. Base móvil . . . . .	79
7.1.4. Torso . . . . .	80
7.2. Diseño del sistema de alimentación . . . . .	80
7.2.1. Convertidores DC a DC . . . . .	81
7.2.2. Inversor . . . . .	81
7.2.3. Autonomía . . . . .	83
7.2.4. Diagrama unifilar . . . . .	84
<b>8. Integración global y pruebas</b>	<b>86</b>
8.1. Arquitectura robótica . . . . .	86
8.1.1. Arquitectura de tres capas . . . . .	86
8.1.2. Modelos de objetos . . . . .	90
8.1.3. Parámetros . . . . .	91
8.2. Integración global de datos . . . . .	91
8.3. Integración global de potencia . . . . .	91
8.4. Pruebas de funcionamiento . . . . .	93
<b>9. Conclusiones y recomendaciones</b>	<b>97</b>
<b>10. Apéndice A: Cronograma</b>	<b>100</b>
<b>11. Apéndice B: Implementación y uso de interfaces</b>	<b>102</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>109</b>

# Índice de figuras

1.1. Diagrama general de bloques del robot humanoide. . . . .	4
2.1. Robot humanoide diseñado para jugar ping-pong [1]. . . . .	9
2.2. Robot humanoide diseñado por la NASA [2]. . . . .	10
2.3. Torso robótico diseñado para el robot humanoide del ARCOS-LAB [3].	12
2.4. Rueda tipo Mecanum [4]. . . . .	14
2.5. Músculos antagonistas del brazo. Cortesía de [5]. . . . .	16
3.1. Organigrama del proyecto. . . . .	19
3.2. Cronograma del proyecto. . . . .	24
4.1. Kinect para Xbox 360. . . . .	27
4.2. Sony ILCE-QX1. . . . .	27
4.3. Cámara térmica “Seek Thermal”. . . . .	28
4.4. Estructura de la cabeza (Vista frontal). . . . .	29
4.5. Marco estructural para la cara emocional [6]. . . . .	31
4.6. Parte superior del marco estructural con soportes [6]. . . . .	32
4.7. Oreja derecha de la cara emocional del robot humanoide [6]. . . . .	33
4.8. Movimientos y ejes de la ceja [6]. . . . .	33
4.9. Mandíbula de la cara emocional del robot humanoide [6]. . . . .	34
4.10. Matriz de leds Adafruit Neopixel Neomatrix 8x8 [7]. . . . .	35
4.11. Diseño final de la cara emocional [6]. . . . .	35
4.12. Construcción final de la cara emocional del robot humanoide. . . . .	36
4.13. Articulación pan del cuello [8]. . . . .	37
4.14. Articulación tilt del cuello [8]. . . . .	38
4.15. Diseño final del cuello [8]. . . . .	41
4.16. Diagrama de bloques general (Integración de la cabeza) [8]. . . . .	42
4.17. Interconexiones entre la cabeza, el cuello y la cara emocional [8]. . . . .	43
4.18. Matriz de Leds conectada al Arduino. . . . .	44
4.19. Conexión entre la Raspberry PI y la tarjeta PCA9685. . . . .	45
5.1. Brazo robótico KUKA Lightweight 4+. . . . .	47
5.2. Controlador del brazo KUKA CR LR. . . . .	48

5.3. Mano robótica DLR HIT Hand II. . . . .	49
5.4. Controlador de la mano NISE 3140. . . . .	50
5.5. Sistema de posicionamiento lineal. . . . .	51
5.6. Dimensiones del controlador del brazo KUKA LWR4+. . . . .	52
5.7. Diseño del acople para el sistema de posición lineal. . . . .	53
5.8. Soporte para los brazos robóticos. . . . .	54
5.9. Sistema de desplazamiento vertical. . . . .	55
5.10. Diseño final del torso del robot humanoide. . . . .	57
5.11. Diagrama de bloques general (Integración del torso) [8]. . . . .	58
5.12. Diseño final del acople entre la mano y el brazo. . . . .	59
5.13. Diseño final del acople entre el brazo y el torso . . . . .	61
5.14. Interconexiones entre la cabeza y el torso [8]. . . . .	62
5.15. Interconexiones entre el sistema de manipulación y el torso. . . . .	63
5.16. Cable ethernet industrial usado entre la mano y el controlador. . . . .	64
5.17. Diagrama de conexión entre la mano robótica y su controlador. . . . .	65
5.18. Integración del sistema de manipulación. . . . .	65
5.19. Intefaz gráfica del software de control FFH. Cortesía de [9]. . . . .	66
6.1. Diseño del sistema de acople entre las ruedas y la reducción. . . . .	70
6.2. Diseño del compartimento de los motores. . . . .	70
6.3. Base móvil diseñada. . . . .	71
6.4. Rueda tipo mecanum Andymark de 6 pulgadas (Imagen tomada de [10]).	72
6.5. Perfiles industriales de aluminio utilizados (Imagen tomada de [10]). . .	73
6.6. Base móvil omnidireccional finalizada (Imagen tomada de [10]). . . . .	73
6.7. Diagrama de bloques general (Integración de la base móvil). . . . .	75
6.8. Diagrama de bloques general del controlador de la base móvil. . . . .	75
6.9. Conexión entre el torso robótico y la base móvil omnidireccional. . . . .	76
7.1. Batería de ciclo profundo adquirida para la base móvil del robot huma- noide. . . . .	78
7.2. Diagrama unifilar del sistema de alimentación del robot humanoide. . .	85
8.1. Arquitectura del sistema. . . . .	87
8.2. Ejemplo de mapeo. . . . .	88
8.3. Ejemplo de mapeo. . . . .	89
8.4. Integración de todas las señales de comunicación del robot humanoide.	92
8.5. Integración de todas las señales de comunicación del robot humanoide.	94
8.6. Primera rutina de manipulación con el robot humanoide. . . . .	95
8.7. Segunda rutina de manipulación con el robot humanoide. . . . .	96

# Índice de cuadros

3.1. Costos del proyecto, sin incluir: brazos, mano y horas de ingeniería . . .	20
3.2. Costo del proyecto incluyendo brazos, mano e ingeniería . . . . .	21
3.3. Fuentes de financiamiento del proyecto . . . . .	23
4.1. Resumen de escenarios y sus respectivas emociones asociadas [6]. . . . .	30
5.1. Características del motor Baldor Brushless AC W067 . . . . .	51
6.1. Tamaños normales para una silla de ruedas . . . . .	69
7.1. Resumen de los requerimientos de energía para la cabeza del robot. . .	79
7.2. Resumen de los requerimientos de energía para la base móvil del robot humanoide. . . . .	80
7.3. Resumen de los requerimientos de energía para el torso del robot [3]. . .	80
7.4. Convertidores DC a DC necesarios para el robot humanoide . . . . .	81
7.5. Elementos que se quieren alimentar con corriente alterna. . . . .	82
7.6. Cálculo de potencia efectiva del robot humanoide. . . . .	84

# Nomenclatura

**ARCOS-Lab** Laboratorio de robots autónomos y sistemas cognitivos (*Autonomous Robots and Cognitive Systems Laboratory*).

**EIE** Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Costa Rica.

**INII** Instituto de Investigaciones en Ingeniería de la Universidad de Costa Rica.

**LINUX** Sistema de código abierto basado en UNIX.

**ROS** Sistema operativo para robots (*Robot Operating System*)

**UCR** Universidad de Costa Rica.

**UNIX** Sistema operativo multiusuario y multitarea.

**YARP** Otra plataforma para robot (*Yet Another Robot Platform*)

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Alcances

Las tareas a las que se enfrenta el ser humano en la vida diaria pueden ser peligrosas, de ahí la importancia de un robot que pueda asistir en labores que puedan poner en riesgo nuestra integridad física y emocional. Esto porque los robots pueden ser utilizados en situaciones de alto riesgo como: operaciones de rescate, manejo de explosivos, manipulación de sustancias tóxicas y exploración de lugares peligrosos[11].

Estas aplicaciones requieren de un robot amigable con el ambiente, que manipule objetos con suavidad y precisión, que cuente con una capacidad de percepción avanzada y que entienda las intenciones de los humanos. Para que un robot cumpla con lo anterior debe tener ciertas capacidades físicas y cognitivas [12] [13]. En el aspecto físico el control suave puede resolver lo de la manipulación delicada, el problema de percepción se puede realizar con sensores con capacidad de detección en 3D y una fusión de sensores complementarios posibilita la comunicación con el ser humano.

El ARCOS-LAB se está dando a la tarea de construir dicho sistema, para ello se encuentra desarrollando un robot humanoide con capacidades de manipulación avanzadas. Este robot estará compuesto por diversas partes que permitirán cumplir con los requerimientos físicos y cognitivos, dichas partes deben estar integradas de tal manera que permitan que el robot pueda interactuar con un humano y desempeñarse de acuerdo a cada circunstancia.

Este trabajo de grado se concentrará en la integración de los componentes del robot humanoide, los cuales son: la base móvil, los brazos, las manos y el dorso. Estos componentes están siendo desarrollados en otros proyectos satélites. El objetivo es finalizar con un robot que posibilite la investigación, a través de la ejecución de diferentes algoritmos y que permita demostraciones en diferentes escenarios de asistencia a humanos.

En este sentido, el diseño y construcción del robot humanoide tiene dos propósitos: habilitar una plataforma que permita la realización de investigación de alto nivel en el país y ligado a ésto, un sentido social, pues un robot humanoide podría asistir al ser humano. Esto es particularmente importante en aquellas labores peligrosas o aquellas actividades que, por alguna discapacidad, no podamos realizar por nuestros propios medios.

## 1.2. Objetivos

Se establecieron los siguientes objetivos para el desarrollo del trabajo:

### 1.2.1. Objetivo general

- Desarrollar la integración de hardware y software de las diferentes partes del robot humanoide con un estado final que permita la utilización de algoritmos avanzados de control cognitivo.

### 1.2.2. Objetivos específicos

- Determinar el estado actual de avance y funcionamiento de cada una de las partes y documentar dicho funcionamiento.
- Establecer las acciones (creación de acoples, montajes, conexiones, electrificación) a tomar sobre el hardware para integrar todas las partes del robot.
- Ejecutar las acciones para integrar las partes del robot y asegurarse un funcionamiento eléctrico, mecánico y de control adecuado.
- Analizar los diferentes sistemas disponibles de software de integración en robótica (robotic middleware, ros, yarp) y determinar la solución más adecuada para nuestro robot.
- Implementar la solución de software de integración seleccionada y desarrollar programas de prueba para las diferentes partes del robot humanoide.

## 1.3. Justificación

Las actividades peligrosas a las que se enfrenta el ser humano en su vida diaria pueden ser realizadas por robots humanoides. Esto evita poner en peligro la integridad del ser

humano y facilita la ejecución de tareas complejas y repetitivas. Las labores en las que puede ser utilizado un robot humanoide son: realización de cirugías, labores de limpieza, reparaciones en zonas de poco acceso y trabajos en atmósferas peligrosas.

EL ARCOS-LAB de la EIE se encuentra desarrollando diferentes proyectos con robots autónomos, uno de ellos es el robot humanoide. Los diferentes componentes del robot se están diseñando y construyendo en varios proyectos satélites. Estos componentes deben integrarse tanto a nivel de hardware como a nivel de software para poder contar con el robot finalizado.

El robot humanoide, una vez finalizado, permitirá realizar investigación con algoritmos avanzados de control cognitivo. Estos algoritmos le permitirán: realizar un control sutil, sujetar objetos, moverlos, empujarlos, colocarlos y verter líquidos en un recipiente. Estas capacidades le permitirán colaborar y asistir al ser humano en diferentes actividades de la vida diaria.

## 1.4. Planteamiento del problema

Este trabajo de grado pretende dar solución a la integración de los diferentes componentes del robot humanoide. Este paso es necesario para poder finalizar con la construcción del mismo. En cuanto a hardware es requerido diseñar y construir los acoples y montajes entre las diferentes partes del robot; a nivel de software es necesario utilizar un software de integración robótica que se encargue de conectar y entrelazar el software de los diferentes componentes del robot.

En la actualidad, los diferentes proyectos asociados al robot humanoide están dispersos e incomunicados entre sí. Se requiere de una coordinación y estructuración entre los diferentes proyectos satélites para que el diseño y construcción del robot humanoide pueda avanzar a buen ritmo. El equipo que se debe organizar es diverso y multidisciplinario, lo que añade una complejidad importante al proyecto, desde el punto de vista de gestión. El equipo con el que se cuenta está compuesto de ingenieros: eléctricos, electromecánicos, mecatrónicos y mecánicos. Adicionalmente, se cuenta con el apoyo de un escultor.

## 1.5. Solución propuesta

El robot humanoide se compone de: una cara emocional, una cabeza, un cuello, un torso, dos brazos y dos manos. Estos elementos se muestran en la figura 1.1. Esta figura también muestra, a alto nivel, como son las conexiones físicas y lógicas entre las diferentes partes del robot humanoide.

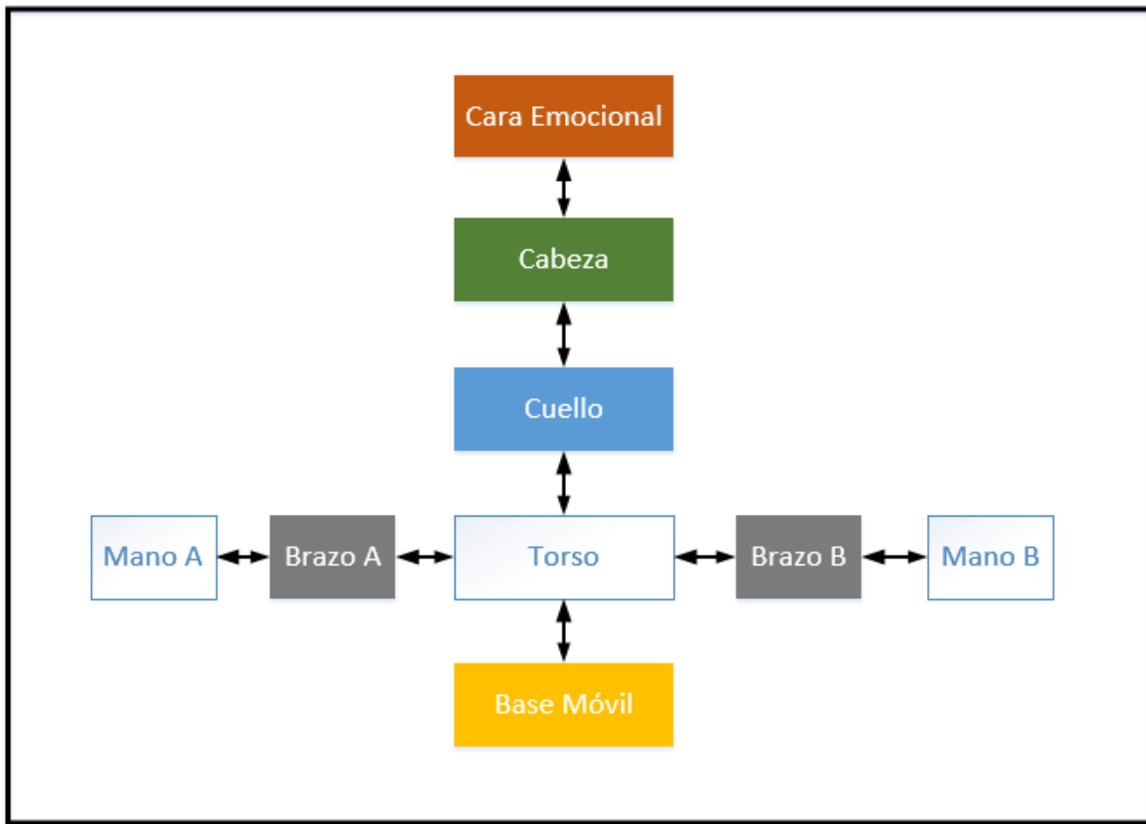


Figura 1.1: Diagrama general de bloques del robot humanoide.

Nótese que la propuesta del robot humanoide no utiliza locomoción bípeda, sino una base móvil omnidireccional. Además, el robot se compone de un cuello que une la cabeza y la cara emocional con el resto del cuerpo. El sistema de manipulación se compone de dos brazos y dos manos.

## 1.6. Metodología

**Análisis y coordinación con los proyectos satélites:** Determinar el estado de avance de los proyectos satélites y resolver dependencias entre los diferentes proyectos. La resolución de dependencias es fundamental para lograr la integración de los diferentes elementos del robot humanoide.

**Documentar el funcionamiento de las diferentes partes del robot humanoide:** Asegurar una correcta documentación del funcionamiento de las diferentes partes del robot humanoide que están siendo desarrolladas en los proyectos satélites, esto para futuras iteraciones de estos subproyectos.

**Integración de los diferentes elementos que componen la cabeza del robot humanoide:** Planificar, coordinar e implementar las acciones necesarias para integrar el cráneo, los sensores, los actuadores, la cara y el cuello, teniendo como resultado final un prototipo funcional de la cabeza del robot humanoide.

**Planificar las acciones para integrar los brazos, la mano, el torso y la base móvil:** Es necesario determinar y planificar las acciones necesarias para integrar estos elementos. Este paso consiste en establecer los requerimientos, cuatificar los recursos y planificar los proyectos satélites.

**Coordinar y ejecutar las acciones para integrar los brazos, la mano, el torso y la base móvil:** Las acciones que se planificaron con anterioridad se ejecutan. Es importante verificar que se disponen de los recursos humanos y materiales para este paso.

**Establecer las necesidades de potencia eléctrica y transmisión de datos:** El robot humanoide constará de una cantidad importante de elementos que requieren potencia eléctrica y un flujo continuo de datos. Es requerido establecer y coordinar los subproyectos que ejecutarán estas actividades.

**Ejecución e implementación de los elementos para establecer la potencia eléctrica y la transmisión de datos:** Las necesidades de distribución eléctrica y de transmisión de datos son ejecutadas en proyectos satélites de acuerdo a las especificaciones y requerimientos establecidos anteriormente.

**Analizar los diferentes programas disponibles de integración robótica:** El robot humanoide requiere de un sistema computacional para centralizar, controlar y gestionar todos los elementos actuadores.

**Implementación del software de integración robótica:** El sistema computacional para controlar el robot humanoide se diseña y construye de acuerdo a los requerimientos.

**Diseño y construcción del sistema de encendido y apagado del robot humanoide:** El robot humanoide requiere de elementos hardware y software para coordinar el encendido y el apagado de cada uno de los diferentes subsistemas.

**Diseñar y ejecutar programas de prueba de manipulación de objetos:** La construcción del robot humanoide está finalizada, por lo que se desarrollan varias pruebas sobre distintos escenarios de asistencia a humanos. El robot humanoide ejecuta un programa básico de manipulación de objetos.

**Evaluación final del robot humanoide:** Los resultados de las pruebas realizadas con el robot humanoide son reportados y documentados. El robot humanoide también consta de documentación suficiente sobre el funcionamiento de cada una de sus partes.

## 1.7. Contribuciones

En este trabajo final de graduación se realizaron las siguientes contribuciones, las cuales se dividen de acuerdo a las partes del robot.

### 1.7.1. General

- Organización y administración del proyecto desde el punto de vista de recursos humanos, recursos económicos y tiempo.
- Programación y establecimiento de dependencias y reuniones entre los diferentes miembros del equipo.
- Búsqueda de financiamiento, patrocinios y recursos económicos para diseño, implementación y pruebas de los proyectos satélites.
- Diseño de la integración global de datos y de potencia de todos los componentes del robot humanoide.
- Diseño e implementación parcial del sistema de alimentación del robot humanoide completo.
- Realización de dos pruebas de manipulación de objetos con el brazo robótico y la mano.

### 1.7.2. Cabeza

- Especificación, diseño, compra y prueba de las fuentes de alimentación de la cabeza del robot humanoide.
- Coordinación de reuniones, dependencias, recursos materiales y humanos entre los siguientes subproyectos: cráneo, cara y cuello.
- Diseño de la cara emocional, el cráneo y el cuello en conjunto con: Jose Carlos Herrera, Greivin Oviedo y Daniel Pérez.
- Integración de transmisión de datos de la cara emocional del robot humanoide con la cara y el cuello del robot.
- Programación básica del Arduino para poner en funcionamiento la matriz de leds de la cara emocional.
- Instalación y programación básica de la Raspberry PI para prueba de los servomotores de la cara.

- Coordinación del software a utilizar en la cámara térmica y la cámara HD, con sus correspondientes nodos ROS.

### 1.7.3. Torso robótico

- Especificación y diseño del sistema de alimentación del torso, lo cual incluye: cálculo de autonomía, diagrama unifilar y especificación del inversor.
- Compra y cotización de las piezas de aluminio del torso para su futura compra y construcción.
- Diseño y construcción del acople mecánico entre la mano y el brazo robótico.
- Especificación de conexión eléctrica y de comunicación de datos entre la mano y el brazo robótico.
- Rediseño del acople mecánico entre el brazo robótico y el torso del robot humanoide.

### 1.7.4. Base Móvil

- Especificación y diseño del sistema de alimentación, cálculo de autonomía y especificación de requerimientos de energía.
- Colaboración en el diseño de la base móvil, instalación eléctrica de potencia y electrónica de control.
- Diseño de integración de la base móvil con el torso desde el punto de vista de comunicación de datos y flujo de potencia.

# Capítulo 2

## Marco Teórico

### 2.1. Introducción

El hombre constantemente ha buscado desarrollar robots cada vez con mayor capacidad de procesamiento y más parecidos a la anatomía humana. Es así como surgen los denominados robot humanoides, los cuales buscan asimilar el cuerpo, los movimientos y el comportamiento de un ser humano. Las aplicaciones en las que puede utilizarse un robot humanoide pueden tener fines funcionales, tales como interacción con entornos humanos, o fines investigativos, como el estudio de la locomoción bípeda.

La mayoría de investigación en robots humanoides se ha desarrollado en Estados Unidos, Japón, China, Korea del Sur e Inglaterra [14]. Estados Unidos y Japón muestran un desarrollo tecnológico similar, pero con una orientación diferente, pues la robótica desarrollada en Estados Unidos suele perseguir objetivos militares, por otro lado, la robótica en Japón está destinada a labores asistenciales [15].

A grandes rasgos un robot humanoide consiste en una estructura mecánica, un circuito de control y un software. La estructura mecánica permite la movilidad del robot, la cual puede ser bípeda o utilizar una base móvil. El circuito de control se encarga de controlar los motores de las articulaciones. Por último, el software realiza los cálculos y planifica los movimientos [14].

## 2.2. Robots humanoides

### 2.2.1. Introducción

Los robots humanoides están diseñados para asemejarse al cuerpo humano. Estos robots tienen varios propósitos, el principal es interactuar con herramientas y ambientes humanos. En la figura 1 se muestra TOPIO 3.0, un robot humanoide desarrollado en Vietnam por la empresa TOSY. El robot está diseñado para jugar ping-pong con un oponente humano usando dos cámaras de alta resolución que detectan la bola[1].

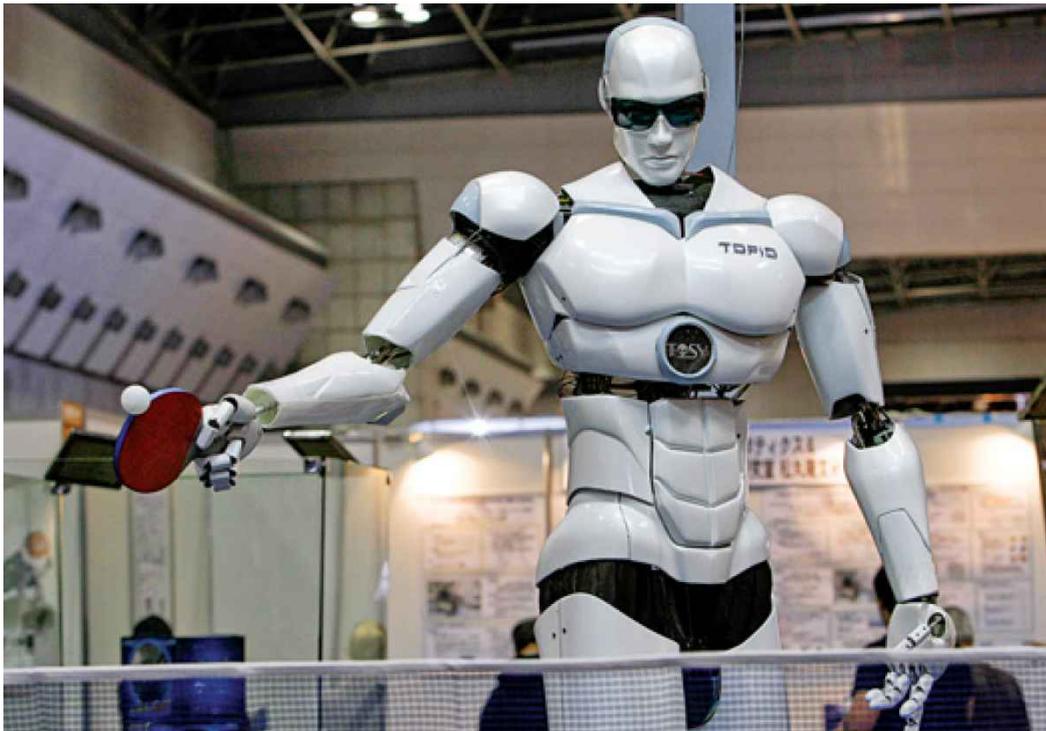


Figura 2.1: Robot humanoide diseñado para jugar ping-pong [1].

En general, un robot humanoide posee las siguientes partes: un torso, una cabeza, dos brazos y un sistema de locomoción. También ocurre que un robot humanoide puede modelar una parte del cuerpo humano, como de la cintura para arriba. Este es el caso de la primera versión de Robonaut 2, un robot humanoide desarrollado por la NASA

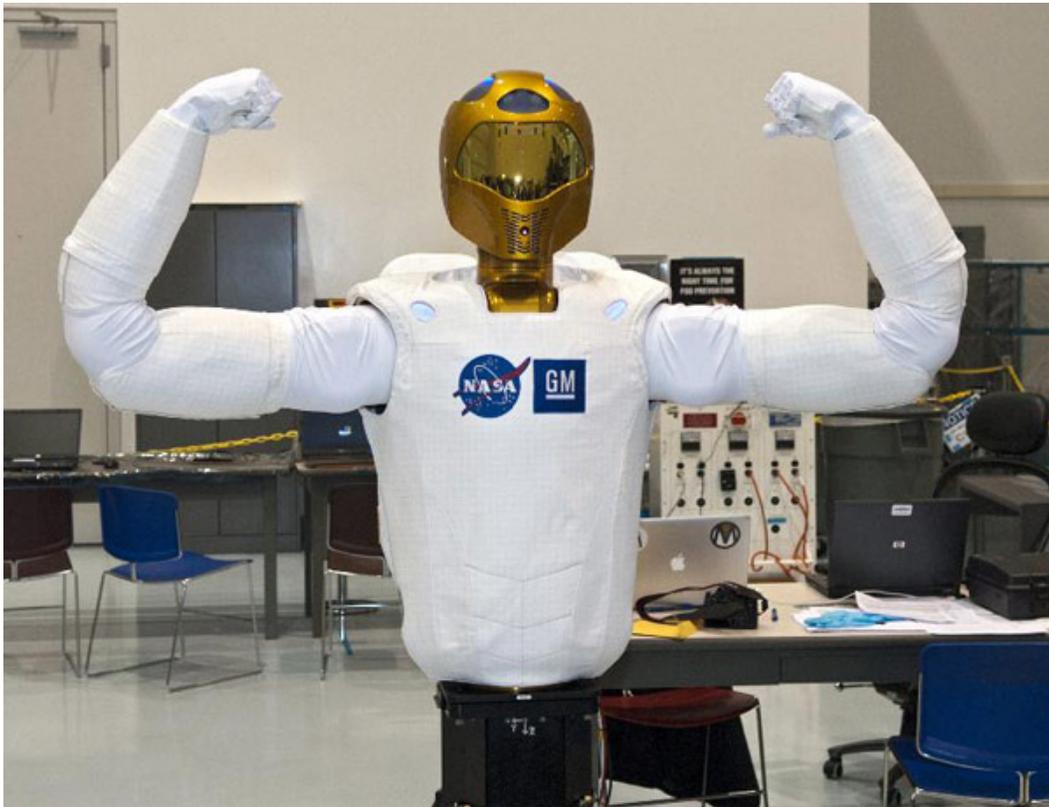


Figura 2.2: Robot humanoide diseñado por la NASA [2].

### 2.2.2. Mano robótica

El objetivo más importante de la robótica es permitir que los sistemas computacionales puedan interactuar con un ambiente que está diseñado y construido en función de la anatomía humana. La manera de hacerlo es a través de una extremidad mecánica con funciones similares a una mano humana, la cual se denomina mano robótica.

Las manos robóticas permiten realizar tareas como manipulación de objetos, contacto físico con el ambiente y modificación del entorno, el mismo puede consistir en una mano aislada o puede ser parte de un robot más complejo. Las manos robóticas se pueden clasificar en dos tipos dependiendo de la cantidad de actuadores: multi-actuados y sub-actuados [11].

Las manos robóticas multi-actuadas permiten controlar la mayoría de uniones en forma independiente y para ello utilizan una cantidad significativa de actuadores. Estos consumen mas energía y son de mayor tamaño. Los brazos sub-actuados poseen la menor cantidad posible de actuadores con el fin de disminuir el consumo y el tamaño de la extremidad [16].

La mano humana, a pesar de ser relativamente pequeña, oculta una enorme complejidad, pues posee 20 grados de libertad; por lo que el diseño y la construcción de una mano robótica requiere de significativos recursos materiales e intelectuales. El costo de una mano robótica para un laboratorio de investigación oscila entre 80 y 120 mil dólares.

La mano robótica de Robonaut, el robot humanoide desarrollado por la NASA para aplicaciones espaciales, es considerada la más similar a una mano humana. La mano del robonaut tiene 14 grados de libertad y está construida en dos secciones: un conjunto manipulador y un conjunto de agarre[17].

### 2.2.3. Cabeza robótica

El diseño de la cabeza robótica es uno de los problemas más desafiantes en la construcción de un robot humanoide. Las cabezas robóticas se pueden clasificar en dos grupos: cabezas diseñadas para la detección activa y cabezas diseñadas para comunicarse socialmente. Las primeras están diseñadas para tener capacidades de detección por lo que requieren actuadores de mayor tamaño y sensores de mayor complejidad, las segundas suelen tener mayor cantidad de actuadores, pero de menor tamaño, para lucir más amigables durante la interacción social[18].

Las cabezas diseñadas para detección activa deben ser capaces de percibir el mundo, esto para poder inspeccionar el ambiente sin necesidad de conocer previamente el mismo. Entre los cinco sentidos del ser humano, el más importante es la vista, el cual permite a los humanos explorar y entender el ambiente que nos rodea, por lo que resulta determinante que el robot humanoide cuente con sensores visuales, entre ellos: cámaras infrarrojas, cámaras estereoscópicas, cámaras de tiempo de vuelo y escáneres de luz estructurada [18].

Las cámaras infrarrojas son dispositivos que operan con radiación térmica, los cuales se clasifican en dos tipos: onda corta y onda larga. Las cámaras infrarrojas de onda corta tienen una longitud de onda de entre dos y cinco micrómetros, las de onda larga tienen una longitud de onda de entre cinco y doce micrómetros. Las cámaras estereoscópicas son básicamente dos cámaras de luz visible, pero ensabladas una al lado de la otra, por lo que captura imágenes un poco diferentes al mismo tiempo. Esto les permite generar información de profundidad [18].

Las cámaras de tiempo de vuelo emiten una luz que se utiliza para escanear un objeto o una escena punto a punto. Estas cámaras suelen ser muy precisas, pero de muy alto costo. Los escáneres de luz estructurada se refiere a sensores como el Kinect, los cuales proyectan un patrón de luz infrarrojo, dicho patrón es analizado por un sensor infrarrojo, lo cual permite obtener información de profundidad de la escena [18].

### 2.2.4. Torso robótico

Las labores asistenciales del robot humanoide requieren que el mismo cuente con un torso que le permita manipular e interactuar con ambos brazos y la mano robótica. El torso también resulta relevante pues suele albergar la mayoría del equipo computacional y de distribución de energía eléctrica.

El diseño de un torso robótico adquiere gran complejidad si la locomoción del robot humanoide es bípeda, pues es necesario estabilizar el torso durante el movimiento de ambas extremidades inferiores. En el caso de robots humanoides provistos de una base móvil, no existe esta complejidad adicional.



Figura 2.3: Torso robótico diseñado para el robot humanoide del ARCOS-LAB [3].

El sistema torso que se diseñó para el robot humanoide fue realizado por Israel Chaves Arbaiza en su proyecto de grado en el Instituto Tecnológico de Costa Rica. El torso

robótico incluye dos brazos robóticos KUKA Lightweight Robot 4 y un sistema de posición lineal con tornillo de potencia [3].

Estos brazos robóticos poseen seis grados de libertad y control de impedancia, lo que aumenta sus capacidades manipulativas y de percepción de los objetos. El sistema de posición lineal implementa un torso móvil que soporta ambos brazos, lo que permite al robot recoger objetos del piso y ponerlos en una superficie[3].

## 2.3. Bases omnidireccionales

Los robots humanoides requieren interactuar con el ser humano, para esto es necesario que se puedan movilizar a través del entorno. La locomoción puede ser de dos tipos: bípeda o puede utilizar una base móvil. La locomoción bípeda es muy compleja y costosa de implementar, por lo que las bases móviles suelen ser utilizadas con mayor frecuencia. Un tipo especial de base móvil son las omnidireccionales, la cual está diseñada para un movimiento plano en dos dimensiones. Este tipo de bases permiten al robot moverse lateralmente, diagonalmente, hacia adelante y hacia atrás, con lo que se tienen tres grados de libertad que pueden ser controlados independientemente.

### 2.3.1. Ruedas tipo Mecanum

El componente más importante de una base móvil son las ruedas. Las ruedas tipo mecanum son ampliamente utilizadas en bases móviles, pues pueden moverse en cualquier dirección. Esta fue desarrollada por el sueco Bengt Ilon en 1973. La rueda posee varios rodillos instalados alrededor de su circunferencia, los cuales tienen su eje de rotación a 45 grados del plano de la rueda. Esta disposición de los rodillos permite movimientos laterales, rotacionales y diagonales [4].

El movimiento hacia adelante y hacia atrás se logra al mover las cuatro ruedas en la misma dirección. La rotación se logra al mover las ruedas de uno de los lados en una dirección y las del otro lado en otra dirección. El movimiento lateral se logra si se mueven las ruedas en diagonal en una dirección y las de la otra diagonal en la dirección opuesta.

## 2.4. Software de integración robótica

El software de integración robótica, también denominado “middleware”, se encarga de conectar los componentes de software a través de una capa que se encuentra entre el sistema operativo y las aplicaciones. En el caso de un robot humanoide este software

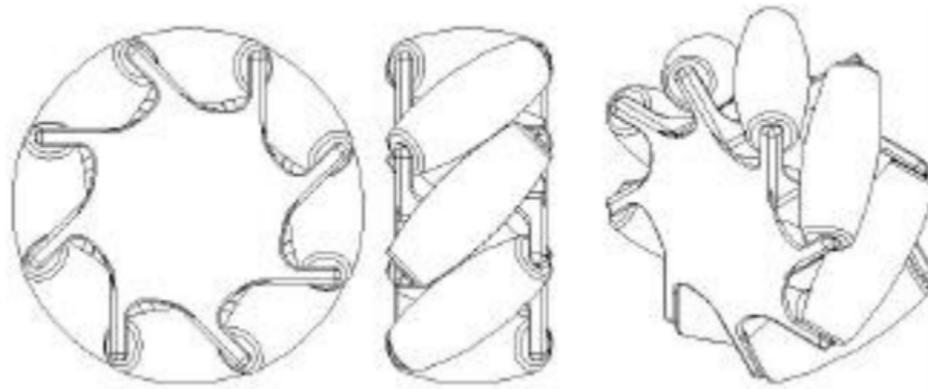


Figura 2.4: Rueda tipo Mecanum [4].

permite integrar el software de cada una de las partes del robot. Existen diferentes tipos de software de integración robótica, entre ellos: Player, ROS, YARP, OROCOS, Urbi, MIRO, LCM y MIRA [19].

### 2.4.1. YARP

Esta plataforma consiste en una colección de programas que permiten comunicar las diferentes partes de un robot humanoide a través de diferentes protocolos de comunicación (TCP, UDP, MPI, XML/RPC, TCPROS, entre otros). YARP no es un sistema operativo, es un software de integración diseñado para robots humanoides[20]. Los componentes de YARP pueden ser divididos en tres partes:

- `LibYARP_OS`: Este componente implementa la interfaz con el sistema operativo para soportar el flujo de datos entre diferentes hilos de ejecución entre diferentes máquinas. Este componente está diseñado para ser neutral en relación al sistema operativo, lo que permite que pueda ser utilizado en Linux, Microsoft Windows, Mac OSX y Solaris.
- `LibYARP_sig`: Clases y métodos orientados al procesamiento de señales, principalmente señales de origen visual y auditivo. Los tipos de datos soportados son relativamente básicos, para permitir la interfaz con librerías externas como OpenCV.
- `LibYARP_dev`: Realiza la interfaz con sistemas comunes utilizados en robótica, como: cámara digitales, tarjetas de control de motores y articulaciones electro-mecánicas.

### 2.4.2. ROS

ROS (Robot Operating System) proporciona librerías y herramientas para ayudar a los desarrolladores de software a crear aplicaciones para ser utilizadas en robots. ROS es un meta-sistema operativo, ya que proporciona los servicios que se esperaría de un sistema operativo, incluyendo abstracción del hardware, control de dispositivos a bajo nivel, procesos de intercambio de mensajes y gestión de paquetes [21].

ROS tiene tres niveles conceptuales: nivel de sistema de archivos, nivel gráfico computacional y nivel comunitario.

- Nivel de sistema de archivo: Este nivel hace referencia a los recursos de ROS que está almacenados en el disco duro, como: paquetes, meta-paquetes, repositorios, entre otros.
- Número gráfico de computación: Es la red de procesos de ROS que están procesando datos juntos. Los conceptos más importantes son: nodos, maestro, mensajes, servicios, entre otros.
- Nivel comunitario: Los recursos de ROS que posibilitan la existencia de comunidades de intercambio de software y conocimiento. Entre estos tenemos: distribuciones, repositorios, listas de correo, entre otros.

### 2.4.3. OROCOS

OROCOS (Open RObot Control Software) es un proyecto de software libre para desarrollar un "framework" modular para robótica [22]. El proyecto soporta las siguientes librerías:

- Real-Time Toolkit
- Kinematics and Dynamics
- Bayesian Filtering
- Orococos Component Library

## 2.5. Control por impedancia

El control por impedancia tiene su origen en los sistemas biológicos. En el caso del ser humano, el cerebro ejecuta movimientos a través de la modificación de la impedancia de las articulaciones. Esto genera que se cambie la rigidez o suavidad de una articulación a través de la activación de los músculos antagonistas. Este comportamiento rígido

se presenta cuando un brazo se encuentra en un espacio abierto, o ante objetos que presentan poca resistencia al desplazamiento. Esta rigidez atenúa las perturbaciones y reduce la amplitud del movimiento[23].



Figura 2.5: Músculos antagonistas del brazo. Cortesía de [5].

En efecto, la funcionalidad y el diseño de las partes del cuerpo humano poseen complejos mecanismos de control. Al tomar un objeto con la mano, la cantidad de fuerza que se aplica sobre el mismo no depende únicamente de la tarea que se vaya a realizar, si no también de la rugosidad, peso y flexibilidad del material. Por tanto, el cerebro humano aplica una estrategia de control de fuerza al agarrar un objeto; pues el sentido del tacto, el sentido de la vista y la experiencia previa del sujeto aportan información que es utilizada para decidir cuanta fuerza se va aplicar.

La estrategia de control de fuerza por impedancia, es un algoritmo que permite a un mecanismo robótico controlar la fuerza a través de ajustes en posición [24]. La fuerza ejercida por el manipulador sobre el entorno depende de su posición y de su impedancia,

esta relación se expresa de la siguiente forma:

$$f = Z \cdot \hat{x} \quad (2.1)$$

donde  $f$ ,  $Z$  y  $\hat{x}$  son: fuerza, impedancia y error de posición respectivamente. La impedancia toma en cuenta las características del manipulador y las características impuestas por el controlador [25]. La ecuación (2.1) se puede expresar en el dominio de Laplace de la siguiente forma:

$$f = Z(s) \cdot \hat{x} \quad (2.2)$$

donde el orden del polinomio  $Z(s)$  es considerado el orden de la impedancia. Esta función puede ser de segundo orden [26], por lo que la fuerza quedaría expresada de la siguiente forma:

$$f = (Is^2 + Ds + K) \cdot \hat{x} \quad (2.3)$$

donde  $I$  es el parámetro de la inercia deseada del manipulador. Las especificaciones de diseño de las matrices  $I$ ,  $D$  y  $K$  se pueden sintonizar siguiendo diferentes métodos [25]. Este es un modelo relativamente simple, pero útil para ilustrar el concepto de control por impedancia.

# Capítulo 3

## Administración del proyecto

Este proyecto, por su naturaleza, es multidisciplinario, pues se emplearon profesionales de diferentes disciplinas, entre ellos: ingenieros mecatrónicos, ingenieros eléctricos, ingenieros mecánicos, artistas plásticos, entre otros. Se consideró que se ocupaba un artista plástico para diseñar aspectos relacionados con la piel y la cara del robot. Pese a que la apariencia del robot no perjudica la funcionalidad ni la operación del robot, se considera que un robot que realiza labores asistenciales debe tener una apariencia amigable.

### 3.1. Organización

Un proyecto de esta magnitud requiere de una estructura organizacional importante. Una sola persona no podía asignar todas las tareas, si no que se requerían coordinaciones para cada parte relevante del robot humanoide. Debido a esto el proyecto se dividió en cuatro partes y a cada parte se la asignó un coordinador, los cuales se listan a continuación:

- Cabeza: Jose Carlos Herrera
- Torso: Israel Chávez
- Base Móvil: Federico Gómez
- Sistema de manipulación: Elvis Aguilar

La cabeza incluía el armazón, la cara emocional y el cuello. El cuello es una estructura que requiere un esfuerzo significativo, ya que además de brindar soporte estructural, debía de proporcionar dos grados de libertad para que el robot pudiera mover la cabeza horizontal y verticalmente.

Cada coordinación disponía de varios miembros en sus equipos. A su vez cada miembro podía disponer de uno o más asistentes que los apoyan en sus tareas. Estos roles eran dinámicos, por lo que un coordinador, si era necesario, podía ser asistente de algún miembro para cumplir alguna tarea específica.

La coordinación de la cabeza se dividió en tres subproyectos: cráneo, cara y cuello. Los tres subproyectos eran coordinados por Jose Carlos Herrera. Entre estos proyectos existían dependencias importantes, por esa razón se decidió designar un solo coordinador para los tres. Por ejemplo, el cuello debía diseñarse conociendo el peso final de la cabeza. Otro dependencia es la existente entre la cara y la cabeza, pues los elementos de la cara del robot debían diseñarse conociendo las dimensiones finales de la estructura de la cabeza.

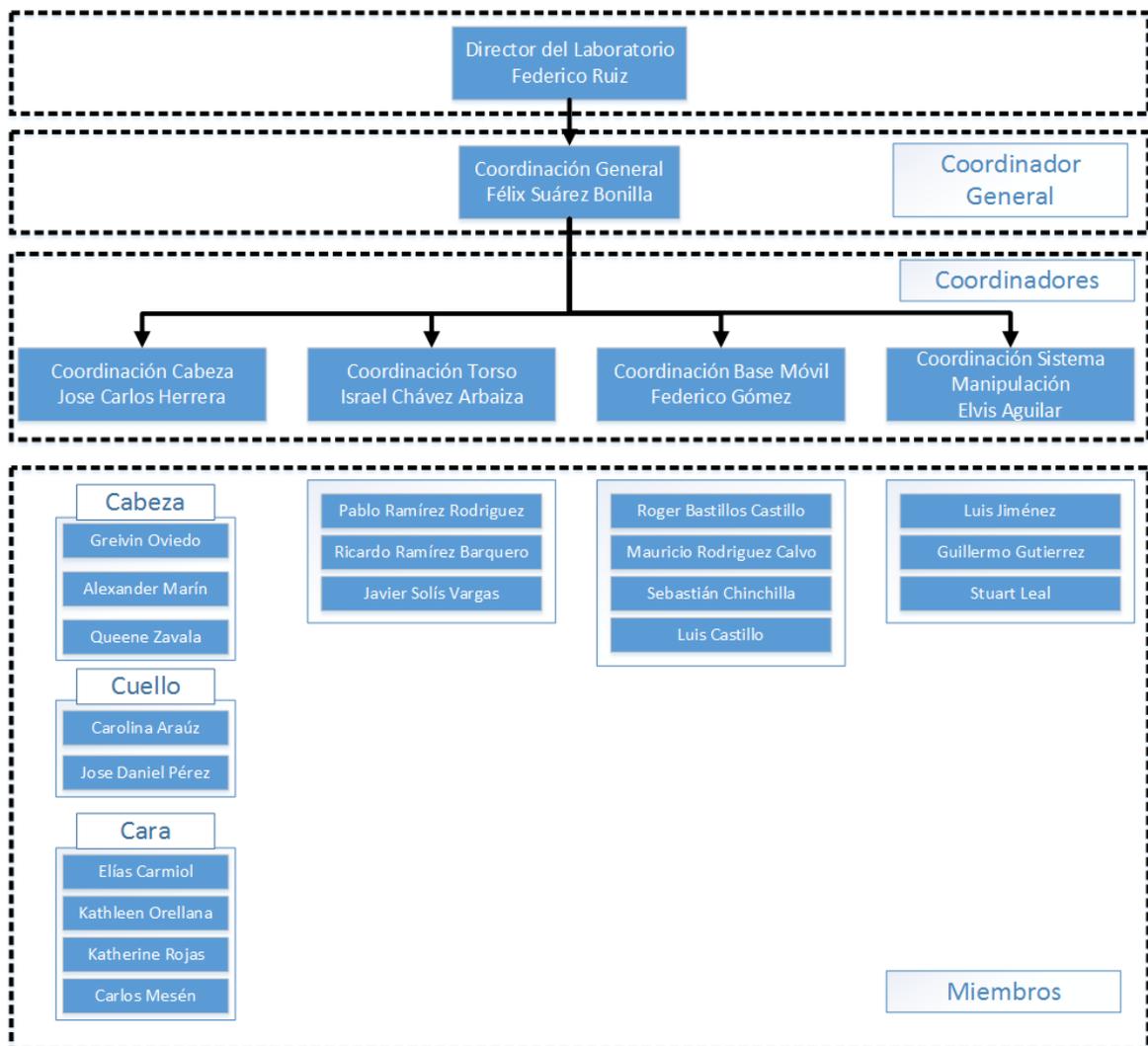


Figura 3.1: Organigrama del proyecto.

El organigrama se muestra en la figura 3.1. Nótese que la cabeza estaba dividida en subproyectos: cabeza (estructura y sensores), cuello (unidad pan-tilt) y cara emocional. Los miembros del proyecto no estaban dedicados a tiempo completo a este proyecto, pues la mayoría tenían deberes académicos y laborales. Pese a estas limitaciones, muchos subproyectos y componentes se pudieron finalizar con éxito.

Cada coordinación tenía reuniones mensuales para ver los avances de cada parte del robot. Cada dos o tres meses también habían reuniones generales. En el momento crítico de algunos subproyectos, con el fin de finalizar algunos entregables, se llegó a tener reuniones semanales. La coordinación general contabiliza aproximadamente **25 reuniones en un período de dos años**.

## 3.2. Costo del proyecto

La disponibilidad de recursos para adquirir los materiales, y el tiempo necesario para realizar la gestiones administrativas pertinentes, fueron los principales retos que enfrentó el proyecto. Debido a esto, en muchas ocasiones, se recurrió a recursos propios del coordinador del laboratorio o de los mismos estudiantes.

Los brazos robóticos y la mano robótica fueron adquiridos por la Universidad de Costa Rica. La mano robótica tuvo un costo de \$84 000 y ambos brazos robóticos costaron \$156 000. Este gasto no toma en consideración trámites administrativos y también excluye el recurso humano para la puesta en marcha de los mismos en el laboratorio. Las horas ingeniería serán tomadas en cuenta para el cálculo final del costo.

La integración del sistema de manipulación tuvo un costo total de 180 mil colones, costo que excluye el recurso humano [9]. El costo total de la construcción y diseño de la cara emocional fue de 250 mil colones [6]. En el caso de la base móvil el costo total fue 1.2 millones de colones [10]. El costo de los elementos para construir el cuello fue 120 mil colones, lo cual incluye los sensores, los perfiles industriales, entre otros gastos. Por último, el cráneo tuvo un costo de 900 mil colones. Nótese que estos gastos excluyen las horas de ingeniería.

Cuadro 3.1: Costos del proyecto, sin incluir: brazos, mano y horas de ingeniería

Componente	Costo
Cara emocional	250 000
Base móvil	1200 000
Cuello	120 000
Cráneo	900 000
Total	2 470 000

El costo del robot, incluyendo los elementos expuestos arriba es, excluyendo el recurso humano, a un tipo de cambio de dólar de 580 colones, es de 139.2 millones de colones. Las horas ingeniero dedicadas al proyecto, en su totalidad, se estiman en 2200, a un costo aproximado de 25 mil colones cada una, da como resultado un costo de 55 millones. Al sumar todos los rubros se tiene un costo total de **196.67 millones de colones**, incluyendo materiales y recurso humano.

Cuadro 3.2: Costo del proyecto incluyendo brazos, mano e ingeniería

Componente	Costo
Mano	48 720 000
Brazos	90 480 000
Recurso humano	55 000 000
Otros (Cabeza y Base)	2 470 000
<b>Total</b>	<b>196 670 000</b>

### 3.3. Recurso humano

La cantidad de personas involucradas en tareas específicas, relacionadas con el robot humanoide, entre el 2015 y el 2017 fue de 23. Sin embargo, la mayoría de integrantes del laboratorio han contribuido de una u otra manera a este proyecto: brindando soporte, realizando tareas administrativas o haciendo trabajos pequeños como soldadura y cableado. Por tanto, la cantidad de personas que trabajó directa o indirectamente en este proyecto se estima en 45.

Desde el punto de vista de gestión del capital humano, lo más importante fue mantener a los miembros y coordinadores motivados, pues muchos de estos estudiantes tienen limitaciones económicas que en ocasiones les impiden estar dedicados exclusivamente a las labores asignadas. En este sentido, la publicidad que tenía el proyecto en los medios de comunicación, resultó ser muy efectiva para mantener a todo el equipo motivado e involucrado en el proyecto.

### 3.4. Financiamiento y patrocinios

El financiamiento de la actividad científica es muy importante para su buen desarrollo y para que ésta, a su vez, contribuya al desarrollo del país. En Costa Rica, el sector académico, y en especial las universidades públicas, son las que más invierten en investigación. La Universidad de Costa Rica es la más grande y antigua de las universidades

estatales del país y destaca como la institución que realiza el porcentaje más alto de la investigación en el ámbito nacional en todas las áreas del conocimiento [27].

En este proyecto se hizo un esfuerzo importante por buscar patrocinios, financiamientos y apoyos de empresas privadas e instituciones estatales. En este sentido, se buscaba un modelo de financiamiento similar al de países desarrollados, donde las empresas colaboran con las universidades para desarrollar tecnología. El laboratorio ARCOS-LAB hizo una actividad importante de promoción para buscar recursos en la empresa privada. Como resultado, dos empresas privadas del sector tecnología, a las cuales denominaremos A y B, mostraron interés en el proyecto.

El ARCOS-LAB elaboró un documento de patrocinio para búsqueda de fondos para la adquisición de equipo, herramientas y materiales. En particular para aquellas compras que requieran ejecución y disposición inmediata, es decir, compras que se necesiten en el momento, como necesidades no esperadas o contempladas que deben ser compradas en un término menor a un año y medio, el cual es el tiempo que tome un proceso de compra en la Universidad de Costa Rica.

El laboratorio, a cambio de los recursos, ofreció una plataforma de publicidad para marcas o empresas interesadas en ser protagonistas del desarrollo de este proyecto. Este consistía en:

- Al menos tres presentaciones anuales con demostraciones del robot humanoide y demás proyectos del ARCOS-LAB.
- Pautas publicitarias en el cuerpo del robot humanoide, los cuales tendrán un valor dependiendo de la visibilidad del mismo.
- El ARCOS-Lab publicaría la lista de patrocinadores en la página web del laboratorio.

El robot humanoide recibió cierta atención, por parte de dos empresas, las cuales mostraron algún interés inicial en colaborar con equipo o materiales para el robot humanoide. La empresa A, la cual es una empresa transnacional muy importante en el sector de tecnología, mostró un interés, por lo que se proporcionó: el documento de patrocinio, una visita al laboratorio o una visita a las instalaciones de la empresa, esto con el fin de aclarar cualquier duda que tuvieran con el proyecto. Eventualmente, pese a un interés inicial, la empresa no confirmó ninguna ayuda o colaboración, a pesar de cierta insistencia por parte del administrador del proyecto y coordinador del laboratorio.

La empresa B confirmó su interés en colaborar con el laboratorio durante una visita al mismo. La empresa ofreció materiales y equipo, por lo que se hizo una lista de las necesidades del laboratorio. En total se hicieron dos reuniones con los coordinadores, asistentes y miembros del laboratorio, como resultado se obtuvo una lista, la cual fue enviada a la empresa. Sin embargo, pese a la insistencia del coordinador, no se

obtuvo ningún resultado. A pesar de que no se pudo obtener colaboración, patrocinio o ayuda del sector privado, es importante destacar que muchas partes del robot fueron eventualmente financiadas por los miembros del laboratorio o por la Universidad de Costa Rica.

Es importante destacar el trabajo realizado para buscar financiamiento de la empresa privada en este documento, pues forma parte de las actividades realizadas durante este proyecto de grado y puede servir como referencia para cualquier investigación futura respecto al financiamiento de la investigación científica a nivel nacional. En concreto, el proyecto tuvo dos fuentes de financiamiento para compra de materiales y equipo: 1) recursos propios de los estudiantes y del director del ARCOS-Lab; 2) fondos de la Universidad de Costa Rica. El aporte estimado se muestra en la tabla, la cual excluye horas de ingeniería.

Cuadro 3.3: Fuentes de financiamiento del proyecto

<b>Aporte</b>	<b>Monto</b>
Universidad de Costa Rica	139 200 000
Lic. Federico Gómez	400 000
Ing. Félix Suárez Bonilla	1 300 000
Dr. rer. nat. Federico Ruiz	770 000
<b>Total</b>	<b>141 670 000</b>

El aporte de la Universidad de Costa Rica fue para la compra de dos brazos robóticos y la mano. El aporte de los miembros del laboratorio fue principalmente, para necesidades especiales inmediatas, donde se requería la compra de materiales y equipo. La

### 3.5. Cronograma

La figura 3.2 muestra un cronograma resumen de todos los proyectos satélites. Nótese que se muestran varias iteraciones de un mismo proyecto. La base móvil solo ha tenido una iteración, pero ese no es el caso de la cara emocional, la cual va por su segunda iteración. Este proyecto está limitado a las primeras dos versiones del cuello y la primera versión de la cara emocional.

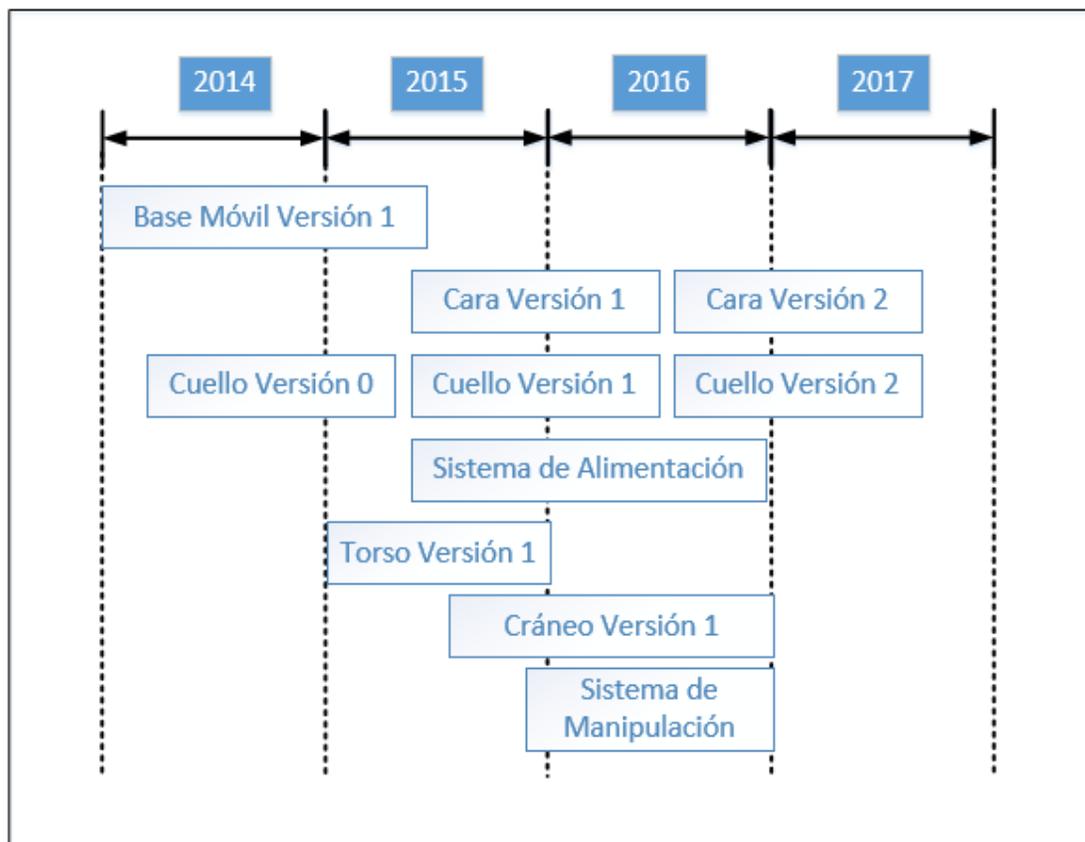


Figura 3.2: Cronograma del proyecto.

# Capítulo 4

## Cabeza del robot humanoide

El hardware de la cabeza del robot humanoide cuenta con tres subsistemas principales: cara emocional, cuello y cráneo. En las siguientes secciones se analizan cada uno de ellos.

### 4.1. Cráneo

La cabeza del robot humanoide deber ser capaz de percibir su entorno. La tarea que se toma como ejemplo es la cocción de un huevo. En este caso el robot necesita: poder manipular los utensilios, percibir la temperatura del huevo y ubicar los ingredientes en la cocina. El diseño debe estar alineado a estas tareas. La percepción de la temperatura es una tarea que un cocinero realiza de forma constante, lo que le permite determinar: si deben bajar o subir la temperatura, si ha quemado los alimentos o si la estufa no está funcionando correctamente. Las imágenes también ayudan a determinar el estado de cocción de las comidas, la ubicación de los utensilios de cocina y la ubicación misma del robot en el área de trabajo. También, otros sensores adicionales pueden ayudar a realizar estas mismas tareas con mayor precisión.

#### 4.1.1. Introducción

La cabeza de un robot humanoide usualmente cuenta con sensores que le permiten conocer y entender el mundo que le rodea. Existen múltiples enfoques para realizar tareas de sentido en un robot humanoide. Algunos de estos enfoques se explican a continuación [28].

- **Visión basada en modelos:** Un enfoque común es el reconocimiento de objetos en tiempo real usando modelos de los objetos a ser manipulados, un ejemplo de

ello es el sistema “Versatile Volumetric Vision” el cual es un sistema basado en bordes desarrollado por Tomita con el fin de encontrar y tomar objetos durante tareas de manipulación.

- **Visión basada en características:** Otro enfoque es “visión basada en características”, la cual consiste en decodificar la tareas, basado en características relevantes del objeto. Este puede ser el caso de herramientas con punta, como lo puede ser un desatornillador, la característica es detectada, lo que permite al robot encontrar y tomar el objeto.
- **Fuerza, torque y sensado táctil:** La idea es obtener información del mundo que lo rodea al medir fuerzas y torques. Un ejemplo es Justin, el cual a partir de sensado de torques efectúa control por impedancia. Otro ejemplo es Cog el cual realiza una variedad importante de tareas como martillar, cortar y girar una manivela al medir la fuerza en la articulaciones.

El robot humanoide cuenta con tres conjuntos de sensores: dos cámaras de alta definición, una cámara térmica y un sensor Kinect. Las cámaras de alta definición se enfocan en objetos pequeños que desean ser analizados y el sensor kinect se enfocará en navegación.

#### 4.1.2. Sensores

La cabeza del robot humanoide dispone de tres sensores: un Kinect 2, dos cámaras ILCE-QX1 y una cámara térmica “Seek Thermal Compact”. El kinect proporcionará información de navegación y reconocimiento de objetos, las cámaras HD serán usadas en inspecciones visuales más detalladas y la cámara térmica proporcionará información de la temperatura del entorno.

El Kinect 2, mostrado en la figura 4.1, es un sensor que integra una cámara RGB, un sensor de profundidad, un micrófono y un procesador. Este último elemento proporciona captura de movimiento en 3D, reconocimiento facial y capacidades de reconocimiento de voz. El micrófono podría ser utilizado en futuros proyectos para que el robot pueda reconocer instrucciones dadas por un operador humano.

La Cámara Sony ILCE-QX1, mostrada en la figura 4.2, es una cámara profesional de 20.1 megapíxeles efectivos, montura tipo E y sensor CMOS. La cámara sin el lente tiene un costo aproximado de 400 dólares. El costo de los lentes varía entre 300 y 1500 dólares. Debido a limitaciones presupuestarias, únicamente se adquirió una de las cámaras y un lente con un costo total de \$550. La otra cámara será adquirida por la Universidad de Costa Rica en subsecuentes iteraciones de este proyecto.

La cámara térmica (véase figura 4.3) proporciona información de temperatura del entorno, esto resulta particularmente importante en una cocina, que es uno de los escena-



Figura 4.1: Kinect para Xbox 360.



Figura 4.2: Sony ILCE-QX1.

rios para los que está diseñado el robot. Los procesos de cocción requieren mediciones de temperatura, tal es el caso del ejemplo de referencia que es la cocción de un huevo. La medición de temperatura es uno de los sentidos con los que cuenta el ser humano para entender su entorno, de ahí la importancia que un robot también pueda disponer de un sensor de este tipo.



Figura 4.3: Cámara térmica “Seek Thermal”.

### 4.1.3. Construcción

El proceso de diseño es iterativo, pues posterior a una etapa de diseño inicial, se construye un prototipo, el cual puede ser sometido a pruebas y análisis para dar con posibles mejoras. Este enfoque se mantiene, no solo para la cabeza, si no para todas las partes del robot humanoide. Esto permite delimitar cada parte del robot, proponer mejoras y agregar nuevas funcionalidades.

El primer prototipo del marco estructural de la cabeza se basó en marcos de aluminio utilizados en estantería y ventanales. Este primer prototipo no reunía las condiciones de robustez mecánica para una cabeza robótica, pero fue la primera aproximación a lo que se quería conseguir. Esta primera versión permitió analizar las futuras necesidades estructurales y eléctricas de la cabeza.

El segundo prototipo se construyó utilizando perfiles industriales de aluminio tipo T, similar a los perfiles utilizados en el torso y la base móvil omnidireccional. Estos perfiles presentan una gran versatilidad para crear la estructura y acoplar elementos a los mismos. El perfil presenta las siguientes características:

- Dimensiones: 20 x 20 x 1000 mm.
- Material: Aluminio 6063-T6

- Apertura de la ranura: 6 mm.
- Diámetro longitudinal central: 5 mm.

Los elementos fueron adquiridos al proveedor “Kyprianos Aluminum T-slot Framing” el cual vende perfiles de aluminio nuevos y elementos de interconexión. La cabeza requiere tres tipos de componentes: perfiles, uniones de tres vías y soportes rectangulares. El costo total de los materiales es \$ 171.90, a lo cual hay que agregar gastos de envío de Estados Unidos a Costa Rica e impuestos. El costo total aproximado de los perfiles fue de aproximadamente \$280. La estructura finalizada se muestra en la figura 4.4



Figura 4.4: Estructura de la cabeza (Vista frontal).

Es relevante hacer notar que el diseño estructural de la cabeza se realizó a partir de cálculos manuales de esfuerzos y sin ningún software de diseño gráfico. Pese a esto no se tuvieron problemas al cortar, atornillar y armar la estructura. Posteriormente se incorpora el diseño en un software CAD para poder integrar la cabeza con el resto del cuerpo.

## 4.2. Cara emocional

La cara emocional posee un marco estructural el cual se diseñó y construyó debido a que al momento de diseñar la cara, el diseño de la cabeza estaba también en proceso de diseño. El diseño de la cabeza se hizo en paralelo al diseño de la cara, esto porque había interdependencias entre ambos proyectos. El diseño se realizó entre el mes de setiembre de 2015 hasta el mes de enero de 2016.

### 4.2.1. Competencias emocionales

La selección de emociones para la cara se basa en los escenarios que se definieron, los cuales son: asistente de cocina, mesero y ensamblador. Estos escenarios dieron como resultado un conjunto de emociones para cada escenario dado, los cuales se muestran en el cuadro 4.1, la cual resume la investigación realizada por Herrera [6].

Cuadro 4.1: Resumen de escenarios y sus respectivas emociones asociadas [6].

Escenarios	Emociones
Mesero	Feliz, confortable, calmado y sorpresa
Ensamblador	Feliz, enérgico y calmado.
Asistente de cocina	Feliz, calmado y emocionado.

Las emociones en la tabla 1 están repetidas, por lo que el conjunto de siete emociones que se diseñará es: felicidad, confortable, calmado, sorpresa, enérgico, tranquilidad y emocionado. Nótese que dentro de este conjunto de emociones no se contemplan emociones negativas como tristeza y disgusto, pues las mismas no fueron consideradas funcionales para ningún escenario.

### 4.2.2. Establecimiento de requerimientos

El proceso de diseño comenzó con el establecimiento de requerimientos, para lo cual se realizaron una serie de reuniones semanales desde el mes de setiembre de 2015 hasta el mes de enero de 2016. En estas reuniones se compartía información con las personas encargadas de la cabeza, el cuello y el torso del robot humanoide. Lo más importante a tomar en cuenta son las especificaciones de movimiento y peso del cuello del robot.

El cuello del robot humanoide consiste en una unidad pan-tilt de dos grados de libertad, por lo que el soporte superior del cuello tiene que unirse con la cabeza del robot humanoide. El peso máximo que pueden soportar los motores del cuello son 5 Kg, que corresponde al peso máximo que puede levantar los motores que se utilizarán en el cuello [6].

El diseño es un proceso iterativo de mejora continua, en este sentido, el peso máximo que podía soportar el cuello dependerá del diseño e implementación final del cuello – que al momento de diseñar la cara no había finalizado-, sin embargo, se estableció como peso máximo 5 Kg, siendo este un requerimiento tanto para la cara, como para el cuello.

El equipo de trabajo definió en conjunto las dimensiones que debería poseer la cabeza, de acuerdo a los sensores, cámaras y aditamentos que debería poseer la misma – esto se detalla más en capítulos posteriores –. Las dimensiones establecidas para la cabeza son una altura de 18 cm, una profundidad de 15 cm y un ancho de 27 cm. Por tanto, el diseño debía sujetarse a esta especificación.

### 4.2.3. Diseño de la cara emocional

#### Marco estructural

La cara emocional se diseñó en forma paralela a la cabeza y el cuello del robot humanoide, sin embargo, su construcción comenzó antes, por lo que fue necesario diseñar y construir un marco estructural para sostener los diferentes elementos de la cara emocional. Este marco provisional se realizó en aluminio, esto debido a su costo y propiedades mecánicas [6].

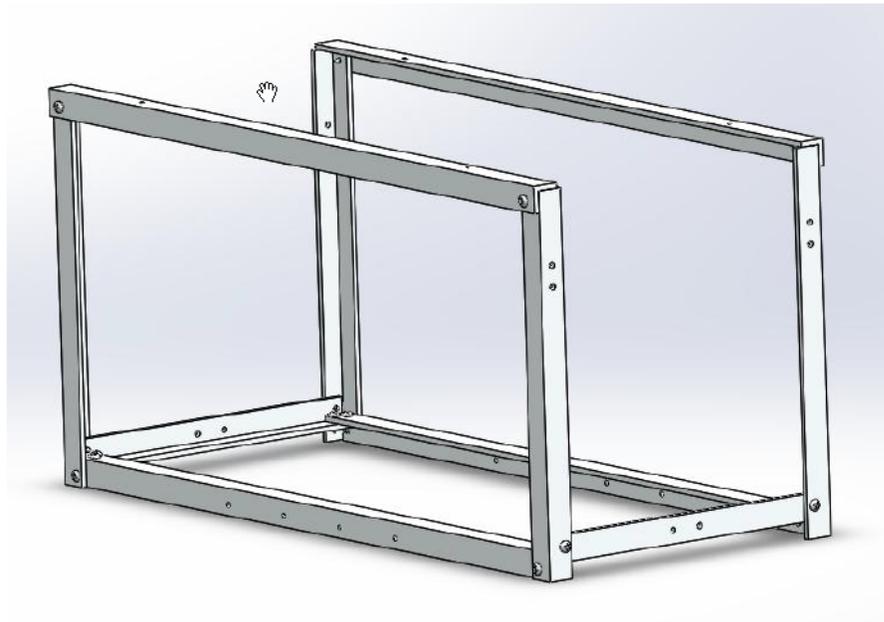


Figura 4.5: Marco estructural para la cara emocional [6].

Nótese en la figura 4.5 que en la parte superior del marco solo se unieron los perfiles de manera horizontal. Esto debido a que los soportes para los servomotores de las partes móviles de la cabeza ayudan a crear solidez a la parte superior del marco. Los soportes y la parte superior del marco estructural se muestra en la figura 4.6.

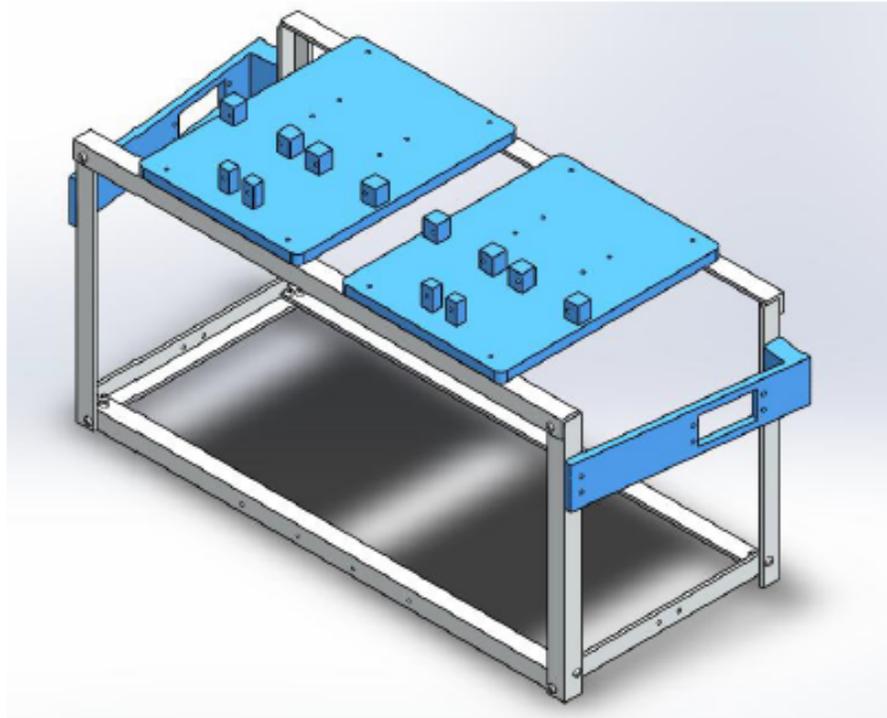


Figura 4.6: Parte superior del marco estructural con soportes [6].

### Antenas

En el diseño de cada antena se utilizó un servomotor HITEC HS-311 para cada una y un brazo metálico con agujeros roscados para unir la antena con el servomotor. Este diseño se inspiró en el robot principal de la película Chappie [6]. El diseño de la antena y el servomotor se muestran en detalle en la figura 4.7.

### Cejas

El diseño de las cejas fue hecho para que cada una posea dos movimientos, uno vertical y otro rotacional, este se puede realizar sobre cualquiera de los ejes que tiene la ceja.

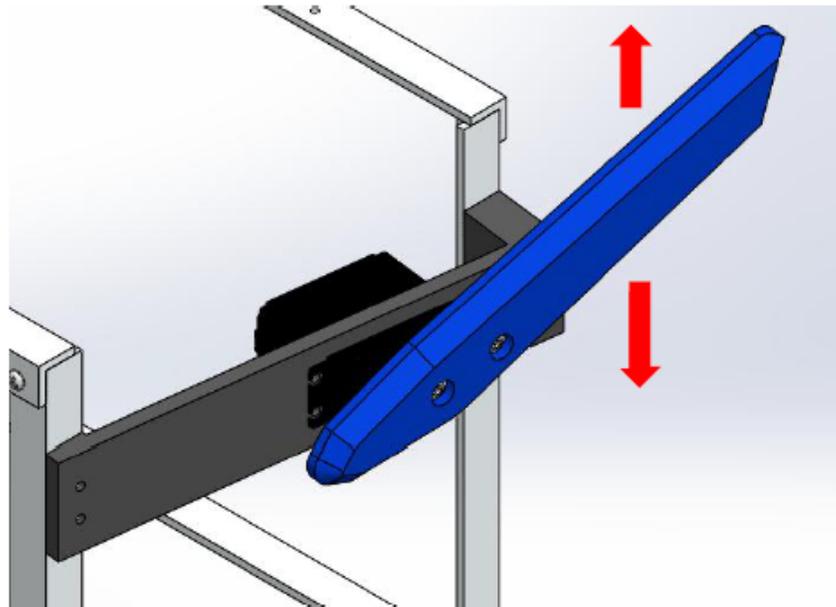


Figura 4.7: Oreja derecha de la cara emocional del robot humanoide [6].

Este movimiento se implementa utilizando dos servomotores HITEC HS 81 y dos bielas en cada ceja. Esto se observa en la figura 4.8.

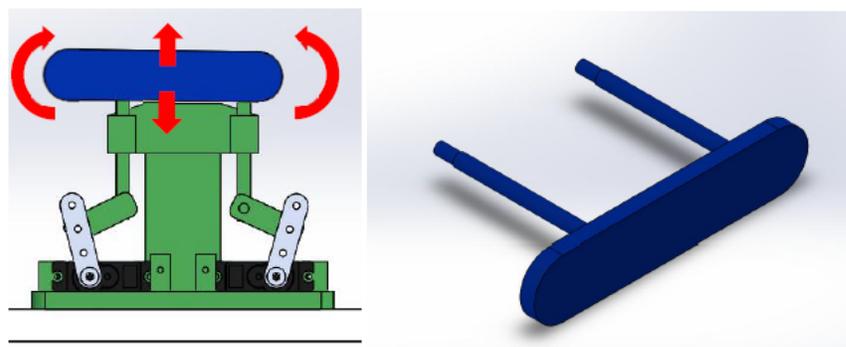


Figura 4.8: Movimientos y ejes de la ceja [6].

### Mandíbula

La mandíbula del robot simular el movimiento de una boca. Esta se divide en dos partes, una fija que se sujeta a la estructura principal y otra móvil que va unida a los dos servomotores HITEC HS-311. La vista frontal de la mandíbula se muestra en la figura 4.9.

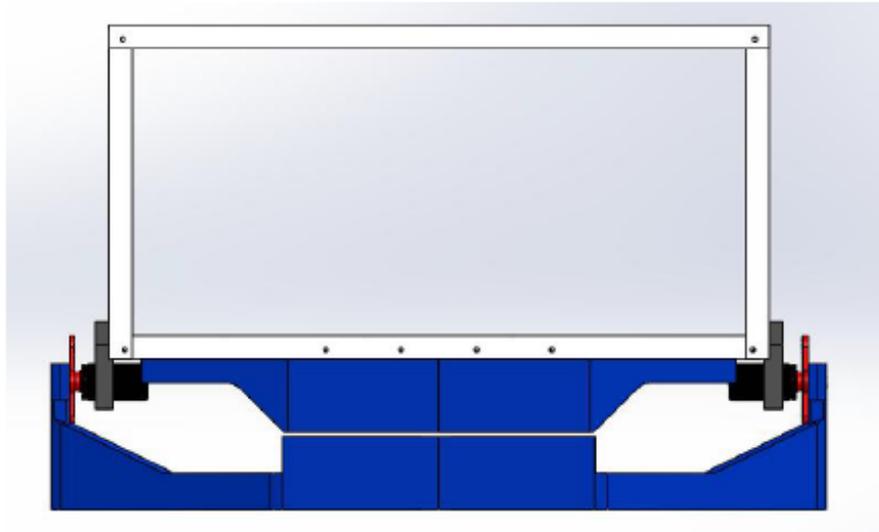


Figura 4.9: Mandíbula de la cara emocional del robot humanoide [6].

## Ojos

Los dos ojos se simulan utilizando dos matrices de leds Adafruit Neopixel Neomatrix 8x8. Este dispositivo consiste en un arreglo de 64 leds dispuestos en ocho filas y ocho columnas, donde el color de cada led es RGB [7]. La característica fundamental de esta matrix de leds es que solo un pin es requerido para controlar todos los LEDs. El dispositivo en cuestión se muestra en la figura 4.10.

Las matrices de LEDs están colocadas debajo de las cejas, ocultando parcialmente los servomotores y bielas. Esto permite que el movimiento de estas partes no genere una distracción cuando el robot interactúe con personas.

### 4.2.4. Construcción

La figura 4.11 muestra el diseño final de la cara emocional. Las partes móviles y fijas se imprimieron en 3D con material PLA y el marco estructural se construyó con perfiles de aluminio. La mayoría impresiones de piezas en 3D se hicieron con un proveedor externo a un costo de \$88.14, esto para lograr una mejor calidad.

La figura 4.12 muestra el resultado final de la etapa de construcción de la cara emocional. La capacidad volumétrica de la impresora 3D también se tomó en consideración, ya que las piezas deben tener dimensiones tales que puedan ser manufacturadas. Las piezas no pueden ser excesivamente grandes, porque si no, la impresora no puede imprimirla. Por esa razón, la mandíbula inferior y superior se dividió en dos partes.



Figura 4.10: Matriz de leds Adafruit Neopixel Neomatrix 8x8 [7].

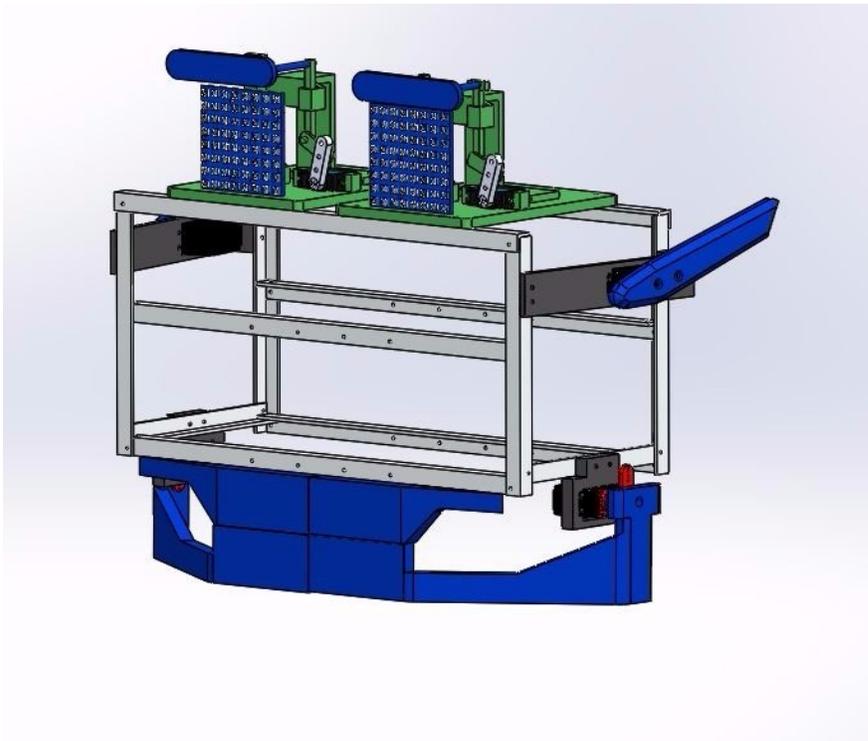


Figura 4.11: Diseño final de la cara emocional [6].

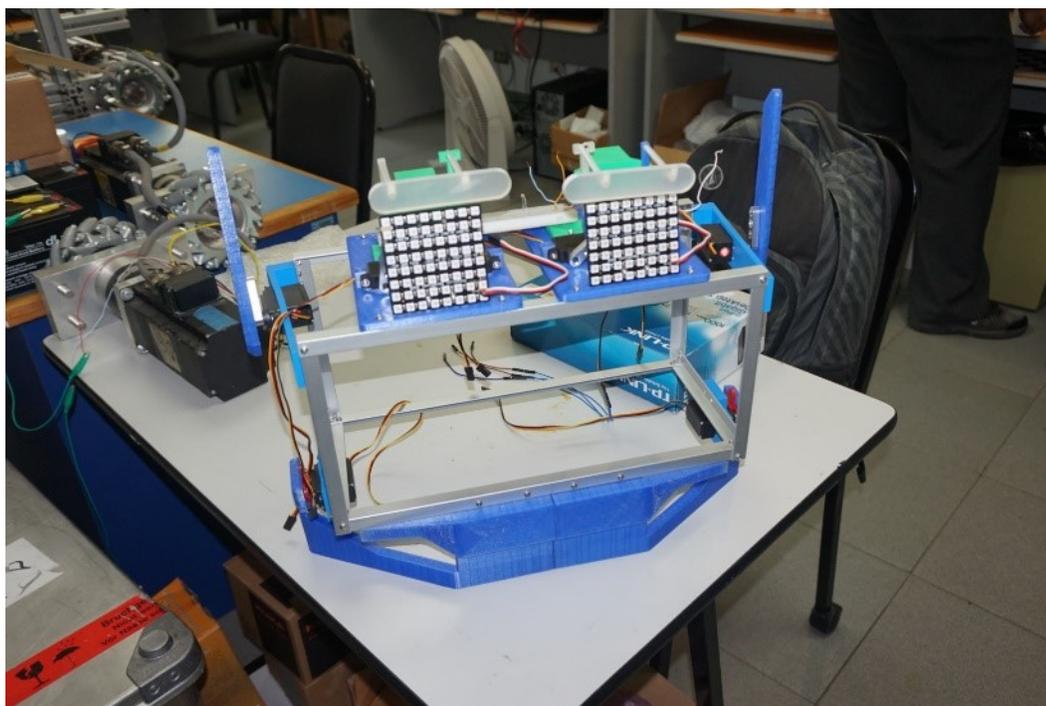


Figura 4.12: Construcción final de la cara emocional del robot humanoide.

## 4.3. Cuello

El objetivo del cuello es brindar soporte y movimiento a la cabeza del robot humanoide; además es un elemento interconexión fundamental entre la cabeza y el torso del robot. El cuello humano cuenta con tres grados de libertad, sin embargo se consideró que dos grados de libertad eran suficientes para que el robot humanoide del ARCOS-LAB pudiera analizar y percibir su entorno.

### 4.3.1. Diseño

El cuello es una unidad pan-tilt que debe permitir a la cabeza realizar movimientos horizontales y verticales, de esta forma el robot puede posicionar sus sensores correctamente sobre el objeto a analizar o estudiar. El cuello se compone de dos elementos: articulación Pan y articulación Tilt. El primero corresponde al giro horizontal y el segundo al movimiento vertical.

El diseño de la articulación Pan se realizó para que pudiera realizar movimientos precisos y estables. También se consideró que la cabeza debería estar siempre soportada en caso de algún fallo. El modelo de la articulación Pan se muestra en la figura 4.13. Este diseño consiste en dos discos capaces de rotar uno sobre el otro, sin perder rigidez. La parte superior de la articulación Pan es la base sobre la cual se soporta la articulación Tilt.

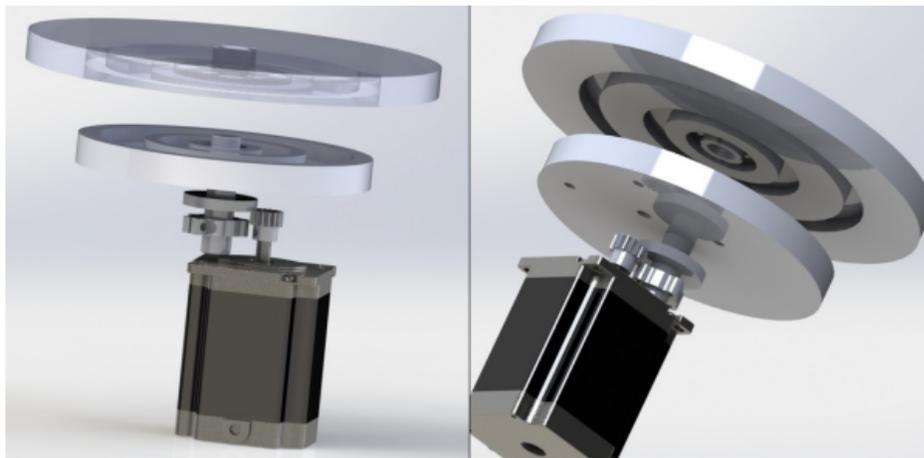


Figura 4.13: Articulación pan del cuello [8].

La articulación Tilt obedece los mismos criterios que rigen el diseño de la articulación Pan, pero a diferencia de este presenta ejes cargados transversalmente y transmisión de momentos de fuerza a través de piezas de sección transversal menor. El diseño de esta articulación se muestra en la figura 4.14. Por último, la figura 4.15 muestra el diseño

final del cuello del robot humanoide obtenido del acople entre las articulación Pan y la articulación Tilt.

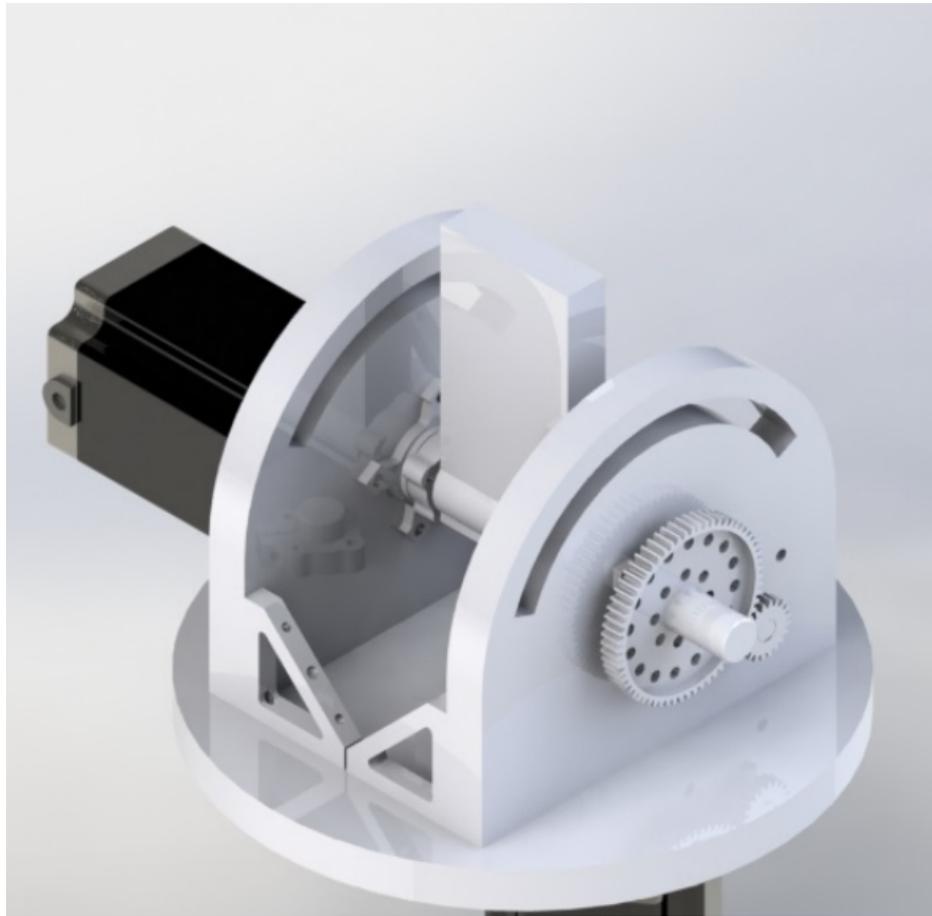


Figura 4.14: Articulación tilt del cuello [8].

La construcción del cuello se deja como trabajo futuro, sin embargo, primero es necesario construir algunos prototipos y someter a prueba el diseño realizado en esta primera iteración. En el año 2017 se asignaron varios estudiantes para evaluar el diseño eléctrico y mecánico, pero el abordaje de estos diseños y pruebas está fuera de este proyecto de grado.

#### 4.4. Integración

En esta sección se aborda la integración entre el cuello, la cara y el cráneo; esto incluye las conexiones físicas y los elementos de hardware necesarios para ello. Lo referente a

potencia y alimentación son cubiertos en un capítulo separado. La figura 4.16 muestra en líneas punteadas la parte del robot que se cubrirán a continuación.

#### 4.4.1. Integración de datos

La figura 4.17 muestra la interconexión de todos los elementos. El control de los ojos se realiza con un Arduino UNO y el control de los servos con un *driver* conectado a una Raspberry PI. El Arduino se conecta al Cluster del robot humanoide a través de una conexión USB y el Raspberry PI se conecta a través de un puerto de red. El Kinect, la cámara térmica y las cámara HD utilizan un conexión USB. Los dos motores del cuello del robot se conectan, a través de un *driver*, a una Raspberry PI. Las conexiones físicas USB y Ethernet van hacia el torso del robot, tal como se observa en esta figura.

El Arduino UNO se decidió utilizar para controlar los ojos, principalmente por tres razones: las librerías están desarrolladas en esta plataforma, se disponía del hardware en cuestión y el equipo encargado de la programación de los ojos tenía experiencia previa programando estos dispositivos. La delimitación de esta tarea utilizando un hardware externo permitió que se pudiera trabajar en los ojos en forma paralela a las otras tareas relacionadas con la cara emocional. Adicionalmente, la utilización de Arduino permitió que estudiantes con poca experiencia en programación pudieran utilizar la matriz para crear unos ojos sencillos (Véase figura 4.18).

El control de los servomotores de la cara emocional se realizó con una Raspberry PI, la cual se utilizó por las siguientes razones: los miembros del equipo disponían de amplia experiencia en esta plataforma, existe una amplia documentación disponible, es una tecnología de muy bajo costo, el sistema operativo oficial de la plataforma es software libre, el equipo de programación tenía experiencia en la utilización de esta tecnología y se disponía de una tarjeta para poder utilizarla en el proyecto.

El programa implementado en phyton permitía mover cada servomotor de la cara en forma independiente. La comunicación entre el Raspberry PI y los servomotores no era directa, si no que se utilizó la tarjeta PCA9685 de Adafruit como elemento de interconexión [29]. La utilización de esta tarjeta tenía los siguientes objetivos: permitir una eventual expansión futura, aislar eléctricamente los actuadores de las señales generadas por el Raspberry PI y hacer más sencilla la implementación del software. (Véase figura 4.19).

#### 4.4.2. Integración mecánica

El diseño del cuello, el cráneo y la cara emocional se realizó en paralelo. Esto representó un reto debido a las dependencias existentes entre estos tres proyectos. La cara emocional se construyó y diseñó en un marco estructural temporal, que pudiera servir

de soporte mientras se construía el cráneo. El cráneo se completó después de finalizada la primera iteración de la cara emocional. Sin embargo, el trabajo de comunicación y coordinación permitió que el acople mecánico entre el cráneo y la cara no representara un problema mayor.

En este proyecto se estableció que el cuello estaría soportado por una placa de aluminio, conectada a la parte superior del torso del robot. La placa de aluminio sería de media pulgada de espesor. El diseño del cuello toma esto en consideración, pues el cuello se asienta sobre placas de aluminio sobre las que puede girar. El acople entre el cuello y el cráneo es a través de la lámina rectangular de aluminio de la articulación Tilt, la cual se acopla a los perfiles tipo T en el centro del cráneo.

### 4.4.3. Integración software

Cada sensor de la cabeza requiere de un programa controlador que permita su funcionamiento y que eventualmente permita crear el nodo ROS respectivo para conectarlo a la arquitectura robótica que se analizará en capítulos subsecuentes. Los principales componentes con los que se desarrolla este estilo en la arquitectura son [21]:

- Nodo principal de coordinación.
- Nodos subalternos.
- Servidor de parámetros.
- Publicación y subscripción.
- Multiplexación de la información.

Como parte de este sub-proyecto, se elaboraron dos nodos ROS, uno para la cámara HD y otro para la cámara térmica. Estas tareas fueron realizadas por Alexander Marín. Para utilizar el nodo de la cámara HD se deben seguir los pasos indicados en la dirección: [https://github.com/arcoslab/ros\\_sony\\_cam](https://github.com/arcoslab/ros_sony_cam). Para utilizar el nodo ROS de la cámara térmica se deben seguir los pasos indicados en la dirección: [https://github.com/arcoslab/ros\\_seek\\_cam](https://github.com/arcoslab/ros_seek_cam).

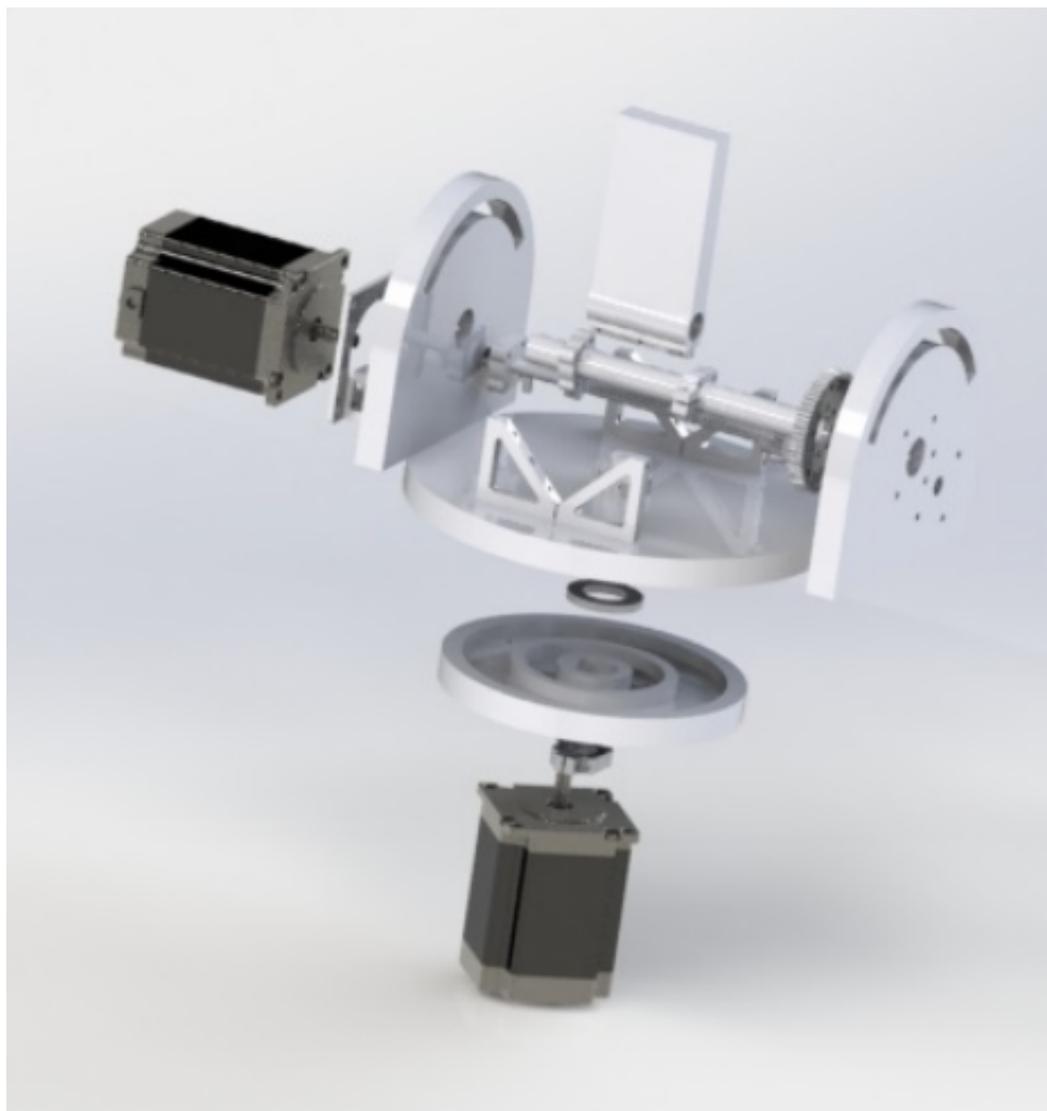


Figura 4.15: Diseño final del cuello [8].

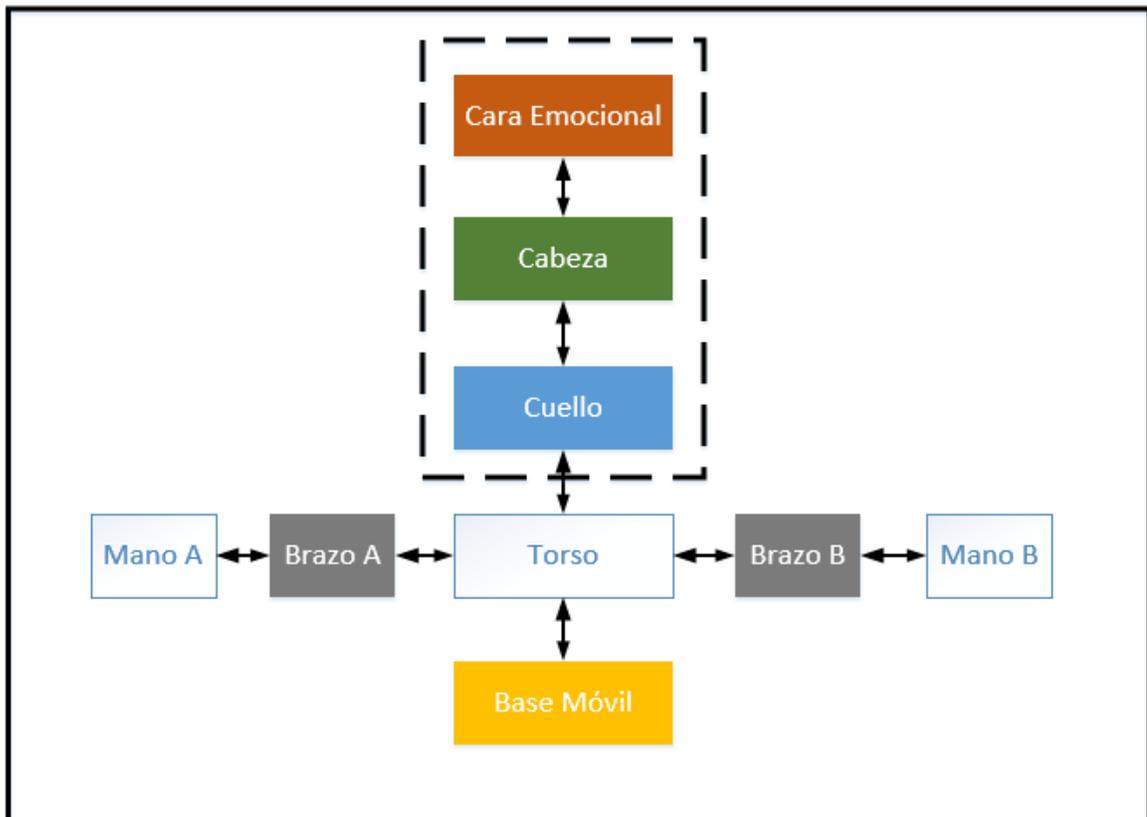


Figura 4.16: Diagrama de bloques general (Integración de la cabeza) [8].

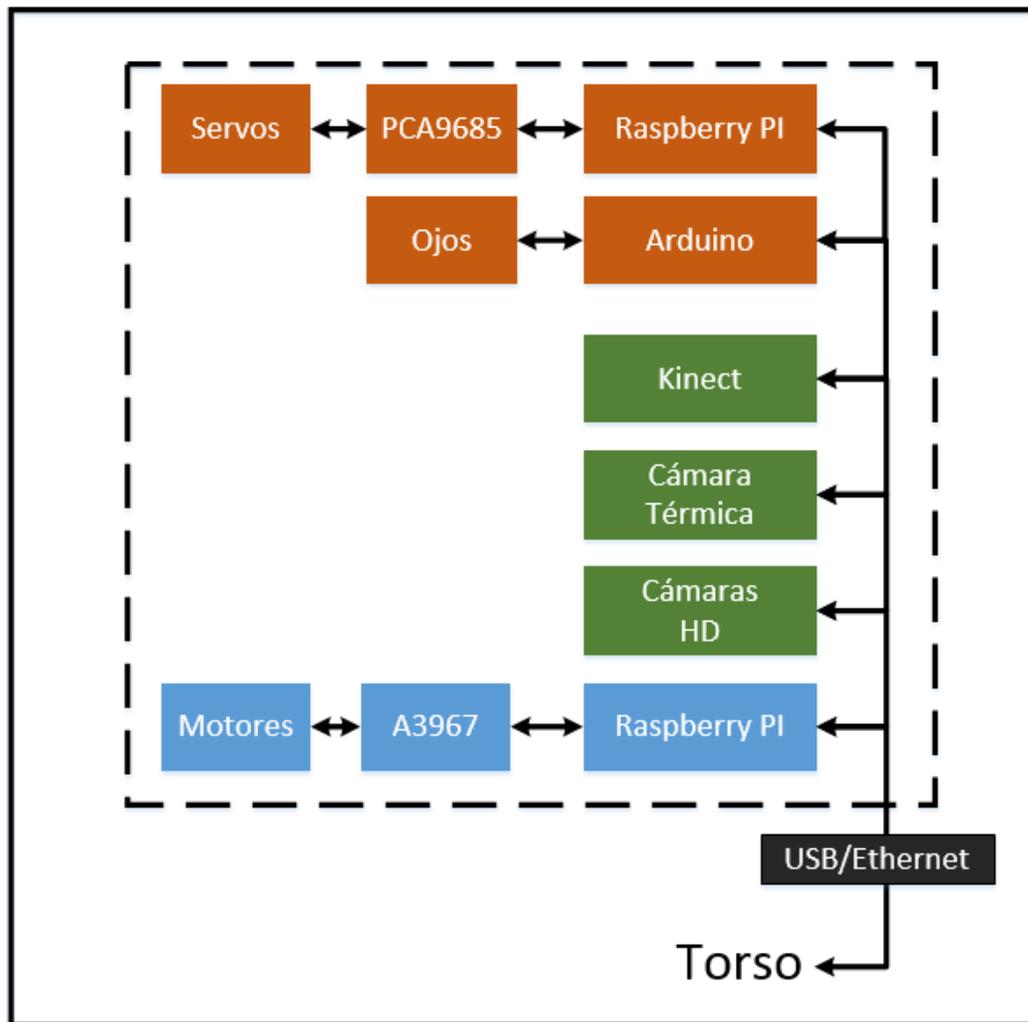


Figura 4.17: Interconexiones entre la cabeza, el cuello y la cara emocional [8].

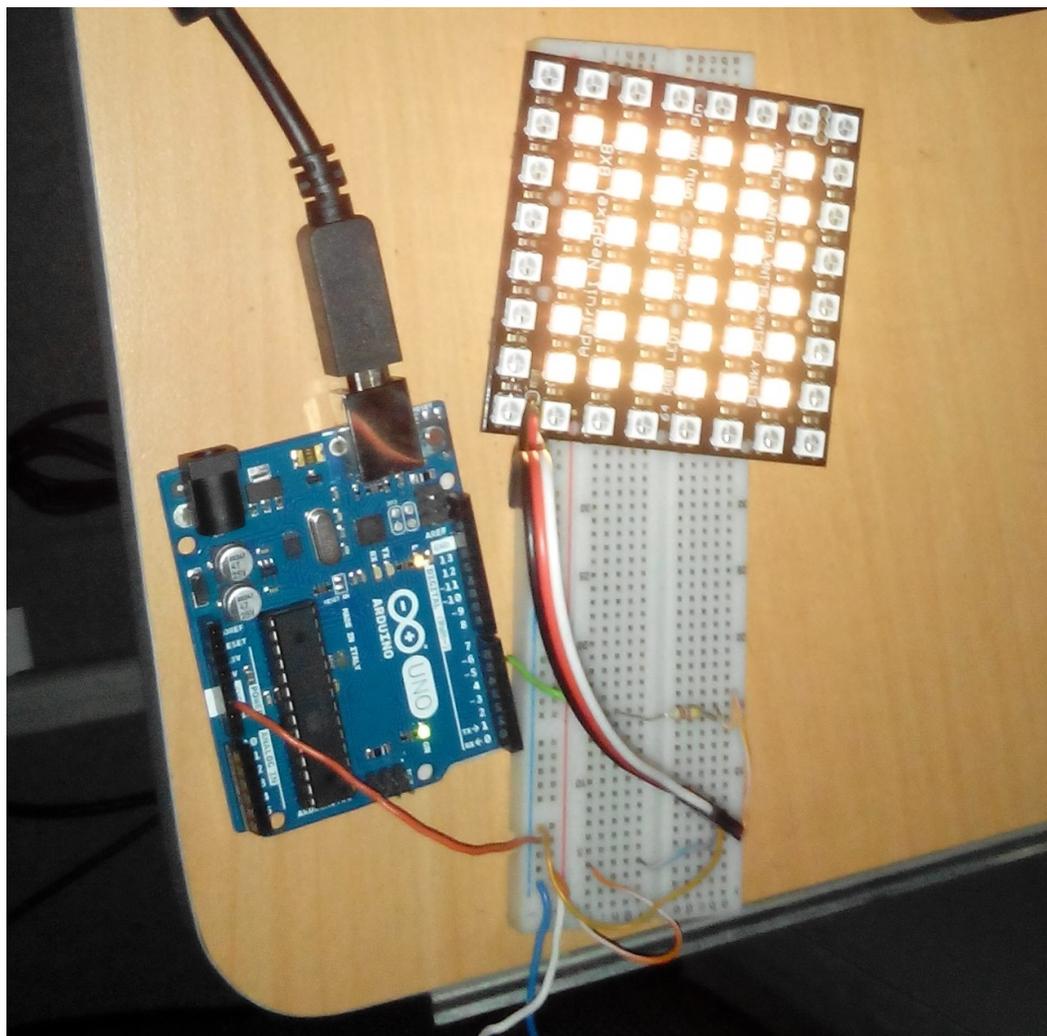


Figura 4.18: Matriz de Leds conectada al Arduino.

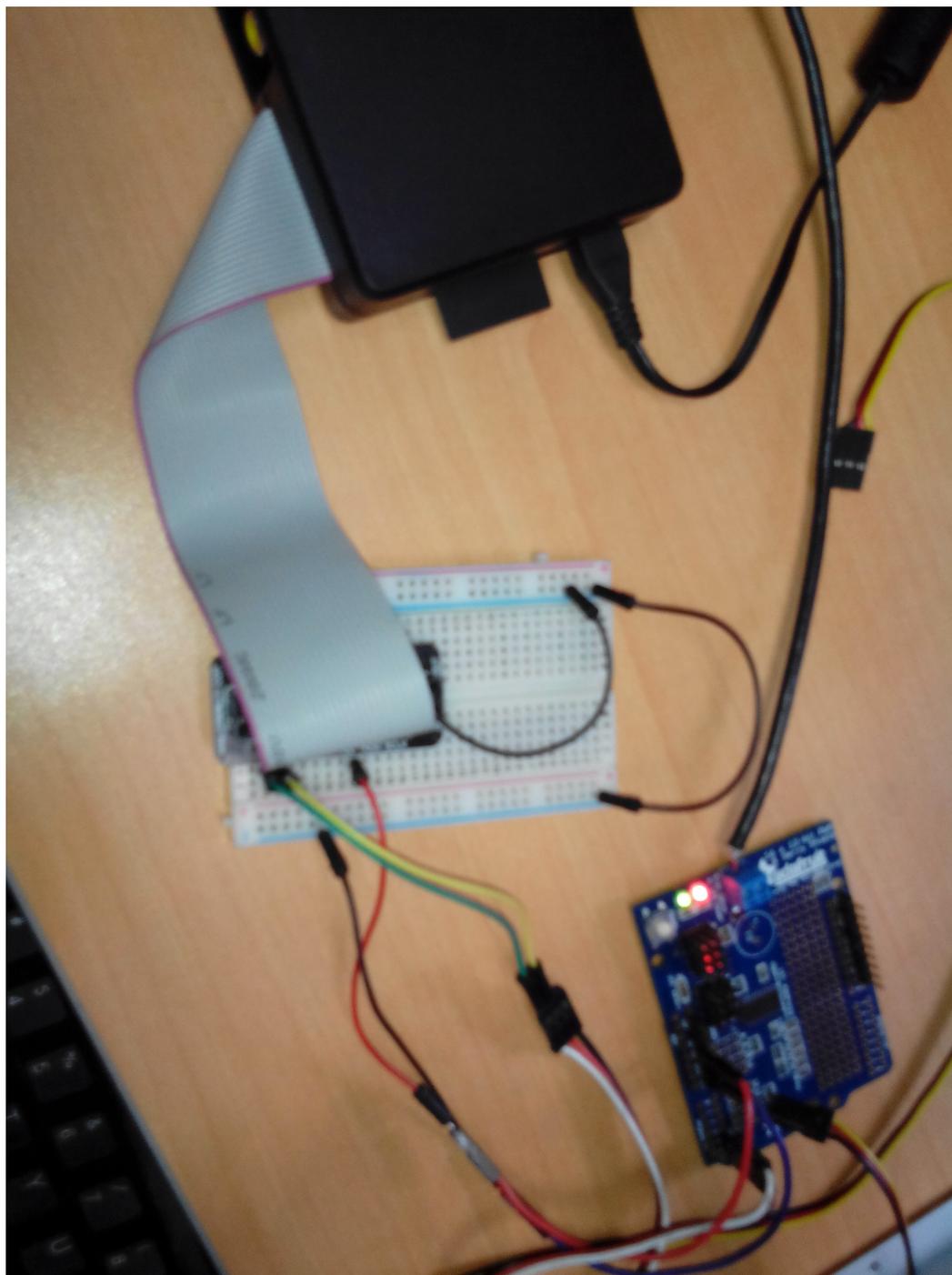


Figura 4.19: Conexión entre la Raspberry PI y la tarjeta PCA9685.

# Capítulo 5

## Torso robótico

### 5.1. Sistema de manipulación

El sistema de manipulación está compuesto de dos elementos principales: el brazo robótico y la mano robótica. El ARCOS-LAB cuenta con dos brazos robóticos y una mano robótica para el robot humanoide. El elemento fundamental que permite la integración mecánica de estas dos piezas es el acople, el cual es el objetivo fundamental de esta sección. Por razones de presupuesto el laboratorio únicamente pudo adquirir una mano robótica. La otra mano deberá ser diseñada y construida en el laboratorio, lo cual queda como trabajo futuro.

#### 5.1.1. Brazo robótico KUKA Lightweight LWR4+

El brazo robótico con el que cuenta el laboratorio es del tipo “KUKA lightweight LWR 4+” el cual posee siete ejes de rotación. El brazo pesa 16 Kg y puede sostener un peso de máxima de 7 Kg. El brazo utiliza un controlador denominado “KUKA CR2 LR”. Las articulaciones del brazo están equipadas con un sensor de posición en el lado de entrada, así como sensores de posición y torque en el lado de la salida. Por tanto, el robot puede operar con control por: posición, velocidad y torque.

El ARCOS-LAB posee dos controladores que sirven de interfaz para enviar órdenes desde la computadora de control al brazo. Cada controlador consiste en un sistema computador con su propia fuente de alimentación. Las partes se muestran en la figura [5.2](#).



Figura 5.1: Brazo robótico KUKA Lightweight 4+.

### 5.1.2. Mano robótica DLR HIT Hand II

La mano robótica tiene cinco dedos y 15 grados de libertad. Esta pesa 1500 gramos y posee control por impedancia en todos sus dedos. Todos los actuadores, engranajes y electrónica están integrados en los dedos o la base del mismo. La mano robótica fue adquirida por la Universidad de Costa Rica a un costo de \$84 000. Esta se observa en la figura 5.3.

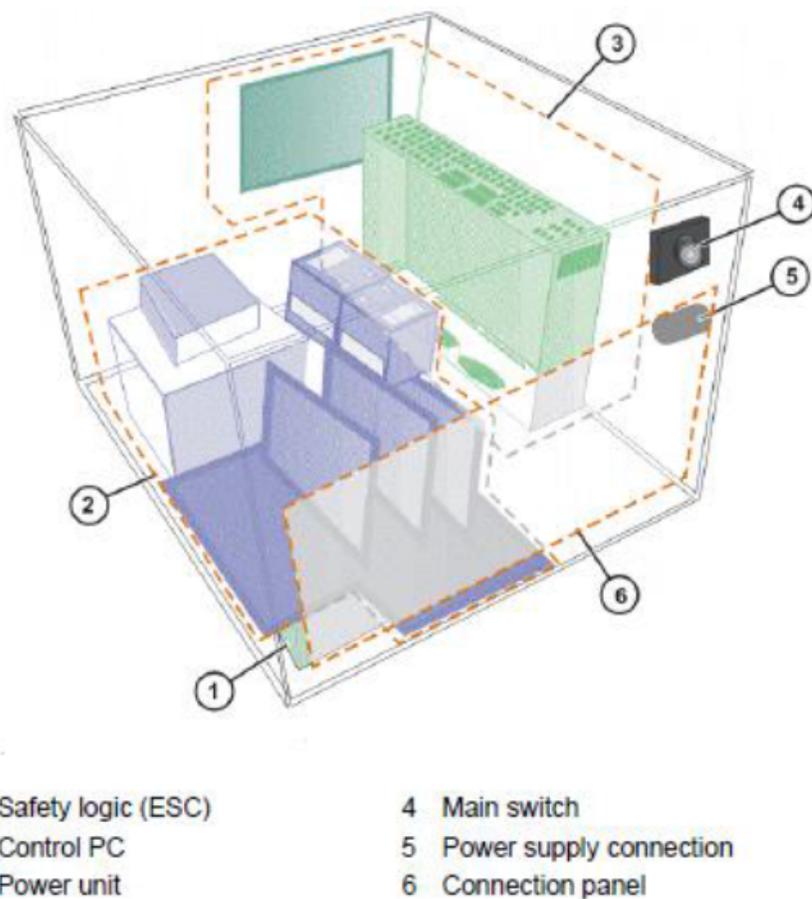


Figura 5.2: Controlador del brazo KUKA CR LR.



Figura 5.3: Mano robótica DLR HIT Hand II.

Al igual que con el brazo robótico, la mano también cuenta con un controlador, el cual se encarga de procesar la señal proveniente de un computador y enviarla a la mano. El controlador se muestra en la figura 5.4. En cuanto a software, el control de los dedos se realiza a través de YARP, de manera que se debe instalar dicha plataforma y los respectivos módulos.



Figura 5.4: Controlador de la mano NISE 3140.

## 5.2. Estructura de soporte

El diseño del Torso busca desarrollar un sistema que sirva de soporte mecánico a las articulaciones y a la cabeza del robot. La estructura debe funcionar para almacenar los servidores, controladores y fuentes de alimentación, así como para brindar la mayor capacidad de manipulación posible.

### 5.2.1. Establecimiento de requerimientos

El torso del robot debe almacenar los sistemas encargados del procesamiento del robot, los cuales son: controladores de los brazos robóticos KUKA CR2 LR, un controlador de la mano robótica NISE 3140, dos servidores de procesamiento central y el sistema de alimentación eléctrica. Al calcular la masa total que debe contener la estructura interna del robot, se obtiene un valor preliminar de 214 Kg. Debido a que varios de estos elementos están en fase de diseño, se considerará un 30 % adicional, es decir, un valor de 278.2 Kg.

El laboratorio contaba inicialmente con una serie de elementos para el torso, estos son: el sistema de posicionamiento lineal, los perfiles industriales de aluminio, los brazos KUKA LWR4+, los controladores KUKA CR2 LR, la mano robótica DLR/HIT II y el controlador de la mano NISE 3140. Estos elementos imponen restricciones de diseño, pues se deberán utilizar para construir el sistema. Estos elementos son el punto de partida.



Figura 5.5: Sistema de posicionamiento lineal.

El sistema de posicionamiento lineal (Véase figura 5.5) con que cuenta el laboratorio es marca *Parker Automation* y modelo *506036ET*. El laboratorio cuenta con perfiles industriales de aluminio de diferentes longitudes, los cuales también se utilizaron para construir la base móvil. Estos también serán utilizados en el torso.

Los dos brazos KUKA, con que cuenta el laboratorio, cuenta con siete grados de libertad, control por impedancia en cada una de sus articulaciones y pueden levantar hasta 7 Kg. El controlador de los brazos tiene una masa de 34 Kg y está diseñado para ser montado en un rack de 19 pulgadas. Las dimensiones del mismo en milímetros se muestran en la figura 5.6.

El motor a utilizar en el sistema de posicionamiento lineal es el *Baldor Brushless AC W067* ya que cuenta con el par nominal indicado para esta aplicación, además de poseer internamente un motor síncrono, un sistema de freno y un resolver. Este motor es el que se utiliza en la base móvil omnidireccional y gracias a las pruebas realizada previamente es conocido que funciona correctamente a 24 VDC. En el cuadro 5.1 se muestran los datos de placa de este motor.

Cuadro 5.1: Características del motor Baldor Brushless AC W067

Carecterística	Valor
Par nominal de salida	0.96
Corriente nominal (A)	2.60
Velocidad nominal (rpm)	6000
Voltaje nominal (V)	200
Corriente pico (A)	10.4
Clase	F

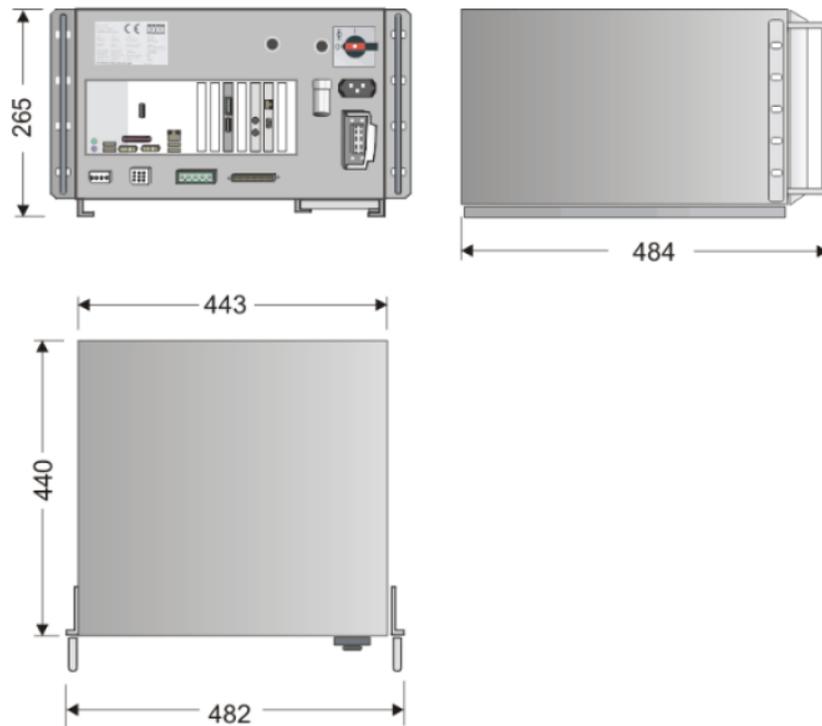


Figura 5.6: Dimensiones del controlador del brazo KUKA LWR4+.

### 5.2.2. Diseño del torso

A partir de los requerimientos, así como de los equipos y de los materiales con los que contaba inicialmente el laboratorio, se realiza el diseño del torso, comenzando con la reducción.

#### Reducción

El sistema de posición lineal requiere la incorporación de una reducción. La velocidad de entrada es de 6000 rpm y la velocidad de salida se considerará de 960 rpm. En cuanto al montaje y la geometría de la reducción, el tipo de conexión de salida requerido es del tipo NEMA23.

La reducción seleccionada es la Parker RX23, con una relación 5 a 1 y una geometría en configuración L (Ejes de conexión de entrada y de salida son perpendiculares), lo cual permite un mejor montaje de la reducción en el motor y la estructura. El diseño del acople para el sistema lineal se muestra en la figura 5.7:

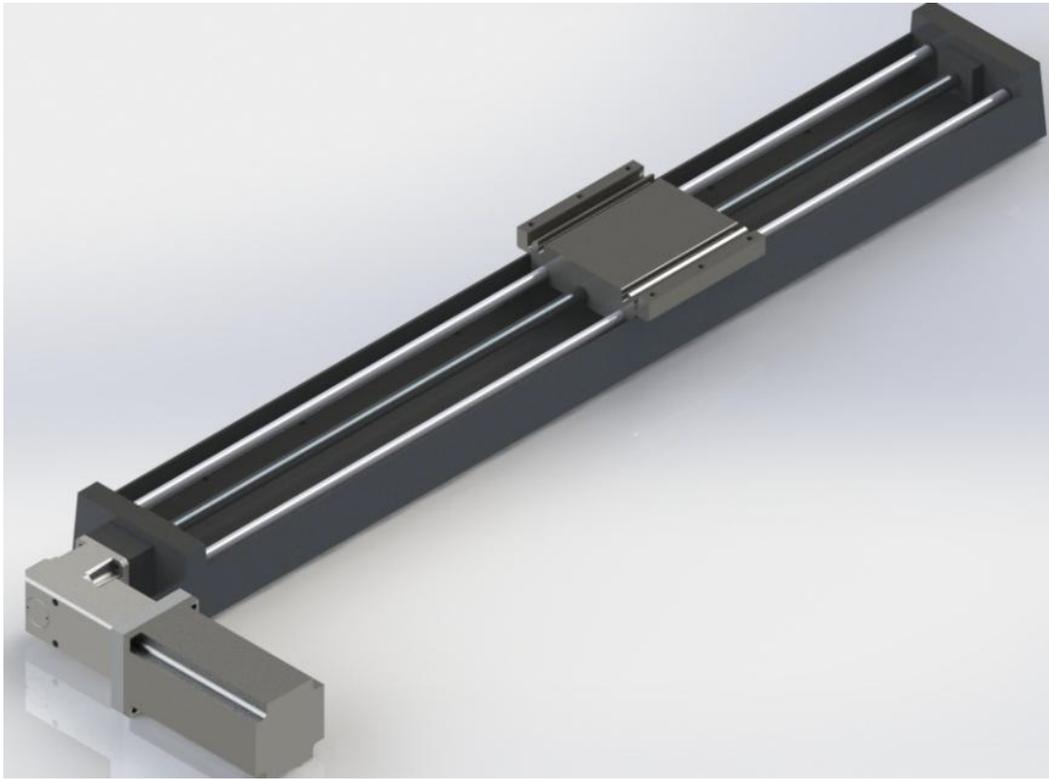


Figura 5.7: Diseño del acople para el sistema de posición lineal.

### **Acople de los brazos robóticos**

Para dotar el robot humanoide de movilidad, fue necesario diseñar un sistema de soporte, el cual consiste en un conjunto de placas que soportan el sistema de manipulación. Esta estructura se muestra en la figura 5.8.

### **Sistema de desplazamiento vertical**

Se decidió agregar una placa de 20 mm, acoplada al carro del sistema de posición lineal y sujeta por dos apoyos montados en dos ejes de acero con rieles de soporte. Esto con el propósito de soportar la estructura de montaje de los brazos robóticos, generar movilidad a lo largo del tornillo de bolas y proporcionar los esfuerzos para el funcionamiento de los brazos manipuladores. Este sistema se muestra en la figura 5.9.

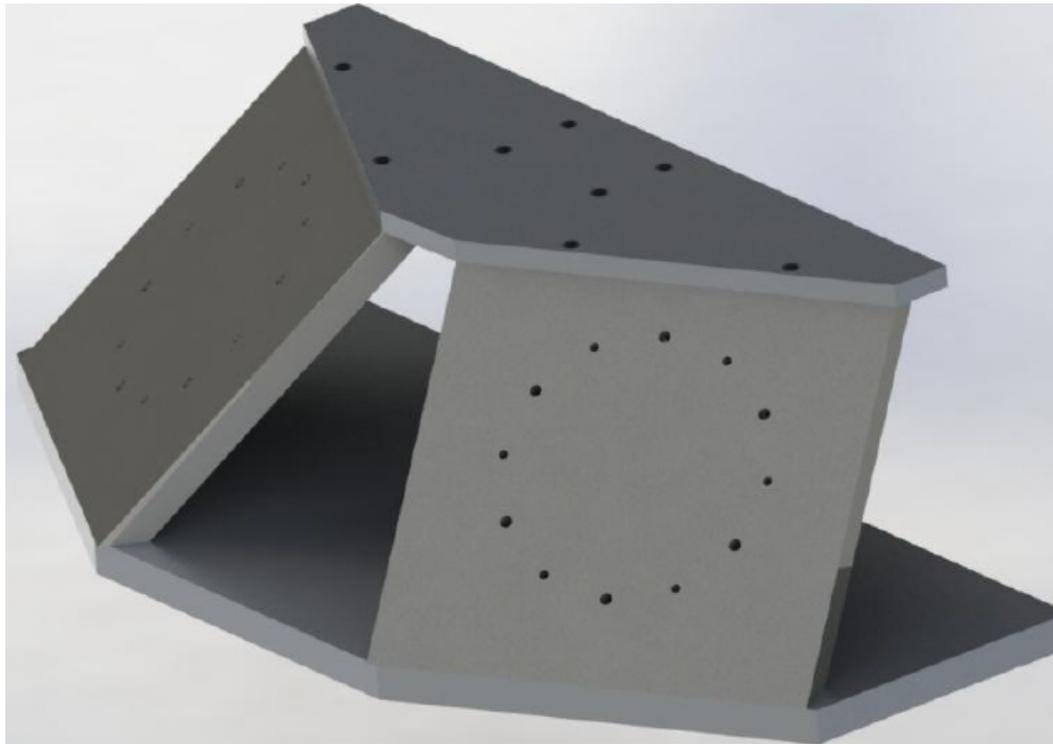


Figura 5.8: Soporte para los brazos robóticos.



Figura 5.9: Sistema de desplazamiento vertical.

### 5.2.3. Ensamblaje final

Luego de verificar los requerimientos de diseño y analizar los esfuerzos en las diferentes piezas del torso, el diseño final se muestra en la figura 5.10. El sistema posicionamiento lineal le permite a los brazos desplazarse 800 mm en forma vertical.

## 5.3. Integración

En esta sección se aborda la integración entre el torso y el sistema de manipulación; esto incluye las conexiones físicas y los elementos de hardware necesarios para ello. Esta integración se puede dividir en dos partes:

- Conexión entre la mano y el brazo.
- Conexión entre el torso y el brazo.

Lo referente al sistema de alimentación es cubierto en un capítulo separado. La figura 5.11 muestra en líneas punteadas la parte del robot que se cubrirán a continuación. La integración de la cara emocional, la cabeza y el cuello fue cubierta en una sección anterior. La integración entre la base móvil y el torso robótico se abordará más adelante.

### 5.3.1. Integración mecánica

#### Acople entre el brazo y la mano

El problema específico que se aborda a continuación es la integración mecánica entre la mano y el brazo. Esta estructura de acople debe ser tal que genere un movimiento natural de la mano. Otra característica es que la misma debe ser liviana, pero lo suficiente fuerte para soportar el peso de la mano. A continuación se listan los requerimientos del acople entre el brazo y la mano. Estos requerimientos son el punto de partida para el diseño del acople.

- La pieza debe ser liviana, pero capaz de soportar el peso de la mano, así como el peso del objeto que sostiene la mano.
- La pieza debe garantizar vibraciones mínimas de la mano en relación al brazo y permitir la conexión entre ambas piezas.
- La pieza no debe colisionar con elementos presentes en el entorno cuando se intenta manipular un objeto.



Figura 5.10: Diseño final del torso del robot humanoide.

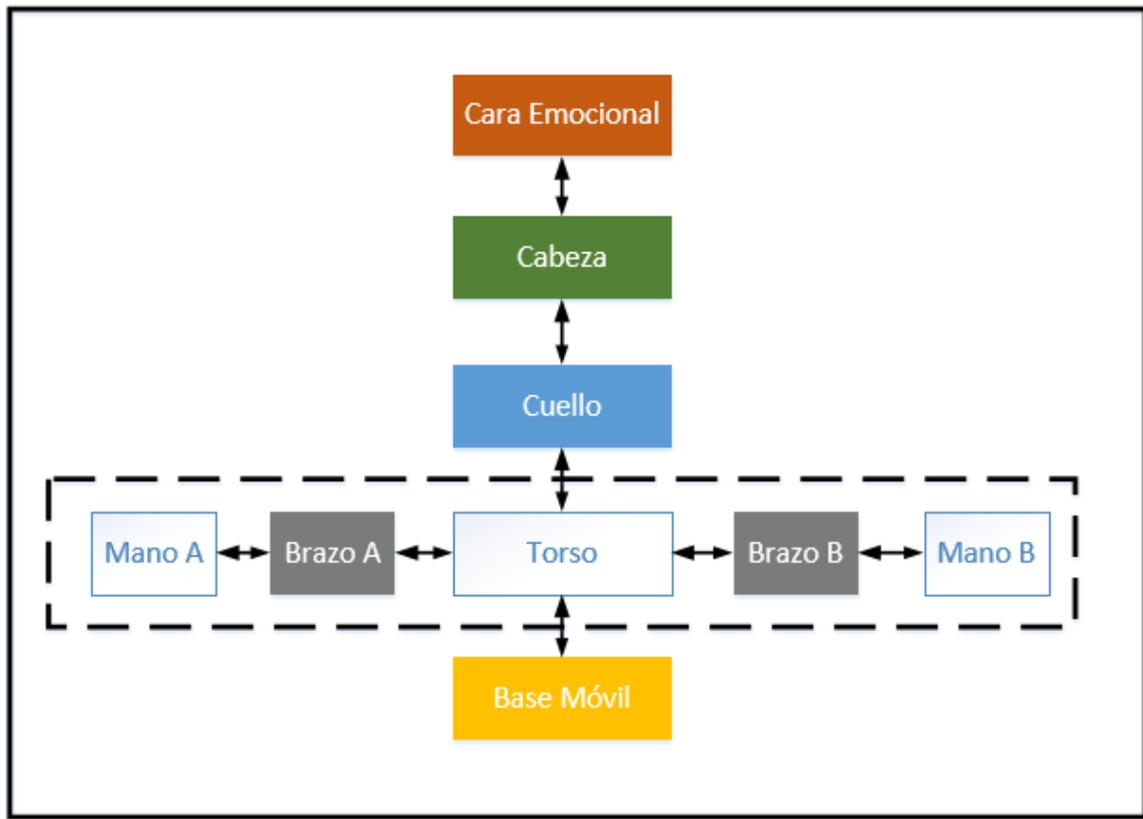


Figura 5.11: Diagrama de bloques general (Integración del torso) [8].

El material seleccionado es aluminio, ya que es barato y liviano, además de que es el material utilizado en otras partes del robot. La zona donde se acopla el efector final se caracteriza por contar con una estructura similar a una esfera y como consecuencia, se diseñó una pieza de unión curva. El modelo de diseño es iterativo, pues primero se construyó un prototipo el cual se imprimió en 3D.

El prototipo permitió identificar diferentes aspectos, como los errores presentes en la pieza, así como las posibles mejoras. Estas mejoras y arreglos se incluyeron en la versión final de la pieza. El más relevante es el hecho de que el primer prototipo contaba con una rosca, sin embargo el efecto final del brazo ya contaba con esa característica. Esto generaría que la unión fuera forzada e incluso que las superficies no llegaran a coincidir. El diseño final se muestra en la figura 5.12.

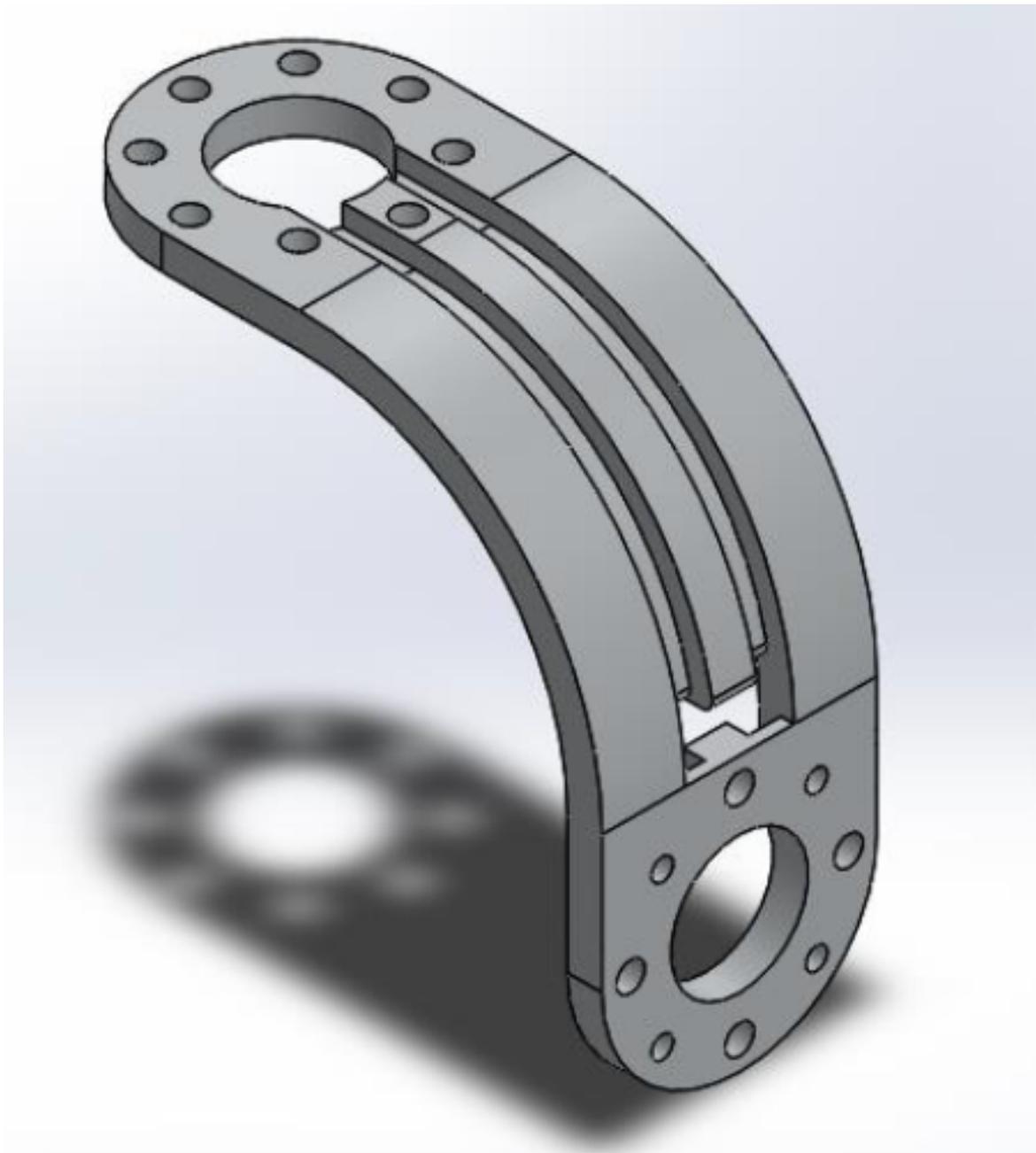


Figura 5.12: Diseño final del acople entre la mano y el brazo.

### Acople entre el torso y el brazo

El diseño del acople entre el torso y el brazo fue abordado inicialmente en el trabajo final de graduación del Chaves [3] (Véase figura 5.8). Este diseño presentaba un problema con respecto a la sujeción de las piezas por lo que fue necesario agregar una estructura adicional. El diseño tal como se había planteado no era manufacturable por lo que era necesario el diseño de una pieza de unión que permitiera sujetar ambas placas a pesar del ángulo de 45 grados que existía entre ellas.

La pieza de unión se diseñó a partir de perfiles de aluminio tipo Bosh presentes en el laboratorio. Los perfiles cuentan con una sección roscada que permite el empleo de tornillos M12x1.75 cm los cuales pueden ser utilizados como elementos de sujeción para esta área. De igual manera, mediante estos agujeros se puede lograr que el tornillo que ingresa a través de la placa de acople del brazo entre con la misma inclinación en la placa y en el perfil. Esta propuesta de acople se muestra en la figura 5.13.

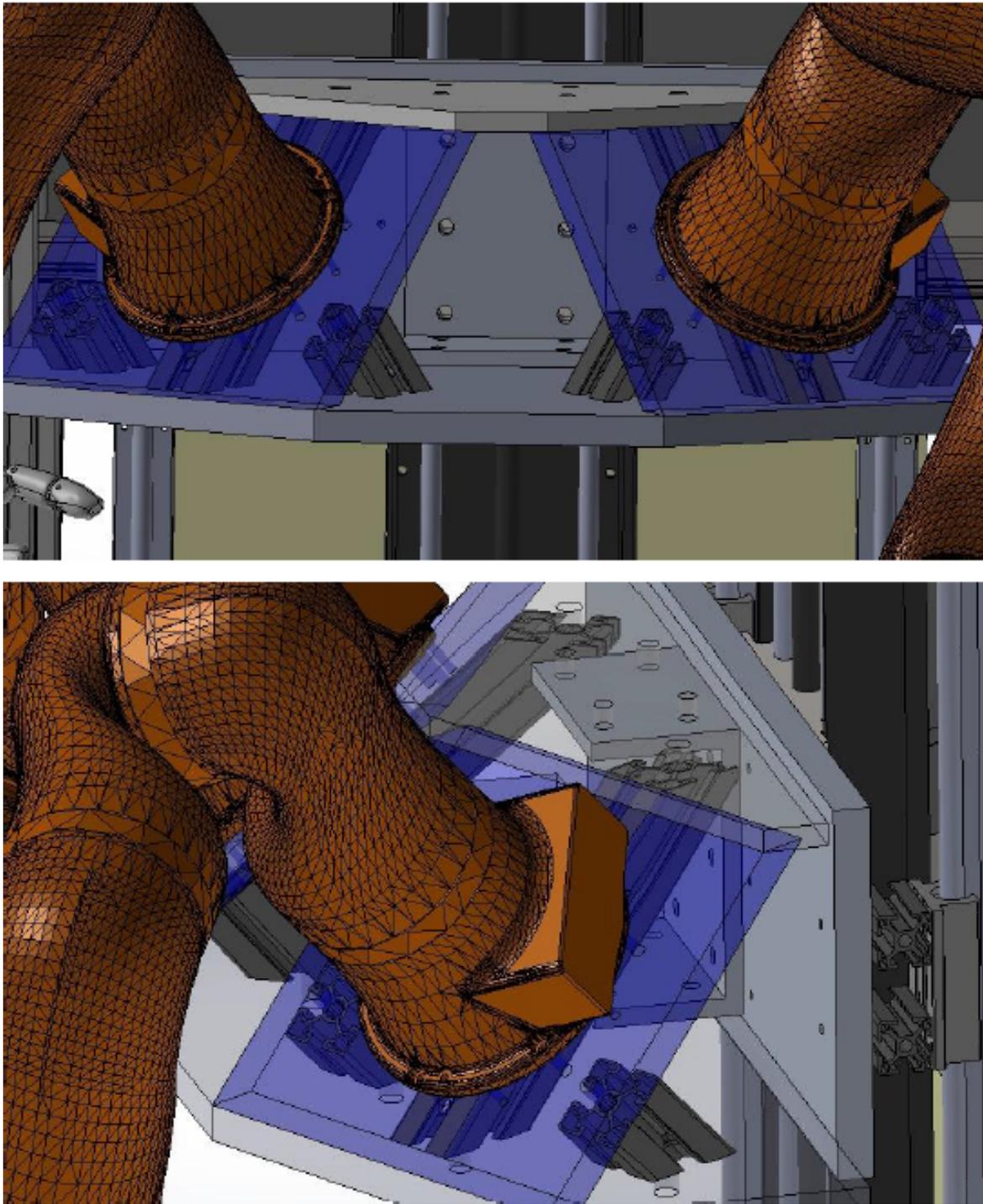


Figura 5.13: Diseño final del acople entre el brazo y el torso

### 5.3.2. Integración de datos

El torso cuenta con un cluster que se compone de: dos servidores para procesamiento, dos controladores de la mano robótica, dos controladores del brazo robótico y un *switch*. Las conexiones físicas ethernet de la cabeza van hacia el *switch*; y las conexiones USB van hacia los servidores. Es importante mencionar que debido a que el laboratorio solo cuenta con una mano robótica, el cluster solo contará con un controlador para la misma. El controlador de la mano se incluye en el diagrama de bloques debido a que eventualmente se contará con otra mano robótica.

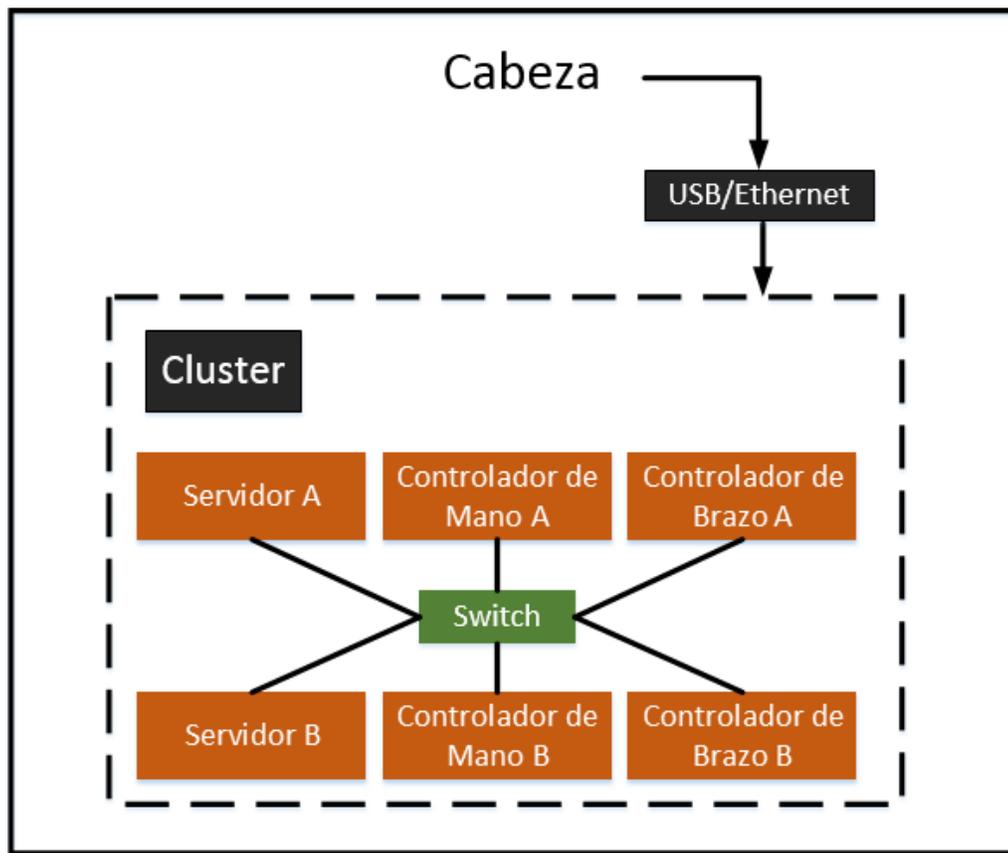


Figura 5.14: Interconexiones entre la cabeza y el torso [8].

La utilización de un *switch* en lugar de un *hub* es preferible debido a que estos poseen la capacidad de aprender y almacenar las direcciones físicas de los dispositivos alcanzables a través de cada uno de sus puertos. Por ejemplo, un equipo conectado directamente a un puerto provoca que el conmutador almacene su dirección física (MAC). Esto permite que, a diferencia de un *hub*, la información dirigida a un dispositivo vaya desde el puerto

origen al puerto de destino.

Los conexión física para controlar y movilizar los diferentes dedos de la mano es una conexión ethernet industrial CAT 5E. Este tipo de cable es usado en aplicaciones que requieren de gran flexibilidad, pues permite una comunicación fluida, además de que se encuentra blindado contra interfeerencias. Entre el brazo robótico y el controlador existe un cable serial de control propietario de Kuka, el cual tiene el propósito de enviar comandos y datos al primero.

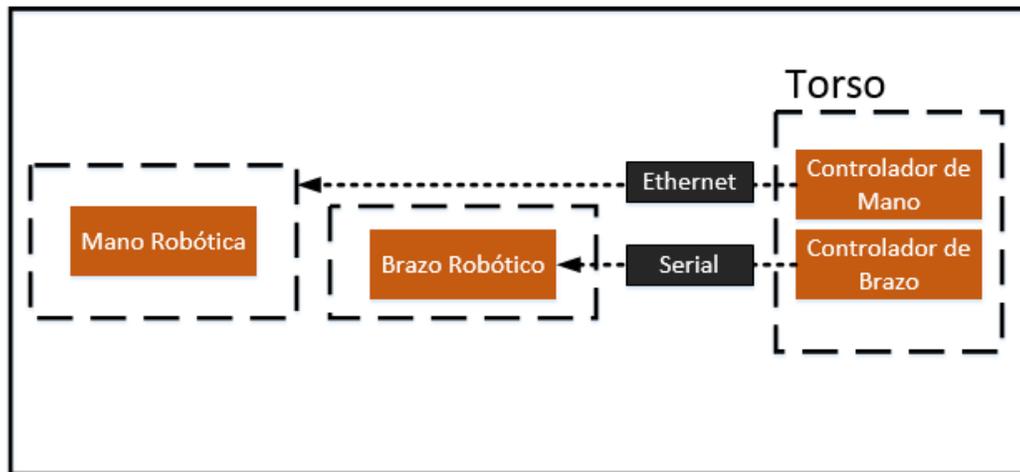


Figura 5.15: Interconexiones entre el sistema de manipulación y el torso.

El interruptor y el cable ethernet industrial usados entre la mano y el controlador de la misma se muestran en la figura 5.16. El interruptor funciona como paro de emergencia en caso de ser necesario, de manera que corta el paso de la corriente e interrumpe el proceso de ejecución para evitar daños en la manos robótica.

El brazo robótico KUKA LWR4+ cuenta con dos tipos de cables dentro de su estructura: una conexión neumática y un cable tipo ethernet. La conexión neumática no es necesaria para conectar la mano y el brazo, sin embargo, el cable Ethernet podía ser usado para la conexión entre el controlador y la mano, pero debido a que este cable estaba desgastado debido a las flexiones realizadas por el brazo durante su utilización, se descartó su uso.

La mano requería una nueva conexión eléctrica, para lo cual se usó cable UPT CAT 5E. Esta conexión se hizo externa al brazo siguiendo el diagrama de la figura. Se utilizaron dos pines para recepción de datos en el controlador, los cuales dan información relativa al movimiento de los dedos, además de un pin para llevar a cabo la transmisión de comandos de control a la mano. También se implementó un interruptor, por lo que se implementó la conexión denotada como señal de parada, la cual requiere dos pines adicionales denominados: *Ground* y *StopDown*.



Figura 5.16: Cable ethernet industrial usado entre la mano y el controlador.

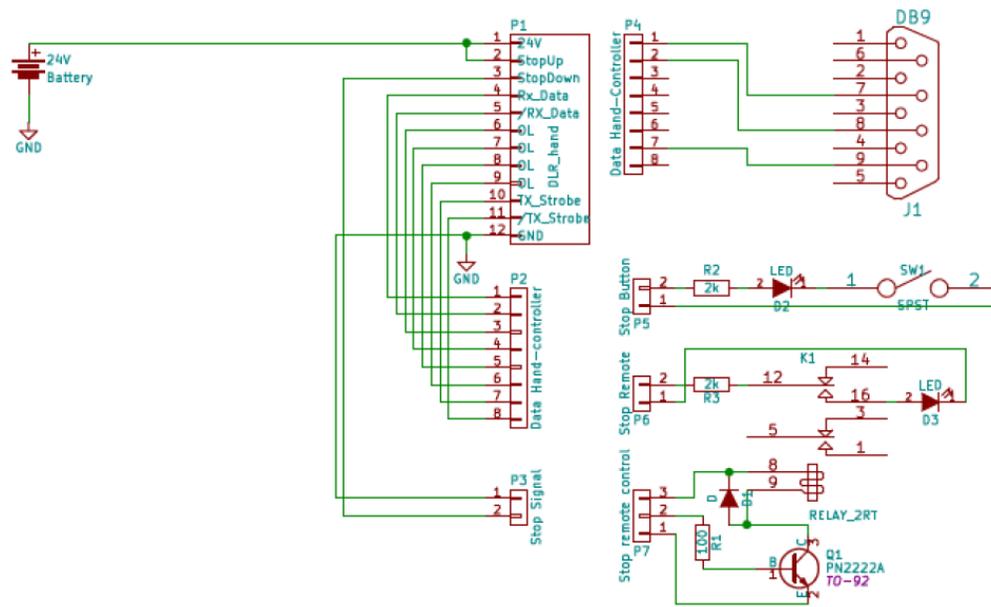


Figura 5.17: Diagrama de conexión entre la mano robótica y su controlador.

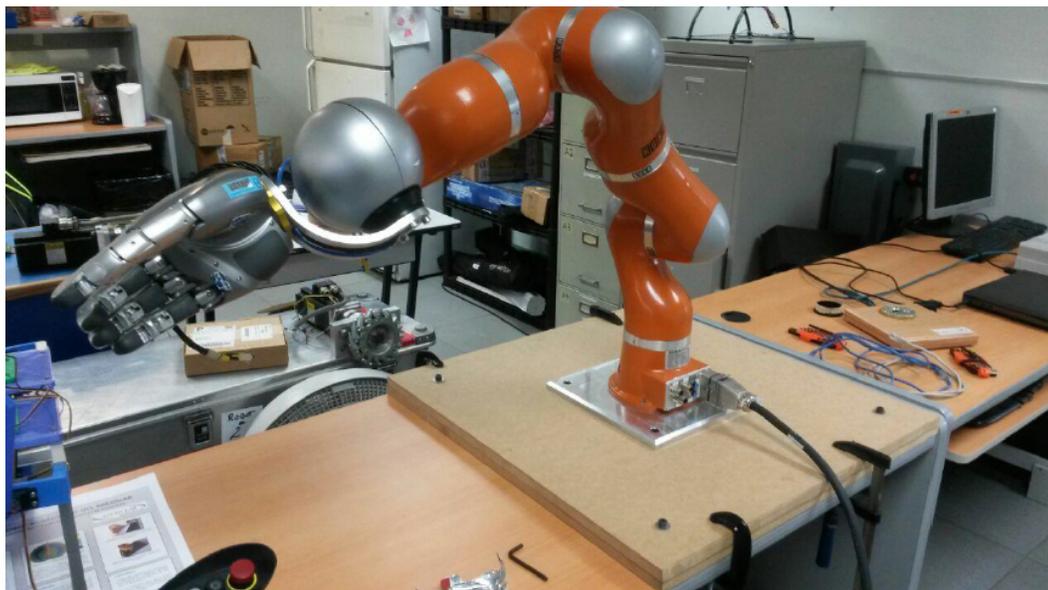


Figura 5.18: Integración del sistema de manipulación.

### 5.3.3. Integración software

La mano DLR HIT es fundamental para que el robot humanoide pueda manipular objetos. Para ello se requiere de un conjunto de elementos de software. Para comunicar la mano con el resto de la red se utilizó YARP. El programa se denominaba hand\_yarp, pero debido a que el mismo aún estaba en desarrollo se utilizó FFH, el cual permitía ejecutar una interfaz gráfica para el control de los dedos. El programa FFH se muestra en la figura 5.19. El procedimiento para la instalación y uso de estos programas se explica en detalle en el Apéndice B de este proyecto.

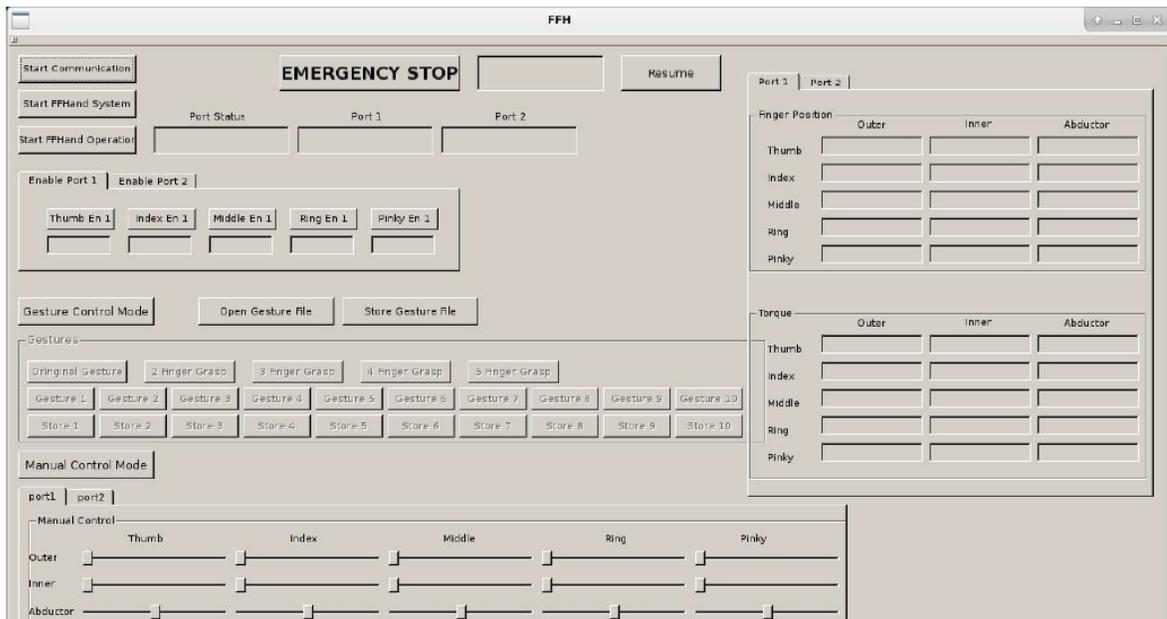


Figura 5.19: Intefaz gráfica del software de control FFH. Cortesía de [9].

Además del control de la mano, se requiere el control del brazo. El brazo robótico cuenta con cuatro modos de operación:

- Manual de velocidad reducida (T1)
- Manual de velocidad alta (T2)
- Automático (AUT)
- Automático externo (AUT EXT)

Cada modo de operación está elaborado para diferentes tipos de usos y velocidades. La selección de cada modo se hace a través de la llave ubicada en el “teach pendant” que apunta a una de las cuatro posiciones posibles.

El control del brazo se hizo a través de la interfaz FRI. Este es un software que ha sido utilizado en laboratorios de investigación para trabajar con brazos robóticos KUKA.

Este software cuenta con dos modos de operación: monitor y comando. El modo monitor consiste en una transferencia de datos cíclica hacia un computador externo, mientras que el modo comando permite la transmisión de comandos hacia el brazo (en sentido inverso). El procedimiento para llevar a cabo la instalación y configuración se muestra en el Apéndice B.

# Capítulo 6

## Base móvil omnidireccional

El robot que se está desarrollando en el ARCOS-LAB necesita un medio para trasladarse por el espacio, razón por la cual es necesario construir un sistema móvil capaz de poder soportarlo y trasladarlo. Sin embargo, estos sistemas móviles son sumamente costosos en la actualidad, con un costo aproximado de \$150 mil. Debido a su alto costo, el ARCOS-LAB se dió a la tarea de construir una base móvil.

### 6.1. Establecimiento de requerimientos

El objetivo de la base móvil es proporcionar al robot humanoide capacidades de locomoción, tomando como referencia las posibles área de trabajo del mismo. Un elemento fundamental que se debe asegurar es que la base pueda soportar el peso del robot humanoide completo. El peso total, considerando un factor de seguridad, es de 278.2 Kg. En el diseño se consideró un peso de 300.0 Kg.

Los motores de la base deben de proporcionar una fuerza que supere el rozamiento estático entre la superficie y la rueda. El cálculo de la fuerza se divide entre cuatro, con lo que se obtiene una fuerza de rozamiento de 147 N por rueda [10]. Esta es la fuerza mínima que deberá proporcionar cada rueda de la base móvil.

La velocidad de desplazamiento deberá ser similar a la velocidad promedio de un ser humano, esto porque el robot será utilizado para realizar tareas cotidianas las cuales no requieren un tiempo de traslación rápido. La velocidad máxima de diseño considerada es de 1,2 m/s. Por tanto, la base móvil también debería permitir cualquier velocidad entre 0.0 m/s y esta velocidad máxima [10].

La base móvil debe ser capaz de transportar el robot humanoide del ARCOS-Lab. Esto implica que dicha base debe contar con características especiales de tamaño y robustez para soportar todas las piezas del robot y a la vez poder trasladarlo por lugares

interiores comunes. La concepción del diseño mecánico parte de las dimensiones de una silla de ruedas. La tabla 6.1 muestra los tamaños usuales para varios tipos de sillas de ruedas. En la segunda columna se muestran las dimensiones de la base móvil. Nótese que este requerimiento es bioinspirado.

Cuadro 6.1: Tamaños normales para una silla de ruedas

Dimensiones (cm)	Base Móvil	Silla de ruedas convencional	Silla de ruedas eléctrica	Silla de ruedas geriátrica
Largo	84	71-120	66-110	91-150
Ancho	85	60-76	62-91	71-120
Altura	60	100-110	91-100	120-140

## 6.2. Diseño de la base móvil

El laboratorio contaba previamente con equipo y materiales, los cuales se podían usar con el fin de minimizar los costos de construcción. Sin embargo, no se contaba con todo el equipo, de manera que se tuvo que realizar un proceso de selección de elementos para luego poder adquirirlos. Los equipos con los que contaba al momento del inicio del proyecto eran: los motores, las ruedas y los perfiles industriales de Aluminio. Los equipos que se tuvieron que adquirir fueron: las baterías y las reducciones.

Las decisiones de diseño se basaron en el equipo disponible al inicio del proyecto y en los requerimientos de: peso del robot humanoide y velocidad de desplazamiento. La base se diseñó a partir de tres estructuras con perfiles: una sección para las baterías y dos secciones para los motores. Estos últimos deben alojar el motor, la reducción y el sistema de acople.

Las ruedas no se deberían acoplar directamente a la reducción, esto para que no sean transmitidas las fuerzas axiales producidas debido a posibles escenarios dinámicos de la base. Es por eso que se diseña un acople que se conecta a la reducción de manera suave. Este acople debe atravesar la placa de montaje para conectarse por el lado externo con la rueda y adicionalmente ir embutido dentro de un sistema de rodamientos para que pueda girar libremente y con poca fricción.

La figura 6.1 muestra el arreglo propuesto para solucionar el problema de la conexión entre actuadores y ruedas. Tomando como base este sistema se diseña un comportamiento para los motores usando perfiles industriales (Véase figura 6.2). Este comportamiento se diseñó con el tamaño mínimo posible, tomando en consideración las restricciones de medidas globales dadas en el cuadro 6.1 así como un espacio adecuado para labores de mantenimiento o desensamblaje.

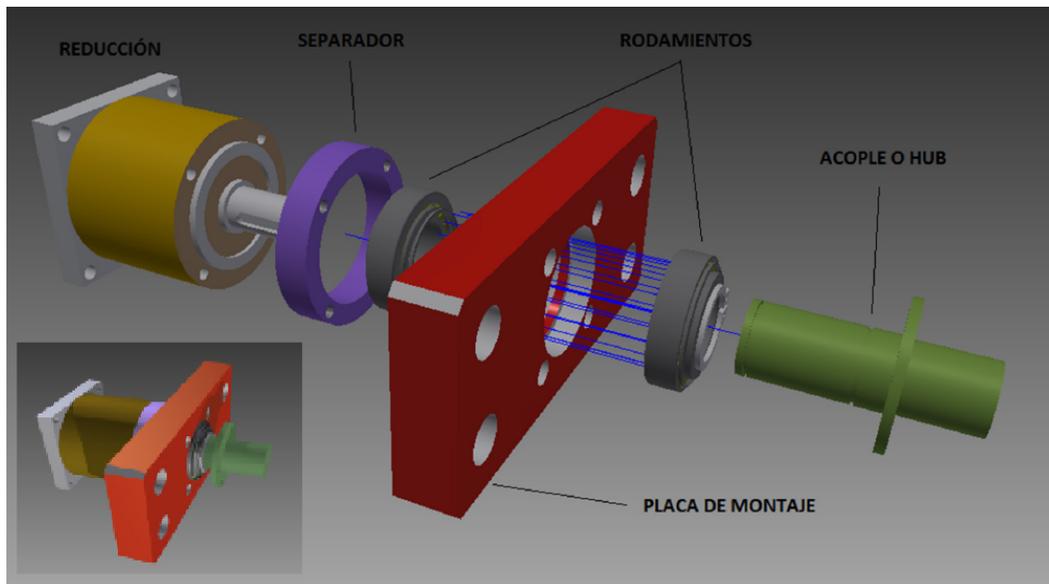


Figura 6.1: Diseño del sistema de acople entre las ruedas y la reducción.

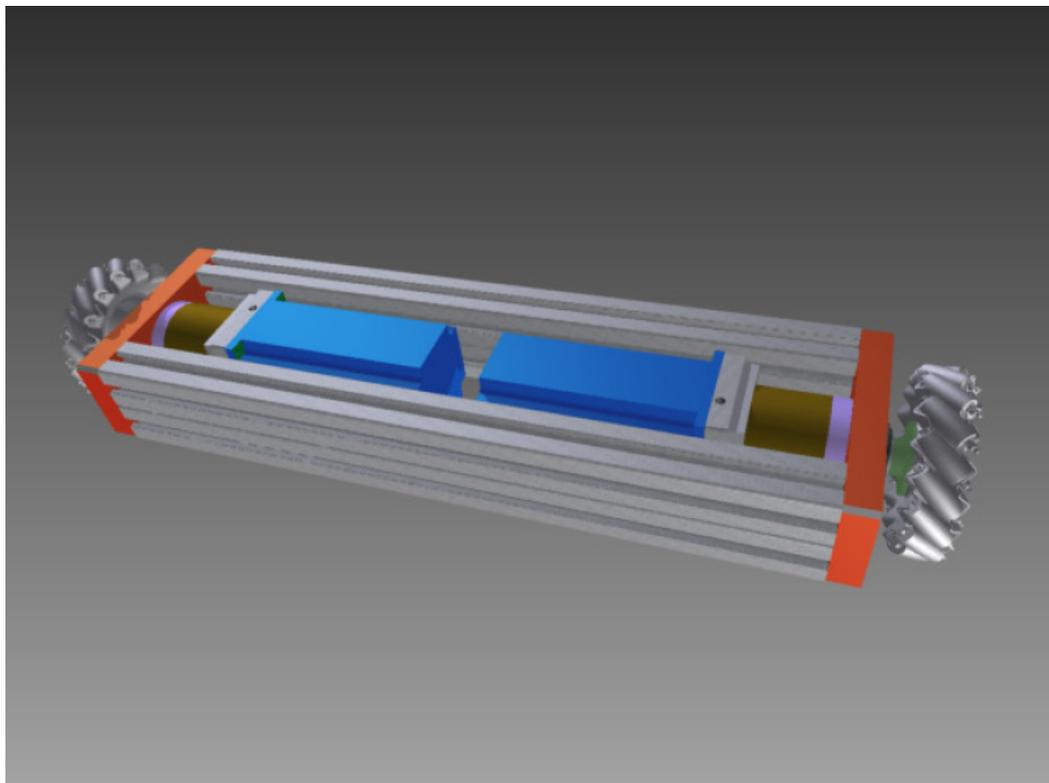


Figura 6.2: Diseño del compartimento de los motores.

La baterías también requieren un compartimento, sobre el cual se coloca una plataforma para soportar el resto del robot humanoide. Esto se observa en la figura 6.3.

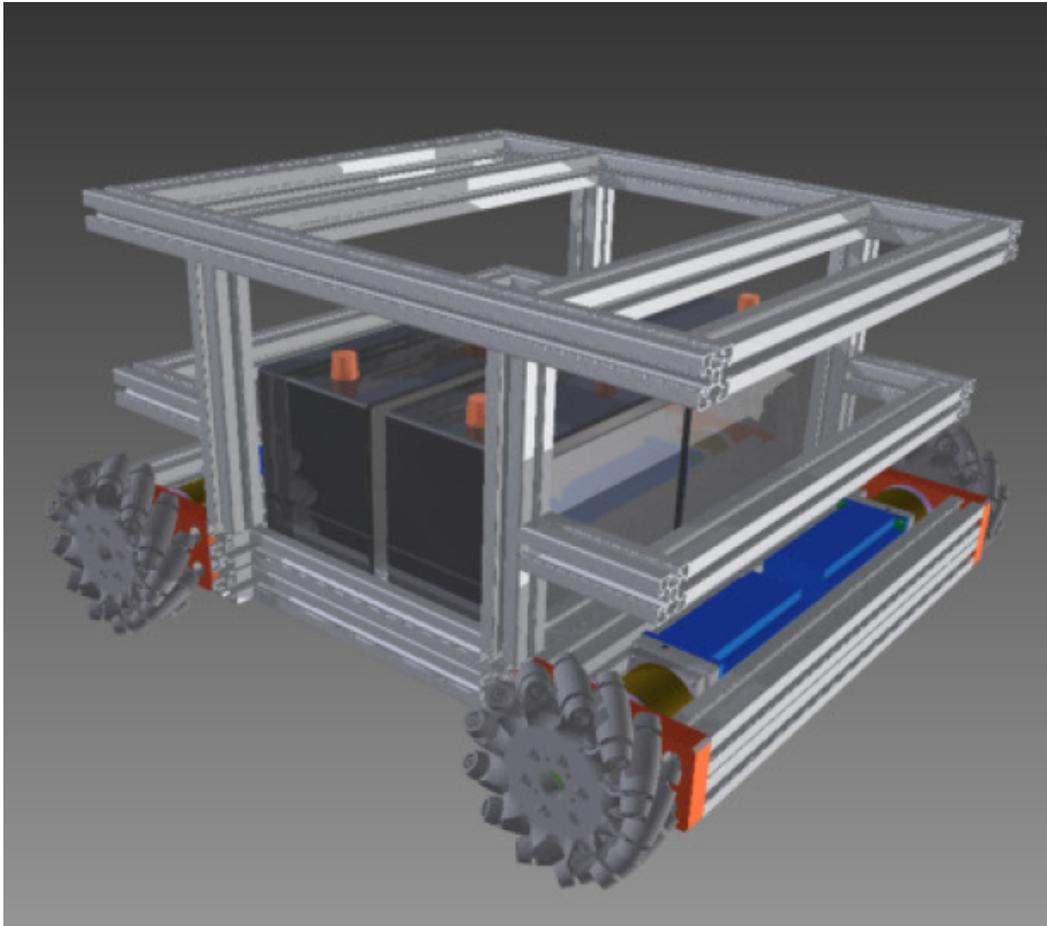


Figura 6.3: Base móvil diseñada.

### 6.3. Construcción y ensamblaje

Los motores más adecuados, principalmente por su robustez, son los “Baldor Brushless”. Estos dispositivos cuentan con un resolver, el cual permite obtener la posición y la velocidad del eje en un instante dado. El motor tiene una potencia nominal de 200 W, pero se determinó que el mismo operaba correctamente para voltajes de: 12 V, 24 V y 48 V [10].

Las ruedas utilizadas ya habían sido adquiridas y estaban disponibles. Las mismas son marca AndyMark de 6 pulgadas de diámetro modelo “AM-0136” y soportan una carga máxima de 36 kg cada una, por lo tanto, las cuatro ruedas soportan 144 Kg.

Esta capacidad era menor que la deseada, por eso se adquirieron ruedas de 8 pulgadas modelo “AM-2115” las cuales soportan 227 Kg cada una [10].

Los perfiles industriales de aluminio, los cuales son de diferentes tamaños, fueron donados por el INII para ser reutilizados para el esqueleto de la base. La figura 6.5 muestra estos perfiles de aluminio.



Figura 6.4: Rueda tipo mecanum Andymark de 6 pulgadas (Imagen tomada de [10]).

La velocidad deseada para el robot es entre 0.0 m/s y 1.2 m/s, ya que es una velocidad adecuada para trabajar en interiores. Sin embargo, se considerará una velocidad máxima de 2.0 m/s. En base al análisis realizado por Gómez [10] se decidió adquirir las reducciones “Neugart PLE80” las cuales tienen una relación 8:1. Esta relación es adecuada puesto que permitiría otorgar a las ruedas velocidades de 0 a 750 rpm.

El ensamblaje final de la base se trabajó en conjunto con el INA donde se realizaron las estructuras principales con perfiles y se atornillaron a las placas de montaje. Posteriormente, se transportaron las piezas fabricadas y los compartimentos de perfiles al ARCOS-LAB donde se finalizó el montaje de la base.

La instalación de baterías, así como el sistema de alimentación eléctrica y la colocación de los circuitos de control se realizó en la etapa final. La figura 6.6 muestra la base móvil omnidireccional ya finalizada.



Figura 6.5: Perfiles industriales de aluminio utilizados (Imagen tomada de [10]).

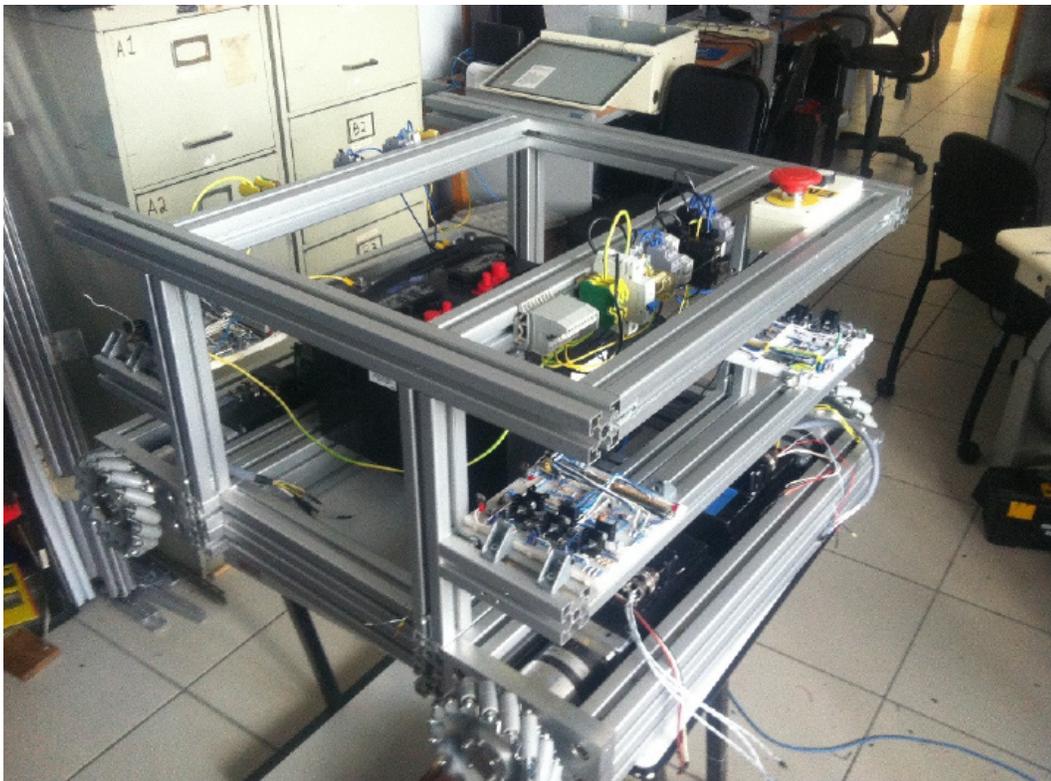


Figura 6.6: Base móvil omnidireccional finalizada (Imagen tomada de [10]).

## 6.4. Integración

En esta sección se aborda la integración de la base móvil con el torso robótico (Véase figura 6.7), en particular la integración de datos entre ambos componentes. Para que la plataforma móvil se pueda desplazar requiere contar con un sistema de control con las siguientes capacidades [10]:

- Recepción de consignas de velocidad y dirección establecidas por un operador humano o por una arquitectura robótica.
- Cálculo de velocidades para cada una de las ruedas, así como estimación de la posición y velocidad del eje de los motores.
- Alimentación eléctrica de los cuatro motores con base en velocidades calculadas para las ruedas.

El esquema de control diseñado por Gómez [10] planteó un esquema de control que permitiera otorgar mandos directamente al usuario. Una de las formas más sencillas es a través de un *joystick*. Los botones análogos de los que dispone este dispositivo permiten proporcionar al sistema de la velocidad y dirección deseada, en un momento determinado. La figura 6.8 muestra el diagrama de bloques que se implementó para lograr la funcionalidad requerida.

Las instrucciones de velocidad y dirección dadas por el control remoto son recibidas por una computadora, en donde reside un programa de control el cual calcula y envía a los microcontroladores a través del puerto serial los comandos de velocidad y sentido de giro para cada uno de los cuatro motores. Al mismo tiempo, se obtienen las señales de posición y velocidad del motor gracias al convertidor de posición y de velocidad, el cual recibe estas señales analógicas por parte del *resolver* del motor.

Los microcontroladores poseen un algoritmo de control en lazo cerrado para que, con los comandos previos, calcule y entregue al controlador la señal de potencia PWM y las señales de control requeridas. El controlador, a partir de estas señales, entrega los voltajes de alimentación adecuados los motores para alcanzar el resultado deseado.

Los microcontroladores, los circuitos de control y los motores están ubicados en la base móvil, por lo que la señal de datos que va hacia el torso es una conexión serial por cada motor, como son cuatro motores, se tienen cuatro conexiones seriales. Estas señales de datos se conectan a los servidores principales del cluster, los cuales están ubicados en el torso.

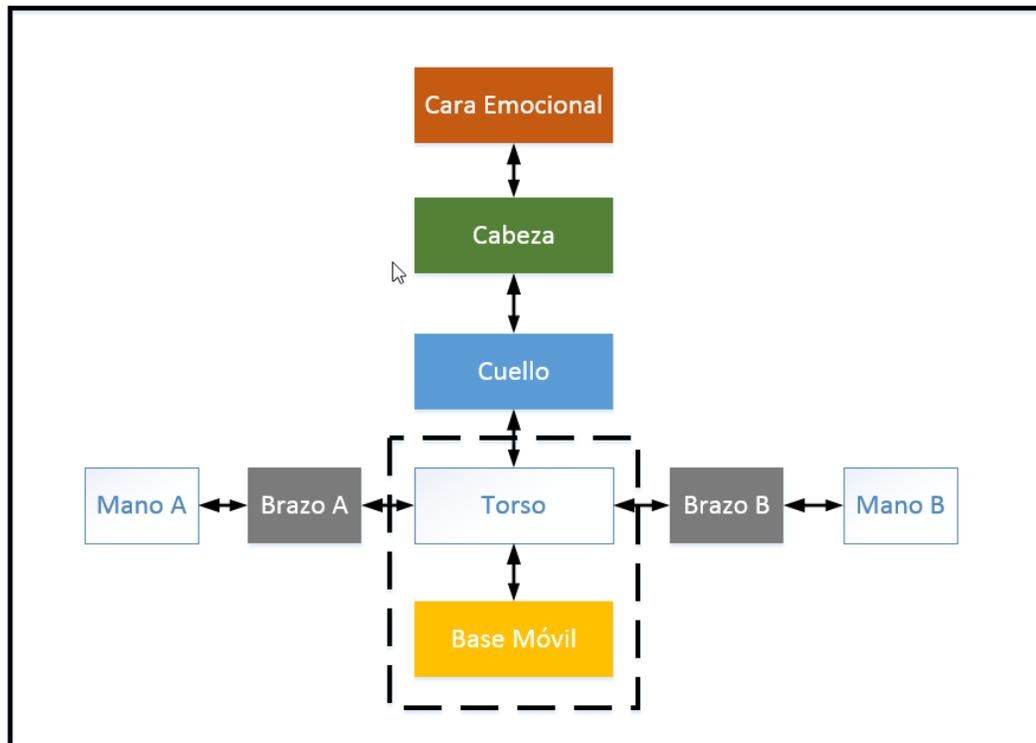


Figura 6.7: Diagrama de bloques general (Integración de la base móvil).

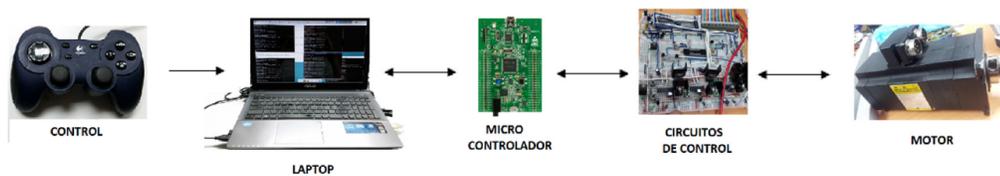


Figura 6.8: Diagrama de bloques general del controlador de la base móvil.

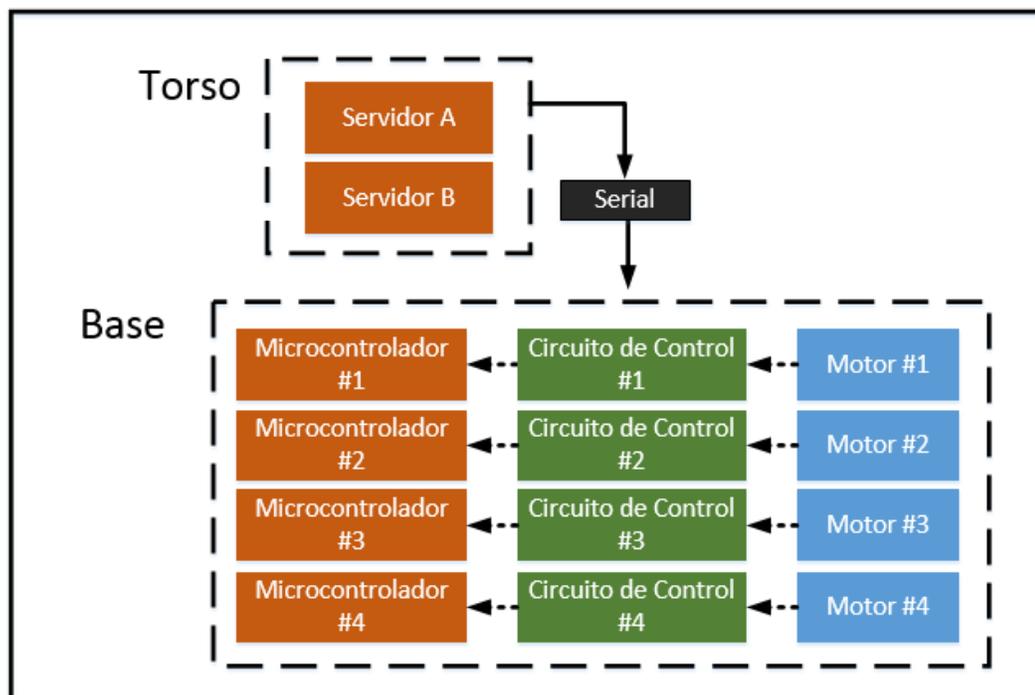


Figura 6.9: Conexión entre el torso robótico y la base móvil omnidireccional.

# Capítulo 7

## Sistema de alimentación

Las diferentes partes del robot humanoide requieren de una alimentación eléctrica. Esta necesidad no ha sido abordada integralmente en trabajos de grado anteriores, o bien ha sido abordada parcialmente. El robot tiene diferentes requerimientos específicos de potencia, voltaje y corriente para cada una de sus partes, los cuales se deben satisfacer por una fuente de alimentación que distribuya la potencia a todo el robot humanoide. Este sistema tendrá como entrada cuatro baterías en serie de ciclo profundo y diferentes salidas para alimentar desde la base móvil omnidireccional hasta la cara emocional ubicada en el cabeza del robot.

### 7.1. Establecimiento de requerimientos

A continuación se analizan las partes más importantes del robot humanoide y se establecen los requerimientos de potencia y voltaje. En cuanto al sistema de alimentación, el robot humanoide se ha dividido en tres partes: cabeza, torso y base móvil. La cabeza también se puede subdividir en tres partes en cuanto al sistema de alimentación: cuello, cara emocional y sistema de percepción (cámara de termografía, cámara de alta resolución y Kinect).

#### 7.1.1. Baterías

El conjunto de baterías constituye el sistema de entrada hacia el sistema de alimentación del robot humanoide. Las baterías adquiridas son de tipo marina o de ciclo profundo de 12 V. Estas baterías son marca Eveready de 600 A, con dimensiones 30.5 cm x 20.0 cm 17.0 cm. Estas baterías se eligieron en un inicio por la autonomía que

ofrecen a la base móvil omnidireccional, pues según Gómez [10] permite que los controladores y motores funcionen por 45 horas continuas.

Las baterías de ciclo profundo pueden descargarse hasta un 20 %, pero la mejor relación entre vida útil y costo se obtiene si se descargan hasta un 50 %. Las descargas esporádicas de la batería por debajo del 50 % no causarán daño alguno, pero descargas frecuentes por debajo del 50 % acortarán la vida de la batería en forma significativa [10]. Esto resulta muy importante desde el punto de vista de autonomía del robot, pues ha de suponerse que las baterías se deberán descargar hasta el 50 % y que a partir de ahí se deberá considerar que la batería debe ser cargada de nuevo.



Figura 7.1: Batería de ciclo profundo adquirida para la base móvil del robot humanoide.

### 7.1.2. Cabeza

El cuadro 7.1 que se muestra a continuación se muestra un resumen de los requerimientos de energía para la cabeza del robot humanoide. Nótese que incluye el cuello, el

sistema de percepción y la cara emocional. Nótese que el mayor consumidor de potencia es la cara emocional, esto por la matriz de leds y los ocho servomotores.

Cuadro 7.1: Resumen de los requerimientos de energía para la cabeza del robot.

Elemento	Sección	Tensión (V)	Corriente (A)	Potencia (W)
Sony ILCE-QX1	Cabeza	2.7 (USB)	0.81	2.2
Cámara Térmica	Cabeza	5 (USB)	0.10	0.5
Kinect	Cabeza	5 (USB)	0.50	2.5
		12	0.21	2.5
Ventilador (Silent Wings 2)	Cabeza	5	0.36	1.8
		7	0.26	1.8
		12	0.15	1.8
Cara emocional	Cabeza	5	7.00	35
Motor	Cuello	24	1.25	30
Controlador	Cuello	5	0.20	1

La cámara Sony ILCE-QX1 y la cámara térmica son parte de la tabla 1, pero la batería se carga a través de un cable USB, por lo que el sistema de alimentación dispondrá de un tomacorriente regular para su alimentación. Esto se considerará en el diseño más adelante cuando se considere un inversor para alimentar estos componentes. Nótese que la potencia requerida por estos elementos es relativamente baja, por lo que el impacto en la potencia total es mínimo.

La cámara Sony ILCE-QX1 y la cámara térmica son parte de la tabla 7.1, pero la batería se carga a través de un cable USB, por lo que el sistema de alimentación dispondrá de un tomacorriente regular para su alimentación. Esto se considerará en el diseño más adelante cuando se considere un inversor para alimentar estos componentes. Nótese que la potencia requerida por estos elementos es relativamente baja, por lo que el impacto en la potencia total es mínimo.

### 7.1.3. Base móvil

La base móvil ocupa dos tipos de voltajes: 12 V para el controlador y 24 V para los motores (incluye frenos). En el informe final de Gómez [10] se hace referencia a una corriente máxima de 20 A para los motores, 4 A para los frenos y de 4 A para los controladores. Este trabajo de grado no detalla los consumos reales de cada componente, solo establece los valores de los fusibles que deberán ser utilizados.

En experimentos posteriores se determina que el voltaje de operación de los motores deberá ser de 48 V, el voltaje de los frenos de 24 V y el voltaje de los controladores de 12 V. El consumo de corriente será de 20 A para los motores, 4 A para los frenos y 4

A para los controladores. Esto se resume en la tabla 7.2, la cual es el punto de partida para seleccionar las fuentes del sistema de alimentación.

Cuadro 7.2: Resumen de los requerimientos de energía para la base móvil del robot humanoide.

Componente	Tensión (V)	Corriente (A)	Potencia (W)
Controlador	12	4	48
Frenos	24	4	96
Motores	48	10	480

#### 7.1.4. Torso

El torso del robot humanoide incluye los siguientes elementos: dos servidores centrales, la mano robótica, el controlador de la mano robótica y los dos brazos; a los cuales se les debe proporcionar potencia eléctrica. Nótese en la tabla 7.3 que el voltaje requerido por estos elementos es 120 V (RMS), por lo que se debe analizar si en efecto, las cuatro baterías permitirían a estos componentes funcionar con autonomía suficiente.

Cuadro 7.3: Resumen de los requerimientos de energía para el torso del robot [3].

Componente	Potencia (W)	Cantidad	Subtotal (W)
Mano robótica	120	1	120
Brazos robóticos	1100	2	2200
Servidores	300	2	600

El brazo robótico, a pesar de tener una potencia nominal de 1100 W, tiene un consumo de potencia promedio mucho menor, de aproximadamente 300 W. Los cálculos de autonomía que se realizarán más adelante considerarán este valor de potencia.

## 7.2. Diseño del sistema de alimentación

El sistema de alimentación tiene como entrada las cuatro baterías de 12 V conectadas en serie y como salida, los diferentes voltajes requeridos. Los voltajes de salida de este sistema de alimentación, deben ser en principio, de dos tipos: corriente directa y alterna. El hecho de que haya elementos que utilizan corriente alterna obliga a la utilización de un inversor, cuyas características deben ser suficientes para proporcionar la potencia requerida.

### 7.2.1. Convertidores DC a DC

En la tabla 7.4 se muestran las fuentes de alimentación necesarias para suplir las necesidades de corriente directa del robot humanoide. Las primeras tres fuentes son para la cabeza del robot humanoide y las últimas tres de la tabla son para la base móvil. Nótese que se adquirieron fuentes independientes para la cabeza y la base, esto para poder realizar pruebas en forma independiente y para no mezclar los circuitos de mayor potencia de la base móvil, con los circuitos de baja potencia del sistema de percepción de la cabeza.

Las fuentes de alimentación que se utilizan son aisladas, es decir, incorporan un transformador para conseguir aislamiento galvánico. La colocación de un transformador garantiza una protección para la red de usuario, al colocar un componente de protección entre el voltaje de entrada y el voltaje de salida, esto es particularmente importante en convertidores DC a DC que disminuyen el voltaje de entrada. En caso de que el transistor de conmutación quede en corto circuito, la carga a la salida del convertidor quedaría a un voltaje más alto, dañando los componentes del robot y perdiendo la enorme inversión que ha realizado el laboratorio en comprar estos componentes.

Cuadro 7.4: Convertidores DC a DC necesarios para el robot humanoide

Tensión (V)	Elemento	Potencia (W)	Potencia adquirida (W)	Número de parte
5	Cabeza	36	40	ESTW010A0A41Z
12		4.3	5	418-EC4SAW-48S12N
24		30	30	PSD-30C-24
12	Base móvil	48	48	AEO04B48N-L
24		96	350.4	SD-350C-24
48		480	?	?
Potencia total (W)		694.3		

### 7.2.2. Inversor

En la tabla 7.5 se listan los elementos que se quieren alimentar con corriente alterna. La alimentación de estos componentes requiere de un inversor que debe transformar 48 VDC a 120 VAC. Nótese que la potencia de cada brazo robótico es de 300 W, el cual es el valor promedio de consumo. La potencia nominal no se ha considerado por ser un valor máximo que se alcanza bajo condiciones de uso muy específicas.

El costo de un inversor es proporcional a la potencia de salida, por tanto se debe decidir si todos los elementos se podrán conectar, o si se deberá excluir alguno por razones de costo o autonomía. El robot humanoide en la actualidad (2016) cuenta con

Cuadro 7.5: Elementos que se quieren alimentar con corriente alterna.

Elemento	Potencia (W)	Cantidad	Subtotal (W)
Brazos robóticos	300	2	600
Mano robótica	120	1	120
Servidores	300	2	600
Cámara Sony ILCE-QX1	2.2	2	4.4
Cámara Térmica	0.5	1	0.5
Total			1324.9

cuatro baterías de 12 V. Cada batería tiene una capacidad de 600 A y 160 minutos, es decir, una capacidad de 225 Ah. El sistema de alimentación debe proporcionar una autonomía razonable, teniendo como entrada las cuatro baterías y como salida los voltajes mencionados en la tabla 7.4 y 7.5.

La autonomía se calcula utilizando la ecuación 7.1: donde se usa la capacidad (C) y el voltaje de salida (T) del banco de baterías, así como la potencia requerida (PR) por la carga. Nótese que la ecuación también toma en consideración: el factor de potencia (FP), la eficiencia del sistema (ES) y el porcentaje de carga mínimo (CM).

$$\text{Autonomía (Horas)} = \frac{C(Ah) \cdot T(V) \cdot ES \cdot FP \cdot CM}{PR(W)} \quad (7.1)$$

Para efectos del cálculo de la autonomía se considerará un factor de potencia de 0.8, una eficiencia del 0.9 y un porcentaje de carga mínimo del 50%. La capacidad del banco de batería es del 225 Ah y el voltaje de salida son 48 V. La potencia requerida se aproximará a 1325 W y por el momento no se tomará en cuenta el consumo de los convertidores DC a DC, pues se quiere hacer una primera aproximación de la autonomía del robot.

$$\text{Autonomía (Horas)} = \frac{225Ah \cdot 48V \cdot 0,9 \cdot 0,8 \cdot 0,5}{1325W} = 2,934horas \quad (7.2)$$

Este tiempo de autonomía no es razonable, principalmente porque se está considerando que todos los equipos alimentados por el inversor están siempre en funcionamiento, lo cual raramente sucede. Es necesario aplicar factores de ajuste para tener un cálculo más preciso de la autonomía del robot humanoide. El inversor que debe adquirir el laboratorio debe poder convertir 48 VDC a 120 VAC, con una potencia de salida mínima de 1325 W.

### 7.2.3. Autonomía

La ecuación (1) no toma en consideración dos aspectos: el consumo de potencia de los convertidores DC a DC que alimentan las cargas que funcionan con corriente directa y el factor de uso (FU) de cada elemento en el robot humanoide. La base móvil, a pesar de tener un consumo de potencia relativamente alto, no se encuentra en funcionamiento todo el tiempo; lo contrario sucede con los servidores y el sistema de percepción, pues estos elementos estarán en funcionamiento casi el 100 % del tiempo. Esto se considerará como factor de uso dentro de los cálculos de autonomía. La ecuación (2) toma en consideración estos aspectos al considerar la potencia total efectiva (PTE) que toma en cuenta el factor de uso y las cargas que funcionan con corriente directa:

$$\text{Autonomía (horas)} = \frac{C(Ah) \cdot T(V) \cdot EF \cdot FP \cdot CM}{PTE(W)} \quad (7.3)$$

El cálculo de la potencia total efectiva (PTE) se realiza a partir de la ecuación (3), nótese que se multiplica el factor de uso (FU) de cada elemento por la potencia respectiva. La potencia total efectiva permite modelar de forma más precisa la autonomía expresada en la ecuación (2) al tomar en consideración el hecho de que los componentes del robot humanoide no siempre están en funcionamiento.

$$PTE = \sum_{i=0}^n PT_i \cdot FU_i \quad (7.4)$$

El cálculo del factor de uso de todas las cargas del robot humanoide se muestra en la tabla 6. Nótese que se ha asignado un valor a cada elemento del robot humanoide, basado en una proyección de la frecuencia de utilización de cada uno. Esto permitirá calcular la autonomía en forma más exacta y precisa. Por ejemplo, el factor de uso de la mano robótica es de 0.3, lo cual indica que la mano estará en funcionamiento el 30 % del tiempo; por otro lado otros elementos como: los servidores, los controladores de la base y la cámara Sony ILCE-QX1, tienen un factor de uso unitario, es decir, estarán en funcionamiento el 100 % del tiempo.

El cálculo de la autonomía considera de la misma forma un factor de potencia de 0.8, una eficiencia total del sistema de 0.8 y una carga mínima de las baterías del 50 %. El cálculo de la autonomía arroja un valor de 3.5935 horas, lo que son tres horas y treinta minutos aproximadamente. Este valor es bajo, pero razonable, de acuerdo a las tareas que deberá realizar el robot humanoide:

$$\text{Autonomía (horas)} = \frac{225Ah \cdot 48V \cdot 0,9 \cdot 0,8 \cdot 0,5}{1081,95} = 3,5935 \text{ horas} \quad (7.5)$$

Cuadro 7.6: Cálculo de potencia efectiva del robot humanoide.

Elemento	Potencia (W)	Factor de uso	Potencia efectiva (W)
Mano robótica	120	0.3	36
Brazo robótico	600	0.3	180
Servidores	600	1.0	600
Cámara Sony ILCE-QX1	4.4	1.0	4.4
Cámara térmica	0.5	0.5	0.25
Cara emocional y controlador del cuello	40	0.7	28
Ventilador y Kinect	5	0.7	3.5
Conjunto de motores del cuello	30	0.3	9
Controladores de la base móvil	48	1.0	48
Frenos de la base móvil	96	0.8	76.8
Motores de la base móvil	480	0.2	96
<b>Potencia Total Efectiva</b>			<b>1081.95</b>

#### 7.2.4. Diagrama unifilar

La figura 2 muestra el diagrama unifilar del sistema de alimentación. Este diseño tiene una autonomía de cuatro horas y veinte minutos. Nótese que los brazos robóticos se conectarán directamente a la red. En total se requieren seis convertidores DC a DC y un inversor. El banco de baterías es de cuatro baterías de 12 V y 225 Ah, cada una.

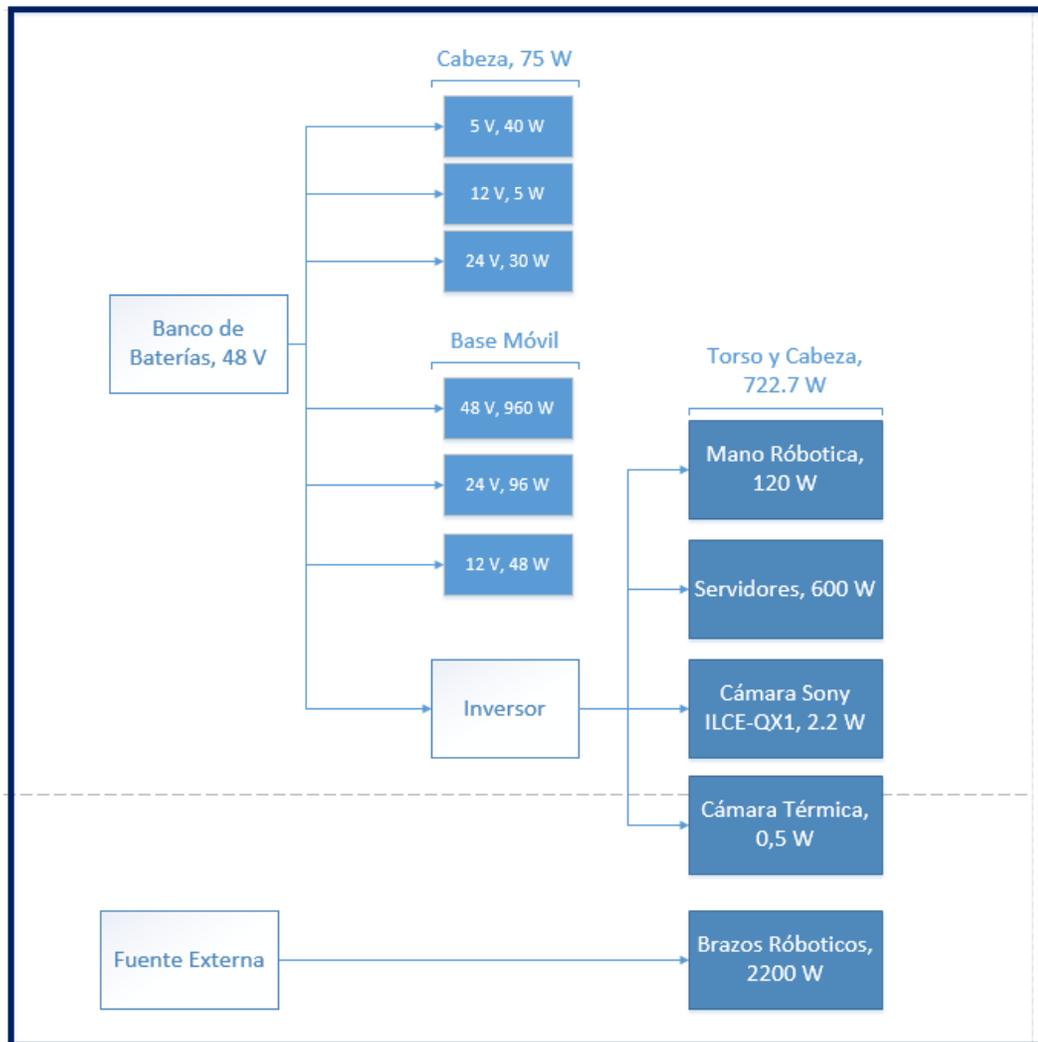


Figura 7.2: Diagrama unifilar del sistema de alimentación del robot humanoide.

# Capítulo 8

## Integración global y pruebas

### 8.1. Arquitectura robótica

El término “arquitectura robótica” puede referirse a dos conceptos diferentes: la estructura y el estilo. La **estructura** se refiere a como el sistema se divide en subsistemas y como estos interactúan, la cual es representada informalmente usando diagramas de caja y flechas. El **estilo** se refiere a los conceptos computacionales que sigue el sistema robótico en cuestión. Todos los sistemas robóticos poseen una estructura y un estilo, sin embargo, en un sistema dado es difícil determinar la arquitectura y el estilo, pues puede poseer varios estilos y las fronteras entre los diferentes subsistemas podrían no estar claras [28].

Los sistemas robóticos tienen ciertos requerimientos especiales, pues los sistemas robóticos necesitan interactuar asíncronamente en tiempo real en un ambiente incierto y dinámico. La primera arquitectura robótica comenzó con el robot Shakey en la Universidad de Stanford a finales de los años 60. La arquitectura de este primer robot se componía de tres elementos: sensado, planeamiento y ejecución. El subsistema de sensado traducía la imagen en un modelo interno. El subsistema de planeamiento tomaba este modelo y una meta para generar un plan, el cual luego era ejecutado por el robot. Este enfoque es denominado paradigma “sensar-planear-actuar”. Nótese que su principal característica es que el plan es ejecutado sin usar directamente la información de sensado [28].

#### 8.1.1. Arquitectura de tres capas

La arquitectura robótica de tres capas: planeamiento, ejecución y control en tiempo real; ha sido ampliamente usada en los últimos años. La capa de planeamiento almacena

metas y actividades a largo plazo. La capa de ejecución es responsable de traducir planes de alto nivel en comportamientos de bajo nivel. La capa de control es el nivel más bajo de la arquitectura robótica, pues conecta actuadores y sensores. Existen lenguajes específicos para esta capa como lo son: ALFA, Behavioral Language y Rex [28]. Estas tres capas necesitan comunicarse e intercambiar datos entre ellas.

La figura 8.1 muestra la arquitectura propuesta en este proyecto de grado para el robot humanoide. La primera parte denominada “Sistema de razonamiento, planeamiento y conocimiento” traduce un lenguaje de alto nivel a un lenguaje de acción. El lenguaje de acción es procesado por un “Sistema de Modelo de Objetos” para generar los comandos y las coordenadas de los movimientos a ser ejecutados por el robot. Por último, estos comandos son traducidos a comandos específicos correspondientes al robot.

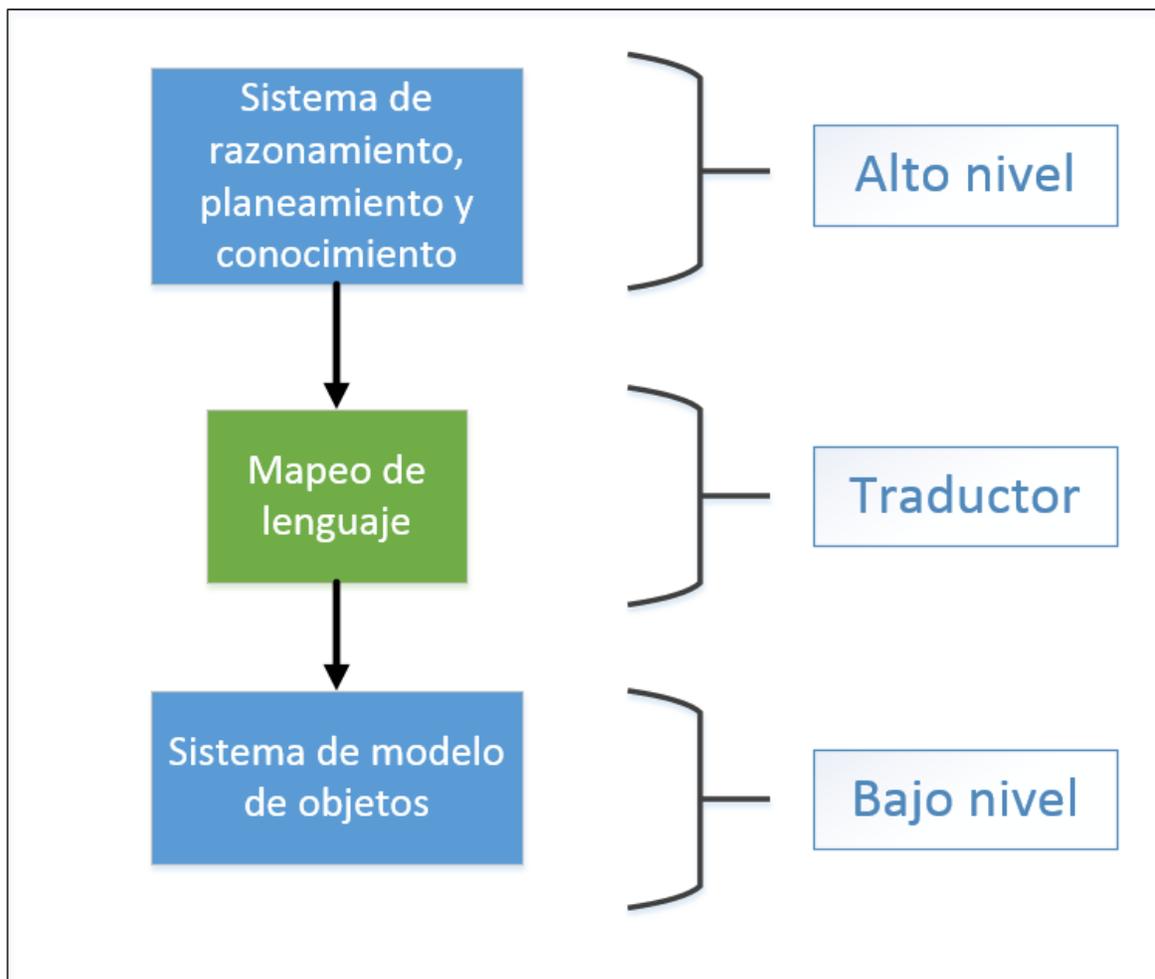


Figura 8.1: Arquitectura del sistema.

La figura 8.2 muestra el proceso de traducción de la oración “Sírname un vaso de leche”. El sistema de alto nivel traduce la instrucción en lenguaje natural a un conjunto de

instrucciones en lenguaje de acción. El sistema de razonamiento también determina las acciones que minimizan la cantidad de recursos necesarios para cumplir el objetivo. El componente de mapeo selecciona el modelo del objeto, las propiedades, la posición y el valor deseado, de cada instrucción del lenguaje de acción. Por último, el sistema de modelo de objetos comanda el sistema de control de la articulación robótica a partir de las instrucciones proporcionadas.

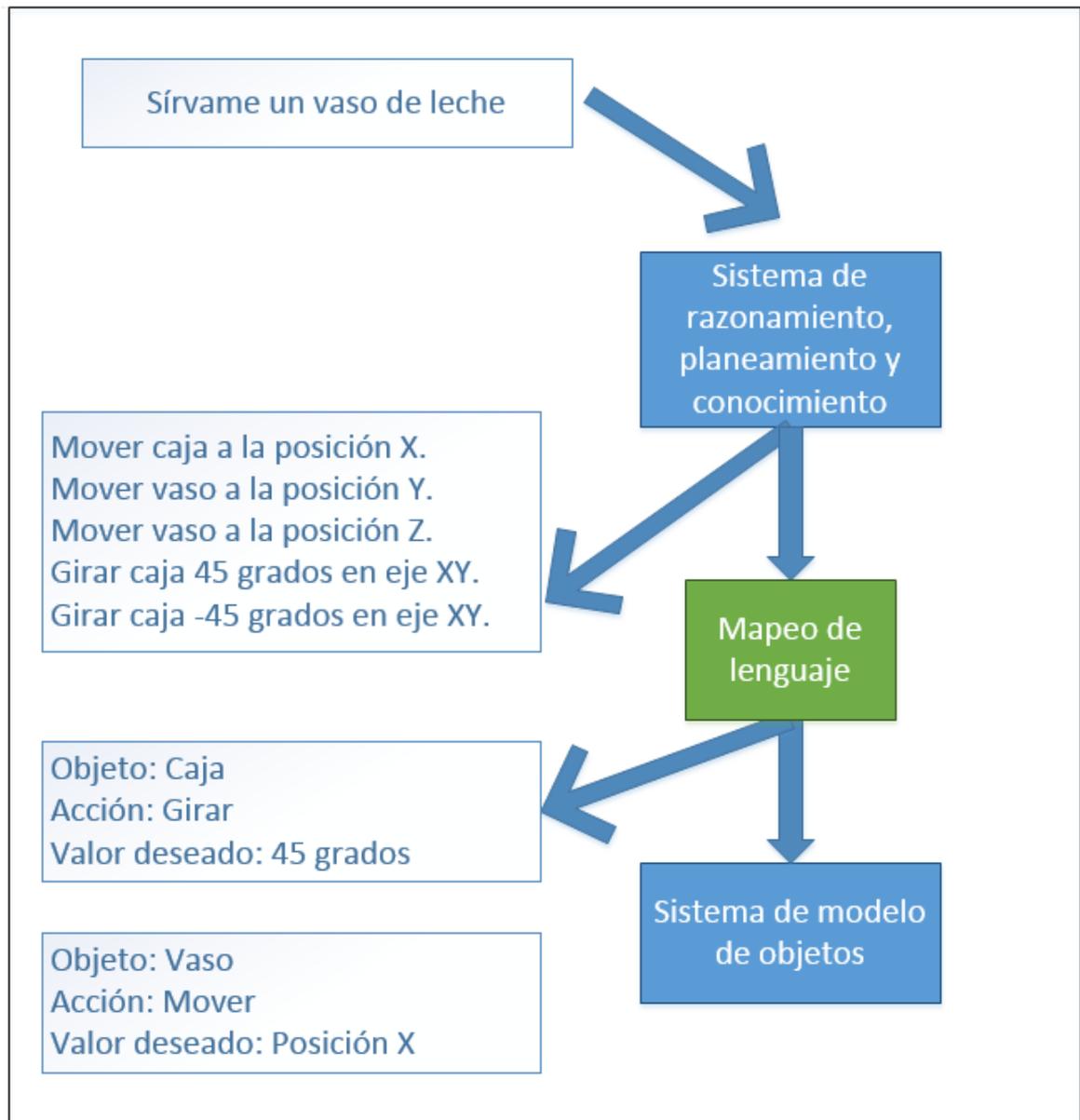


Figura 8.2: Ejemplo de mapeo.

Las instrucciones o comandos en lenguaje de acción son generados por el sistema de

alto nivel. Estas instrucciones deben ser lo más atómicas y simples posibles para ser ejecutadas por el modelo de objetos. La forma es que esta instrucción atómica se acopla al modelo de objetos está siendo abordada por Suárez [30]. La hipótesis inicial parte de que un sistema de mapeo es una solución factible a este problema.

El sistema de mapeo consiste en identificar en el lenguaje de acción: el objeto, la acción y el valor deseado. Estos valores son proporcionados al modelo de objetos, el cual se comunica directamente con los actuadores y sensores del robot. La figura 8.3 describe el proceso de acoplar la instrucción en lenguaje de acción al modelo de objetos. El sistema de alto nivel produce una instrucción, la cual es mapeada en: selección de la posición (valor deseado) y selección del objeto (acción y objeto). Las propiedades del objeto son seleccionadas una vez que se ha identificado el objeto. Nótese que se ha agregado una base de datos de posiciones al sistema para almacenar la posición de los objetos en el escenario de prueba y proporcionar los valores numéricos precisos a los objetos del sistema.

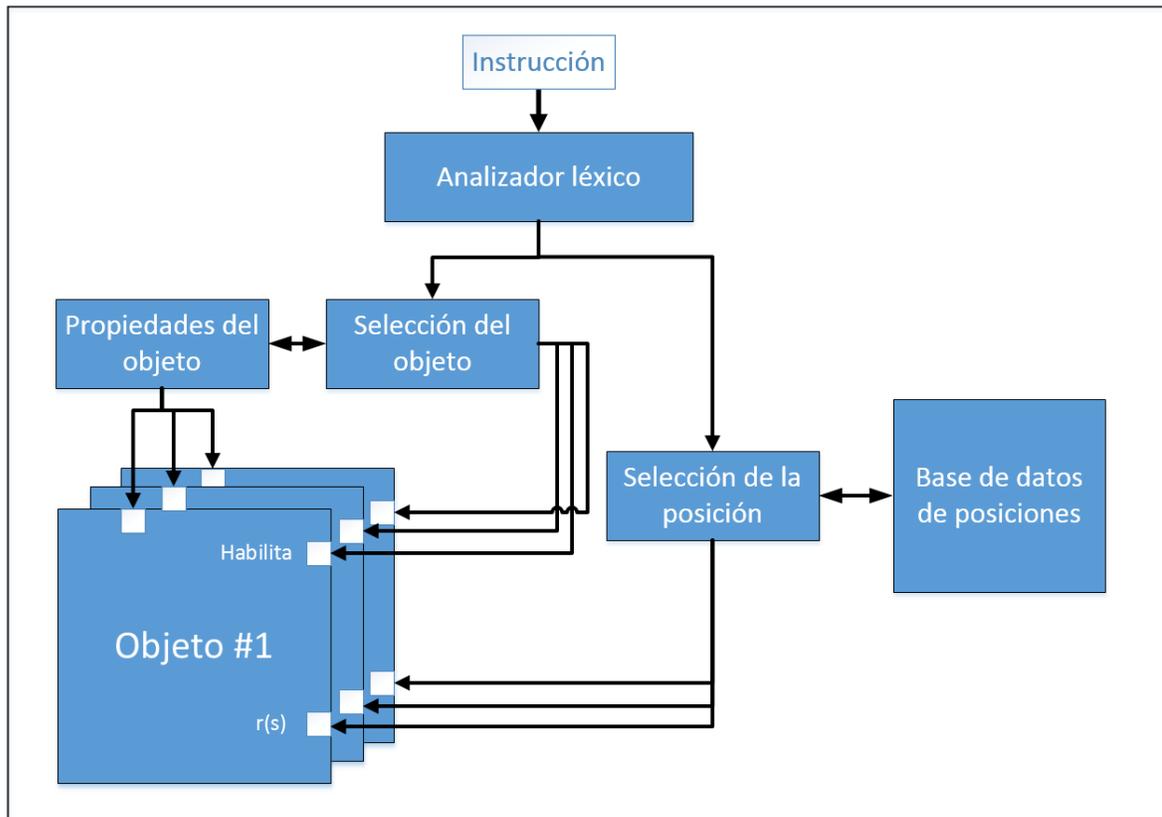


Figura 8.3: Ejemplo de mapeo.

### 8.1.2. Modelos de objetos

La principal tarea de este componente es predecir y controlar el comportamiento del objeto. Un modelo de objeto es una descripción matemática del comportamiento del objeto, es decir, un sistema dinámico donde las entradas al sistema pueden ser cualquier cosa que el robot pueda transmitir al objeto y las salidas son cualquier cosa que el robot puede medir o inferir. El modelo de un objeto es un conocimiento de como se comporta un determinado objeto ante un determinado estímulo.

El modelo del objeto nos permite determinar que hará el objeto bajo ciertas condiciones conocidas. Por ejemplo, se puede determinar cómo se moverá el objeto al aplicar una fuerza en un determinado punto del mismo, para lo cual se deberían contemplar ciertos fenómenos físicos como: fricción, rotación y gravedad. El modelo del objeto será diferente si el objeto es diferente y deberá contemplar la información de interés en relación al problema que se intenta resolver.

Existen tres métodos diferentes que se utilizan para construir el modelo de objetos: aprendizaje de máquina, identificación del sistema e identificación de parámetros [31]. En caso de usar ‘aprendizaje de máquina’ el robot explora el objeto y realiza mediciones. Posteriormente, a través de un algoritmo de aprendizaje, se obtiene el modelo. En caso de usar ‘identificación de sistemas’ el objeto se explora con diferentes entradas, se analizan las salidas y se obtiene la función de transferencia. Este método es usado tradicionalmente en control automático para obtener el modelo de una planta o proceso.

Por último, el método de ‘identificación de parámetros’ presenta ventajas importantes, esto debido a que un modelo bien realizado puede ser aplicado a una gran cantidad de objetos y, aún así, ser muy compacto. Este método primero hace uso de las ecuaciones obtenidas de la física y mecánica de los cuerpos, para luego identificar los parámetros del modelo obtenido de forma experimental. Por ejemplo: Un cuerpo en movimiento sobre una superficie plana presenta un coeficiente de fricción dinámica, el modelo en este caso está dado por:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}_a}{m} - \mu_d mg$$

La respuesta del objeto es la aceleración  $\vec{a}$  y la entrada es la fuerza aplicada  $\vec{F}_a$ . Nótese que obteniendo el modelo aplicando las leyes de la mecánica clásica (método de identificación de parámetros) es posible predecir la respuesta del objeto ante una determinada fuerza aplicada. El cálculo de la respuesta necesita la determinación de dos magnitudes físicas: la masa del cuerpo y el coeficiente de fricción. Ambos se obtienen realizando mediciones, en el primer caso a través de una báscula, en el segundo a través de un experimento más elaborado.

En un escenario compuesto de múltiples objetos, se deberá contar con una librería de objetos, es decir, un conjunto de modelos matemáticos que describen el comportamiento de los objetos. Los modelos de objetos pueden ser analíticos o consistir en descripciones algorítmicas, físicas o espaciales del objeto. En la actualidad se está realizando amplia investigación para generar librerías de objetos y ponerlas a disposición de la comunidad de investigadores en robótica [32].

### 8.1.3. Parámetros

El modelo de un objeto tiene parámetros, como pueden ser: tamaño, peso, volumen, fricción, temperatura, entre otros. Esto es conocido como propiedades del objeto. Por ejemplo, en el caso de una caja que es empujada por una articulación robótica, los siguientes parámetros son considerados en el artículo de Ruiz, Cheng y Beetz [31]:

- Dimensiones del objeto: El robot, en lugar de explorar el objeto, toma un modelo CAD del mismo.
- Peso: Es necesario que se conozca para calcular la fricción y el torque, los cuales son parte del modelo.
- Coeficiente de fricción: Este valor se obtiene experimentalmente al ir aumentando la fuerza entre la superficie y la caja.

## 8.2. Integración global de datos

La figura 8.4 muestra, en un sola imagen, la interconexión de todos los elementos del robot humanoide. El diagrama incluye los cuatro sistemas principales: cabeza, sistema de manipulación, torso robótico y base móvil omnidireccional. En el diagrama se especifica el tipo de conexión entre los componentes, por ejemplo, la conexión entre la mano robótica y el cluster se da a través de un cable Ethernet.

## 8.3. Integración global de potencia

El diagrama de la figura 8.5 muestra como se distribuye la potencia entre todos los componentes del robot humanoide. Las fuentes especificadas son convertidores DC a DC los cuales se detallaron en el capítulo anterior. El sistema de alimentación posee en total seis convertidores DC a DC, de los cuales ya se adquirieron tres; las otras tres fuente están en proceso de compra.

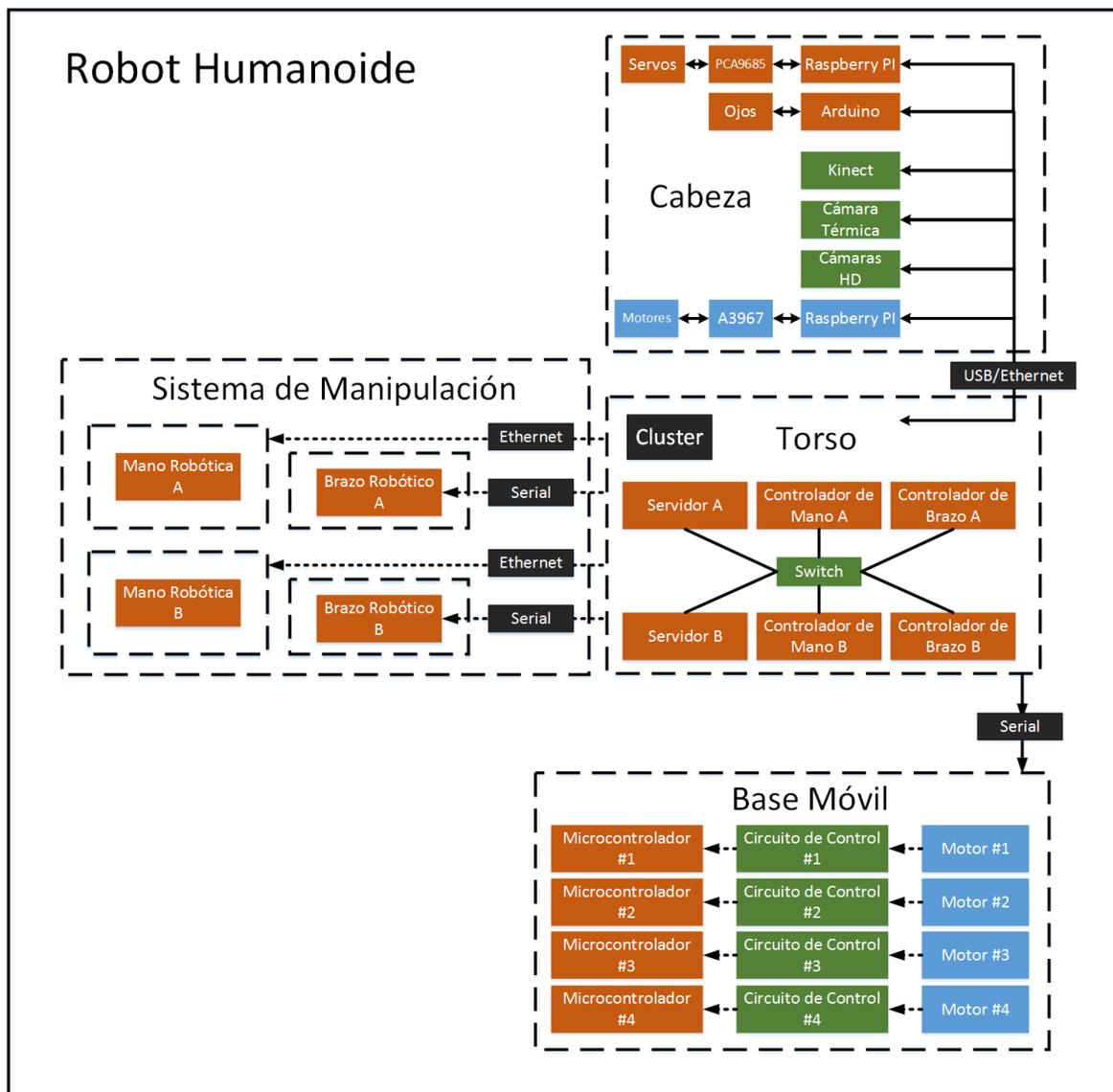


Figura 8.4: Integración de todas las señales de comunicación del robot humanoide.

Nótese que el inversor distribuye potencia a la cabeza, al sistema de manipulación y a los servidores. Los brazos robóticos no están conectados al inversor, esto porque se planea conectarlo a una fuente de alimentación externa debido a los altos requerimientos de potencia de los mismos. El análisis detallado de esto se muestra en el capítulo anterior.

## 8.4. Pruebas de funcionamiento

Las pruebas de funcionamiento se llevaron a cabo en el conjunto de manipulación de objetos, las cuales consisten en dos rutinas de movimientos, las cuales poseen como objetivo validar lo realizado a lo largo del proyecto, ya que son las responsables de verificar que los elementos correspondientes a la mano y el brazo del robot humanoide cumplan los requisitos estipulados. Estas pruebas también permiten visualizar el comportamiento de dichos elementos en labores de manipulación, en las cuales se emplean diferentes modos de operación del brazo para brindar mayor versatilidad al usuario, quien podrá seleccionar el que se adapte mejor a sus necesidades.

El **método por compensación de gravedad** permite una mayor facilidad al usuario para movilizar el robot, ya que se encarga de guiar el brazo a la posición deseada, por lo que para labores de demostración o de futuras tareas de aprendizaje del robot resulta útil. No obstante, para manipular objetos es un método en el que debe definirse una nueva herramienta cada vez que se desea manipular un objeto diferente, sino la compensación no se dará y el brazo tenderá a caerse, de forma que se puede convertir en un método ineficiente cuando se desea utilizar en un área de trabajo dinámica, donde los objetos cambian constantemente.

Posteriormente a la calibración se decide realizar las pruebas de funcionamiento del conjunto de manipulación a través del control por posición y FRI, ya que este primer método es independiente del peso y la forma del objeto con que se trabaja, mientras que FRI representa la nueva característica del brazo y es el encargado de permitir la transferencia de datos entre éste y el computador externo.

La primera rutina se observa en la figura 8.6, la cual consiste en agarrar un objeto en una posición, en este caso una bola de espuma color rojo, de parte de un usuario, luego se moviliza el brazo robótico mediante el *teach pendant* para lograr posicionar la mano sobre una caja de cartón y depositar la bola dentro de ésta. Cabe destacar que los movimientos de articulaciones realizados en esta sección pretenden emular el comportamiento de una persona cuando realiza la misma acción.

Luego se realiza la rutina a través de FRI para comprobar la nueva característica del brazo robótico, la cual corresponde a la comunicación y transferencia de datos con un computador externo. Para llevar a cabo el movimiento del elemento se utilizó el programa *LWRJointPositionControlExample*, y de igual manera que en el caso anterior, se sujetó el objeto a través del software de control de la mano (FFH).

En la figura 8.7 se observa el comportamiento senoidal del brazo, de forma que durante la trayectoria realizada por el mismo, todas las articulaciones siguen la misma secuencia y giran simultáneamente, por lo que se logra apreciar un movimiento de mayor fluidez en comparación con la primera rutina implementada.

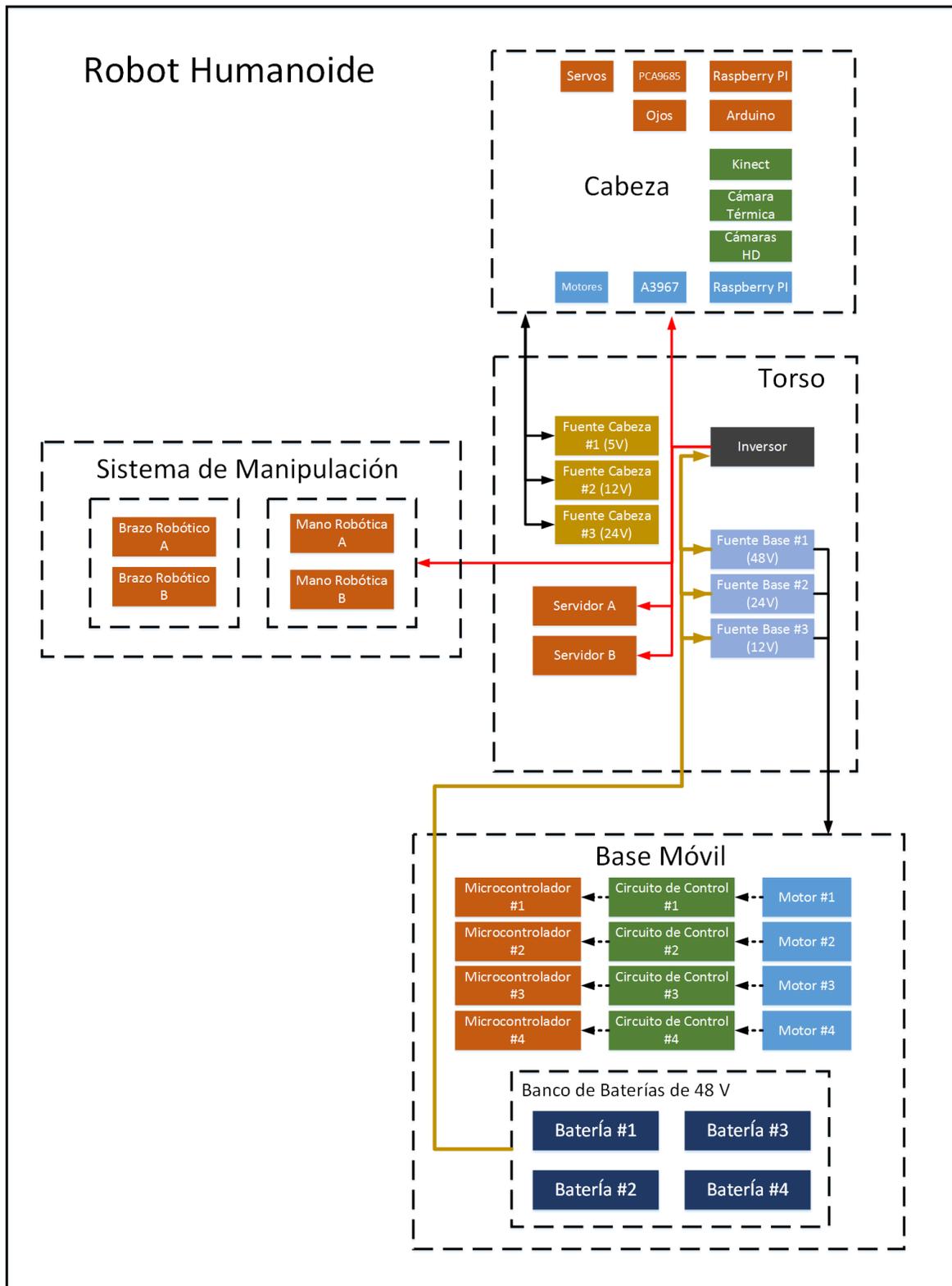


Figura 8.5: Integración de todas las señales de comunicación del robot humanoide.

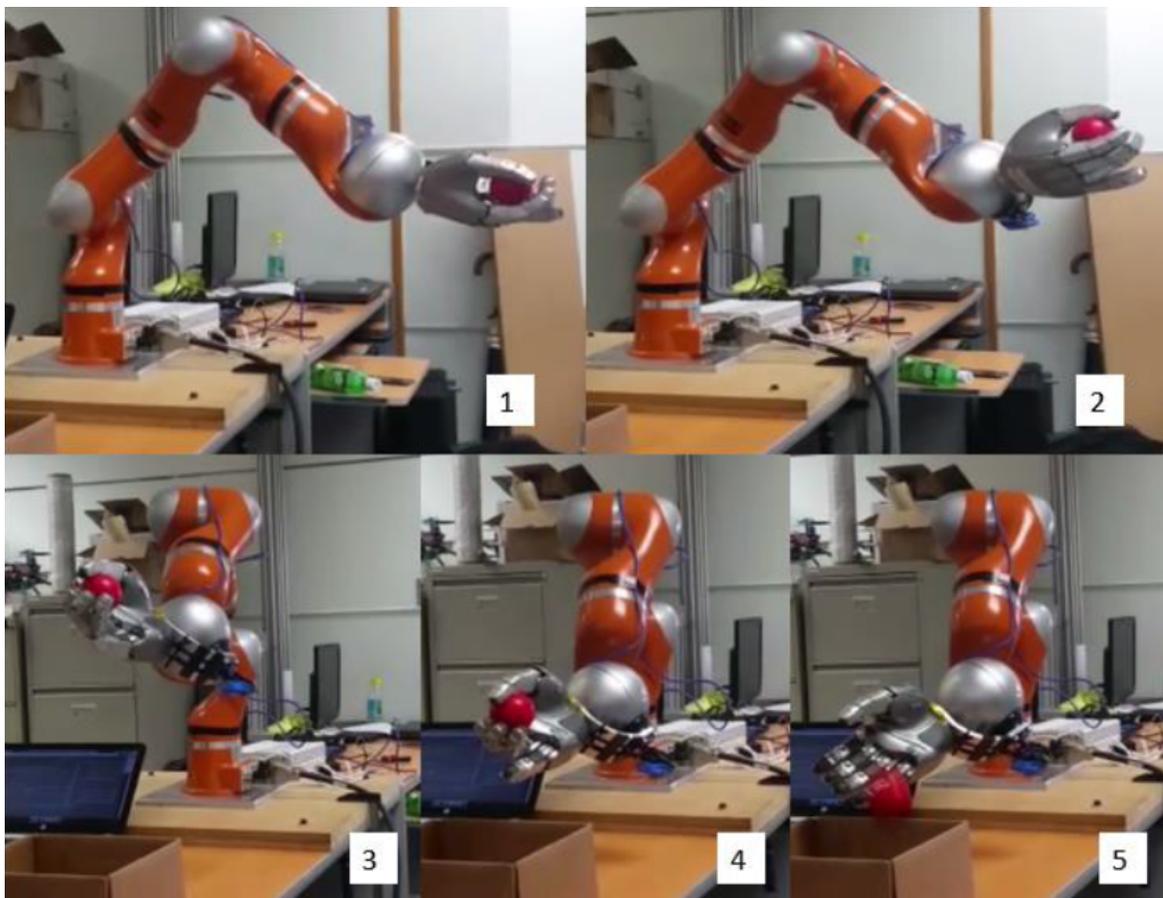


Figura 8.6: Primera rutina de manipulación con el robot humanoide.

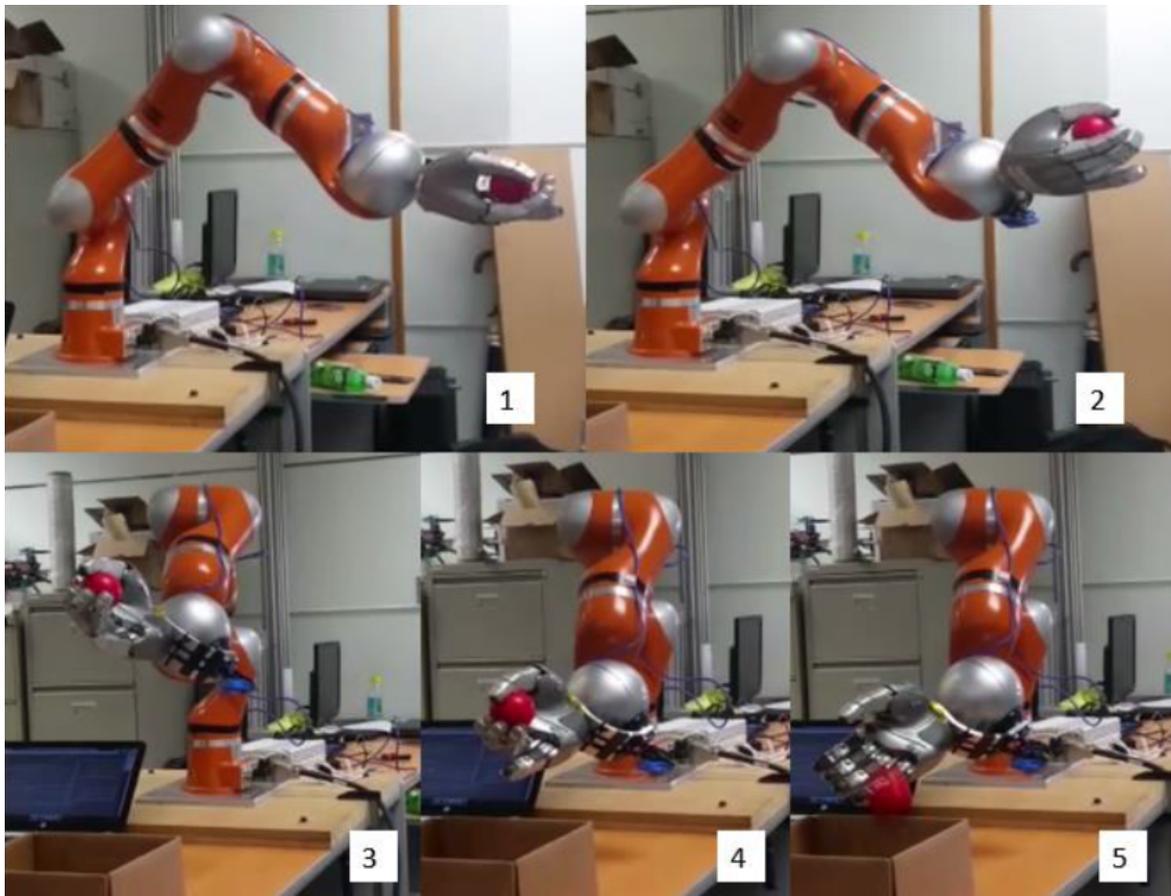


Figura 8.7: Segunda rutina de manipulación con el robot humanoide.

# Capítulo 9

## Conclusiones y recomendaciones

La construcción del robot humanoide no se completó en su totalidad, pero si se tuvo un avance muy importante en el diseño y la construcción del mismo. La cabeza del robot humanoide se completó en un 95 %. El diseño del torso del robot humanoide se completó en su totalidad y se le añadieron algunas mejoras importantes, por lo que el avance se estima en un 70 %. La base móvil se finalizó con un 85 % de avance. El sistema de manipulación avanzó en un 90 %. En cuanto a componentes de software el avance se estima en un 30 %. En la actualidad se cuenta con software para la cámara Térmica y la cámara HD, así como una propuesta de la arquitectura robótica a utilizar, las cual está actualmente en desarrollo.

El robot humanoide del ARCOS-Lab es un proyecto **progresivo** e **iterativo**. El término “progresivo” significa que el mismo se desarrolla en forma incremental, donde en cada etapa se añaden más y mejores características. El término “iterativo” implica que el desarrollo del mismo debe pasar por varios ciclos de desarrollo. Por ejemplo, en la primera iteración de la cara emocional, que es la que describe en este proyecto, el entregable final consta de un prototipo impreso en 3D. Las siguientes iteraciones de este proyecto deberán utilizar materiales mas robustos y resistentes.

El proyecto tuvo un costo total de **196.67 millones de colones**, lo cual incluye: equipos, materiales y horas de ingeniería. La mano y los brazos robóticos fueron costeados por la Universidad de Costa Rica. El resto de los componentes se adquirieron con recursos propios de los mismos estudiantes y del director del laboratorio, este aporte se estima en **2.47 millones de colones**. Esto demuestra el compromiso de los miembros del laboratorio por aportar al desarrollo de este proyecto y favorecer a los futuros estudiantes del laboratorio con una plataforma que permita realizar investigación en robótica.

La búsqueda de financiamiento y apoyo de la empresa privada fue una constante en este proyecto y una de las labores que realizó el coordinador del proyecto y el director del

laboratorio. A pesar de que hubo un interés, de al menos dos empresas, por colaborar, no se consiguió ninguna ayuda de parte de ellas. En particular, se intentó que una de estas empresas donara los servidores del cluster, pero pese a la gestiones realizadas, al final no se pudo concretar nada.

Los sensores elegidos para este proyecto cumplen con los requerimientos de percepción necesarios para realizar las tareas establecidas y son **suficientes** para ampliar las funciones del robot en los entornos de trabajo establecidos. El **costo** fue un elemento que también se tomó en consideración en la adquisición de los sensores. En el caso particular de la cámara de alta definición, debido a las limitaciones presupuestarias, se decidió adquirir únicamente una cámara, lo que permitió disminuir los costos y seguir con el desarrollo de los subproyectos asociados. El laboratorio está pronto a adquirir un par de cámaras adicionales con mejores características las cuales se utilizarán en los proyectos subsecuentes.

En el presente proyecto se diseñó el sistema de alimentación del robot humanoide, se determinaron cuales elementos eran necesarios y se adquirieron las fuentes de alimentación para la cabeza, la cara y el cuello del robot. En el caso particular de la cabeza se especificaron y adquirieron los convertidores DC a DC. A pesar de que no se cuenta con todos los elementos del sistema de alimentación, este primer diseño es el punto de partida para una implementación final de este sistema y constituye también una avance muy importante respecto al estado inicial del robot.

La cara emocional del robot tuvo un avance significativo, pues en la actualidad se dispone de un prototipo funcional. La construcción de la cara se finalizó exitosamente, el hardware permite operar los servomotores y las matrices de leds. Adicionalmente, ya se han seleccionado el conjunto de emociones que resulta ser suficiente para los entornos de trabajo en los que se desempeñará el robot. A pesar de esto, algunos diseños se pueden mejorar, en particular las cejas, cuyos mecanismos no resultan ser lo suficientemente robustos. Los siguientes proyectos relativos a la cara emocional deberán abordar este problema.

El ARCOS-Lab dispone en la actualidad de un robot con un avance significativo en cada uno de sus partes. Los avances mas importantes se dieron en la cabeza donde se cuenta con una estructura robusta y una cara emocional funcional, incluyendo los convertidores DC a DC para alimentar cada elemento. En el caso del torso, el laboratorio cuenta con un diseño robusto, capaz de soportar y aumentar las capacidades de los brazos robóticos. En cuanto al sistema de manipulación, la integración se logró con un acople y la especificación del software necesario para manipular el brazo y la mano robótica. Por último, la base móvil cuenta con un diseño y construcción que requiere algunas mejoras importantes, cuyo estado final permite la operación de las ruedas sin carga.

Los estudiantes que participaron en la construcción del robot hacían las tareas como parte de un trabajo final de graduación o en algunas ocasiones “Ad-honorem”, con el

fin de ampliar sus conocimientos. Esto plantea una limitante en cuanto al tiempo y los recursos que cada estudiante podía dedicar a este proyecto, no porque los estudiantes no tuvieran un compromiso, sino porque existen limitaciones económicas que los obligan a estudiar y trabajar. En este sentido, la recomendación es que el laboratorio disponga recursos para pagarle a los estudiantes un salario por las tareas académicas que desempeñan en el laboratorio. En la actualidad el laboratorio está explorando diferentes fuentes de financiamiento para poder brindar esa oportunidad.

Este proyecto está proponiendo la arquitectura de tres capas para el robot humanoide y los modelos de objetos para abordar las complejas tareas de manipulación. Adicionalmente se propone crear un nodo ROS principal, nodos subalternos para los sensores y actuadores, así como un servidor de parámetros. En este proyecto se elaboraron dos nodos ROS, uno para la cámara térmica y otro para la cámara de alta resolución. Los elementos expuestos son el primer paso para la implementación de una arquitectura robótica completamente funcional.

Durante la administración de un proyecto, los objetivos deben establecerse de acuerdo a los **recursos materiales y humanos** de que se disponga. Esto fue particularmente importante durante la integración de los elementos de la cara emocional, donde se decidió utilizar como plataforma el Arduino para crear los ojos con la matriz de leds. Esa decisión se toma en parte porque los asistentes (recurso humano) destinados a realizar esta tarea tenían una formación previa en esta plataforma, pero carecían de las destrezas para implementar la solución es microcontroladores más complejos.

La granularidad y la división del trabajo fueron factores de éxito en este proyecto. Esto significa que las tareas debían ser **específicas** y estar bien **delimitadas**. Los proyectos pequeños y específicos tienen mayor probabilidad de éxito que los proyectos generales que intentan abarcar muchos elementos. Esto se pudo constatar durante la ejecución de este proyecto. Las futuras iteraciones de las diferentes partes del robot humanoide deberán tomar en cuenta este aprendizaje y también deberán encontrar formas de mantener alta la motivación de los estudiantes.

Existe una cantidad importante de trabajo futuro relacionado con la integración y desarrollo del robot humanoide. La cabeza está finalizada en su totalidad, se desarrolló software para sus sensores, pero aún se carece de una solución integral para utilizar esta información en la ejecución de tareas en los escenarios propuestos. Esto debe ser abordado en futuros trabajos finales de graduación.

Este trabajo contiene una propuesta de una arquitectura de software de tres capas para ser utilizada en el robot humanoide. También se propone la utilización de modelos de objetos para resolver el problema de la manipulación. En la actualidad hay varios estudiantes trabajando en este problema, lo que permitirá contar con una infraestructura adecuada de procesamiento. Este es trabajo futuro que surge como consecuencia de la propuesta realizada en este proyecto.

# Capítulo 10

## Apéndice A

El proyecto está pensado para completarse en 48 semanas, trabajando 10 horas a la semana y haciendo uso de las instalaciones y equipos disponibles en el ARCOS-LAB. El cronograma es el siguiente:

**Semana 1 a 10:** Planificar, coordinar y ejecutar las acciones para diseñar la cabeza del robot humanoide. La cabeza se divide en tres proyectos satélites que corresponden a diferentes partes de la misma: el cuello, la cabeza y la cara.

**Semana 10 a 14:** Establecimiento de requerimientos para los sensores que serán instalados en la cabeza. Cotización y solicitud de todos los materiales y equipos que serán necesarios.

**Semana 14 a 20:** Ejecución de las actividades para construir la cabeza del robot humanoide, una vez que esta ya ha sido diseñada. Es necesaria la integración y coordinación entre diferentes proyectos.

**Semana 15 a 25:** Planificar y coordinar las actividades de integración de los brazos, la mano, el torso y la base móvil del robot humanoide. Cotización y solicitud de todos los materiales y equipos que serán necesarios.

**Semana 20 a 22:** Establecer las necesidades de potencia eléctrica y transmisión de datos para los diversos elementos, esto porque los sensores y actuadores del robot requieren un suministro adecuado de energía y un medio físico para el transporte de datos.

**Semana 22 a 25:** Diseño y construcción de los elementos para distribuir la energía y transmitir datos entre diferentes elementos. Integración y coordinación entre los diferentes proyectos satélites.

**Semana 25 a 35:** Implementación del sistema computacional que manejará el software de integración robótica. Cotización y solicitud de todos los materiales y equipos que

serán necesarios.

**Semana 30 a 40:** Coordinación e implementación del sistema de encendido y apagado del robot humanoide. Cotización y solicitud de todos los materiales y equipos que serán necesarios.

**Semana 40 a 48:** Realización de pruebas básicas sobre distintos escenarios de prueba de asistencia a humanos. Realización de una informe completo del trabajo a partir del cual el mismo puede ser ampliado.

# Capítulo 11

## Apéndice B

La mano DLR HIT Hand II es un dispositivo muy delicado, por lo que se deben definir ciertas precauciones durante su utilización, tales como no mover los dedos de forma manual ya que se pueden dañar elementos internos, así como mantener el interruptor de emergencia cerca del usuario por si se requiere presionar durante su utilización.

Para utilizar la mano robótica primeramente se debe conectar tanto el controlador como el propio elemento a sus respectivas fuentes de poder, luego se debe verificar que el interruptor de emergencia se encuentre apagado, de ser el caso se continúa con el encendido de la fuente de poder de la mano. Al conectar la alimentación al controlador, éste inmediatamente se enciende.

La conexión entre la mano y el controlador se puede establecer mediante cable de red (Ethernet) o inalámbrico (Wifi) a través de la red del laboratorio. Se opta por el segundo caso debido a que el control del brazo robótico requiere la conexión Ethernet, por lo que si se desea manipular ambos elementos desde un mismo computador, solo de esta manera sería posible.

Posteriormente se debe configurar el computador personal a utilizar y el controlador de la mano, de una forma que sea posible ingresar a este último elemento como usuario *root* sin necesidad de contraseña, para llevar a cabo esto se hará uso de las llaves *ssh*.

### Ingreso al controlador de la mano robótica

El procedimiento que se muestra a continuación se utiliza para poder ingresar al controlador de la mano robótica, sin contraseña y desde un computador externo. Se debe destacar que estos pasos solamente deben ser ejecutados la primera vez que se desea establecer la conexión entre los elementos.

- Verificar que fueron creadas las llaves ssh. Estas se localizan en *home/.ssh/*. Las dos llaves se denominan: *ida\_rsa.pub* (pública) y *ida\_rsa* (privada).
- Establecer la conexión con la red del laboratorio. Por lo comentado anteriormente, se realiza la conexión mediante la red inalámbrica.
- Crear una conexión de red virtual mediante la ejecución del comando en la terminal: *sudo ifconfig wlan0:0 192.168.200.10 netmask 255.255.255.0*.

De esta manera se configura la dirección IP del computador para que sea compatible con la IP estática que posee el controlador de la mano.

- Verificar la comunicación entre el computador y el controlador mediante la ejecución del siguiente comando en la terminal: *ping 192.168.200.1 -c 4*.

Mediante este comando se envían paquetes de datos (específicamente cuatro) al controlador. Dentro de la consola es posible observar si se recibieron con éxito o por el contrario, el tiempo de espera se agotó y no se pudo cumplir dicha tarea.

- Realizar ssh al servidor mediante la ejecución del comando: *ssh root@192.168.200.1*. Esta IP ingresada es la dirección estática correspondiente a la del controlador de la mano.
- Ingresar la contraseña del servidor. Esta información se debe solicitar a Federico Ruiz Ugalde o a la persona encargada de la mano robótica en ese momento.
- Una vez ingresado al servidor, se debe ejecutar el siguiente comando el cual permite cambiar de directorio: *cd .ssh*

- Añadir la llave pública del computador externo utilizado de la siguiente forma:

```
echo ssh-rsa Datos_Llave_Publica >> authorized_keys
```

La sección definida como Datos\_Llave\_Publica hace referencia a la información que almacena el archivo *ida\_rsa.pub*.

- Si se desconoce el valor de Datos\_Llave\_Publica del paso anterior, se puede ejecutar el siguiente comando en la terminal para observarlo:

```
cat ~/.ssh/ida_rsa.pub
```

- Ejecutar el comando “exit” para salir del servidor.

En caso de que el *ping* que se realizó anteriormente produzca un error, se debe verificar que el servidor se encuentre encendido y conectado correctamente al enrutador. Por otro lado, si al tratar de conectar la mano mediante ssh se obtiene el error *SSH: DH\_GEX group out of range*, esto se debe a que las nuevas versiones de Debian y las funciones de vulnerabilidad han sido corregidas, sin embargo, este procedimiento no se

ha realizado para el controlador de la mano, como consecuencia se genera el error y se debe solucionar manualmente.

Este error se soluciona mediante un editor de texto al abrir el archivo “config”, ubicado en *home/.ssh*, y agregar la línea mostrada a continuación en la parte inicial del archivo, de esta manera se corrige el problema.

```
KexAlgorithms diffie-hellman-group-exchange-sha256,diffie-hellman-group14sha1,diffie-hellman-group1-sha1
```

Es importante recordar que el procedimiento anterior se debe realizar únicamente la primera vez que se intenta establecer la conexión entre el computador y el controlador de la mano. Para iniciar la conexión entre ambos elementos es necesario la ejecución de la siguiente línea en la terminal, seguidamente se debe ingresar la contraseña definida para la llave ssh (“passphrase”) con el comando *ssh-add*.

Se debe verificar que se encuentran instaladas las siguientes dependencias, en caso contrario, se debe llevar a cabo la respectiva instalación en el sistema:

- qt4qmake
- qt4-default
- autoconf
- automake
- libtool

Posteriormente, se debe solicitar permiso al encargado de la mano robótica para tener acceso a este repositorio, una vez logrado lo anterior, se realiza la copia del mismo, mediante git, al computador personal que se va a utilizar.

## Compilación e instalación de los programas

Para compilar, instalar y utilizar el nuevo repositorio, se debe llevar a cabo el siguiente procedimiento:

- Ubicar la librería “libard” de ARDNET en la siguiente dirección: `cd /local/src/hand-code/libard`
- Ejecutar el comando *autoreconf -i* para reconfigurar la instalación de la librería. Adaptar de la siguiente manera, la línea correspondiente al prefijo: *./configure -prefix=/home/user/local/DIR/libard*
- Se compila el código mediante el comando *make -j5*. En este caso se utiliza *-j5* debido a que se trabaja con un computador de cuatro núcleos, si se cuenta con

una cantidad diferente se debe adaptar el comando. Por ejemplo, para dos núcleos usamos: *make -j3*.

- Se instala el código compilado anteriormente *make install*.
- Acceder a la carpeta DIR, ubicada en la siguiente dirección `cd /local/DIR`.
- Instalar la librería mediante `xstow xstow libard`.
- Ubicar el código de la mano robótica en la siguiente dirección `cd /local/src/hand-code/FFH`.
- Ejecutar el siguiente comando para simplificar el proceso de construcción del código *qmake -r*.
- Ubicar el código de la mano robótica en la siguiente dirección `cd /local/src/hand-code/FFH`.
- Compilar el código de la mano robótica denominado FFH `make`.
- Acceder a la carpeta `hand_yarp`, ubicada en la siguiente dirección: `cd /local/src/hand-code/hand_yarp`.
- Compilar el programa con el comando *make*. Ahora se cuenta con los programas FFH y `hand_yarp` instalados.

## Programa FFH

- Si se desea utilizar el programa de control de la mano robótica FFH, se debe repetir el paso 8 y ejecutar el siguiente comando en la terminal `./FFH`.
- Presionar el botón “Start Communication” en la interfaz gráfica iniciada..
- Presionar la opción “Start FFH and System” en la interfaz gráfica.
- Presionar el botón “Start FFH and Operation” en la interfaz gráfica.
- Verificar la conexión de la mano con el computador mediante la opción “Port Status” en la interfaz gráfica. En caso de haber sido realizada correctamente, se debe observar el estado “port1 connected” en esta casilla.
- En la casilla correspondiente al puerto utilizado (“Port 1” o “Port 2”), deberá observarse el siguiente estado “this is a right hand!”, además, en la parte derecha de la interfaz gráfica se apreciarán los valores de torque y posición en cada dedo, lo que también verificará la correcta conexión de la mano robótica.
- Mediante la interfaz gráfica y la sección denominada “Enable Port”, se deben habilitar los dedos de la mano al presionar cada uno de los siguientes botones:

“Thumb En 1”, “Index En 1”, “Middle En 1”, “Ring En 1”. La opción denominada “Pinky En 1” no debe seleccionarse, ya que el dedo meñique no funciona actualmente.

- Verificar que los dedos se encuentre funcionando mediante la opción “Manual Control Mode”, la cual permitirá manipular los dedos de forma manual al desplazar las barras correspondientes a la parte inferior (“Inner”) y superior (“Outer”) de cada uno de ellos, además será posible movilizarlos hacia los lados mediante el abductor del dedo (“Abductor”).
- Si se desea realizar labores de manipulación mediante la mano, se deberá seleccionar la opción “Gesture Control Mode”, donde será posible llevar a cabo diferentes tipos de agarre que involucren una diferente cantidad de dedos.
- Para realizar un agarre mediante dos dedos se deberá oprimir el botón correspondiente a “2 Finger Grasp” en la interfaz gráfica, si se desea utilizar tres dedos se deberá seleccionar “3 Finger Grasp” y finalmente, si se requieren utilizar cuatro entonces será la opción “4 Finger Grasp”.
- Si se desea regresar la mano al estado normal (Figura 7.2), se deberá oprimir el botón denominado “Original Gesture” en la sección “Gesture Control Mode” de la interfaz gráfica.
- En caso de existir algún inconveniente durante el empleo de la mano, se podrá utilizar la opción “Emergency Stop” en la interfaz gráfica, no obstante, se recomienda realizar el paro de emergencia mediante el interruptor físico implementado en la conexión eléctrica de la mano.
- Para finalizar la conexión entre la mano y el computador externo, se debe cerrar el programa FFH

## Programa `hand_yarp`

- Si se desea ejecutar el programa `hand_yarp`, primeramente se debe iniciar el servidor de YARP mediante el siguiente comando en la terminal:

```
yarpserver
```

Nota: YARP debe de estar previamente instalado en el computador a utilizar.

- Repetir el paso 11 para ubicar la carpeta del programa y ejecutar en la terminal el siguiente comando `./ssh_hand.py`
- Abrir una nueva pestaña en la terminal (`ctrl + shift + t`) y ejecutar el siguiente comando:

*./hand\_yarp*

- En este paso se habilitan dos puertos en YARP, uno denominado `/hand/in` (de escritura) y el otro `/hand/out` (de lectura)
- Abrir nuevamente una pestaña en la terminal y habilitar un puerto en YARP de lectura mediante la ejecución del siguiente comando `yarp read /read`. Se habilita el puerto denominado `/read`.
- Comunicar el puerto de escritura de la mano robótica con el de lectura del computador `yarp connect /hand/out /read`
- Observar en la pestaña del puerto de lectura `/read` el continuo monitoreo de los valores pertinentes a posición y torque
- Para finalizar la comunicación se debe terminar el proceso (`ctrl + c`) del puerto de lectura `/read`, así como el programa `hand_yarp` y el servidor `yarpserver`.

Si se ha finalizado la labor de manipulación, se debe garantizar que la fuente de alimentación de la mano quede apagada y desconectada, además se debe retirar el cable de poder del controlador de la mano, ya que éste no se apaga directamente mediante un botón o interruptor.

## Implementación y uso de interfaz FRI

Primeramente, se verificará la dirección IP asignado al controlador del brazo robótico. Mediante el “teach pendant” se debe ejecutar el archivo “`vxwin.ini`” presente en el KRC, por lo que se debe acceder a la ventana correspondiente al explorador de archivos.

Una vez localizada dicha ventana, se debe seleccionar la carpeta correspondiente al disco duro principal, denotado como “C”, y luego abrir otra denominada “Windows”. Dentro de esta última opción se encontrará el archivo y se podrá ejecutar para su respectiva lectura o modificación.

El archivo “`vxwin.ini`” mostrará una información como la ejemplificada en la Figura B.5.1, es importante cerciorarse del valor de “e”, ya que este representa el IP del controlador del brazo. Dicho valor debe estar definido como 192.168.2.250, en caso contrario se debe modificar para conservarlo de esta manera.

Luego se debe especificar la dirección IP y el puerto necesario para el servidor remoto o computador externo, de manera que nuevamente se debe acceder a la ventana de explorador de archivos y en este caso, después de elegir el disco duro principal, se selecciona la carpeta denominada “KRC”. Dentro de esta última, se debe ingresar en “Roboter” y posteriormente a “INIT”, en donde se ubicará el archivo “`dlrrc.ini`” y se podrá apreciar la información que contiene (Figura B.5.2). Además, de ser necesario se

podrá modificar, con el objetivo de definir el IP del computador externo (“FRIHOST”), el cual corresponde a 192.168.2.113.

Se procede con la implementación de la interfaz FRI dentro del computador externo, el cual se recomienda que posea una distribución de Linux para la instalación y operación, en este caso se realizó mediante el sistema operativo Debian 8.0 y una arquitectura de 64 bits.

Se debe tener acceso a los repositorios internos del ARCOSLab, de esta manera poder clonar mediante git los archivos necesarios para la implementación del software, los cuales están almacenados en una carpeta denominada “fri\_stanford”, en la cual se pueden encontrar los programas creados mediante C++ (con extensión .cpp) que permiten monitorear y controlar el brazo robótico.

De igual forma que se realizó con el software de la mano robótica, se lleva a cabo la instalación de FRI mediante Xstow, sin embargo, si se utiliza una arquitectura de 64 bits se deben considerar ciertas modificaciones en los archivos para garantizar la comunicación entre el KRC y el computador externo. Estas modificaciones o pasos se detallan a continuación:

# Bibliografía

- [1] B. Borel. (2010) A ping-pong playing terminator. <http://www.popsoci.com/technology/article/2010-02/ping-pong-playing-terminator>.
- [2] J. Badger. (2013) Robonaut. <http://robonaut.jsc.nasa.gov/default.asp>. National Aeronautics And Space Administration (NASA).
- [3] I. Chávez Arbaiza, “Diseño del torso móvil para un robot humanoide.” Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2015.
- [4] O. Diegel, “Improved mecanum wheel design for omni-directional robots,” in *Proc. 2002 Australasian Conference on Robotics and Automation*. Institute of Technology and Engineering, Massey University, Auckland, 2002.
- [5] Definicion.de. Definición de antagonista. <http://definicion.de/antagonista/>.
- [6] J. C. Herrera Espinoza, “Diseño de una cara emocional para un robot humanoide.” Instituto Tecnológico de Costa Rica, Febrero 2016.
- [7] Adafruit. Adafruit neopixel neomatrix 8x8 - 64 rgb led pixel matrix. <https://www.adafruit.com/product/1487>.
- [8] D. Perez, “Diseño del sistema de orientación para movimiento y soporte de cabeza de robot humanoide.” Instituto Tecnológico de Costa Rica, Junio 2016.
- [9] E. Aguilar Céspedes, “Integración del conjunto de manipulación de objetos del robot humanoide del arcos-lab.” Instituto Tecnológico de Costa Rica, Noviembre 2016.
- [10] F. Gómez Salazar, “Diseño, construcción y puesta en marcha de una base móvil omnidireccional para el laboratorio arcos-lab.” Universidad de Costa Rica, Mayo 2015.
- [11] N. E. Nava Rodriguez, *Advanced Mechanics in Robotic Systems*. Springer London, 2011.
- [12] J. H. Low, W. W. Lee, P. M. Khin, N. V. Thakor, S. L. Kukreja, H. L. Ren, and C. H. Yeow, “Hybrid tele-manipulation system using a sensorized 3-d-printed soft robotic gripper and a soft fabric-based haptic glove,” pp. 880–887, Abril 2017.

- [13] T. Feix, I. M. Bullock, and A. M. Dollar, “Analysis of human grasping behavior: Correlating tasks, objects and grasps,” *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 7, no. 4, pp. 430–441, Octubre 2014.
- [14] X. Zhao, “Humanoid robot design,” in *The Proceedings of the Second International Conference on Communications, Signal Processing, and Systems*, vol. 246, 2014, pp. 367–375.
- [15] A. Faiola. (2005) Humanoids with attitude. <http://www.washingtonpost.com/wp-dyn/articles/A25394-2005Mar10.html>.
- [16] K. Mitsui, “An under-actuated robotic hand for multiple grasps,” in *2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. IEEE, 2013, pp. 5475–5480.
- [17] C. Lovchik. The robonaut hand: A dextrous robot hand for space. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.206.1860&rep=rep1&type=pdf>.
- [18] C. Arauz, “Construcción y puesta en funcionamiento de una unidad pan-tilt para la cabeza del robot humanoide del laboratorio arcos-lab.” Universidad de Costa Rica, 2015.
- [19] P. Fitzpatrick, “A middle way for robotics middleware,” *Journal of Software Engineering for Robotics*, 2014.
- [20] YARP. (2014) What exactly is yarp? [http://www.yarp.it/what\\_is\\_yarp.html](http://www.yarp.it/what_is_yarp.html). Yet Another Platform Robot (YARP).
- [21] ROS. (2014) Higher-level concepts. <http://wiki.ros.org/ROS/Concepts>. Open Source Robotics Foundation.
- [22] H. Bruyninckx. Open robot control software. <http://www.orocos.org/>. The Orococos Project.
- [23] S. Chinchilla Gutiérrez, “Articulación con control por impedancia.” Universidad de Costa Rica, 2014.
- [24] F. Medina. Control de fuerza por impedancia y estudio de un sensor de fuerza para una prótesis de mano de nueve grados de libertad. [http://www.unicauca.edu.co/ai/publicaciones/Mosquera\\_ACA09.pdf](http://www.unicauca.edu.co/ai/publicaciones/Mosquera_ACA09.pdf).
- [25] A. Moral, “Controlador de un manipulador tipo scara aplicado a tareas en interacción con sistemas biológicos.” Universidad Nacional de San Juan, 2006.
- [26] G. Grioli, C. Interdipartimentale, A. Bicchi, and C. Interdipartimentale, “A non-invasive real-time method for measuring variable stiffness,” in *In Proc. Robotics Science and Systems (RSS 2010)*, 2010.

- [27] UCR. (2017) Investigación en la universidad de costa rica. <https://www.ucr.ac.cr/investigacion/>.
- [28] B. Siciliano and O. Khatib, *Springer Handbook of Robotics*. Secaucus, NJ, USA: Springer-Verlag New York, Inc., 2007.
- [29] Adafruit. Adafruit 16-channel 12-bit pwm/servo driver - i2c interface. <https://www.adafruit.com/product/815>.
- [30] F. D. Suárez Bonilla, “Anteproyecto: Mapeo para traducción del lenguaje de acción a instrucciones del sistema de modelo de objetos,” Maestría Académica en Ingeniería Eléctrica, Universidad de Costa Rica, 2017.
- [31] F. Ruiz-Ugalde, G. Cheng, and M. Beetz, “Prediction of action outcomes using an object model.” Universidad Técnica de Múnich, Intelligent Autonomous Systems and Institute for Cognitive Systems, Munich, Germany, 2010.
- [32] B. Calli, A. Walsman, A. Singh, S. Srinivasa, P. Abbeel, and A. Dollar, “Benchmarking in manipulation research: Using the yale-cmu-berkeley object and model set.” vol. 22, no. 3, 2015, pp. 36 – 52.