



Universidad  
Carlos III de Madrid

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

DEPARTAMENTO INGENIERÍA DE SISTEMAS Y AUTOMÁTICA

INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL ELECTRÓNICA INDUSTRIAL

PROYECTO FIN DE CARRERA

# **DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LOS SISTEMAS ELECTRÓNICOS DEL TREN INFERIOR DEL ROBOT HUMANOIDE RH-2**

AUTOR: GONZALO FUNES ROMERO

TUTOR: SANTIAGO MARTÍNEZ DE LA CASA DÍAZ

SEPTIEMBRE 2010





## Tabla de contenido

<b>Capítulo 1:</b> .....	<b>5</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>5</b>
1. Introducción.....	6
2. Objetivos.....	7
3. Motivaciones. ....	7
4. Organización del documento.....	8
<b>Capítulo 2:</b> .....	<b>11</b>
<b>HUMANOIDE</b> .....	<b>11</b>
1. Historia de la robótica. ....	12
2. La robótica. ....	15
3. Actualidad en la robótica.....	19
4. Desarrollo proyecto RH-2. ....	26
5. RH-0 y RH-1.....	31
6. El nuevo Rh-2.....	33
<b>Capítulo 3:</b> .....	<b>37</b>
<b>SISTEMAS HARDWARE DEL RH-2</b> .....	<b>37</b>
1. Arquitectura hardware del RH-2: .....	38
2. Optimización sistemas electrónicos RH-2. ....	43
2.1 Accionadores. ....	43
2.2 Sensorización.....	45
2.3 Sistemas de control. ....	54
2.4 Comunicaciones.....	57
<b>Capítulo 4:</b> .....	<b>59</b>
<b>PUESTA EN MARCHA MOTORES BRUSHLESS</b> .....	<b>59</b>
1. Introducción.....	60
2. Conexionado.....	60
3. Programación del motor.....	75
3.1 Creación de un nuevo proyecto.....	75
3.2 Cambio del firmware .....	76
3.3 Configuración de la comunciación.....	78
3.4 Configuración Driver/Motor .....	79
3.5 Movimiento Motor .....	80



---

4. Circuito Final .....	80
<b>Capítulo 5: .....</b>	<b>83</b>
<b><i>DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN. ....</i></b>	<b>83</b>
1. Diseño mecánico.....	84
1.1 Medidas. ....	84
1.2 Distribución componentes.....	86
2. Diseño electrónico. ....	89
3. Listado de componentes.....	95
4. Esquemáticos.....	96
5. Circuitos impresos. ....	100
6. Diseños finales. ....	111
<b>Capítulo 6. ....</b>	<b>112</b>
<b><i>CONCLUSIONES. ....</i></b>	<b>112</b>
1. Conclusiones y trabajos futuros. ....	113
<b>Capítulo 7. ....</b>	<b>115</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA. ....</b>	<b>115</b>



# Capítulo 1: *INTRODUCCIÓN.*

---

## 1. Introducción.

Actualmente existen múltiples campos de investigación dentro de la robótica, uno de los que mayor importancia está teniendo es el desarrollo y perfeccionamiento de robots humanoides. Por ello en el departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad Carlos III de Madrid se están realizando diversos proyectos e investigaciones en este ámbito. Uno de esos proyectos en desarrollo es el robot humanoide RH-2, esta versión mejorada viene precedida por otras dos versiones anteriores pertenecientes a la serie RH.

La importancia de la robótica en nuestras vidas es evidente, hoy en día muchas funciones que anteriormente realizaban los seres humanos son realizadas por robots. Desde las tareas más cotidianas, hasta los procesos industriales más complejos y peligrosos. Por lo que, ya que los robots realizan tareas propias de los humanos, se comenzaron a desarrollar robots humanoides. Estos robots han de ser capaces de adaptarse a distintos tipos de entornos, imitar funciones humanas como andar, subir pendientes, manipular objetos, interactuar con el exterior, etc.

Para llevar a cabo estas actividades se han de dar unas características determinadas en el robot. En el caso del RH-2 las características fundamentales son las siguientes:

- Locomoción bípeda que permita imitar la caminata humana.
- Brazos capaces de manipular objetos.
- Cuerpo central donde ubicar el hardware de control.
- Sensores que permitan al humanoide interactuar con el entorno.
- Autonomía energética.

Las funciones a desempeñar por el robot pueden variar y cada una de ellas requerirá una personalización del robot. Ya que es un robot humanoide, la locomoción bípeda, que sea estable y mantenga el equilibrio al andar en distintas superficies será el principal requisito de este proyecto.

Dada la complejidad de esta versión de la serie RH, se ha dividido en varios proyectos. Cada uno se encarga de analizar más a fondo los distintos dispositivos, como pueden ser: las unidades centrales de computación, sistemas de alimentación, sistemas de comunicación, control de los accionadores, sensorización del robot, etc. Una vez conocidos los sistemas a utilizar, se procederá a la implementación de las placas de circuito impreso, que es en lo que estará centrado este proyecto fin de carrera.

## 2. Objetivos.

Se diseñarán los sistemas electrónicos del robot humanoide RH-2. El proyecto se centra en la optimización de los sistemas electrónicos del robot y en el diseño de las placas de circuito impreso para su implementación. Para realizar esta optimización primero es necesario conocer más a fondo los sistemas de actuación, sensorización y alimentación. Para ello se realizará un estudio breve sobre cada uno de los sistemas, en el que será importante distinguir las diferentes señales eléctricas de cada elemento. Estas señales serán la base para crear las placas de circuito impreso.

Se analizará la estructura mecánica del robot, el objetivo es conocer la posición de los diferentes sistemas dentro del humanoide y las dimensiones del mismo. Es necesario obtener previamente estos datos para una óptima colocación de los componentes. Dado el gran tamaño del humanoide se ha dividido en dos, la parte superior y la parte inferior. Este proyecto se ocupa del tren inferior del robot, formado por ambas piernas, cada una de ellas dividida en muslo y tibia.

Una vez analizada la posición de los sistemas electrónicos y las dimensiones del robot, se comienzan a dimensionar las placas de circuito impreso. El buen diseño de estas placas es muy importante, ya que además de posicionar los diferentes componentes y conectores, éstos deberán adaptarse a la estructura mecánica del robot.

Uno de los sistemas más importantes en el proyecto son los actuadores, ya que de ellos va a depender el movimiento del humanoide. Por ello se analizarán los diferentes tipos de actuadores a utilizar. El objetivo es elegir aquellos que respondan mejor a las necesidades del robot. También se estudiará la puesta en marcha de dichos actuadores.

## 3. Motivaciones.

El ser humano es considerado una máquina perfecta y los ordenadores como el mayor invento de la humanidad. El uso de microprocesadores para construir un producto semejante a un humano supone el mayor reto para el mundo tecnológico. El desarrollo de un humanoide requiere recursos de todas las ramas de la ingeniería, en especial electrónica y mecánica.

Japón se ha considerado a partir de los 80 el precursor de nuevos productos y nuevas tecnologías. En este caso está mucho más avanzado que el resto del mundo en el desarrollo de humanoides. Se trata de un mercado poco rentable debido a los altos costes de los robots y sistemas aún en prueba. Pero teniendo en cuenta el avance de la tecnología y la rapidez con la que bajan los costes, Japón puede

convertirse en el foco de este nuevo mercado. Ya pasó durante el siglo pasado con la creación de robots industriales. Las mayores multinacionales que comercializan robots para industrias pertenecen a los países asiáticos junto con la europea ABB. Dos décadas fueron suficientes para la expansión del mercado a todo el mundo de la producción.

Es imprescindible que Europa investigue en este campo de la robótica para no quedar en desventaja respecto a los competidores. La mayoría de los proyectos europeos acerca de robots humanoides, no son comparables en cuanto al tamaño de inversión y calidad de los japoneses. EE.UU. está incluso menos actualizada que Europa y sólo destacan las investigaciones de la NASA en el campo de robots humanoides.

Por tanto es obvia la motivación para conocer los métodos de control de humanoides y el diseño de los sistemas hardware y software que necesita. Desde el primer proyecto del RH-0, son muchas las personas que han seguido interesándose con este tema para conseguir avances y obtener experiencia.

Es una motivación importante conseguir que el robot humanoide RH-2 creado en la Universidad Carlos III, sea el más avanzado tecnológicamente, que su caminata sea estable y se comuniquen con el entorno. Lograr que el robot destaque en ferias internacionales de robótica como lo hace el HRP-3 o incluso el ASIMO y convertirse en el precursor en España, al igual que lo fue el RH-0.

#### **4. Organización del documento.**

Este proyecto comienza introduciendo el concepto de robótica, su importancia en la actualidad y cómo ha sido su evolución. Realizando un análisis de los humanoides más avanzados en la actualidad. Se explican los fundamentos de la caminata humana y los parámetros necesitados por el robot para poder llevarla a cabo. También se especifican las nuevas características del RH-2, y de sus anteriores versiones el RH-0 y el RH-1.

En el capítulo 3 se subdivide el hardware del RH-2 y se analizan los diferentes sistemas que lo componen. Una vez conocidos, se estudian los diferentes dispositivos encargados de cumplir las funciones de los sistemas del humanoide. Detallando sus características principales.

El siguiente capítulo muestra la puesta en marcha de los motores que se utilizarán en el humanoide, conexiones, programación, etc. Además se realiza un estudio del conexionado de los diferentes dispositivos utilizados, con el fin de conocer las señales que proporcionan y necesitan.



Por último, en el capítulo 5 se muestra el diseño realizado para las placas de circuito impreso. Inicialmente se analiza la estructura mecánica del robot, conociendo así las posibles configuraciones de los dispositivos en las placas de circuito impreso. Una vez elegida la configuración deseada, se analizan los sistemas necesarios para el correcto funcionamiento de las placas, alimentaciones, protecciones, comunicaciones, etc. Finalmente, se muestran los esquemáticos y diseños de las placas de cada una de las partes estudiadas del RH-2.





# Capítulo 2:

## *HUMANOIDE.*

---

## 1. Historia de la robótica.

La robótica es un concepto de dominio público. La mayor parte de la gente tiene una idea de lo que es la robótica, sabe sus aplicaciones y el potencial que tiene; sin embargo, no conocen el origen de la palabra robot y tampoco del origen de las aplicaciones útiles de la robótica como ciencia.

Por siglos, el ser humano ha construido máquinas que imitan partes del cuerpo humano. Los antiguos egipcios unieron brazos mecánicos a las estatuas de sus dioses; los griegos construyeron estatuas que operaban con sistemas hidráulicos, los cuales eran utilizados para fascinas a los adoradores de los templos.

El inicio de la robótica actual puede fijarse en la industrial textil el siglo XVIII, cuando Joseph Jacquard inventa en 1801 una máquina textil programable mediante tarjetas perforadas. Luego, la Revolución Industrial impulsó el desarrollo de estos agentes mecánicos. Además de esto, durante los siglos XVII y XVIII en Europa fueron construidos muñecos mecánicos muy ingeniosos que tenían algunas características de robots. Jacques de Vaucansos construyó varios músicos de tamaño humano a mediados del XVIII, esencialmente se trataba de robots mecánicos diseñados para un propósito específico: la diversión. En 1805, Henri Maillardert construyó una muñeca mecánica que era capaz de hacer dibujos, una serie de levas se utilizaban como “programa” para el dispositivo en el proceso de escribir y dibujar.

El desarrollo en la tecnología, donde se incluyen las poderosas computadoras electrónicas, los actuadores de control retroalimentados, transmisión de potencia a través de engranes, y la tecnología en sensores ha contribuido a flexibilizar los mecanismos autómatas para desempeñar tareas dentro de la industria.

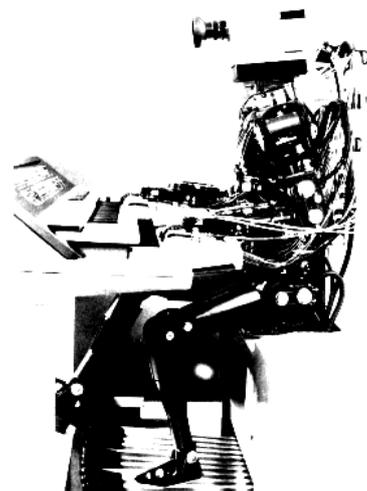


Figura 1. Prototipo robot humanoide.

Son varios los factores que intervienen para que se desarrollaran los primeros robots en la década de los 50. La investigación en inteligencia artificial desarrolló maneras de emular el procesamiento de información humana con computadoras electrónicas e inventó una variedad de mecanismos para probar sus teorías.

No obstante las limitaciones de las máquinas robóticas actuales, el concepto popular de un robot es que tiene una apariencia humana y que actúa como tal. Este concepto de humanoide ha sido inspirado y estimulado por varias narraciones de ciencia ficción.

La palabra robot se utilizó por primera vez en 1920 en una obra llamada “Los Robots Universales de Rossum”, escrita por el dramaturgo checo Karel Capek. Dicha narración se refiere a un brillante científico llamado Rossum y su hijo, quienes desarrollan una sustancia química que utilizan para fabricar robots. Sus planes consisten en que los robots sirvan a la clase humana de forma obediente para realizar todos los trabajos físicos. Rossum sigue realizando mejoras en el diseño, hasta obtener el “ser perfecto”. El argumento experimenta un giro desagradable cuando los robots perfectos comienzan a no cumplir con su papel de servidores y se rebelan contra sus dueños, destruyendo toda la vida humana. La palabra checa “Robota” significa servidumbre o trabajo forzado, y cuando se tradujo al inglés se convirtió en el término robot.

Más adelante, Isaac Asimov comenzó en 1939 a contribuir con varias narraciones referidas a robots y a él se le atribuye el acuñamiento del término robótica. La imagen de robot que aparece en su obra es el de una máquina bien diseñada y con una seguridad garantizada que actúa de acuerdo con tres principios:

1. Un robot no puede actuar contra un ser humano o, mediante la inacción, que un ser humano sufra daños.
2. Un robot debe de obedecer las órdenes dadas por los seres humanos, salvo que estén en conflicto con la primera ley.
3. Un robot debe proteger su propia existencia, a no ser que esté en conflicto con las dos primeras leyes.

A continuación se muestra una tabla con los avances de la robótica desde sus inicios.

Fecha	Desarrollo
1946	El inventor americano George Devol desarrolló un dispositivo controlador capaz de registrar señales eléctricas y reproducirlas para accionar una máquina mecánica.
1951	Raymond Goertz trabajó en el desarrollo con manipuladores de control remoto para manejar materiales radioactivos.
1954	Se desarrolla una máquina prototipo de control numérico en el Instituto Tecnológico de Massachusetts.
1959	Se introdujo el primer robot comercial por Planet Corporation. Estaba controlado con interruptores fin de carrera.
1960	Sale al mercado el primer robot comercial. El robot se llamaba Versatran”.
1961	Un robot Unimate se instaló en la Ford Motors Company para atender a una máquina de fundición de troquel.

1965	Se inaugura el Robotics Institute en la “Carnegie Mellon University”.
1966	Tralfa, una firma noruega, construyó e instaló un robot de pintura de pulverización.
1968	Un robot móvil llamado “Shakey” se desarrolló en SRI (Standford Research Institute), estaba provisto de sensores así como una cámara de visión y sensores táctiles y podía desplazarse por el suelo.
1972	Shigeo Hirose, un estudiante graduado en Tokio construye para el Instituto de Tecnología un robot con aspecto de serpiente.
1973	Se desarrolló en SRI el primer lenguaje de programación de robots del tipo de computadora para la investigación con denominación WAVE. Fue seguido por el lenguaje AL en 1974.
1974	Kawasaki, bajo licencia de Unimation, instaló un robot para soldadura por arco para estructuras de motocicletas.
1974	Aparece el primer robot controlado por un mini-ordenador, el robot es el “T3”.
1976	El robot de la NASA “Viking II” aterriza en Marte. Disponía de un brazo robótico articulado.
1978	Comienzan a surgir numerosas empresas dedicadas a la fabricación de robots para la industria.
1980	Marca Raipert establece la dinámica del movimiento humano al caminar.
1982	IBM introdujo el robot RS-1 para montaje, se trata de un robot con estructura de caja constituido por tres dispositivos de deslizamientos ortogonales.
1984	Surge Robots 8. La operación típica de estos sistemas permitía que se desarrollaran programas de robots utilizando gráficos interactivos en una computadora y luego se cargaban al robot.
1986	HONDA E0. La empresa japonesa inicia un nuevo proyecto para crear un robot humanoide.
1988	Se crea el primer robot con fines médicos en Dannbury.
1994	Se desarrolló “Dante II”, un robot caminante creado por CMU’s Robotics Institute, utilizado para explorar volcanes.
1997	Honda presenta P3 un enorme robot humanoide.
1999	Sony lanza “Aibo” un perro-robot. Comienza la carrera por el marketing tecnológico en Japón.
2001	Fujitsu presenta su nuevo humanoide, HOAP-1.

2003	Se desarrolla el primer robot humanoide capaz de correr, el encargado fue Sony y su nombre "Qrio".
2006	Wabian 2R. El tercer humanoide desarrollado por la universidad japonesa de Waseda.
2006	Nuevo HRP-3. El instituto nacional de investigaciones científicas y tecnológicas (AIST) obtiene el fruto de una gran inversión, creando el HRP-3.
2007	"Hubo". Se adecua al estilo japonés de robot con carácter real. La cara asemeja a Einstein e incluye más de 30 mini-motores para la gesticulación facial.

## 2. La robótica.

La robótica es un área interdisciplinaria formada por la ingeniería mecánica, eléctrica, electrónica y sistemas computacionales. La mecánica comprende tres aspectos: diseño mecánico de la máquina, análisis estático y análisis dinámico. La microelectrónica le permite al robot transmitir la información que se le entrega, coordinando impulsos eléctricos que hacen que el robot realice los movimientos requeridos por la tarea.

Desde los años 60 se ha contemplado un intenso desarrollo de la robótica industrial, de tal forma que los robots, que llegaron a ser considerados el paradigma de la automatización industrial, se han convertido en nuestros días en un elemento más de dicha automatización.

La robótica industrial ha alcanzado un elevado grado de madurez, y la compra e instalación de robots industriales en los entornos productivos ha dejado de ser una aventura para convertirse en una opción razonable en muchos contextos de la automatización.

Al igual que ha pasado con los ordenadores, y las nuevas tecnologías en general, los robots actuales son más robustos, rápidos y fiables. Su capacidad de carga y repetitividad es comparativamente superior, y su programación se ha facilitado considerablemente, y son asequibles para mayor cantidad de empresas.

El mercado de la robótica industrial crece anualmente, al igual que el parque mundial de robots, que supera los 900.000 robots. Japón y Estados Unidos lideran la fabricación y consumo de robots industriales siendo Japón el número uno.

Actualmente, éste dominio técnico sobre la robótica industrial, da paso a investigar en el campo de la robótica de servicio, es decir, el desarrollo de robots que

puedan maniobrar en cualquier entorno y nos ofrezcan servicios personalizados a humanos, y no de carácter industrial.

Se puede hacer una división muy genérica de los tipos de robots existentes. Hay muchas cualidades a tener en cuenta para realizar una división. Atendiendo a sus campos de aplicación se pueden dividir en industriales y de servicios:

- **Industriales.**

La definición más aceptada posiblemente sea la de la Asociación de Industrias Robóticas (RIA), según la cual: un robot industrial es un manipulador multifuncional reprogramable, capaz de mover materia, piezas, herramientas, o dispositivos especiales, según trayectorias variables, programadas para realizar tareas diversas.

La maquinaria para la automatización rígida dio paso al robot con el desarrollo de controladores rápidos, basados en el microprocesador, así como un empleo de servos en bucle cerrado, que permiten establecer con exactitud la posición real de los elementos del robot y establecer el error con la posición deseada. Esta evolución ha dado origen a un serie de tipos de robots industriales.

- *Manipuladores:*

Son sistemas mecánicos multifuncionales, con un sencillo sistema de control, que permite gobernar el movimiento de sus elementos de manera manual o secuencial.

- *Robots de repetición y aprendizaje:*

Son manipuladores que se limitan a repetir una secuencia de movimientos, previamente ejecutada por un operador humano, haciendo uso de un controlador manual o un dispositivo auxiliar. En este tipo de robots, el operario en la fase de enseñanza, se vale de una pistola de programación con diversos pulsadores o teclas, o bien, de joysticks, o bien utiliza un maniquí, o a veces, desplaza directamente la mano del robot. Los robots de aprendizaje son los más conocidos hoy en día, en los ambientes industriales y el tipo de programación que incorporan, recibe el nombre de “gestual”.

- *Robots por control por computador:*

Son manipuladores o sistemas mecánicos multifuncionales, controlados por un computador, que habitualmente suele ser un microordenador.

En este tipo de robots, el programador no necesita mover realmente el elemento de la máquina cuando la prepara para realizar un trabajo. El control por

computador dispone de un lenguaje específico, compuesto por varias instrucciones adaptadas al robot, con la que puede confeccionar un programa de aplicación utilizando sólo el terminal del computador, no el brazo. A esta programación se le denomina textual y se crea sin la intervención del manipulador.

Las grandes ventajas que ofrecen este tipo de robots hacen que se vayan imponiendo en el mercado rápidamente, lo que exige la preparación urgente de personal cualificado, capaz de desarrollar programas similares a los de tipo informático.

- **De servicios.**

Son todos aquellos robots que sirven a los seres humanos, en alguna actividad ya sea peligrosa o repetitiva, alguna veces son teleoperados, es decir, se controlan a distancia o pueden ser autónomos (tienen una capacidad de decisión propia). Se encuentran varias categorías.

- *Móviles:*

Los robots móviles están provistos de patas, ruedas u orugas que los capacitan para desplazarse de acuerdo a su programación. Elaboran la información que reciben a través de sus propios sistemas de sensores y se emplean en determinado tipo de instalaciones industriales, sobre todo para el transporte de mercancías en cadenas de producción y almacenes.

También se utilizan robots de este tipo para la investigación en lugares de difícil acceso o muy distantes, como es el caso de la exploración espacial y de las investigaciones o rescates submarinos. A pesar de todo, existen otros robots como los humanoides que se podrían englobar en este subconjunto.



**Figura 2. Robot móvil.**

- *Médicos:*

Los robots médicos son fundamentalmente prótesis para disminuidos físicos que se adaptan al cuerpo y están dotados de potentes sistemas de mando. Con ellos se logra iguales con precisión los movimientos y funciones de los órganos o extremidades que suplen.

En los últimos años se han desarrollado robots médicos utilizados para realizar intervenciones quirúrgicas. Un ejemplo es el robot “Da Vinci”, fabricado por Intuitive Surgical, que ha vendido más de 800 unidades. Desde una consola el cirujano maneja los brazos del robot, como si fueran los propios. De este modo se logra realizar cirugías más precisas, sin errores, con poco dolor y consiguiendo una recuperación más rápida del paciente.



**Figura 3. Robot medico Da Vinci.**

– *Androides:*

Este tipo de robots intentan reproducir total o parcialmente la forma y el comportamiento cinemático del ser humano. Actualmente los androides son todavía dispositivos muy poco evolucionados, sin utilidad práctica, y destinados fundamentalmente al estudio y experimentación.

El objetivo es que presten un servicio a las personas (cuidados médicos primarios, vigilancia, seguridad, realizar tareas peligrosas, tareas sencillas del hogar, etc.). Uno de los aspectos más complejos de estos robots es la locomoción bípeda. En este caso, el principal problema es lograr mantener el equilibrio del robot durante la caminata, regulando sus movimientos en tiempo real, semejante al control de sistema neuronal humano.

No sólo su capacidad de caminar o evitar obstáculos es interesante. Idealmente un robot humanoide, debe ser capaz de actuar de un modo similar al humano, es decir, debe estar dotado de una inteligencia, que le aporte capacidad de aprendizaje. Atendiendo a la percepción de los estímulos de su entorno, un humanoide debe poder interactuar en cualquier ambiente y realizar tareas no preprogramadas con antelación.

### 3. Actualidad en la robótica humanoide.

Conocer la actualidad de los robots humanoides y de las arquitecturas hardware utilizadas, es importante para adquirir nuevas ideas y analizar qué tipo de arquitectura puede ser más conveniente en cada caso.

La investigación y desarrollo de robots humanoides, está concentrada en institutos tecnológicos y universidades. La mayoría de los robots diseñados son prototipos, y no logran incorporarse al mercado, porque el coste de estos robots no les hace económicamente competitivos. Es necesario que grandes empresas inviertan y apuesten por este nuevo campo de la robótica. Sólo multinacionales japonesas como Honda o institutos de investigación específicos (KAIST en Corea y AIST en Tokio) han logrado grandes avances y robots humanoides fiables. La evolución de Honda conlleva investigaciones desde 1986. Los robots humanoides utilizan muchos recursos de las últimas tecnologías, su sistema engloba muchas especialidades ingenieriles y conseguir avances depende del avance de las nuevas tecnologías.

Como primer paso para la expansión comercial de los humanoides, se han desarrollado pequeños robots. Empresas de juguetes como Hitec venden mini-humanoides a precios asequibles. Su utilización en concursos internacionales de robótica abre un mercado relacionado con el hobby por nuevos juguetes. Las ferias internacionales de robótica difunden los nuevos avances en torno a los humanoides de tamaño real. Estos robots si ofrecen servicios y aplicaciones sustitutivas a las tareas humanas.

A continuación se analizan los últimos robots humanoides desarrollados por distintas universidades, centros públicos de investigación y multinacionales. En concreto y en función de la información disponible, se analiza su arquitectura hardware.

- **Wabian 2R.**

La Universidad japonesa de Waseda, ha creado un instituto para investigaciones robótica HRI (humanoid robotics institute). Concretamente su último humanoide fue creado en 2006, el Wabian-2R que dispone de 41 grados de libertad y una arquitectura hardware descentralizada. El control de los motores y todos los sensores se realiza a través de tres tarjetas de comunicación HRP Interface board, por lo que se emplea un canal de cada tarjeta para el control con cada uno de los dispositivos y motores. Estas tarjetas son de diseño propio y también se utilizaron en el humanoide HRP-2.



**Figura 4. Wabian-2R.**

El sistema de control que dispone el Wabian-2R sigue el siguiente esquema para su funcionamiento. Además se muestran otras características principales del humanoide.

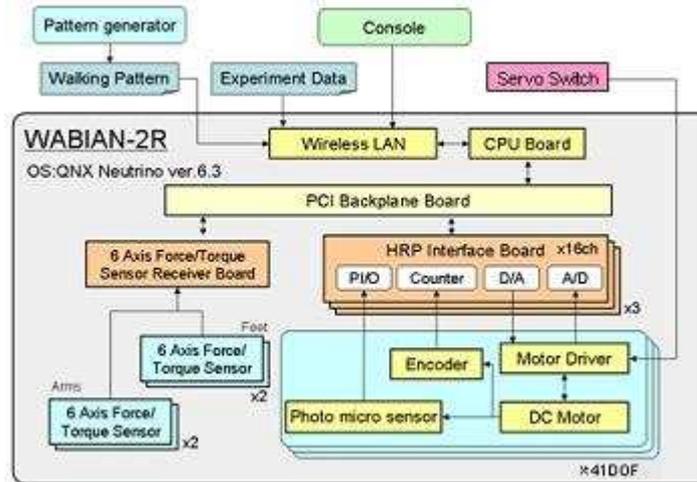
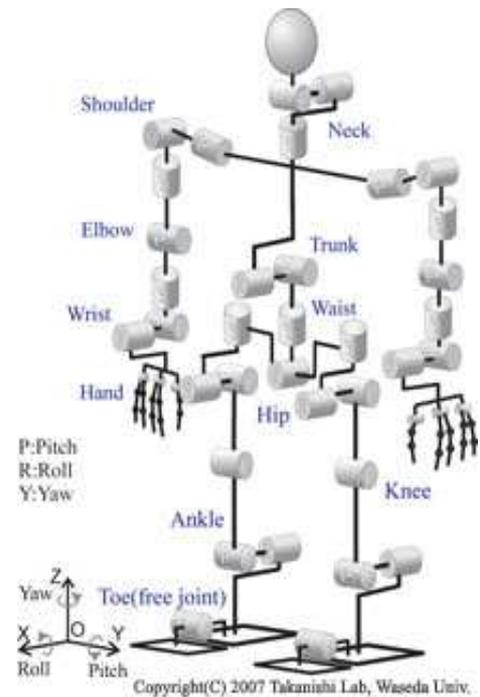


Figura 5. Esquema distribución hardware Wabian-2R.

Características	Wabian-2R
Peso con baterías (kg)	64,5
Altura (cm)	147,5
Grados de libertad	Piernas: 6x2 Pies: 1x2 Cintura: 2 Tronco: 2 Brazos: 7x2 Manos: 3x2 Cuello: 3 Total: 41
Sensores	6 sensores fuerza-par Sensor de luz Encoder magnético
Actuadores	Motores DC con servo
Mecanismo reductor	Harmonic Drive
Transmisión	Polea dentada
Baterías	Baterías de litio
Sistema operativo	QNX. Neutrino RTOS.

Tabla 1. Características principales Wabian-2R.



- **H7.**

La construcción del primer prototipo del H6 fue en el año 2000. Diseñado por Aircraft and Mechanical Systems Division y fabricado por Kawada Industries, Inc. El humanoide tiene 35 grados de libertad y emplea motores DC y transmisiones Harmonic Drive. Su sistema de computación está centrado en dos microprocesadores Pentium III a 750 Mhz con sistemas operativos Linux real-time. El hardware utilizado para las comunicaciones no se especifica.

En 2003 se desarrolló la versión posterior H7, como base para investigaciones acerca del software en el Instituto Nacional de Avances Científicos y Tecnológicos (AIST). Utiliza los sensores y la estructura del H6 y renueva algunos componentes hardware. Esta nueva versión utiliza dos microprocesadores más avanzados, acorde al avance tecnológico de la fecha, son dos Pentium IV a 3.0 Ghz con bus interno a 533 Mhz y 1 Gb de memoria RAM.

Estas placas con los microprocesadores incluyen conectores PICMG, que mediante el estándar PCI, pueden suministrar altas potencias a las tarjetas que se les conecten (100 W y 161 W en arquitecturas de 32 y 64 bits correspondientemente). También incluyen conectores PCI normales e ISA para conectar discos duros. Dispone de tarjetas de entrada/salida con convertidores D/A y A/D necesarios para controlar y recibir la información de todos los motores, por lo que se puede suponer que no emplea una arquitectura descentralizada con buses para la comunicación.

No existe información detallada acerca del robot, ni recientes versiones. El H7 ha permanecido como un humanoide fiable, que logra mantener caminatas muy estables e incluso subir escaleras.



**Figura 6. Robot humanoide H7.**

Kawada Industries en la actualidad colabora con otras instituciones como el AIST y sus diseños son usados por ejemplo en el robot Hubo, en robots de Toyota e Incluso en el Asimo.

- **ASIMO.**

Honada Motor Company es el responsable del desarrollo de ASIMO, que es considerado desde 2005 el robot humanoide más avanzado hasta la fecha. Es el resultado de los estudios llevados a cabo durante 22 años, desde el primer humanoide E0 y E1. Tiene la capacidad de caminar o subir escaleras de una manera independiente, es decir, puede identificar obstáculos y reconocer objetos en movimiento, y así calcular la óptima trayectoria para llegar al punto de destino.

También posee la capacidad de reconocer comandos orales y gestos faciales. Además destaca por su habilidad para manipular objetos, abrir puertas y en general, realizar tareas domésticas sencillas.

No existe información detallada acerca de la arquitectura hardware integrada en el robot. Honda es la compañía más veterana en el estudio de humanoides, y su experiencia sobre el uso de distintas arquitecturas sería de gran utilidad.

El proyecto de Asimo ha sido dividido en dos fases. Una primera fase para desarrollar la parte inferior, caminante, y otra fase para diseñar la parte superior. Éste es el mismo objetivo que se quiere en el RH-2, conseguir en primer lugar una caminata estable y fiable, para en la segunda parte interrelacionar el tronco y brazos del robot con la piernas.

El sistema de computación consta de un PC para el procesamiento de imagen, un PC para reconocimiento y síntesis de voz y un procesador para el control y planificación. También incluye una tarjeta controladora de comunicación por red inalámbrica para comunicación con el sistema externo y la tarjeta de DSP para detectar los sonidos.



Figura 7. Robot humanoide Asimo.

Dos cámaras fotográficas de color están instaladas en la unidad principal para obtener las imágenes que se procesan para computar la profundidad. El framegrabber conecta el ordenador de visión con el bus PCI para transferir datos a alta velocidad. El sistema de visión está separado del grupo del procesador de control y de planificación. Dispone además de dos micrófonos instalados en la parte delantera de la cabeza para el sistema de sonido. Se utiliza Ethernet para comunicarse entre procesos con diversas velocidades (por ejemplo, el sistema de visión es lento, mientras que el auditivo es rápido). En el sistema externo de Asimo, se han desarrollado un sistema de gestión de mapas para navegación y especificación de tareas en entornos artificiales tales como oficinas, museos y hospitales. Este

sistema puede enviar comandos al robot y permite la selección de tareas para la ejecución en las localizaciones especificadas.

Sólo existe información genérica del hardware utilizado, pero no especifica el sistema interno de computación y comunicación. Asimismo actualmente utiliza diversos sistemas operativos, y un sistema de comunicación interna asíncrona para sincronizar tareas y movimientos. Se puede suponer que su arquitectura hardware es análoga a los robots HRP, porque Honda compró la tecnología que utilizaban.

- **HRP-3.**

Este robot que deriva del anterior HRP-2, ha sido desarrollado por AIST y fabricado por Kawada Industries, Inc y la nueva colaboración de Kawasaki Heavy Industries. Es el último y más novedoso humanoide desarrollado por el instituto nacional de ciencia y tecnología. Dispone de 36 grados de libertad, y su altura es de 160 cm. Es el robot más alto fabricado, lo cual no influye en su peso ni en su capacidad para caminar, levantarse tras una caída, manipular objetos o subir escaleras.

El robot dispone de un software y un entorno gráfico para dirigir el robot a través de una PDA, desde un teléfono móvil o a través de internet. De esta manera se puede utilizar el robot a distancia, como sistema de vigilancia y seguridad en el hogar.



**Figura 8. Robot HRP-3.**

En el proyecto HRP-3 se ha hecho un estudio acerca de la viabilidad del uso de un sistema más distribuido. Todos los robots y sus posteriores versiones, requieren rediseñar el hardware de la comunicación a los nuevos requisitos del robot. Con la descentralización se busca la versatilidad y flexibilidad del sistema.

Los dispositivos hardware de computación y gestión de la red están integrados en cuatro placas. Una placa para albergar a los dos microprocesadores, SH4 de tan sólo 240 Mhz. La conexión de las dos placas con los microprocesadores es a través del puerto LAN. Una placa de entradas y salidas para el control de los motores. Una tercera placa que recibe la señal analógica de los sensores y una última placa con cuatro puertos RS-422 que consiguen velocidades asíncronas de 1 Mhz. Todas las placas están alimentadas a través de la placa del micro.

- **Lola.**

En la universidad de Munich han desarrollado el humanoide “Lola”, la nueva versión del anterior “Johnnie”. Este robot se caracteriza por su bajo peso y una estructura descentralizada para el control de los accionadores. Utiliza motores sin escobillas para las articulaciones, excepto la parte superior de las piernas donde se usan actuadores lineales, llamados “ballscrews”, situados entre la rodilla y la cadera. Son motores eléctricos lineales que actúan como un cilindro hidráulico. Consiguen movimientos precisos, entregan un alto par y dejan el centro de masas cerca de la cadera.

Tanto estos cilindros como los motores eléctricos, incorporan encoders en el eje del actuador. Cuenta con 22 actuadores para obtener 22 grados de libertad, junto a sensores de fuerza, altitud, etc. Para la comunicación con los actuadores y sensores recurre a un sistema de Ethernet – CAN bus en tiempo real, basado en el sistema SERCOS. El sistema SERCOS (serial real time communication service) es un interfaz digital de comunicación para datos, especialmente pensado para el control de servos digitales y motores, que alcanza 100 Mbps.



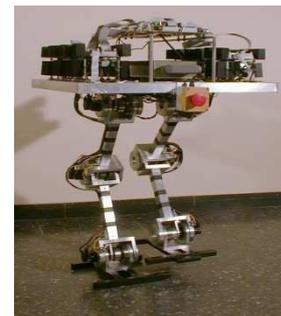
©2009 Institute of Applied Mechanics - TU München

**Figura 9. Humanoide Lola.**

- **BARt.**

La Universidad de Hannover ha investigado desde 1999, como crear un robot humanoide. El último proyecto logra una caminata muy estable y con capacidad para levantarse del suelo.

La altura de este robot es de 130 cm, sólo pesa 25 Kg y dispone de 13 grados de libertad. Utiliza motores DC de 60 a 150 W, encoders absolutos para medir la posición y Harmonic Drives como método de transmisión. Incluye un sensor inercial en el torso y cuatro sensores de fuerza en cada pie.



**Figura 10. Humanoide BARt.**

Emplea un sistema distribuido para la comunicación con los circuitos de los motores. Para ello utiliza el protocolo CAN-bus, a través de un microprocesador principal PowerPC de 1 Ghz.

- **Qrio.**

Sony SDR-4X denominado comercialmente como “QRIO”, es un robot de tamaño reducido desarrollado por Sony. Mide 60 cm, dispone de una tecnología

denominada “Intelligent Servo Actuator” que es lo que le permite andar dinámicamente, variando las revoluciones por minuto y el par en las articulaciones. Este sistema es el usado por la mayoría de los humanoides.

Si nos referimos a capacidades de velocidad, autonomía, etc. la verdad es que este robot de Sony está realizando avances continuamente debido a que la estructura de “QRIO” es extremadamente versátil.

Sony ha creado su propio sistema operativo en tiempo real, denominado Aperio. El protocolo de comunicaciones Open-R también ha sido creado por Sony y no existe información disponible acerca de él.



**Figura 11. Humanoide Qrio.**

- **HOAP-3.**

Este humanoide proviene de la evolución de un anterior modelo lanzado en julio de 2003 el HOAP-2. La nueva versión se caracteriza por su reducida altura, 60 cm, y su peso, 8.8 Kg; además incorpora nuevos sensores de reconocimiento de imagen y un puerto USB 1.1 a través del cual el usuario puede cargar el software en el robot. Los avances en la capacidad de movimiento, reconocimiento externo y la funcionalidad de comunicación son la culminación de una intensa investigación y desarrollo durante 4 años.

Dispone de un procesador Pentium M a 1.1 Ghz que funciona con el sistema operativo RT-Linux. Lo interesante de este robot es que Fujitsu dará a conocer información sobre los sistemas de control y el software del androide con el fin de que se convierta en una máquina programable por el usuario. La programación de HOAP (Humanoid Open Architecture Platform) se podrá realizar en código C/C++.

Pero la mayor innovación de este robot es su capacidad para aprender, y hasta cierto punto comprender sus acciones. A diferencia de robots corrientes, el HOAP-3 aprende de a poco a generalizar la acción y adaptarla para usarla oportunamente. De esta manera, el robot es capaz de identificar el mejor momento para usar cada acción. Los investigadores usan un controlador remoto para comunicarse con el humanoide, de manera que este sepa que se le está “explicando” una nueva acción.



**Figura 12. Mini-robot HOAP-3.**

Se puede considerar como precursor de los mini robots humanoides que se desarrollaron en años posteriores, para su manejo como hobby o también de investigación. El reducido tamaño y peso, son imprescindibles para lograr un control más fácil, ya que la inestabilidad del robot y sus inercias son menores. Empresas como Kyosho, Hitec, Lego o Kondo comercializan mini humanoides para uso como hobby o como sistemas de introducción educacional al campo de los humanoides.

#### 4. Desarrollo proyecto RH-2.

##### Teoría del equilibrio bípedo.

El proceso de caminar es complejo, no sólo es necesario dar pasos. En este proceso están involucrados tanto pies, caderas, espina, brazos, hombros, cabeza, etc. La coordinación perfecta de todos los anteriores elementos hace que la caminata humana sea eficiente.

Como nuestro objetivo fundamental es crear un robot bípedo, es necesario conocer los principios básicos sobre el proceso de caminata de los humanos, para crear un sistema mecánico y electrónico que sea capaz de emular en cierta forma la caminata de un humano.

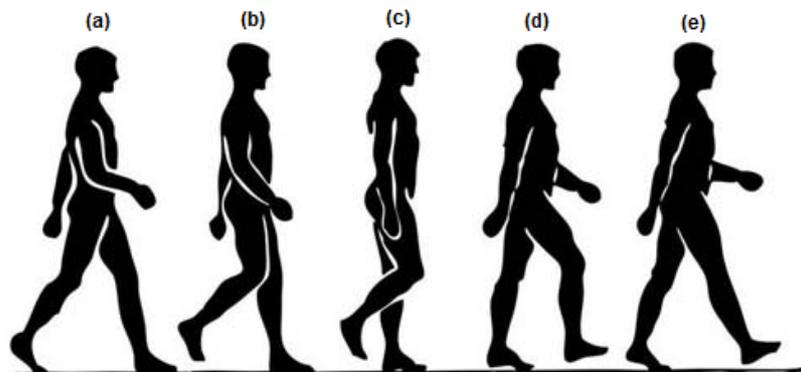


Figura 13. Caminata humana.

La caminata comienza con los dos pies extendidos y sobre el suelo, en donde el equilibrio no es muy significativo (a). El gran problema comienza al levantar uno de los dos pies para realizar los movimientos siguientes (b, c y d), ya que la tendencia es caer hacia ese lado y hacia delante o atrás dependiendo del estado dinámico del robot en ese instante. Para evitar que el cuerpo caiga se deben realizar correctivos a los movimientos del robot (por ejemplo, mover la cadera al lado contrario del pie levantado), permitiendo así la estabilidad dinámica de la caminata. El medio ciclo se completa cuando los dos pies vuelven a estar en el suelo (e). El otro medio ciclo es idéntico, solamente que el pie que se levanta es el que anteriormente servía de apoyo y viceversa.

A continuación se definen previamente algunos conceptos fundamentales relacionados con el análisis dinámico de una caminata humana.

- Planos anatómicos.
  - Centro de masa.
  - Proyección del centro de masa.
  - Polígono de soporte.
  - Centro de presión o fuerza.
  - Índice rotación del pie.
  - Punto de momento cero.
- *Planos anatómicos:*

Nos sirven para estudiar el cuerpo humano, son líneas imaginarias usadas en ciertas estructuras anatómicas reconocidas con el fin de dividir en planos al ser humano para localizar estructuras anatómicas.

Los planos fundamentales son: el sagital, es el plano frontal que divide el cuerpo longitudinalmente; el frontal, cualquier plano vertical que sea perpendicular al sagital; y el transversal, es todo aquel plano que sea perpendicular al eje vertical.

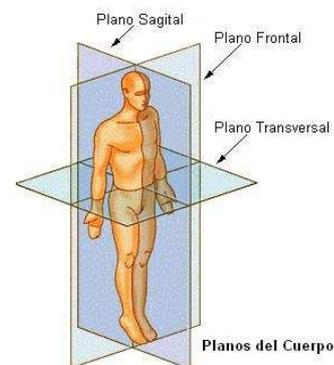


Figura 14. Planos anatómicos.

- *Centro de masa:*

El centro de masas (COM) de un sistema discreto o continuo es el punto geométrico que dinámicamente se comporta como si en él estuviera aplicada la resultante de las fuerzas externas al sistema.

Se propone el cálculo dinámico del COM del robot durante la caminata, es decir, a partir de la posición de cada uno de los eslabones del robot, en un determinado instante se formará el modelo simplificado del péndulo invertido. Se propone el siguiente cálculo para el COM en un cuerpo con distribución discreta de materia.

$$\bar{x} = \frac{\sum_i m_i \cdot x_i}{\sum_i m_i} ; \bar{y} = \frac{\sum_i m_i \cdot y_i}{\sum_i m_i} ; \bar{z} = \frac{\sum_i m_i \cdot z_i}{\sum_i m_i}$$

Donde:

- $x, y, z$  son las coordenadas del COM del robot durante su movimiento.
- $[x_i, y_i, z_i]$  son las coordenadas de los COM de cada uno de los eslabones del robot.
- $m_i$  la masa de la partícula  $i$ -ésima.

– *Polígono de soporte:*

Es la figura geométrica plana formada en el suelo por uno o dos pies, dependiendo del estado de la caminata. Cuando el robot se encuentra en soporte único, el polígono de soporte es la figura determinada por el pie de apoyo, en cambio, cuando el robot se encuentra en doble soporte el polígono de soporte es la figura formada por los dos pies, tal como muestra la figura.

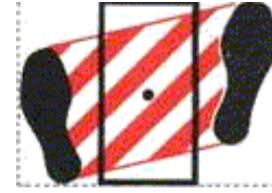


Figura 15. Polígono de soporte.

– *Proyección del centro de masa:*

Es la proyección del punto donde se concentra la masa del cuerpo.

– *Centro de presión o fuerza:*

El centro de presión (COP) es definido como el punto en la superficie de contacto donde la fuerza de reacción neta de la superficie actúa. Las fuerzas tangenciales de la fuerza de reacción constituyen la fricción, la misma que debe compensar a las fuerzas del robot en esa dirección. Las fuerzas que son de nuestro interés para el cálculo del COP son las fuerzas normales.

Los sensores de fuerza-par situados en los pies permitirán el cálculo del COP en todo momento.

– *Punto de momento cero:*

El punto de momento cero (ZMP) especifica el punto con respecto al cual la fuerza dinámica de la reacción en el contacto del pie con la tierra no produce ningún momento, es decir, el punto donde la fuerza total de la inercia es igual a cero.

– *Índice de rotación del pie:*

Es el punto en el pie/superficie de contacto en el cual la fuerza de reacción neta de la superficie tendría que actuar para que el pie permanezca fijo.

La rotación de los pies es una indicación de inestabilidad postural, la cual debe ser tratada cuidadosamente en un pie de forma dinámica estable y evitar por completo en una caminata estáticamente estable. Para que un robot bípedo se encuentre dinámicamente estable durante su caminata, el FRI debe estar siempre dentro del polígono de soporte.

Éstos son los principales parámetros que deben ser medidos y controlados por el sistema de control del robot. También es necesario un análisis cinemático para conocer la posición de las articulaciones en todo momento, y para poder calcular las trayectorias.

- **Estudio cinemático.**

Básicamente, el análisis cinemático de un robot comprende el estudio de su movimiento con respecto a un sistema de referencia. Se puede dividir en cinemática directa y cinemática inversa.

- *Cinemática directa:*

Es una técnica que se usa para calcular la posición de partes de una estructura articulada (como es el caso del RH-2) a partir de sus componentes fijas. Por lo tanto se controlará el robot de manera indirecta, a partir del movimiento de sus articulaciones. Además sirve para calcular las transformaciones inducidas por las articulaciones de la estructura.

$$x = f(q)$$

- *Cinemática inversa:*

Consiste en determinar la configuración que debe adoptar un cuerpo articulado para obtener una posición y orientación determinadas. Mediante su resolución se puede controlar el movimiento de una manera explícita, es decir, directamente a través de la posición y orientación.

$$q = f^{-1}(x) ; q_k = f_k(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma)$$

Donde k representa el número de grados de libertad de la cadena cinemática.

- **Planificación mediante generación de trayectorias.**

Mediante este método de planificación se incide directamente sobre las articulaciones, ya que se trabaja con la posición y orientación de los efectores finales. Se utiliza una ecuación general que describe las trayectorias (curvas paramétricas en función del tiempo) tanto para la cadena como para la pierna flotante, es decir en el plano sagital:

$$x(t) = x_0 + v_0 t + \left[ \frac{3(x_1 - x_0) - T(2v_0 + v_1)}{T_1^2} \right] t^2 + \left[ \frac{2(x_0 - x_1) + T_1(v_0 + v_1)}{T_1^3} \right] t^3$$

Donde:

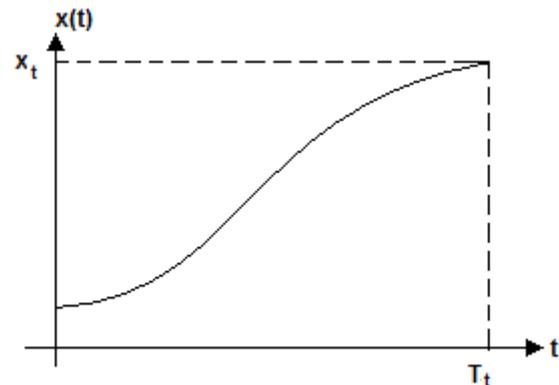
$T_i$  es el periodo de interpolación.

$x_0$  es la posición inicial.

$x_1$  es la posición final.

$v_0$  es la velocidad inicial.

$v_1$  es la velocidad final.



- **Sistema de control de la caminata**

Ya han sido introducidos los conceptos básicos para conocer las características de la caminata humana. También la teoría acerca de los métodos de cálculo de el equilibrio y trayectorias de un humanoide, son útiles para saber cuál es el sistema básico de control del robot. Este sistema por tanto nos definirá cuáles son nuestros requisitos hardware. Para mantener una caminata estable, se consideran los parámetros internos del robot imprescindibles y se desarrolla una arquitectura que permita comunicación y adquisición de los datos de todos los sensores. Además de la fiabilidad del sistema se considera primordial la velocidad de cálculo y comunicación.

A continuación se explica brevemente el sistema de control de la caminata de un humanoide.

Una vez se han generado las caminatas, se ejecutarán las trayectorias en cada articulación, realizando la interpolación entre cada punto cargado y el siguiente. A medida que el robot describe las trayectorias de cada uno de los eslabones, se obtendrán las mediciones de la posición angular de cada articulación. Con este dato se calcula el error en las trayectorias y se corregirán los siguientes puntos de la trayectoria. Además es necesario controlar constantemente el centro de masa con el sensor inercial. Este sensor nos permite medir y poder corregir los errores en la inclinación del cuerpo. Otro dato importante es la fuerza que ejercen los pies sobre el suelo, que permite controlar la inclinación lateral del cuerpo durante la caminata.

El esquema de control, es el mayor requisito del robot caminante. La implementación de este lazo de control en tiempos pequeños, asegura que el humanoide mantenga la estabilidad mientras camina.

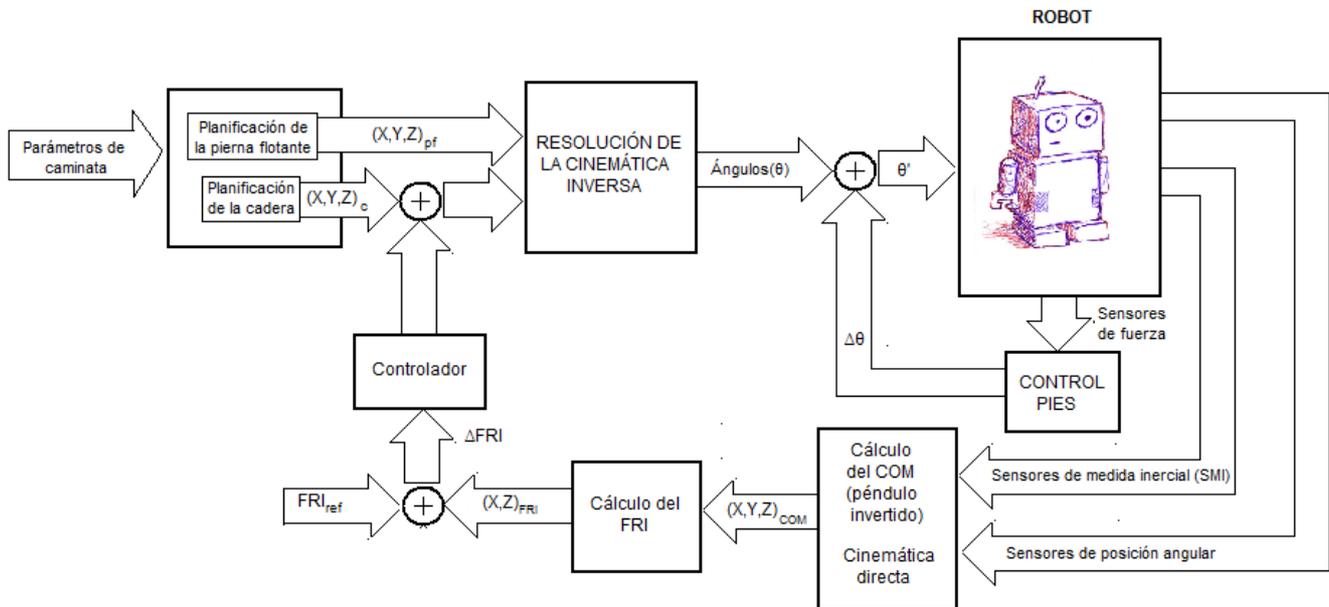


Figura 16. Sistema de control de la caminata en lazo cerrado.

## 5. RH-0 y RH-1.

En este apartado se pretende dar las características principales de los anteriores proyectos RH-0 y RH-1, tales como grados de libertad, componentes hardware, tamaño, peso y su distribución. Ambos han sido desarrollados tomando como modelos los prototipos más avanzados existentes en aquel momento, como eran el Asimo de Honda y el HRP-2P de Kawada.

El avance de la versión RH-1 frente a la versión anterior RH-0 suponía simplemente la modificación de algunos elementos hardware y rediseños mecánicos. Excepto algunos cambios estructurales, se mantiene el tamaño 120 cm y los grados de libertad, 21.

GDL	Número	Eje de movimiento
Cadera	3(x2)	Sagital, Frontal, Transversal
Rodilla	1(x2)	Sagital
Tobillo	2(x2)	Sagital, Frontal
Hombros	2(x2)	Sagital, Frontal
Codos	1(x2)	Sagital
Muñecas	1(x2)	Transversal
Tronco	1	Transversal
<b>TOTAL</b>		<b>21</b>

Tabla 2. Grados de libertad RH-0 y RH-1.

Se recurría a una arquitectura descentralizada, usando para ello dos redes según el protocolo CAN-bus. Una red para la parte superior, y otra para la parte inferior, dedicadas ambas al control de los drivers de los motores. La distribución incluye el uso de varios microprocesadores.

<b>Accionadores</b>	<b>RH-0</b>	<b>RH-1</b>
Motor	Faulhaber 24 V DC	Faulhaber 24 V DC
Frenos motor	MBZ 22 de Faulhaber	MBZ 22 de Faulhaber
<b>Sensorización</b>		
Encoder	HEDS 5540 A de Faulhaber	HEDS 5540 A de Faulhaber
Giróscopo	Silicon CRS07	Silicon CRS07
Inclinómetro	ADXL Analog Devices	
Sincronismo	Contrinex serie 620	Contrinex serie 620
<b>Computación</b>		
Microprocesador	SECO M570 PC/104 400Mhz	Pentium M PC/104 Digital Logic
Driver	Elmo Harmonica A5/50 CAN	Elmo Harmonica A5/50 CAN
Adquisición de datos	-	SDM 7540 HR-1
<b>Comunicación</b>		
Inalámbrica	3COM Wireless LAN PC Card	Router ASUS WL-530G
Can-bus	Advantech PCM-3680 PC/104 Dual	Softing PC/104AC2104 50Ah

**Tabla 3. Elementos hardware RH-0 y RH-1.**

Es común a ambos sistemas hardware, el uso de un microprocesador de formato PC/104 con bus internos ISA dedicado al tratamiento digital de imagen y sonido, y otro igual para el control de la red CAN y el control de las trayectorias de las articulaciones en función de los datos sensoriales. Para determinar la posición angular de los motores, se obtenía la información directamente del encoder relativo incluido el motor.

La comunicación entre los microprocesadores y el router era inalámbrica. Para ello se incluía mediante conexión una tarjeta inalámbrica según el protocolo 802.11b. Para comunicarse con los inclinómetros y giróscopo se recurría a una conexión serie RS-232.

Se pretende diseñar una versión de la serie RH completamente nueva, partiendo desde cero. Se consideran los anteriores RH-0 y RH-1, intentando introducir mejoras y solucionar los problemas existentes.

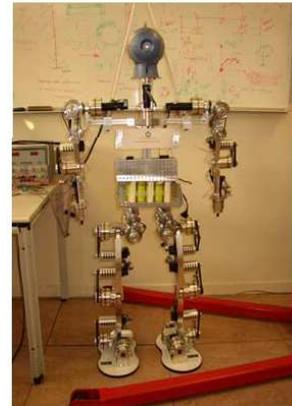


Figura 17. Prototipo RH-0.

## 6. El nuevo Rh-2.

El nuevo diseño dispondrá de 24 grados de libertad y se estima un peso de 60 Kg y una velocidad de 1Km/h durante la caminata. Se estima que podrá transportar objetos de 2 Kg de peso e incluso sentarse. Su altura varía de 120 cm a 165 cm, dotando al robot de un tamaño más acorde al de un humano.

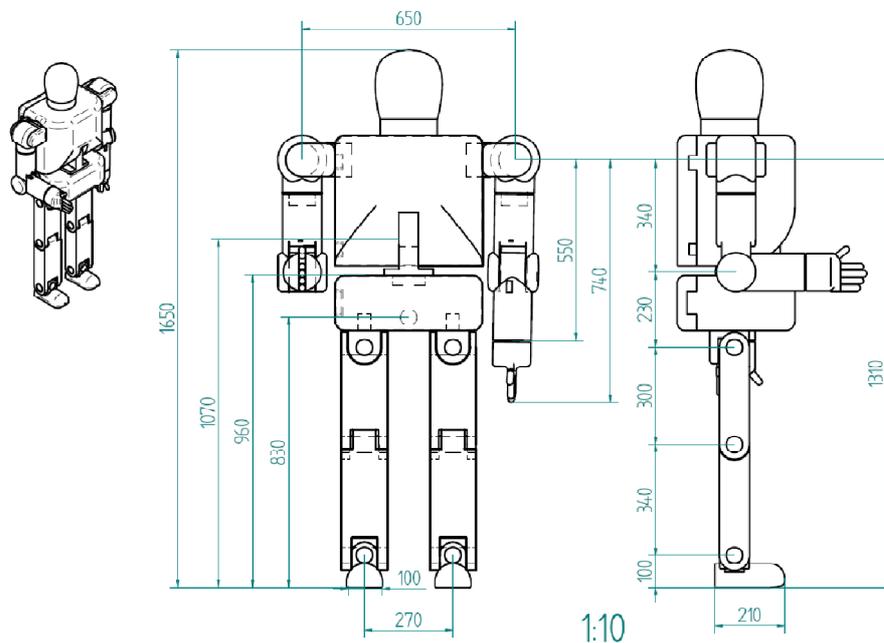


Figura 18. Medidas del humanoide RH-2.

Los anteriores modelos disponían de 21 grados de libertad como se mencionó anteriormente. El nuevo modelo, RH-2, pretende incluir tres grados de libertad más. Uno en cada codo en el plano transversal, que permita al brazo realizar movimientos más parecidos a los humanos. Otro grado de libertad es necesario en el tronco, en su plano frontal, para poder controlar de manera más rápida el balanceo hacia delante y

atrás del cuerpo y lograr mantener su centro de masa en una posición correcta. Este nuevo grado de libertad dota al robot de la capacidad de plegar más el tronco y poder sentarse.

El robot humanoide RH-2 es un sistema mecánico de 24 grados de libertad (26 si se tienen en cuenta los motores de la cabeza). Se distribuyen de la siguiente manera por sus extremidades:

- *Piernas*: Dispone cada una de 6 GDL distribuidos entre el tobillo, la rodilla y la cadera. La cadera posee 3 de ellos, uno en el plano sagital, otro en el frontal y el tercero en el plano transversal, utilizado en el cambio de dirección de movimiento. La rodilla tiene un GDL en el plano sagital, pues no es necesario ningún otro. Y por último el tobillo posee 2 GDL, en los planos sagital, para adaptar el pie al suelo y en el plano frontal que permite el balanceo junto con el de la cadera para mantener el equilibrio.
- *Brazos*: Cada uno de los brazos dispone de 5 GDL distribuidos entre el hombro, el codo y la muñeca. En el hombro existen 2 GDL en los planos sagital y frontal, en el se dispondrán 2 GDL en el plano frontal y transversal. En la muñeca existe únicamente un GDL en el plano transversal. Esta distribución permitirá manipular objetos, e intentará imitar la movilidad de un brazo humano.
- *Tronco*: El tronco posee 2 GDL, uno en el plano transversal que le permite el giro en ese plano sin tener que mover las piernas, y otro en el plano frontal que le permite regular su inclinación.

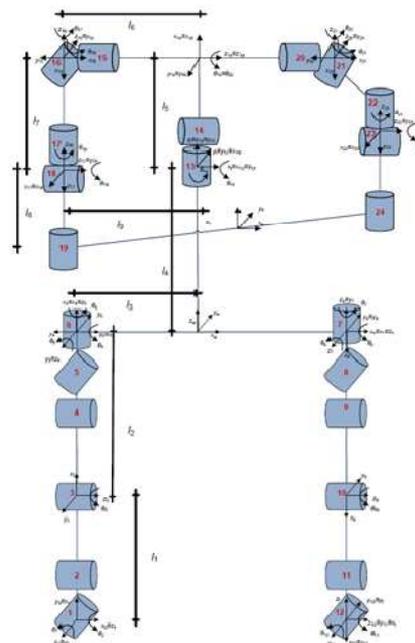


Figura 19. Grados de libertad RH-2.

En un futuro se estudiarán los grados de libertad de la cabeza. Una opción es moverla gracias a las nuevas cámaras autodirigidas que incluyen motores para enfocar al elemento en movimiento.

Es necesario un sistema para medir el error de posición entre la posición leída del motor, y la posición real a la salida de las transmisiones. En los proyectos anteriores sólo se recurría a leer el encoder del motor, y no se tenían datos de la posición en la que se encontraba realmente la articulación. La implementación de los sensores de sincronismo para realizar el homing y buscar la posición de referencia de los motores, no se llevó a cabo. Será necesario introducir otro encoder en cada transmisión y diseñar el circuito de control y adquisición de los datos. Otra de las medidas necesarias es la fuerza que ejercen los pies sobre el suelo, en los proyectos anteriores no se incluían estos sensores. Sin este parámetro y sin el error de posición de las articulaciones no se puede completar el ciclo de control de la caminata.

En la medida de lo posible, el ciclo de control de la caminata del robot debe cerrarse en el mínimo tiempo posible. Es imprescindible que se pueda realizar este lazo de control, el robot debe funcionar en un lazo cerrado para mantener siempre la estabilidad. Recurrir a sistemas lo más distribuidos posibles nos aseguran tiempos de cómputo más reducidos. Se debe demostrar la viabilidad del protocolo CAN-bus utilizado en los anteriores robots, y comprobar que el hardware que gestiona esta red es el más apropiado.

El montaje del robot en su totalidad es una tarea compleja y es difícil que todo funcione perfectamente. Por eso se quiere realizar una primera fase del proyecto RH-2 para construir la parte inferior, las piernas y construir un andador.

Una vez probado el andador y conseguida una caminata muy estable se dará el paso a la segunda fase. Se diseñará concretamente y llevará a cabo la parte superior, haciendo hincapié en la relación del robot con el entorno. Para ello se definirán los sensores excepcionales necesarios como pueden ser cámaras, micrófonos, etc. y se estudiará la opción de incluir un microprocesador específico para el tratamiento de imagen y sonido.

Los microprocesadores usados anteriormente se basaban en el protocolo ISA para la comunicación interna. Estos dispositivos fueron problemáticos y ahora se estudiarán distintos protocolos internos como PCI y se buscarán otras opciones de microprocesadores.

El robot no dispone de demasiado espacio para albergar todo el hardware que requiere. En concreto los drivers para el control de los motores eran muy voluminosos, teniendo en cuenta que se usaban 21. Ahora se usarán 3 drivers más en



principio, y se pretende que el robot sea más ligero y menos voluminoso. Se necesitan drivers ligeros, pequeños, de bajo consumo y que cumplan con las especificaciones de los anteriores o las mejores.

La información de los sensores que gestionan los microprocesadores, debe ser actualizada en tiempo real. Las consultas entre los microprocesadores deben ser lo más rápidas posibles. El acceso desde un medio externo al sistema, también debe ser eficaz, para posibilitar un control del robot desde internet u otro medio físico. Se han de estudiar las posibilidades de comunicación alámbrica e inalámbrica disponibles actualmente.

En definitiva se busca una solución para los problemas derivados de las anteriores versiones, y teniéndolos en cuenta diseñar un nuevo sistema actualizado acorde a las nuevas tecnologías disponibles.



# Capítulo 3:

## *SISTEMAS HARDWARE DEL RH-2.*

---

## 1. Arquitectura hardware del RH-2:

A continuación se van a definir de forma breve los diferentes sistemas que componen la arquitectura hardware del robot. Cada uno de estos sistemas está compuesto por dispositivos que serán analizados más adelante.

- *Accionadores:* Como ya se ha mencionado anteriormente, el objetivo principal de un robot humanoide es mantener una caminata estable y tener equilibrio. Una responsabilidad importante en este proceso recae sobre los accionadores, encargados de dar movimiento al robot. Este sistema estará compuesto por motores y dispositivos de transmisión.
- *Sensorización:* Otra función importante en el robot es obtener información, tanto del entorno que le rodea, como de sí mismo. Los dispositivos encargados de obtener dicha información son los sensores.
- *Control datos:* Toda la información obtenida por el sistema de sensorización ha de ser procesada, de ello se encargará el sistema de control de datos. La arquitectura tomada para la transmisión y el procesamiento de datos se explicará más adelante dada su complejidad. Este sistema estará compuesto por microprocesadores principalmente.
- *Control motor:* La puesta en marcha y el control de los accionadores se realiza a través de los drivers. Estos dispositivos se comunicarán con los microprocesadores, que les darán la información necesaria para poner en movimiento los motores.
- *Alimentación:* Otro objetivo importante en este proyecto es conseguir que el robot no necesite de una alimentación externa continuamente. Esta autonomía energética se consigue incorporando unas baterías al humanoide, las cuales deberán ser dimensionadas para poder alimentar a todos los dispositivos durante períodos de tiempo determinados.
- *Comunicación:* Para poder transmitir toda la información adquirida por los sensores y controlar los accionadores, es necesario definir un protocolo de comunicación. En este proyecto se utilizará el protocolo CAN-bus.

En la siguiente tabla se muestra un resumen de los diferentes sistemas utilizados en el robot humanoide RH-2. Se incluyen los dispositivos encargados de llevar a cabo las funciones de cada sistema.

<b>Función</b>	<b>Sistema</b>	<b>Dispositivo</b>
Acción	Accionadores	Motores
		Transmisión
Información	Sensorización	Sensorización externa
		Sensorización interna
Decisión	Control datos	Microprocesadores
	Control motor	Drivers
Soporte	Alimentación	Baterías
	Comunicación	Router

**Tabla 4. Sistemas y dispositivos del RH-2.**

La arquitectura propuesta para el humanoide se basa en dos microprocesadores como sistema computacional, uno que envía órdenes a las piernas (caminante), y otro a los brazos (manipulador).

El procesador principal, caminante, se encargará de procesar la información de los sensores para lograr mantener el equilibrio y lograr una caminata estable. Tendrá dos tarjetas conectadas. Una que contiene el chip con el protocolo CANopen y que puede gestionar dos redes Can bus a la vez. Cada una de estas redes (1 y 2) se encargará de controlar los motores de las piernas izquierda y derecha respectivamente. La otra tarjeta PCI sirve de interfaz entre los sensores fuerza-par-aceleración y el microprocesador.

El procesador secundario, manipulador, se encargará de controlar el movimiento de los brazos. También será el encargado de controlar y recibir información del entorno, para una vez procesados estos datos actuar en consecuencia y llevar a cabo tareas de manipulación de objetos, evitar obstáculos, navegación, etc. Al igual que el procesador principal dispondrá de dos tarjetas PCI. La función de la primera de ellas será controlar los motores de los brazos y el tronco a través de las redes Can bus 3 y 4. La otra tarjeta PCI se utilizará para comunicar los sensores fuerza-par-aceleración y el microprocesador.

Con esta arquitectura se quiere conseguir un sistema distribuido entre dos microprocesadores principales, que a su vez estén conectados con los microprocesadores de los drivers y encoders. El objetivo de esta división del sistema es obtener un mayor rendimiento y velocidad de cálculo para cada una de las partes.

Para realizar un control sobre la posición de los motores se utilizarán encoders absolutos. Si se conoce la posición del motor, se puede conocer la posición absoluta de la articulación. Estos encoders absolutos irán colocados en el eje de la articulación, dónde pueden medir la posición angular. Se comunicarán con su microprocesador correspondiente a través de un PIC y un receptor-transmisor.

Los motores a utilizar serán motores brushless CC (sin escobillas) de diseño plano que dispondrán de sensores Hall para medir la posición relativa del mismo. A cada motor se le acoplará un encoder relativo en su eje, que funcionando junto con los sensores Hall será capaz de medir la velocidad del motor. Estos dispositivos serán controlados por un driver que será el encargado de procesar la información recibida. A su vez cada driver estará comunicado por el CAN Bus con su microprocesador correspondiente.

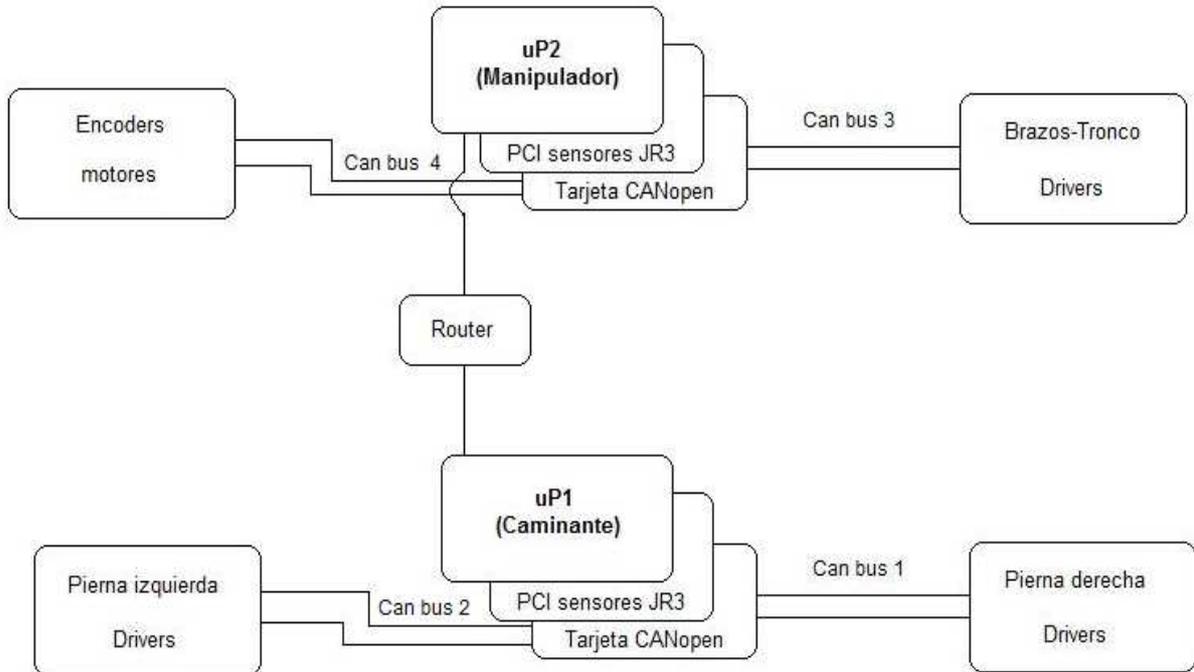
Junto a los anteriores dispositivos para obtener información de la posición del robot, se encuentran los sensores de fuerza-par. Estos sensores se situarán en los tobillos y muñecas del robot, su objetivo es calcular la fuerza y el par que ejercen los puntos de apoyo del robot.

El resto de sensores utilizados se conectarán al ordenador o directamente al microprocesador correspondiente a través de las entradas digitales disponibles.

Para la alimentación independiente del robot se utilizarán baterías. Hay que tener en cuenta los consumos de todos los dispositivos mencionados. En el apartado 3.2.2.2 se muestra el dimensionamiento de las baterías.

Por último, en cuanto a las comunicaciones, se añadirá un router que creará una red entre los microprocesadores y habilitará posibles conexiones con el exterior, a través de wifi.

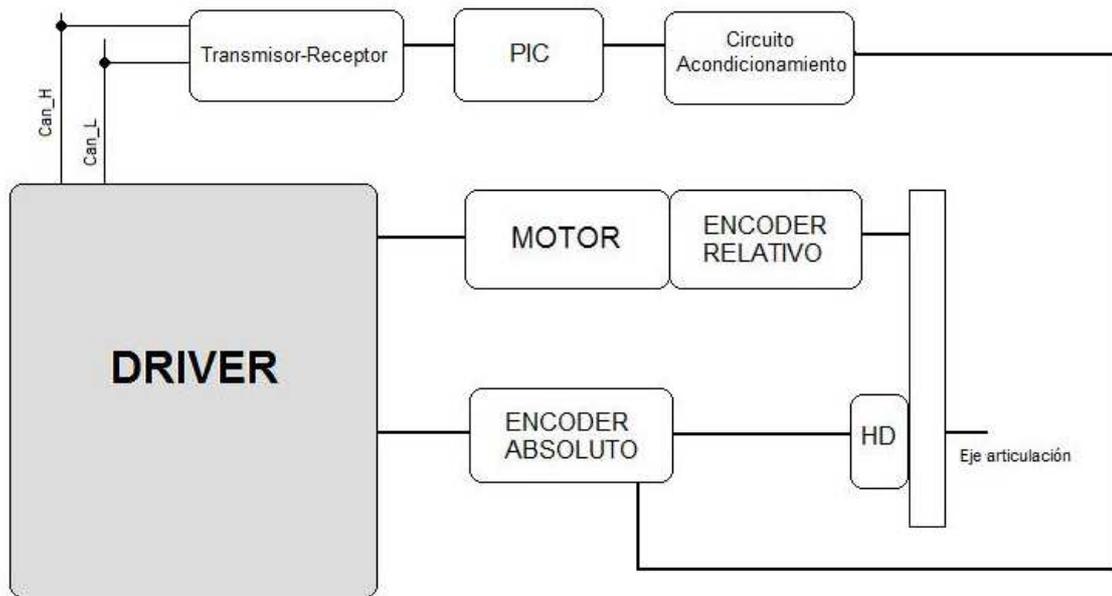
En la siguiente figura se muestra un esquema de la arquitectura hardware propuesta.



**Figura 20. Arquitectura hardware RH-2**

Como ya se ha mencionado anteriormente, este proyecto fin de carrera se centrará en el procesador principal del robot, que es el encargado del movimiento de las piernas. Este bloque se va a dividir en dos partes, la pierna izquierda y la pierna derecha. Cada una de ellas está compuesta por seis motores, tres de ellos en la cadera, uno en la rodilla y dos en el tobillo.

Todos los motores llevan asociados los mismos dispositivos para su control. El driver es el encargado de procesar todos los datos obtenidos de los diferentes dispositivos. Como se puede observar en la siguiente figura, tanto el motor como el encoder relativo transmiten la información obtenida directamente al driver. Mientras que el encoder absoluto, necesita de una electrónica asociada para poder comunicarse con el driver.



**Figura 21. Bloque motor-driver.**

Los dispositivos electrónicos que vemos en la figura, menos el driver, se encuentran acoplados o cerca de cada motor. Como se verá más adelante, los drivers se colocarán en unas placas de circuito impreso situadas en el muslo y en la tibia de cada pierna. Por lo tanto, estos drivers se deberán conectar con los dispositivos mencionados mediante cables.

## 2. Optimización sistemas electrónicos RH-2.

En este apartado se analizarán los componentes a utilizar en los diferentes sistemas del robot.

### 2.1 Accionadores.

#### 2.1.1 Motores.

Los motores son el principal dispositivo del sistema accionador. Para este proyecto se han seleccionado motores brushless de corriente continua sin escobillas de la marca Maxon, los cuales poseen un diseño sencillo ultra plano que permite una mayor facilidad para su colocación en el humanoide. Este tipo de motores poseen rotor externo, sus características principales son las siguientes:

- Vida útil insuperable.
- Relativamente alta inercia.
- Altas velocidades incluso a bajos voltajes.
- Bajo rizo de par (bobinado con núcleo de hierro).
- Conmutación electrónica en bloques.
- Buen precio.



**Figura 22 . Motores Brushless DC planos Maxon.**

Los motores planos de rotor externo se utilizan para diferentes aplicaciones en la industria, principalmente en escáner de código de barras, robótica, muestreo de aire, cintas transportadoras, etc.

En el robot humanoide RH-2 se utilizarán varios tipos de motores, en función de su potencia y par motor. La parte inferior, caminante, poseerá dos tipos de motores, ambos de 50 W pero con diferente par motor. Como ya se mencionó anteriormente, cada pierna del robot llevará montados seis motores, el montaje será el mismo para ambas piernas. En la siguiente tabla se muestra la distribución de los motores por cada articulación, se pueden distinguir los grados de libertad existentes en cada pierna.

Articulación	Eje de movimiento	Tipo motor	Alimentación	Par motor (mNm)
Cadera	Axial	339287	36	94,3
	Sagital	339287	36	94,3
	Frontal	251601	24	84,3
Rodilla	Sagital	251601	24	84,3
Tobillo	Sagital	251601	24	84,3
	Frontal	339287	36	94,3

**Tabla 5. Distribución motores parte caminante RH-2.**

En el capítulo 4 se estudiará la puesta en marcha de estos motores.

### 2.1.2 Transmisión.

Para transmitir el movimiento del motor a los ejes se han elegido reductores CSD – 25 y 20 de la casa Harmonic Drive LLC. Este modelo es la siguiente versión a la serie CSF, la cual era cuatro veces más gruesa. Además esta serie de reductores tienen otras características:

- Diseño simple y compacto.
- Exactitud de posicionamiento extremadamente alta.
- Buena fiabilidad y precisión en la transmisión del movimiento.
- Juego cero.



**Figura 23. Harmonic drive CSD.**

Los reductores elegidos para la transmisión de la parte inferior del robot son los mostrados en la tabla 6.

Articulación	DOF	Modelo HD
Cadera	1	CSD-25
	2	CSD-20
Rodilla	1	CSD-25
Tobillo	2	CSD-25

**Tabla 6. Reductores RH-2 “caminante”.**

## 2.2 Sensorización.

Unos de los dispositivos electrónicos que forman el RH-2 son los sensores, su objetivo principal es obtener información. Con los datos obtenidos, el robot será capaz de controlar el movimiento de los motores, conocer la posición de las articulaciones en cada momento, mantener el equilibrio, informar del estado de las baterías, etc.

Dependiendo del tipo de los datos obtenidos se pueden distinguir dos clases de sensores. Los que dan información sobre componentes del propio robot, sensorización interna, y los que se ocupan de registrar señales provenientes del entorno, sensorización externa.

### 2.2.1 Sensorización interna.

#### Sistema posicionamiento articular.

Es necesario conocer la posición de cada una de las articulaciones, para ello se ha de medir la posición angular. Esta posición ha de obtenerse en términos absolutos, para conocer donde están realmente los eslabones y poder generar las trayectorias correctamente. Conociendo la posición absoluta, no es necesario un sistema de sincronismo como el que utilizaba el RH-1.

El movimiento se transmite mediante el sistema formado por motor, correa y harmonic drive. El proceso comienza con el movimiento del eje del motor, este transmite el movimiento al eje de la articulación mediante la correa y el harmonic drive.

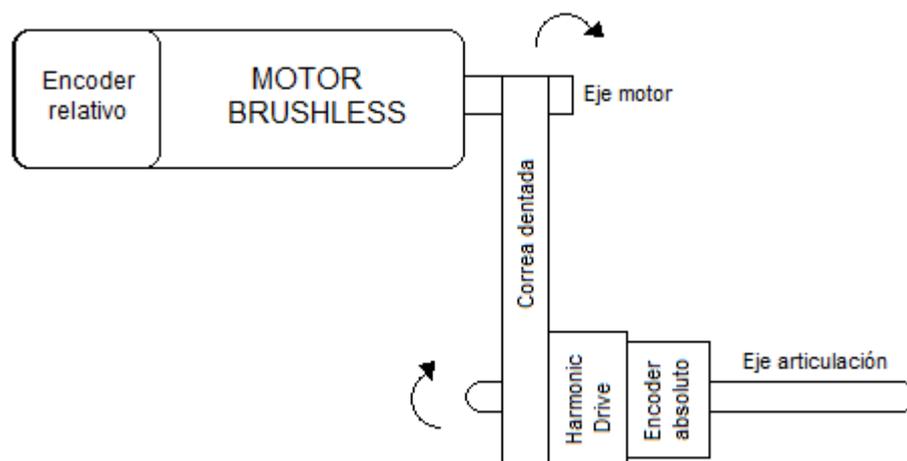


Figura 24. Sistema medición posición articular.

Además del conjunto compuesto por motor, correa y harmonic drive, el sistema de medición de la posición articular también posee otros dispositivos como se puede observar en la figura anterior. El encoder relativo acoplado al eje del motor se encargará de medir la posición relativa de la articulación, mientras que la misión del encoder absoluto acoplado al eje de la articulación, será medir la posición absoluta.

Los datos obtenidos por el encoder relativo serán enviados directamente al driver que controla al motor. Sin embargo, para transmitir la información obtenida por el encoder absoluto, será necesario un sistema de adaptación para enviar la señal. Este sistema estará compuesto principalmente por, un microcontrolador y un transmisor-receptor.

A continuación se estudiarán más a fondo los dispositivos electrónicos que componen el sistema de medición de la posición articular.

- **Encoder relativo.**

Los encoder relativos seleccionados serán de la marca Renco, modelo RCML15. La serie RCML combina los pulsos de conmutación de los motores brushless y la retroalimentación de posición incremental. Esta característica reduce el coste, mientras que mejora el rendimiento y la fiabilidad. El bajo perfil que posee el encoder hace que sea perfecto para los diseños donde el espacio es crítico.

Además posee otras características:

- Bloqueo del deslizamiento patentado para una fácil instalación.
- Capaz de medir hasta 5000 pulsos por vuelta.
- 2 canales de datos.
- Frecuencia de respuesta de 500 KHz.
- 3 canales de conmutación.



Figura 25. Encoder relativo RCML15.

- **Encoder absoluto.**

El encoder absoluto elegido será de la marca Avago Technologies, el modelo 7500 AEAS. Este dispositivo, además de caracterizarse por su reducido tamaño, alta precisión y montaje modular formado por un disco y la cabeza lectora, permite una fácil adaptación a nuestro diseño. Otra característica principal de este encoder es que es capaz de medir la posición desde 0º hasta 360º y con una precisión de 16 bits, codificada en código Gray.

Las demás características principales de este dispositivo son las siguientes:

- Dos salidas diferenciales seno/coseno.
- 11 salidas digitales más dos salidas de seno/coseno, generan un código Gray preciso de 16 bits.
- Ultra rápido. Envío de datos en serie a 1MHz.
- 12 bits de resolución para velocidades hasta 12000 rpm y 16 bits para velocidades inferiores a 10000 rpm.
- El bit más significativo puede ser invertido.



Figura 26. Encoder absoluto AEAS 7500.

- **Microcontrolador.**

El controlador elegido es el modelo PIC 18F2580 de la marca Microchip. Su objetivo será gestionar y construir los mensajes para transmitir los datos obtenidos por el encoder absoluto. Este tipo de controladores poseen las siguientes características principales:

- Permite una tasa de transferencia de 1Mbps.
- Tres buffer dedicados a la transmisión y dos para la recepción.
- Incluye cuatro timers.
- Integra el protocolo CAN.
- Reducido tamaño, bajo consumo y alta fiabilidad.
- Flexibilidad en la frecuencia del reloj, hasta 40MHz.

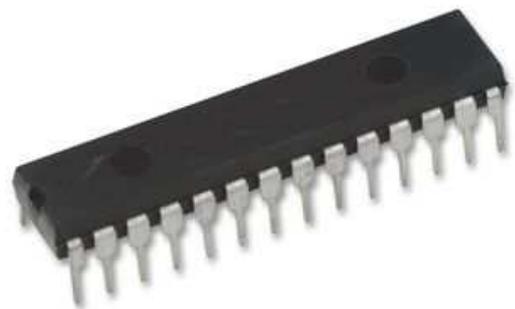


Figura 27. Controlador PIC 18F2580.

Este tipo de controladores suelen utilizarse en los nodos de los sistemas eléctricos de los automóviles. Esto demuestra que son microprocesadores sencillos y muy probados.

- **Transmisor-receptor.**

Se ha elegido un transmisor-receptor de la marca Philips, el modelo seleccionado es el PCA82C250, el cual está pensado para el funcionamiento junto a un controlador con protocolo Can bus. En este caso su misión será el enlace físico con el bus de CAN.

Es necesario amplificar y acondicionar la señal de salida del controlador para transmitirla sin problemas por el bus. Además este dispositivo ofrece aislamiento térmico y eléctrico entre el bus y el controlador. Este sistema también es muy usado en los sistemas eléctricos del automóvil.



Figura 28. Transmisor-receptor PCA82C250.

### Sistema orientación centro de masas.

Para mantener la estabilidad del robot humanoide en todos los terrenos, es necesario conocer la inclinación del cuerpo respecto del plano perpendicular con el suelo. Aunque la proyección del centro de masas del cuerpo del robot esté en un punto interior al polígono de soporte del robot, su tronco puede estar inclinado.

Por ejemplo, si el robot se encuentra subiendo una rampa, la posición del tronco deberá ser inclinada hacia delante, para favorecer y reforzar el punto de apoyo del robot. Por lo tanto, será necesario medir la posición del tronco en cualquier situación. De esto se encargará un sensor inercial situado en la parte superior del robot.

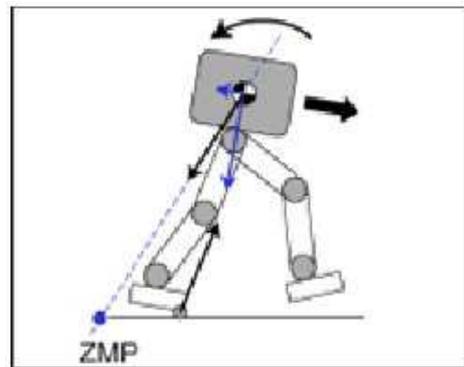


Figura 29. Orientación centro de masas.

- **Sensor inercial.**

En los proyectos anteriores de la serie RH, se combinaban acelerómetros y giróscopos analógicos. Esta tecnología se ha modernizado, y en el RH-2 se utilizará un sensor inercial modelo GAM-3D de la marca Technaid. La ubicación seleccionada para el sensor es en el tronco del robot, a la altura del pecho.

Este tipo de sensores comprende el uso de giróscopos, acelerómetros y magneto térmicos. Estos dispositivos proporcionan medidas de manera digital, con estos datos se podrá controlar el equilibrio del robot. La marca Technaid ofrece varias

soluciones implementadas para la comunicación entre el sensor y el procesador. Para este proyecto se ha seleccionado la comunicación mediante USB, ya que sólo se necesita un sensor.

### 2.2.2 Sensorización externa.

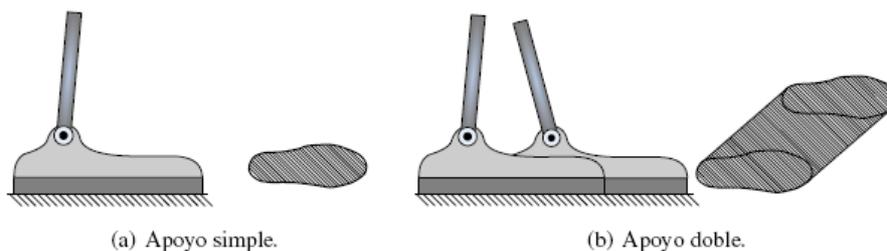
La toma de datos del entorno no es el principal objetivo del proyecto RH-2. La interacción entre el robot y el exterior, no se consideran relevantes, aunque puede ser una posible evolución para el proyecto. Por ello se expondrán más adelante algunos sensores que podrían ser instalados en el robot para simular algunas funciones humanas, como la vista, el oído y el tacto.

Aunque no sea la función más importante del robot, sí se instalará un sensor externo, el sensor de fuerza-par. Se considera como externo ya que, a pesar de que la información sirva para el funcionamiento interno del robot, se tomarán datos de carácter exoceptivo.

#### Sistema medición fuerza y par.

Es necesario conocer el criterio de estabilidad ZMP (punto de momento cero). El ZMP es un concepto muy importante en la resolución del movimiento de un robot bípedo, como es el caso de los humanoides. Mantener la estabilidad dinámica no es tarea fácil, ya que el torso del robot tendrá más masa e inercia que las piernas, las cuales soportarán todo el peso. El punto de momento cero es aquel en el que la componente tangencial del momento resultante de la inercia, la fuerza de la gravedad y las fuerzas externas es cero.

Según la teoría de estabilidad Miomir Vukobratovic, para asegurar la estabilidad del movimiento y que no se produzcan pares de vuelco, el ZMP tiene que estar en todo momento dentro del área efectiva de estabilidad. Esta área depende del apoyo del robot, que puede ser simple o doble. Durante el apoyo simple, el área efectiva de estabilidad comprende la suela del pie como se muestra en la figura 30. En el apoyo doble, el área de estabilidad corresponde al polígono de soporte formado entre los dos pies.



**Figura 30. Área efectiva de estabilidad.**

Para calcular el ZMP se pueden emplear sensores comerciales de fuerza-par, como los que se usarán en este proyecto. Proporcionan información sobre las componentes de las fuerzas en los tres ejes y los pares que actúan durante el movimiento de la articulación.

- **Sensor fuerza-par.**

Los sensores elegidos para la medición de la fuerza y el par que ejercen los puntos de apoyo son el modelo JR3 de la marca JR3 Inc. Este proyecto dispondrá de cuatro sensores, dos de ellos colocados en las muñecas y otros dos colocados en los tobillos.

Este tipo de sensores poseen seis grados de libertad, por lo que mide los pares y las fuerzas en los ejes del espacio cartesiano XYZ. Los datos de salida del sensor de fuerza-par serán en formato digital, ya que se encargará de convertirlos el circuito interno del sensor. Será capaz de medir una fuerza máxima de 30Kgs-fuerza, teniendo una resolución de menos de 10gr-fuerza.



**Figura 31. Sensor fuerza-par JR3.**

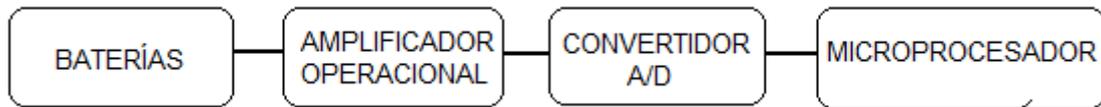
Como interfaz entre los sensores y el microprocesador se usarán placas conectadas a las ranuras PCI de cada microprocesador. Cada placa conectará dos sensores, los cuales reciben la alimentación y los datos por el cable de conexión a la tarjeta PCI. Es un cable de 8 pines de transmisión serie síncrona. El interfaz usa un avanzado chip para el procesamiento digital de señales, que permite filtrar las señas que recibe de los sensores JR3. Además dispones de 16K2 byte de memoria compartida entre el sensor y el microprocesador. La tarjeta también ajusta y monitoriza la tensión de alimentación de los sensores, para que permanezca estable en su modo diferencial (-12V, +12V)

- **Sensor autonomía energética.**

Para un buen funcionamiento de las baterías será necesario conocer el nivel de carga de las mismas, ya que si operan a niveles por debajo de un mínimo será perjudicial para la duración de las baterías.

El encargado de procesar los datos será el microprocesador secundario, manipulador. Para adaptar la señal se utilizará un amplificador operacional en su configuración no inversor, para disminuir la tensión de forma proporcional y poder llevarla al convertidor A/D. El dispositivo a usar será el AD7321, que convertirá la

señal analógica de las baterías a una señal digital, para más adelante enviarlo al microprocesador a través de RS-232.



**Figura 32. Sistema control alimentación.**

Se realizó un dimensionamiento de las baterías para el futuro sistema de alimentación, para ello se han de conocer primero los consumos de cada uno de los dispositivos a utilizar en el robot. A continuación se muestran dos tablas con las potencias consumidas por cada grupo de componentes, se ha dividido el estudio en cada uno de los microprocesadores del humanoide.

CAMINANTE	Tensión (V)	Corriente Nominal (A)	Corriente Máxima (A)	Potencia Nominal (W)	Potencia Máxima (W)	Unidades	Potencia Nominal Total (W)	Potencia Máxima Total (W)
<b>SENSORIZACIÓN</b>								
Controlador PIC 18F2580 a 40Mhz	5	0,038	0,044	0,19	0,22	12	2,28	2,64
Transmisor/Receptor PCA82C250	5	0,0001	0,00017	0,0005	0,00085	12	0,006	0,0102
Sensor A1321	5	0,0056	0,008	0,028	0,04	30	0,84	1,2
<b>COMPUTACIÓN</b>								
μP Sbc Gemini 5.25" core 2 duo	48	2,45	2,94	117,6	141,12	1	117,6	141,12
Driver ISCM8005+Lógica	48	0,1	0,25	4,8	12	12	57,6	144
Encoder Absoluto aeas 7500	5	0,025	0,03	0,125	0,15	12	1,5	1,8
Encoder Incremental Renco	5	0,055	0,055	0,275	0,275	12	3,3	3,3
Driver ISCM8005+Motor Maxon 339287	36	0,861	4,86	30,996	174,96	6	185,976	1049,76
Driver ISCM8005+Motor Maxon 251601	24	2,36	16,5	56,64	396	6	339,84	2376
<b>POTENCIA TOTAL</b>							<b>708,942</b>	<b>3719,8302</b>

**Tabla 7. Consumos conjunto "caminante".**

MANIPULADOR	Tensión (V)	Corriente Nominal (A)	Corriente Máxima (A)	Potencia Nominal (W)	Potencia Máxima (W)	Unidades	Potencia Nominal Total (W)	Potencia Máxima Total (W)
<b>SENSORIZACIÓN</b>								
Controlador PIC 18F2580 a 40Mhz	5	0,038	0,044	0,19	0,22	12	2,28	2,64
Transmisor/Receptor PCA82C250	5	0,0001	0,00017	0,0005	0,00085	12	0,006	0,0102
Convertidor AD7321	16,5	0,00018	0,0009	0,00297	0,01485	1	0,00297	0,01485
<b>COMPUTACIÓN</b>								
μP Sbc Gemini 5.25" core 2 duo	24	2,45	2,94	58,8	70,56	1	58,8	70,56
Driver ISCM8005+Lógica	24	0,1	0,25	2,4	6	12	28,8	72
Encoder Absoluto a eas 7500	5	0,025	0,03	0,125	0,15	12	1,5	1,8
Encoder Incremental Renco	5	0,055	0,055	0,275	0,275	12	3,3	3,3
Driver ISCM8005+Motor Maxon 339282	36	0,893	5,38	32,148	193,68	6	192,888	1162,08
Driver ISCM8005+Motor Maxon 251601	24	2,36	16,5	56,64	396	6	339,84	2376
<b>COMUNICACIÓN</b>								
Wireless N Gigabit Router TEW-633GR	12	0,779	0,935	9,348	11,22	1	9,348	11,22
<b>POTENCIA TOTAL</b>							<b>636,76497</b>	<b>3699,62505</b>

Tabla 8. Consumos conjunto “manipulador”.

- **Sensor presión en pie.**

Un futuro proyecto para el RH-2 será realizar un sensor para medir la presión en la planta del pie. De ese modo se conocerá la posición y la superficie de contacto del pie del robot. El sensor que se pretende realizar estará compuesto por un array de sensores de presión.

La idea es usar una suela de un material elástico como el látex, que sea capaz de adaptarse a las irregularidades del terreno. Mediante este array de sensores se obtendrán gran cantidad de datos, gracias a ello se podrá conocer mejor la superficie sobre la que está situado el robot.

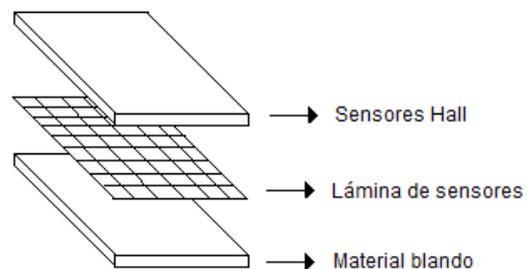


Figura 32. Sistema medida presión.

El array de sensores estará dividido en celdas, cada una de ellas dispondrá de un sensor de presencia. El funcionamiento será el siguiente, se coloca un sensor de efecto Hall en la parte superior, y en la inferior se dispondrá de un imán. De este modo se podrá medir la distancia de la parte superior al imán, o lo que es lo mismo la distancia que se ha deformado el material elástico.

Con este control de la pisada del robot y que la superficie de contacto con el suelo sea flexible, se conseguirá una apoyo del pie que asemeje al humano.

### **Futuros sistemas de sensorización.**

A continuación se resumen algunos de los posibles sistemas aplicables al RH-2 para dotarle de sentidos similares a los humanos.

- **Tacto.**

Para otorgar al robot la posibilidad de reconocer cuándo mantiene contacto con un objeto, se pueden instalar sensores capacitivos en algunas zonas de la carcasa externa. Este tipo de sensores reaccionan antes metales y no metales, que al aproximarse a la superficie activa sobrepasan una determinada capacidad. La distancia de conexión respecto a un determinado material es tanto mayor cuanto más elevada sea su constante dieléctrica.

En el departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad Carlos III de Madrid se han desarrollado otros robots. Uno de ellos es Maggie, que dispone de sensores de contacto para otorgarle de tacto. Otra posible solución sería aplicar este tipo de sensores al RH-2. Estos sensores crean un campo magnético al situarlos en contacto con una superficie dieléctrica de plástico o cristal. Cuando un cuerpo se acerca al campo y lo atraviesa, se detecta una caída de tensión en el condensador del circuito.



**Figura 33. Sensor capacitivo.**

- **Oído.**

Se pueden instalar micrófonos en el robot para otorgarle la capacidad de oír. Pero no sólo interesa que el robot sea capaz de oír, sino que también pueda reconocer de dónde procede el sonido e identificar qué tipo de sonido se ha producido.

Para reconocer el lugar de donde procede el sonido, se podrían instalar varios micrófonos en el robot, y dependiendo de la intensidad recibida en cada uno de ellos

reconocer el lugar de procedencia. También se puede digitalizar el sonido recibido, de este modo se puede crear una base de datos en el robot que asocie estos sonidos a órdenes orales.

- **Vista.**

La cabeza del robot dispone de espacio para instalar una web-cam o una cámara TCP/IP de tamaño reducido. La ventaja de éstas últimas es que se pueden conectar directamente a través del router del robot. De este modo el usuario podría conectarse a la cámara desde otra ubicación a través de internet.

Otras facetas importantes de la vista de un robot humanoide serían el reconocimiento facial, la detección de objetos en movimiento o la memorización de algunos patrones visuales. Estas funciones harían que el robot interactúe más con el medio que le rodea.



**Figura 34. Minicámara TCP/IP.**

## **2.3 Sistemas de control.**

La información obtenida por el sistema de sensorización del RH-2 ha de ser clasificada y procesada. Esta función la lleva a cabo el sistema computacional, formado principalmente por dos microprocesadores dedicados a la gestión de los brazos y las piernas del robot. Otra posible función será gestionar sistemas de video y audio.

Existen otros elementos de control en el robot, los drivers. Estos dispositivos se encargarán de enviar y recibir las señales necesarias para el funcionamiento de los motores. El sistema será individualizado, es decir, cada motor tendrá asociado un único driver para su control.

Para poder poner en funcionamiento los motores, previamente es necesaria una programación del driver. En el capítulo 4 se explicará la puesta en marcha de los motores y la configuración del dispositivo de control.

### **2.3.1 Control computacional.**

El principal objetivo de dividir el sistema computacional en dos microprocesadores es el de dividir las tareas. El microprocesador principal, caminante, se encargará de controlar las piernas para mantener el equilibrio y realizar caminatas. Mientras que el microprocesador secundario o manipulador, de controlar los brazos y el tronco.

Si en el futuro se añaden dispositivos de audio o video, el encargado de gestionarlos será el manipulador, ya que estos sistemas requieren de una alta carga computacional. El control de los brazos y tronco es menos complejo que el de las piernas, además no es una tarea crítica en la estabilidad del robot.

- **Microprocesador principal.**

Los microprocesadores elegidos para el sistema computacional son el modelo SBC Gemini 5.25" Embedded Intel Core 2 Duo de la marca ARCOM. Este dispositivo se adapta perfectamente a los requisitos y a la arquitectura del sistema computacional. Además dispone de ranuras de expansión PCI, una característica necesaria para la conexión de los sensores de fuerza-par y la tarjeta de Can bus.

El chip core 2 duo ofrece una arquitectura x86, fiable y conocida en los primeros microprocesadores que se han fabricado. El bus interno es de 64 bits, por lo que la velocidad de comunicación interna será aún mayor. El tamaño del bus influye en la velocidad de transferencia a través de las ranuras PCI que cuentan con un reloj interno de transferencias síncronas de 33 MHz.

La velocidad de procesamiento ofrecida por estos microprocesadores es de 1.60 GHz a 3.33 GHz. Velocidad suficiente para el uso necesario en el proyecto y para ampliaciones futuras.



**Figura 35. Microprocesador SBC Gemini.**

Otras características principales:

- Dispone de una ampliación máxima de 3GB de memoria RAM.
- 4 puertos LAN, uno se usará para la conexión punto a punto y otro para la conexión a la red a través del router.
- 2 puertos serial ATA, para la conexión de discos duros.
- 4 puertos USB, para la conexión de sensores o periféricos de entrada y salida.
- 8 entradas y salidas digitales, para la conexión y manejo sencillo y rápido de señales digitales de sensores.
- Una ranura PCI, para la conexión del sensor de fuerza-par.
- Una ranura mini-PCI, para la conexión de las tarjetas Can bus.
- Un puerto RS-232, para la conexión con el PC.

Además dispone de puertos serie y puertos para conexión de pantalla, lo que resulta una gran ayuda a la hora de programarlo y manejar su sistema operativo.

### 2.3.2 Control de motores.

En este apartado se pretende evaluar los controladores de los actuadores, lo que se considera el entorno del control de los ejes del movimiento del robot humanoide. El dispositivo encargado de ello es el driver. Un driver es un actuador que se encarga de regular el flujo de intensidad que recibe el motor según las ordenes que reciba éste de la unidad central de control, para poder realizar los movimientos del robot de forma deseada.

Se necesita un driver de pequeñas dimensiones para poder ubicarlo dentro del humanoide, en el apartado 5.1.2 se explicará la distribución de los drivers en las placas de circuito impreso. Además el driver ha de proporcionar la suficiente potencia para alimentar a los motores encargados del movimiento de las articulaciones y poseer una gran capacidad de programación para el manejo de los motores.

- **Driver.**

El dispositivo seleccionado para el control de los motores es el modelo ISCM8005 de la marca Technosoft. Es un servo driver que proporciona un controlador de movimiento con funciones PLC incluidas y un amplificador, en una unidad muy compacta. El formato de los drivers ISCM es ideal para montar en aplicaciones donde se dispone de un espacio reducido, como es el caso de este proyecto. Gracias a su controlador integrado, este dispositivo puede ser programado fácilmente para ejecutar de forma autónoma complejos comando de control de movimientos.



**Figura 36. Driver ISCM 8005.**

Las características principales del driver son las siguientes:

- Adecuado para motores CC, brushless y de pasos.
- Permite determinar la posición, velocidad y controlar el par.
- La tensión de alimentación del motor es de hasta 80V.
- Protecciones contra sobretensiones, cortocircuitos, fallos de masa, etc.
- Capacidad de soportar altas corrientes (5 A nominales, 16,5 A de pico) necesarias para ejecutar los pares de movimiento del robot.

- Posee conexión a puerto serie RS-232, para conectarlo con el PC.
- Tiene 8 entradas/salidas digitales programables y 2 entradas analógicas programables.
- Posibilidad de comunicación mediante CAN-bus 2.0 hasta 1Mbps.
- Varios modos de control.
- Lenguaje propio (TML) para el control de los motores.
- 33 modos de búsqueda de posición inicial.
- Reducido tamaño, 70x50mm.

Las aplicaciones para este tipo de drivers son muy variadas, sistemas distribuidos con control inteligente de motor, imprenta, fábricas de automatización, industria textil, automoción, etc.

El poseer un lenguaje propio para el control de los motores es una gran ventaja, ya que permite crear funciones y programas que pueden ser llamados desde la unidad de control. Además se pueden definir tablas almacenadas en la memoria EEPROM del driver para ser ejecutadas en cualquier momento.

## 2.4 Comunicaciones.

Respecto a las comunicaciones, como parte del soporte del sistema, es vital conseguir la máxima velocidad posible. La consulta de datos es constante entre los distintos dispositivos conectados al Can Bus y entre los microprocesadores. También debe existir una comunicación del sistema con el exterior, a través de una red externa, a ser posible inalámbrica.

- **Router.**

Existe una amplia gama de routers inalámbricos en el mercado, pero según los requisitos de velocidad de 1Gbps, tamaño, peso y consumo reducidos sólo se ha encontrado un candidato que ofrezca estas características. El modelo TEW-663gr de la marca Trednet, que incorpora la tecnología de red inalámbrica más reciente para aumentar la velocidad, seguridad y fiabilidad.

Una de las novedades que incorpora el router es el soporte del protocolo 802.11 n, que aumenta el alcance y la cobertura inalámbrica de datos, consiguiendo velocidades de transmisión de datos de 300 Mbps.



Figura 37. Router TEW-663gr.



- **Protocolo CAN bus.**

La comunicación entre los encoders de cada motor y los drivers que los controlan se realizará mediante el protocolo CAN bus. Este tipo de comunicación bidireccional ha de ser rápida y fiable, ya que debe controlar el tráfico masivo de información y actuar atendiendo a las preferencias de los mensajes.

La conexión ha de ser sencilla y con poco cableado, ya que los encoders y motores se encontrarán en zonas alejadas y móviles, y hay que evitar problemas durante el movimiento.



# Capítulo 4:

## *PUESTA EN MARCHA MOTORES BRUSHLESS.*

---

## 1. Introducción.

Dado que el principal objetivo de este proyecto es la implementación de las placas de circuito impreso de la parte inferior del robot, y ésta se encargará principalmente del movimiento de las articulaciones, será necesario un conocimiento previo de la puesta en marcha de los motores a utilizar. Como ya se ha explicado anteriormente el encargado de controlar el movimiento de los motores será el driver, el cual, necesitará las señales de otros dispositivos.

En este apartado se estudiará el patillaje de los diferentes dispositivos seleccionados así como su conexionado con el driver, también se analizará el software proporcionado por el fabricante para la programación y configuración de los motores.

## 2. Conexionado.

Previamente al montaje de las placas de circuito impreso se han realizado pruebas de la puesta en marcha de los motores. De este modo, se ha podido comprobar el correcto funcionamiento de los dispositivos seleccionados. Para realizar las conexiones necesarias se ha utilizado una tarjeta de entradas/salidas de la marca Technosoft compatible con el driver seleccionado. La tarjeta permite un acceso sencillo y directo a los principales componentes ya que dispone de conectores para motores de paso y brushless, para la conexión al PC a través de RS-232, para la alimentación, para la comunicación por CAN, etc.

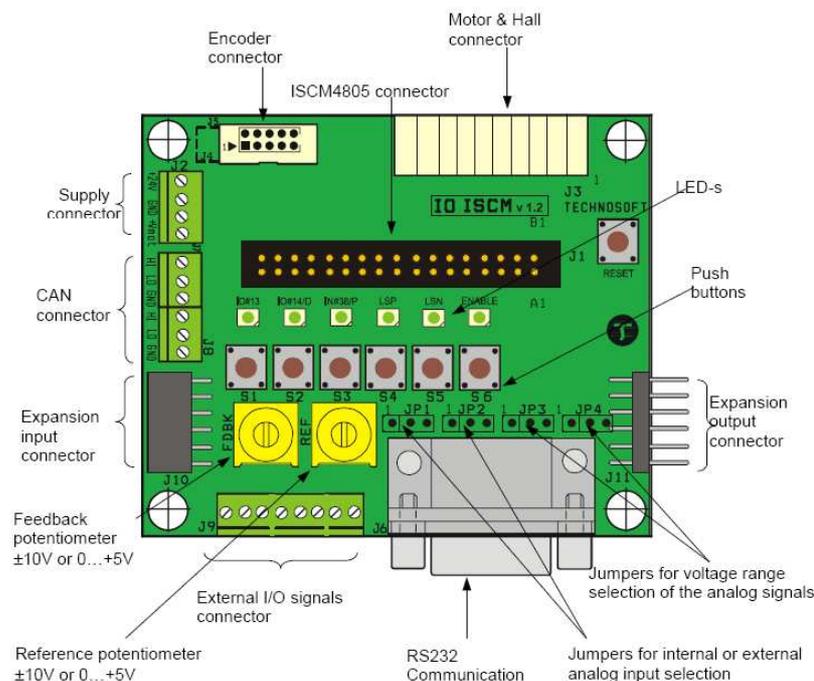


Figura 38. Tarjeta entradas/salidas.

Para conseguir controlar el motor se han utilizado los siguientes conectores mostrados en la figura anterior: *Motor & Hall connector*, *Encoder connector*, *RS232 Communication*, *Supply connector*. A continuación se procederá a explicar uno a uno la distribución de los pines en estos conectores. También se comentará cómo se han de conectar los componentes directamente con el driver, ya que así será el esquema que seguirán las placas de circuito impreso. Además se mostrará el patillaje de cada dispositivo utilizado.

- **Driver.**

- *Patillaje*: Sus conexiones se dividen en dos caras, A y B. Cada una de ellas posee 17 pines, lo que hacen un total de 34 pines. En la cara A del driver, se distingue fácilmente el microprocesador, condensadores así como pequeños chips con distintas finalidades. En la cara B del driver se encuentran los transistores encargados de generar algunas órdenes de control sobre los motores.

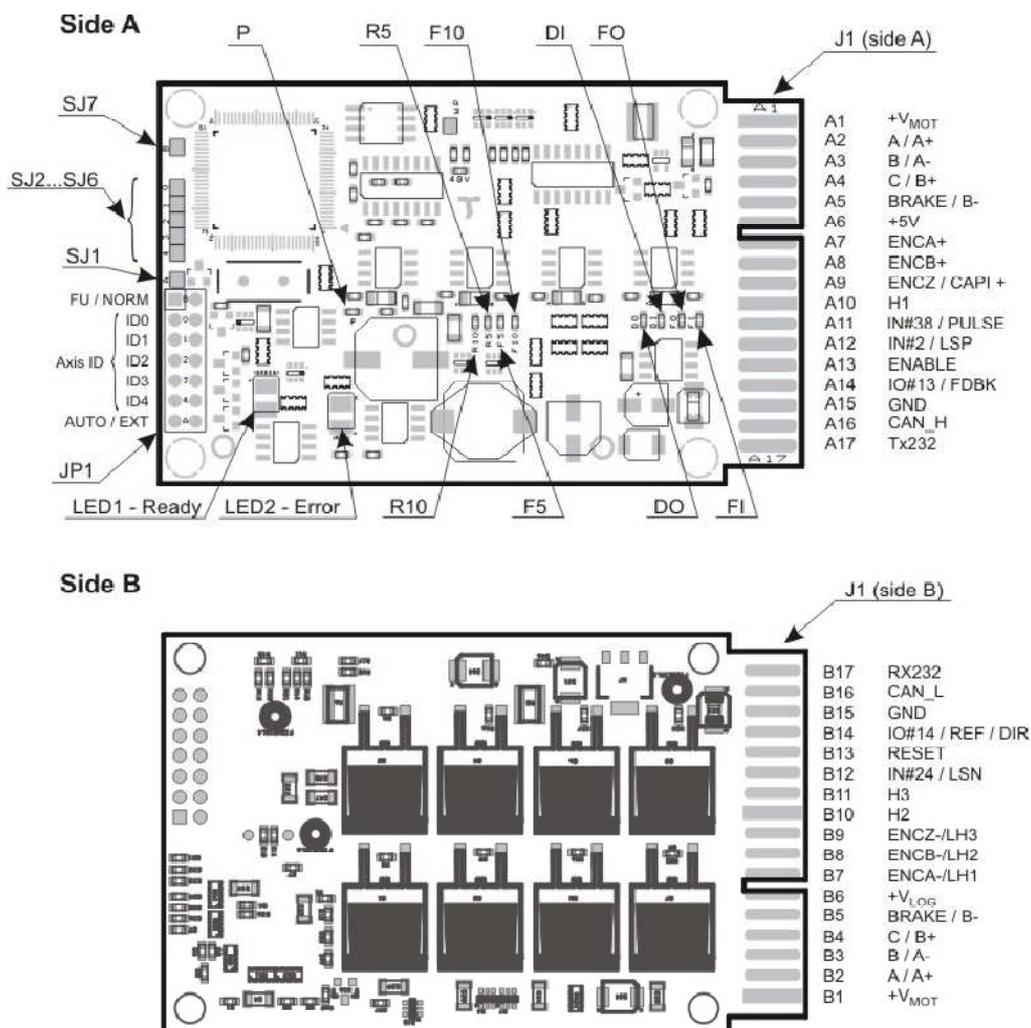


Figura 39. Esquema driver ISCM8005.

En las tablas que se muestran a continuación se describen los pines de ambas caras del driver, se define su tipo, el nombre, y la función que desempeña cada uno de ellos.

Pin	Nombre del pin	Tipo	Función
A1	+Vmot	I	Terminal positivo de la alimentación del motor: de 12 a 80V
A2	A / A+	O	Fase A para motores brushless Terminal + para motores brrushed
A3	B / A-	O	Fase B para motores brushless Terminal - para motores brrushed
A4	C / B+	O	Fase C para motores brushless
A5	FRENO / B-	O	Salida para el freno
A6	+5V	O	5V generados internamente
A7	ENCA+	I	Señal A del encoder Señal A+ del encoder diferencial
A8	ENCB+	I	Señal B del encoder Señal B+ del encoder diferencial
A9	ENCZ / CAPI+	I	Señal Z del encoder Señal Z+ del encoder diferencial
A10	H1	I	Señal 1 del sensor Hall
A11	IO#38 / PULSE	I/O	Salida digital de 3.3V Entrada digital de 5V
A12	IN#2 / LSP	I	Entrada de 5V
A13	ENABLE	I	Conectar a +5V para desactivar las salidas PWM
A14	IO#13 / FDBK	I/O	Salida digital de 3.3V Entrada digital de 5V Entrada analógica de 0V a 5V. Se puede usar como realimentación de posición analógica o velocidad del tachó
A15	GND	-	Tierra
A16	CAN_H	I/O	Línea positiva del bus CAN
A17	TX232	O	Línea de transmisión del puerto RS-232

Tabla 9. Descripción pines cara "A" driver.

Pin	Nombre del pin	Tipo	Función
B1	+Vmot	I	Terminal positivo de la alimentación del motor: de 12 a 80V
B2	A / A+	O	Fase A para motores brushless Terminal + para motores brrushed
B3	B / A-	O	Fase B para motores brushless Terminal - para motores brrushed
B4	C / B+	O	Fase C para motores brushless
B5	FRENO / B-	O	Salida para el freno
B6	+Vlog	I	Terminal positivo de la alimentación del driver
B7	ENCA- / LH1	I	Señal A- del encoder diferencial
B8	ENCB- / LH2	I	Señal B- del encoder diferencial
B9	ENCZ / LH3	I	Señal Z- del encoder diferencial
B10	H2	I	Señal 2 del sensor Hall
B11	H3	I	Señal 3 del sensor Hall
B12	IN#24 / LSN	I	Entrada de 5V
B13	RESET	I	Conectar a +5V para resetear la tarjeta
B14	IO#14 / REF / DIR	I/O	Salida digital de 3.3V Entrada digital de 5V Entrada analógica de 0V a 5V. Se puede usar como referencia analógica de posición, de velocidad o de torque.
B15	GND	-	Tierra
B16	CAN_H	I/O	Línea negativa del bus CAN
B17	TX232	O	Línea de recepción del puerto RS-232

Tabla 10. Descripción pines cara “B” driver.

- **Motor.**

Al driver se le pueden conectar multitud de tipos de motores: brushless (sin escobillas), paso a paso de 2 y 3 fases y brushed (con escobillas). Sin embargo para el prototipo RH-2 sólo se van a utilizar motores brushless, por lo que se analizará la conexión de este tipo de motores.

- *Patillaje*: el motor brushless de la marca Maxon utilizado dispone de un conector de 8 pines, en el cual se distinguen las señales de las tres fases del motor, los sensores hall y la alimentación. Se ha de tener en cuenta que las fases del motor conducen una corriente mayor que el resto de señales, por ello se deberán utilizar cables o pistas más gruesas que para el resto.

Pin	Nombre
1	Sensor Hall 1
2	Sensor Hall 2
3	4.5...18 VDC
4	Fase motor 3
5	Sensor Hall 3
6	GND
7	Fase motor 1
8	Fase motor 2

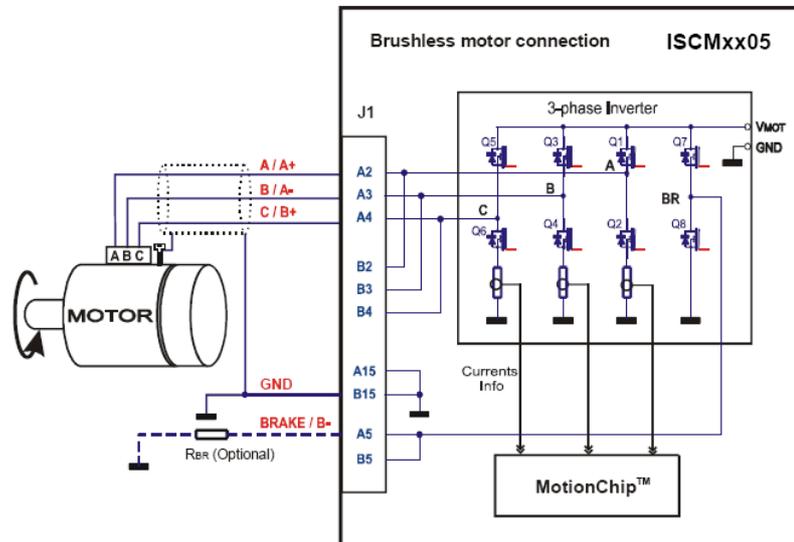
**Tabla 11. Pin-out motor Maxon.**

- *Conexión I/O*: se ha utilizado un cable que une el conector del motor con el *Motor & Hall connector* de la tarjeta de entradas/salidas. La distribución de los pines de este conector, también llamado J3, se muestra en la siguiente tabla.

Pin	Nombre del pin	Tipo	Función
1	A / A+	O	Fase A para motores brushless
2	B / A-	O	Fase B para motores brushless
3	C / B+	O	Fase C para motores brushless
4	BRAKE / B-	O	Salida freno para motores brushless
5	GND	-	Tierra
6	+5V	O	Terminal positivo alimentación
7	H1	I	Señal Hall 1 del sensor digital Hall
8	H2	I	Señal Hall 2 del sensor digital Hall
9	H3	I	Señal Hall 3 del sensor digital Hall
10	GND	-	Tierra

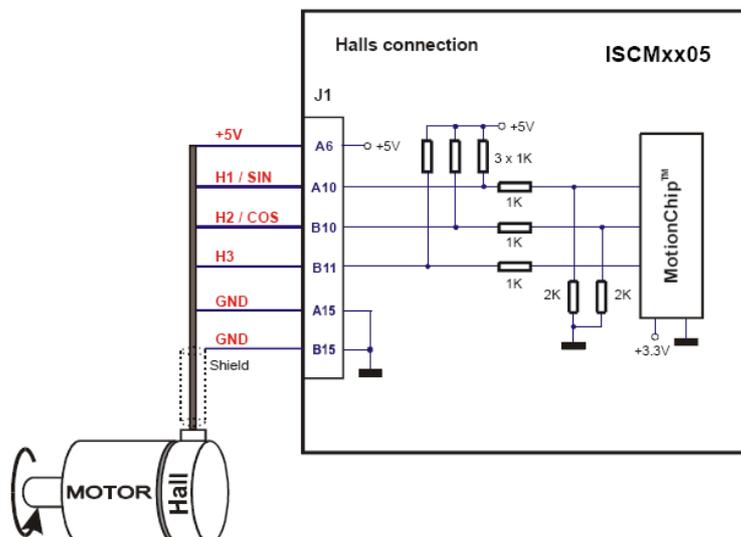
**Tabla 12. Descripción pines conector J3.**

- *Conexión driver*: la correspondencia de las señales del motor con los pines del driver se muestra en las siguientes figuras. Ésta será la distribución que seguirán las pistas en las placas de circuito impreso para el robot RH-2.



**Figura 40. Conexión motor brushless.**

En la anterior figura, además de las fases del motor que conectan con los pines A2, A3 Y A4 respectivamente y la tierra que conecta con el pin A15, se distingue otra conexión, la resistencia de frenado. Es una resistencia opcional que se conectaría entre masa y el pin A5 del driver. En la página 73 se explicará el uso de esta resistencia. La siguiente figura muestra las conexiones de los sensores Hall con el driver.



**Figura 41. Conexión sensores hall.**

- **Encoder relativo.**

- *Patillaje*: para el control de la posición se ha utilizado un encoder relativo de la marca Renco. Este encoder dispone de 8 pines, de los cuales sólo se conectarán 5, ya que al utilizarse para controlar la posición únicamente hay que conectar la alimentación y las fases A, B, y Z (que serán los encargados de generar los pulsos de posición). El resto de pines servirían para conectar el encoder en modo diferencial.

Pin	Nombre
1	GND
2	Z
3	A
4	+5V
5	B
6	U
7	V
8	W

Tabla 13. Pin-out encoder Renco.

- *Conexión I/O*: el conexionado del encoder a la tarjeta de entradas/salidas se ha de realizar mediante el *Encoder connector*. Según las hojas de características de la tarjeta de entradas/salidas este conector corresponde con el J5, sirve para conectar el encoder incremental y sigue el pin-out mostrado en la siguiente tabla.

Pin	Pin name	Type	Function
1	GND	-	Ground
2	ENCZ	I	Single-ended encoder Z signal
3	ENCA	I	Single-ended encoder A signal
4	+5V		Positive terminal of the +5V logic supply
5	ENCB		Single-ended encoder B signal

Tabla 14. Descripción pines conector J5.

Tras realizar pruebas en el laboratorio se comprobó que la distribución de los pines no correspondía con la indicada y seguía la mostrada en la siguiente tabla. También se comprobó que si el encoder al obtener los datos de posición, cuenta de forma negativa, sólo será necesario intercambiar las fases A y B.

Pin	Pin name	Type	Function
1	GND	-	Ground
10	ENCZ	I	Single-ended encoder Z signal
8	ENCA	I	Single-ended encoder A signal
4	+5V		Positive terminal of the +5V logic supply
6	ENCB		Single-ended encoder B signal

Tabla 15. Descripción pines conector J5(corregida).

- *Conexión driver*: normalmente los pines que general los pulsos reciben los nombres de ENCA+, ENCB+ y ENCZ, los cuales han de conectarse respectivamente a los pines A7, A8 y A9 del driver. La alimentación se conectará al pin A6 y la masa al pin A15. La siguiente figura muestra el conexionado final.

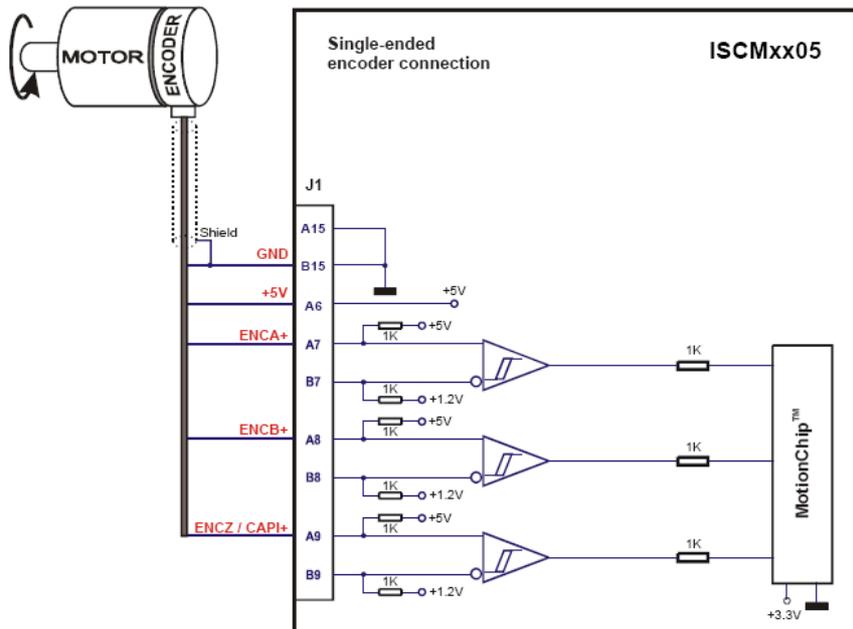


Figura 42. Conexionado encoder incremental.

- **Encoder absoluto.**

- *Patillaje*: este componente posee un patillaje más complejo que el resto, tiene 22 pines distribuidos en dos filas como se muestra en la figura. Únicamente se utilizarán 8 de los pines, ENCA-, ENCA+, ENCB-, ENCB+, ENCZ-, ENCZ+, que corresponden con las señales diferenciales de los pulsos transmitidos por el encoder, +5V y GND, que serán la alimentación.

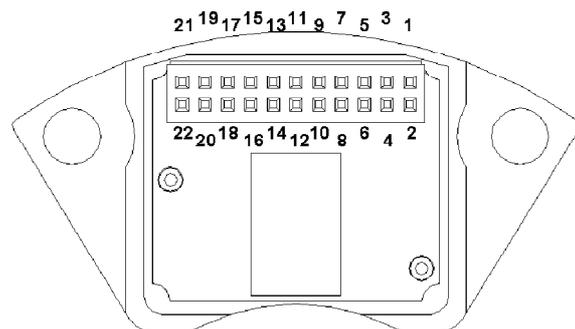


Figura 43. Pin-out encoder absoluto.

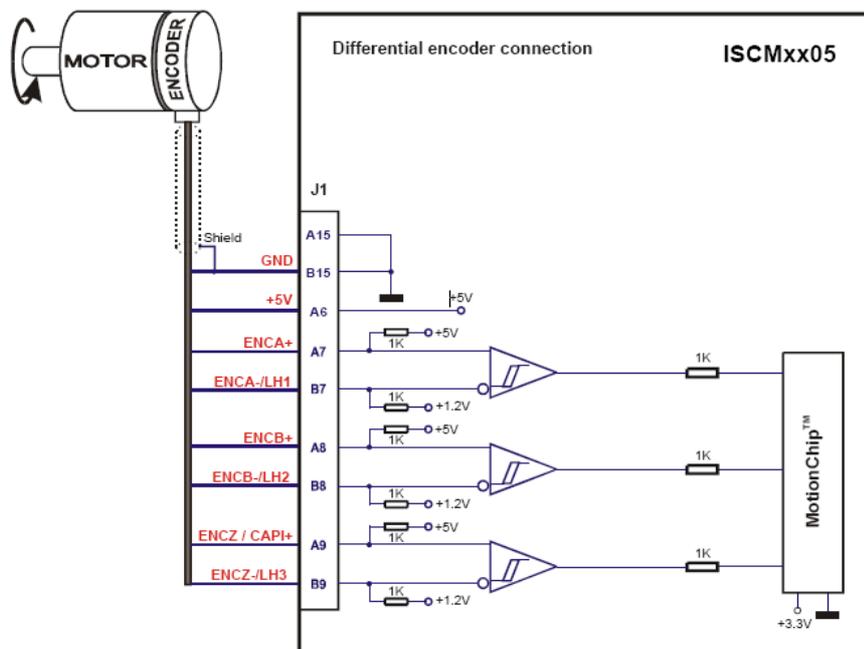
- *Conexión I/O*: para la puesta en marcha de los motores no ha sido posible utilizar el encoder absoluto, ya que éste se ha de fijar al eje de la articulación. En las pruebas realizadas en el laboratorio no se disponía del sistema de transmisión, por lo que únicamente se ha trabajado con el motor y su eje.

La tarjeta de entradas/salidas dispone de un conector para encoder en general, el *Encoder connector* de la figura 38. Según el dispositivo que se utilice existe una configuración diferente de los pines en el conector. A continuación se muestra cuál sería la distribución si se conectase un encoder absoluto.

Pin	Nombre del pin	Tipo	Función
1	GND	-	Tierra
2	+5V	O	Terminal positivo alimentación
3	GND	-	Tierra
4	+5V	O	Terminal positivo alimentación
5	ENCA-/LH1	I	Señal diferencial negativa entrada A
6	ENCA+	I	Señal diferencial positiva entrada A
7	ENCB-/LH2	I	Señal diferencial negativa entrada B
8	ENCB+	I	Señal diferencial positiva entrada B
9	ENCZ-/LH3	I	Señal diferencial negativa entrada Z
10	ENCZ+	I	Señal diferencial positiva entrada Z

**Tabla 16. Descripción pines conector J4.**

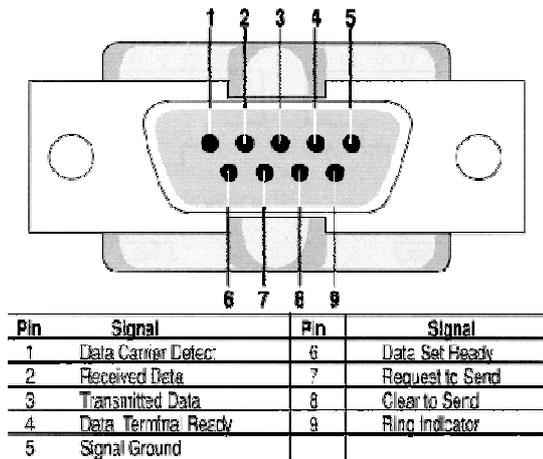
- *Conexión driver:* al conectar el encoder absoluto directamente al driver habrá varios pines que se utilicen a la vez para este dispositivo y para el encoder relativo. Estos pines serán el A7, A8 y A9, es decir, los pulsos positivos enviados por ambos componentes. El resto de señales enviadas por el encoder absoluto se conectarán de la siguiente manera con el driver.



**Figura 44. Conexión encoder absoluto.**

- **RS-232.**

- *Patillaje:* existen varios tipos de conectores RS-232, en este caso se va a utilizar uno del tipo DB9. Únicamente van a entrar en funcionamiento 3 de los 9 pines que posee, uno para el envío de datos Tx (pin 3), otro para la recepción de datos Rx (pin 2) y por último un pin de tierra (pin 5) para tener una referencia común en las señales.



**Figura 45. Conector RS-232, DB9.**

- *Conexión I/O:* para la comunicación entre el driver y el PC encargado de controlarle, se ha elegido la comunicación RS-232, pudiéndose haber realizado también por el puerto CAN. La conexión del RS-232 con la tarjeta de entradas/salidas se ha realizado directamente a través de un cable común para este tipo de conectores. Esto se debe a que la tarjeta dispone de un conector para comunicaciones mediante RS-232.

Hay que observar con detenimiento el patillaje de los conectores utilizados, ya que en ocasiones es necesario cruzar los pines de transmisión de datos en el cable porque coinciden los pines de transmisión y de recepción de datos en ambos conectores. Como se puede observar en la figura ... y en la siguiente tabla, los pines de transmisión y recepción de datos ya están cruzados en el conector de la tarjeta de entradas/salidas.

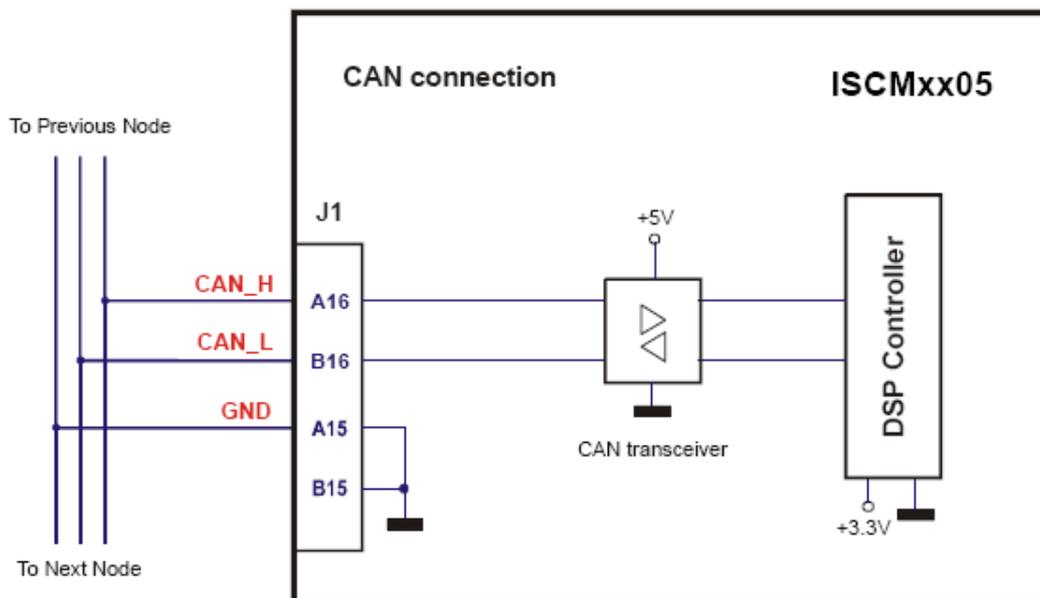
Pin	Nombre del pin	Tipo	Función
1	NC	-	No conectado
2	TX232	O	Transmisión de datos
3	RX232	I	Recepción de datos
4	NC	-	No conectado
5	GND	-	Tierra
6	NC	-	No conectado
7	NC	-	No conectado
8	NC	-	No conectado
9	NC	-	No conectado

**Tabla 17. Descripción pines conector J6.**

- *Conexión driver*: la transmisión de datos en las placas de circuito impreso que se van a diseñar para el RH-2 no se va a realizar mediante RS-232. Los datos que ha de enviar y recibir el driver al microprocesador encargado de controlarle serán enviados a través del CAN Bus.

- **CAN Bus.**

La comunicación por el CAN Bus va a ser muy importante, ya que transmitirá los datos de los encoders absolutos y los drivers en las placas de circuito impreso del RH-2. Es importante mantener el circuito de comunicación aislado de interferencias, por ello se recomienda utilizar pistas de masa rodeándolo.



**Figura 46. Conexión CAN.**

La red del CAN requiere unas resistencias de terminación. El valor recomendado es entre 105 y 135  $\Omega$  siendo el valor típico elegido 120  $\Omega$ . Se colocará una al principio de cada red y otra al final, con el fin de aislar el circuito de comunicación.

- **Alimentación.**

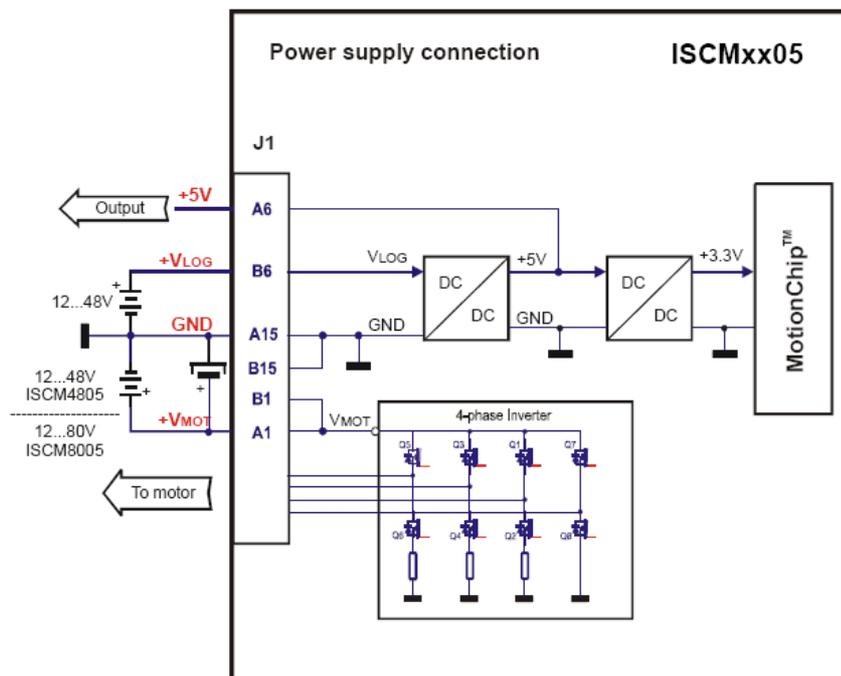
- *Conexión I/O*: Para la alimentación hay que tener en cuenta que son necesarias dos alimentaciones distintas, *logic supply* (12-48V) y *motor supply* (12-80V), la primera de ellas se encarga de alimentar a los circuitos complementarios y la segunda de alimentar al motor. La tarjeta de entradas/salidas facilita el conector J2 (*supply connector*) para el conexionado de la alimentación, el cual posee el pin-out mostrado en la tabla 3.

Pin	Nombre del pin	Tipo	Función
1	+Vlog	I	Terminal positivo alimentación de la lógica
2	GND	-	
3	GND	-	
4	+Vmot	I	Terminal positivo alimentación del motor

**Tabla 18. Descripción pines conector J2.**

- *Conexión driver*: los pines utilizados para otorgar de alimentación al driver serán B6 para la lógica y A1 para el motor. Estas señales transportarán gran cantidad de corriente, por lo que el ancho de las pistas que se van a utilizar en las placas de circuito impreso del RH-2 deberán ser mucho más anchas que el resto.

El driver también posee una salida de +5V en la que se pueden conectar otro tipo de componentes a parte del motor. Esta salida será de gran ayuda ya que de ese modo no será necesario conectar todos los dispositivos a la alimentación principal.



**Figura 47. Conexión alimentación.**

- **Recomendaciones.**

El fabricante da varias recomendaciones para las conexiones de los diferentes componentes y para proteger el driver de sobretensiones. Las condiciones de funcionamiento en el robot no se darán en ambientes con mucho ruido electromagnético, ni se utilizarán cables de gran longitud para el conexionado de los componentes. Las recomendaciones del fabricante principalmente son para casos en

los que sí se den algunas de las anteriores condiciones, por lo que en el RH-2 no será necesario aplicar la mayoría de ellas.

El cableado de la alimentación del motor sí va a necesitar de un condensador en su entrada. Se ha de ubicar a no más de 10cm del conector de borde del driver y su capacidad deberá ser de 100  $\mu\text{F}$  o más, según el voltaje.

El driver puede recibir sobretensiones por diferentes causas. Durante los frenos bruscos o reveses en el movimiento, se inyecta energía regenerativa en la corriente del motor. Esto puede causar un aumento en la tensión de alimentación del motor (en función de las características de la alimentación). Si la tensión sobrepasa una  $U_{\max}$ , salta la unidad de protección contra sobretensiones y la etapa de potencia del driver se desactiva. Con el fin de evitar esta situación existen dos opciones:

1. *Añadir un condensador* en el cableado del motor lo suficientemente grande para absorber la energía que fluye de nuevo a la fuente. El condensador debe estar dimensionado para una tensión igual o mayor que la máxima sobretensión esperada y puede ser calculado con la siguiente fórmula:

$$C \geq \frac{2xE_M}{U_{\max}^2 - U_{\text{nom}}^2} - C_{\text{drive}}$$

Dónde:

$U_{\max} = 95 \text{ V}$ . Es el límite de la protección contra sobretensiones.

$C_{\text{drive}} = 0 \mu\text{F}$ . Es la capacidad interna del driver.

$U_{\text{nom}} = 80 \text{ V}$ . Es el voltaje nominal de la alimentación del motor.

$E_M$  = es la energía total que fluye de regreso a la fuente en Julios. En el caso de un motor rotativo con carga,  $E_M$  se puede calcular con la fórmula:

$$E_M = \frac{1}{2}(J_M + J_L)\omega_M^2 + (m_M + m_L)g(h_{\text{initial}} - h_{\text{final}}) - 3I_M^2 R_{Ph} t_d - \frac{t_d \omega_M}{2} T_F$$

Dónde:

$J_M \rightarrow$  inercia total del rotor [ $\text{kgm}^2$ ].

$J_L \rightarrow$  inercia total de la carga visto desde el eje del motor después de la transmisión.

$\omega_M \rightarrow$  velocidad angular del motor después de decelerar [ $\text{rad/s}$ ].

$m_M \rightarrow$  masa del motor [ $\text{kg}$ ]. Cuando el motor se mueve en un plano no horizontal.

$m_L \rightarrow$  masa de la carga [kg]. Cuando la carga se mueve en un plano no horizontal.

$g \rightarrow$  aceleración de la gravedad.  $9.8 \text{ [m/s}^2\text{]}$ .

$h_{initial} \rightarrow$  altitud inicial del sistema [m].

$h_{final} \rightarrow$  altitud final del sistema [m].

$I_M \rightarrow$  corriente del motor [ $A_{rms}/\text{fase}$ ].

$R_{Ph} \rightarrow$  resistencia de fase del motor [ $\Omega$ ].

$t_d \rightarrow$  tiempo para decelerar [s].

$T_F \rightarrow$  par de fricción total visto desde el eje del motor [Nm]. Incluye la carga y la transmisión.

En el caso de un motor lineal con carga, la inercia del motor  $J_M$  y la inercia de la carga  $J_L$  serán sustituidos por la masa del motor y la masa de la carga medidas en [kg], la velocidad angular  $\omega_M$  se convertirá en la velocidad lineal medida en [m/s] y el par de fricción  $T_F$  se convertirá en la fuerza de fricción medida en [N].

Si el cálculo de  $E_M$  no se puede hacer debido a los datos que faltan, un buen valor de partida para el condensador puede ser 10.000mF/100V.

2. Conectar una resistencia de frenado  $R_{BR}$  entre el pin A5 (BRAKE/B-) y el pin A15 (GND) y activar la unidad de frenado desde el EasySetUp cuando la tensión de alimentación del motor excede  $U_{BRAKE} = 87 \text{ V}$ . Esta opción no es válida cuando se utiliza un motor paso a paso.

Esta opción puede ser combinada con un condensador externo cuyo valor no es suficiente para absorber al completo la energía regenerativa  $E_M$ , pero que ayuda reduciendo la magnitud de la resistencia de frenado.

El valor de la resistencia de frenado elegida debe respetar las siguientes condiciones:

- Limitar la corriente máxima por debajo de la corriente de pico del driver  
 $I_{peak} = 16.5 \text{ A}$ .

$$R_{BR} > \frac{U_{max}}{I_{peak}}$$

- Mantener la potencia de frenado requerida:

$$P_{BR} = \frac{E_M - \frac{1}{2} C (U_{max}^2 - U_{brake}^2)}{t_d}$$

dónde  $C = C_{EXT} + C_{DRIVE}$ , es la capacidad total en la alimentación del motor (externa + driver).

$$R_{BR} < \frac{U_{brake}^2}{2 \times P_{BR}}$$

- Limitar la corriente media por debajo de la corriente nominal del driver  $I_{nom} = 8 \text{ A}$ .

$$R_{BR} > \frac{P_{BR} \times t_d}{t_{cycle} \times I_{nom}^2}$$

dónde  $t_{cycle}$  es el intervalo de tiempo entre 2 frenadas en caso de movimientos repetitivos.

- Debe ser dimensionado para una potencia media  $P_{AV} = \frac{P_{BR} \times t_d}{t_{cycle}}$  y para una potencia de pico  $P_{peak} = \frac{U_{max}^2}{R_{BR}}$ .

Si  $\frac{U_{max}}{I_{peak}} > \frac{U_{brake}^2}{2 \times P_{BR}}$  la potencia de frenado  $P_{BR}$  debe ser reducida incrementando el tiempo de deceleración  $t_d$  o la capacidad externa en la alimentación del motor  $C_{EXT}$ .

Si  $\frac{P_{BR} \times t_d}{t_{cycle} \times I_{nom}^2} > \frac{U_{brake}^2}{2 \times P_{BR}}$  la potencia de frenado  $P_{BR}$  debe ser reducida o el intervalo de tiempo entre dos frenadas  $t_{cycle}$  incrementado.

### 3. Programación del motor.

Para la programación del motor se va a utilizar el software proporcionado por el fabricante, el programa utilizado se llama *EasyMotion Studio*. Este programa dispone de una gran variedad de recursos para controlar los motores. Se creará un proyecto donde se configurará el driver en primer lugar y más adelante el motor, una vez creado podremos controlar el motor y enviarle funciones para su movimiento.

Es necesario recordar que la configuración a continuación explicada se ha realizado sin conectar un encoder diferencial al motor. Únicamente se controlará el motor mediante los sensores Hall que dispone y un encoder relativo.

#### 3.1 Creación de un nuevo proyecto.

Para comenzar a configurar el driver y el motor es necesario crear un nuevo proyecto en el programa, para ello, una vez abierto el programa *EasyMotion Studio*, se selecciona *New*. Se abrirá una nueva ventana en la que aparecerán distintos tipos de drivers y de tipos de comunicaciones, en nuestro caso elegimos *PLUG IN DRIVES* → *ISCM8005 CANOPEN* → *BRUSHLESS MOTOR* → *Incremental Encoder* como se muestra en la siguiente figura.

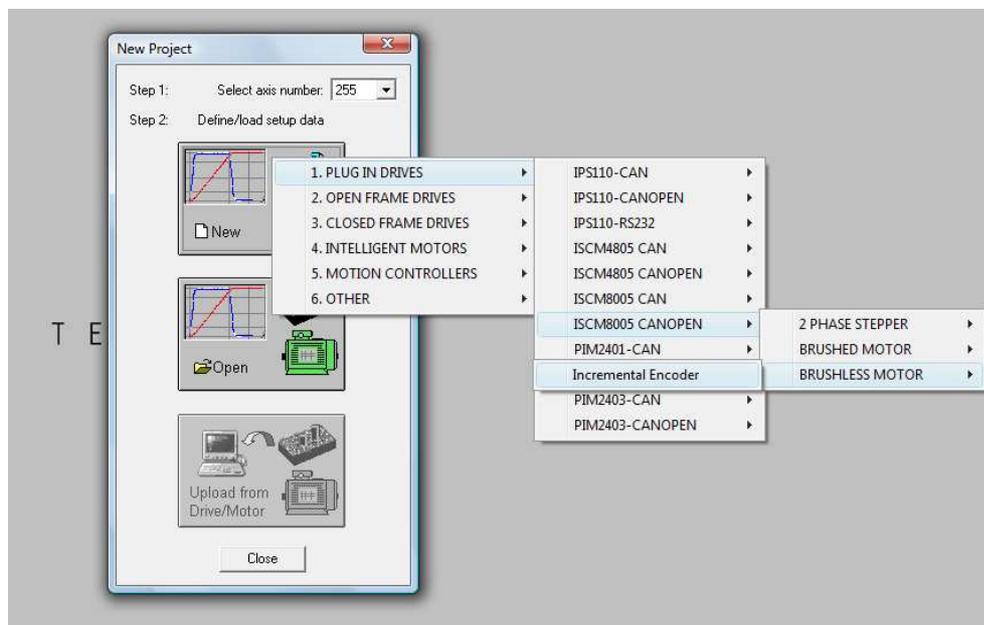


Figura 48. Elección proyecto.

Una vez creado el proyecto aparecerá la pantalla mostrada en la figura 49, es la pantalla general del proyecto. En ella se muestra el identificador del producto y del firmware, se ha de comprobar que el driver utilizado posea el mismo identificador que el mostrado en el proyecto, por otro lado el firmware indica el tipo de comunicación utilizada, lo cual se explicará en el apartado siguiente.

En el lado izquierdo de la pantalla se muestran los menus *Setup* y *Motion*, el primero de ellos sirve para configurar el motor y el driver, mientras que el segundo sirve para enviar señales al motor y controlar su movimiento. En la parte inferior de la pantalla se muestra el estado de la conexión entre el PC y el driver, en este caso muestra *Offline* ya que aun no se ha conectado el driver, en el apartado 4.3.3 se muestra cómo se ha de configurar la conexión.

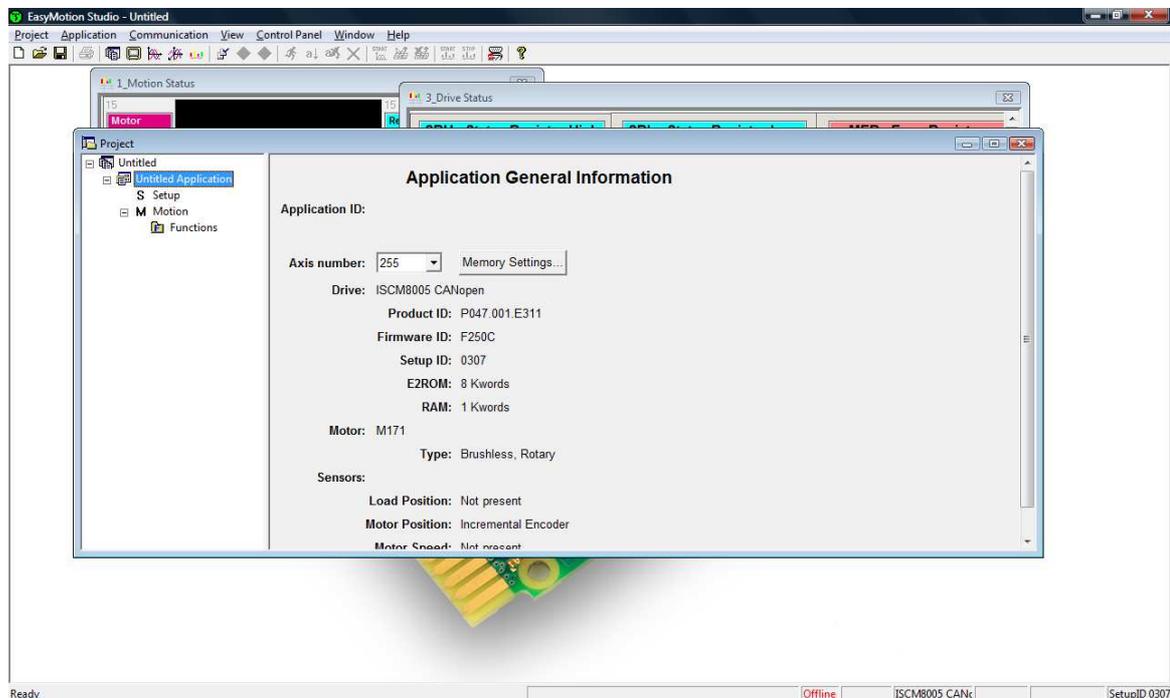


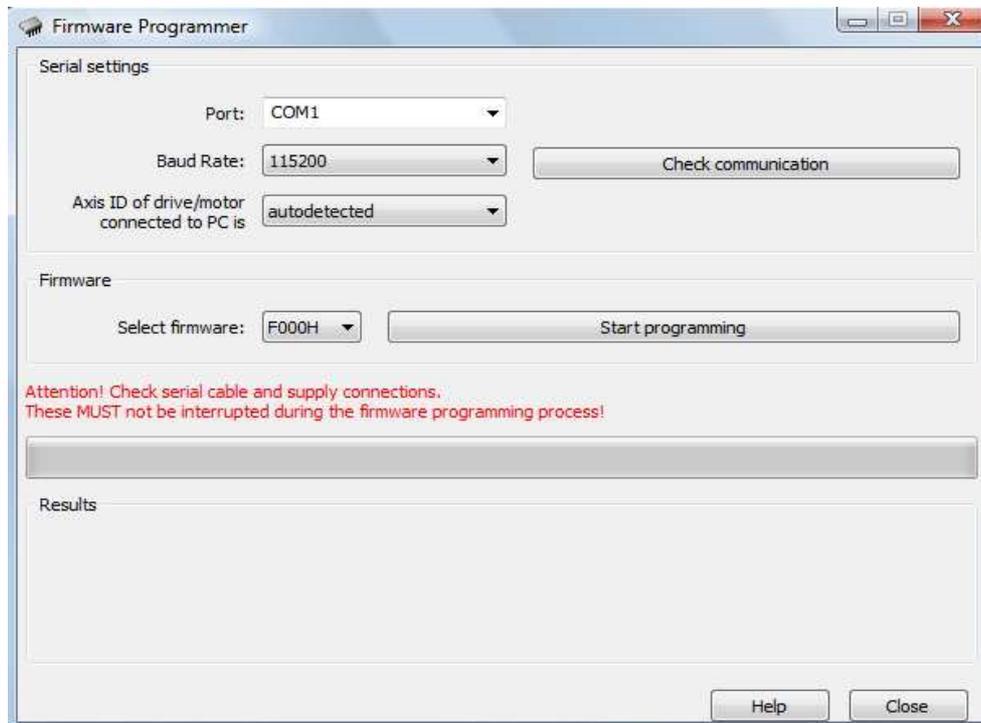
Figura 49. Nuevo proyecto.

### 3.2 Cambio del firmware.

Inicialmente es necesario indicar al driver el protocolo de comunicación que se va a utilizar, para ello se va a utilizar el programa *Firmware Programmer* incluido en el software del driver, este programa nos servirá para cambiar el firmware del driver y con ello el protocolo de comunicación.

Lo primero es conectar el driver al PC mediante un cable RS-232, alimentar el driver y comprobar el puerto COM al que está conectado el driver. Una vez conectado ejecutamos el programa *Firmware Programmer*, la pantalla inicial se muestra en la figura 50, en la parte superior podemos elegir el puerto COM al que

está conectado el driver, los baudios a los que se realizará la comunicación, y el Axis ID el cual dejaremos en *autodetected*. Cuando se han configurado estos parámetros se pulsa el botón *Check Communication* para comprobar la conexión con el driver y el firmware instalado, los resultados aparecerán en la parte inferior de la pantalla.



**Figura 50. Cambio firmware.**

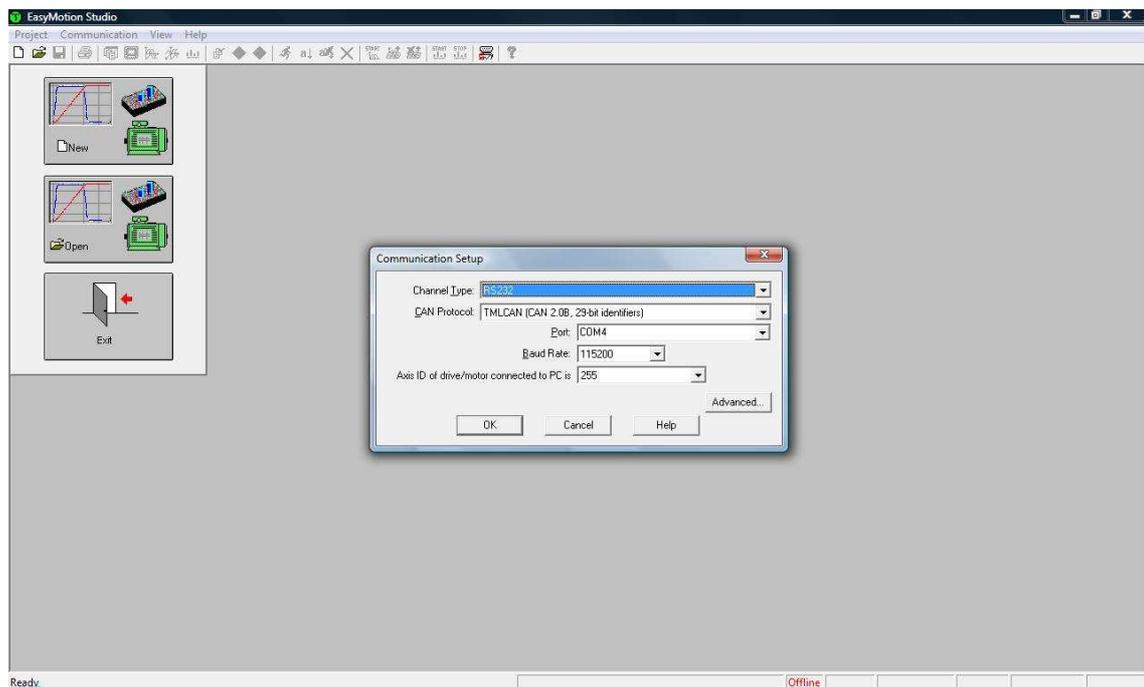
En función del protocolo de comunicación a utilizar se ha de instalar un firmware u otro, la tabla 19 muestra la versión de firmware que hay que instalar en función del protocolo de comunicación a utilizar. Una vez seleccionado el firmware deseado se selecciona en el apartado firmware y se pulsa el botón *Start programming*, con el que se inicia el proceso de instalación del firmware. Tras varios minutos ya estará instalado el nuevo firmware en el driver.

Protocolo	Firmware
RS-232	F000I
CANOpen	F250C

**Tabla 19. Firmware vS Protocolo.**

### 3.3 Configuración de la comunicación.

Para un correcto funcionamiento es necesario configurar la comunicación entre el driver y el PC, para ello se utilizará de nuevo el programa *EasyMotion Studio*. Como ya se mencionó anteriormente inicialmente en la parte inferior derecha de la pantalla aparece el estado de la conexión, en este caso *Offline*. Para conseguir que el estado cambie se ha de seguir los siguientes pasos: conectar el driver al PC, alimentar el driver y en el programa acceder al menú *Communication* → *Setup* mostrándose lo que ilustra la siguiente figura.



**Figura 51. Configuración comunicación.**

Lo principal a tener en cuenta en este menú es el puerto COM utilizado, se debe seleccionar el puerto en el que está conectado el driver al PC, si ya se ha configurado el firmware se utilizará el mismo puerto seleccionado entonces. El resto de parámetros se configuran como muestra la figura anterior, es decir, el protocolo CAN elegido TMLCAN (CAN 2.0B, 29-bit), los baudios los máximos posibles (115200) y el Axis ID se selecciona *autodetected* o el 255. Si la conexión entre el driver y el PC es correcta en la parte inferior de la pantalla aparecerá el estado *Online*, el axis ID y el firmware instalado.

### 3.4 Configuración Driver/Motor.

Una vez creado un nuevo proyecto aparece la pantalla mostrada en la figura 49, en la parte izquierda de la pantalla aparece el menú *Setup* el cual permite configurar y parametrizar el driver y el motor utilizados. Pulsando sobre *Setup* se abre una pantalla donde se ha de pulsar el botón *Edit* abriéndose dos nuevas pantallas mostradas en la figura 52. En la primera de ellas se puede configurar el motor, podremos buscar nuestro motor en una base de datos de motores que posee el programa o introducir los datos manualmente. Si seguimos la *Guideline Assistant* resultará bastante sencillo configurar los parámetros, algunos de ellos podremos introducirlos realizando pruebas sobre el motor conectado.

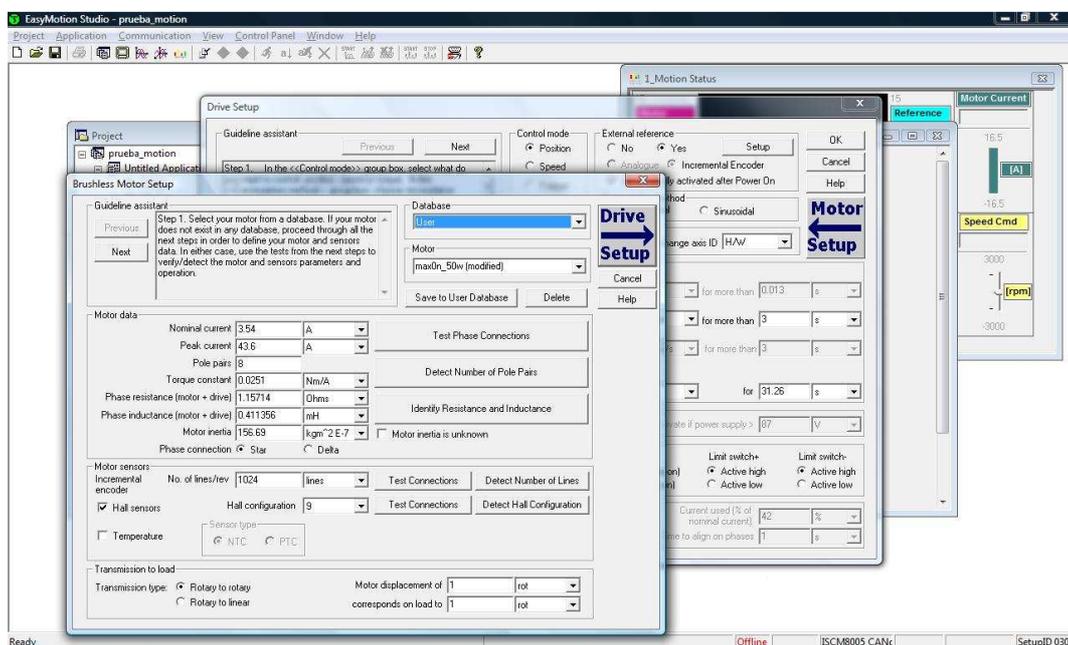


Figura 52. Configuración Motor/Driver.

Tras finalizar la configuración del motor se ha de pulsar sobre el botón *Drive Setup* de nuevo siguiendo la *Guideline Assistant* podremos configurar los parámetros del driver. Cabe destacar que como en este caso se utilizó un encoder incremental el modo de control del driver a seleccionar fue posición, el cual permite configurar los PID de corriente y de posición. Cuando hayamos finalizado la configuración de ambos pulsamos sobre el botón OK.

La configuración creada se denomina *setup table*, ahora es necesario descargar los datos a la memoria EEPROM del driver. Para ello en la pantalla de *Setup* pulsamos sobre el botón *Download to Drive/Motor*, en la parte inferior izquierda de la pantalla aparece el progreso de la transmisión de datos. Una vez descargados los datos el motor estará listo para su uso.

### 3.5 Movimiento Motor.

En la pantalla inicial del proyecto (figura 49) seleccionamos el menú *Motion* para programar el movimiento del motor, para ello se utiliza el lenguaje TML que es el utilizado por el software de Technosoft. Este lenguaje puede generar funciones de una complejidad relativa para poner en funcionamiento el motor. Pero para realizar pruebas con el motor no es necesario aprender a programarlo, ya que según abrimos el menú *Motion* se activará automáticamente el *Motion Wizard*, mostrado en la figura 53, el cual ofrece la posibilidad de crear secuencias de movimiento usando gráficos donde sólo hay que configurar algunos parámetros como la aceleración, la velocidad o el incremento de posición deseados, y el programa creará inmediatamente el lenguaje TML.

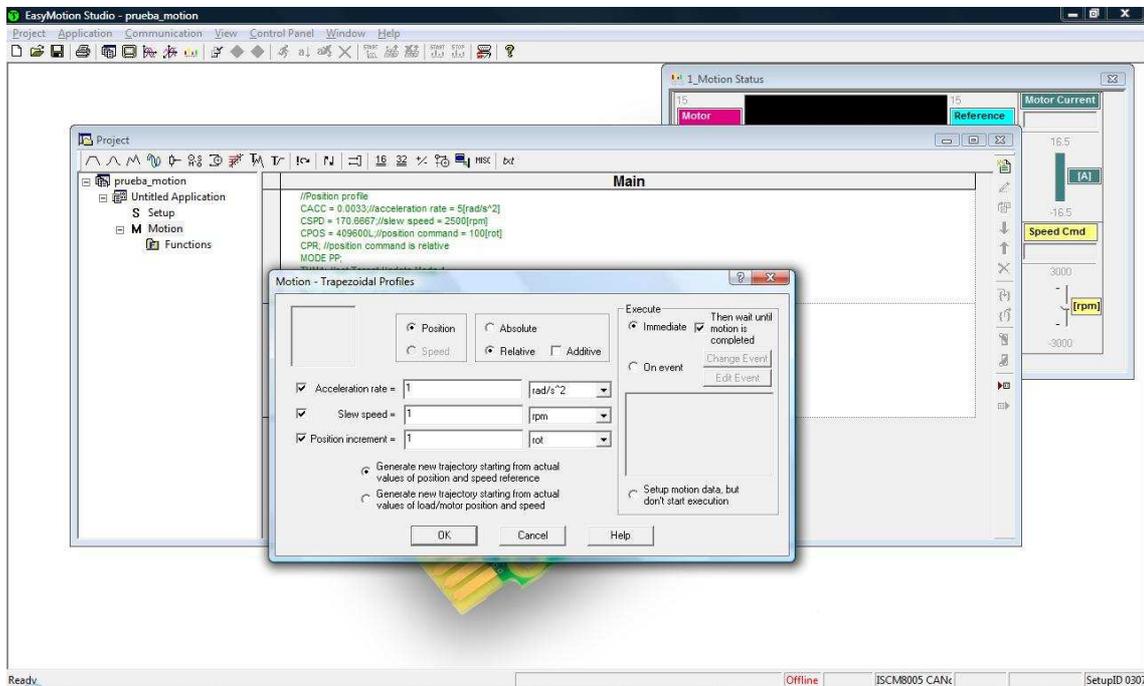


Figura 53. Motion Wizard.

## 4. Circuito Final.

Para realizar la puesta en marcha del motor se puede utilizar la tarjeta de entradas/salidas para el driver como se mencionó a lo largo de este capítulo, o se puede implementar un circuito como el mostrado en la figura mostrada en la siguiente página, siguiendo las conexiones mencionadas también en este capítulo. Los componentes que se muestran en el esquemático representan los conectores de cada uno de los componentes utilizados.

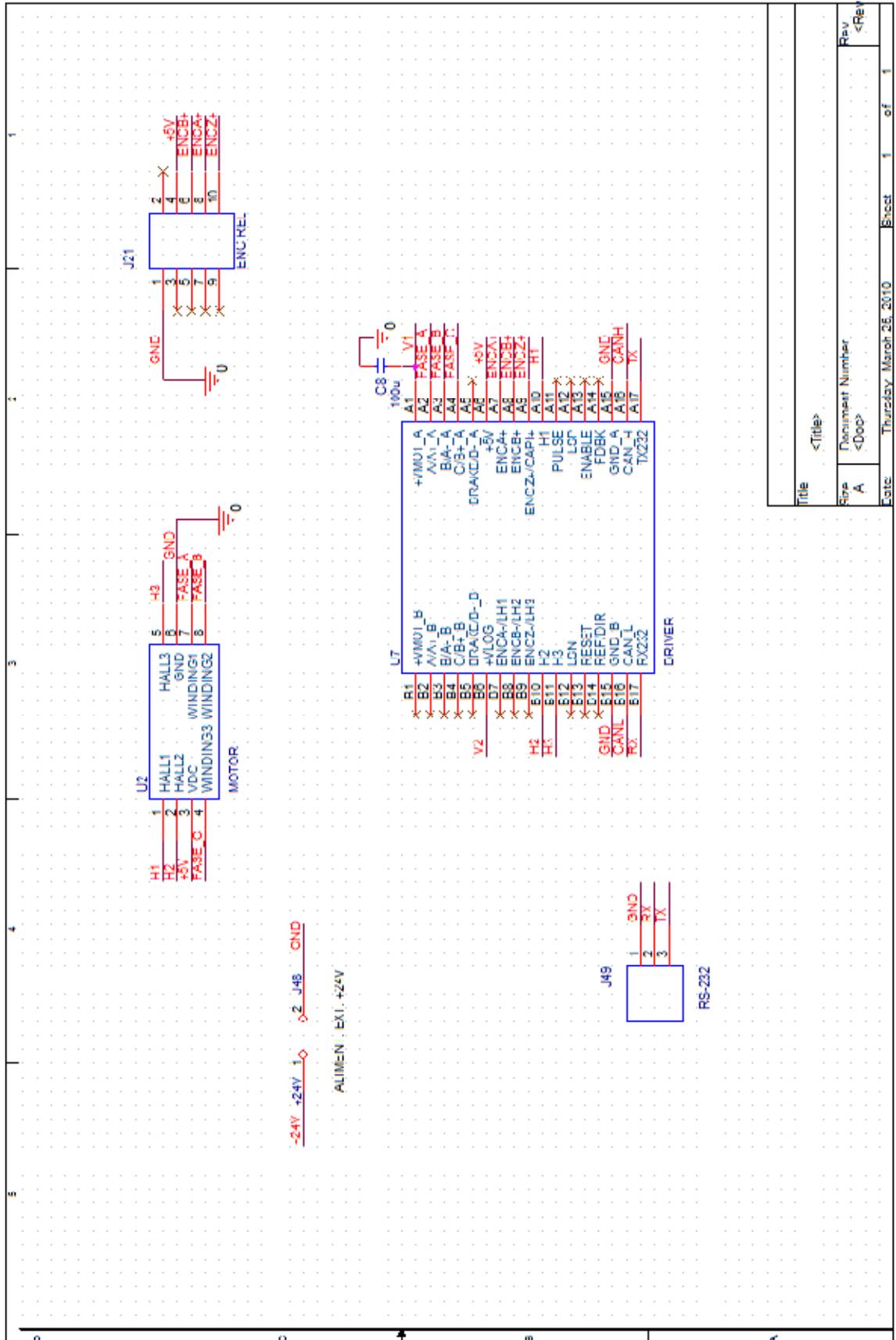


Figura 54. Esquemático puesta en marcha motores brushless.

## 5. Pruebas.

Una vez conocidas las conexiones para el funcionamiento del motor y la programación necesaria para su control, se realizaron pruebas siguiendo el esquemático anterior.

En primer lugar se conectó el motor Maxon modelo 339287 con tensión de alimentación +36Vdc, realizándose pruebas de control a través del driver. Como no se disponía de las articulaciones del robot, no se realizó un control relativo de la posición a través del encoder absoluto, ya que éste debería estar situado en el eje de la articulación. Sí se incorporó un encoder relativo en el eje del motor, el cual se comprobó, que transmitía correctamente los pulsos necesarios para el control de la velocidad del motor. Siendo necesarias también las señales transmitidas por los sensores Hall incorporados en el motor, que informarán de la posición del rotor del motor.

Más adelante se realizaron pruebas con el motor Maxon modelo 251601 con tensión de alimentación +24Vdc. Para alimentar este motor se realizaron pruebas introduciéndole una tensión de alimentación de +36Vdc al igual que para el modelo anterior. Al comprobar su correcto funcionamiento y control a pesar de la sobrealimentación, se decidió introducir una única alimentación en las placas de circuito impreso, simplificando así el sistema de alimentación.

Se realizaron diversas pruebas para comprobar el control del driver sobre el motor, giro del motor a izquierda y derecha, aumento y disminución de la velocidad del motor, velocidad constante del motor, parada del motor, control de la posición, etc. Todas las pruebas mencionadas funcionaron correctamente, obteniendo los resultados esperados.



# Capítulo 5:

## *DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN.*

---

## 1. Diseño mecánico.

En este apartado se pretende analizar más a fondo la estructura de las piernas del robot humanoide RH-2. Hay que tener en cuenta que para realizar un correcto diseño de la electrónica y de las placas de circuito impreso se ha de tener un conocimiento previo de la estructura mecánica del robot. Una vez realizado este análisis mecánico se tendrá conocimiento sobre: las medidas de las diferentes partes de las piernas, el posicionamiento de los motores, obstáculos que puedan dificultar el diseño, etc.

La estructura mecánica del robot ha sido diseñada mediante el programa de diseño 3D, Catia. El programa está desarrollado para proporcionar apoyo desde la concepción del diseño, hasta la producción y el análisis de productos. Inicialmente fue desarrollado para servir a la industria aeronáutica, pero se ha hecho un gran hincapié en el manejo de superficies complejas. Dado su potencial y exactitud para los diseños ha sido elegido para este proyecto.

La primera fase del proyecto del humanoide RH-2 se centra únicamente en las piernas y la cadera. De modo que se construya en primer lugar un caminante, con el cual será más sencillo realizar los cálculos para conseguir una caminata estable. Más adelante se acoplarán el torso, los brazos y la cabeza. En la siguiente figura puede observarse una de las piernas del robot.

Ya que la pierna estará dividida en dos partes, y para el control de los motores es necesario un gran número de dispositivos y conectores, se ha optado por realizar 2 placas de circuito impreso por cada pierna, una en el muslo, y otra en la tibia.

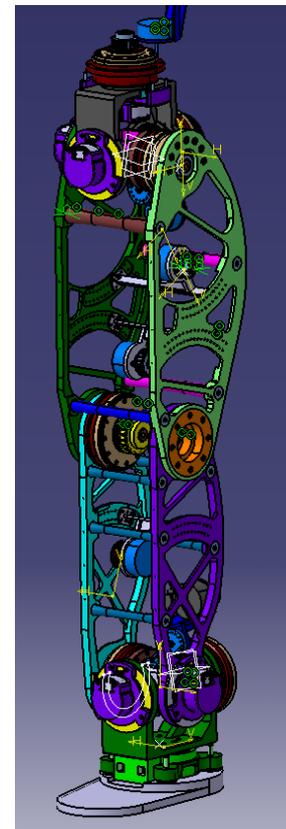


Figura 55. Pierna derecha RH-2.

### 1.1 Medidas.

En primer lugar se debe conocer el tamaño de cada una de las partes de la pierna, para de ese modo poder dimensionar las placas de circuito impreso. Es conveniente que éstas tengan el mayor tamaño posible sin molestar en la estructura del robot. El tamaño será un factor crítico ya que se necesitarán colocar un gran número de conectores y componentes, además de tener que rutar todas las señales eléctricas.

Existe una diferencia entre la anchura del muslo y la tibia, siendo mayor en el primero que en la segunda. Esto permitirá realizar una placa más grande en la parte superior de la pierna que en la parte inferior. Las placas se han realizado con la mayor anchura posible, ocupando toda la estructura del robot posible y consiguiendo así una distribución más sencilla.

En cuanto a la altura de las placas, no se puede ocupar toda la superficie disponible en cada bloque de la pierna. Esto se debe a que existen unas pequeñas curvaturas en los bordes de la estructura, las cuales no permite que la placa este colocada de una forma plana y con una sujeción rígida a la estructura. Por lo tanto, la altura de cada placa, vendrá limitada por la zona sin curvatura de cada bloque de las piernas.

La sujeción de las placas a la estructura del robot se realizará mediante tornillos de métrica 2,5, situados en los laterales de la estructura.

- *Medidas Tibia:*

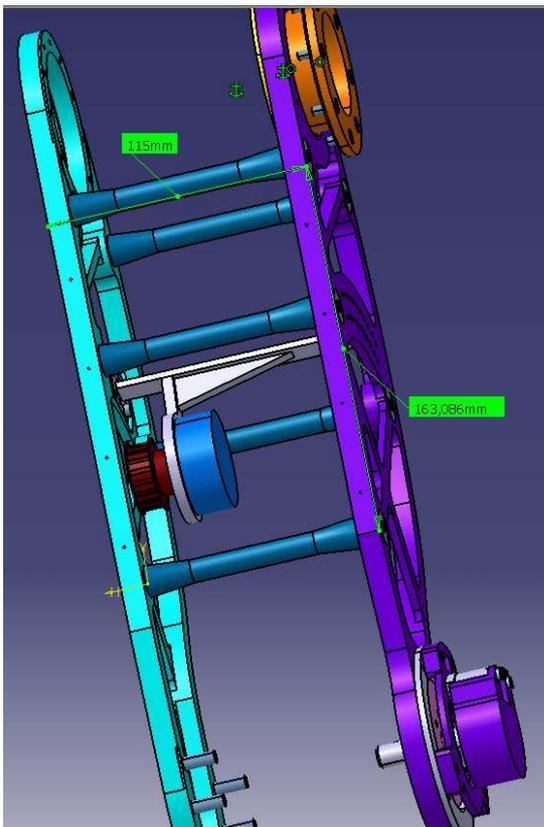


Figura 56. Medidas tibia RH-2.

- *Medidas Muslo:*

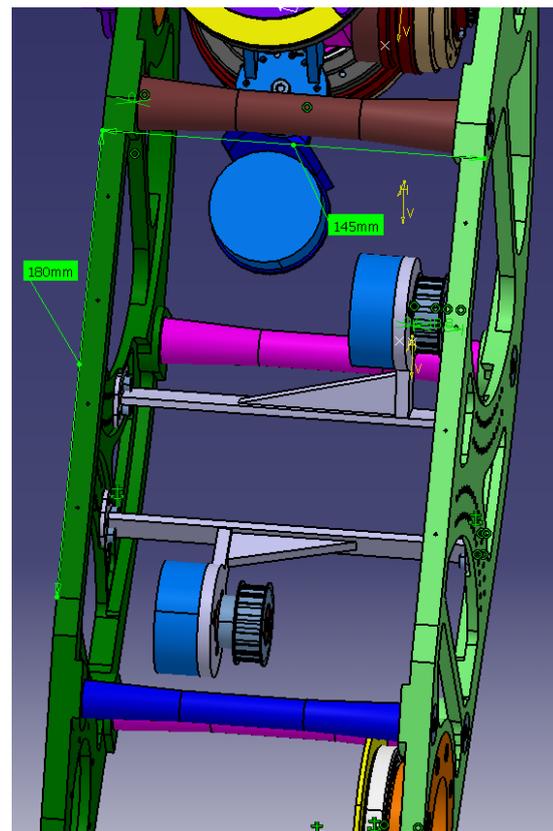


Figura 57. Medidas muslo RH-2.

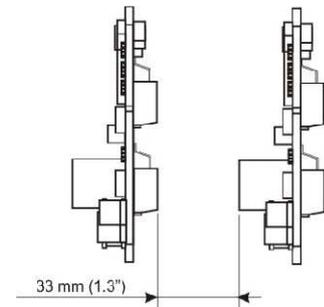
Inicialmente se realizaron los diseños de las placas de circuito impreso con las medidas mostradas anteriormente. Tras realizar un diseño previo de la colocación de componentes, se observó que debido a obstáculos de la estructura no era posible realizar el montaje. Por lo que se decidió aumentar la longitud de ambas placas para posibilitar el montaje de todos los conectores y componentes.

Finalmente quedarán unas placas con los siguientes tamaños: 115x188 mm para la placa de la tibia y 145x195 mm para la placa del muslo. El espesor será el mismo en ambas placas y será de 0.5 mm, grosor suficiente para el montaje de componentes superficiales y componentes de agujero pasante. Además es la misma distancia de unas pequeñas hendiduras existentes en la estructura del robot, de este modo las placas no sobresaldrán de la pierna.

### 1.2 Distribución componentes.

Cada pierna llevará instalados 6 motores, tres en la cadera, uno en la rodilla y dos en el tobillo. El control de cada uno de los motores se realizará mediante su driver correspondiente, este componente es el de mayor tamaño de los que se han de montar en cada una de las placas de circuito impreso y por lo tanto condicionará la posición del resto de componentes. Por ello, en primer lugar se han de posicionar los drivers.

Hay que tener en cuenta una recomendación del fabricante, que se refiere a la separación mínima que ha de existir a la hora de montar los drivers. En el caso de un montaje con más de un driver, se recomienda una distancia de separación de al menos 33 mm entre ellos. Los drivers fueron diseñados para ser enfriados por convección natural, gracias a esta separación mínima se asegura una libre circulación del aire entre los dispositivos.

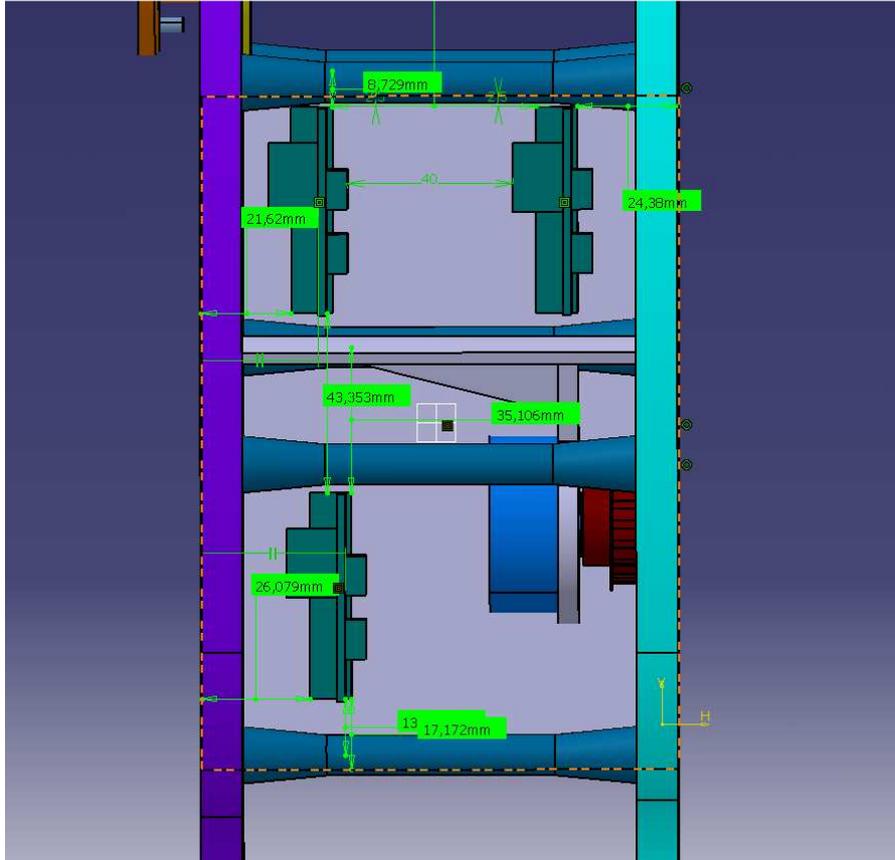


**Figura 58. Montaje driver.**

Atendiendo a la recomendación del fabricante y a la distribución de los motores en las piernas, se ha decidido montar 3 drivers en la placa de circuito impreso del muslo y los otros 3 en la de la tibia. En el muslo se controlarán los motores de la cadera, y en la tibia se controlará el motor posicionado en la rodilla y los dos situados en los tobillos. Además, se consigue el espacio suficiente en cada placa para una buena circulación del aire, y con ello una buena refrigeración.

– *Montaje tibia:*

Como ya se ha mencionado, dos de los motores a controlar estarán en el tobillo y uno en la rodilla, por lo que habría sido buena opción colocar los drivers en las mismas posiciones que los motores que controlan, es decir, dos abajo y uno arriba. Pero existen obstáculos que impiden esta distribución, por ejemplo el motor que se ve en la siguiente figura.



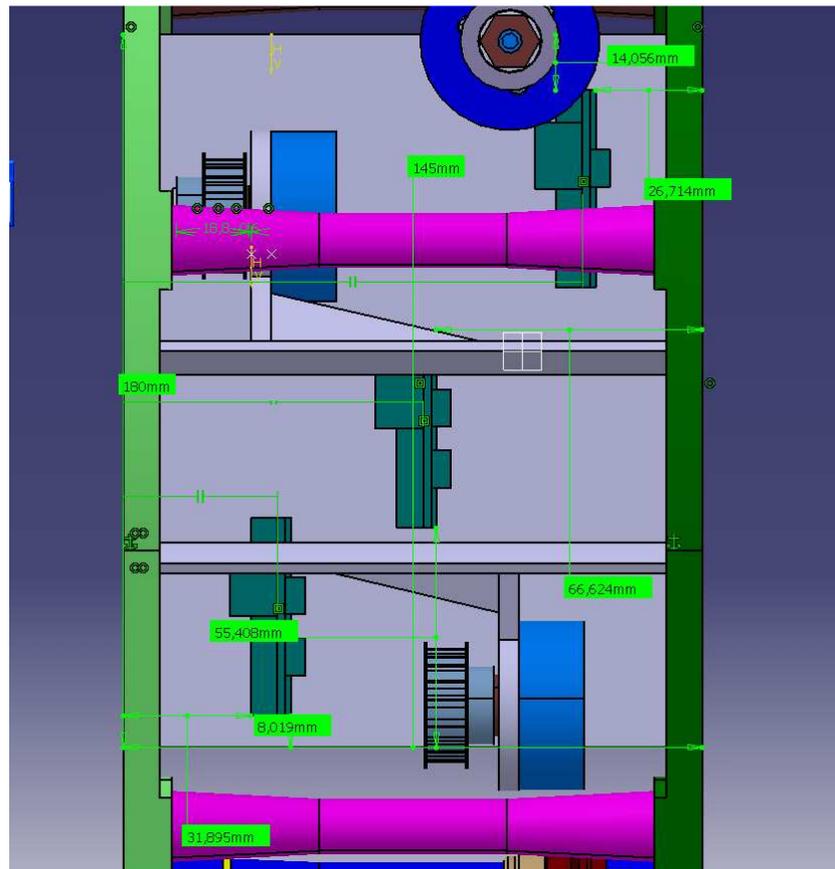
**Figura 59. Distribución drivers tibia derecha RH-2.**

Finalmente se han colocado dos drivers en la parte superior y uno en la inferior. Con el montaje elegido se consigue una separación de 40 mm entre los drivers contiguos, más que suficiente para su buena refrigeración.

La tibia izquierda se realizará simétricamente a la derecha, es decir, el driver de la parte inferior estará en el lado derecho de la pierna. Más adelante, en el apartado 5.5 se mostrarán los circuitos impresos de ambas piernas, donde se podrá apreciar dicha distribución simétrica.

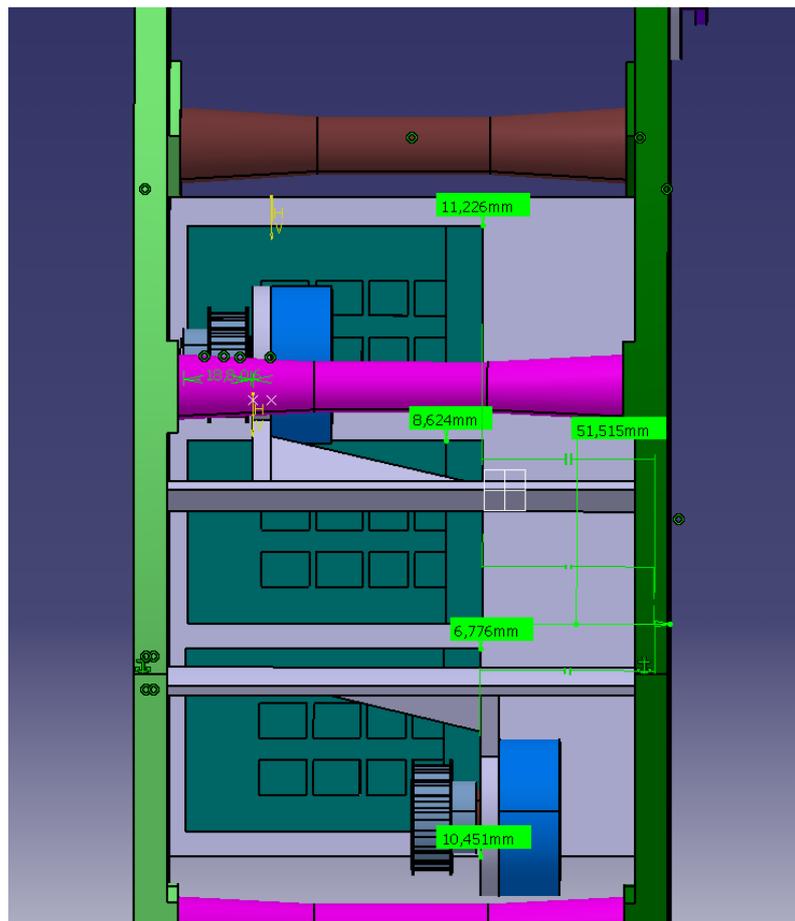
– *Montaje muslo:*

El tamaño de la placa del muslo es mayor que el de la tibia, por lo que el diseño debería ser más sencillo para esta parte. A pesar de ello, ha sido necesario realizar dos distribuciones distintas. En primer lugar, se eligió un montaje vertical de los drivers como recomendaba el fabricante, dadas las dimensiones de la placa, se conseguía un diseño espacioso entre los drivers.



**Figura 60. Distribución vertical drivers muslo RH-2.**

Más adelante, se decidió colocar las baterías del humanoide en los muslos. Por lo que era necesario un diseño con el mayor volumen libre posible. En el diseño anteriormente mencionado, entre los drivers, los motores y demás obstáculos; apenas quedaba espacio para el montaje de las baterías. Se decidió posicionar los drivers en horizontal, de este modo, se conseguirá un mayor volumen libre para la colocación de las baterías.



**Figura 61. Distribución horizontal drivers muslo RH-2.**

A diferencia de la tibia, en el muslo las placas de ambas piernas serán idénticas. Es otra de las ventajas de realizar el montaje horizontal de los drivers.

## 2. Diseño electrónico.

Una vez conocida la posición de los drivers en las placas de circuito impreso, las conexiones necesarias entre los componentes, el patillaje de cada dispositivo, etc. Se procede al diseño del esquemático de cada una de las partes de la pierna.

Se ha optado por un diseño jerárquico para ambas placas, siguiendo el concepto del driver como principal componente, ya que será el encargado de controlar los motores y gran parte de los demás componentes irán conectados a él. Como en cada placa se montarán tres drivers, existirán tres bloques iguales dentro del esquemático. Compuestos cada uno por un driver, un encoder relativo, un encoder absoluto, un motor y un condensador. Hay que mencionar que los componentes conectados al driver estarán en posiciones diferentes según su función, por lo tanto, en esos casos, lo que queda representado en el esquemático será el conector correspondiente a cada componente.

Además de los componentes anteriormente mencionados ya conocidos, se han añadido otra serie de protecciones, indicadores y conexiones necesarios para un correcto funcionamiento del humanoide y para reaccionar ante posibles fallos. A continuación se describen las más importantes.

- **Conexión alimentación.**

Para conseguir alimentar los componentes de las placas de circuito impreso de la tibia y el muslo con el menor cableado posible, se ha realizado buses de alimentación. De modo que, únicamente halla que alimentar desde la unidad central de alimentación (situada en la parte central del robot) la placa del muslo, transmitiéndose la tensión y corriente a través de un bus hasta la parte inferior de la pierna.

Se han realizado dos buses de alimentación como se puede observar en la figura 62. Con uno sería suficiente, pero se ha diseñado un bus auxiliar para posibles fallos de la línea principal. Este diseño además permite alimentar la placa del muslo o de la tibia independientemente, simplemente desconectando la unión entre ellas.

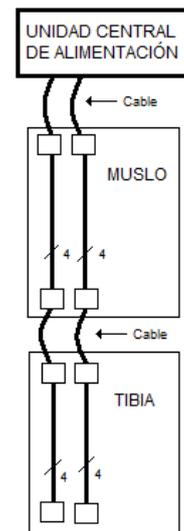


Figura 62. Buses alimentación.

Cada uno de los buses de alimentación transportará dos alimentaciones diferentes para el funcionamiento del humanoide. En primer lugar y la más importante, la alimentación de los motores. A pesar de disponer de motores con alimentaciones diferentes (*tabla 5*), se utilizará una única alimentación para los motores, +36 Vdc, consiguiendo así simplificar el circuito de alimentación. Se realizaron pruebas en el laboratorio con los dos modelos, haciéndoles funcionar a ambos a +36 Vdc, y se pudo comprobar que el funcionamiento era correcto. En segundo lugar, se tiene la alimentación secundaria, dedicada a las placas de control de los encoder absolutos, y a las señales digitales y analógicas del driver que deberán ser alimentados a +5 Vdc.

Para la conexión de los cables de alimentación a las placas de circuito impreso se han elegido conectores Mini-Fit Jr. de la marca Molex. Serán de montaje por agujero pasante y el número de contactos será cuatro, dos contactos para las masas de las alimentaciones y los otros dos para los terminales positivos.



Figura 63. Conector Mini-fit.

Habrán otros dispositivos como los sensores Hall de los motores y los encoder relativos que necesitarán ser alimentados. De esto se encargará el driver, que dispone de una salida de +5 V, con la que se puede alimentar circuitos que no necesiten una corriente elevada.

- **Conexión comunicaciones.**

Al igual que para la alimentación, se ha decidido transmitir los datos a través de dos buses de comunicaciones, uno principal y otro auxiliar. En este caso se deberá conectar con el microprocesador principal encargado de gestionar las señales enviadas.

Será necesario transportar diez líneas de datos, cuatro de ellas serán las señales necesarias para la comunicación por el Can-bus (CAN\_H, CAN\_L y dos tierras para aislar la comunicación) y el resto corresponderán al sensor de fuerza-par.

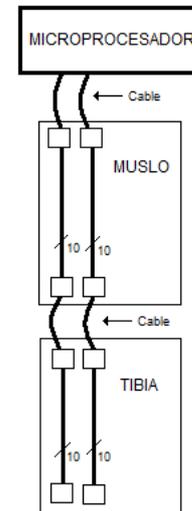


Figura 64. Buses comunicación.

Los bordes de las placas albergarán un gran número de conectores, por ello se ha minimizar el espacio ocupado lo más posible. Las señales de comunicación no necesitan de conectores de gran tamaño como la alimentación. Para transmitir los datos de la comunicación se han elegido un nuevo modelo de conectores de tamaño muy reducido, los FFC de la marca Molex, concretamente el modelo de diez contactos, con un paso de 0.5 mm y montaje superficial. A pesar de poseer diez contactos, la longitud del conector no supera los 10 mm. El cable que ha de usarse para estos reducidos conectores es de la marca Molex, ofrece gran flexibilidad, una característica importante para poder posicionarlo más fácilmente en el robot.

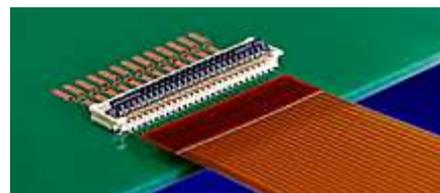


Figura 65. Conector FFC.

- **Supresor de transitorio.**

El driver posee una protección interna contra sobretensiones, cortocircuitos y demás posibles fallos del sistema. Pero para asegurar una mayor protección se han añadido supresores de sobrevoltajes transitorios en la alimentación que también protegerán al resto de componentes.

Los sobrevoltajes transitorios pueden originarse por maniobras de conexión o desconexión, descargas atmosféricas y descargas electrostáticas. Éstas pueden dañar el aislamiento de transformadores, motores, condensadores, cables y ocasionar fallos en la transmisión por la ionización del aire. Los supresores de sobrevoltajes transitorios protegen al equipo electrónico dentro de unos límites de voltaje determinados. Por lo tanto, dejará pasar el voltaje necesario para el funcionamiento de los dispositivos electrónicos, pero protegerá el equipo ante posibles subidas de tensión a partir de un voltaje de ruptura determinado.

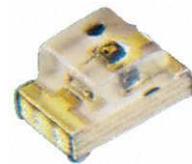
Se han seleccionado dos supresores diferentes, en función de las alimentaciones necesarias para el funcionamiento del humanoide. El modelo SMBJ36A, para la alimentación de los motores, y el modelo SMBJ5.0A para la alimentación secundaria, ambos del fabricante Vishay. En la siguiente tabla se recogen las principales características de ambos supresores.

Características	SMBJ5.0A	SMBJ36A
Tensión de corte inversa máxima	36 V	5 V
Tensión de ruptura mínima	40 V	6.4 V
Tensión residual máxima	58.1 V	9.2 V
Corriente de pulsos de pico máxima	10.3 A	65.2 A
Tipo de dirección	Unidireccional	Unidireccional
Tipo de montaje	Superficial	Superficial

**Tabla 20. Características supresores de transitorio.**

- **Indicadores alimentación.**

En montajes de gran tamaño es conveniente poseer indicadores del estado de las conexiones. Por ello, se montarán dos diodos led de color verde en cada una de las placas de circuito impreso, que servirán de indicadores sobre el estado de la alimentación. Serán de la marca Toshiba, con el encapsulado 0805 que permite un montaje superficial y de reducido tamaño.



**Figura 66. Led 0805.**

- **Conexión encoder absoluto.**

Como ya se mencionó anteriormente, algunos componentes no serán montados en la placa de circuito impreso ya que han de colocarse en otra posición del humanoide. Este es el caso de los encoders absolutos, que han de ser montados en el eje de la articulación.

Para adaptar las señales enviadas por los encoders, serán necesarios unos circuitos formados cada uno de ellos por un PIC, un transmisor-receptor y un circuito de acondicionamiento (figura 21). Todos estos componentes, junto con el encoder serán montados en una placa cercana a la articulación correspondiente. Los datos procesados por estos conjuntos serán enviados al driver a través del Can-bus. Por lo tanto, será necesario montar conectores en las placas del muslo y la tibia, que se encargarán de recibir las señales transmitidas y de alimentar al circuito de procesamiento y acondicionamiento.

Cada placa controlará tres motores, por lo que serán necesarios tres conectores para obtener la información de los encoders en cada placa. Al igual que para las conexiones de las comunicaciones, se utilizarán conectores FFC para reducir el espacio ocupado por los conectores.

- **Entradas/salidas analógicas/digitales.**

El driver posee una serie de entradas/salidas digitales y de dos entradas analógicas. Se podrán utilizar para diferentes funciones como introducir generadores de pulsos, realizar cambios de dirección, habilitar señales, resetear el driver, etc. Al no conocerse previamente a la implementación de las placas de circuito impreso qué señales de este tipo se utilizarán, se conectarán jumpers en los pines correspondientes. Estos jumpers dejarán la posibilidad al usuario de conectar las señales necesarias cuando sea conveniente.

Existe la posibilidad de que alguno de los drivers que se utilizarán se bloquee y sea necesario reiniciarlo. Para ello se utilizará una de las entradas digitales de los drivers, el reset, correspondiente al pin B13. Se montará un pulsador en cada uno de los drivers, conectados a +5V y al pin B13. En caso de que el driver se bloquee, únicamente será necesario utilizar el pulsador correspondiente y el driver se reiniciará.

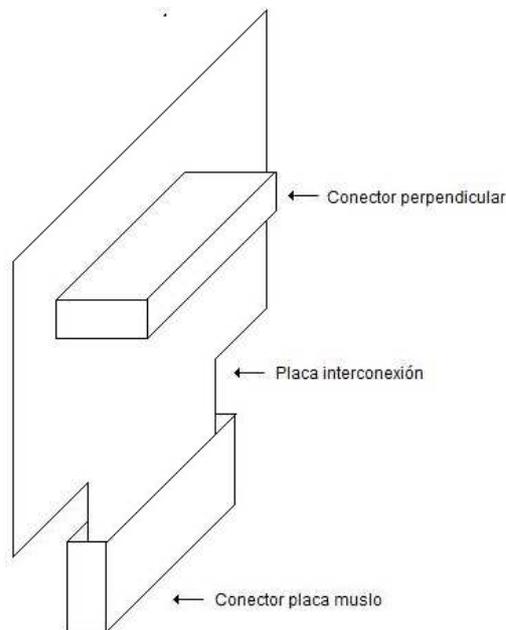


**Figura 67. Pulsador reset.**

- **Placa interconexión.**

El montaje horizontal de los drivers en las placas de circuito impreso del muslo, requiere la implementación de unas placas de interconexión. Estas placas se introducirán en los conectores verticales para los drivers de los muslos, y llevarán montado un conector para drivers perpendicularmente. Los drivers se introducirán en estos conectores, quedando en posición horizontal.

De este modo, se consigue que los drivers estén montados paralelamente a las placas de circuito impreso de los muslos a una altura mayor que si se montasen sobre conectores de 90º directamente. Es importante que tengan una mínima distancia con las placas del muslo ya que será una zona con un alto calentamiento, debido a que se montarán las baterías del humanoide en la misma zona.



**Figura 68. Placa interconexión.**

### 3. Listado de componentes.

En la siguiente tabla se muestran los componentes necesarios para la implementación de las placas de la tibia y el muslo.

COMPONENTES	REFERENCIA	FOOTPRINT	DESCRIPCIÓN	INFO	ENCAPSULADO
<b>CONECTORES</b>					
Mini-fit 4 pines	484-1899 (RS)	MINI_FIT_CON_4	Alimentación		
Mini-fit 8 pines	484-1912 (RS)	MINI_FIT_CON_8	Motores		
FFC 6 pines	527460671 (MOLEX)	FFC_CON_6.05	Enc_absoluto	Serie 52746	
FFC 10 pines	527461071 (MOLEX)	FFC_CON_10.05	Comunicación	Serie 52746	
Micro match 6 pines	215079-6 (TYCO ELECTRONICS)	MICRO MATCH 6	Sensor F/P		
Micro match 8 pines	215079-8 (TYCO ELECTRONICS)	MICRO MATCH 8	Enc_relativo		
Conector Driver	E-TEC ECC-034-S100-01	DRIVER_CON	Driver		
Jumper	Header paso 2.54 mm	JUMPER_100	Señales_aux		
<b>COMPONENTES</b>					
Led	625-8974 (RS)	LED_0805	Led alimentación		TLGU1002A
Diodo TVS 5V	628-7304 (RS)	SMBJ	Protección 5V	Unidireccional-5V	SMBJ5.0A
Diodo TVS 36V	631-1025 (RS)	SMBJ	Protección 36V	Unidireccional-40V	SMBJ36A
Pulsador	183-701 (RS)	MICROSWITCH2	Pulsador reset driver		B3S-1000
<b>RESISTENCIAS</b>					
120	678-9718 (RS)	RESIST	Resistencia CANBUS	0,1W	D11/CRCW0603 (0603)
150	669-6515 (RS)	RESIST_1206	R alimentación	0,25W	ERA8AEB (1206)
1K7	632-0388 (RS)	RESIST_2512	R alimentación	1W	232276361782 (2512)
<b>CONDENSADORES</b>					
100uF	537-0540 (RS)	COND_100U/50V	Cond alimentación		EEEFK1H101P

Tabla 21. Listado de componentes.

## 4. Esquemáticos.

– Bloque driver:

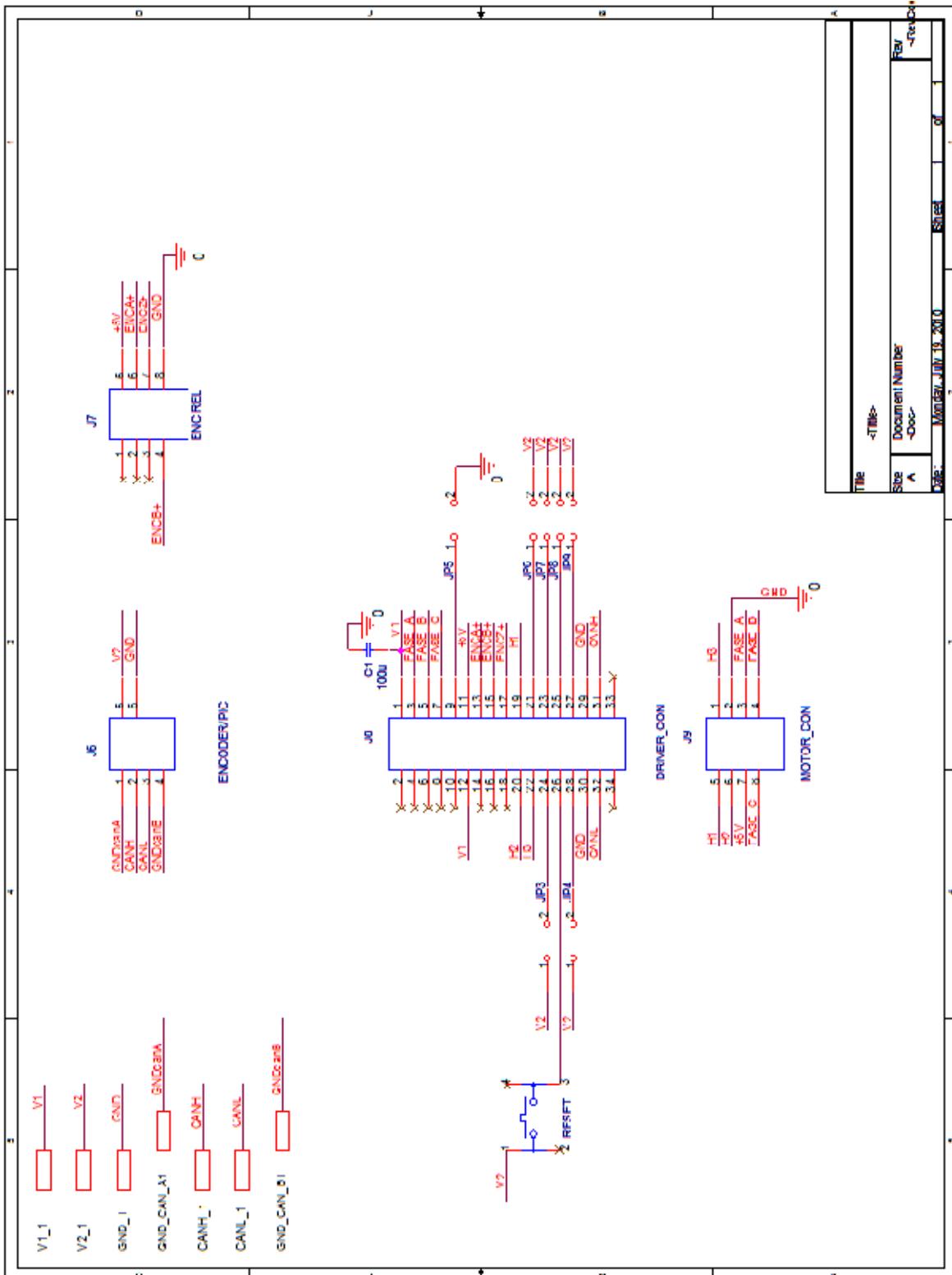


Figura 69. Esquemático bloque driver.

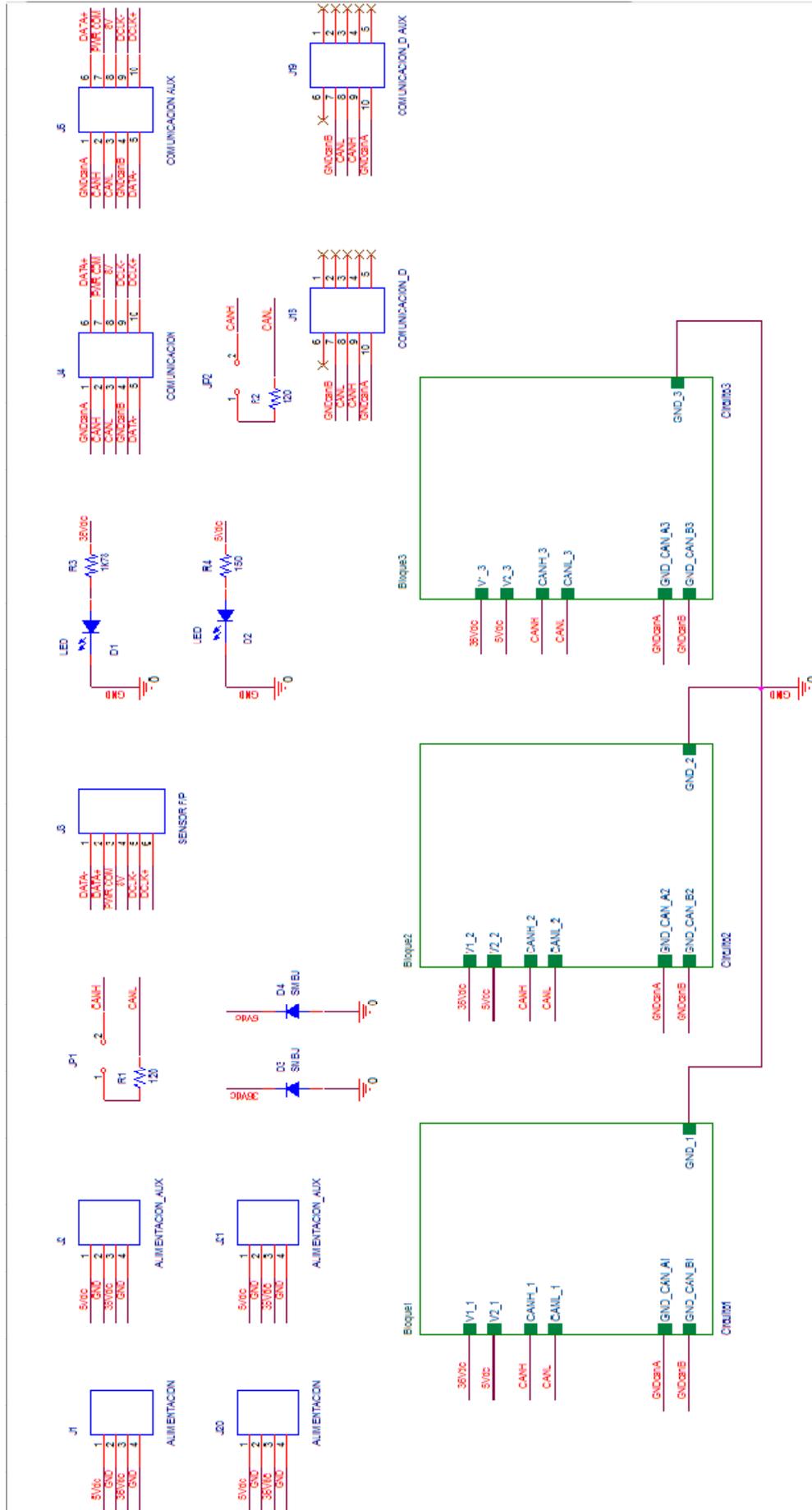


Figura 70. Esquemático Tibia RH-2.

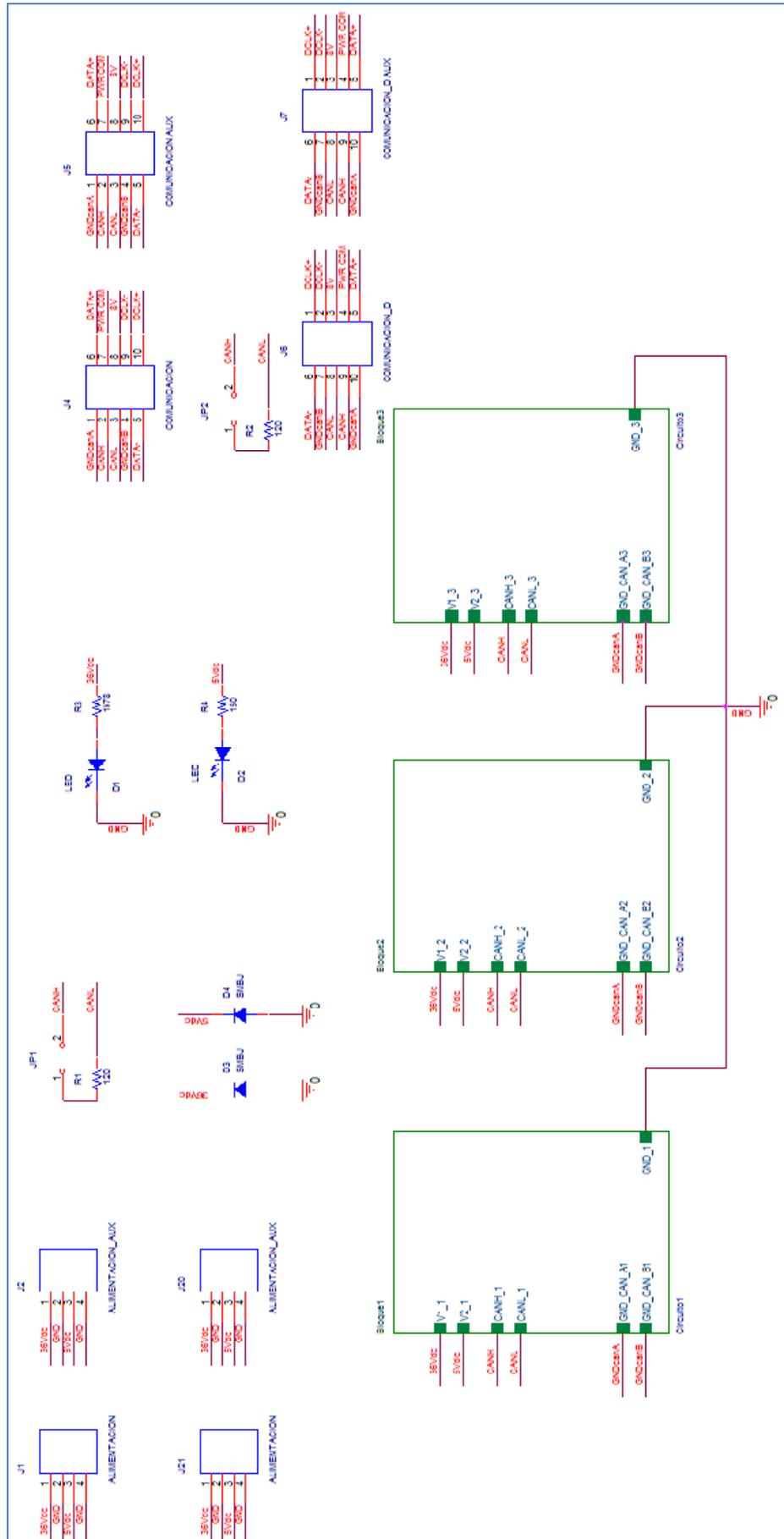


Figura 71. Esquemático Muslo RH-2.

– Placa interconexión:

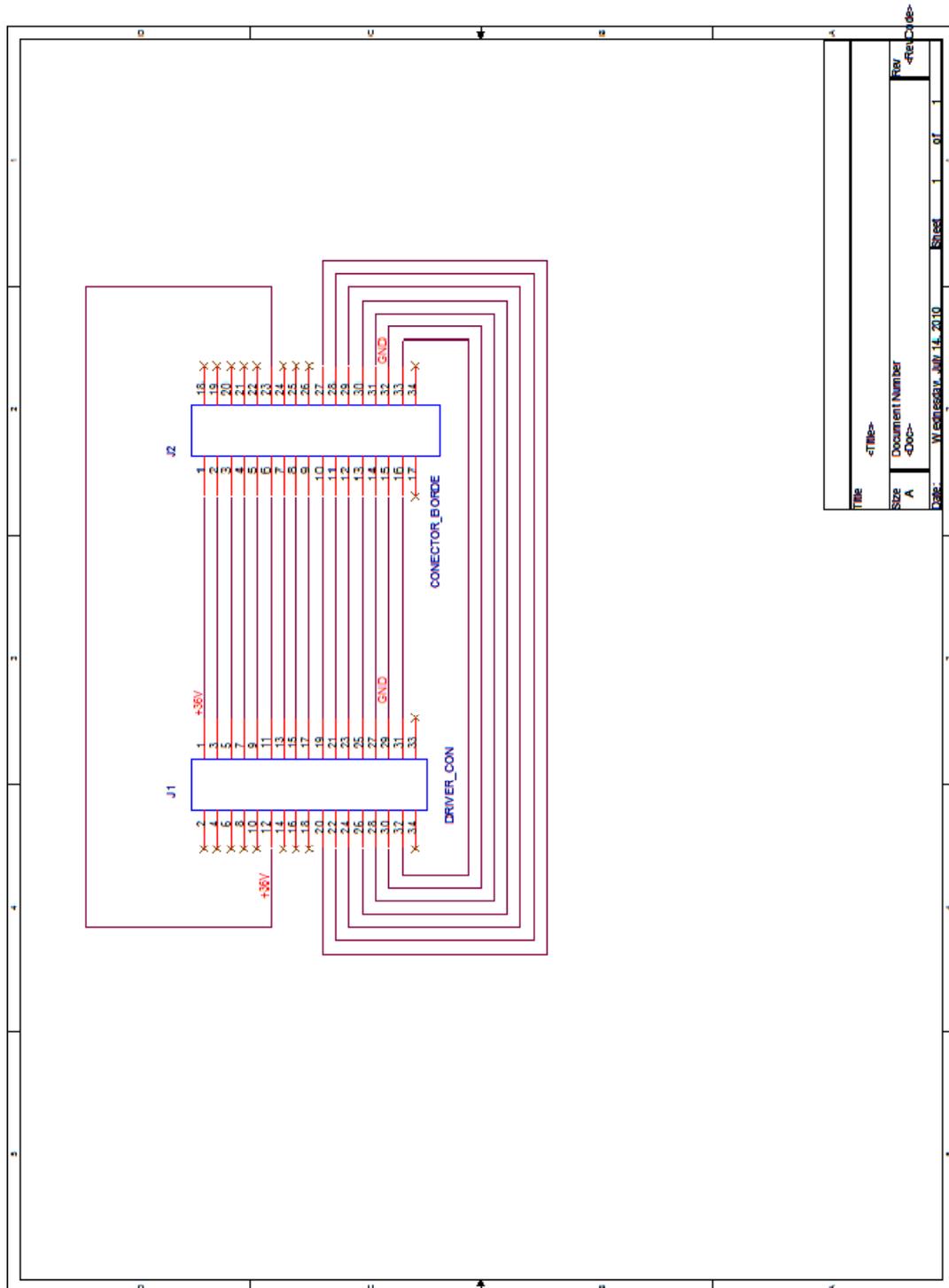


Figura 72. Esquemático placa interconexión.

## 5. Circuitos impresos.

– *Tibia derecha:*

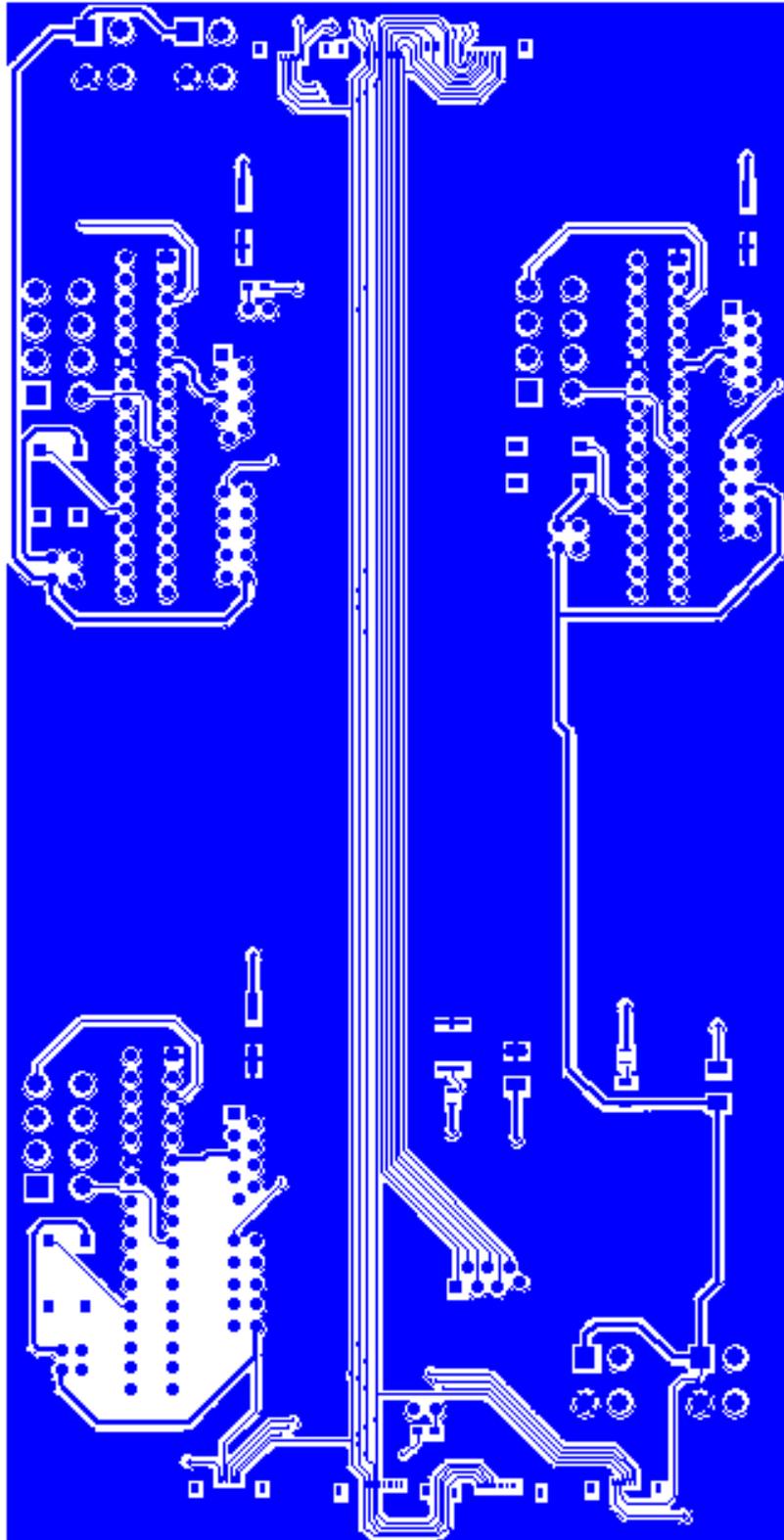


Figura 73. Cara top tibia derecha RH-2.

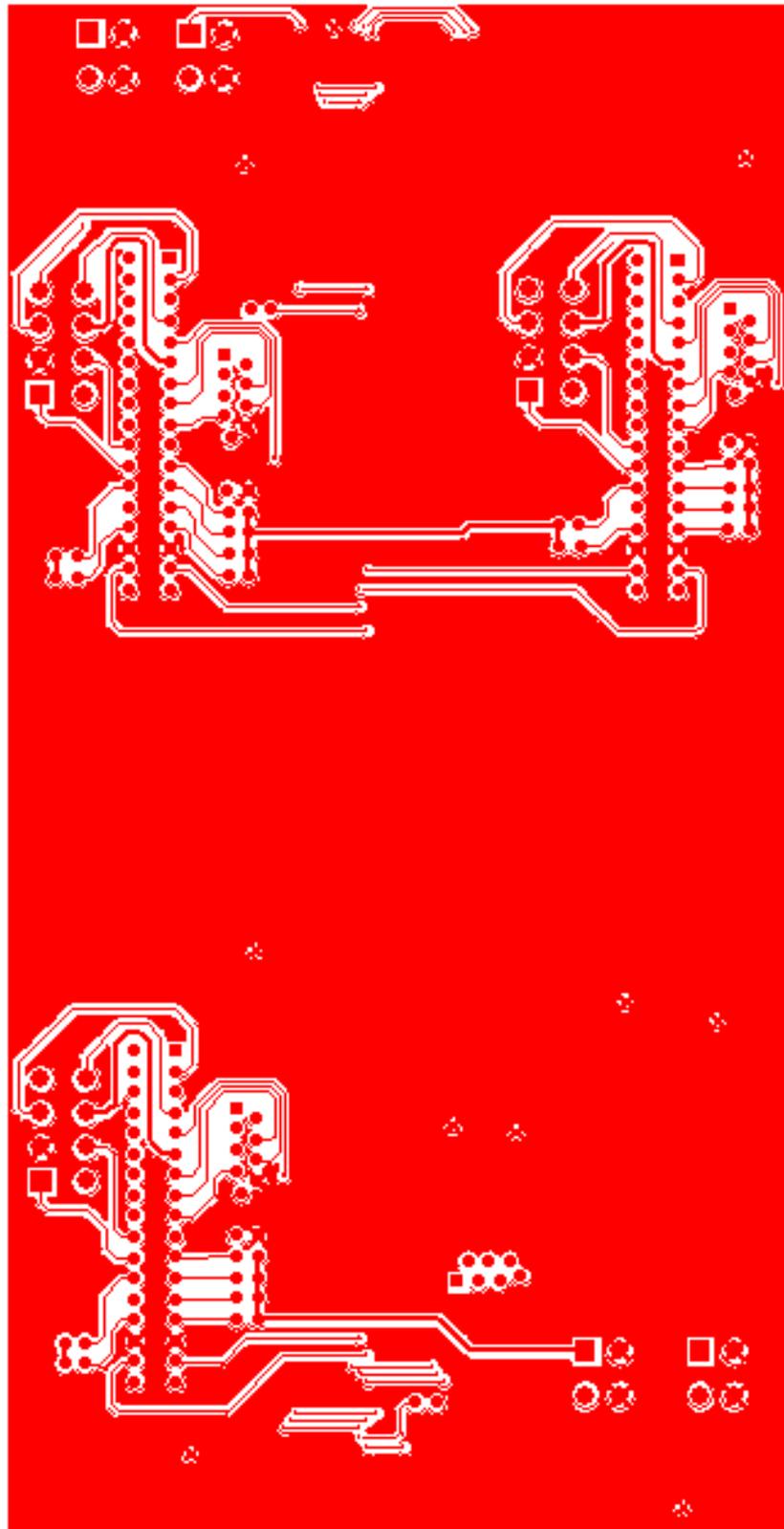


Figura 74. Cara bottom tibia derecha RH-2.

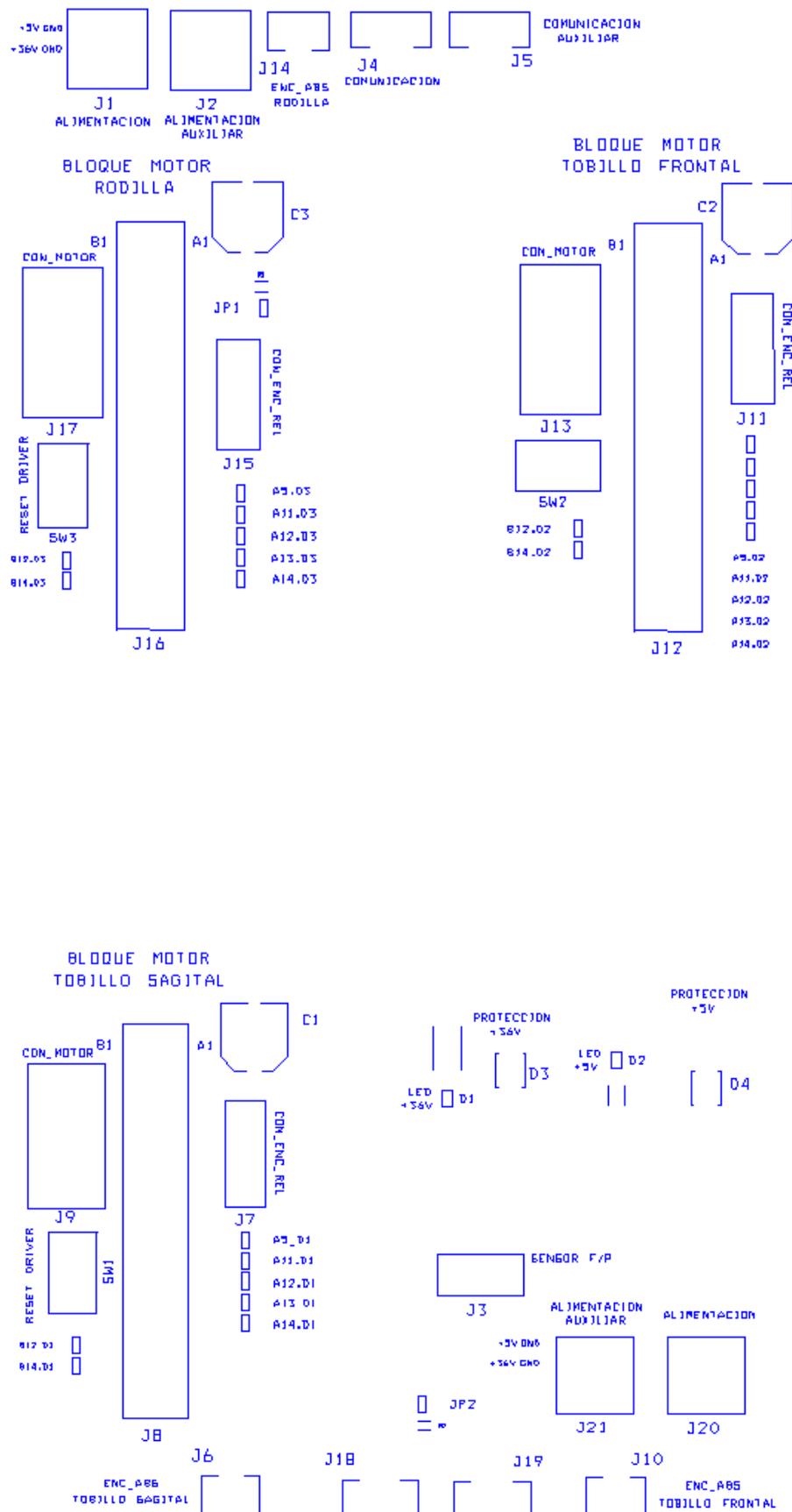


Figura 75. Serigrafía SSTOP tibia derecha RH-2.

– *Tibia izquierda:*

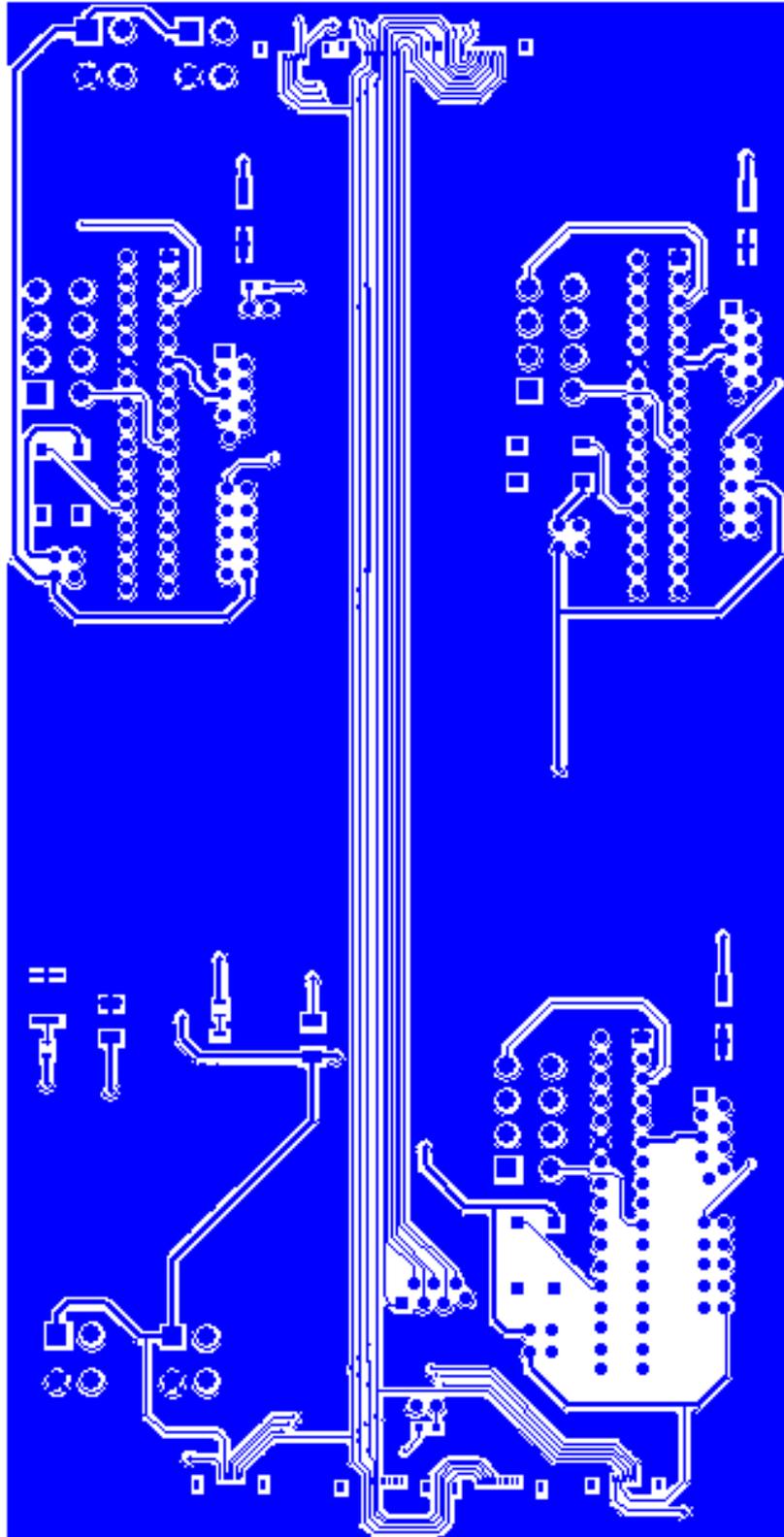


Figura 76. Cara top tibia izquierda RH-2.

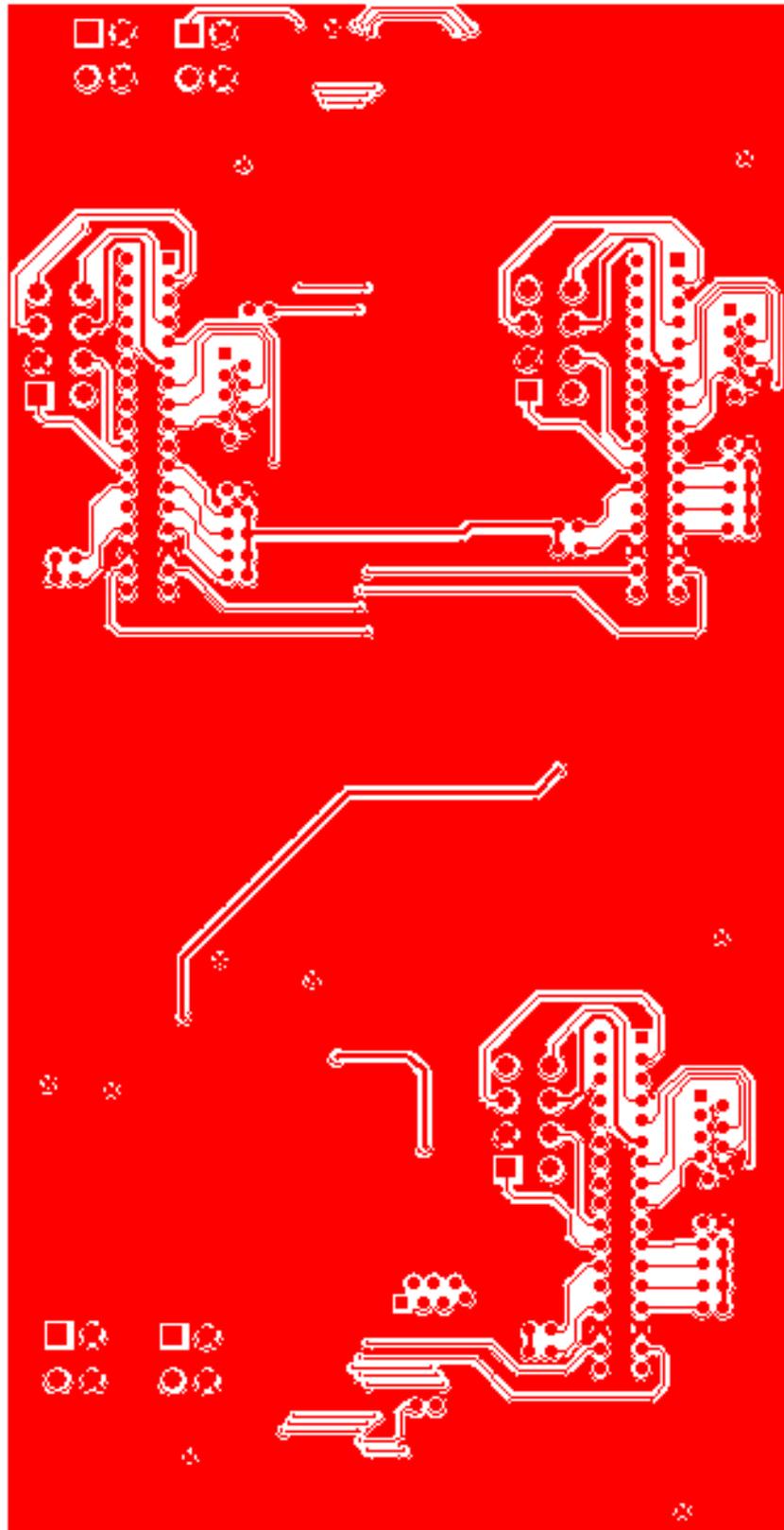


Figura 77. Cara bottom tibia izquierda RH-2.

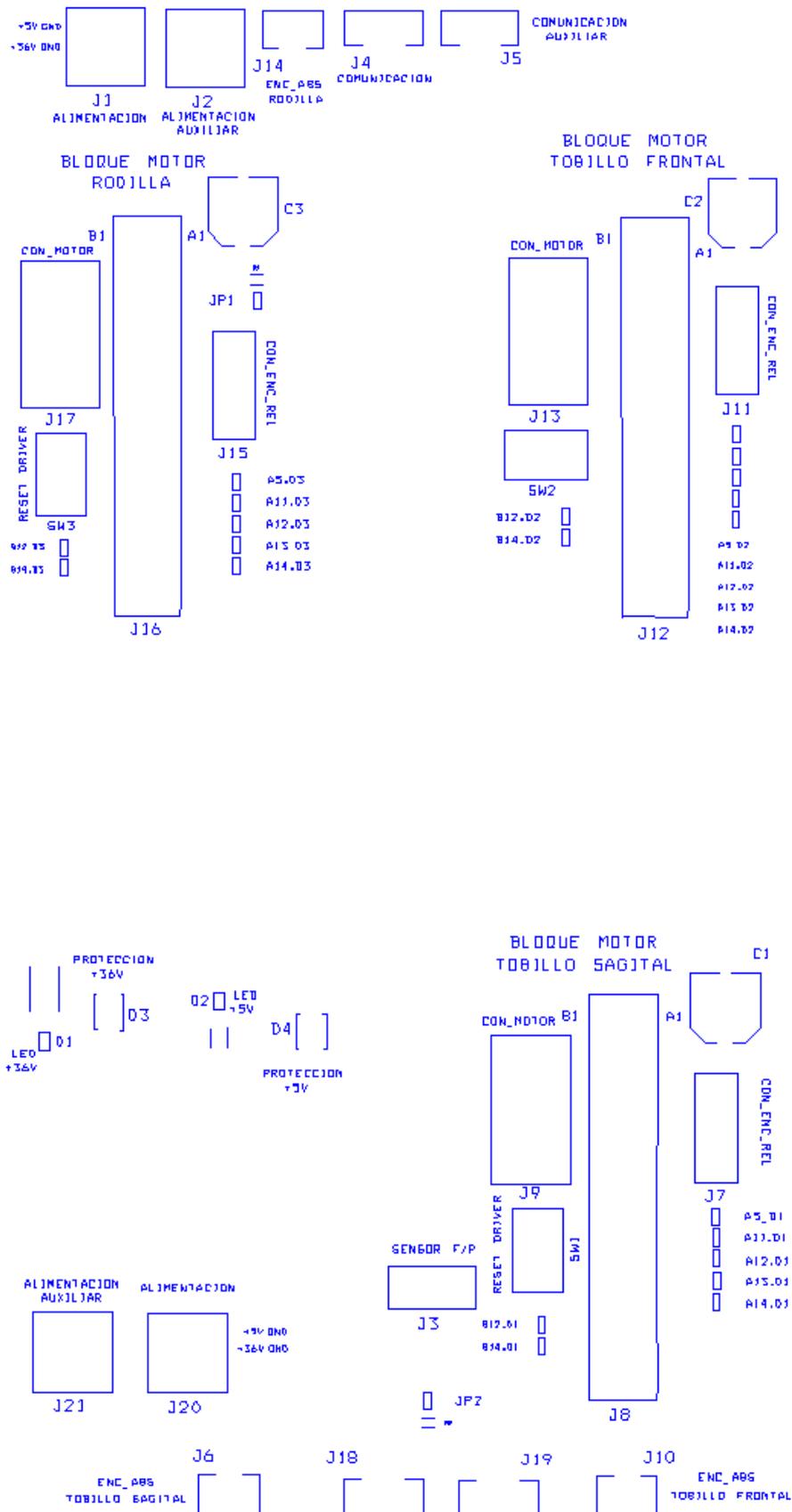


Figura 78. Serigrafía SSTOP tibia izquierda RH-2.

– *Muslo:*

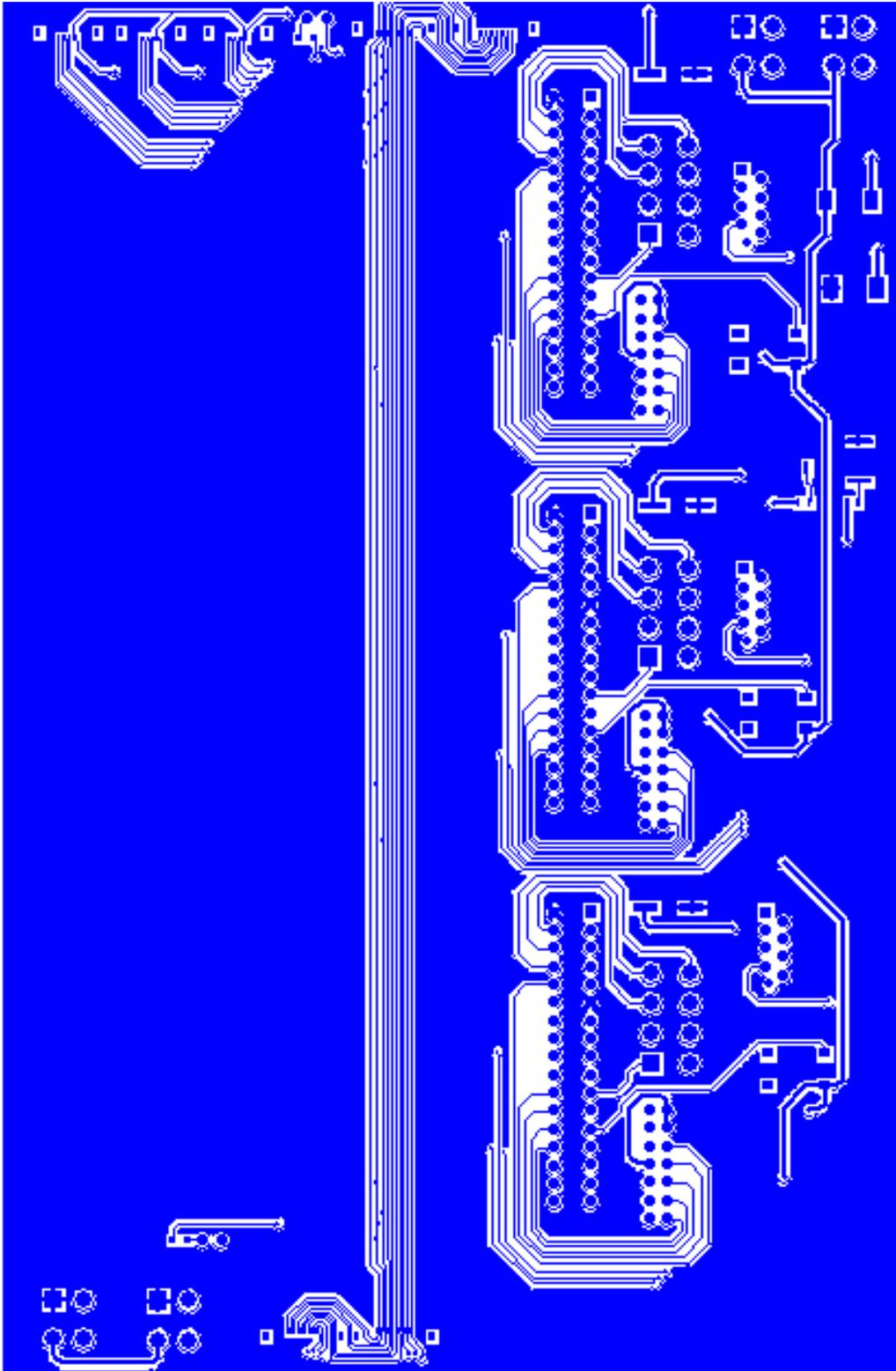


Figura 79. Cara top muslo RH-2.

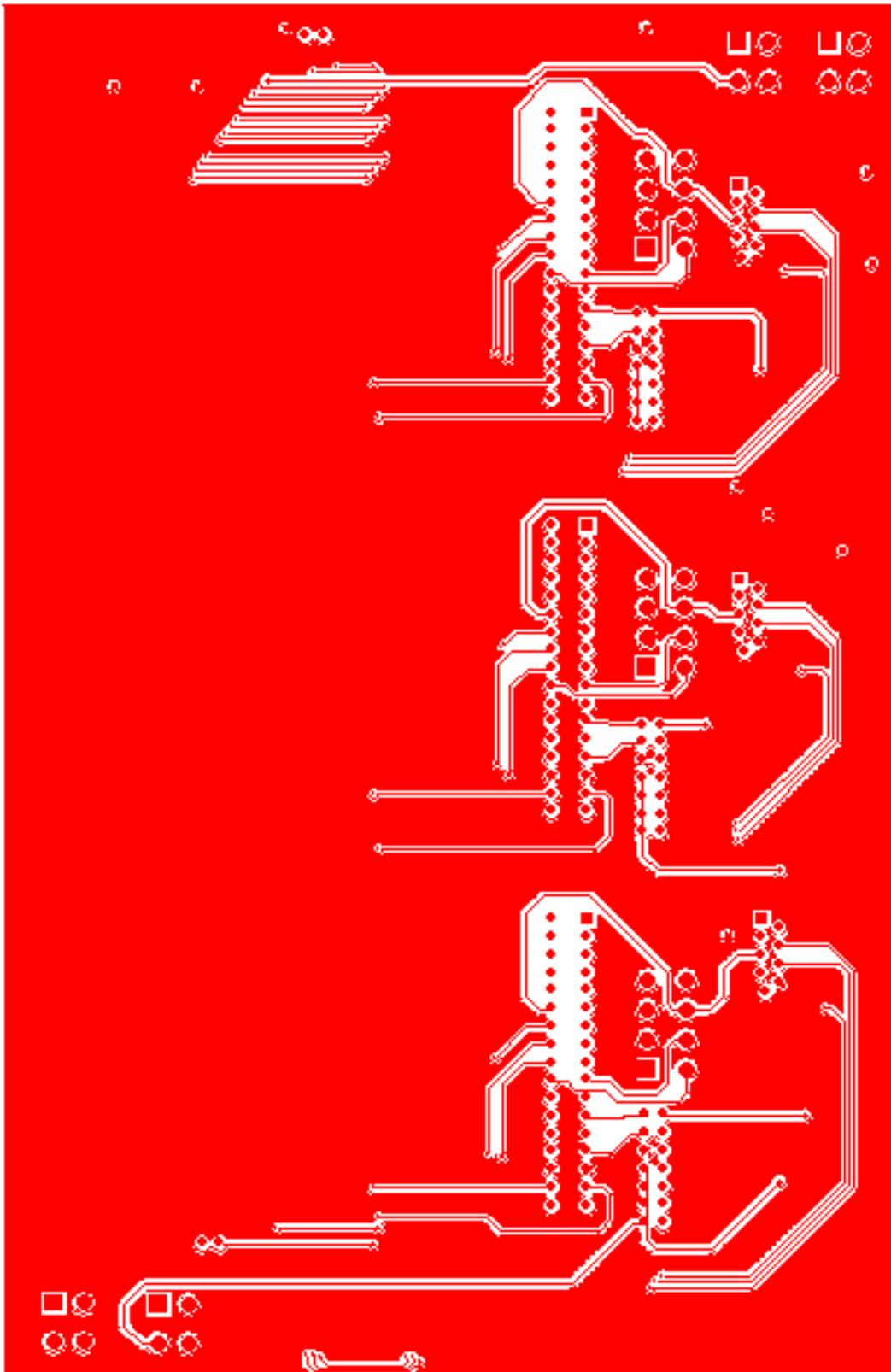


Figura 80. Cara bottom muslo RH-2.

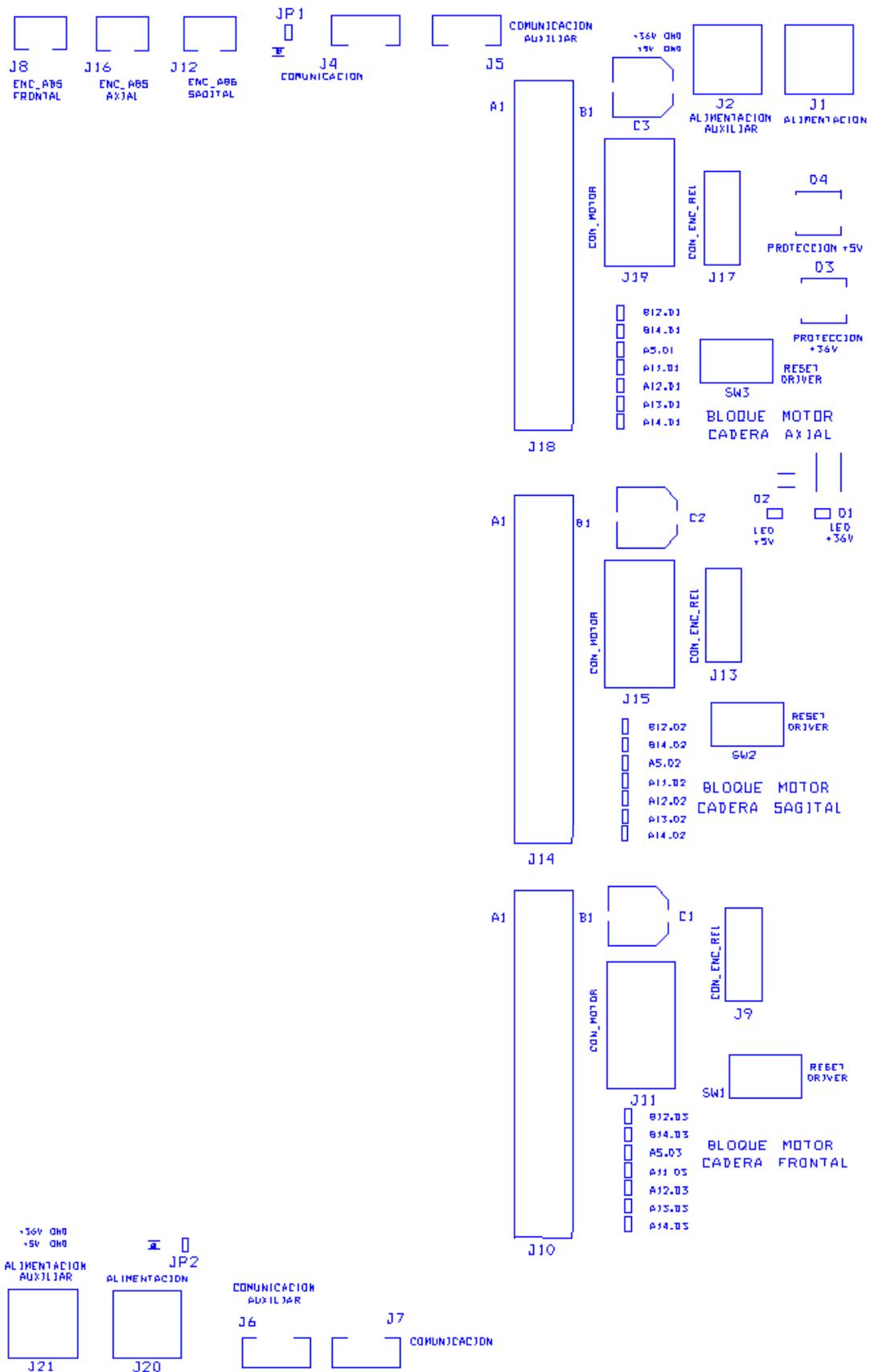


Figura 81. Serigrafía SSTOP muslo RH-2.

– Placa interconexión:

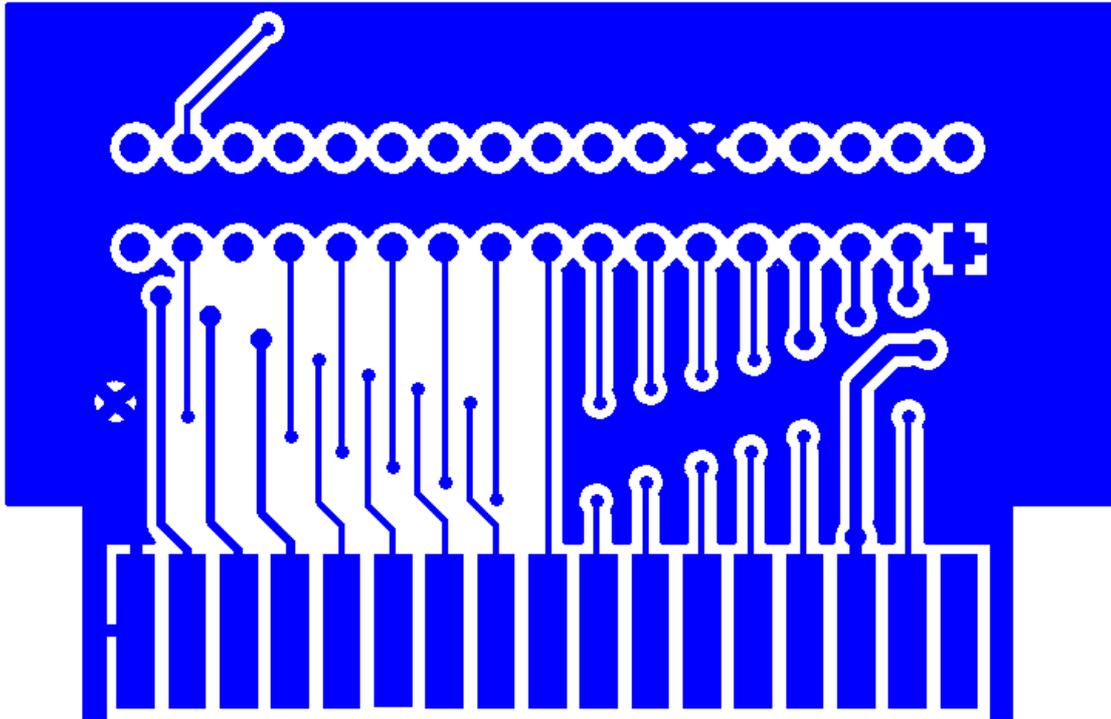


Figura 82. Cara top placa interconexión drivers muslo RH-2.

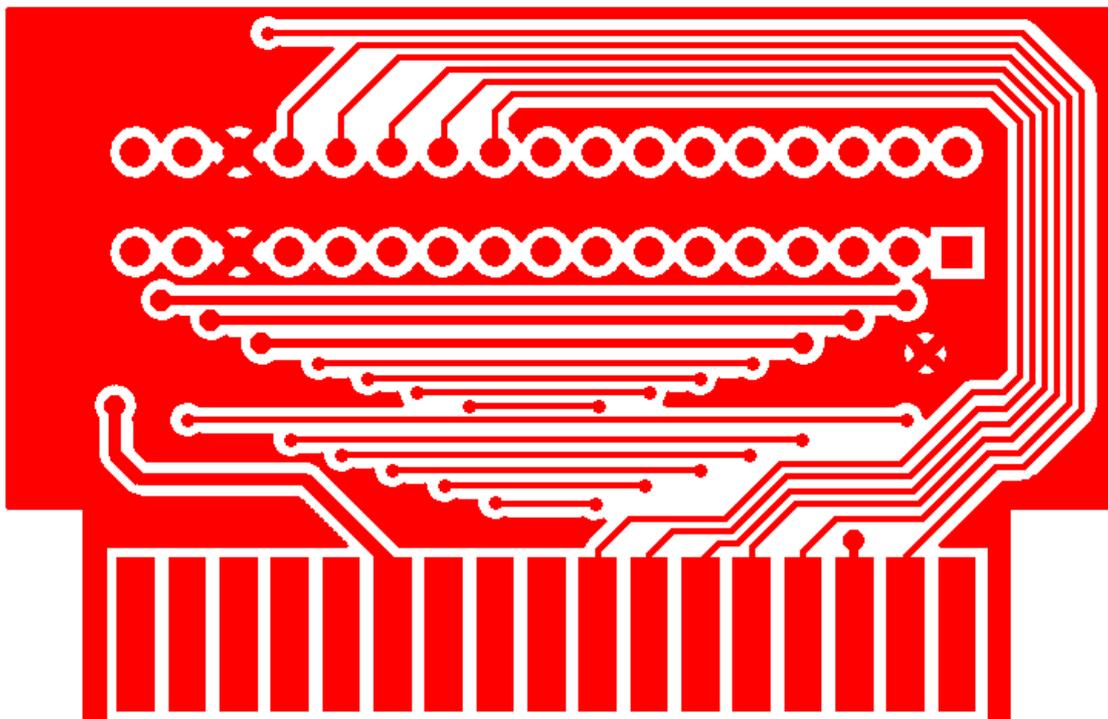
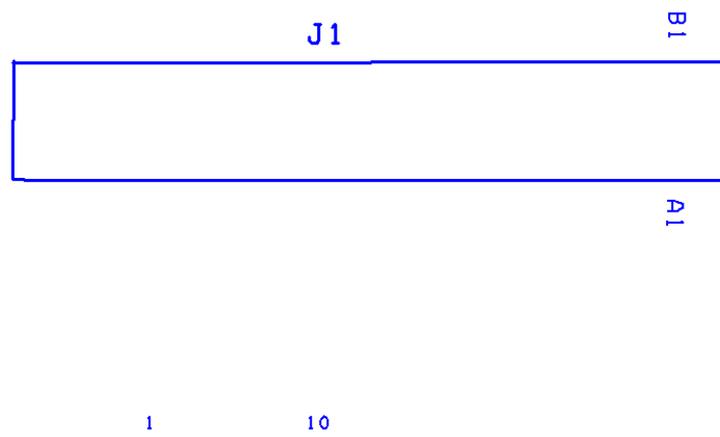


Figura 83. Cara bottom placa interconexión drivers muslo RH-2.



**Figura 84. Serigrafía placa interconexión drivers muslo RH-2.**

## 6. Diseños finales.

Para dar una idea visual de cómo quedarán finalmente las placas, se muestra en las siguientes figuras, los diseños 3D finales de la tibia y el muslo. Se pueden observar los conectores FFC para el bus de comunicación y para la conexión con la placa del encoder absoluto, los conectores mini-fit para la alimentación y los drivers.

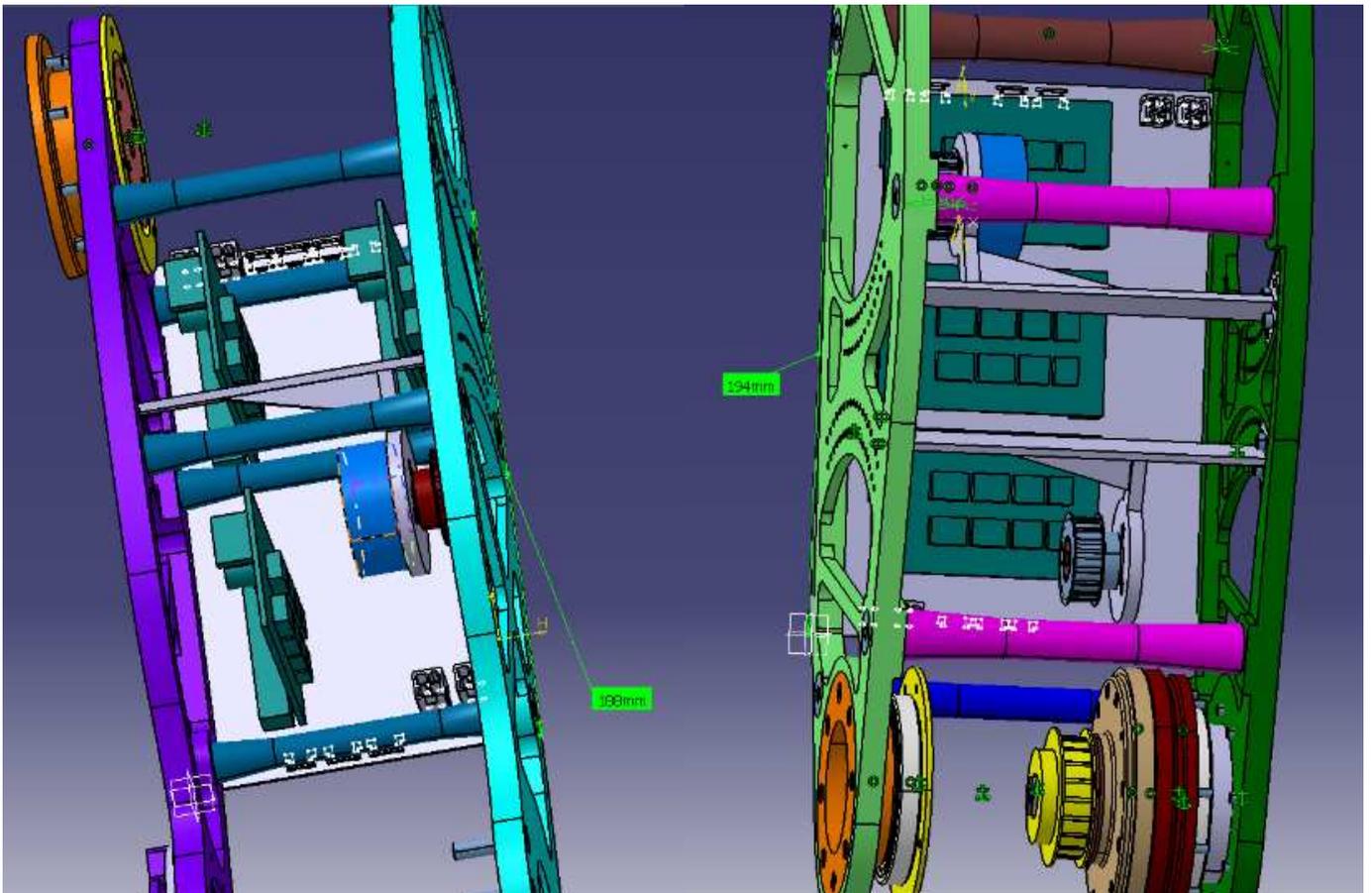


Figura 85. Diseños finales tibia (izq) y muslo RH-2.



# Capítulo 6.

## *CONCLUSIONES.*

---

## 1. Conclusiones y trabajos futuros.

La robótica es un campo en continua expansión en el que intervienen casi todos los campos de la ingeniería: cinemática, dinámica, mecánica, regulación y control, electrónica digital y analógica, electrónica de potencia, etc.

El desarrollo de robots humanoides actualmente permanece al margen del mundo comercial, pero teniendo en cuenta los avances tecnológicos y las inversiones que se están realizando en este campo, pronto se comercializarán robots humanoides para entornos industriales. Por ello es importante desarrollar nuevos proyectos de investigación, en los que se den a conocer nuevos avances y conseguir antes los objetivos de comercialización.

El proyecto del nuevo RH-2 de la Universidad Carlos III de Madrid, se basa en un amplio estudio previo, que asegura una buena base para la posterior realización del humanoide. La división del proyecto en dos fases, ha supuesto como primer objetivo conseguir crear la parte caminante del robot, lo cual ha servido para centrar los estudios realizados. Este nuevo prototipo pretende estar a la altura de los humanoides actuales, y dar un paso más en este proceso de continuas mejoras.

La división de humanoide en subsistemas, supone una ayuda para la comprensión de los diferentes dispositivos necesarios para el funcionamiento del robot. Ha sido necesario estudiar a fondo los componentes utilizados y conocer cómo se comunican entre ellos y las señales necesarias para su funcionamiento.

En este proyecto concretamente, ha sido necesario realizar un estudio eléctrico y de funcionamiento de los componentes, ya que el objetivo final ha sido la realización de las placas de circuito impreso del humanoide y para ello era necesario conectar las diferentes señales de los dispositivos utilizados.

Se ha dividido cada una de las piernas del humanoide en dos partes principales para la colocación de las placas de circuito impreso, el muslo y la tibia. Primeramente ha sido necesario conocer la estructura del humanoide, para de ese modo poder colocar los componentes de mayor tamaño de la forma más correcta posible. Como se mencionó en el apartado correspondiente, se ha utilizado el programa de diseño 3D Catia para la estructura mecánica. Inicialmente me resultó difícil familiarizarme con el programa dada su complejidad. Más adelante, obteniendo información conseguí conocer más a fondo el manejo del programa, y es algo que sin la realización de este proyecto no habría conocido.

Una vez conocida la distribución principal, se ha procedido a realizar los esquemáticos eléctricos de los dispositivos a utilizar, tanto para las tibias como para los muslos. Que conllevaba el conocimiento de las señales eléctricas de cada componente.

Por último, y lo que mayor tiempo y trabajo ha llevado la implementación de las placas de circuito impreso. Para ello, se han elegido los componentes a utilizar para el funcionamiento de las placas, tales como leds de alimentación, protecciones, alimentaciones, etc. y los conectores para los diferentes dispositivos utilizados. La elección de los conectores ha sido complicada, debido a mi desconocimiento previo sobre la utilización comercial de estos. Una de las cosas aprendidas en este proyecto, ha sido cómo realizar búsquedas en el mercado para conseguir los componentes y conectores deseados, buscar sus hojas de características, gráficas, realizar sus huellas para la implementación, etc.

La implementación de las placas, se ha realizado con el programa OrCAD estudiado en una asignatura de la carrera, pero no al nivel requerido en este proyecto. Ha sido necesario aprender a realizar vías, rutar en diferentes capas, modificar el ancho de las pistas, crear planos en varias capas, rutar circuitos complejos, etc. Una vez finalizado el proyecto creo que he mejorado ampliamente mi nivel de conocimiento en esta rama, que es parte importante de la electrónica.

Dados los avances de la tecnología y de la investigación en el campo de los humanoides, es seguro que se descubran nuevos sistemas de funcionamiento más compactos, componentes de menor tamaño, menos peso, etc. La incorporación de nuevos sistemas al RH-2, significará una optimización de las placas de circuito impreso realizadas, pudiéndose reducir el tamaño de las mismas y mejorando su distribución.

Este proyecto conlleva la realización de las placas de circuito impreso de la parte inferior del RH-2, para lo cual se han realizado pruebas previas a la implementación. Una vez construidas las placas, será necesario incorporarlas al humanoide, y realizar pruebas de funcionamiento con el sistema completo.



# Capítulo 7.

# BIBLIOGRAFÍA.

---

- **Páginas web.**

Se incluyen algunas de las principales páginas web visitadas, en la realización del proyecto ha sido necesario un mayor número de enlaces.

- <http://www.technosoftmotion.com>
- <http://www.ir3.com>
- <http://www.maxonmotor.es>
- <http://www.farnell.com>
- <http://www.molex.com>
- <http://www.amidata.es>
- <http://www.sony.nt/SonyInfor/QRIO/>
- <http://www.technaid.com>
- <http://www.eurotech.com>
- <http://proton.ucting.udg.mx/dpto/tesis/quetzal/CAPITUL1.html>
- <http://www.renco.com>
- <http://www.avagotech.com>
- <http://asimo.honda.com>

- **Manuales.**

- ISCM8005 Technical Reference
- MotionChip TML Programming User Manual
- IO ISCM User Manual
- MotionChip Configuration Setup
- CANopen Programming
- ISCM8005 Starter Kit User Manual

- **Proyectos fin de carrera.**

*Universidad Carlos III de Madrid:*

- Análisis de los accionadores del robot humanoide RH-2.  
Autor: Alberto Navarro Criado.
- Diseño e implementación encoder absoluto CANopen.  
Autor: Julián Fortes Monteiro.
- Diseño de la arquitectura Hardware del robot humanoide RH-2.  
Autor: Andrés Cano Sánchez.