

Jornadas de Automática

Actualización de la arquitectura de la electrónica del robot humanoide TEO

Maldonado-Muñoz, P. I., Rodríguez-Sanz, A.*, Martínez, S., Balaguer, C.

RoboticsLab, Dpto. de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad Carlos III de Madrid, Av. de la Universidad 30, 28911 Leganés, España.

To cite this article: Maldonado-Muñoz, P. I., Rodríguez-Sanz, A., Martínez, S., Balaguer, C. 2024. Upgrade of the architecture of the electronics for the humanoid robot TEO. *Jornadas de Automática*, 45. <https://doi.org/10.17979/ja-cea.2024.45.10963>

Resumen

En el presente artículo se expone una propuesta de mejora de la electrónica general del robot humanoide TEO. Se introduce una nueva arquitectura para la unidad de alimentación basada en módulos y una reestructuración de los componentes ubicados en el torso. También se propone un prototipo de articulación embebida impresa en 3D con componentes mejorados. Con estos cambios, se busca solventar los problemas electrónicos y mecánicos producto del desgaste ocasionado por el uso del robot, así como facilitar el mantenimiento y sustitución de las diversas placas distribuidas por toda la estructura del robot.

Palabras clave: Sistemas mecatrónicos, Modelado, Robótica embebida, Metodologías de diseño, Sistemas de control de movimiento.

Upgrade of the architecture of the electronics for the humanoid robot TEO.

Abstract

This article presents a proposal to improve the general electronics of the humanoid robot TEO. It introduces a new modular architecture for the power unit and the restructuring of the components located in the torso. A prototype of a 3D printed embedded joint with improved components is also proposed. These changes aim to address the electronic and mechanical problems due to the wear caused by the movements of the robot, as well as to facilitate the maintenance and replacement of the various boards distributed throughout the robot's structure.

Keywords: Mechatronic systems, Modelling, Embedded robotics, Design methodologies, Motion Control Systems.

1. Introducción

Task Environment Operator (TEO) es el nombre de la tercera versión del robot humanoide desarrollado por el grupo RoboticsLab de la Universidad Carlos III de Madrid, como una plataforma de investigación para el desarrollo de tareas de asistencia doméstica (Martínez et al., 2012). El robot tiene una estatura de 1.70 m, un peso estimado de 62.5 kg y cuenta con un total de 28 grados de libertad (DoF), lo que le permite replicar movimientos y realizar tareas similares a las que desarrollan las personas. El robot cuenta con tres ordenadores a bordo ubicados en su torso, dedicados a la manipulación, la locomoción y la visión (García-Haro, 2020) (ver la Figura 1(a)). La electrónica completa del robot abarca dos áreas principa-

les: una unidad de alimentación, ubicada en la parte trasera del robot (ver la Figura 1(b)), y las múltiples placas de comunicación y control repartidas por los cuatro buses de CAN (brazo izquierdo, brazo derecho, pierna izquierda y pierna derecha).

En este trabajo se describen los principales problemas de funcionamiento del robot, causados por el desgaste mecánico de los componentes, y se propone una mejora de la electrónica basada en la reestructuración de los elementos del torso (reductores de tensión y ordenadores a bordo), y el rediseño y actualización de las articulaciones del robot. De esta forma, se pretende facilitar el mantenimiento y sustitución de la electrónica del robot, así como mejorar el rendimiento general de los sistemas electromecánicos.

*Autor para correspondencia: albertro@pa.uc3m.es

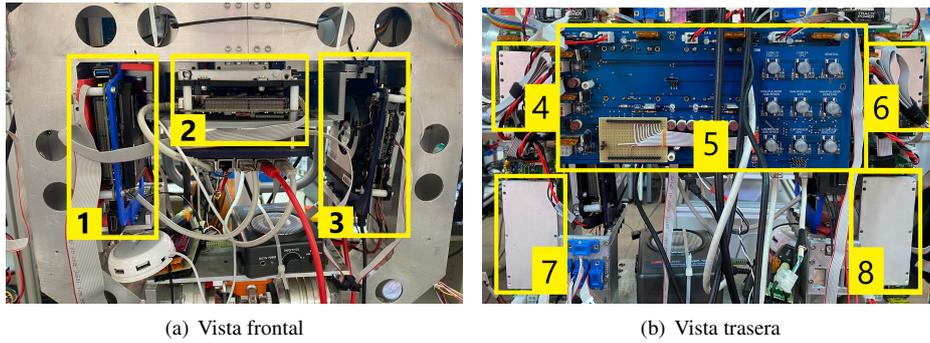


Figura 1: (a) Vista frontal del robot con los tres ordenadores integrados: (1) locomoción, (2) visión, (3) manipulación. (b) Vista trasera del robot con los DC-DC: (4) brazo izquierdo, (5) placa base, (6) brazo derecho, (7) pierna izquierda, (8) pierna derecha.

2. Rediseño de la unidad de alimentación

Debido a los problemas electrónicos de los conectores, las soldaduras internas de las placas, la falta de accesibilidad a los componentes, así como del exceso de calor generado por la falta de refrigeración en los sistemas situados en el interior del torso, se decidió rediseñar la electrónica de alimentación. En primer lugar, se realizó un estudio del funcionamiento de la electrónica presente y su estado, así como de los inconvenientes y las oportunidades de mejora de esta. Como se puede observar en la Figura 2, la unidad de alimentación actual está compuesta por una placa base general (PB), que gestiona las entradas y salidas a las otras partes del robot, así como del control de las mismas. Esta placa también incluye tres reductores de tensión Traco Power TEP-160 para alimentar los ordenadores a bordo a una tensión de 24 V, y se comunica con un conjunto de convertidores DC-DC de 250 y 500 W (MDCDC) de la marca Vicor para alimentar todas las articulaciones de las piernas y los brazos a 36 V.

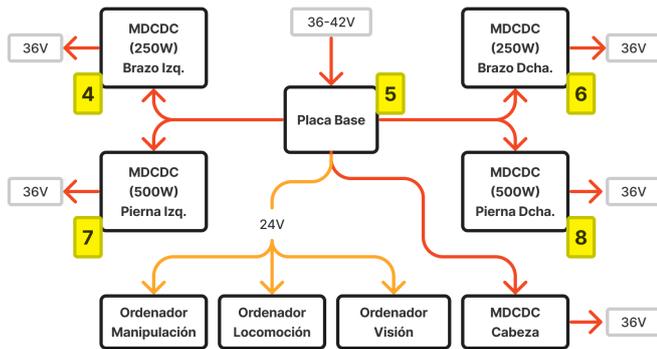


Figura 2: Diagrama de bloques de la unidad de alimentación actual.

A la PB le llega la alimentación general de 36–42 V, la cual es distribuida a cada uno de los módulos en función de la tensión requerida, siendo el elemento central de control y comunicación. Esta incluye parte de la electrónica de control para cada uno de los convertidores, tanto los externos como los internos, además de otros DC-DC a 5 V para la alimentación de los sensores de dichos módulos. Por otro lado, cada uno de los MDCDC fue diseñado para su convertidor correspondiente, siendo todos ellos distintos del resto, que incluían sensores con distintos protocolos de comunicación.

En cuanto a la distribución, toda la electrónica de alimentación se encuentra repartida en la zona superior del robot. En el interior del torso del humanoide se sitúan los procesadores correspondientes a la manipulación, locomoción y visión (ver la Figura 1(a)). La PB se encuentra en la parte posterior de este, en cuyo reverso se ubican los convertidores de voltaje de 24 V correspondientes a cada uno de los procesadores. Anejadados al marco posterior, se encuentran los actuales MDCDC de las extremidades y, en la cabeza, se encuentra el correspondiente convertidor (ver la Figura 1(b)).

Con el objetivo de mejorar la disposición y accesibilidad de la electrónica de alimentación, se propone la reestructuración de la misma (ver la Figura3). En primer lugar, se generalizan los MDCDC, de modo que una misma PCB sea capaz de integrar cualquiera de los tres convertidores de voltaje. Para ello, se ha diseñado una huella común a los tres tipos de convertidores (ver la Figura 6), dando versatilidad a un único diseño de placa. De este modo, una misma placa integrará la electrónica requerida para cualquiera de los tres DC-DC, permitiendo una mejora en cuanto a la facilidad para el intercambio de placas en caso de avería en algún componente, y estandarizando las entradas y salidas tanto de voltaje como de señal. Esto facilita la distribución, organización e identificación de los conectores en la placa general. Con un diseño de tipo modular, cualquier modificación en los valores de tensiones o potencias se puede realizar con una única sustitución o reconfiguración de los propios convertidores. Esto permite experimentar con distintos sistemas, motores y componentes, sin afectar al resto de la electrónica.

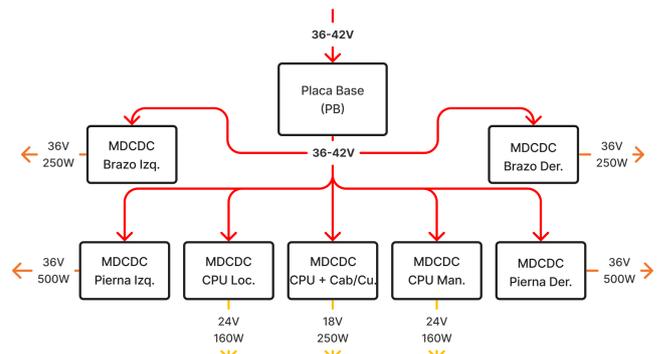


Figura 3: Diagrama de bloques de la nueva arquitectura propuesta.

En la Figura 4, se pueden identificar dos bloques distintos en los nuevos módulos de alimentación propuestos. La zona de alimentación se compone de una entrada de 36–42 V procedentes de la PB, del DC-DC, de la salida de tensión de 36 V para la alimentación de las extremidades, y del convertor de tensión que reduce a 5 V para la alimentación de sensores. El DC-DC principal es un elemento personalizado que incluye todas las entradas y salidas de cada uno de los tres reductores, para el cual se ha desarrollado además la ya mencionada huella común en la que se incluyen los pines y contornos de cada uno de ellos. Se ha adaptado la electrónica de protección para que pueda ser utilizada en cualquiera de los tres escenarios.

El segundo bloque contiene los elementos de comunicación y control. Se ha integrado un medidor de corriente (INA236) a la entrada del módulo, el cual se comunica mediante el protocolo I²C (circuito inter-integrado). Este es un bus serie de datos consistente en una línea de reloj (SCL) y otra de datos (SDA). Dicho protocolo ha sido estandarizado en los módulos, de manera que todos los sensores integrados se comunican por medio de este. Además, se ha añadido un sensor de temperatura (LM75), que se comunica con este mismo protocolo. Puesto que se necesita de siete módulos, y las direcciones para la comunicación de los datos han de ser distintas en cada uno de estos, se integra en cada módulo un microswitch de siete entradas y salidas. En función del sistema que se alimente, este deberá comunicar en unas direcciones establecidas mediante las entradas analógicas de los sensores, diferenciando además dos modelos del INA236 (A y B), cuya única diferencia se encuentra en las direcciones de bits. El control de activación del módulo se realiza por medio de un integrado cuya función es la de una compuerta lógica “AND”, y cuyas entradas son la de señal de activación de la PB (PWR) y la señal procedente de la seta de emergencia, como método de seguridad (PE).

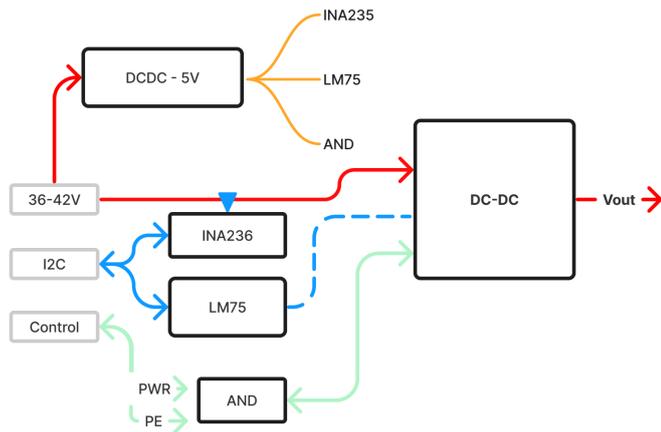


Figura 4: Diagrama de bloques de cada módulo DC-DC.

Con el objetivo de facilitar el acceso a los nuevos módulos DC-DC, se propone una nueva arquitectura en la que se reestructuran los elementos ubicados en el torso del robot. Los MDCDC se distribuyen en paralelo a lo largo de la parte superior del marco del torso, perpendiculares a la PB situada en la parte trasera del robot. Debajo de estos, se va a añadir una serie de ventiladores para redirigir el flujo de aire hacia la par-

te superior y mejorar la disipación de calor de los reductores. Estos ventiladores se activan mediante una compuerta lógica “OR”, cuyas entradas proceden de los sensores de temperatura de cada placa. Uno de los principales cambios con respecto a la versión actual del torso es la sustitución del MDCDC de la cabeza, alojado en el interior de esta, por un nuevo ordenador Jetson AGX Xavier de Nvidia para el desarrollo de aplicaciones de visión con IA a bajo consumo (hasta 30 W). Como resultado, solo se mantienen los ordenadores de manipulación y locomoción, los cuales se dispondrán en horizontal en la parte inferior del torso del robot (ver la Figura 5).

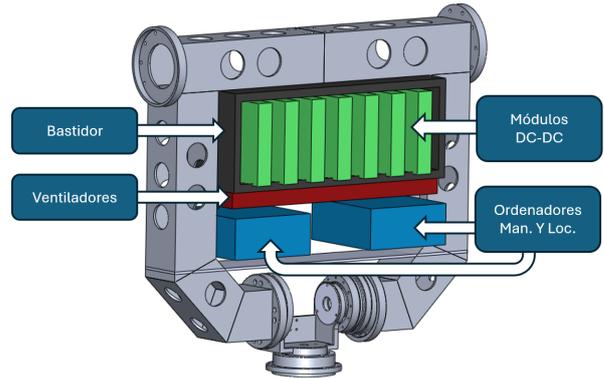


Figura 5: Disposición de los componentes en el torso del robot.

Para que esta distribución sea viable, se debe adaptar el diseño de las PCB de los MDCDC para que cumpla con unas dimensiones que lo permitan. Para ello, se ha usado de referencia el elemento de mayor magnitud: el DC-DC. En primer lugar, se diseñó la huella que contiene los tres distintos convertidores con sus pines y delimitaciones correspondientes (ver la Figura 6). Puesto que se necesita espacio en el torso para distintos elementos, se restringen las dimensiones máximas de la placa a 120 x 100 mm, siendo el largo el establecido por los mismos convertidores. De este modo, se permite ampliar la placa a ambos lados del ancho de estos para ubicar la electrónica, de manera que, al disponer los módulos en el bastidor, los conectores estén lo más cerca posible del plano posterior del robot; esto es, la placa base. Además, puesto que se deben disponer siete módulos en paralelo, estos no deben superar una profundidad mayor de 20 mm, para dejar así suficiente espacio de circulación para aumentar el flujo de aire.

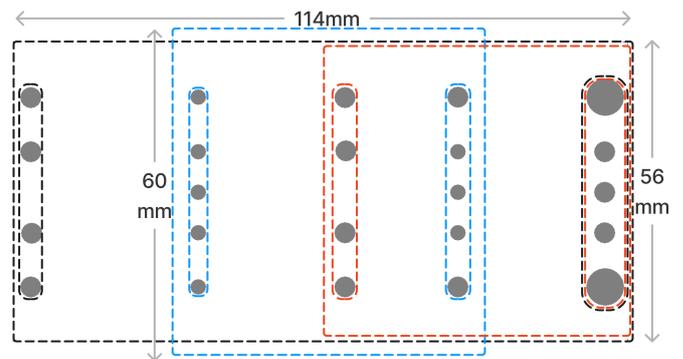


Figura 6: Huella común para los tres DC-DC.

3. Rediseño del sistema electromecánico de las articulaciones

Como parte del rediseño de la electrónica de alimentación, se ha reubicado el módulo DC-DC de la cabeza al torso y sustituido por una nueva unidad de computación Jetson AGX Xavier, para la cual se ha desarrollado un nuevo modelo CAD (ver la Figura 7). A raíz de esta modificación, se ha decidido crear un nuevo modelo para las dos articulaciones del cuello con componentes actualizados e impresos con resina en 3D. Las modificaciones presentadas en la cabeza y el cuello serán trasladadas en el futuro para renovar el resto de articulaciones y sistemas de computación del robot humanoide.

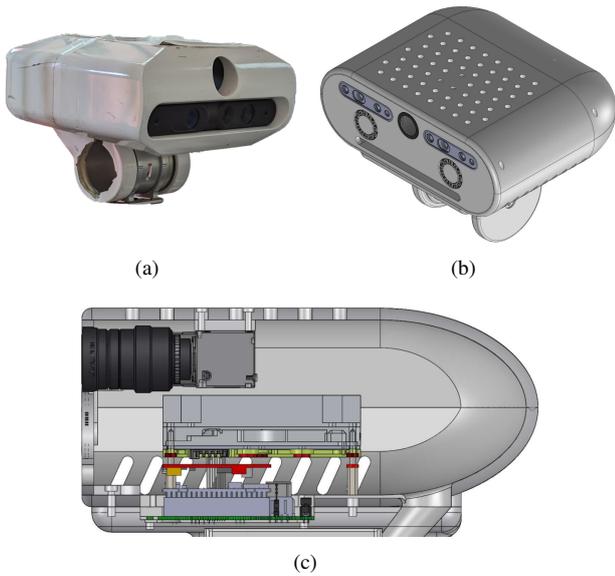


Figura 7: Comparación de las versiones de la cabeza del robot TEO. (a) Diseño antiguo, (b) Diseño nuevo, (c) Sección lateral del nuevo diseño (Rodríguez-Sanz et al., 2024).

Como parte del rediseño de las articulaciones, se han actualizado dos de los componentes electromecánicos que componen el bucle de control con el objetivo de mejorar la eficiencia de estas (ver la Figura 8). Se ha implementado una versión del motor BLDC de mayor potencia (50 W) y se han reemplazado los sensores de posición capacitivos por dos sensores de posición magnéticos de mayor precisión. Previamente, se empleaban dos encoders CUI AMT-203V (11 bits de resolución) para operar como encoder relativo en la salida del motor y como encoder absoluto en la salida de la articulación. Estos se han sustituido por dos encoders magnéticos independientes, de mayor resolución y menor tamaño: el encoder relativo RLM (12 bits) y el encoder absoluto AksIM-2 (17 bits). En adición a estos, se han añadido sensores de límite magnéticos para delimitar los ángulos de giro máximos de las articulaciones sin depender de las medidas de los encoders relativos, con lo que se consiguen evitar colisiones con los límites físicos en caso de funcionamiento erróneo de los encoders. Los drivers iPOS3604 MX-CAN se han decidido mantener al poder administrar la potencia necesaria para controlar los motores, y al estar ya definidas e implementadas las comunicaciones entre estos y los ordenadores de manipulación y locomoción por medio del middleware YARP (Martínez et al., 2019).

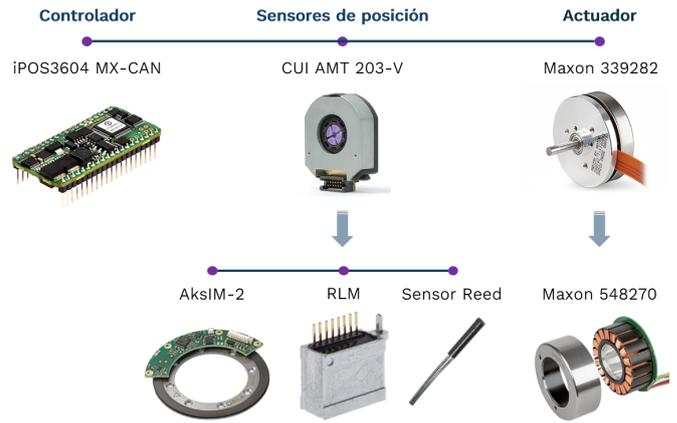


Figura 8: Actualización de los componentes de las articulaciones del robot.

La estructura de la articulación propuesta se ha impreso en 3D con resinas mediante la técnica de la estereolitografía y posteriormente se ha mecanizado para obtener las tolerancias más restrictivas del montaje de los componentes. Esta metodología de fabricación permite adaptar las piezas a las necesidades de otras articulaciones (p. ej. la conexión de un tipo de mano a las muñecas) y fabricar prototipos funcionales con rapidez en caso de rotura o desgaste de las piezas (Rodríguez-Sanz et al., 2024). La sección del nuevo modelo de la articulación con los componentes electromecánicos descritos se muestra en la Figura 9.

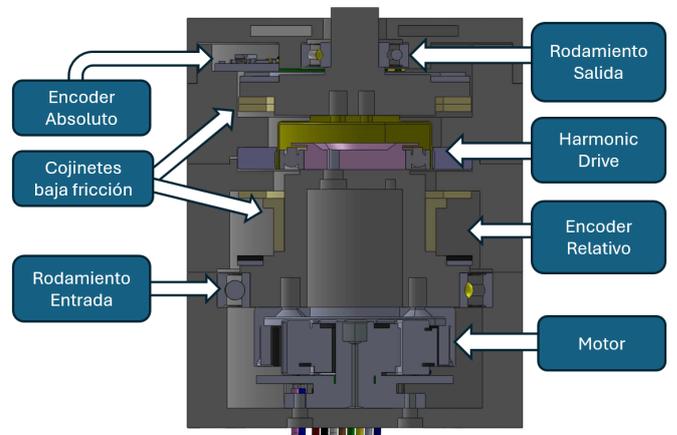


Figura 9: Sección del nuevo modelo de la articulación.

La electrónica de control de cada articulación debe integrar los protocolos de comunicaciones empleados por los distintos componentes para el correcto funcionamiento de la articulación. La articulación propuesta emplea los tres siguientes: controller area network (CAN), serial peripheral interface (SPI) y cuadratura incremental. El primero de estos se emplea para las comunicaciones entre los controladores iPOS 3604 MX-CAN distribuidos a lo largo de las extremidades y los ordenadores de manipulación y locomoción. El bus CAN emplea dos canales diferenciales (CAN-High y CAN-Low) para definir el estado recesivo o dominante de los bits del mensaje. El middleware YARP emplea el protocolo de nivel superior CANOpen para gestionar las comunicaciones del bus.

Los otros dos protocolos se emplean en cada uno de los tipos de encoder. Los encoders relativos RLM se comunican directamente a través de tres canales físicos: A, B y Z, generando pulsos en cuadratura incremental a una tasa de transferencia máxima de 2 MHz. Por el contrario, los encoders absolutos AksIM-2 emplean el protocolo SPI para comunicarse con un microcontrolador intermedio a una tasa de transferencia de 4 MHz. Para ello se emplean cuatro canales: reloj (SCK), salida del maestro (MOSI), salida del esclavo (MISO) y selección del esclavo (SS). Esto se debe a que los controladores no incorporan la interfaz SPI, por lo que se emplea el microcontrolador para interpretar los mensajes entre los dos protocolos.

Como propuesta de mejora, se ha decidido sustituir el microcontrolador PIC18F2580 y el transceiver MCP2551, ambos de la marca Microchip, por los modelos PIC18F25K83 y MCP2561 respectivamente. La elección de estos nuevos componentes se fundamenta en la adición de módulos independientes en el microcontrolador para los protocolos I²C y SPI, la mejora de las protecciones contra sobrecorrientes y sobretensiones en ambos dispositivos (Microchip, 2014), y la posibilidad del uso del software MPLAB X IDE. Este último contiene las librerías necesarias para programar y depurar el firmware del microcontrolador en tiempo real, facilitando las tareas de puesta a punto y mantenimiento (Microchip, 2023). El diagrama de bloques de la electrónica de las dos articulaciones del cuello se muestra en la Figura 10.

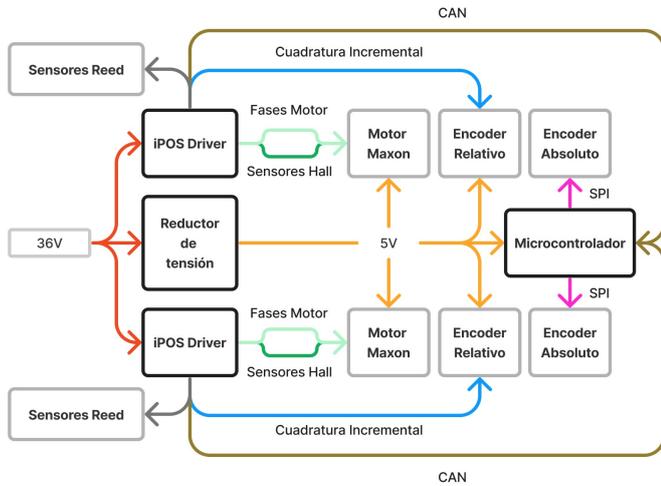


Figura 10: Diagrama de bloques de la PCB combinada del cuello.

De cara al diseño y fabricación de la PCB, se ha decidido usar un diseño de dos capas, puesto que las comunicaciones que se emplean en las articulaciones a las tasas de transferencia definidas se consideran de media velocidad, y no requieren de restricciones de impedancia propias de un diseño multicapa. Para las pistas de alimentación se ha empleado un plano de masa en la capa inferior, para unificar las tierras del circuito y reducir el recorrido de retorno de las señales, y un plano de la alimentación positiva (36 V) en la capa superior. La suma total de las corrientes consumidas por todos los componentes alimentados a 5 V, considerando que hay dos de cada uno por cada articulación, es de aproximadamente 1 A (ver la Tabla 1). El ancho de las pistas se puede calcular usando como re-

ferencia el estándar IPC-2221, para el cual se ha obtenido un ancho de pista mínimo de 0.31 mm (12 mil). Este valor se ha usado como referencia para el resto de señales.

Tabla 1: Corrientes consumidas por los dispositivos alimentados a 5V

Dispositivo	Avg. (mA)	Máx. (mA)	Condición
RLM	–	30	–
AksIM-2	135	155	–
MCP2561	5	10	Bit recesivo
	45	70	Bit dominante
PIC18F26K83	16.7	17	Clk=64 MHz
	–	250	Máx. V _{DD}

Se ha definido una condición extra para las pistas que emplean los encoders absolutos para reducir el ruido en las señales, la longitud de las pistas. Considerando las pistas de las señales como líneas de transmisión de datos, se puede calcular la longitud máxima de la línea en la que se cumple el tiempo mínimo de subida o *rise time* (n_s) de la señal mediante (1), donde n_s es el tiempo de subida, L_{bus} es la longitud máxima del bus, c_{vacuum} es la velocidad de la luz en el vacío y D_k es la constante dieléctrica del material de la PCB (FR-4) (Peterson, 2024). Considerando un factor extra del 10 % para cumplir el tiempo de subida de 25ns (Microchip, 2018) y una constante dieléctrica de 4.2, se obtiene una longitud crítica de la pista de 37.5 cm.

$$n_s = \frac{L_{bus} \sqrt{D_k}}{c_{vacuum}} \rightarrow n_s = \frac{L_{bus} \sqrt{4.2}}{3 \cdot 10^8} \rightarrow L_{bus} = 37,5 \text{ cm} \quad (1)$$

En cuanto al bus CAN, el estándar ISO 11898-2 define que las pistas diferenciales se deben rutar en una topología de bus con dos resistencias de terminación de 120 Ω para igualar la impedancia nominal del bus. Además, para comunicar a una tasa de transferencia de 1 Mbps se definen una longitud máxima de las pistas de 30 cm en las placas (International Organization for Standardization, 2024).

El último punto a considerar en el diseño de la nueva PCB ha sido la elección de nuevos conectores para las conexiones con los encoders absolutos y los buses de CAN. Previamente se empleaban conectores Würth Electronics serie 6902, los cuales han sido los componentes que más problemas de conexiones generaban a la hora de usar el robot y mayor tiempo requerían para ajustarlos. Estos se han sustituido por conectores Harwin de la serie Datamate con enganches. La PCB resultante de las dos articulaciones ensamblada se muestra en la Figura 11.



Figura 11: Nuevo diseño de la PCB de las dos articulaciones del cuello.

4. Conclusiones

La propuesta de mejora de la electrónica del robot humanoide TEO, presentada en este artículo, ofrece una solución integral a los problemas de desgaste y mantenimiento del robot. Al introducir una nueva arquitectura modular para la unidad de alimentación y rediseñar los componentes ubicados en el torso, se aborda de manera efectiva la accesibilidad y la eficiencia térmica de los sistemas electrónicos. Además, estos cambios también permiten mejorar notablemente la funcionalidad y adaptabilidad del robot, permitiendo experimentar con distintos sistemas y componentes sin la posibilidad de impactar negativamente en la electrónica de este.

Se ha propuesto también un nuevo diseño embebido para las articulaciones del robot con componentes actualizados, así como su electrónica de control en una placa combinada para las dos articulaciones del cuello.

Como trabajos futuros, resta la fabricación de los módulos de alimentación propuestos y la integración de la nueva cabeza y articulaciones del cuello en el robot para validar la alimentación de la electrónica y realizar pruebas de comunicaciones con la Jetson AGX Xavier.

Agradecimientos

La investigación que ha conducido a estos resultados ha recibido financiación del proyecto COMPANION-CM: Inteligencia artificial y modelos cognitivos para la interacción simétrica humano-robot en el ámbito de la robótica asistencial, con referencia Y2020/NMT-6660, financiado por Proyectos Sinérgicos de I+D la Comunidad de Madrid.

Referencias

- García-Haro, J., 2020. Object oriented control system in humanoid robots for transport tasks. Ph.D. thesis, University Carlos III of Madrid.
- International Organization for Standardization, 2024. ISO 11898-2:2024, Road vehicles — Controller area network (CAN) — Part 2: High-speed physical medium attachment (PMA) sublayer. Standard, <https://www.iso.org/standard/85120.html>, Último acceso: 20/05/2024.
- Martínez, S., García-Haro, J. M., Monje, C. A., Balaguer, C., 2019. Development of applications for humanoid robots using multiple platforms, tools, and cloud data sharing. *International Journal of Humanoid Robotics* 16 (06), 1950043. DOI: 10.1142/S0219843619500439
- Martínez, S., Monje, C. A., Jardón, A., Pierro, P., Balaguer, C., Muñoz, D., 2012. TEO: Full-size humanoid robot design powered by a fuel cell system. *Cybernetics and Systems* 43 (3), 163–180. DOI: 10.1080/01969722.2012.659977
- Microchip, 2014. MCP2561/2 High-Speed CAN Transceiver. <http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/20005167c.pdf>, Último acceso: 18/05/2024.
- Microchip, 2018. PIC18(L)F25/26K83 – 28-Pin, Low-Power, High-Performance Microcontrollers with CAN Technology. <https://www.microchip.com/en-us/product/pic18f26k83>, Último acceso: 19/05/2024.
- Microchip, 2023. Major Differences between MPLAB® X IDE and MPLAB IDE v8 – Microchip Developer Help. <https://microchipdeveloper.com/mplabx:migration-diffs>, Último acceso: 22/05/2024.
- Peterson, Z., 2024. Is There an SPI Trace Impedance Requirement? <https://resources.altium.com/p/there-spi-trace-impedance-requirement>, Último acceso: 20/05/2024.
- Rodríguez-Sanz, A., J., Martínez de la Casa, S., Łukawski, B., Menendez, E., Balaguer, C., 2024. Estereolitografía: una alternativa para la fabricación de las articulaciones de un robot. In: Simposio de Robótica, Bioingeniería y Visión por Computador. Universidad de Extremadura, pp. 58–63.