

## DISEÑO Y DESARROLLO DE UN ROBOT OMNIDIRECCIONAL PARA APLICACIONES COLABORATIVAS\*

**Edgar Granados Osegueda**

Departamento de Sistemas Digitales  
ITAM

Rio Hondo 1, Ciudad de México, 01080  
edgar.granados@itam.mx

**Marco Morales \***

Departamento de Sistemas Digitales  
ITAM

Rio Hondo 1, Ciudad de México, 01080  
marco.morales@itam.mx

**José Guadalupe Romero \***

Departamento de Sistemas Digitales  
ITAM

Rio Hondo 1, Ciudad de México, 01080  
jose.romerovelazquez@itam.mx

### RESUMEN

*En este artículo se presenta el diseño y construcción de un robot móvil omnidireccional para aplicaciones colaborativas. El modelo cinemático que describe el movimiento omnidireccional del robot es implementado con un algoritmo de control a bordo del robot en **TODO: MM: menciona el hardware del FPGA/micro** y con un programa externo al que se accede desde el Robot Operating System (ROS). Los experimentos realizados ilustran el buen comportamiento del sistema diseñado.*

### INTRODUCCIÓN

Actualmente, los robots móviles son utilizados en un amplio rango de actividades, como exploración (e.g., DEPTHX en exploración acuática, y MER de la Nasa en la exploración de Marte) y transporte. Existen diversos tipos de robots móviles incluyendo los humanoides (e.g, el Nao), los voladores y los que se mueven con ruedas. Estos últimos tienen una estructura mecánica y modelos relativamente sencillos [1]. Por esto, son una muy buena opción para realizar tareas sobre pisos planos y donde la reacción a los cambios de dirección sea crucial.

Un robot móvil omnidireccional es un tipo de robot a base de ruedas con 3 grados de libertad (holonómico). La característica omnidireccional la obtiene del uso de ruedas omnidireccionales con el respectivo modelo cinemático. Una ventaja de éste tipo

de robot es que puede alcanzar cualquier pose sin realizar maniobras auxiliares. Debido a esto, la principal aplicación de robots omnidireccionales es en ambientes dinámicos con poco espacio para maniobrar como fábricas, hospitales y almacenes.

Para contar con un sistema homogéneo de robots para investigación, se requiere de un diseño de robot versátil. Es necesario que sea fácilmente adaptado y usado en ambientes distintos por lo que un diseño modular es preferible. Diseñar un robot móvil omnidireccional amplía el tipo de investigación que se puede realizar, pudiendo adaptarse a aplicaciones donde se necesita de robots no holonómicos. Debido al desarrollo que se tiene en Robocup Small Size League, se toman las especificaciones físicas de ésta liga como marco de referencia para el diseño del robot.

En la solución presentada, se detalla la arquitectura del sistema. El cómputo externo al robot está implementando en ROS para aprovechar las modularidad que ofrece. Se detalla la estructura del robot, incluyendo los mecanismos para movimiento del robot así como el cómputo interno. En la sección de algoritmos se presenta el modelo cinemático desarrollado y el algoritmo de control utilizado.

Para validar el modelo cinemático desarrollado, se realizaron experimentos de seguimiento de trayectorias con distintas condiciones. También se presenta la respuesta obtenida con la implementación del algoritmo de control.

---

\*SE AGRADECE EL PATROCINIO A ESTA INVESTIGACIÓN DE LA ASOCIACIÓN MEXICANA DE CULTURA A.C.

## MARCO DE REFERENCIA

Un robot omnidireccional es aquel que puede moverse de un punto A a un punto B en línea recta mientras gira sobre su propio eje para llegar en una orientación dada [2]. Para obtener un movimiento omnidireccional con un robot de ruedas concéntricas, es necesario contar con por lo menos 3 ruedas omnidireccionales colocadas con distintos ángulos de separación [3]. Un número de ruedas adicional proporciona redundancia por lo que 4 ruedas es el diseño mas popular.

Existen diversos diseños de rueda omnidireccional. Se pueden clasificar en ortogonales y universales [4]. Las primeras fueron utilizadas brevemente en Robocup SSL por el equipo de la Universidad de Cornell [5] aunque dejaron de utilizarlas debido a que no daban la tracción necesaria para un control adecuado a altas velocidades sustituyéndolas por ruedas universales [6]. Son dos los diseños más populares de ruedas omnidireccionales universales. La rueda Mecanum, conformada por rodillos en un ángulo en la periferia de la rueda. El principal problema que presenta ésta rueda es el espacio necesario además de ser un diseño complejo conceptual y físicamente. El otro tipo de rueda cuenta con rodillos alineados al eje principal de la rueda. La ventaja de ésta rueda radica en su diseño compacto aunque el perfil de la rueda suele no ser perfecto debido a los rodillos.

La maniobrabilidad que ofrece un robot omnidireccional constituye su principal ventaja. Algunos robots que buscan aprovechar esto son: OmniBot de la NASA, el Airtrax ATX-3000 y la *OMNI-chair*. El primero desarrollado como un robot altamente maniobrable en ambientes peligrosos [7]. El segundo es un levantacargas omnidireccional enfocado a almacenes [8]. El último, consistió en un proyecto para desarrollar una silla de ruedas omnidireccional y darle mayor capacidad de movimiento a su usuario [9]. Lograr un movimiento correcto en un robot omnidireccional presenta diversos retos. Al utilizar por lo menos tres motores resulta esencial implementar un algoritmo de control eficiente. La mayoría de los equipos utilizan un control de velocidad sin embargo, en 2011 SKUBA presentó un control basado en el torque del motor [10].

## ARQUITECTURA DEL SISTEMA

La arquitectura propuesta se muestra en la Fig. 1. Se utiliza la visión proporcionada por SSL, la cual reporta la pose de cada robot. Para los distintos componentes que se implementan se utiliza ROS. La utilización de ROS permite tener un sistema modular, facilitando la interacción y reemplazo de los diversos componentes. Aunque la arquitectura presentada está pensada en Robocup SSL, es posible reemplazar componentes para enfocar el sistema a otro problema.

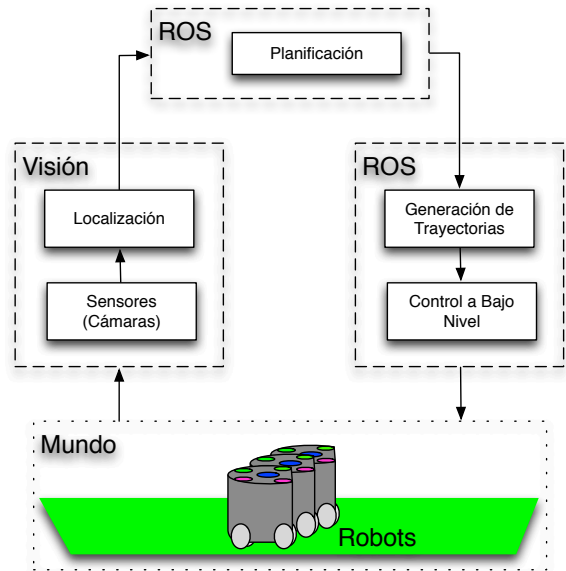


FIGURE 1. Diagrama del Sistema de ROS implementado

### Cómputo Externo

**Visión** Este es un componente proporcionado por SSL. El componente utiliza las imágenes obtenidas de dos cámaras colocadas en la parte superior de la cancha, las procesa y obtiene la posición y orientación de cada robot así como la posición de la pelota. El componente no está implementado en ROS pero sus salidas son adaptadas a ROS para poder utilizarlo.

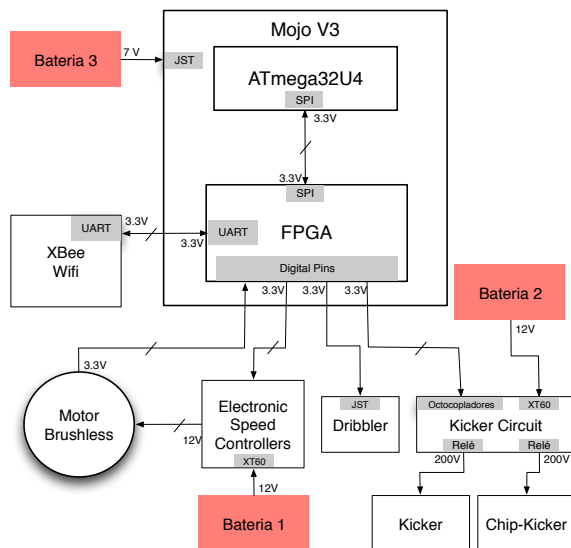
**Planificación** Este componente es el encargado de realizar la planeación de tareas para todos los robots del equipo que se encuentren en el juego. Obtiene las posiciones de todos los elementos del juego de la visión así como las posiciones esperadas en un futuro de cada nodo de trayectorias.

**Trayectorias** Cada robot cuenta con su nodo de trayectorias. Éste nodo recibe la posición actual, la deseada y el tiempo deseado del nodo de estrategias y se encarga de generar la trayectoria necesaria. De no ser posible generar la trayectoria deseada en el tiempo deseado, se reporta al nodo de Estrategias.

**Control a Bajo Nivel** Este nodo recibe la velocidad del robot deseada en cada ciclo y la envía al robot.

### Estructura del Robot

Un robot de SSL debe caber dentro de un cilindro de 18 cm de altura por 15 cm de diámetro, siendo el diseño más eficiente un robot cilíndrico con ruedas concéntricas. Realizando



**FIGURE 2.** Componentes de Electrónica

un análisis de los robots de la liga, se determinó que la velocidad máxima deseada del robot se estableciera en 3.5 m/s. Igualmente, la carga que el robot debe soportar se estableció en 2.5 Kg. Debido a la velocidad del juego, es común que ocurran colisiones entre ellos por lo que el exterior del robot debe ser de un material resistente además contar con piezas fácilmente reemplazables. Para ser reconocido por la visión de la liga, es necesario cumplir con el *patrón estándar*.

Para poder realizar numerosas pruebas de las distintas partes que conforman al robot, se optó por utilizar el modelado por deposición fundida (impresión 3D). Adicionalmente, este método permite realizar diseños más complejos además de probarlos y validarlos rápidamente. Se utilizaron dos tipos de plástico: ABS y HIPS. Se realizó un diseño modular para facilitar futuras mejoras, así como volverlo fácilmente adaptable a otros escenarios.

La electrónica del robot se compone de una tarjeta de desarrollo MOJO la cual tiene una FPGA Spartan 6 XC6SLX9 y un microcontrolador ATmega32U4. Para la comunicación, se utiliza una tarjeta XBee WiFi. Para el control de los motores, se utiliza un ESC (Electronic Speed Controller) por motor. La interacción de los componentes se muestra en 2.

**Carcasa y Base** La base es la pieza en la cual se ensamblan el resto, mientras que la carcasa protege al robot de posibles impactos durante su utilización. Estas piezas constituyen las piezas de mayores dimensiones en el diseño por lo que son manufacturadas usando plástico HIPS al ofrecer mejores resultados en piezas de grandes dimensiones. La carcasa está formada por 4 piezas únicas. Como parte de la carcasa se incluye el patrón necesario para que la visión de la liga proporcione la posición

del robot.

**Energía** Los componentes que requieren de electricidad para funcionar son tres: mecanismos para el movimiento, para la pelota y el cómputo. Cada uno utiliza su propia batería LiPo para tenerlos aislados eléctricamente entre sí, para la comunicación entre ellos se utilizan optocopladores. Los mecanismos para el movimiento, motores y ESC son alimentados por una batería de 12 V. Los mecanismos para la pelota, Kickers y dribbler, son alimentados por una batería de 12 V. El componente de cómputo es alimentado por una batería de 7 V.

## Mecanismos para Movimiento del Robot

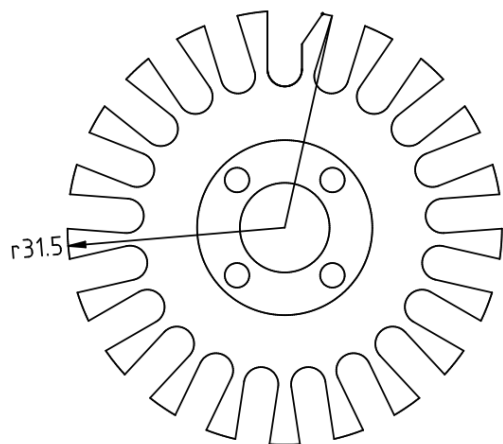
**Rueda** La mayoría de los diseños de ruedas omnidireccionales comerciales están enfocados en aumentar la eficiencia de la rueda buscando que el perfil de la rueda sea perfectamente circular ([2]), sacrificando el espacio utilizado por la rueda. Debido a las restricciones en las dimensiones del robot, se realizó un diseño propio. La rueda omnidireccional más común dentro de la liga consiste en una rueda con rodillos perpendiculares al eje principal.

Los factores más importantes en el diseño de la rueda es la facilidad de ser ensamblada y la resistencia del material utilizado. El diseño final utilizado utiliza cuatro piezas únicas, de las cuales 2 son de diseño propio: una pieza de plástico ABS (3) y 21 rodillos de aluminio; y dos piezas comerciales: 1 cable de acero y 21 orings.

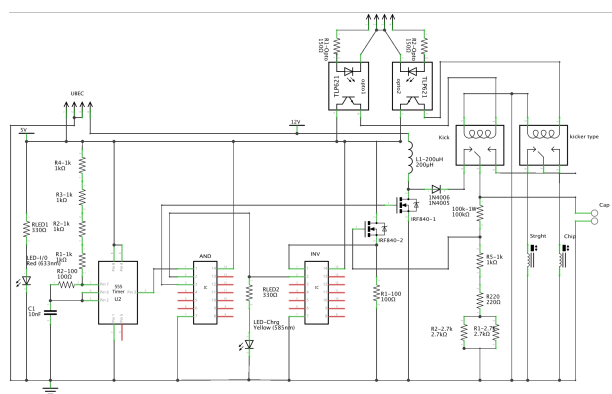
Como solamente una pieza conforma el esqueleto de la rueda, se simplifica el ensamblado además de hacer ser más resistente comparado con otras versiones que utilizan varias piezas como esqueleto. Adicionalmente, el radio de la rueda así como el número de rodillos utilizados favorece un funcionamiento eficiente de la rueda comparado con versiones de menor tamaño o menor número de rodillos.

**Reductor** El motor utilizado es Maxon 200142. Este motor tiene una velocidad sin carga de 4370 RPM (nominal de 2940 RPM). Dados los requerimientos de velocidad y peso establecidos, es necesario utilizar un reductor de velocidad de 2.5. Se utiliza un reductor conformado por engranes cilíndricos rectos de metal. Se utilizan engranes comerciales debido a la necesidad de contar con alta eficiencia en la transmisión de la energía además de tener que ser resistentes en altas velocidades.

**Electronic Speed Controller (ESC)** Se utiliza un ESC por motor que sirve de interfaz entre la FPGA que envía una señal PWM y el motor. Este componente permite aislar eléctricamente la FPGA (que utiliza voltaje TTL) de los motores (que utilizan 12V). Se utiliza un modelo de ESC dedicado a drones multihélice debido a la rapidez de respuesta que estos



**FIGURE 3.** Diagrama de la Rueda Omnidireccional Utilizada



**FIGURE 4.** Circuito para el Kicker

ofrecen y que resulta necesaria para el correcto funcionamiento de cada motor.

### Mecanismos para la Pelota

En esta sección se presentan los mecanismos diseñados para tener control de la pelota (*dribbler*) así como el mecanismo de pateo (*Kicker*).

**Kickers** Se utiliza un seleonoide el cual es alimentado con 200 V cuando se da la señal para patear. En la Fig. 4 se muestra el circuito utilizado para llevar la entrada de 12 V a una salida de 200 V. Dentro del circuito, se utiliza un *Universal Battery Elimination Circuit (UBEC)* para alimentar con 5 V los circuitos integrados a partir de los 12 V de la batería.

**Dribbler** El mecanismo del dribbler consiste en un motor DC que funciona entre 3 y 5 V así como un sistema de engranes de

plástico para la transmisión de energía y una espuma en el punto de contacto con la pelota. Para el control del dribbler se utiliza un Puente H en modo unidireccional.

### Cómputo Externo

En esta sección se detallan los componentes de cómputo utilizados. Estos componentes mandan las señales necesarias a cada actuador además de recibir las señales de los sensores utilizados. Realizan los cálculos necesarios para el movimiento así como la comunicación con el resto del sistema.

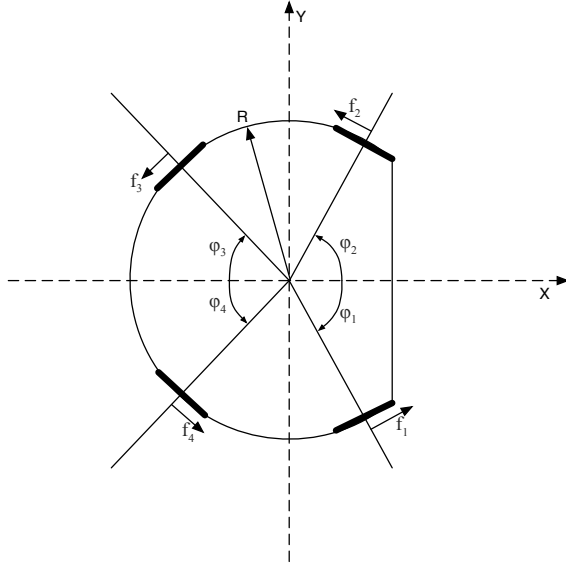
**FPGA** Debido a que es necesario controlar los 4 motores así como otros componentes, es necesario contrar con la capacidad de atender múltiples entradas y salidas al mismo tiempo. Una FPGA ofrece esta capacidad además de tener mayor resolución respecto a un microcontrolador. En el sistema implementado, la FPGA tiene seis funciones:

1. Recibir los datos del XBee.
2. Calcular la velocidad de cada motor mediante la señal de cada sensor hall.
3. Mandar la velocidad deseada a cada ESC mediante PWM.
4. Activar el dribbler.
5. Activar el kicker.
6. Recibir y procesar la señal de sensores adicionales.

La FPGA se comunica con el Microcontrolador mediante SPI y Memory Mapping. Envía las velocidades deseadas  $X, Y, \omega$  así como las velocidades reales de cada motor y recibe las velocidades deseadas para cada motor.

**Microcontrolador** En cada ciclo del microcontrolador, se reciben las velocidades deseadas  $X, Y, \omega$  así como las reales de cada motor y se determina una nueva velocidad deseada de motor mediante el modelo omnidireccional así como aplicando un algoritmo de control PI. Las velocidades por motor calculadas son transferidas a la FPGA. Los algoritmos para el movimiento omnidireccional así como el algoritmo de control son implementados en el Microcontrolador.

**Comunicación** Para el control del robot es necesario contar con comunicación inalámbrica (únicamente esta prohibido usar bluetooth). Se optó por utilizar Wifi debido a la gran adopción que tiene esta tecnología permitiendo utilizar prácticamente cualquier equipo de cómputo para el control del robot. En específico, se utiliza XBee Wifi por su tamaño y utilizar voltaje TTL siendo compatible con la FPGA. Se utiliza direccionamiento estático para tener control de las IPs de cada robot, además de facilitar la conexión inicial con el access point. Para favorecer un diseño modular, el resto de los componentes son agnósticos a la tecnología utilizada para la comunicación.



**FIGURE 5.** Distribución de Ángulos y Fuerzas

## ALGORITMOS

### Movimiento Omnidireccional

A partir de un movimiento deseado, expresado en el vector de velocidades deseadas del robot  $V_l = (v_x \ v_y \ \omega)^T$ , es necesario descomponerlo en velocidades de motores deseadas  $V_m = (m_1 \ m_2 \ m_3 \ m_4)^T$ .

A partir de la ecuación general de fuerza Eqn. (1) se puede derivar la Eqn. (2) específica para el caso de cuatro motores. Debido a las ruedas omnidireccionales, cada motor aporta en los componentes de X y Y. Utilizando el diagrama de la Fig. 5, es posible derivar la Eqn. (3) para el motor 1 en X y Eqn. (4) para el motor 1 en Y. Similarmente, se pueden obtener las ecuaciones para los otros motores.

$$F = Ma \quad (1)$$

$$a = \frac{1}{M} (F_1 + F_2 + F_3 + F_4) \quad (2)$$

$$Ma_{1x} = |f_1| \cos(90 - \varphi_1) = |f_1| \sin(\varphi_1) \quad (3)$$

$$Ma_{1y} = |f_1| \cos(\varphi_1) \quad (4)$$

Para obtener la aceleración angular que aporta cada motor al robot, de la Eqn. (5) donde R es el radio de acuerdo a la Fig. 3 se puede derivar la Eqn. (6) específica para el uso de 4 motores. Sustituyendo el momento de inercia Eqn. (7) para el caso de un cilindro con distribución de masa desconocida en (6) se obtiene la Eqn. (8).

$$\dot{\omega} = \frac{Rf}{I} \quad (5)$$

$$\dot{\omega} = \frac{R}{I} (f_1 + f_2 + f_3 + f_4) \quad (6)$$

$$I = \alpha MR^2; \quad 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (7)$$

$$R\dot{\omega} = \frac{1}{M\alpha} (f_1 + f_2 + f_3 + f_4) \quad (8)$$

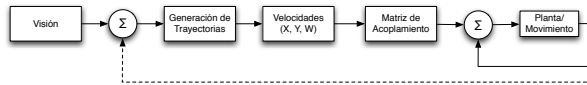
A partir de los resultados obtenidos de las aceleraciones traslacionales y angulares, se puede derivar la Eqn. (9). También se puede expresar como en la Eqn. (10), donde  $C_\alpha$  se conoce como la Matriz de Acoplamiento de Fuerzas.

$$\begin{pmatrix} a_x \\ a_y \\ R\dot{\omega} \end{pmatrix} = \frac{1}{M} \begin{bmatrix} \sin \varphi_1 & -\sin \varphi_2 & -\sin \varphi_3 & \sin \varphi_4 \\ \cos \varphi_1 & \cos \varphi_2 & -\cos \varphi_3 & -\cos \varphi_4 \\ \frac{1}{\alpha} & \frac{1}{\alpha} & \frac{1}{\alpha} & \frac{1}{\alpha} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \end{pmatrix} \quad (9)$$

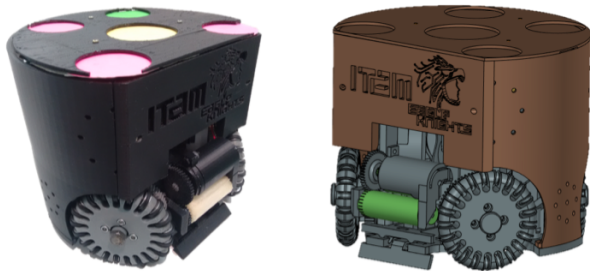
$$a = C_\alpha F \quad (10)$$

Para poder realizar la transformación de la velocidad deseada en el espacio a velocidades de cada motor, es necesario considerar tanto el perímetro de la rueda como el factor de reducción mediante la Eqn. (11). A partir de esta, se pueden obtener las ecuaciones de cada motor definiendo el vector  $v_m = (v_1 \ v_2 \ v_3 \ v_4)^T$  mediante la Eqn. (12) y su forma reducida, la Eqn. (13) donde a  $D$  se le conoce como la Matriz de Acoplamiento de Velocidades.

$$V_l' = \frac{V_l \cdot e}{2\pi r} \quad (11)$$



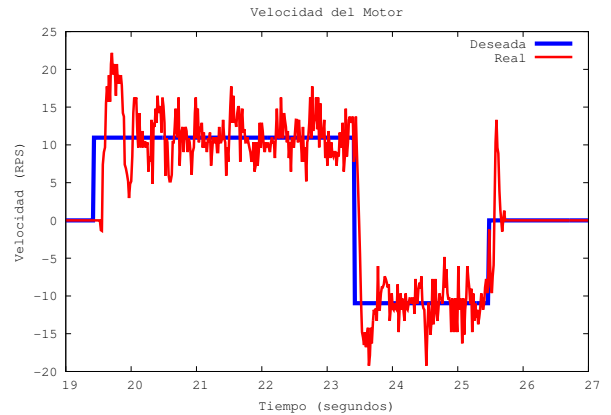
**FIGURE 6.** Esquema de Control Implementado



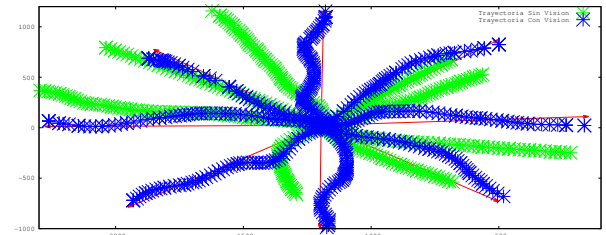
**FIGURE 7.** Robot Real vs Modelo 3D del Robot

$$v_m = \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \phi_1 & \cos \phi_1 & 1 \\ -\sin \phi_2 & \cos \phi_2 & 1 \\ -\sin \phi_3 & -\cos \phi_3 & 1 \\ \sin \phi_4 & -\cos \phi_4 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} v'_x \\ v'_y \\ R\omega' \end{pmatrix} \quad (12)$$

$$v_m = DV'_l \quad (13)$$



**FIGURE 8.** Velocidad real vs Velocidad deseada



**FIGURE 9.** Trayectorias con retroalimentación

## Control

Para el control a bajo nivel, utilizando la retroalimentación que otorga cada motor, se implementó un control PI a nivel motor. El esquema general del algoritmo de control utilizado se muestra en la Fig. 6. La sintonización de las variables se realiza a mano siguiendo el método de Ziegler - Nicholson.

Adicional al control PI por motor, se cuenta con la retroalimentación de la visión gracias a la cual se puede calcular y corregir la trayectoria del robot al enviar continuamente actualizaciones de la velocidad deseada (30 Hz).

## EXPERIMENTACIÓN Y RESULTADOS

En la Fig. 8 se puede ver la respuesta de un motor ante una velocidad deseada con el algoritmo de control PI implementado. Aunque las oscilaciones no se eliminan, se reducen rápidamente, siendo la respuesta rápida uno de los factores más importantes debido al dinamismo del sistema. Igualmente, el motor es capaz de cambiar de velocidad, incluso a velocidades negativas (dirección contraria) rápidamente.

Estableciendo 8 direcciones en el plano XY, se probó la respuesta del robot ante cada dirección con control PI sin visión y con visión. En la Fig. 9 se pueden ver los resultados de

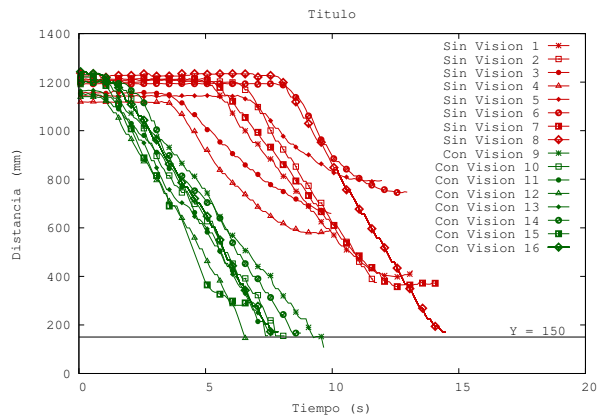
estas pruebas. Para el caso del robot sin retroalimentación de visión, existen algunas direcciones en las cuales el movimiento y su posición final es cercano al deseado, específicamente en las direcciones en que prácticamente no se utilizan dos ruedas. En cambio en las otras direcciones, se tiene mayor error en el movimiento del robot. Para el caso del movimiento con retroalimentación de visión, aunque en algunos casos existe un movimiento errático, la posición final es muy cercana a la deseada gracias a la corrección que realiza el sistema ante los errores en el movimiento del robot.

Utilizando los datos del experimento mencionado anteriormente, se puede obtener el error que tiene el robot en el tiempo. Definiendo el error como la diferencia entre la posición deseada y la actual, en la Fig. 10 se puede observar la mejora que representa la retroalimentación de visión. Debido a las dimensiones del robot, se estableció un margen de 150 mm por lo que se detiene al alcanzar esa posición reportada por visión.

## CONCLUSIÓN

Con el diseño propuesto se logra que el robot se mueva aproximadamente a la velocidad propuesta, manteniendo la integridad de sus componentes y con un peso menor que el contemplado inicialmente, aunque siendo capaz de cargar los 2.5 Kg





**FIGURE 10.** Robot Real vs Modelo 3D del Robot

propuestos. Tanto la carcasa como la base y las ruedas han sido capaces de resistir golpes entre los robots a las velocidades normales de movimiento y la visión reconoce el patrón estándar incorporado en la carcasa. En la Fig. 7 se muestra una comparación entre el diseño modelado en 3D y la construcción final del robot.

La utilización de ROS para el sistema así como el funcionamiento de la arquitectura propuesta ha sido satisfactorio. La modularidad entre sus componentes permite intercambiarlos si se requiere una función distinta sin afectar el comportamiento del resto del sistema.

Como trabajo futuro se propone un método de sintonización automático para el sistema de control. Adicionalmente, es necesario implementar un algoritmo de evasión de obstáculos así como un módulo asignación de tareas.

## REFERENCES

- [1] Corke, P., 2011. *Robotics, Vision and Control: Fundamental Algorithms in MATLAB*. Springer Tracts in Advanced Robotics. Springer Berlin Heidelberg.
- [2] Rojas, R., 2005. "A short history of omnidirectional wheels". See also URL <http://robocup.mi.fu-berlin.de/buch/shortomni.pdf>.
- [3] Rojas, R., and Förster, A. G., 2006. "Holonomic control of a robot with an omnidirectional drive". *KI-Künstliche Intelligenz*, **20**(2), pp. 12–17.
- [4] Ashmore, M., and Barnes, N., 2002. "Omni-drive robot motion on curved paths: The fastest path between two points is not a straight-line". In *Australian Joint Conference on Artificial Intelligence*, Springer, pp. 225–236.
- [5] D'Andrea, R., Kalmar-Nagy, T., Ganguly, P., and Babish, M., 2000. "The cornell robocup team". In *Robot Soccer World Cup*, Springer, pp. 41–51.
- [6] Purwin, O., and D'Andrea, R., 2003. "Cornell big red 2003". *Robocup*.
- [7] Houshangi, N., and Lippitt, T., 1999. "Omnibot mobile base for hazardous environment". In *Electrical and Computer Engineering, 1999 IEEE Canadian Conference on*, Vol. 3, IEEE, pp. 1357–1361.
- [8] Adăscăliței, F., and Doroftei, I., 2011. "Practical applications for mobile robots based on mecanum wheels-a systematic survey". *Gh. Asachi Technical University of Iasi, Mechanical Engineering Faculty, Theory of Mechanisms and Robotics Department, B-dul D. Mangeron*, pp. 61–63.
- [9] Borgolte, U., Hoyer, H., Bühler, C., Heck, H., and Hoelper, R., 1998. "Architectural concepts of a semi-autonomous wheelchair". *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, **22**(3-4), pp. 233–253.
- [10] Chaiso, K., and Sukvichai, K. Skuba 2011 extended team description.