

DESARROLLO DE SISTEMA DE POSICIONAMIENTO EN ROBOT MECANUM PARA RETO WORLDSKILLS 2015

Development Of Positioning System In Robot Mecanum For Challenge Worldskills 2015

Albeiro Valencia¹
Jhonatan Sánchez²
David Henao³
Camilo García⁴

Resumen

Este informe muestra el desarrollo técnico y proceso de análisis para la construcción de una plataforma base de robótica móvil apuntando a un evento competitivo en dicha área del conocimiento; orientado específicamente a la inclusión de robots móviles en entornos industriales para ser usados en el transporte de materiales. Se presenta el análisis del marco dirección en un robot omnidireccional con ruedas mecanum, el esquema de cinemática inversa para obtener la posición por estimación del movimiento de las ruedas y la arquitectura de la implementación del sistema de control.

Palabras clave: Robot móvil, Control PID, Rueda mecanum, WordSkills.

Abstract

This report shown technical development and analysis process to building a platform base mobile robotics pointing to a competitive event in this area of knowledge, and specifically aimed at the inclusion of mobile robotics in the industry environments to use in the materials transport. Presents the analysis steering frame in a omnidirectional robot with mecanum wheels, inverse kinematic scheme to obtain the position by dead reckoning and movements of the wheels, and architecture implementation of control system.

Keywords: Mobile Robot, PID Control, Mecanum wheel, WorldSkills.

¹ Maestría. Servicio Nacional de Aprendizaje – SENA. Centro de Tecnología de la Manufactura Avanzada Complejo Norte Dg 104 #69 - 120, Medellín, Colombia. Correo electrónico: javalencia@sena.edu.co,

² Tecnólogo. Servicio Nacional de Aprendizaje – SENA. Centro de Tecnología de la Manufactura Avanzada Complejo Norte Dg 104 #69 - 120, Medellín, Colombia. Correo electrónico: jhonatansanchez@misena.edu.co

³ Tecnólogo. Servicio Nacional de Aprendizaje – SENA. Centro de Tecnología de la Manufactura Avanzada Complejo Norte Dg 104 #69 - 120, Medellín, Colombia. Correo electrónico: dhenao51@misena.edu.co

⁴ Tecnólogo. Servicio Nacional de Aprendizaje – SENA. Centro de Tecnología de la Manufactura Avanzada Complejo Norte Dg 104 #69 - 120, Medellín, Colombia. Correo electrónico: jcgarcia006@misena.edu.co

INTRODUCCION

La formación en ciencia y tecnología es una preocupación a nivel mundial, habiendo incorporado en los planes de estudio de la educación básica, temáticas como: operadores mecánicos y eléctricos, adquisición de señales y programación de computadores, todas ellas enmarcadas en la solución de problemas en contexto (Barrera-Mesa et al., 2017; Ruiz-Macías & Duarte, 2018; López-Gaitán et al., 2018; Gutiérrez-Rodríguez, 2018). En este sentido, surge la robótica educativa como alternativa para propiciar en los estudiantes el desarrollo de habilidades tecnológicas. A nivel internacional existen diversas competencias que apuntan al desarrollo cognitivo de los participantes y a la generación de innovación tecnológica (Mesa-Mesa & Barrera-Lombana, 2013). Entre las diversas competencias podemos mencionar el For Inspiration and Recognition of Science and Technology, FIRST (2016), Robocup (2016), y WorldSkills (2016).

FIRST tiene como misión inspirar a la gente joven a ser líderes en ciencia y tecnología, enganchándolos en programas excitantes para construir ciencia, ingeniería y habilidades tecnológicas, que inciten a la innovación y en ese camino se fortalezcan las habilidades transversales.

En 2011 y 2016, Brandeis University Center realizaron una evaluación formal de los programas FRC (FIRST Robotics Competition) y FTC (FIRST Tech Challenge) (Melchior et al., 2016; Center for Youth and Communities Heller School for Social Policy and Management, 2011), con maestros y equipos de competidores. Ellos mostraron y argumentaron un aumento en su interés en el aprendizaje de la ciencia y la tecnología después de haber pertenecido a un equipo FIRST. Más del 91%, se mostraron más interesados en ingresar a la educación, y de realizar una carrera en ciencia y tecnología, y además mostraron un desempeño superior en habilidades transversales.

El proyecto Robocup, tiene como objetivo el de avanzar en el estado del arte en robots inteligentes. La visión original del proyecto ha sido la de construir un equipo de robots que tengan la capacidad de ganarle a un equipo de humanos en un juego de fútbol en el año 2050 (Robocup, 2016). Sin embargo, la organización establece que ese objetivo es la disculpa. El interés que subyace es la promoción por la investigación en ciencia e ingeniería y el desarrollo de la inteligencia artificial (Kitano, 1997). Tal es así, que actualmente los encuentros de la RoboCup no se centran únicamente en el tema de la RoboCup Soccer (equipos de robots autónomos jugando fútbol) sino que también ha incluido la RoboCup@Home (competencias de robots utilitarios domésticos), RoboCup Rescue (robots en competencias de búsqueda y rescate) y RoboCupJunior, esta última constituyéndose en una metodología para conducir a los jóvenes hacia el logro de las disciplinas fundamentales para el desarrollo STEM (ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas), al igual que también fortalece el desarrollo de las habilidades blandas (Kitano, 1997). Evidencias de su impacto en los participantes han sido reportadas ampliamente en la literatura (Lakemeyer et al., 2006; Ferrein et al., 2011; Sklar et al., 2004).

Worldskills es una organización que promueve el desarrollo de habilidades profesionales hacia la excelencia. Entre otras actividades laborales, como la investigación y la cooperación

internacional, diseña y ejecuta eventos de competición en los que profesionales de diferentes países y regiones, y las diferentes habilidades de trabajo se miden una por una con estándares internacionales en calidad y rendimiento en su trabajo (WorldSkills, 2016). Una de estas habilidades está relacionada con la introducción de sistemas móviles autónomos en tareas dentro de los sistemas de producción: robótica móvil. La competencia en ésta habilidad, es decir, el proyecto prueba de competencia, está contextualizado en tareas que un robot móvil puede realizar en diferentes entornos, generalmente enfocadas a su uso en el ámbito industrial. La robótica en tales contextos está orientada al transporte de objetos de un punto a otro en un entorno conocido. En estas competiciones se propone un proyecto de prueba con aproximadamente 8 meses de anterioridad, que plantea una situación real de aplicabilidad para un UGV (vehículo terrestre no tripulado), y un entorno específico o corte de presentación que imita la situación real. El proyecto establece la necesidad de diseñar, construir y programar el robot para resolver la tarea solicitada.

En este artículo, se presenta la solución de un equipo de jóvenes aprendices del Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA) en la competencia internacional de habilidades técnicas WorldSkills Sao Paulo 2015 (WorldSkills, 2016), específicamente en la habilidad robótica Móvil.

A continuación se expondrá el reto de la competencia, posteriormente los materiales utilizados, el control de posicionamiento y maniobra del robot, continuando con un análisis del robot desarrollado y las conclusiones sobre el trabajo.

RETO PLANTEADO

El reto para la contienda del año 2015 consistió en el diseño, construcción e implementación de las capacidades de un robot en atender un sistema de despacho de pedidos en un almacén. La corte contenía estanterías con dos referencias de productos disponibles en forma individual o en paquetes de cuatro unidades, un mostrador para colocar los pedidos de 3 clientes diferentes, con zonas delimitadas para cada cliente. La tarea específica del robot es compilar cada pedido en un pallet disponible de una pila de pallets y entregar el pedido correctamente al cliente correcto en el mostrador (WorldSkills, 2015).

La necesidad puede resolverse usando una plataforma móvil y un sistema de manipulación ajustado para agarrar las diferentes presentaciones de los productos y los pallets (Avila et al., 2012; Cárdenas & Prieto-Ortiz, 2015). Es ampliamente difundido el uso de plataformas móviles omnidireccionales en los entornos industriales, debido a la versatilidad de movimiento, a la capacidad de giro en espacios ajustados, y aunque su velocidad no es relativamente alta, es suficiente para las aplicaciones enfocadas en transporte de materiales en tales entornos (Niño-Vega et al., 2016; Herrera-Baquero & Prieto-Ortiz, 2018). De ahí y aunado a los recursos materiales disponibles se determina el diseño, construcción e implementación de una plataforma móvil omnidireccional.

MATERIALES

Entre los reglamentos de competencia se encuentran restricciones en el equipamiento disponible para que los competidores confeccionen la solución. Entre ellas las más relevantes son los actuadores para desplazamiento, el sistema de control y algunos elementos sensores. Los sistemas para desplazamiento están constituidos por 4 ruedas tipo Mecanum (US 3876255, 1975). El diseño de estas ruedas está basado en rodillos dispuestos comúnmente en un ángulo de 45° con respecto al eje motor, en la circunferencia de la rueda, en la figura 1 se muestra tal disposición.

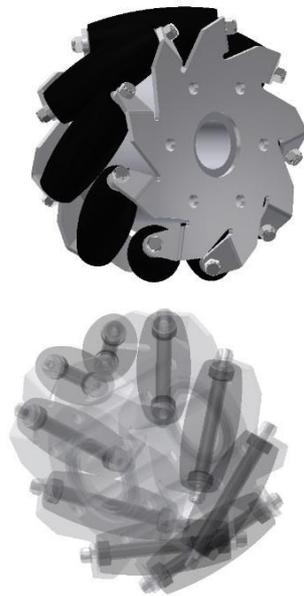


Fig. 1. Modelo Rueda tipo Mecanum

El uso de estas ruedas permite el desplazamiento omnidireccional de la plataforma en que se usa, ventaja indiscutible para la solución en el reto propuesto. Además de características de rodadura suave por garantía de un área de permanente contacto con el suelo. El esquema directo de uso de estas ruedas está en la disposición de la figura 2, disposición ampliamente testada en varios reportes (Tlale & Villiers, 2008; Lin & Shih, 2013; Tlale & Villiers, 2011).

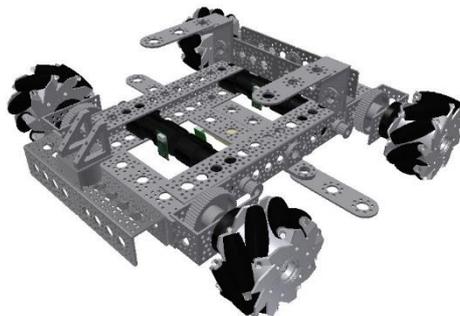


Fig. 2. Plataforma estándar con ruedas mecanum

Cada sistema de accionamiento posee un mecanismo para reportar su movimiento usando sensores tipo encoder incrementales de 12 PPR, y una relación de transmisión 64:1.

Como medios de reconocimiento del entorno se han dispuesto 2 sensores de distancia por ultrasonido (referencia HC-SR04) y 4 por luz infrarroja (referencia GP2Y0A21YK0F), una cámara web HD (referencia Microsoft LifeCam Studio HD), e interruptores de colisión, además de un sistema de medición inercial para medida de la velocidad angular (medido con el acelerómetro interno del sistema NimyRIO 1900). El sistema de manipulación está basado en un elevador vertical y un sistema de sujeción con apertura regulada por servomotores.

El sistema de control dispuesto, es un hardware para control embebido conformado por una FPGA (Field programmable Gate Array), un procesador corriendo Linux RT, y circuitería acondicionada para entradas/salidas digitales y análogas (Altamirano-Santillán et al., 2017; Santos-Jaimes & Flórez-Fuentes, 2013).

METODO

La plataforma convencional para uso de las ruedas suecas, Illon o mecanúm (Gracia, 2008), es un cuadrado o rectángulo con el eje perpendicular a un par de caras y paralelos entre sí (ver figura 2). Con esta disposición, el marco de dirección tomado por robot depende del vector de fuerza total aplicado como la suma de cada vector aplicado por cada rueda, resultado de la acción motriz. El vector de fuerza aplicado por una rueda es el resultado de la dinámica del punto de contacto del rodillo con la superficie. La figura 3, esquematiza como el área de contacto se desplaza de un lado del rodillo al otro, cuando la rueda se mueve debido a fuerza impulsora del motor unido a su eje. La tracción es obtenida a lo largo de un ángulo de 45° determinando el movimiento del área de contacto (Gfrerrer, 2008). El vector fuerza desarrollado en el rodillo debido a la acción impulsora es entonces perpendicular al eje de la rueda (Tlale & Villiers, 2008) figura 4.

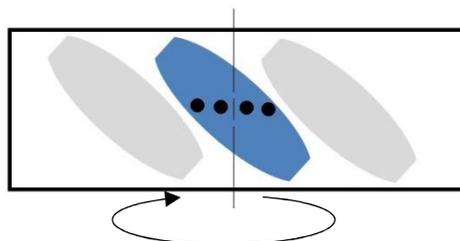


Fig. 3. Punto de contacto en la rueda tipo mecanum

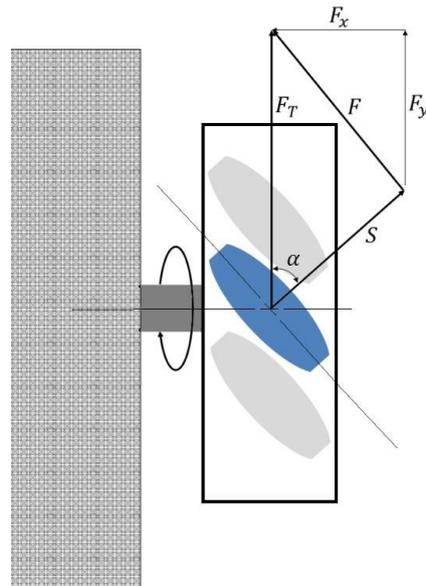


Fig. 4. Fuerzas ejercidas en el rodillo

La fuerza producida F_T es calculada como la relación entre el torque efectivo del motor T y el radio R de la envolvente de la superficie más externa de los rodillos (ver figura 5).

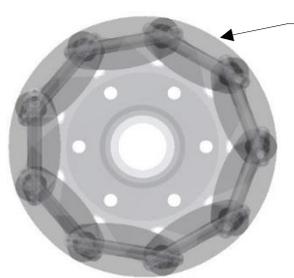


Fig. 5. Envolvente de la rueda mecanum

Debido a la disposición de los rodillos y a su característica intencional, parte de la fuerza desarrollada es efectiva para el arrastre F y parte se pierde en rodadura libre del rodillo S. Con la orientación de los rodillos $\alpha = 45^\circ$ la fuerza efectiva se calcula como $F = \text{sen}(45^\circ) * F_t = 0.707 F_t$. La suma de las componentes F de todas las ruedas es la fuerza resultante impulsora del robot y por consiguiente de su dirección y velocidad:

Donde i es la i-ésima rueda

$$F_R = \sum_{i=1}^4 F_i$$

Por ejemplo, si las ruedas 1 y 4 en la disposición del robot de la Figura 6, son impulsadas por sus respectivos motores a velocidades y respectivamente, y las ruedas 3 y 2 en forma inversa a 1 y a 4, los vectores resultantes en condiciones ideales son iguales y orientados a 45° y 135° , respectivamente, como se ve en la Figura 6. El vector de fuerza resultante es

paralelo al eje -X del marco de referencia del robot, como resultado el robot se desplazará en éste sentido y orientación. Los vectores F_y y F_x son las fuerzas impulsoras en el marco de referencia del robot.

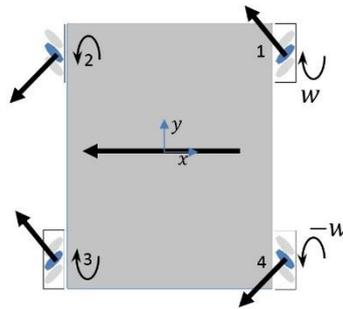


Fig. 6. Principio del marco de dirección

Bajo diferentes combinaciones en los sentidos de accionamiento de cada motor y con la misma velocidad, en la Figura 7 son presentados los vectores de dirección posibles para gobernar el robot, diferencias en las velocidades de los motores resultan en vectores de movimiento con orientaciones intermedias, y trayectorias especiales, salvo que ciertas configuraciones pueden resultar en singularidades rueda (Tlale & Villiers, 2008; Torres et al., 2013).

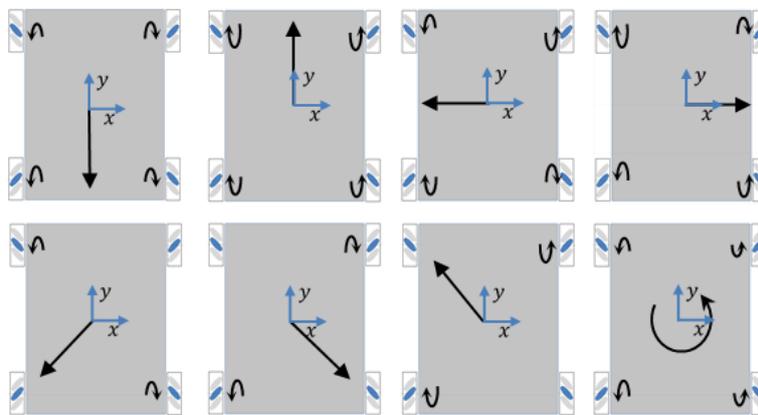


Fig. 7. Vectores de dirección

A partir del desarrollo de la fuerza resultante se desprenden las relaciones cinemáticas entre el movimiento del robot y el movimiento de las ruedas (Gracia, 2008) (Gfrerrer, 2008):

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ w_z \end{bmatrix} = \frac{R}{4} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & 1 \\ -\frac{1}{l_1 + l_2} & \frac{1}{l_1 + l_2} & -\frac{1}{l_1 + l_2} & \frac{1}{l_1 + l_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \\ w_4 \end{bmatrix}$$

Ecuación 1

La Ecuación 1 permite calcular las velocidades en el marco de referencia del robot a partir de las velocidades medidas de cada rueda, lo que se conoce como Dead Reckoning. La velocidad de cada rueda (W) es calculada a partir de la lectura de los pulsos del encoder, velocidades que, operadas por las operaciones indicadas en la matriz, junto con las distancias de los centros de las ruedas l_1 y l_2 y su radio R , resultan en la determinación de la velocidad de desplazamiento en (v_x), la velocidad de desplazamiento en (v_y) y la velocidad angular del robot (ω_z). Por otro lado, para establecer el algoritmo de conducción o de maniobra del robot, la inversa de la Ecuación 1 permite obtener las velocidades de cada rueda W_i según las velocidades necesitadas en el marco de referencia del robot:

$$\begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \\ w_4 \end{bmatrix} = \frac{1}{R} \begin{bmatrix} 1 & 1 & -l_1 - l_2 \\ 1 & -1 & l_1 + l_2 \\ 1 & -1 & -l_1 - l_2 \\ 1 & 1 & l_1 + l_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega_z \end{bmatrix}$$

Ecuación 2

El reto WorldSkills, y en general la aplicación de AGV's (Vehículos de guiado automático) para la solución de transporte de material en un entorno conocido, puede ser afrontado navegando por el entorno con trayectorias definidas por tramos entre puntos definidos en el espacio de coordenadas global. A partir de una posición de referencia definida $P_R(X_R, Y_R, \theta_R)$ y una posición actual calculada $P_A(X_A, Y_A, \theta_A)$, controladores PID determinan, según la desviación, las velocidades necesarias (v_x, v_y, ω_z) para llevar el robot hasta la posición de referencia. Ahora bien, el marco de referencia del robot está atado a éste y por lo tanto se desplaza y orienta con éste (Figura 8), como consecuencia si el robot está girado 90° respecto al marco de referencia global, el eje del marco de referencia del robot estará alineado con el eje $+Y$ del marco de referencia global, y el comando de movimiento para un desplazamiento en $+X$ resultará realmente un desplazamiento en $+Y$.

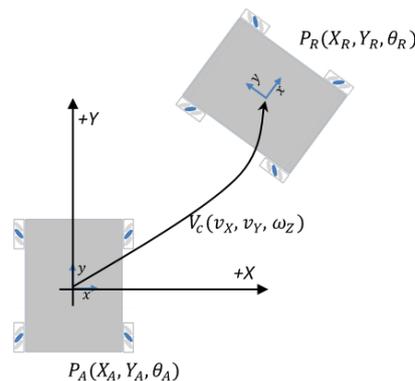


Fig. 8. Marcos del robot y marco de referencia global

Es usual que la definición de trayectorias se establezca en el marco de referencia global, por tanto, se realiza una rotación del vector de comando de velocidades $V_c(v_x, v_y, \omega_z)$ del marco de referencia global al marco de referencia del robot utilizando la Ecuación 3, para así determinar la orientación actual del robot con respecto al marco de referencia global. En la

Figura 9 se presenta la rotación del eje Y del robot con respecto al marco de referencia global:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \text{sen}\theta \\ -\text{sen}\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$$

Ecuación 3

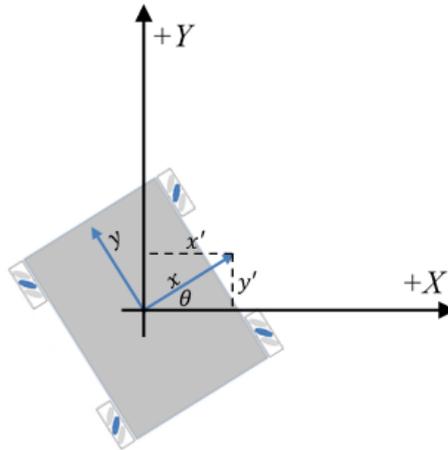


Fig. 9. Marco del robot y marco de referencia global

En forma inversa, la posición del robot calculada a través de la expresión con cambio de variables, se encuentra en el marco de referencia del robot, posición que es trasladada al marco de referencia global utilizando la Ecuación 4 para la estimación correcta del error de posición.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \text{sen}\theta \\ -\text{sen}\theta & \cos\theta \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix}$$

Ecuación 4

Una vez determinado el vector de velocidades de referencia en el marco inercial del robot, se calculan las referencias de velocidad de cada motor usando la Ecuación 2. Para garantizar el éxito en el correcto posicionamiento y seguimiento de la trayectoria deseada, son utilizados cuatro controladores de velocidad PID (uno por motor). La estructura completa de control implementada se muestra en la Figura 10.

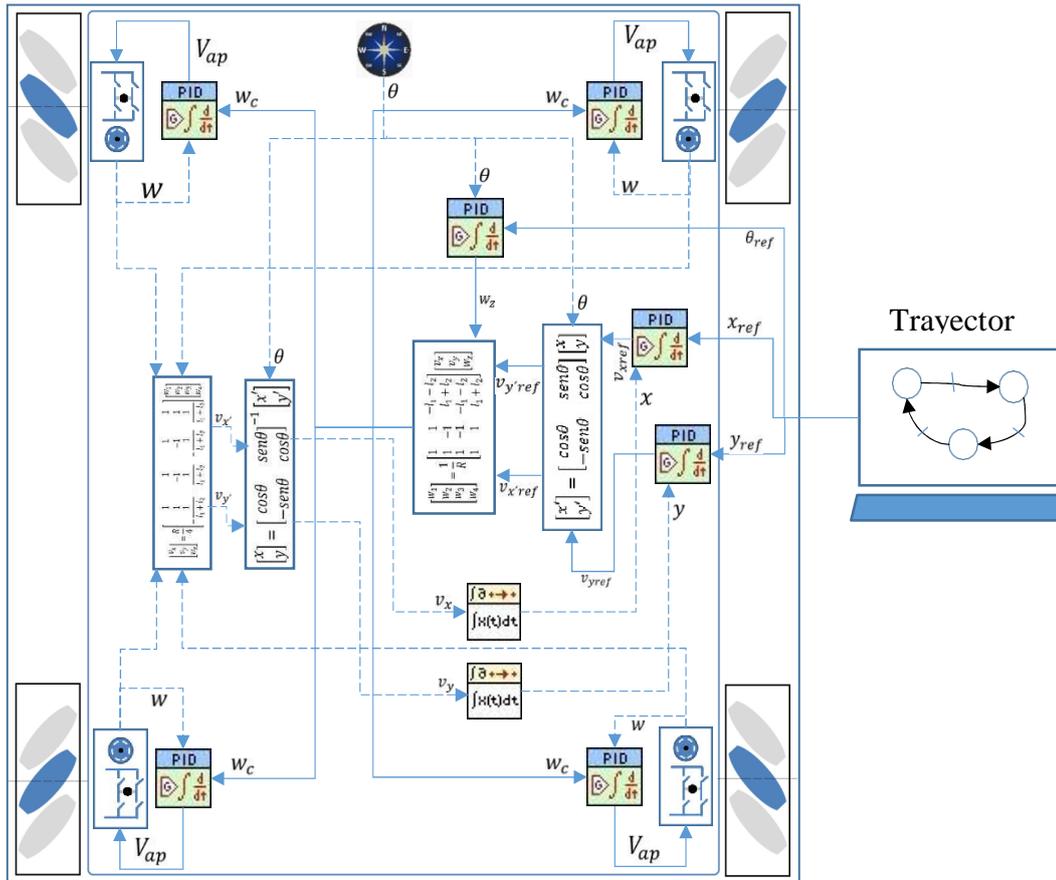


Fig. 10. Estructura lógica de control

La estructura de control presentada en la Figura 10 fue implementada en la tarjeta NI MyRIO1900, donde los puertos de I/O requeridos para la lectura de encoders y activación de los motores tienen conexión directa con la FPGA interna de la tarjeta. La tarjeta NI MyRIO1900 posee también un procesador ARM® Cortex™-A9 dual-core el cual ejecuta un sistema operativo Linux Real Time y se encuentra interconectado con la FPGA a través de canales DMA (Data Memory Access), así mismo con un sistema Host a través de conexión Ethernet. El esquema de la configuración e intercomunicación de la tarjeta NI MyRIO1900 se presenta en la Figura 11.

Las tareas de control del robot se han dispuesto entonces de tal forma que se fructifiquen las ventajas de la disposición de la plataforma. En primera instancia las lecturas y funciones de escalado y acondicionamiento de las señales provenientes de los sensores se han trabajado a nivel de FPGA, lo mismo que las señales de regulación de potencia de los actuadores. En busca de mejoría en el desempeño del posicionamiento del robot, se ha aprovechado las inherentes características de velocidad de ejecución de la FPGA para implementar controladores PID de velocidad. Las tareas concernientes a maniobrabilidad, cálculo de posición y estrategias de solución de pruebas se han implementado a nivel del procesador RT. La definición de puntos de trayectorias y acciones se ha dejado a nivel de host.

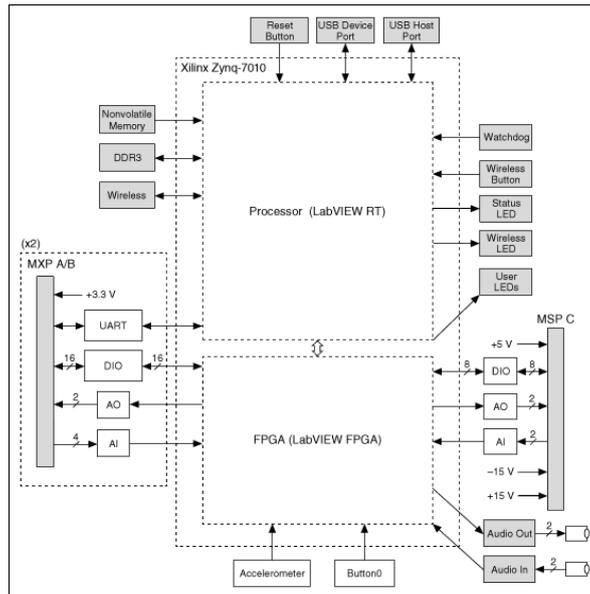


Fig. 11. Diagrama de bloques de Hardware NI MyRIO 1900 (National Instruments Corp., 2016).

RESULTADOS Y ANÁLISIS

El resultado más relevante, y que debido a su pertinencia respecto al porcentaje de responsabilidad en el éxito o fracaso en la competencia, corresponde al correcto posicionamiento de la plataforma móvil. Para llegar a la posición correcta, el robot debe además de tener la arquitectura en hardware y software adecuada, así como sus lazos de control debidamente ajustados. En cuanto a esto se poseen 3 lazos de control para las posiciones cartesianas y la orientación del robot, en pseudo- cascada con controladores de velocidad para cada rueda. Aunque los lazos externos son independientes, se acoplan en los controladores internos por acción de las relaciones cinemáticas del robot. Luego, contando con los tres parámetros de ajuste de los algoritmos de control usados, resulta en un sistema de 21 grados de libertad. Los ajustes presentados aquí son obtenidos experimentalmente, adecuados a la posición del control de masa del robot completo. En la práctica los controladores internos pueden ajustarse en forma desacoplada, asegurando obtener la misma velocidad y fuerza de empuje para cada rueda a la referencia calculada por las relaciones cinemáticas. La Figura 12 muestra el desempeño esperado de los 4 controladores de velocidad, la Figura 13 el posicionamiento final en varios puntos de una trayectoria y detallando la vecindad de un punto la trayectoria de llegada con la figura 14, y la Figura 15 la respuesta del controlador de orientación, mostrando en buen desempeño logrado en la implementación.

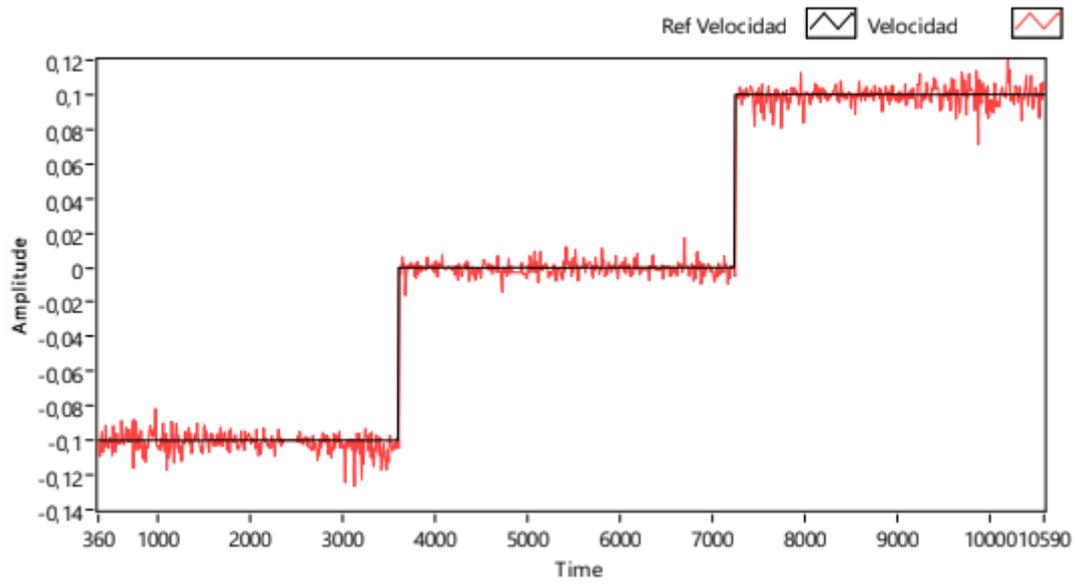


Fig. 12. Respuesta de controladores de velocidad (%)

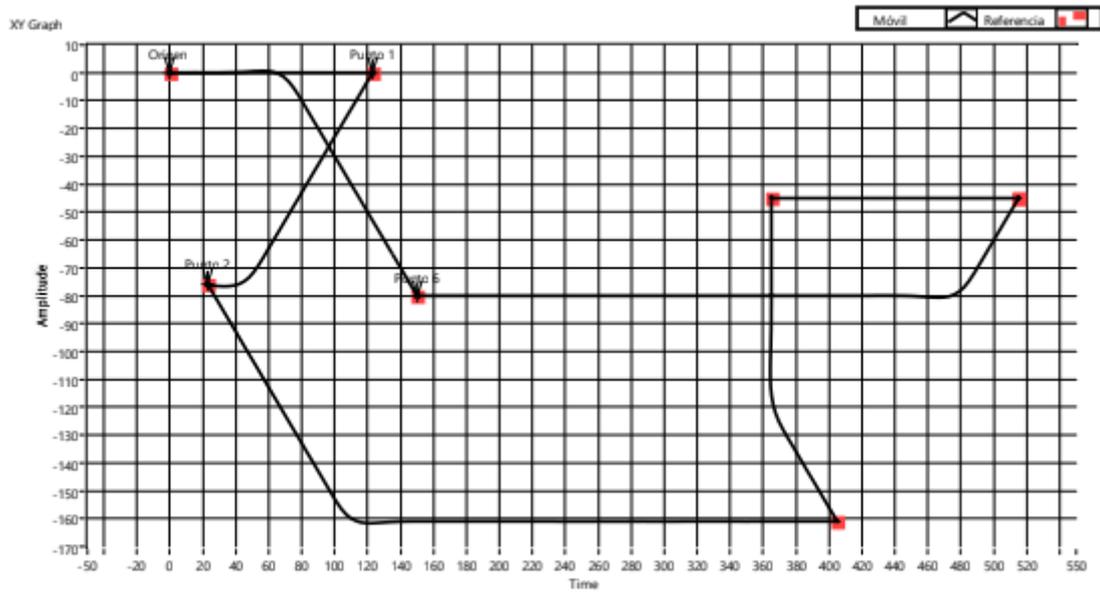


Fig. 13. Respuesta de posicionamiento del robot

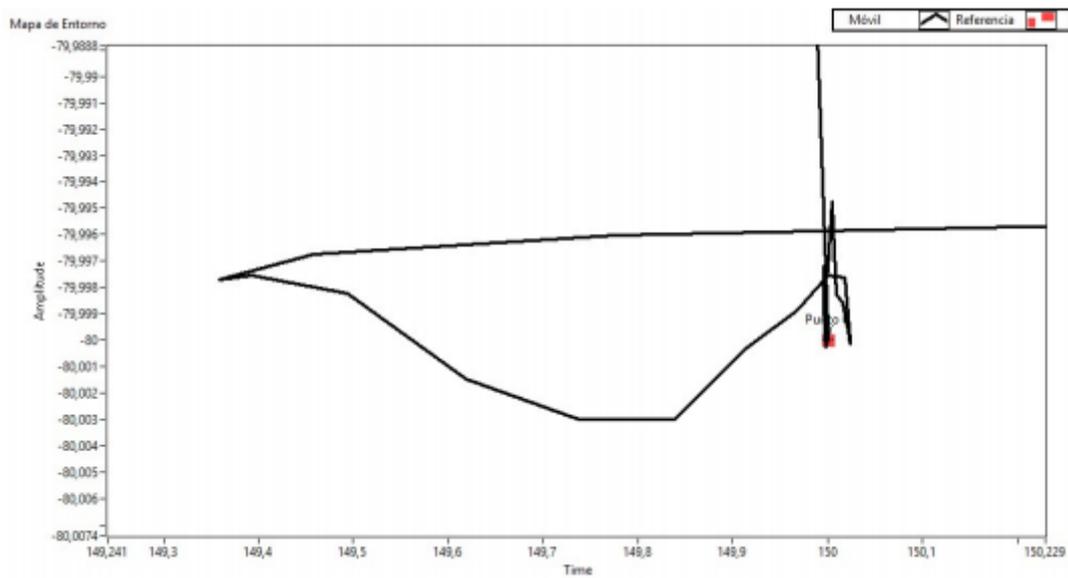


Fig. 14. Acercamiento a un punto de referencia

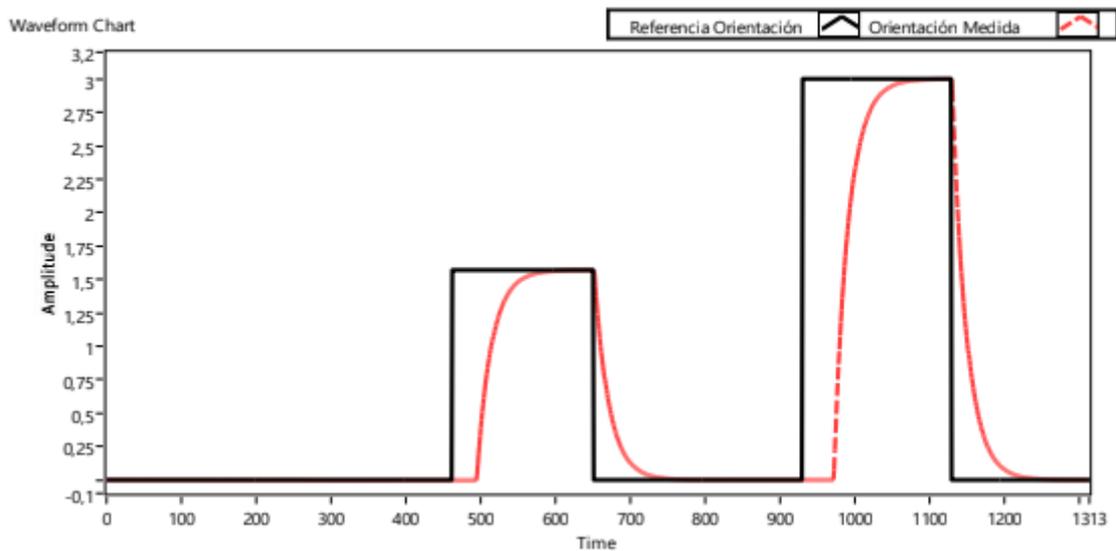


Fig. 15. Respuesta de controladores orientación (rad)

El resultado en la operatividad de este artefacto, desarrollado por los competidores, muestra la calidad esperada para apuntar al buen desempeño de las tareas finales del robot. Otro caso más que concluye que las competencias en robótica han demostrado ser un buen ambiente para la inmersión y mejoramiento de las competencias técnicas (y otras) de aprendices y además una estrategia de enganche para incrementar la inventiva y la necesidad por encontrar nuevas soluciones tecnológicas. Se muestra la calidad del producto comisionado y de la apropiación de conocimientos necesarios en las disciplinas STEM para el desarrollo profesional.

REFERENCIAS

Altamirano-Santillán, E., Vallejo-Vallejo, G., & Cruz-Hurtado, J. (2017). Monitoreo volcánico usando plataformas Arduino y Simulink. *Revista de Investigación, Desarrollo e Innovación*, 7(2), 317-329. doi: <https://doi.org/10.19053/20278306.v7.n2.2017.6073>

Ávila, A. A., Flórez-Serrano, E., & Gualdrón-Guerrero, O. (2012). Diseño e implementación de un curso interactivo multimedia para el aprendizaje de los procesos CAM en un centro de mecanizado leadwell v30. *REVISTA COLOMBIANA de Tecnologías de Avanzada*, 2 (20). Recuperado de: http://ojs.unipamplona.edu.co/ojs_viceinves/index.php/RCTA/article/view/188

Barrera-Mesa, C. E., Fernández-Morales, F. H., & Duarte, J. E. (2017). Diseño de un ambiente de aprendizaje mediado por TIC para la enseñanza de operadores mecánicos orientado al grado séptimo de la educación básica, en el Colegio Boyacá de Duitama. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, 2 (30), 11-19. doi: <https://doi.org/10.24054/16927257.v30.n30.2017.2740>

Cárdenas, J. A., & Prieto-Ortíz, F. A. (2015). Diseño de un algoritmo de corrección automática de posición para el proceso de perforado PCB, empleando técnicas de visión artificial. *Revista de Investigación, Desarrollo e Innovación*, 5 (2), 107-118. doi: [10.19053/20278306.3720](https://doi.org/10.19053/20278306.3720)

Center for Youth and Communities Heller School for Social Policy and Management, (2011). *Cross-Program Evaluation of the FIRST Tech Challenge and the FIRST Robotics Competition. Executive Summary.*

Tlale, N., & Villiers, M. de, (2008). "Kinematics and Dynamics Modelling of a Mecanum Wheeled Mobile Platform," *Mechatronics and Machine Vision in Practice*, 2008. M2VIP 2008. 15th International Conference on, Auckland, pp. 657-662. doi: [10.1109/MMVIP.2008.4749608](https://doi.org/10.1109/MMVIP.2008.4749608)

Tlale, N., & Villiers, M. de. (2011). Development of a Control Model for a Four Wheel Mecanum Vehicle. *ASME. J. Dyn. Sys., Meas., Control*.2011;134(1):011007-011007-6. doi:10.1115/1.4005273.

Ferrein, S., Marais, A., Potgieter, & Steinbauer, G. (2011). RoboCupJunior: A vehicle for S&T education in Africa?. *AFRICON*, 2011 Livingstone, 1-6. doi: [10.1109/AFRCON.2011.6072136](https://doi.org/10.1109/AFRCON.2011.6072136)

Gferrer, A. (2008). Geometry and kinematics of the Mecanum Wheel. *Computer Aided Geometric Design*, 25 (9), 784-791. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/j.cagd.2008.07.008](https://doi.org/10.1016/j.cagd.2008.07.008)

FIRST (2016). Home | FIRST. Recuperado de: <http://www.firstinspires.org/>

Gracia, L. (2008). Modelado Cinemático y Control de Robots Móviles con Ruedas. Tesis Doctoral. Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática Universidad Politécnica de Valencia.

Gutiérrez-Rodríguez, C. (2018). Fortalecimiento de las competencias de interpretación y solución de problemas mediante un entorno virtual de aprendizaje. *Revista de Investigación, Desarrollo e Innovación*, 8(2), 279-293. doi: <https://doi.org/10.19053/20278306.v8.n2.2018.7170>

Herrera-Baquero, L. P., & Prieto-Ortiz, F. A. (2018). Metodología para la inspección de la herramienta en el taladrado de piezas. *Revista de Investigación, Desarrollo e Innovación*, 9 (1), 187-200. doi: <https://doi.org/10.19053/20278306.v9.n1.2018.7937>

Kitano, H. (Ed.). (1997). RoboCup-97: Robot Soccer World Cup I, Series: Lecture Notes in Computer Science, 1395 (14).

Lin, L., & Shih, H. (2013). Modeling and Adaptive Control of an Omni-Mecanum- Wheeled Robot. *Intelligent Control and Automation*, 4 (2), 166-179. doi: 10.4236/ica.2013.42021.

Lakemeyer, G., Sklar, E., & Sorrenti, D. G. (2006); Takahashi, T. (Eds.). RoboCup 2006: Robot Soccer World Cup X. Lecture Notes in Computer Science, 4434.

López-Gaitán, M. A., Morán-Borbor, R. A., & Niño-Vega, J. A. (2018). Prácticas experimentales como estrategia didáctica para la comprensión de conceptos de física mecánica en estudiantes de educación superior. *Infometric@ - Serie Ingeniería, Básicas y Agrícolas*, 1 (1), 1-14. Recuperado de: <http://cienciometrica.com/infometrica/index.php/syh/article/view/12>

Melchior A., Burack C., Hoover M., & Marcus, J. (2016). FIRST Longitudinal Study: Findings at Follow-Up (Year 3 Report). The Center for Youth and Communities Heller School for Social Policy and Management Brandeis University Waltham, MA, FIRST Manchester.

Mesa-Mesa, L. A. & Barrera-Lombana, N. (2013). La robótica educativa como instrumento didáctico alternativo en educación básica. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, 2(22), 59-67.

National Instruments Corp. (2016). User guide and specifications NI myRIO-1900. Recovered <http://www.ni.com/pdf/manuals/376047c.pdf>

Niño-Vega, J. A., Martínez-Díaz, L. Y., & Fernández-Morales, F. H. (2016). Mano robótica como alternativa para la enseñanza de conceptos de programación en Arduino. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, 2 (28), 132-139. doi: <https://doi.org/10.24054/16927257.v28.n28.2016.2476>

Robocup (2016). RoboCup. Recuperado de: <http://www.robocup.org/>

Ruiz-Macías, E., & Duarte, J. E. (2018). Diseño de un material didáctico computarizado para la enseñanza de oscilaciones y ondas, a partir del estilo de aprendizaje de los estudiantes. Revista de Investigación, Desarrollo e Innovación, 8 (2), 295-309. doi: <https://doi.org/10.19053/20278306.v8.n2.2018.7966>

Santos-Jaimes, L. M., & Flórez-Fuentes, A. (2013). Metodología para el análisis forense en Linux. REVISTA COLOMBIANA DE TECNOLOGIAS DE AVANZADA, 2 (20), 90-96. Recuperado de : http://revistas.unipamplona.edu.co/ojs_viceinves/index.php/RCTA/article/view/194

Sklar, E., Parsons, S., & Stone, P. (2004). Using RoboCup in University Level computer science education. Journal on Educational Resources in Computing (JERIC) - Special issue on robotics in undergraduate education, 4 (2). doi: 10.1145/1071620.1071624

Torres, C. J., et al. (2013). Estudio cinemático de una plataforma robótica para agricultura. Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada, 2 (22). Recuperado de: http://ojs.unipamplona.edu.co/ojs_viceinves/index.php/RCTA/article/view/421

US 3876255, Bengt Erland Ilon, "Wheels for a course stable selfpropelling vehicle movable in any desired direction on the ground or some other base", published 8 April 1975.

WorldSkills, (2015). WorldSkills International. Technical Description Mobile Robotics. Manufacturing and engineering technology, 5.

WorldSkills (2016). WorldSkills. Recuperado de: <https://www.worldskills.org/>