

Diseño y simulación de un vehículo prototipo para la distribución automática de fertilizantes agrícolas

PEDRO FERNANDO MARTÍN GÓMEZ¹
OSCAR SAÚL HERNÁNDEZ MENDOZA²
JUAN SEBASTIÁN TOQUICA ARENAS³

RESUMEN

Durante los últimos años, la agricultura ha tenido un especial desarrollo de nuevas tecnologías dirigidas al bienestar y al sostenimiento del ser humano. A través de múltiples investigaciones se han creado nuevas tecnologías en automatización agrícola, con base en la eficiencia y efectividad de las prácticas agrícolas comunes, junto con equipos y métodos modernos de producción. En esta línea, el presente artículo describe el diseño y la simulación de un vehículo autónomo para la irrigación inteligente de fertilizantes en un cultivo piloto, por lo cual se utiliza un *software* especializado. Se genera así una nueva perspectiva sobre cómo la robótica y la automatización pueden aportar una solución diferente y eficaz en la forma como se manejan cultivos por filas en Colombia, en función de que estos sean más tecnificados y acordes con su topografía y características de producción. Este vehículo busca viabilizar la aplicación de tecnología moderna en la agricultura, adaptada a cultivos de pequeño y mediano tamaño, los cuales representan un alto porcentaje de la producción agrícola en el país.

Palabras clave: automatización, vehículo autónomo, producción agrícola, diseño, simulación.

¹ Doctor en Ingeniería Mecánica por la Universidad Federal de Uberlândia, Santa Mônica, Brasil. Magíster en Materiales y Procesos de Manufactura por la Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. Ingeniero mecánico por la Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. Actualmente se desempeña como docente del programa de Ingeniería en Automatización en la Universidad de La Salle, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: pmartin@unisalle.edu.co

² Doctor en Ingeniería Mecánica por la Universidad Estatal de Campinas, Campinas, Brasil. Magíster en Ingeniería Mecánica por la Universidad de Siracusa, Nueva York, Estados Unidos. Ingeniero mecánico por la Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. Actualmente se desempeña como profesor doctor emérito de posgrado en la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Federal de Uberlândia, Santa Mônica, Brasil. Correo electrónico: oscarhernandez@femec.ufu.br

³ Candidato a magíster en Sistemas Mecatrónicos por la Universidad de Brasilia, Brasil. Ingeniero de diseño y automatización electrónica por la Universidad de La Salle, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: jstoquica@gmail.com

FECHA DE RECEPCIÓN: 18 DE OCTUBRE DEL 2013 • FECHA DE APROBACIÓN: 18 OCTUBRE DEL 2014

Cómo citar este artículo: Martín Gómez, P.F., Hernández Mendoza, O.S. y Toquica Arenas, J.S. (2015). Diseño y simulación de un vehículo prototipo para la distribución automática de fertilizantes agrícolas. *Épsilon*, 24, 49-70

Design and Simulation of a Prototype Vehicle for Automatic Distribution of Agricultural Fertilizers

ABSTRACT

For the past few years, agriculture has had a special development of new technologies for the welfare and sustenance of human beings. New technologies in agricultural automation have been developed through multiple investigations based on the efficiency and effectiveness of common agricultural practices, together with modern production equipment and methods. In this vein, this paper describes the design and simulation of an autonomous vehicle for smart irrigation of fertilizers in test crops, reason why a specialized software is used. Thus, a new perspective is generated about how robotics and automation can provide a different and effective solution to the way crops are handled as rows in Colombia, depending on whether they are more technically advanced and consistent with our topography and production characteristics. This vehicle seeks to facilitate the application of modern technology in agriculture, adapted to small and medium size crops, which represent a high percentage of agricultural production in the country.

Keywords: automation, autonomous vehicle, agricultural production, design, simulation.

Projeto e simulação de um veículo protótipo para a distribuição automática de adubos agrícolas

RESUMO

Durante os últimos anos, agricultura teve um especial desenvolvimento de novas tecnologias dirigidas ao bem-estar e o sustento do ser humano. Através de múltiplas pesquisas foram desenvolvidas novas tecnologias em automação agrícola, baseadas na eficiência e efetividade das práticas agrícolas comuns, com equipamentos e métodos modernos de produção. Nesta linha, este artigo descreve o projeto e a simulação de um veículo autônomo para a aplicação inteligente de adubos numa cultura piloto, utilizando um software especializado. Gera-se assim uma nova perspectiva do que a robótica e a automação oferecem pelas alternativas diferentes e eficazes para dirigir as culturas por filas na Colômbia, utilizando maior tecnologia ajustada à nossa topografia e as características de produção. Este veículo procura viabilizar a aplicação de tecnologia moderna da agricultura nas culturas de pequeno e médio tamanho, as quais são uma representação de alta percentagem da produção agrícola no país.

Palavras chave: automatização, veículo autônomo, produção agrícola, desenho, simulação.

Introducción

En los últimos años, la agricultura ha captado la atención del mundo entero por el desarrollo de avances tecnológicos y nuevos métodos estratégicos, sin dejar de lado la experiencia humana. Un ejemplo de ello es la aplicación de campos como la robótica en la agricultura, lo que ha facilitado las producciones en gran escala. Esta especialización tecnológica de la agricultura es llamada en la actualidad *agricultura de precisión*, esto es: el manejo de la variabilidad agrícola para mejorar los beneficios económicos y reducir el impacto tecnológico en el medio ambiente (Blackmore, 2007).

Dentro de las múltiples aplicaciones para este tipo de agricultura se encuentra el uso de los vehículos autónomos (*autonomous guide vehicle* [AGV]) requeridos en muchos procesos de los cultivos. El diseño de sistemas específicos a medida ha creado vehículos de cuatro o seis ruedas; con orugas; de dos, cuatro o seis piernas, e incluso robots aéreos especiales. Además, estos diseños están presentes en sistemas de dosificación, agitación, siembra, irrigación, cosecha y todos los procesos relacionados con la agricultura.

Para este fin, se han desarrollado vehículos omnidireccionales, como el MEGAN-1 (Diegel *et al.*, 2002), los OMNI-x (Mohd *et al.*, 2006), los tractores modificados (Gan-Mor *et al.*, 2007; Da Cunha *et al.*, 2011; Murakami *et al.*, 2008; Rosa *et al.*, 2008), el robot TA-ATMR como modificación de una Yamaha Grizzly 700 ATV (Bascetta *et al.*, 2009) y robots con piernas (Ilda *et al.*, 2008). También se han desarrollado robots con posicionamiento autónomo controlados por sistemas de posicionamiento global y navegación cinética satelital (GPS-RTK), como el Autonomous Platform and Information System (API) (Slaughter *et al.*, 2008; Åstrand y Baerveldt, 2002) y la plataforma modular INDIGO para cargas mayores de 80 kg (Sternfeld *et al.*, 2005).

Otros diseños con robots respaldados por sistemas de información geográfica son los desarrollados por la Universidad de São Paulo (Tabile *et al.*, 2011) y el robot ATRV-jr, de iROBOT, para detección de obstáculos (Blackmore *et al.*, 2004). Se han creado también robots cooperativos para tareas en grupo (Paulsen *et al.*, 2005; Mondada *et al.*, 2004; Pettinaro *et al.*, 2002) y, finalmente, robots tipo Rover

todoterreno para exploración aeroespacial, con diversas aplicaciones en los últimos años: el robot DIDAJÓ de la Universidad de San Buenaventura, en Bogotá, Colombia (Ardila *et al.*, 2006); los robots Mars Explorer Rover (MER) de la NASA; los robots SOLERO y CRAB del Autonomous System Laboratory en Suiza; los modelos RCL-E y RCL-C, y los tipo CRAB-S y CRAB-8 de última generación, con muchas versiones en la actualidad (Thueer *et al.*, 2006).

La mayoría de estas aplicaciones involucran visión por computador, sistema de posicionamiento global (GPS) con generación de trayectorias por computador, sistemas de información geográfica (SIG), bases de datos para almacenamiento y un sistema de comunicación inalámbrico (generalmente de tipo *wi-fi* o *zig-bee*). Todas estas aplicaciones, por su estructura compleja, son justificables en sistemas de producción en gran escala, sobre terrenos básicamente planos y con cultivos de más de 1000 ha.

Por esta razón, y dado que la producción agrícola en Colombia es desarrollada en alto porcentaje por pequeños agricultores, fue dimensionado y analizado por computador un vehículo con estructura tipo Rover de seis ruedas, con tecnología de análisis de ingeniería por computador (CAE). Su función fue la dosificación automática de fertilizantes líquidos de nitrógeno, potasio y fósforo sobre cultivos pequeños y medianos, a partir de un sistema de posicionamiento basado en GPS y controlado por computador, con tecnología de menor costo. El vehículo fue dimensionado para una autonomía de 1 ha y capacidad máxima de carga de 500 kg.

Características fundamentales del tipo de cultivo

Para desarrollar el prototipo fue necesario determinar las características de un cultivo piloto, para así ajustar el vehículo a las condiciones específicas de este. El cultivo fue seleccionado según su tamaño, características, cantidad de producción, demanda y facilidad de acceso cerca de Bogotá, así como por las condiciones orgánicas y de fertilización con nitrógeno, fósforo y potasio. Además, se tuvieron en cuenta otros factores: la cercanía del cultivo a Bogotá, los requerimientos de transporte y desplazamiento frecuente para pruebas en campo y el tamaño pequeño de la planta, como elemento fundamental para el dimensionamiento del vehículo. Así,

fue seleccionado un cultivo de papa, que típicamente se hace con 1 m entre surcos y 40 cm entre plantas, y una altura de planta promedio de 40 cm.

Todo lo anterior se suma al interés de desarrollar un prototipo estructural base, sobre el cual puedan ser implementados después dispositivos modulares intercambiables para diferentes labores del cultivo, como siembra, irrigación, cosecha, fertilización y medición de variables de cultivo o de medio ambiente. Los sistemas componentes fueron desarrollados para estas condiciones y características del cultivo. Adicionalmente, aunque el producto final comercializable en este caso es el tubérculo, puede ser aplicado a otros cultivos de características o dimensiones similares (Martín, 2013).

Requisitos de diseño derivados de la aplicación

El tamaño del vehículo debe ser acorde con las características del cultivo indicadas anteriormente; la longitud y el ancho no deben superar los 100 cm; la altura mínima depende del tamaño de las plantas de papa (aproximadamente, 40 cm), y el largo del prototipo es proporcional a las anteriores dimensiones, para facilitar el giro sobre su centro geométrico. En consecuencia, según las características del suelo, es un vehículo todoterreno, por el medio húmedo y agresivo donde se va a desempeñar; con flexibilidad de tránsito por el cultivo y sin dañar las plantas; de configuración flexible, para intercambiar diferentes módulos componentes de una variedad de tareas agrícolas; y con material liviano y fácil de construir y mantener en el campo colombiano. Las principales características de diseño y construcción son estas:

- a) La estabilidad del vehículo se logra con tres ruedas mínimo, para cuando hay falta de tracción o de contacto con la superficie del cultivo.
- b) Los obstáculos de tamaño máximo sobrepasables son de aproximadamente el 20% del diámetro de las ruedas; los motores, en cooperación con el sistema de evasión, tendrán suficiente torque para la superación de los obstáculos.
- c) Las limitaciones dimensionales del vehículo, debidas a las características de los cultivos por filas, dependerán del tamaño de las plantas y su distribución en el terreno.

Diseño estructural del prototipo de vehículo

Para establecer las dimensiones estructurales del vehículo fue calculada el área mínima de los soportes y las partes que componen el chasis. Para ello fue seleccionado el material de construcción, y con sus propiedades físicas y las cargas aplicadas se determinaron las respuestas de desplazamientos y los esfuerzos generados en cada uno de los componentes a partir del equilibrio estático (figura 1).

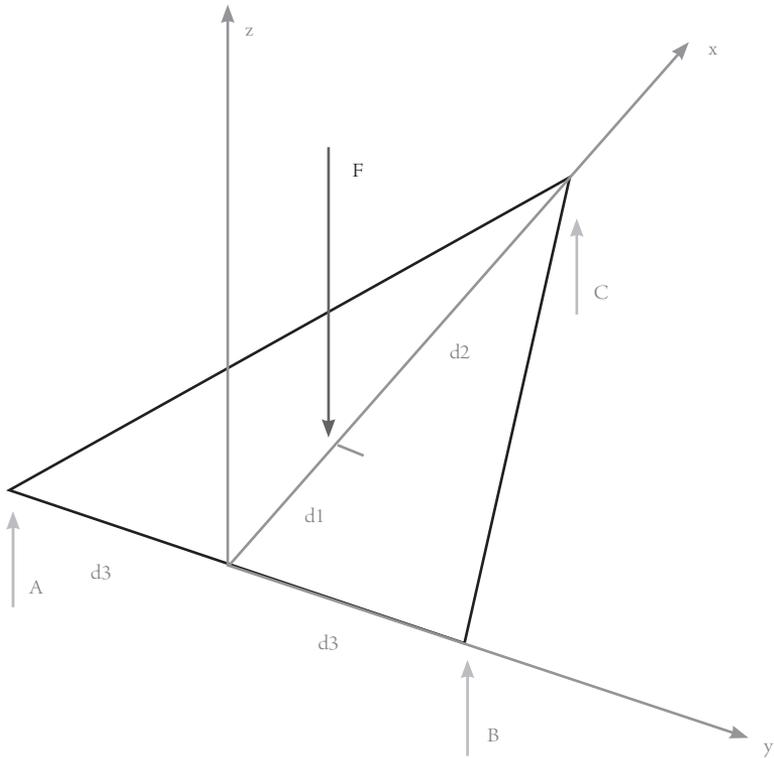


Figura 1. Diagrama de cuerpo libre del marco principal de la estructura

Fuente: elaboración propia.

En el diseño del chasis fueron determinadas las reacciones generadas por la carga máxima que soportará el vehículo, presupuestada en aproximadamente 500 kg con todo el sistema de dosificación abordo. En la figura 1 se identifican los tres apoyos —que en la práctica se denominan los pivotes A , B y C — sobre los cuales la carga total F se distribuye a través del marco y cuyo análisis fue hecho para los planos ZX y ZY , dando como resultado:

Para el plano ZX, la reacción en el punto C queda definida por la ecuación [1]:

$$R_{CZ} = F \frac{d_1}{d_1 + d_2} \quad [1]$$

Donde d_1 y d_2 son las distancias según la figura 1.

Para el plano ZY, las reacciones en los puntos A y B queda definidas según la ecuación [2]:

$$R_{AZ} = R_{BZ} \quad [2]$$

Finalmente, la reacción en el punto A se determina de acuerdo con la ecuación [3]:

$$R_{AZ} = \frac{F}{2} \left(1 - \frac{d_1}{d_1 + d_2} \right) = \frac{F}{2} \left(\frac{d_2}{d_1 + d_2} \right) \quad [3]$$

De donde fueron obtenidos los siguientes valores:

$$\begin{aligned} R_{AZ} &= R_{BZ} = 1611,4 \text{ N} \\ R_{CZ} &= 839,6 \text{ N} \end{aligned}$$

Para determinar el área transversal de una viga estructural bajo flexión, se debe cumplir con criterios básicos de diseño, como el momento flector máximo en la viga y el esfuerzo de diseño soportado por las dimensiones de la sección transversal de la viga (Mott, 2009). Como resultado del diseño, se definió un perfil de aluminio 2014-T4 de 50 mm por 26 mm para el marco principal de la estructura, con barras de suspensión de 634,5 mm² de área mínima, soporte de ruedas de 453,3 mm² de área mínima y pasadores de ensamble de 11 mm de diámetro mínimo. Los diseños de las uniones de la estructura con tornillos son mostrados en la figura 2.

El análisis estático de cada una de las piezas fue desarrollado con el *software* Solidworks, mediante CAE para los materiales seleccionados. De acuerdo con los resultados mostrados en la figura 3, el límite elástico del material (290 MPa) no es superado, y el máximo esfuerzo generado es de aproximadamente 25,5 MPa. Esto arroja un factor de seguridad de aproximadamente 10, que puede ser favorable

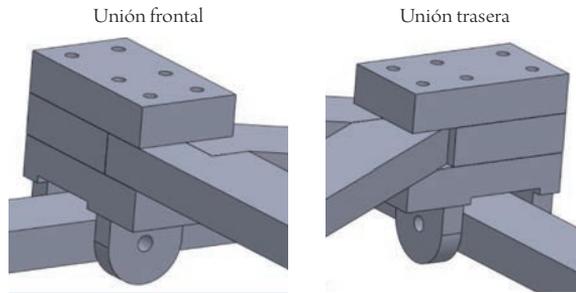


Figura 2. Diseño de las uniones de la estructura principal

Fuente: elaboración propia.

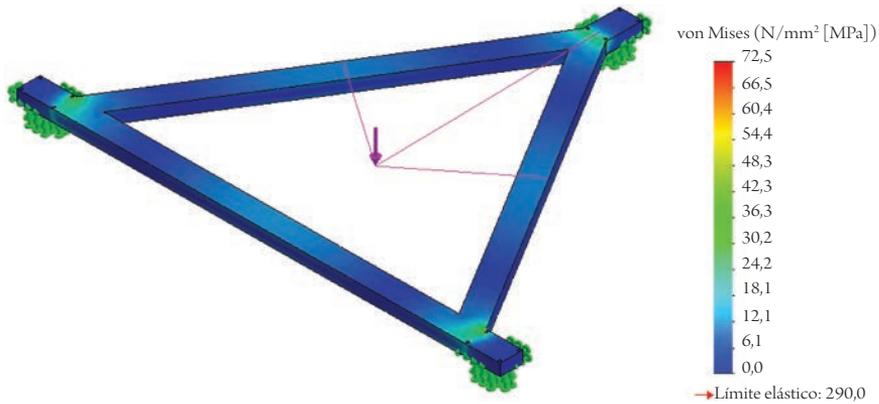


Figura 3. Análisis de esfuerzos del marco principal de la estructura

Fuente: elaboración propia.

por el tipo de ambiente al cual está expuesto el vehículo y por la carga que soporta con las características irregulares del terreno. Además, ello favorece la portabilidad de tanques con líquidos en movimiento y la posibilidad de que otros accesorios modulares diseñados en el futuro puedan generar cargas mayores sobre la estructura. Al aplicar estos mismos criterios, y desde los recursos CAE, también fueron diseñados los demás elementos componentes de la estructura del vehículo.

Para las condiciones de carga estipuladas, y según los diseños de montaje, fueron seleccionados pernos de cabeza hexagonal tipo G8 de 5/16 × 18 UNC 2A, de 3,5 plg de longitud, como se puede observar en la figura 4.

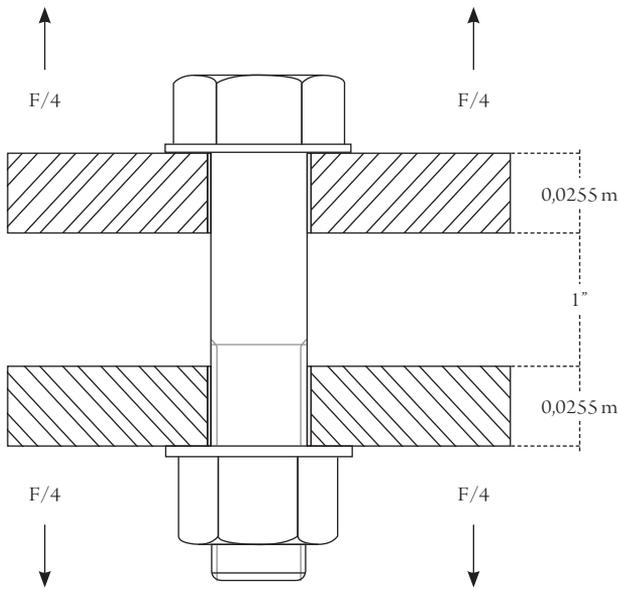


Figura 4. Diagrama de fuerzas en el perno según el diseño del ensamble

Fuente: elaboración propia.

Medidas preliminares del vehículo

La estructura tipo Rover de seis ruedas fue seleccionada a partir de un diseño de la Universidad de Michigan (Weymouth y Roth-Tabak, 1990), por su estabilidad, versatilidad y buen comportamiento en todo tipo de terrenos. Así, tendrá por lo menos cuatro ruedas en contacto permanente con el suelo en diferentes momentos, lo cual es importante por la necesidad de llevar tanques con líquidos a bordo (Thueer *et al.*, 2006). El radio de giro apropiado para el vehículo fue definido para que fuera sobre su propio centro geométrico, en función de que ocupe el menor espacio posible y optimice el espacio disponible para el cultivo. Adicionalmente, fue considerado este hecho para establecer el mismo centro geométrico como punto de referencia, a fin de asegurar el posicionamiento del vehículo con respecto a las plantas de cultivo para la dosificación; es decir, este punto es considerado como la referencia de posicionamiento dentro del cultivo sobre cada planta que debe dosificarte.

De acuerdo con lo anterior, se tuvo en cuenta la disposición al momento de realizar el giro de la estructura, la flexibilidad y el poco espacio que requiere, para no

estropear las filas del cultivo, en comparación con otros mecanismos de giro. Ello permite una mayor precisión del sistema, al posicionarse en función del centro geométrico del vehículo. A partir de las características propias del cultivo, se dimensionaron todos los elementos, limitados por la distancia entre surcos y la altura máxima que podrían alcanzar las plantas. Esto da como resultado las medidas de 970 mm de lado en el plano horizontal, con una altura de 400 mm para para la estructura como se muestra en la figura 5.

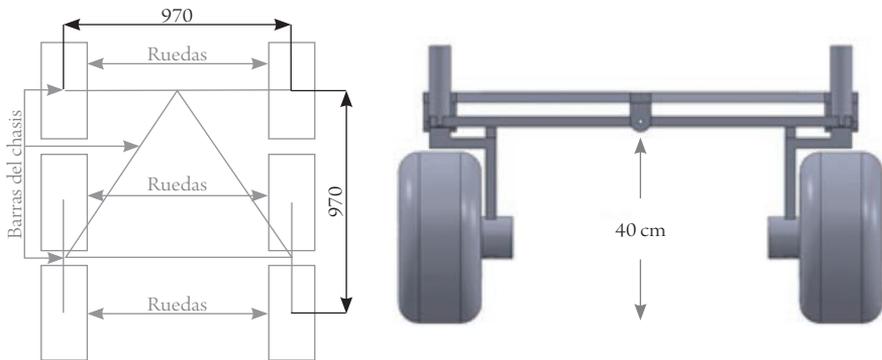


Figura 5. Dimensionamiento general del vehículo

Fuente: elaboración propia.

Sistema de dirección

Respecto al giro del vehículo sobre su propio centro geométrico, ocupando el menor espacio posible y sin estropear las plantas, fue determinado un sistema mediante el cual se hace la rotación de las llantas: se producirá un giro simultáneo de dos llantas delanteras y dos traseras. También se calculó el ángulo necesario para que las líneas de eje se crucen en el centro de rotación, que para este caso coincide con el centro geométrico, como se muestra en la figura 6.

Para el sistema de giro seleccionado, se utilizan servomotores independientes en cada rueda, encargados de girar las ruedas 45° para posicionar el AGV en estado de "giro"; una vez alcanzado esto, los seis motores que generan el avance del vehículo se energizan en sentido horario o antihorario, según el caso, para desarrollar el movimiento de giro hasta que la medición del compás electrónico valide o confirme los requerimientos de orientación especificados. Una vez orientado el vehículo, este

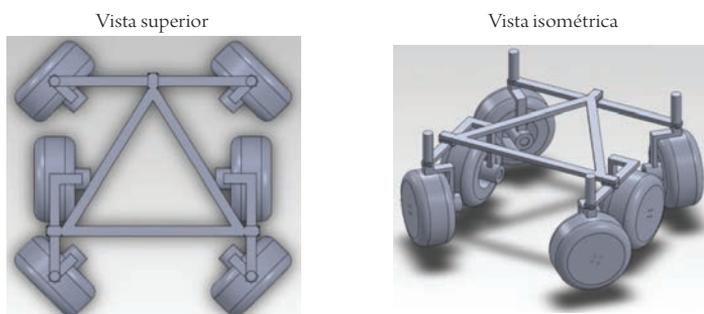


Figura 6. Especificación del sistema de rotación de las ruedas para el giro sobre el centro geométrico

Fuente: elaboración propia.

endereza nuevamente las ruedas, para desplazarse linealmente según los puntos de trayectoria enviados, basado en el algoritmo A^* de trayectorias (Martín *et al.*, 2012).

Cálculo de motores

Los motores fueron calculados a partir de la fuerza necesaria para el movimiento del vehículo o el giro de las ruedas. Para ello se tuvo en cuenta el peso máximo que habrá de movilizar el prototipo, es decir, 500 kg distribuidos sobre las seis ruedas, de acuerdo con su geometría y dimensiones. Estos cálculos dependen fundamentalmente del peso que soporta y de la fricción con el suelo (figura 7), para el cálculo del torque necesario.

Adicionalmente, a la fuerza de fricción F_{FR} se le suma la componente horizontal del peso, derivada de la inclinación del suelo con ángulos máximos de 13° ; por lo tanto, la fuerza total del motor tiene en cuenta la componente de fuerza adicional por la inclinación generada. El motor reductor seleccionado es de marca Transtecno. En la tabla 1 se detallan las características.

Tabla 1. Especificaciones generales del motor reductor

MARCA	REFERENCIA	VOLTAJE DE OPERACIÓN	RELACIÓN DE REDUCCIÓN	TORQUE DE SALIDA (N - m)	VELOCIDAD (m/s)
Transtecno	ECP350/1053	24 VDC	1:168	186	0,21

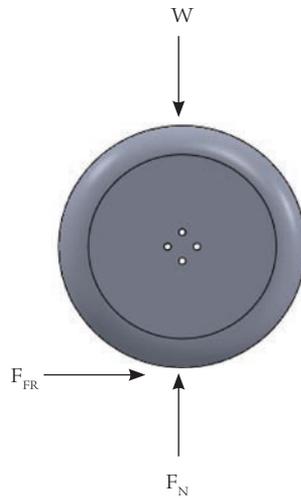


Figura 7. Diagrama de cuerpo libre de la rueda para el cálculo de los motores

Nota: W , peso total; F_{FR} fuerza de fricción; F_N fuerza normal.

Fuente: elaboración propia.

Sistema de suspensión

Se implementó el tipo de suspensión *rocker-bogie* (Bickler, 1988), que es utilizado especialmente en los vehículos Mars Rover de la NASA. El término *rocker* fue introducido por la función de oscilación de los eslabones entre los sistemas de suspensión del robot. Este principio ofrece mayor estabilidad debido a que cuando un *rocker* se eleva, el otro extremo desciende, lo cual genera siempre el contacto de las ruedas con el terreno. Asimismo, el término *bogie* se refiere a la unión de la rueda con la terminación en el respectivo *rocker*.

Según el tipo de suspensión seleccionado, se modificaron algunos aspectos de la configuración *rocker-bogie* básica, para implementar así un prototipo ajustado a las condiciones del terreno, con mayor flexibilidad en la articulación y que sobrepase eficientemente los obstáculos. En la figura 8 se muestra el sistema de suspensión desarrollado; se aprecian allí los *bogies* utilizados para la aplicación, en función de facilitar el movimiento de las ruedas compensado con el balanceo lateral del vehículo.

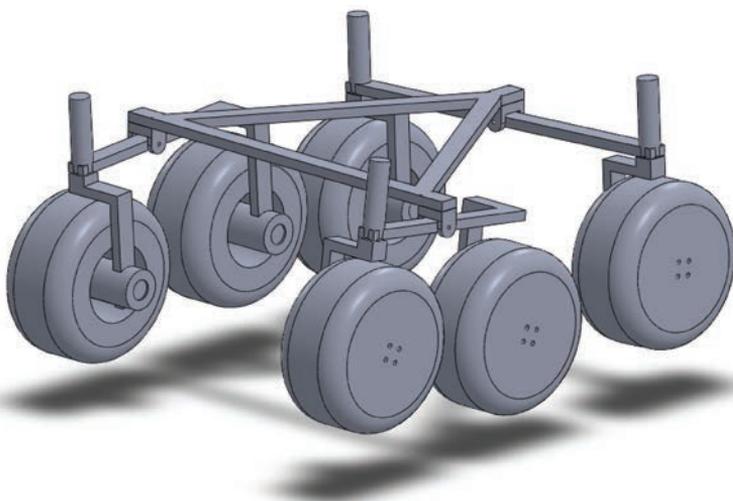


Figura 8. Accionamiento flexible del sistema de suspensión basado en los *rocker-bogies*

Fuente: elaboración propia.

Sistema de control de movimiento y navegación

Para el control de movimiento y navegación fue implementada una arquitectura DAMN (*distributed architecture for mobile navigation*), ilustrada en la figura 9. Esta arquitectura distribuida para navegación móvil está basada en un árbitro que coordina las acciones de evasión de obstáculos, búsqueda del objetivo, seguimiento de ruta y solicitud de nueva ruta según las características de desempeño. A partir de esta arquitectura se planteó el código de control para el vehículo.

Junto a las variables de *posicionamiento* y *evasión de obstáculos*, el algoritmo de control provee las acciones por seguir según el comportamiento del vehículo sobre el terreno. Dependiendo de la trayectoria generada por el algoritmo A*, el sistema de control verifica el estado actual y orienta el vehículo (giro) en dirección a las coordenadas recibidas; posteriormente, realiza el desplazamiento necesario para proceder con la dosificación de los fertilizantes y esperar nuevamente coordenadas del próximo punto al cual deberá dirigirse. Este procedimiento se repite hasta agotar el fertilizante o terminar el proceso de dosificación (figura 9).

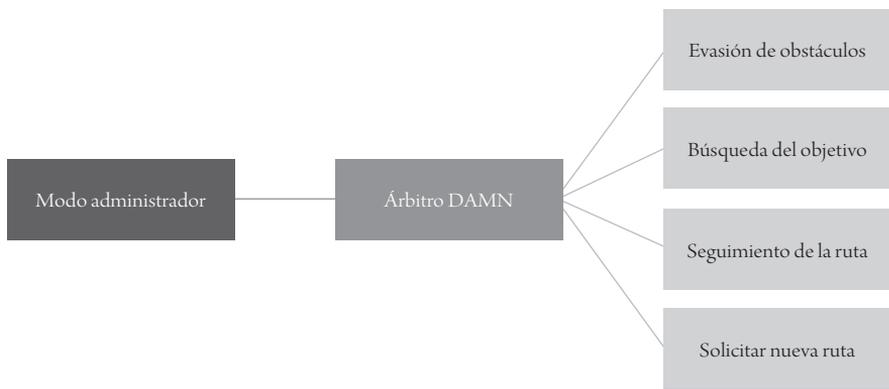


Figura 9. Configuración de arquitectura DAMN implementada

Fuente: elaboración propia.

En la figura 10 se muestra cómo fue configurado el sistema de control para el desempeño del vehículo sobre el terreno, el cual se desarrolló en Microsoft Visual Studio, versión 2008, en lenguaje C++. De acuerdo con la figura, el *software* Mari-

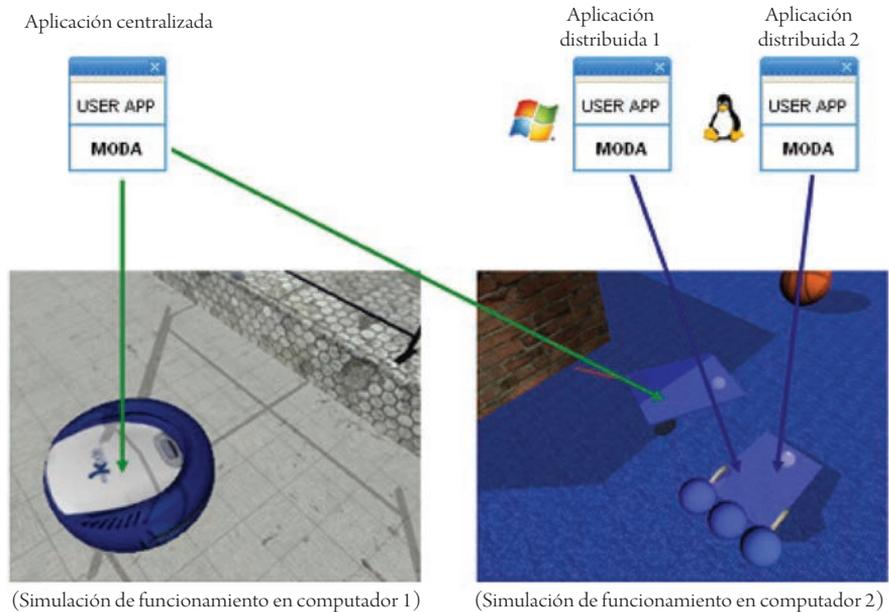


Figura 10. Configuración por bloques del servidor MODA en el *software* Marilou Robotics Studio

Fuente: AnyKode Marilou (2012).

lou Robotics Studio tiene un servidor MODA (Marilou Open Devices Access), donde reside la aplicación centralizada en el computador, la cual se comunica con la aplicación de control del vehículo, configurado para la simulación como un controlador distribuido. A través de este servidor virtual se simula la conexión entre el controlador del vehículo y el computador para la simulación dinámica del vehículo (Anykode, 2012).

El algoritmo desarrollado mediante la implementación de la metodología DAMN para el control del movimiento y posicionamiento del vehículo está conformado por selecciones prioritarias (árbitro) entre variables de entrada, como el ángulo de rotación con respecto al norte terrestre. Se tiene en cuenta acá un compás electrónico simulado con las mismas características reales, la detección de obstáculos y la distancia recorrida por el vehículo, como variables adquiridas por funciones internas del simulador. Se registra además la variación de movimiento en función de los ejes coordenados, a semejanza de dispositivos electrónicos basados en posicionamiento terrestre.

La relación de posicionamiento terrestre aplicada en el simulador está descrita por coordenadas semejantes a un plano cartesiano de dos dimensiones, y allí la distancia entre puntos es de 1 m. Para la evasión de obstáculos, el algoritmo depende fundamentalmente de los sensores ultrasónicos de distancia, los cuales realizan la lectura de posibles objetos que obstruyan el desplazamiento del vehículo. Junto a las variables de posicionamiento y evasión de obstáculos, el algoritmo de control provee al comportamiento sobre el terreno agrícola el control sobre los actuadores o motores. Dependiendo de la trayectoria generada por el algoritmo pertinente, el sistema de control verifica el estado actual y posiciona el vehículo (giro), y posteriormente se desplaza para proceder con la dosificación de los fertilizantes y esperar nuevamente las coordenadas, como se muestra en el diagrama de flujo de la figura 11.

Adicionalmente, se implementó en el sistema de control una corrección de posición para cuando el vehículo se encuentra en cercanías al punto de dosificación; así, se desplaza el vehículo específicamente hacia la coordenada correcta, lo cual garantiza la dosificación de los fertilizantes necesarios de forma eficiente. El error máximo es de 10 cm de distancia, ya que el tiempo requerido para ubicarse con precisión mayor es demasiado largo.

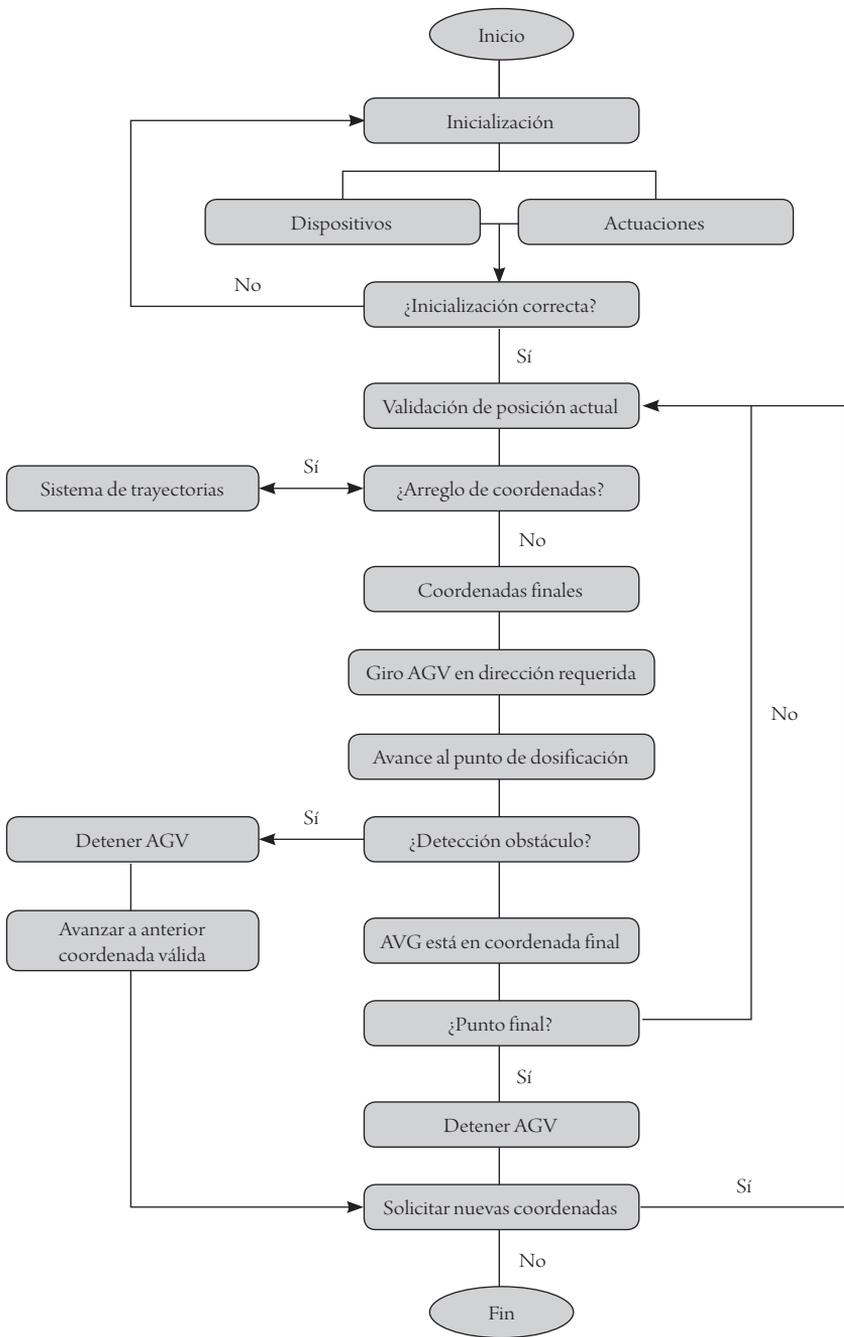


Figura 11. Diagrama de flujo de funcionamiento del vehículo

Fuente: elaboración propia.

Simulación dinámica

Para la verificación del diseño funcional fue realizada la simulación en el terreno, así como el comportamiento generado por los actuadores y sensores mediante el algoritmo de control desarrollado en lenguaje C. Se generó un modelo con las mismas características físicas del modelado en Solid Works, el cual fue puesto sobre el terreno donde se desplaza el AGV. Este modelo considera aspectos similares al campo de cultivo real, es decir, con las plantas y los puntos de las estaciones en campo. Posteriormente, se hicieron varias simulaciones con diferentes trayectorias y en distintas condiciones de movimiento. Los resultados se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Errores obtenidos en la trayectoria desplazamiento

	SIMULACIÓN 1 (%)		SIMULACIÓN 2 (%)		SIMULACIÓN 3 (%)	
	ERROR CON CORRECCIÓN	ERROR SIN CORRECCIÓN	ERROR CON CORRECCIÓN	ERROR SIN CORRECCIÓN	ERROR CON CORRECCIÓN	ERROR SIN CORRECCIÓN
Error en metros	1,33	0,67	1,43	1,32	0,63	0,51
	1,81	6,20	1,32	1,80	0,71	0,30
	0,41	2,31	1,55	3,74	2,93	4,10
	1,48	1,50	1,73	3,41	0,50	2,40
	1,50	4,51	4,68	4,34	3,28	3,11
Promedio	1,31	3,04	2,14	2,92	1,61	2,08

Fuente: elaboración propia.

En la tabla 2 se aprecia el comportamiento del vehículo al comparar el algoritmo sin corrección y con corrección de posicionamiento a partir de los resultados promedio. Se entiende por *corrección de posicionamiento* a aquella aplicación que hace la corrección para un error máximo de 10 cm de distancia. No hay corrección de posicionamiento cuando la aplicación no hace esta consideración adicional. Los resultados ofrecen la dosificación de los fertilizantes sobre el punto deseado con mayor precisión, con lo cual se mejora considerablemente el posicionamiento en el cultivo y se disminuye el porcentaje de error, pero aumentan los tiempos de aplicación.

El vehículo fue modelado con formas básicas de Marilou Robotics Studio (cilindros, cubos, esferas), y luego fueron configuradas las relaciones y características como material y restricciones funcionales (figura 12).

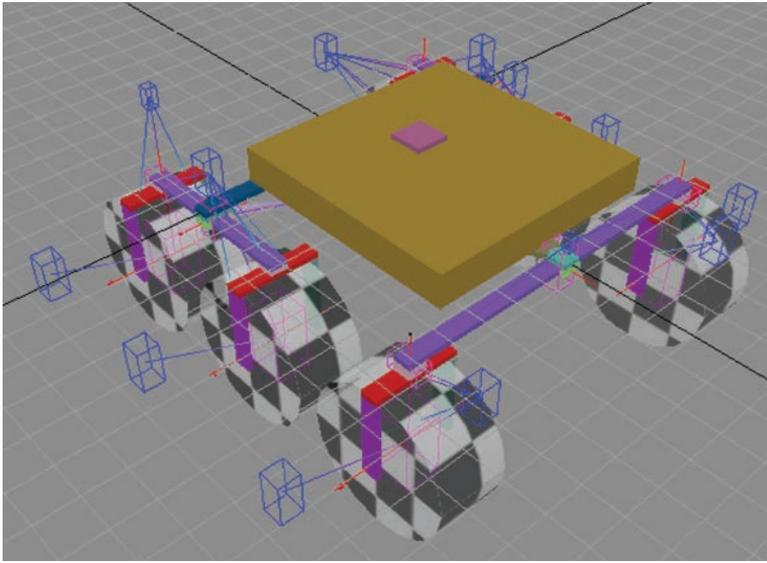


Figura 12. Modelo final del vehículo configurado en Marilou Robotics

Fuente: elaboración propia.

Tales relaciones y características fueron posteriormente importadas sobre el modelo de distribución del cultivo (mostrado en perspectiva en la figura 13). El cultivo está compuesto por 7 filas, cada una de 12 plantas (previamente modeladas en Blender), donde fue hecha la simulación del algoritmo de control para el posicionamiento, la evasión de obstáculos y la posterior dosificación.

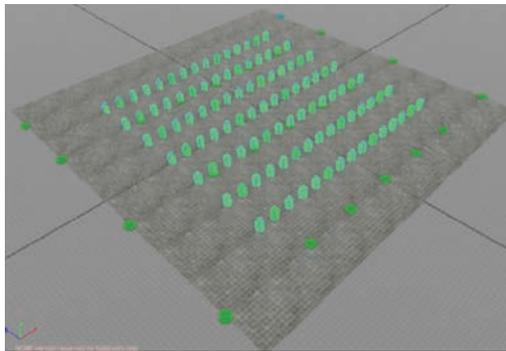


Figura 13. Modelo de terreno desarrollado en Blender con las plantas (verde claro) y las estaciones alrededor (verde oscuro)

Fuente: elaboración propia.

El sistema de control se probó mediante la simulación de trayectorias a través del terreno, con la aplicación del sistema de control con corrección y sin corrección de posicionamiento, cuyos resultados se muestran en la figura 14. Se simuló el comportamiento de posicionamiento del vehículo a partir de puntos establecidos y de los valores mostrados por el sensor de posicionamiento utilizado en la simulación. Los valores mostrados corresponden a los promedios de diez repeticiones de las mismas pruebas simuladas para tres casos diferentes.

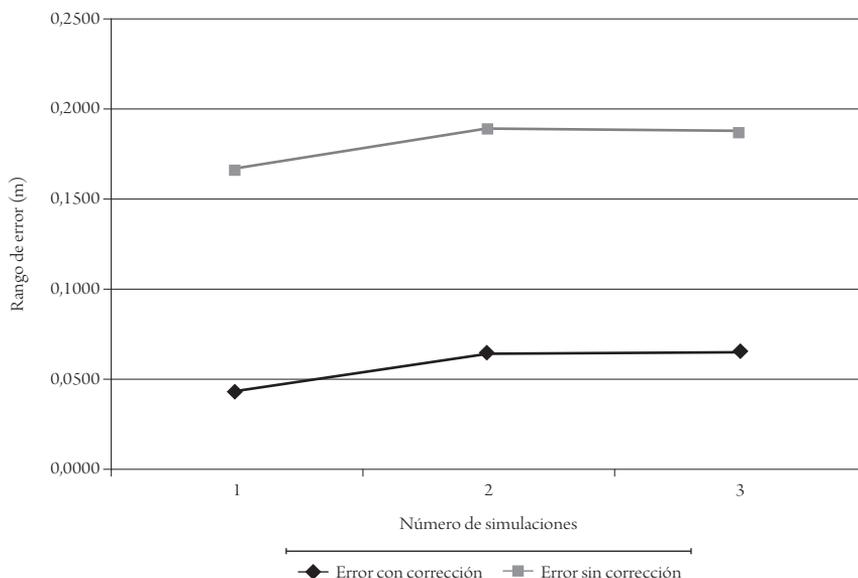


Figura 14. Comparaciones de resultados del error de posicionamiento con corrección y sin esta

Fuente: elaboración propia.

Conclusiones

A partir de la selección inicial del cultivo de papa para la implementación del sistema de dosificación automático, se obtuvieron factores necesarios para el desarrollo de los sistemas que forman parte del vehículo. Estos resultados permitieron el dimensionamiento de la estructura de un prototipo que cumple con los requisitos establecidos, además de constituir una configuración todoterreno ideal.

El diseño estructural del vehículo en *software* especializado, complementado con la simulación dinámica, dio resultados satisfactorios acerca del funcionamiento de la suspensión tipo *rocker-bogie*, así como en una aproximación del comportamiento del algoritmo de control sobre el cultivo modelado, el cual fue optimizado con otro algoritmo de corrección de posicionamiento para la dosificación de los fertilizantes, con un error máximo de 10 cm de distancia.

Con respecto al comportamiento del vehículo en la simulación del terreno, luego de varias simulaciones puede garantizarse la respuesta que tiene el algoritmo de posicionamiento para la dosificación de fertilizantes en los puntos requeridos. Esta precisión permite obtener un error promedio de 0,12 m sin corrección de posición, y 0,0569 m con corrección de posición, que son errores aceptables para la aplicación de fertilizantes.

A partir del dimensionamiento del vehículo se pudo validar claramente, mediante el *software* de análisis de ingeniería CAE, la utilidad de la metodología de elementos finitos, a lo que debe sumarse la seguridad de cada una de la piezas en comparación con el peso soportado por el vehículo.

El sistema de control mediante el servidor MODA del *software* para simulación dinámica es compatible con dispositivos de control como actuadores, sensores u otros sistemas complementarios, los cuales, en la construcción final del vehículo, solo dependerán de la calibración para el enlace con el algoritmo diseñado.

El tiempo empleado para la supervisión de los diferentes puntos de dosificación es menor en comparación con el recorrido total del cultivo y sin condiciones objetivas de supervisión, por cuanto mediante la utilización del algoritmo de generación de trayectorias se logran suministrar las rutas de dosificación para que el vehículo proceda con la administración o el suministro de fertilizantes en los puntos definidos, con mayor rapidez, regularidad y precisión.

Referencias

AnyKode Marilou (2012). Marilou Open Devices Access (MODA) (*software* de modelación). Montpellier, Francia .

- Ardila, J. A., Hernández, D. M. y Luque, D. (2006). Diseño y construcción de un vehículo autónomo tipo Rover "DIDAJO". *Ingenium*, 7(14), 38-47.
- Åstrand, B. y Baerveldt, A. (2002). An agricultural mobile robot with vision-based perception for mechanical weed control. *Autonomous Robots*, 13, 21-35.
- Bascetta, L., Magnani, G. A., Rocco, P., Rossi, M. y Zanchettin, A. M. (2009). Teleoperated and Autonomous All Terrain Mobile Robots (TA-ATMR). *B&R First European Industrial Ethernet Award*. Salzburg, Austria. Recuperado de http://www.researchgate.net/publication/228461818_Teleoperated_and_Autonomous_All_Terrain_Mobile_Robot_%28TA-ATMR%29
- Bickler, D. (1988). *Articulated suspension system*. Estados Unidos: Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA).
- Blackmore, B. S., Fountas, S., Vougioukas, S., Tang, L., Sørensen, C. G. y Jørgensen, R. A. (2004). Method to define agricultural robot behaviours. *Mechatronics & Robotics Conference*, 1197-1200.
- Blackmore, S. (2007). Agricultura de precisión (AP). *Revista Nacional de Agricultura*, 949, 20-28.
- Da Cunha, J., Martins, D. H. y Da Cunha, W. G. (2011). Operational performance of the mechanized and semi-mechanized potato Harvest. *Engenharia Agrícola Jaboticabal*, 31(4), 826-834.
- Diegel, O., Badve, A., Bright, G., Potgieter, J. y Tlale, S. (2002). Improved mecanum wheel design for omni-directional robots. *Australasian Conference on Robotics and Automation, 2002*, 117-121.
- Gan-Mor, S., Clark, R. L. y Upchurch, B. (2007). Implement lateral position accuracy under RTK-GPS tractor guidance. *Computer Electronic Agriculture*, 59, 31-38.
- Ilda, M., Kang, D., Taniwaki, M., Tanaka, M. y Umeda, M. (2008). Localization of CO₂ Source by a hexapod robot equipped with an anemoscope and a gas sensor. *Computer and Electronics in Agriculture*, 63, 73-80.
- Luttenberger, C. (2004). *Introducción al concepto de redes VRS (Virtual Reference Stations)*. Madrid: TOPCART.
- Machado, T. M. et al. (2010). Metodologia para avaliação do desempenho de receptor de GPS de uso agrícola em condição cinemática. *Engenharia Agrícola*, 30(1), 121-129.
- Martín, P., Hernández, O., García, A., López, J., Tumialán, A. y Rangel, J. (2012). Planeamiento de trayectorias para un vehículo autónomo en agricultura de precisión. 3rd International Symposium on Innovation and Technology, 2012. Cusco, Perú: Instituto Internacional de Innovación y Tecnología.

- Martín, P. (2013). *Distribuição inteligente de adubos químicos via GPS com tecnologia para pequenos produtores* (tesis de doctorado). Uberlândia, Brasil: Universidad Federal de Uberlândia.
- Matthies, L. et al. (1998). *Robotic perception for autonomous navigation of mars rovers*. California, Estados Unidos: Instituto de Tecnología de California.
- Moan, Y. (2009). *Swarm robotics: an extensive research review*. Selangor, Malasia: Universidad de Monash.
- Mohd, J. F., Rizon, M., Yaacob, S., Adm, A. H. y Mamat, M. R. (2006). Designing omnidireccional mobile robot with mecanum wheel. *American Journal of Applied Sciences*, 3(5), 1831-1835.
- Mondada, F. et al. (2004). Swarm-bot: A new distributed robotic concept. *Autonomous Robots*, 17(2-3), 193-221.
- Mott, R. L. (2009). *Resistencia de materiales* (5.ª ed.). México: Pearson.
- Murakami, N., Ito, A., Will, J. D., Steffen, M., Inowe, K., Kita, K. y Miyaura, S. (2008). Development of a teleoperation system for agricultural vehicles. *Computers and Electronics in Agriculture*, 63, 81-88.
- Paulsen, G. L., Farritor, S., Hunstberger, T. L. y Aghazarian, H. (2005). All terrain exploration with the cliff-bot system. Recuperado de <http://www.engineering.unl.edu/research/robots/publicationdocs/ICRA05-Paper.pdf>
- Pettinaro, G. C. et al. (2002). Swarm-robotics: A different approach to service robotics. *Proceedings of the 33rd International Symposium on Robotics*. Estocolmo, Suecia: Federacion Internacional de Robótica.
- Rosa, U. A., Cheetancheri, K. G., Gliever, C. J., Lee, S., Thompson, J., y Slaughter, D. C. (2008). An electro-mechanical limb shaker for fruit thinning. *Computer and Electronics in Agriculture*, 61, 213-221.
- Slaugther, D.C., Giles, D.K., Downey, D. (2008). Autonomous robotic weed control systems: A review. *Computer and Electronics in Agriculture*, 61, 63-78.
- Sternfeld, R., Hiiemaa, M., Sell, R., Leomar, P. y Tamre, M. (2005). Design of a module-architecture autonomous robot platform INDIGO. OST conference. Estocolmo, Suecia.
- Tabile, R. et al. (2011). Design and development of the architecture of an agricultural mobile robot. *Engenharia Agrícola*, 31(1), 130-142.
- Thueer, T., Krebs, A. y Siegwart, R. (2006). Comprehensive locomotion performance evaluation of all-terrain robots. *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2006, 4260-4265.
- Weymouth, T. y Roth-Tabak, Y. (1990). *Using and generating environment models for indoor mobile robots*. Michigan, Estados Unidos: Universidad de Michigan.