





Diseño de un robot móvil para realizar la siembra de semillas de cereales en parcelas con previa labranza

Design of a mobile robot for sowing cereal seeds in plots with prior tillage

M.S. Castro-Zenil ^{a,*}, A. Alvarado-López ^b, G.R. Peñaloza-Mendoza ^a, V. Becerra-Tapia ^a

^a Academia de Ingeniería Biomédica, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Pátzcuaro, 61615, Pátzcuaro, Michoacán, México.

^b Academia de Ingeniería en Desarrollo Comunitario, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Pátzcuaro, 61615, Pátzcuaro, Michoacán, México.

Resumen

Se realizó el diseño y la primera implementación de un robot móvil que apoya a la siembra de semillas de cereales, esto en terrenos que previamente han sido labrados, este esquema apoya a los agricultores que no tienen la posibilidad económica de tener un tractor y una sembradora de precisión. Este robot fue diseñado para sembrar, fertilizar y cerrar el surco que previamente abrió. Este robot recibe los parámetros de configuración a través de una aplicación móvil, lo que permite que pueda ser operado de forma sencilla y se adapta a diversas configuraciones de parcelas y tipos de cultivo.

Palabras Clave: Robot móvil, sembrador, automatización, cereales.

Abstract

The design and first implementation of a mobile robot that supports the sowing of cereal seeds on land that has been previously tilled, this scheme supports farmers who do not have the economic possibility of owning a tractor and a precision planter. This robot was designed to sow, fertilize and close the furrow that was previously opened. This robot receives the configuration parameters through a mobile application, which allows it to be operated in a simple way and adapts to various plot configurations and crop types.

Keywords: Mobile robot, seeder, automation, cereals.

1. Introducción

La agricultura de precisión ha revolucionado la forma en que se lleva a cabo la producción agrícola al permitir un enfoque más preciso y basado en datos. Esta disciplina combina tecnologías avanzadas, como sistemas de posicionamiento global (GPS), sensores, imágenes satelitales y análisis de datos, para optimizar el uso de recursos, mejorar la productividad y reducir el impacto ambiental. La agricultura de precisión se basa en la idea de que cada sección de un campo agrícola es única y requiere un manejo personalizado.

Según Stafford, J. (2018), la agricultura de precisión proporciona beneficios significativos a los agricultores y al medio ambiente. Con el uso de sensores y tecnologías de mapeo, los agricultores pueden recopilar datos detallados sobre el suelo, la humedad, los nutrientes y las enfermedades de los cultivos. Estos datos se utilizan para tomar decisiones

informadas sobre la siembra, la aplicación de fertilizantes y pesticidas, y la gestión del riego. Al optimizar el uso de insumos agrícolas, se pueden reducir los costos de producción y minimizar el impacto negativo en los recursos naturales.

La agricultura de precisión también permite la adopción de prácticas de agricultura de conservación, como la siembra directa y la aplicación variable de insumos. Estas prácticas ayudan a minimizar la erosión del suelo, conservar la humedad y mejorar la salud del ecosistema agrícola en general. Además, mediante el monitoreo constante de los cultivos, los agricultores pueden detectar problemas tempranamente y tomar medidas correctivas, lo que reduce las pérdidas y mejora la calidad de los productos.

La agricultura de precisión ha transformado la forma en que se maneja la producción de cereales al permitir un enfoque más preciso y basado en datos. Esta disciplina utiliza tecnologías avanzadas y análisis de datos para mejorar la eficiencia y la

*Autor para correspondencia: mcastro@itspa.edu.mx

Correo electrónico: mcastro@itspa.edu.mx (Mario Salvador Castro-Zenil), aalvarado@itspa.edu.mx (Alma Alvarado-López), grey@itspa.edu.mx (Guillermo Rey Peñaloza-Mendoza), vikshelby.500@gmail.com (Víctor Becerra-Tapia).

rentabilidad de los cultivos de cereales, al tiempo que reduce el impacto ambiental. Mediante el uso de sistemas de posicionamiento global (GPS), sensores y herramientas de análisis, los agricultores pueden maximizar el rendimiento y la calidad de sus cultivos de cereales de manera personalizada y sostenible.

Según Esperbent (2016), la agricultura de precisión ha demostrado ser especialmente beneficiosa en la producción de cereales. Mediante el mapeo y el análisis de variables clave, como la calidad del suelo, los niveles de nutrientes y la humedad, los agricultores pueden tomar decisiones informadas sobre la aplicación de fertilizantes, la siembra y el riego. Estas decisiones se basan en las necesidades específicas de cada área del campo, lo que permite un uso más eficiente de los recursos y una mejora en la productividad del cultivo.

La aplicación de la agricultura de precisión en la producción de cereales también ha permitido el desarrollo de prácticas de manejo más precisas y eficientes. Por ejemplo, la siembra variable ajusta la densidad de siembra de acuerdo con las condiciones locales, optimizando la distribución de las semillas y asegurando una emergencia uniforme de las plantas. Del mismo modo, la aplicación variable de fertilizantes y pesticidas permite adaptar las cantidades aplicadas según las necesidades de cada área, evitando el desperdicio y minimizando el impacto ambiental.

Además, la agricultura de precisión ha permitido un monitoreo continuo y en tiempo real de los cultivos de cereales. Los sensores y las imágenes satelitales proporcionan información actualizada sobre el estado de los cultivos, lo que permite detectar problemas tempranamente, como enfermedades o estrés hídrico, y tomar medidas correctivas de manera oportuna. Esto ayuda a reducir las pérdidas de cultivos y a mejorar la calidad final de los cereales.

La agricultura de precisión ofrece numerosos beneficios en términos de eficiencia y sostenibilidad, pero también implica costos adicionales en comparación con los métodos agrícolas convencionales. La implementación exitosa de la agricultura de precisión requiere inversiones en tecnologías avanzadas, capacitación, infraestructura y análisis de datos. Es fundamental que los agricultores comprendan y evalúen cuidadosamente los costos asociados antes de adoptar estas tecnologías, asegurándose de que los beneficios a largo plazo justifiquen la inversión inicial.

Según Monteiro et al. (2021), los costos de implementación de la agricultura de precisión pueden variar según el tipo de tecnología utilizada y las necesidades específicas de cada finca. Las inversiones iniciales pueden incluir la adquisición de equipos de GPS, sensores, sistemas de mapeo, software de análisis de datos y hardware necesario para su integración en maquinaria agrícola existente. Estos costos pueden ser significativos y varían en función del tamaño de la finca y la escala de implementación.

Además, es esencial considerar los costos continuos asociados con la agricultura de precisión. Esto incluye los gastos de mantenimiento y calibración de equipos, la actualización de software y hardware, así como los costos de conectividad y almacenamiento de datos. Asimismo, la capacitación del personal en el uso adecuado de las tecnologías y el análisis de datos puede requerir inversiones adicionales en tiempo y recursos.

Sin embargo, es importante destacar que, si se implementa de manera efectiva, la agricultura de precisión puede generar

ahorros y beneficios económicos a largo plazo. Por ejemplo, la optimización en la aplicación de insumos agrícolas, como fertilizantes y pesticidas, puede reducir los costos y minimizar el desperdicio. Además, el monitoreo preciso de los cultivos permite una detección temprana de problemas y una toma de decisiones más informada, lo que puede mitigar pérdidas y mejorar el rendimiento.

El costo de comprar un tractor y una sembradora de precisión puede variar considerablemente dependiendo de varios factores, como la marca, el modelo, las características y el país o región en el que se realice la compra. El costo de un tractor puede variar ampliamente según su tamaño, potencia y características adicionales.

Los tractores nuevos pueden tener un precio que oscila desde unos pocos miles de dólares hasta más de cien mil dólares. Los tractores más pequeños y básicos suelen ser menos costosos, mientras que los tractores más grandes y equipados con tecnología avanzada pueden ser considerablemente más caros. En general, podrías esperar que el costo de un tractor nuevo esté en el rango de al menos \$20,000 USD a \$100,000 USD o más, dependiendo de las especificaciones.

Al igual que con los tractores, el costo de una sembradora de precisión puede variar según el tamaño, la capacidad y las características específicas. Las sembradoras de precisión modernas suelen estar equipadas con tecnología avanzada, como sistemas de dosificación y distribución precisa de semillas, control de profundidad y sistemas de monitoreo. Según el tamaño y la complejidad, el costo de una sembradora de precisión nueva puede oscilar entre \$30,000 USD y \$150,000 USD o más.

En el campo de la agricultura de precisión, los robots para la siembra han surgido como una tecnología prometedora que ofrece ventajas significativas en términos de eficiencia y precisión. Estos robots autónomos o controlados remotamente están diseñados para realizar la siembra de semillas de manera precisa y eficiente, optimizando el proceso agrícola y mejorando la productividad. Con su capacidad para operar en diversas condiciones y terrenos, los robots para la siembra están revolucionando la forma en que se lleva a cabo este importante paso en la producción de cultivos.

Según Zhang et al. (2018), los robots para la siembra representan un avance clave en la automatización agrícola. Estos sistemas están equipados con tecnología avanzada, como sistemas de posicionamiento global (GPS), sensores y actuadores, que les permiten navegar por el terreno, detectar obstáculos y realizar la siembra de manera precisa. La precisión de estos robots es fundamental, ya que asegura una distribución uniforme de las semillas y evita el desperdicio de recursos.

En general, en el campo mexicano se pueden encontrar diferentes niveles de automatización. Por un lado, se utilizan maquinarias y equipos básicos, como tractores y herramientas manuales, para llevar a cabo tareas como la preparación del suelo, la siembra y la cosecha. Estos equipos son comunes y ampliamente utilizados en la mayoría de las áreas agrícolas de México.

Sin embargo, en los últimos años ha habido un aumento en la adopción de tecnologías más avanzadas, como sistemas de riego automatizados, sensores para monitoreo de cultivos y maquinaria agrícola con capacidad de GPS y control de precisión. Estas tecnologías están siendo implementadas en

diversas regiones y cultivos en México, especialmente en grandes explotaciones agrícolas y cultivos de alto valor económico.

Además, se están explorando y aplicando tecnologías emergentes, como drones agrícolas para el monitoreo de cultivos y la detección temprana de enfermedades, sistemas de agricultura de precisión para la optimización del uso de insumos y técnicas de manejo de datos para la toma de decisiones basada en información precisa.

Aunque el grado de automatización en el campo mexicano aún puede considerarse en desarrollo, se observa un creciente interés y adopción de tecnologías agrícolas avanzadas para mejorar la eficiencia, la productividad y la sostenibilidad en la producción agrícola del país.

2. Metodología

El desarrollo de esta investigación está dada a través de la revisión documental de los procesos de automatización en los cultivos en el campo mexicano, en particular en el campo michoacano. Posteriormente se definieron los objetivos de la investigación, lo que permitió establecer las actividades para la consecución de los mismos.

2.1. Objetivo General

Realzar un prototipo de robot móvil que logre sembrar semillas de cereales.

2.2. Objetivos Específicos

- Diseñar un modelo de robot móvil que pueda abrir un surco de entre 2 a 5 centímetros de profundidad.
- Diseñar un sistema de ministración de semillas.
- Diseñar un sistema de irrigación de fertilizante.
- Diseñar una aplicación móvil para el control de parámetros.

3. Desarrollo

En el estado de Michoacán de Ocampo, México, el campo tiene grandes atrasos, y esto es un parámetro para describir la mayoría de los campos agrícolas del país. Los agricultores que cuentan con tecnología como lo son tractores, son pequeños y en su mayoría viejos, y la inversión en sembradoras de precisión y tractores o equipos es algo que está fuera de las posibilidades de los agricultores, por lo tanto, se busca generar un robot que apoye a este sector.

Se parte de la base que los campos ya han sido cultivados con anterioridad, que la tierra ya está suelta, lo que permitirá que esta herramienta pueda operar sin el apoyo de un tractor que haca la tierra, o que el agricultor arará el campo y lo preparará para la primera siembra.

La segunda particularidad es que este prototipo trabajará sobre la siembra de cereales, en un inicio este desarrollo solo trabajara con estas semillas, debido a que la siembra de cereales tiene ciertas características que permiten que este prototipo pueda ser probado y que establezca el camino para

que en trabajos futuros pueda buscarse el apoyo para la fabricación de un modelo que sea llevado a campo.

Bajo el modelo de la agricultura de precisión, este prototipo nos permitirá mapear la cantidad de semillas regadas para el posterior análisis del rendimiento del cultivo, lo que permitirá analizar las condiciones del suelo vs el rendimiento del mismo para buscar unificar las condiciones y tener un mayor rendimiento de cultivo.

La primera variable a considerar es la profundidad en la que se deben de depositar las semillas, de acuerdo al tipo de semilla el grado de profundidad a la que se debe de abrir el canal es de 2 a 5 cm. Esto también dependerá del suelo y sus características, este es un factor que dependerá en muchas ocasiones de la experiencia del agricultor, el cual ya conoce la calidad de la semilla, las características de su parcela e incluso la estación del año en que se realice la siembra.

Para atender a esta variable se implementó un servomotor que permita manipular la distancia a la que la cuña debe de bajar para lograr la profundidad deseada. Cabe resaltar que dicha profundidad será suministrada a través de la aplicación móvil que nos apoyará para establecer los parámetros necesarios para la operación del robot.

El servo que se utiliza para este prototipo es el DS3230MG de la marca DSSERVO (ver Figura 1 y Figura 2), el cual alcanza un torque de 29.5 kg a 5v y hasta 34.5 kg a 6.8v. De 0o a 270o tiene un ciclo de señal a 50Hz con un high time de 0.5 a 2.5 ms en sentido antihorario, mientras que para un giro de 360o continuo ocupa 1 ms en sentido horario, 1.5ms para el paro y 2 ms para el giro en sentido antihorario.



Figura 1: Servomotor DS3230MG.

Para la pala que nos permitirá cerrar la zanja después de depositar la semilla también se utilizará este servomotor.

Para el movimiento del robot se pensó en motores de torque que además permitan a través de encoders, para este prototipo se utilizó el GM25-350, que es un motor que nos da un buen torque y que nos permite conocer la distancia recorrida, ver Figura 3.

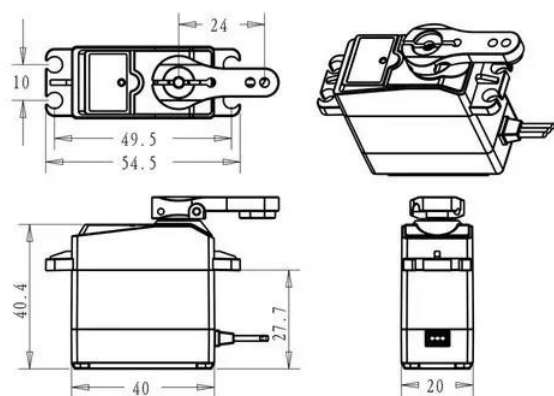


Figura 2: Medidas del DS3230MG.



Figura 3: Motor GM25-350 con Encoder.

robot desde la aplicación móvil deben de incluir el largo del terreno, la separación entre las líneas de siembra y el ancho del terreno, lo cual le permitirá iniciar y terminar el proceso de forma autónoma. Además, deberá de indicársele si inicia en el extremo izquierdo o derecho del terreno para que el robot identifique si debe de dar los giros en sentido horario o sentido antihorario.

Una vez que se tiene la operación del movimiento del robot el siguiente paso es la implementación del proceso para depositar la semilla. Para esto pensó en utilizar de nuevo un servomotor que permitiera el proceso para la apertura y cierre de un compartimiento que permite el riego de las semillas.

Los cereales no ocupan una siembra de semilla a semilla, de forma artesanal después de realizar los surcos en la tierra labrada se aventaba la semilla en forma de “lluvia”, por lo tanto, no debemos de preocuparnos por soltar de una semilla en una semilla, sino que podemos generar un proceso de apertura y cierre y que por la gravedad nos permita que las semillas se esparzan en el canal que abrió la cuña del robot.

La cantidad en gramos que repartieron en el recorrido o “línea” de siembra nos permitirá mapear después la cosecha de esa línea y nos permitirá conocer la eficiencia del suelo para ese cultivo.

Este proceso de deposición de la semilla entonces se da a través del llenado de un depósito que desemboca en un embudo y este tendrá una paleta que cierra el compartimiento para el llenado de la paleta para que en su movimiento de apertura “riegue la semilla”. La velocidad con la que se hace este movimiento de apertura y cierre determinará la cantidad de semillas que se rieguen.

Esta también relacionado con la velocidad del robot, si el robot se mueve rápido y la apertura/cierre de la paleta es lento entonces se regará menor cantidad de semilla. DE forma inversa el lento recorrido del robot y rápido proceso de apertura y cierre de la paleta permitirá la mayor deposición de semilla por distancia lineal del recorrido.

Estos parámetros serán también controlados por la aplicación móvil y su adecuación podrá darse a través de la experiencia del agricultor, pues depende de muchos factores. En un trabajo futuro, con la realimentación de las cosechas, estos parámetros podrían calcularse de forma automática brindándole al robot una completa autonomía.

Otra de las consideraciones que se tomaron es la fertilización en el proceso de siembra. El utilizar fertilizantes líquidos es una parte importante del proceso y que se ha vuelto una práctica común para mejorar la cantidad y la calidad de la cosecha. Este proceso proporciona nutrientes esenciales a las plantas que ayudan a su mejor crecimiento y su eficiente aplicación ayuda a aumentar significativamente el rendimiento del cultivo.

Para esto se utilizó una pequeña bomba para la dispersión del líquido que es la Brushless DC Pump AD20P-1230C (ver Figura 4), que nos da hasta 240 L/H, la dispersión del fertilizante es por atomización y es otro de los parámetros que pueden configurar desde la aplicación, esto no permitirá controlar la cantidad de fertilizante que se puede utilizar por unidad cuadrada de medida (metros o cm).

Esta función al momento está dada por un proceso de cálculo directo de la velocidad de movimiento del robot que nos permite programar la cantidad de tiempo que permanece encendida la bomba para lograr una correcta dispersión del fertilizante.

Para calcular la distancia recorrida, es necesario tener en cuenta algunos parámetros específicos del encoder, como su resolución o cuentas por revolución. La resolución del encoder se refiere al número de pulsos o cuentas generados por el encoder en una revolución completa del eje.

Al conocer el número de pulsos o cuentas generados por el encoder y la resolución de este, así como la circunferencia del eje en el que está montado, puedes calcular la distancia recorrida con la fórmula (1):

$$Distancia = \frac{Cuentas}{Resolucion} \times Circunferencia. \quad (1)$$

Donde:

- Cuentas es el número de pulsos o cuentas registrados por el encoder.
- Resolución es la resolución del encoder, es decir, el número de pulsos o cuentas por revolución.
- Circunferencia del eje es la longitud de la circunferencia del eje o rueda en la que se encuentra montado el encoder.

Para poder trabajar con el encoder se hizo uso de la librería Encoder.h, que está disponible para Arduino, de esta forma podemos indicarle al robot el tamaño de la parcela que debe de recorrer, al llegar al final del recorrido indicado el robot girará 90o sobre su eje (el giro que se logra al mover las ruedas de un lado y parar las del otro lado, no es completamente sobre su eje pero es la aproximación que se toma) y avanza de nuevo para volver a dar el giro de 90o y empezar el trabajo nuevamente.

Bajo esta metodología se realizará una siembra en una especie de “serpentin”. Para esto los datos que alimentarán al



Figura 4: Bomba de Agua AD20P-1230C.

Este proceso es el que debe de prestarse mayor atención, pues el desgaste de encendido apagado de la bomba puede llevar a cambiar la bomba por otra que tenga mayor tiempo de vida o que soporte de mejor manera este desgaste.

Por último, la elección de la tarjeta que nos permitirá controlar el robot y la comunicación con la aplicación móvil. Para esto elegimos el módulo ESP32 DevKitC V4, que cuenta con un CPU Xtensa dual core de 32 bits a 240 MHz. Además, cuenta con conectividad Bluetooth V4.2 BR/EDR y BLE.

Esta placa además cuenta con 4 interfaces I2C y dos interfaces I2C y 3 UART, lo que nos permitirá la coexistencia con todos los dispositivos que integran al robot, ver Figura 5.

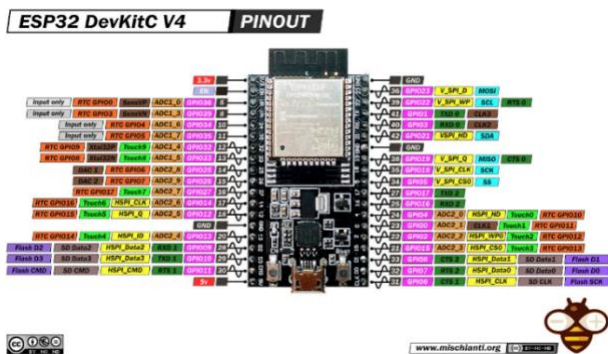


Figura 5: PinOut ESP32 DevKitC V4.

4. Resultados

Se generó una primera versión del prototipo el cual cumple con las tareas que se propusieron, esta primera versión cuenta con llantas, aunque no es lo ideal para el trabajo nos permitió mayor facilidad para el cálculo de la distancia recorrida, ver en la Figura 6. El posterior trabajo se ha realizado a través del diseño de un robot que utiliza orugas para un mejor agarre y evitar que el robot pudiese atascarse en la parcela o que patinara y con esto se obtuviera un valor erróneo de la distancia recorrida, ver Figura 7.



Figura 6: Versión 1 del prototipo de frente.



Figura 7: Versión 1 del prototipo Costado.

Se diseñaron los sistemas de cuña tanto para el frente como para la parte posterior del modelo, la cual cerraría la zanja dejando la parcela lista para el riego y el crecimiento de la planta, ver Figura 8.

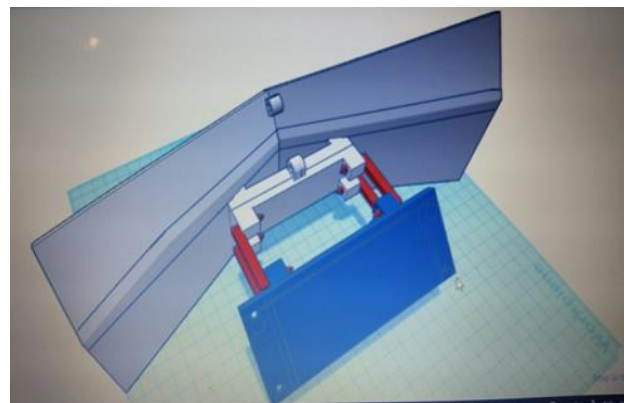


Figura 8: Diseño de la pala de Cierre.

Se diseñaron las orugas, los gearbox y las track wheels que permiten al robot cambiar su disposición y tracción para ser más eficiente. De igual forma se diseñó la dispensadora de semillas, de forma tal que pueda ser adaptada a las nuevas disposiciones del robot, ver Figura 9.

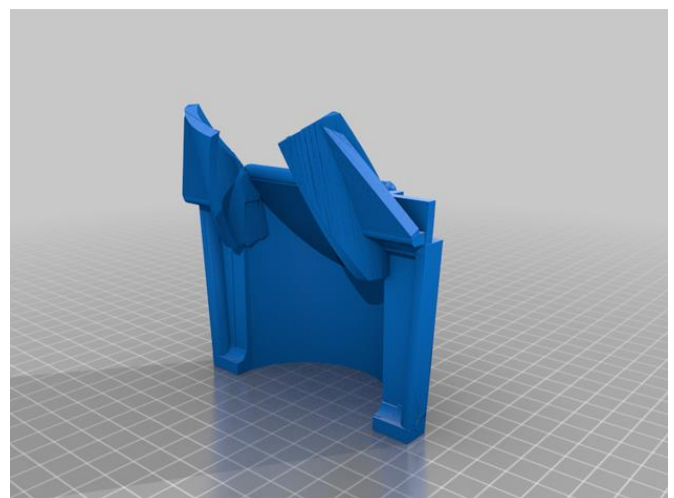


Figura 9: Diseño de la esparcidora.

En la Figura 10 se tiene un modelado de las conexiones y los componentes que controlan al robot móvil.

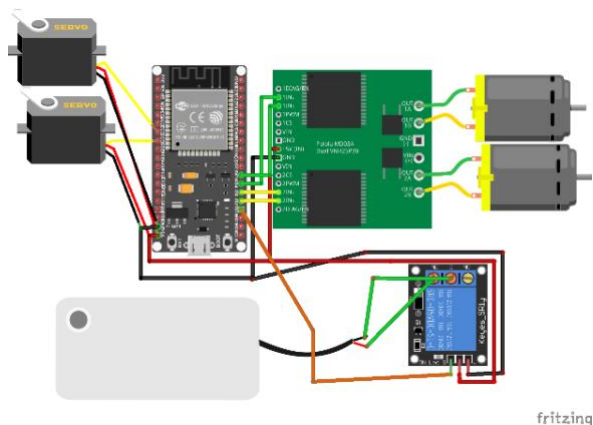


Figura 10: Diagrama de conexiones.

5. Conclusiones

En la Figura 10 observamos el diagrama de conexión que se siguió para este robot, el cual en sus primeras pruebas trabaja de forma consistente, las pruebas realizadas fueron en unas pequeñas parcelas experimentales que se encuentran en la Institución y que han sido labradas y sembradas con anterioridad para experimentación por alumnos de la carrera de Ingeniería en Desarrollo Comunitario, en este terreno el robot trabajo de forma adecuada, pudiendo abrir la zanja, depositando las semillas en un número que se consideró apropiado por el Ing. Agrónomo encargado de esta área experimental, en el riego del fertilizante se tuvieron problemas al regar en mayor cantidad de lo que se necesitaba, siendo este uno de los principales parámetros en que los que se debe de trabajar para la segunda versión del prototipo, el cierre de la línea en la parcela fue correcto.

La medición de la efectividad de la siembra no puede ser comentada en este artículo debido a que a la fecha de presentación de este trabajo las plantas ya han germinado, pero tienen aún un crecimiento pequeño.

El costo del robot en tamaño real es un estimado, pues los costos de los motores y el metal será relativo al costo del dólar, pero se estima un costo aproximado de \$62 500.00.

Por último, en la figura 11, tenemos la interface de la aplicación, en la cual podemos controlar todos los parámetros, desde el tipo de semilla, las dimensiones de la parcela, la distancia entre líneas de siembra, la velocidad del robot, si el giro del robot será horario o antihorario, la cantidad de fertilizante que será utilizado, etc.

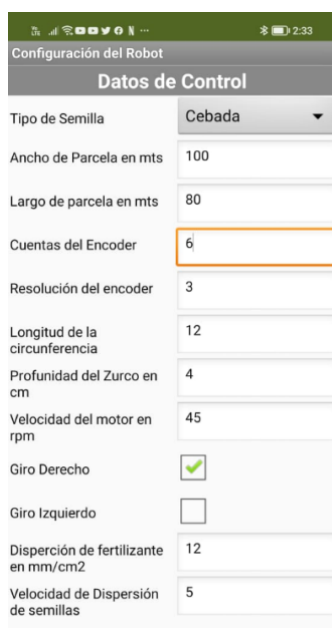


Figura 11: Ventana de captura de parámetros de la app.

Referencias

Esperbent, C. (2016). Robots: la próxima revolución del campo: Desarrollos argentinos que transformaron el trabajo en el campo. RIA. Revista de investigaciones agropecuarias, 42(1), 8-13. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=86445998004>.

Monteiro, A., Santos, S., Gonçalves, P. (2021). Precision Agriculture for Crop and Livestock Farming-Brief Review. Animals: an open access journal from MDPI, 11(8), 2345. <https://doi.org/10.3390/ani11082345>

Ortega Quiñonez, L. H., Silva García, N., Rueda Sánchez, O. E., Roa Prada, S. (2023). Desarrollo de un sistema de navegación autónoma en robot móvil tipo oruga para apoyo en tareas de siembra en campos caficultores. Revista colombiana de tecnologías de avanzada (RCTA), 2(38), 38-45. <https://doi.org/10.24054/rcta.v2i38.1275> (Original work published 26 de junio de 2022)

Sharma, S. (2023). Precision Agriculture: Reviewing the Advancements, Technologies, and Applications in Precision Agriculture for Improved Crop Productivity and Resource Management. 4. 41-45. 10.26480/rfna.02.2023.41.45.

Stafford, J. (2018). Precision agriculture for sustainability (1st ed.). Burleigh Dodds Science Publishing. <https://doi.org/10.1201/9781351114592>

Zhang, Q., Tan, M., Zhang, X., Liu, J., Zhang, Y. (2018). Design and experiment of an autonomous rice transplanter. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 90(3-4), 497-512.