



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

**POSGRADO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO
INTEGRAL DEL AGUA**

**VEHÍCULO TERRESTRE NO TRIPULADO CON MECANISMO
PARA SEMBRAR MAÍZ**

**TESIS QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO
MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA**



PRESENTA:

DAVID IVÁN SÁNCHEZ CHÁVEZ

DIRECCION GENERAL ACADEMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXAMENES PROFESIONALES

Chapingo, Estado de México, enero de 2018.



**VEHÍCULO TERRESTRE NO TRIPULADO CON MECANISMO PARA SEMBRAR
MAÍZ**

Tesis realizada por David Iván Sánchez Chávez bajo la dirección del comité asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

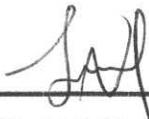
MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

Director:



Dr. Pedro Cruz Meza

Asesor:



Dr. Noé Velázquez López

Asesor:



Dr. Agustín Ruíz García

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico para mis estudios de maestría.

A los miembros de mi comité por su compromiso y muy valiosa guía con el desarrollo de este trabajo de investigación: Dr. Pedro Cruz Meza, Dr. Noé Velázquez López, Dr. Agustín Ruíz González.

A todos los compañeros que contribuyeron en este proyecto de alguna u otra manera, Armando Reyes, Norberto Cuapantecatl, Gerardo Ruiz, Alejandro Reyes y los demás compañeros del posgrado, los compañeros del DIMA: Swamy, Cesar Pílon, Cesar Morales; este ha sido el primer paso y se dio en equipo.

DEDICATORIA

A mi familia por su apoyo total. Mis padres que siempre están para recordarme estar agradecido de lo que hago, a mis hermanos que siempre me ayudaron y me impulsan a seguir mejorando como persona: Elsa, Luis, Ismael y Diego ustedes son una fuente de inspiración.

A mis amigos por su compañía estos años. Sobre todo a Rio, Ale y Javi; porque siempre tienen la broma adecuada para que los días se sientan mejores y la música para mantener la cabeza en su lugar, y Sara que nunca olvidó preocuparse porque estuviera haciendo mi trabajo.

A Thal por alentarme a ser mejor cada día, alegrar mis semanas, y hacerme sentir que no hay nada lo suficientemente difícil para no intentarlo.

DATOS BIOGRÁFICOS

David Iván Sánchez Chávez se crio en el municipio de Alpatláhuac en el estado de Veracruz, México. Curso su educación básica en las escuelas de su municipio de origen: la primaria “Emiliano Zapata” y la telesecundaria “Independencia”. En el año 2006 fue aceptado en la preparatoria Agrícola, donde culminó su preparación media superior en el año 2009. Se incorporó a los estudios de licenciatura en el departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo, los cuales concluyó en el año 2013.

Obtuvo su título profesional el año 2015, en el cual ingresó al programa de Maestría en Ingeniería y Uso integral del Agua en la línea de investigación de mecanización agrícola.

ÍNDICE DE CONTENIDO

I.	INTRODUCCIÓN.....	1
II.	REVISIÓN DE BIBLIOGRAFÍA.....	5
	2.1 Vehículos terrestres no tripulados.....	5
	2.2 Robótica aplicada a la agricultura.....	6
	2.3 Encoders.....	15
	2.4 Motores.....	17
	2.5 Tarjetas de control.....	19
	2.6 Visión artificial.....	20
	2.7 siembra mecánica del maíz.....	21
	2.7.1. Parámetros de siembra.....	21
	2.7.2 sistemas de siembra.....	22
	2.7.3 densidades de siembra.....	22
	2.7.4 dosificación de semillas.....	24
III.	DESARROLLO.....	27
	3.1 Diseño conceptual.....	29
	3.1.1 Identificación del cliente.....	30
	3.1.2 Determinación de los requerimientos del cliente.....	31
	3.1.3 Ponderación de los requerimientos del cliente.....	31
	3.1.4 Estudio comparativo.....	32
	3.1.5 Traducción de los requerimientos del cliente en términos mensurables.....	36
	3.1.6 Fijación de las metas de diseño.....	36
	3.1.7 Estructura de funciones.....	37
	3.2 Diseño de detalle.....	47
	3.2.1 selección de las llantas.....	47
	3.2.2 Motor.....	47
	3.2.3 sistema de transmisión.....	52
	3.2.4 Selección de rodamientos.....	56
	3.2.5 chasis.....	59
	3.2.6 Mecanismo de siembra.....	59
	3.2.7 Sistema electrónico.....	63

3.2.8 drivers.....	63
3.2.9 Tarjeta de control.....	66
3.2.10 Encoders	67
3.2.11 Cámara web.	70
3.2.12 Unidad de medida inercial (IMU).....	71
3.2.13 Sistema de alimentación eléctrica.	74
3.3 Construcción.	74
3.3.1 chasis.	75
3.3.2 sistema de transmisión.	75
3.3.3 Adaptación del mecanismo de siembra	78
3.3.4 Conexión del sistema electrónico.....	81
IV. RESULTADOS.....	81
4.1 Sistema de Control del vehículo.	81
V. CONCLUSIONES.....	90
VI. LITERATURA CITADA.....	93

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Densidades óptimas y densidades recomendadas por el CIMMYT para los maíces tropicales para zonas bajas.	23
Cuadro 2. Ponderación de los requerimientos.	31
Cuadro 3. Comparación entre las opciones comerciales (benchmarking).	35
Cuadro 4. Requerimientos planteados para el diseño.	36
Cuadro 5. Principios de funcionamiento propuestos para cumplir con cada subfunción.	42
Cuadro 6. Evaluación de las variantes de diseño seleccionadas para el vehículo.	43
Cuadro 7. Propuesta seleccionada.	44
Cuadro 8. Configuración de manejo IBT-3.	65
Cuadro 9. Características Cámara Logitech c920 HD pro.	71
Cuadro 10. Características motorreductor Faulhaber.	79
Cuadro 11. Resumen de los componentes del UGV,	82

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Encoder incremental.	16
Figura 2. Encoder absoluto.	17
Figura 3. Circuito usado para producir PWM, variación del voltaje promedio mediante el seccionamiento en el tiempo.	18
Figura 4. Circuito de puente H con compuertas lógicas.	19
Figura 5. Control de velocidad por PWM de manera digital.	19
Figura 6. Dosificador mecánico de disco.	26
Figura 7. Dosificador por cinta perforada.	27
Figura 8. Diseño conceptual de eco robot.	32
Figura 9. Bonirobot (robot agrícola).	33
Figura 10. Rowbot, robot agrícola para la aplicación de nitrógeno en maíz.	34
Figura 11. Diagrama de la función principal o global.	37
Figura 12. Primer prototipo Robot agricultor.	38
Figura 13. Chasis del primer prototipo.	39
Figura 14. Rueda y motor del primer prototipo.	39
Figura 15. Fuente de poder.	40
Figura 16. Controlador L298N.	40
Figura 17. Diagrama de control.	40
Figura 18. Diagrama que incluye todas las subfunciones y relaciones que se buscan en la maquina a diseñar.	41
Figura 19. Dibujo del ugv propuesto.	44
Figura 20. Curiosity, robot tipo rover utilizado en la exploración de Marte.	45
Figura 21. Dibujo 3D de del prototipo del vehículo.	46
Figura 22. Llantas seleccionadas.	47
Figura 23. Motorreductores seleccionados.	51
Figura 24. Tipo de tacómetro utilizado analógico y de contacto.	52
Figura 25. Ubicación de la cadena (a) (azul), las catarinas(b) y los rodamientos(c) en el UGV.	56
Figura 26. Información de rodamientos del manual de la marca Timken.	57
Figura 27. Dimensiones principales del rodamiento implementado en el vehículo.	58
Figura 28. Rodamiento montado en el eje.	58
Figura 29. Diseño conceptual de mecanismo de siembra, por biela-manivela.	60
Figura 30. Diseño conceptual de dosificador por disco vertical y tolva para semillas.	60
Figura 31. Diseño conceptual actuador para microlabranza.	61
Figura 32. Sembradora Earthway.	62
Figura 33. Abridor y cadena de la sembradora Earthway 1001b.	62
Figura 34. Driver para control de motores IBT-3.	64
Figura 35. Conexión del driver I298n al arduino para controlar el giro del motorreductor.	66

Figura 36. Arduino MEGA 2560.	67
Figura 37. Características técnicas del Encoder EE-SX1103.	68
Figura 38. Diagrama eléctrico para la conexión del encoder.	68
Figura 39. Soldadura de los componentes para el circuito.	69
Figura 40. Conexión de los canales A y B, tierra y 5V del Encoder.	69
Figura 41. Encoder conectado al eje motriz de la rueda.	69
Figura 42. Cámara Logitech c920 utilizada, en el sistema de visión.	70
Figura 43. IMU MPU 9250.	72
Figura 44. Pines utilizados para la conexión de la IMU.	73
Figura 45. Estructura principal primer prototipo(izquierda), final(derecha).	75
Figura 46. Bujes, rodamientos y brazos de soporte de las ruedas.	76
Figura 47. Buje acoplado a las llantas.	76
Figura 48. Ejes motriz a la salida de la reducción del motor, con buje(izquierda). Ejes inducidos para las ruedas, con desbastes para fijar las piezas(derecha). .	77
Figura 49. Brazos de soporte de las ruedas y la transmisión.	77
Figura 50. Catarinas del sistema de transmisión.	77
Figura 51. Montaje del sistema de transmisión.	78
Figura 52. Motorreductor Faulhaber.	79
Figura 53. Placas colocadas para sujetar el motor a la sembradora.	80
Figura 54. Posición de la sembradora.	81
Figura 55. Estado del prototipo durante el Field Robot Event 2017.	84
Figura 56. Control bluetooth Sony.	85
Figura 57. Diagrama de flujo del control principal del robot.	86
Figura 58. Diagrama de flujo del control servovisual implementado.	88
Figura 59. Información mostrada por el software de control servovisual.	89

Vehículo terrestre no tripulado con mecanismo para sembrar maíz

Unmanned ground vehicle with mechanism for corn seeding

Sánchez-Chávez David Iván¹; Cruz-Meza Pedro¹

¹Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua

Correos: d.ivansanchez@gmail.com; pcruzmeza@yahoo.com.mx

Resumen

Este trabajo describe el desarrollo mediante la metodología del diseño mecánico y la robótica, del prototipo de un vehículo terrestre no tripulado tipo skid-steer, con características y componentes para sembrar maíz, tomando en cuenta las dimensiones de los espacios dedicados a la agricultura, las velocidades típicas de trabajo, y la simplicidad para el mantenimiento. Para ello se hizo una estructura principal de aluminio, en la cual se ubicaron los componentes seleccionados más adecuados: llantas, baterías de alimentación a 12 V, sensores ultrasónicos, encoders, cámaras, drivers, tarjeta de control; se hizo el diseño y construcción de: transmisión mecánica de cadena, y sistema de suspensión, y la adaptación de una sembradora de jardín. Se realizó el control del movimiento mediante el uso de PWM para variar la velocidad de las ruedas y así realizar giros, esto se usó también para el sentido de giro del disco vertical de dosificación de semillas. La plataforma obtenida permitió explorar el uso de nuevas formas de trabajo, presentando una alternativa para hacer frente a las exigencias entorno a las labores agrícolas, como la necesidad de producir más y el daño causado al suelo por la maquinaria actual.

Descriptores: visión artificial, ugv, sensores, robótica, programación, skid-steer

Vehículo terrestre no tripulado con mecanismo para sembrar maíz

Unmanned ground vehicle with mechanism for corn seeding

Sánchez-Chávez David Iván¹; Cruz-Meza Pedro¹

¹Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua

Correos: d.ivansanchez@gmail.com; pcruzmeza@yahoo.com.mx

Abstract

This paper describes the development, using the methodology of mechanical design and robotics, of a prototype of a skid-steer type unmanned ground vehicle, with characteristics and components to seed corn, taking into account the dimensions of agricultural places, typical working speeds, and simplicity for maintenance. For this purpose, a main aluminum frame was made, in which the most suitable selected components were placed: wheels, 12 V batteries, ultrasonic sensors, encoders, cams, drivers, control board. Also, a mechanical chain transmission, a suspension system and an adaptation of a garden seeder were designed and made. Movement control was made by using PWM to change the speed of the wheels to thus make turns; this was also used for the spin of the seeder's vertical dosing-disc. The platform obtained allowed exploring the use of new ways to work, introducing an alternative to face the needs around farming, like the need to produce more and lessen the damage caused to the soil by current machinery.

Keywords: artificial vision, ugv, sensors, robotics, programming, skid-steer

I. INTRODUCCIÓN.

Según proyecciones actuales, la población mundial alcanzará aproximadamente los 9 000 millones de habitantes para el año 2050 esto según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2016). La migración del campo a la ciudad continúa en muchas partes del globo, dando lugar a un planeta que pronto tendrá muchos más habitantes del medio urbano que del rural. Dado que los adultos jóvenes constituyen la mayoría de los movimientos migratorios, el éxodo del campo a la ciudad suele acelerar el envejecimiento demográfico en las zonas rurales, determinando grandes contracciones en la fuerza rural de trabajo. Esto tendrá profundas consecuencias en la agricultura, al llegar a ser el transporte y la elaboración de los productos alimenticios y la capacidad de la gente para comprarlos aún más esenciales como componentes de la seguridad alimentaria. (FAO, 2016).

Paralelamente al crecimiento del número de seres humanos, ha ido avanzando la degradación de los recursos naturales. En un momento en que se necesita producir más alimentos, la degradación de las tierras y el abuso de sustancias químicas comportan una mengua de la producción agrícola (FAO, 2016). Para hacer frente a estos problemas sociales y buscar solventar la demanda de alimentos de la población mundial será necesario intensificar la producción agrícola. La intensificación no solo es en el sentido de rendimiento y en la producción durante todo el año, sino también en el de los costos de producción (Canakci y Akinci, 2006). Por lo tanto mantener el ritmo de producción con respecto al aumento de la población, así como, reducir los altos costos debido a la mano de obra empleada en labores de cultivo, cosecha y monitoreo se está convirtiendo en un desafío para la agricultura. Una alternativa prometedora es el uso de robots agrícolas, estos tienen la capacidad de mantener la calidad del producto o trabajo (Van Henten et al., 2003). Los avances en la robótica han abierto una puerta a la utilización de robots en tareas en la agricultura que eran imposibles de realizar por el hombre, y que ahora son posibles de realizar por las

máquinas e incluso han permitido liberar al hombre de tareas riesgosas o monótonamente repetitivas.

Actualmente utilizamos maquinas cada vez más pesadas para laborar en nuestros terrenos, provocando al mismo tiempo daños por compactación que se ven claramente al momento de reparar y acondicionar el suelo para el siguiente ciclo agrícola.

Las demandas para racionalizar la imperante escasez de labor y altos costos por salarios han resultado en el uso de grandes y pesadas máquinas en la agricultura. Por lo tanto, incrementar la eficiencia de operaciones ha sido conseguido, pero al mismo tiempo, la estructura del suelo ha sido dañada y la función del suelo como un medio de crecimiento ha sido comprometida. A largo plazo, se espera que esto resulte en problemas irreversibles con el crecimiento de las plantas (Hanza y Anderson, 2005)

Esta combinación de maquinaria pesada y un suelo compactado incrementan el requerimiento de potencia y la demanda de energía para varias labores de campo, en algunos casos sube de 70 a 80% (Jensen *et al.*, 2002).

Esto puede ser reducido si empleamos un conjunto de robots trabajando como un enjambre, apoyando a las maquinas actuales de manera que se reduzca el uso de máquinas demasiado grandes. Actualmente existen sistemas de máquinas agrícolas que funcionan de manera independiente sin necesidad de una supervisión humana directa, ejemplo de esto son los vehículos aéreos no tripulados (VAN) que se utilizan entre otras cosas para monitoreo de cultivos y aplicación de productos agroquímicos; también hay tractores que pueden funcionar sin necesidad de operador para realizar diversas labores agrícolas; pero estos sistemas siguen estando hechos para técnicas de cultivo tradicionales que causan daño a los suelos agrícolas, y ya han alcanzado tamaños máximos para poder transitar en los caminos y carreteras. Los campos son compactados por las llantas en los sistemas actuales, el control espacial de la maquinaria puede ahorrar tiempo, combustible e insumos. Esto puede hacerse optimizando la planeación de rutas y controlando el tráfico de las máquinas, utilizando

vehículos ligeros que generen una baja presión en el terreno y que no causen tanto daño en el suelo. Una opción para reducir el tamaño es emplear vehículos terrestres no tripulados (VTN, o UGV por sus siglas en inglés) que en el sentido más amplio, es cualquier pieza de equipo mecanizado que se mueve a través de la superficie de la tierra y sirve como un medio para llevar o transportar algo, pero explícitamente no lleva a un ser humano.

En este proyecto se propone el desarrollo del prototipo de un vehículo terrestre no tripulado utilizando la robótica, que tenga la capacidad de moverse en espacios dedicados a la agricultura, con un mecanismo para sembrar maíz, explorando las posibilidades de este tipo de tecnología para encontrar una alternativa para reducir los daños causados al suelo por la maquinaria actual y la automatización de labores agrícolas específicas.

JUSTIFICACIÓN

La migración del campo a la ciudad continúa en muchas partes del globo, dando lugar a un planeta que pronto tendrá muchos más habitantes del medio urbano que del rural. Esto tendrá profundas consecuencias en la agricultura (FAO, 2016). Además, utilizamos maquinas cada vez más pesadas para laborar en nuestros terrenos, provocando daños por compactación que se ven claramente al momento de reparar y acondicionar el suelo para el siguiente ciclo agrícola. Una alternativa es complementar las grandes máquinas agrícolas actuales con máquinas pequeñas que sean capaces de mejorar la productividad, sin necesidad de pasar maquinaria pesada para todas las labores, y que sean una alternativa a la escasez de fuerza de trabajo en la producción de alimentos.

OBJETIVOS

Objetivo General

- Diseñar, construir y evaluar un vehículo terrestre no tripulado para sembrar maíz.

Objetivos Específicos

1. Diseñar un vehículo ligero no tripulado que pueda moverse en espacios dedicados a la agricultura.
2. Adaptar un mecanismo para realizar abrir el terreno lo suficiente para colocar semillas, seguro, eficaz y sencillo.
3. Adaptar el sistema de dosificación de semillas.
4. Generar un prototipo funcional, fácil de operar, con necesidades de mantenimiento mínimas y que cumpla las características de seguridad y productividad requeridas.

II. REVISIÓN DE BIBLIOGRAFÍA.

2.1 Vehículos terrestres no tripulados

Los vehículos terrestres no tripulados conocidos también por sus siglas VTNT, o como es más común UGV (Unmanned ground vehicle), no son otra cosa que un vehículo diseñado para ser operado de manera remota, o con la capacidad de desplazarse de manera autónoma. Los vehículos terrestres no tripulados (SUGVs) juegan un papel importante en muchas industrias, desde exploración planetaria hasta defensa militar. En un inicio estas máquinas comenzaron siendo desarrolladas con fines bélicos, pero en la actualidad son plataformas que pueden desempeñar muchas labores, un ejemplo son los tractores dirigidos por GPS. Los rovers de la NASA spirit y opportunity han explorados la superficie de marte por años, proporcionando información útil mientras requieren significativamente menos recursos comparados a las misiones tripuladas. Mientras avanza la investigación en campos tales como visión por computadora, e inteligencia artificial, la utilidad de los SUGVs solo aumentará (Smith et al, 2013).

Así pues, desde el punto de vista del control existen dos clases de UGVs: autónomos y controlados por un operador remotamente. Los cuales son utilizados en tareas en donde es peligroso, inconveniente o imposible tener un operador humano, existen diversos UGVs en tamaño y mecanismos como los vehículos de orugas y los de ruedas. Un vehículo autónomo puede ser visto como un robot móvil autónomo el cual se espera que tenga la habilidad de recolectar información acerca del ambiente, detectar objetos de interés, viajar entre puntos, etc.

Por lo tanto, el desarrollo de robots autónomos móviles necesita gran tecnología incluyendo sensado y control; existen aún muchos problemas complicados por resolver. Uno de ellos es el problema de seguimiento de una trayectoria, en particular los robots de ruedas fijas (WMRs) con deslizamiento y derrapamiento (skidding and slipping). El control de los WMRs ha recibido considerable atención a lo largo de tres décadas, porque los WMRs sin deslizamiento y derrapamiento

pertencen a sistemas mecánicos con restricciones no holonómicas (Nonami et al, 2013).

Simplificando, podemos decir que robots o sistemas holonómicos son aquellos capaces de modificar su dirección instantáneamente (en esta consideración se considera masa nula), y sin necesidad de rotar previamente. Un vehículo con un sistema de dirección como el de un coche, por ejemplo, no lo es, porque para poder desplazarse en el sentido lateral tiene que realizar varias maniobras previas. Del mismo modo, un robot con 2 ruedas es no-holonómico ya que no puede moverse hacia la izquierda o la derecha. Siempre lo hace hacia delante en la dirección definida por la velocidad de sus ruedas. Diremos que un robot es holonómico si tiene los mismos grados de libertad efectivos que controlables. En general, un robot no holonómico tiene menos grados de libertad controlables que número total de grados de libertad, mientras que si sucede lo contrario, el robot es redundante. En general, a mayor diferencia entre grados de libertad controlables y grados totales, más difícil será controlar el robot.

2.2 Robótica aplicada a la agricultura

En los años recientes la tecnología robótica ha sido cada vez más empleada en la agricultura para desarrollar vehículos inteligentes que puedan aumentar la productividad y la competitividad. (Giulio et al, 2016)

Retos en términos de economía, eficiencia en la producción y problemas ambientales, requieren innovación en términos de nuevos tipos de maquinaria, e incrementar la automatización en varios niveles de proceso, incluida tecnología robótica. El proceso de innovación ha sido detenido por varias barreras incluyendo costosa tecnología con insuficiente robustez mecánica, limitada capacidad de operación, pero sobre todo la incapacidad de desarrollar y diseñar tecnología que se integre lo suficiente con el usuario y el ambiente de trabajo dinámico. (Kondo and Ting, 1998; Kassler, 2001; Dario et al., 2004)

Este esfuerzo se debe a la búsqueda de métodos de producción nuevos que nos permitan hacer frente a la creciente demanda de alimentos, la inclusión de la

robótica en la agricultura busca llevar los sistemas de producción de alimentos al siguiente nivel.

El siguiente paso esperado es de mecanización a automatización, como uno de los posibles objetivos de la ingeniería del siglo 21. A este respecto los años más recientes han visto un aumento en la transferencia de tecnología de la robótica a la agricultura para el desarrollo de vehículos inteligentes (Tobe, 2015) que pueden llevar a ahorrar tiempo de trabajo (e.g., Klose, Möller, Vielstädte, & Ruckelshausen, 2010). Un objetivo específico es que se incremente el nivel de conducción automática de tractores e implementos en campos de cultivo, como es reconocido por Horizon (Horizon 2020 es el programa de investigación y desarrollo más grande de la Unión Europea). Esto es especialmente importante considerando la última tendencia en la agricultura de usar un grupo de vehículos cooperativos para promover el aumento de eficiencia y productividad (Reinecke, Grothaus, Hembach, Scheuren, & Hartanto, 2013).

Los primeros desarrollos de robots para la agricultura fueron abordados desde un punto de vista industrial, haciendo que se movieran siguiendo una guía de manera similar a una línea de empaque o ensamble. La introducción de robots en el trabajo agrícola implica cambios mayores en su ambiente de trabajo o de operación: nivelación del suelo, la creación de pasillos adecuado para las máquinas, etc. Esto implicaba gastos altos para la adecuación de los espacios, además de que eran sistemas muy rígidos. Esto llevo al abandono de este tipo de adaptaciones. Hoy el enfoque es crear máquinas inteligentes que sean capaces de hacer frente de manera flexible con ambientes no estructurados o semiestructurados, y también, capaces de desempeñar operaciones y actividades autónomamente. (Billingsley et al., 2008).

El desarrollo de estas máquinas trabajando de forma cooperativa y de manera sincronizada permitirá mejorar las labores agrícolas, como por ejemplo reducir el tiempo de espera cuando una máquina de trabajo agrícola se descompone y es llevada a reparación.

A pesar de que los vehículos agrícolas autoguiados usando sistemas de navegación basados en el sistema de posicionamiento global (GPS) han estado en uso práctico por algunos años, estos sistemas no proporcionan ninguna información acerca de la “dinámica” del entorno. Por ejemplo, en la mayoría de las aplicaciones agrícolas es común que esté disponible un mapa de ruta del terreno donde el vehículo opera frecuentemente. Sin embargo, no podemos ciegamente confiar en este mapa, porque puede contener errores debidos a cambios recientes en el campo causados por humanos o por la naturaleza. Además, el mapa no contiene ninguna información acerca de objetos en movimiento (e.g., personas, animales y vehículos) que pueden estar presentes en la escena y esto requiere corrección de los datos así como un conocimiento extremadamente preciso de las ubicaciones de los surcos de cultivo. Esto causa un serio problema de seguridad relacionado a cualquier tipo de navegación autónoma y operación. Además, un gran cuerpo de investigación ha sido recientemente devoto a guiar robots agrícolas dentro de los surcos del cultivo usando sensores locales que proveen una rica fuente de información incluyendo color, textura y estructura 3d (English, Ross, Ball, & Corke, 2014).

El reto es ahora el desarrollar vehículos semi o totalmente autónomos, más inteligentes, que puedan operar de manera segura en ambientes dinámicos semiestructurados o no estructurados, en los cuales humanos, animales y otras máquinas pueden estar presentes. Para abordar este asunto, los investigadores necesitan dotar al vehículo con un claro entendimiento del mundo que lo rodea. La habilidad cognitiva para percibir el ambiente es, en muchos casos, un tema de garantizar la seguridad de la gente, animales, y arriesgar maquinas caras o causar daño a la cosecha (Giulio et al, 2016).

Los robots diseñados para trabajar en espacios agrícolas y ejecutar tareas agrícolas, necesitan que la investigación se enfoque en: fusionar sensores complementarios para una adecuada localización y habilidades de sensado, desarrollar manipuladores simples para cada tarea agrícola, desarrollo de algoritmos para planeación de rutas, navegación y guiado adecuados para

ambientes afines, campo abierto y espacios conocidos a priori, e integrar operadores humanos en esta compleja y altamente dinámica situación (Bechar et al, 2016).

Ha habido muchos intentos de introducir robots o máquinas semiautomáticas en diferentes actividades del campo, tales como: trasplante, control de malezas, monitores de cultivos y del ambiente, control de plagas, cosechas de cultivos, recolección de frutos (Asimopoulos, Parisses, Smyrniaios, & Germanidis, 2013; Bak & Jakobsen, 2004; Bakker, Asselt, Bontsema, Müller, & Straten, 2010; De-An, Jidong, Wei, Ying, & Yu, 2011; Gobor, Schulze Lammers, & Martinov, 2013; Greenman et al., 2003; Hamner, Bergerman, & Singh, 2011; Kondo, Yamamoto, Yata, & Kurita, 2008; Slaughter, Giles, & Downey, 2008; Yaghoubi et al., 2013)

La mayoría de los sistemas están aún en etapa de desarrollo y no están disponibles en el mercado. Considerando que las máquinas agrícolas usualmente operan en terrenos irregulares, darle a robots autónomos o remotamente operados la capacidad de trasladarse y desempeñar diferentes labores en diferentes superficies es un reto (Tarokh, Ho, & Bouloubasis, 2013).

Para lograr que estos desarrollos lleguen al mercado y al campo agrícola es importante apoyar más investigación y desarrollo para mejorar el desempeño y reducir los costos de estos robots.

El trabajo de desarrollo en estos temas es entonces necesario para lograr el advenimiento de la automatización en la agricultura, haciéndolos accesibles a los productores agrícolas del mundo en el futuro de la misma forma que las computadoras llegaron a las oficinas en el pasado, como una herramienta tecnológica de uso diario para la mejora de las labores.

Para su implementación inmediata, aunque no se ha logrado una autonomía total en estos robots, se tienen máquinas que reducen el esfuerzo humano y que permiten automatizar el campo, pero aún es necesaria la supervisión humana, estos logros no deben hacerse menos, sino promover el uso de robots que trabajen de esta forma.

La Fundación Nacional de Ciencia de los Estados Unidos ha identificado la necesidad de robots (llamados co-robots) que sirvan como co-trabajadores y trabajen junto a o cooperativamente con personas. Estos co-robots tienen una relación simbiótica con un compañero humano, donde como equipo, ellos combinan sus relativas fortalezas para conjuntamente desempeñar una tarea. Dichos co-robots deben ser relativamente no caros y fácil de usar (Perez-Ruiz et al, 2014).

Estos robots que no tienen tecnología de punta para la identificación de su entorno de manera precisa tienen la ventaja de ser menos costosos y más viables a implementarse a mediano plazo en la agricultura, realizando labores monótonas para las personas cuidando la calidad del trabajo, permitiendo que los humanos se enfoquen labores que requieran más raciocinio, sin ser agotadoras.

La intensiva investigación en aplicar la automatización y la robótica en labores de campo ha demostrado ampliamente que es técnicamente muy factible.

La productividad agrícola se ha incrementado significativamente a lo largo de los años como resultado de la intensificación, mecanización y automatización (Nof, 2009; Zhang, 2013). Es un importante objetivo para la aplicación de varios tipos de tecnología diseñados para incrementar tanto el rendimiento del cultivo como la calidad, mientras se reducen los costos. Por ejemplo, la siembra y trasplante de precisión incrementan el tamaño promedio de las plantas y la uniformidad de la madurez de las plantas, la fertirrigación de precisión que consiste en agregar agua y nutrientes requeridos por el cultivo únicamente en el momento y lugar óptimos, disminuyen la cantidad de insumos agrícolas para la producción del cultivo y el impacto ambiental (Tremblay et al, 2011).

Al mismo tiempo que se incrementa la población mundial, el número de personas que se dedican al trabajo agrícola disminuye, y la edad promedio de los trabajadores aumenta, indicando esto que esta profesión no es lo suficientemente atractiva para las generaciones más jóvenes. A pesar de todos estos retos, la reducción de las labores que se realizan en condiciones pesadas y el

mejoramiento con esto del nivel de vida de los agricultores debería incrementar la atracción hacia esta importante labor (Bechar, 2016).

El trabajo de los robots agrícolas se desenvuelve en espacios donde ni el ambiente ni los objetos a manipular son estructurados, además de que la presencia de seres vivos requiere que muchas de las labores se hagan de manera cuidadosa y precisa para no dañar los productos, esto es un reto en términos de comercialización. Los ambientes agrícolas requieren que el robot sea capaz de moverse, a diferencia de la mayoría de los robots en fábricas o vehículos en estacionamientos (Canning, Edwards, & Anderson, 2004). En dichos ambientes, hay muchas situaciones en las que los robots autónomos fallan debido al gran número de eventos inesperados (Steinfeld, 2004). Este requerimiento de operar en ambientes no estructurados complica la aplicación de la robótica en un sistema que es difícil y caro de desarrollar. Un enfoque para reducir los costos en estos sistemas y permitir cumplir ciertas labores agrícolas con un grado de automatización mayor al presente en las máquinas agrícolas actuales es el desarrollo de corobots.

A pesar de que existen problemas para aplicar la robótica a la agricultura el desarrollo de la parte sencilla de las labores puede representar hasta un 80% de la labor total, lo que deja el otro 20 % a soluciones complejas, como algoritmos que le permitan al robot responder a eventos poco comunes.

Aunque en número limitado, algunas aplicaciones robóticas están hoy comercialmente disponibles. Estas aplicaciones fueron implementadas paso por paso, resultando en un buen desempeño de algunas labores específicas. Ejemplos incluyen robots ordeñadores robots (Halachmi, Adan, Van Der Wal, Van Beek, & Heesterbeek, 2003; Hansen, 2015; Kolbach, Kerrisk, Garcia, & Dhand, 2013) y tractores y combinadas autónomos (Bell, 2000; Schueller, 2006; Thuilot et al., 2002). El proceso de implementación para el desarrollo de estos primeros robots autónomos han indicado que los inconvenientes e ineficiencias requieren soluciones que usen las ventajas de los humanos para permitir al robot reaccionar y hacer frente a condiciones complejas y dinámicas, es decir, incorporar sistemas

colaborativos humano-robot (HRS), al menos por un tiempo (van Henten et al, 2013).

Las capacidades humanas de percepción, pensamiento y acción aún no tienen rival en ambientes con anomalías y eventos imprevistos (Tervo y Koivo, 2014); como resultado las habilidades de robots y humanos son aún complementarias (Rodríguez et al, 2003). La investigación de la relación humano-robot en un campo en constante desarrollo, evolucionando desde mecanismos en control humano directo de tipo maestro-esclavo hasta una amplia gama de robots que incorporan inteligencia artificial para muchas aplicaciones y bajo supervisión de control humana (Sheridan, 2016).

Tomando ventaja de la percepción humana y de la constancia de la máquina, y precisión en tareas específicas, se consigue un sistema simple que mejora el desempeño de la labor y reduce costos.

De acuerdo con Ceres et al (1998), la cooperación de un robot agrícola con un operador humano (HRS) ayuda a resolver tres difíciles problemas: i) manejar el robot a través del campo, de árbol a árbol y o de surco a surco; ii) detección y localización de la producción; iii) tomar y separar productos seleccionados.

En algunos casos cuando la intervención humana necesaria es lo suficientemente baja un operador humano podrá hacerse cargo de varios robots. Además de que los HRS son sistemas que garantizan más seguridad que los que no tienen supervisión.

Un robot agrícola generalmente está diseñado para realizar una labor principal, pero para ello, debe desempeñar labores secundarias, por ejemplo, un robot que tenga la función de plantar como labor principal, deberá realizar labores secundarias tales como: movimiento, sujeción de las plántulas, abrir el suelo, localizar su ubicación, etc.

Para el presente trabajo se consideraron algunas de estas tareas secundarias como la interacción con un operador humano, y el desplazamiento.

Movimiento y dirección.

Los subsistemas de movilidad y dirección interactúan con el ambiente a través del contacto con el suelo, dirigiendo el vehículo en la dirección deseada a la velocidad apropiada. De acuerdo con Grimstad et al (2015) se necesita tener muchos aspectos en cuenta en el desarrollo de un robot agrícola, tales como la necesidad de operar durante periodos de humedad sin quedar atascado o dañando la estructura del suelo, manteniendo el costo total del robot a un nivel que lo haga económicamente viable y la plataforma/chasis debe ser flexible, lo cual reduce complejidad, pero permite que todas las ruedas estén en contacto con el suelo. Estas plataformas comúnmente usadas en la agricultura, comprenden plataformas de 4 llantas con 2 o 4 llantas motrices y 2 o 4 llantas de dirección. Algunas plataformas con 6 ruedas motrices o plataformas de orugas son también usadas.

Sensado y localización.

Para los sistemas de sensado se usan en estas máquinas sensores como los encoders, que miden la posición angular de las ruedas, los acelerómetros, los giroscopios, Lidar (un sensor laser), pero los que han tenido mayor éxito comercial son los sistemas GPS, y visión por computadora. La precisión obtenida por GPS en aplicaciones ha demostrado ser de gran utilidad en el desempeño de las tareas, sin embargo, los altos costos de su implementación hacen que no sea factible su uso en todas las máquinas autónomas pensadas para trabajo agrícola. Además de que en cultivos cubiertos, se encuentran problemas para la obtención de las señales satelitales. (Rovira-Más et al, 2015).

El advenimiento de los robots agrícolas tiene el potencial de incrementar la calidad del producto fresco, reducir los costos de producción, reducir los trabajos pesados manuales, y, en algunas partes del mundo, compensar la carencia de trabajadores en algunos sectores agrícolas (Bechar, 2010).

El tamaño de los sistemas debe ser reducido. Los vehículos pequeños consumen menos energía que los grandes, y son más adecuados para requerimientos estocásticos y dinámicos. Los vehículos pequeños también pueden reducir el impacto ambiental evitando la sobreaplicación de químicos y sobrecobertura, y

su peso más ligero y presión en el suelo más baja causa menos compactación en el suelo que los sistemas grandes (Bechar et al, 2017).

El desarrollo de HRS (human support robot) es considerado un primer paso razonable en el camino hacia sistemas ARS (autonomous robots systems) totalmente autónomos (Bechar et al, 2017)

La implementación de componentes electrónicos: sensores y actuadores en un vehículo autónomo para labores agrícolas nos permite también aportar al conocimiento al observar el desempeño y las adversidades que se presenten en el ambiente de trabajo típico del campo. Como las afectaciones que pueda haber a los sensores o componentes en el movimiento típico en los terrenos agrícolas.

Jeon et al (2009) utilizaron una plataforma similar de robot skid steering, para realizar aplicaciones de productos agroquímicos, los elementos de la plataforma robótica que usaron son de relativa baja inversión, por lo que el diseño propuesto se ve como una opción factible para desarrollar el vehículo, usando un control de bajo nivel, con miras a que la plataforma sirva a desarrollar la investigación en máquinas agrícolas autónomas en el futuro en México.

Entre las ventajas de utilizar energía eléctrica como fuente de energía del robot esta la reducción de contaminación directa al aire, ya que comúnmente estas labores se hacen con máquinas que utilizan combustibles fósiles, prueba de esto son trabajos como el que reportan Gonzales-de-soto et al (2016), quienes sustituyeron la alimentación de los implementos de un tractor robotizado que usaban la toma de fuerza (PTO), por un sistema híbrido, reduciendo las dañinas emisiones hasta cerca de un 50%; una adición valiosa al vehículo sería la evaluación de implementar un panel solar.

En años recientes ha habido una intensa labor de investigación en lo que refiere a aplicar la tecnología de robots en labores agrícolas, sin embargo, la mayoría de ellos, se encuentran en etapa de desarrollo, por lo que no están disponibles en de manera comercial. Los robots dedicados a la agricultura deberán

desarrollar las labores en ambientes agrícolas no estructurados, con la misma calidad de trabajo que se consigue con los métodos usados actualmente.

2.3 Encoders

Un encoder o como se traduce comúnmente, un codificador, un codificador es un dispositivo que produce una salida digital como resultado de un desplazamiento lineal o angular. Los codificadores de posición se clasifican en dos categorías: codificadores incrementales que detectan cambios en la rotación a partir de una posición de datos y codificadores absolutos que proporcionan la posición angular real. En un codificador incremental para medir un desplazamiento angular un haz luminoso, al atravesar las ranuras de un disco, es detectado por un sensor de luz adecuado. Cuando el disco gira, el sensor produce una salida en forma de pulsos; la cantidad de pulsos es proporcional al desplazamiento angular del disco. Así, la posición angular del disco y, por lo tanto, del eje que lo rota, se determina por el número de pulsos producidos desde cierta posición. En la práctica se utilizan tres pistas concéntricas con tres sensores. La pista interna sólo tiene un orificio y sirve para ubicar la posición 'de origen' del disco. Las otras dos pistas presentan una serie de orificios a igual distancia uno de otro y cubren toda la circunferencia del disco, sólo que los orificios de la pista de en medio están corridos respecto a los de la pista externa, a la mitad del ancho de un orificio. Este corrimiento determina el sentido del giro. En un giro en sentido de las manecillas del reloj los pulsos de la pista externa están adelantados en relación con los de la pista interna; en un giro en sentido contrario a las manecillas del reloj, van atrasados. La resolución está definida por la cantidad de ranuras en el disco. Si durante una revolución aparecen 60 ranuras y dado que una revolución es un giro de 360° , la resolución correspondiente es de $360/60 = 6^\circ$.

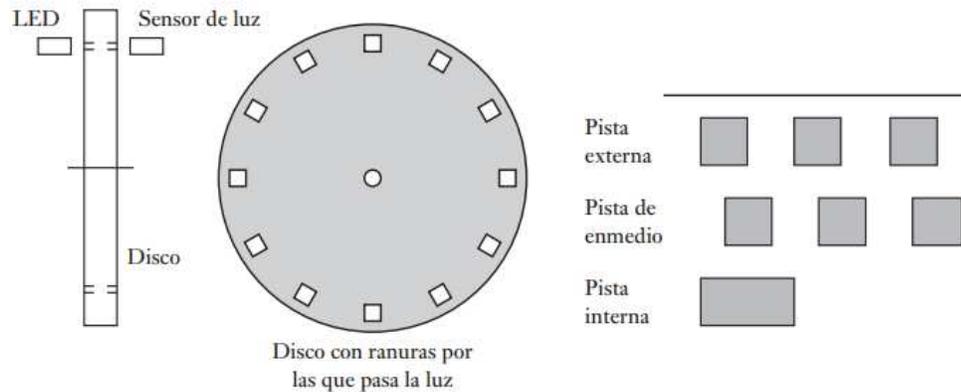


Figura 1. Encoder incremental.

En un codificador absoluto, la salida es un número binario de varios dígitos que representa cierta posición angular. El disco giratorio tiene tres círculos concéntricos de ranuras y tres sensores para detectar los pulsos de luz. Las ranuras están dispuestas de manera que la salida secuencial de los sensores es un número en código binario. Los codificadores típicos tienen hasta 10 o 12 pistas. El número de bits del número binario corresponde al número de pistas. Por ello, si hay 10 pistas habrá 10 bits y el número de posiciones que es posible detectar es 210, es decir, 1024, con una resolución de $360/1024 = 0.35^\circ$. En general no se utiliza la forma normal del código binario porque al pasar de un número binario al siguiente podría cambiar más de un bit y si, por una desalineación, uno de los bits cambia en forma fraccionaria antes que otros, de momento aparecería un número binario intermedio y podría producir un conteo erróneo. Para solucionar lo anterior, en general se utiliza el código Gray o código cíclico binario. Éste sólo cambia un bit cuando se pasa de un número al siguiente. Los codificadores ópticos, por ejemplo el HEDS-5000 de Hewlett Packard, vienen listos para montarlos en ejes y contienen una fuente luminosa LED y un disco de código. También existen circuitos integrados de interfaz para decodificar la salida del codificador que dan una salida binaria adecuada para un microprocesador. En un codificador absoluto con siete pistas en su disco codificador, cada pista da uno de los bits del número binario, por lo que existen 27 posiciones especificadas, por ejemplo 128. Con ocho pistas tenemos 28 es decir, 256. (Bolton, 2013).

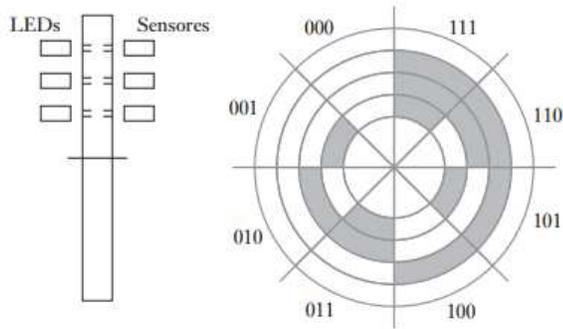


Figura 2. Encoder absoluto.

2.4 Motores

Los motores eléctricos con frecuencia se usan como elemento de control final en los sistemas de control por posición o de velocidad. Los motores de c.d. se pueden clasificar en dos categorías principales: motores de c.d. y motores de c.a. La mayoría de los motores que se emplean en los sistemas de control modernos son motores de c.d. los cuales se pueden dividir en dos grupos principales, los que usan escobillas para hacer contacto con un ensamble de anillo conmutador en el rotor para cambiar la corriente de un rotor a otro y los que no tienen escobillas. Con los de escobillas, el rotor tiene devanado de bobina y el estator puede ser un imán permanente o electroimán. Con los que no tienen escobillas, el arreglo es a la inversa, en ese rotor es un imán permanente y el estator tiene el devanado de bobina (Bolton, 2013).

Control de motores de corriente directa

La velocidad que alcanza un motor de imán permanente depende de la magnitud de la corriente que pasa por el devanado de la armadura. En un motor con devanado de campo, la velocidad se modifica variando la corriente de la armadura o la de campo; en general, es la primera la que se modifica. Por lo tanto, para controlar la velocidad se puede utilizar el control del voltaje que se aplica a la armadura. Sin embargo, dado que es frecuente el empleo de fuentes de voltaje de valor fijo, el voltaje variable se logra mediante un circuito electrónico. En una fuente de corriente alterna se utiliza el circuito de tiristor para controlar el voltaje promedio que se aplica a la armadura. Sin embargo, es común que nos

interese el control de motores de c.d. mediante señales de control provenientes de microprocesadores. En estos casos se utiliza la técnica de modulación por ancho de pulso (PWM), que utiliza una fuente de voltaje de c.d. constante y secciona su voltaje para que varíe su valor promedio.

Para obtener PWM utilizando un circuito de transistor básico, el transistor se activa y desactiva mediante una señal que se aplica a su base. El diodo tiene por objeto servir de trayectoria a la corriente que surge cuando el transistor se desconecta, debido a que el motor se comporta como generador. Este circuito sólo se utiliza para operar el motor en una dirección (Bolton, 2013).

Para utilizar el motor en dirección directa e inversa se utiliza un circuito con cuatro transistores, conocido como circuito H (puente h). Este circuito se puede modificar mediante compuertas lógicas, de manera que una entrada controle la conmutación, y la otra la dirección de rotación. Los anteriores son ejemplos de control en malla abierta, para los cuales se supone que las condiciones permanecen constantes, por ejemplo, el voltaje de alimentación y la carga que desplaza el motor. En los sistemas de control en malla cerrada se utiliza la retroalimentación para modificar la velocidad del motor si cambian las condiciones (Bolton, 2013).

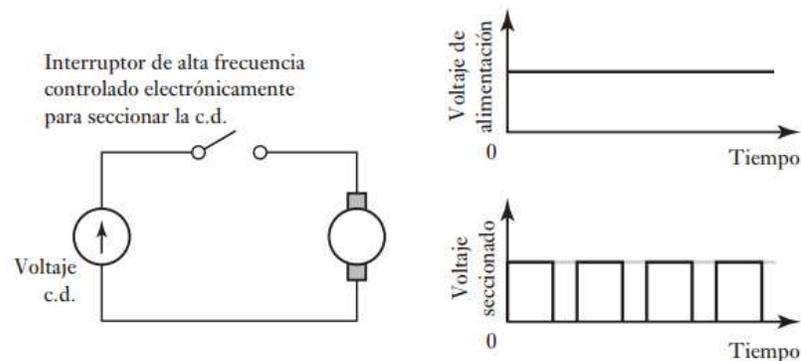


Figura 3. Circuito usado para producir PWM, variación del voltaje promedio mediante el seccionamiento en el tiempo.

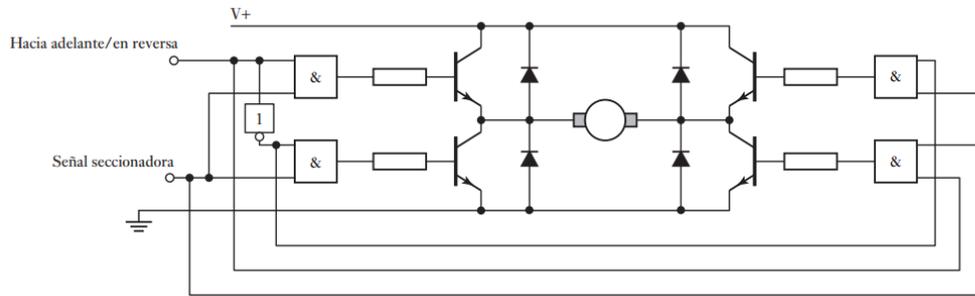


Figura 4. Circuito de puente H con compuertas lógicas.

En la siguiente figura 5 se muestra el diagrama de control de velocidad por PWM para un motor de cd de manera digital, para la medición de las revoluciones se un encoder (codificador) que retroalimenta al microprocesador.

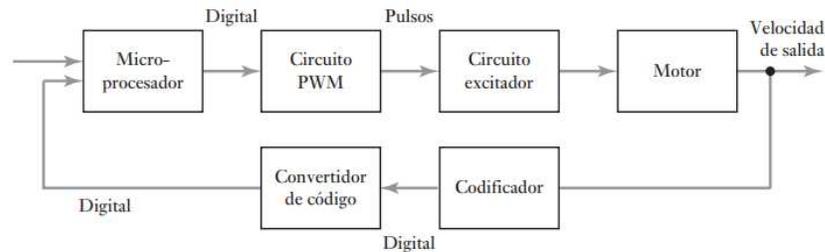


Figura 5. Control de velocidad por PWM de manera digital.

2.5 Tarjetas de control

En la actualidad varios desarrolladores de hardware y software se han dedicado a desarrollar dispositivos electrónicos que permitan el control de actuadores y la lectura de sensores de manera más accesible para las personas en general, entre ellos se encuentra arduino, la cual implementa microcontroladores de la marca atmega para el desarrollo de aplicaciones con control electrónico.

Arduino es una plataforma de desarrollo de tarjeta única con microcontrolador de código abierto ampliamente usada, con componentes de hardware y software fáciles de usar. Se ha utilizado aun así en el desarrollo de sistemas de control bien documentados, por ejemplo para diseño de redes inalámbricas de sensores para aplicaciones de monitoreo ambiental (Ferdoush et al, 2014)

Esta plataforma ofrece diversas opciones para el desarrollo con características

2.6 Visión artificial

La visión artificial es un sensor altamente versátil, usualmente usado para navegación, guiado y detección de plantas u objetos, pero también para medición de características de las plantas asociadas a tareas agrícolas específicas. El sensor consiste en una cámara y un dispositivo de carga acoplada (CCD) o un semiconductor complementario de óxido metálico (CMOS) usualmente operando en el IR (infrarrojo), INR (infrarrojo cercano) o el espectro visible para extraer información tanto de color como de profundidad (Nissimov, Goldberger, & Alchanatis, 2015). Es relativamente económico y una poderosa herramienta de sensado. Aun así, debe ser combinada con otros sensores en el framework adecuado para usarse en guiado (Hague et al., 2000) o cosecha (Fernandez et al, 2014). En algunos casos, se toman múltiples posiciones y puntos de vista de la cámara (estéreo visión) o en series de tiempo debido a la compleja estructura del ambiente y del cultivo (Hemming, et al, 2014).

Las cámaras se han utilizado en algunas máquinas agrícolas inteligentes, un ejemplo es en máquinas para eliminación de malezas entre surcos de cultivo, estas se usan en diferenciar el cultivo de las malezas y en guiar al vehículo, como reporta Melander et al (2015) en cuatro equipos disponibles para el mercado europeo, , Robovator (www.visionweeding.com, acceso 2 de Octubre 2014), Robocrop (www.garford.com, acceso 2 de Octubre de 2014), Steketee IC (www.steketee.com, acceso 2 de Octubre 2014); lo cual nos da antecedentes de la efectividad del uso de cámaras como medio para identificar plantas y fuente de información para guiar a la máquina, estas máquinas sin embargo, están destinadas a ser usadas en cultivos con un considerable espacio entre surcos, además de que hay una buena diferencia entre el tamaño de las plantas del cultivo y las malezas. Las imágenes obtenidas por las cámaras son procesados por una computadora que calcula los puntos en los que el actuador necesita ser activado de acuerdo a la velocidad de avance y la proximidad a las plantas del cultivo que las hojas de la azada están programadas para cultivar.

2.7 siembra mecánica del maíz

El maíz, *Zea mays* L., es uno de los granos alimenticios más antiguos que se conocen. Pertenece a la familia de las Poáceas (Gramíneas), tribu Maydeas, y es la única especie cultivada de este género. Otras especies del género *Zea*, comúnmente llamadas teosinte y las especies del género *Tripsacum* conocidas como arrocillo o maicillo son formas salvajes parientes de *Zea mays*. Son clasificadas como del *Nuevo Mundo* porque su centro de origen está en América.

El grano o fruto del maíz es un cariopse. La pared del ovario o pericarpio está fundida con la cubierta de la semilla o testa y ambas están combinadas conjuntamente para conformar la pared del fruto. El fruto maduro consiste de tres partes principales: la pared, el embrión diploide y el endosperma triploide. La parte más externa del endosperma en contacto con la pared del fruto es la capa de aleurona. La estructura del endosperma del maíz es muy variable y le da al grano distintas apariencias.

2.7.1. Parámetros de siembra

Aparte del sistema de siembra que se use, la semilla -tratada con fungicidas y/o insecticidas cuando sea necesario- debe ser colocada a la profundidad correcta, por lo general de 5 a 10 cm. Esto asegura un buen contacto con el suelo húmedo que previene la desecación y asegura que el coleoptile no tenga dificultades para llegar a la superficie. Una siembra profunda es importante en áreas con temperaturas del suelo muy altas, sobre todo si el suelo no tiene cobertura. La siembra más superficial en los suelos con humedad marginal debe ser evitada ya que no solo pone en peligro la germinación sino que también causa un nacimiento desuniforme de las plántulas, con las que nacen por último compitiendo en forma desventajosa con las plantas que germinaron antes.

Edmeades (1990) informó que en Ghana la población de las plantas mejoró al sembrar profundamente -8 cm- y cubrir bien las semillas para mejorar la humedad alrededor de las semillas. Esto es importante sobre todo en los suelos arenosos de las zonas semiáridas.

Los suelos con terrones grandes no permiten un buen contacto entre el suelo y la semilla y son responsables de la germinación pobre y desuniforme. Los suelos que son propicios al encostramiento deberían ser manejados bajo un sistema de labranza cero con una buena cobertura; si se siembra bajo labranza convencional, las costras deben ser rotas inmediatamente antes de la emergencia de las plantas por medio de una carpida superficial. (FAO)

2.7.2 sistemas de siembra

Bajo los métodos convencionales de labranza, las semillas de maíz pueden ser sembradas haciendo hoyos en el suelo con un palo sembrador, un machete o una azada, o colocando las semillas en un surco abierto con un pequeño arado de madera o de vertedera. La siembra mecánica de las semillas puede ser hecha con una sembradora a tracción humana o con una sembradora-fertilizadora conocida como *matraca* en Brasil, también a tracción humana, la cual tiene dos pequeños recipientes, uno para la semilla y otro para el fertilizante. Para la siembra en gran escala se utilizan sembradoras directas de uno o de múltiples surcos, tanto para siembra con el sistema de labranza cero o con sistemas convencionales.

Las sembradoras en línea abren un surco con una especie de azada o con un disco simple o doble, en el cual es depositada la semilla a distancias regulares. La semilla es colocada de acuerdo a la densidad de siembra elegida, cubierta y compactada por una rueda compresora que asegura un buen contacto con el suelo.

El CIMMYT ha desarrollado una sembradora pequeña de bajo costo para siembra directa conocida como *chiquita*, que puede ser tirada por animales o por tractores. Esta sembradora puede ser hecha por cualquier herrero hábil y sus planos e instrucciones para la construcción pueden ser obtenidos directamente en el CIMMYT, México.

2.7.3 densidades de siembra

Para un cultivar dado, la densidad de siembra recomendada es normalmente de 20 a 30%, o a veces menos, de la densidad óptima identificada cuando el cultivar

crece bajo las condiciones experimentales ideales. Como los cultivares difieren en precocidad, respuesta a las fechas de siembra, prolificidad, tamaño de la planta, resistencia al vuelco y arquitectura y como que las condiciones de crecimiento varían de acuerdo a la fertilidad de los suelos, la humedad y la presencia de factores bióticos deletéreos, la densidad de las plantas y su espaciamento deben ser determinados para cada caso y cada recomendación particular. El uso final del cultivo, por ejemplo como grano o forraje, la mejor medida de la mazorca para la comercialización, los modelos de cultivos intercalados y la germinación de las semillas son factores adicionales que deben

El CIMMYT recomienda densidades óptimas de plantas para los germoplasmas tropicales, de acuerdo a la altura de la planta y la fecha de floración. Se debe tener en cuenta que la densidad recomendada es sensiblemente menor a la densidad óptima que bajo condiciones de estrés de sequía, cuando las densidades de siembra deberían ser aún más bajas, esto lo podemos ver en el cuadro 1.

Cuadro 1. Densidades óptimas y densidades recomendadas por el CIMMYT para los maíces tropicales para zonas bajas.

<i>Altura de planta</i> (m)	<i>Días a 50%</i> floración masculina	<i>Densidad óptima</i> (plantas/ha)	<i>Densidad recomendada</i> (plantas/ha)
1,6 - 1,8	<50	85 000	60 000
1,8 - 2,0	50-55	78 000	55 000
2,0 - 2,2	55-60	70 000	50 000
2,2 - 2,4	>60	65 000	45 000

Fuente: basado en Lafitte, 1994.

Una densidad recomendada se obtiene a partir de la densidad óptima -por ejemplo, 85 000- usando el siguiente cálculo simple por la cual la cifra es reducida en 30% de modo de obtener la densidad recomendada:

$$85\ 000 - (85\ 000 \times 0,30) = 60\ 000 \text{ plantas/ha}$$

Sin embargo, si se estima que el 20% de las plantas se pueden perder entre el momento de la siembra y la cosecha, la densidad de siembra recomendada tendrá que ser ajustada:

$$60\ 000 \times 120/100 = 72\ 000 \text{ semillas/ha}$$

Si un kilo de semillas de una cierta variedad contiene 3 000 semillas, serán necesarios 25 kg de semilla por hectárea (Lafitte, 1994). En lo que se refiere al espaciamiento, cuando los agricultores siembran su maíz en hoyos hechos con un palo sembrador, su tendencia es a ahorrar tiempo y esfuerzos haciendo el menor número de hoyos posibles por unidad de superficie y colocando varias semillas en cada hoyo. La experiencia ha demostrado que cuando más de dos semillas son sembradas en cada hoyo, comparadas con la misma densidad pero colocando una o dos semillas por hoyo, el rendimiento de grano es afectado debido a la competencia por agua, nutrimentos y luz. Cuando crecen cuatro plantas o más en cada hoyo, hasta tres plantas pueden resultar estériles. El tamaño de la mazorca y, por lo tanto, el peso decrece a medida que la densidad de las plantas aumenta, si bien esta reducción puede ser algo menor en variedades menos prolíficas. En Ghana, Edmeades (1990) observó una declinación importante en el rendimiento cuando había más de dos plantas juntas, siendo esta declinación mayor a las densidades más altas.

Los mayores rendimientos son obtenidos por lo general con un promedio de rendimiento por planta de 150 a 180 gramos. Las mazorcas muy grandes -por ejemplo de más de 350 gramos- están asociadas con densidades muy bajas y, viceversa, se producen mazorcas muy pequeñas a densidades excesivamente altas. Es posible generalizar diciendo que el rendimiento de grano se incrementa en forma lineal a medida que aumentan las densidades, hasta que la competencia por nutrimentos, agua y luz produce efectos múltiples que, combinados, causan una drástica reducción de los rendimientos tales como mazorcas más pequeñas, escasa formación de semillas -debida sobre todo a una demora en la emergencia de los estambres en relación a la antesis (protandria)- mazorcas mal desarrolladas, mayor vuelco y rotura de los tallos.

2.7.4 dosificación de semillas

Los componentes principales de un sistema mecánico de siembra son:

1. Tolva
2. Sistema de transmisión de movimiento

3. Abre surco
4. Sistema de dosificación de semillas
5. Ruedas compresoras
6. Tapadores (Cañavate, 1993)

Los mecanismos de siembra son la parte central de los sembradores mecánicos pues es en ellos donde se requiere de ingenio y conocimiento para llevar a cabo su desarrollo de manera funcional y satisfactoria para las necesidades planteadas, en particular se sabe que existen diferentes tipos de siembra como la siembra al voleo, en líneas a chorrillo o en líneas monograno, para las cuales existen diferentes tipos de mecanismos dosificadores.

Sistemas mecánicos de siembra en línea monograno.

Este es el tipo de sistema que se requiere en el caso de la siembra de maíz. En este tipo de siembra se tiene la necesidad de sembrar una semilla a la vez, lo que provoca una mayor necesidad de precisión, tanto en la cantidad de unidades a sembrar como en la distribución a lo largo de las hileras, pues en este tipo de siembra es necesario tomar en cuenta la densidad de población que se va a aplicar a cierto tipo de cultivo, para esto se documentaron estos mecanismos:

A.- Sistema de dosificación mecánico, por medio de placas o discos.

En el fondo de la tolva, se ubica una placa o rueda transportadora intercambiable, con dientes cuyo valle se escogen según la semilla a sembrar (En algunos casos hay una doble y hasta una triple hilera de valles o celdillas. Se intenta que esta placa gire bastante despacio, para no romper semillas) Por debajo de la placa se encuentra la contraplaca que conduce a la semilla y que permite la expulsión de la misma en determinado momento. La pieza que gira es la rueda. Cuenta con un sistema de enrazamiento, para asegurarse de que vaya una sola semilla por orificio, y un sistema de gatillo o dedo que expulse a la semilla en el momento preciso. La presión de estos dedos o gatillos se regula por medio de unos bulones y resortes, para que no sea excesiva. Los expulsores no deben rozar la placa, y deben encontrarse en el centro justo del orificio, visto desde abajo.

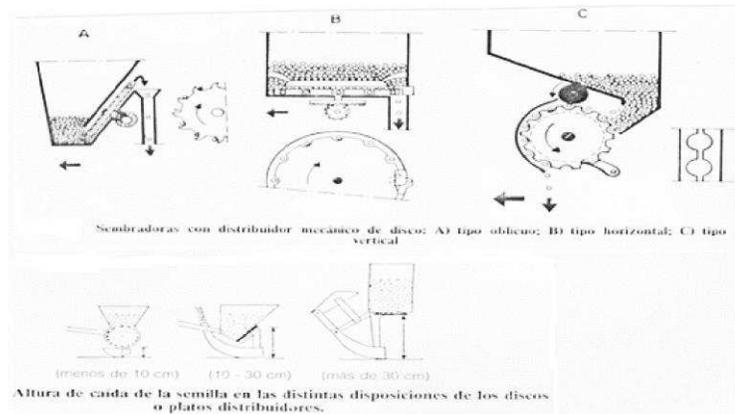


Figura 6. Dosificador mecánico de disco.

Para variar la dosificación, es posible cambiar por otra rueda con mayor o menor número de orificios, o cambiar la velocidad de giro de la rueda por las relaciones de transmisión desde la rueda motriz, se puede usar un engrasador de cepillo para no dañar la semilla, en lugar de la caja de gatillos abertura hacia el tubo de descarga. Al fijar la placa de siembra, los conos de los agujeros deben estar con la base mayor hacia abajo. La placa también se puede colocar inclinada(A) o vertical (C). En este caso la ventaja es que el engrase es por gravedad, el sistema expulsor es una rueda dentada o estrella, pero la altura de caída es necesariamente mayor. La rueda dentada debe ser de plástico, de puntas redondeadas, para evitar dañar el grano. Es necesario controlar el juego libre de la estrella y la contraplaca, y el estado de los dientes en este tipo de dosificador, según las condiciones de uso, regulación, semilla, etc.

B.- Dosificadores neumáticos.

1. Por vacío
2. Por presión

C.- Dosificación por cinta perforada.

Es una variante del disco con orificios, sólo que en este caso se colocan los orificios en una banda perforada de goma. Las semillas entran en la cámara de dosificación por medio de una abertura lateral, procedente de la tolva. La correa se mueve en sentido contrario al avance del tractor, para reducir la velocidad relativa de la semilla con respecto al suelo. El rodillo de engrase empuja hacia

atrás a la semilla sobrante, de modo que haya una sola semilla en cada orificio. La semilla se descarga detrás del rodillo de enrase (figura 7).

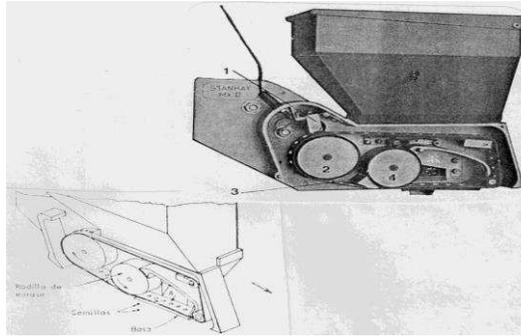


Figura 7. Dosificador por cinta perforada.

Es importante considerar en el diseño del sistema dosificador, y de la sembradora en general, la distancia de caída de la semilla. Para una siembra de precisión, esta no debe ser mayor a 5 cm por encima de la superficie del suelo, preferentemente menor. Si es mayor la distancia, la semilla rebota dentro del tubo en su caída libre, y la diferencia en la caída de cada semilla hace que la uniformidad de distancia entre ellas se pierda. En algunos cultivos, como girasol, soja, maíz, etc., el rendimiento se ve afectado por la y la densidad de la población por hectárea (Baraño et al, 1983).

III. DESARROLLO

La ingeniería usa el conocimiento científico para lograr un objetivo específico. El mecanismo mediante el cual una necesidad es convertida en un plan funcional y significativo es llamado diseño (Deutschman et al, 1987).

Diseñar es formular un plan para satisfacer una necesidad. Los ingenieros intervienen en un diseño de una manera u otra, incluso en la vida diaria puesto que siempre se presentan problemas y casos que deben resolverse.

Un problema de diseño no es un problema hipotético. Todo diseño tiene un propósito concreto: la obtención de un resultado final al que se llega mediante una acción determinada o por la creación de algo que tiene realidad física (Shigley et al, 1990).

Para el diseño del vehículo se utilizó la metodología del diseño mecánico compuesta en general por las siguientes etapas: reconocimiento de una necesidad, especificaciones y requisitos, estudio de posibilidades, síntesis de diseño creativo, diseño preliminar y desarrollo, diseño detallado teórico, construcción del prototipo y pruebas de evaluación (Deutschman, 1987).

Toda solución a un problema está sujeta a determinadas restricciones para su resolución. Es necesario en la etapa inicial de un diseño, tomar en cuenta todas estas, ya sean de tipo, social, económico o tecnológico.

En esta etapa inicial se hizo investigación en lo referente a automatización del campo para conocer a que restricciones se han enfrentado los investigadores desarrollando este tipo de tecnología, todo eso se ve reflejado en la revisión bibliográfica, de ella observamos que es un hecho como ya se mencionó anteriormente, que la población mundial con su crecimiento exponencial demandará en un futuro alimentos en cantidades que serán imposibles de conseguir por el campo agrícola a través de los medios y métodos actuales de producción. Lo cual nos lleva a buscar, entre otras cosas muy importantes, como la reducción de pérdidas, o aumento de producción en las variedades usadas, máquinas agrícolas que nos permitan una mayor productividad en el trabajo de producción de alimentos. El enfoque actual de crear máquinas cada vez más grandes ha traído consigo, así como muchos beneficios, problemas como la compactación del suelo, y los puntos de fallo que detienen el trabajo por días, mientras la máquina es reparada cuando ocurren daños al funcionamiento óptimo. Además de esto el tamaño actual de las máquinas es el máximo para que estas puedan transitar en carretera o caminos.

Entonces es necesario buscar opciones para realizar las actividades agrícolas de otra manera. Otro de los problemas que se pueden subsanar a través de maquinaria autónoma es la carencia de mano en obra en labores determinadas.

Automatizar una labor puede ser de alto costo, cuando buscamos adaptar un sistema autónomo a un ambiente no estructurado, en donde pueden presentarse varias situaciones que afecten el trabajo, como la presencia de animales,

humanos, o el cambio de lugar, a diferencia de los procesos industriales automatizados en donde se puede acondicionar el espacio de trabajo de un robot.

Para reducir estos costos por sensores y sistemas computacionales, es tangible pensar en un sistema mecánico que en colaboración con un humano nos permita desempeñar trabajos pesados y repetitivos de la agricultura en producciones pequeñas como las presentes en México.

3.1 Diseño conceptual

Previsiones tecnológicas han indicado que la siguiente generación de robots de servicio demostrarán un alto grado de autonomía y confiabilidad, tendrán mínimo impacto en el ambiente e interactuarán de manera flexible con el usuario. Es necesario entonces, determinar los requerimientos de funcionabilidad para un futuro sistema robótico de bioproducción eficiente energéticamente, desde la perspectiva de varias partes interesadas, junto con el desarrollo de un marco de referencia de alto nivel para diseñar y desarrollar prototipos de las funcionalidades comunes de robots móviles. (Sørensen et al, 2010)

Una vez identificado el problema principal a resolver es necesario determinar las características deseables de la máquina e interpretarlas en parámetros que puedan ser medidos, esto se hizo implementando el sistema de QFD, observando a parte de los medios disponibles y el espacio de trabajo, las máquinas similares existentes en el mercado, y los clientes o usuarios potenciales.

En esta parte del trabajo se desarrolló un vehículo utilizando la metodología de diseño mecánico en la parte motriz del mismo, sin embargo, fue necesario además aplicar técnicas de robótica, la cual se relaciona en sí con el deseo de sintetizar algunos aspectos de la función humana mediante el uso de mecanismos, sensores, actuadores y computadoras. Todo esto representa un enorme compromiso que evidentemente parece requerir una multitud de ideas provenientes de varios campos “clásicos”.

Existe una serie de factores que deben considerarse antes de iniciar un nuevo diseño, (obviamente no todos pueden ser aplicados a algún problema en

particular) estos son: costo de manufactura, costo de operación, costo de mantenimiento, factores de seguridad, embarque y transporte, lubricación, materiales, dimensiones de los componentes, cinemática, ergonomía y facilidad de manejo.

Por su naturaleza los problemas de diseño en la ingeniería mecánica no tienen una respuesta única, puesto que hay un número casi interminable de diseños aceptables, ninguno de los cuales se puede considerar que sea una respuesta “incorrecta”. Pero entre las respuestas “correctas” algunas son obviamente mejores que otras debido a que reflejan un conocimiento más completo de la tecnología en la que se basan, un concepto más ingenioso del diseño básico, un uso más efectivo y económico de la tecnología de producción existente, una apariencia más estética y agradable. Existen características generales que se deben considerar al momento de llevar a cabo un proceso de diseño.

El paso inicial en la aproximación a la solución de un problema de diseño comienza con la identificación del problema. La identificación del problema puede ser de dos tipos: (1) identificación de una necesidad o (2) identificación de los criterios de diseño. La identificación de una necesidad es un punto de partida bastante frecuente en un proyecto de diseño. Se reconoce un problema, defecto o falla en un producto, sistema o medio existente.

En este trabajo se hizo una combinación de ambos enfoques, después de la identificación del problema el cual se ha comentado en la revisión de literatura, se realizó la identificación de los criterios de diseño, mediante la aplicación de la metodología del despliegue de la función calidad, QFD (Quality Function Deployment) que busca adaptar el diseño a las necesidades del usuario, consta de 6 etapas: a) identificación del cliente, b) determinación de los requerimientos, c) ponderación de los requerimientos, d) estudio comparativo, e) traducción de los requerimiento en términos medibles, f) fijación de las metas de diseño.

3.1.1 Identificación del cliente.

Los clientes potenciales son productores que tengan como objetivo la producción de alimentos de manera intensiva en un futuro. Otro usuario próximo es el

desarrollador de aplicaciones automatizadas para labores agrícolas, este trabajo pretende servir de plataforma base, para que le sean adaptados diversos aperos para el trabajo ya sea en invernaderos, o en campo abierto.

El desarrollo de este vehículo fue visto desde un principio por el equipo de trabajo como un primer paso hacia la creación de una plataforma móvil que tenga la capacidad de cargar con instrumentación, y actuadores para desempeñar varias labores propias de la agricultura, tales como aspersores, brazos para cosecha, o mecanismos de siembra. Esto buscando la creación de tecnología mexicana adecuada para los tiempos en los que vivimos, aprovechando los avances tecnológicos y pensando en el futuro.

3.1.2 Determinación de los requerimientos del cliente.

- ECONÓMICO EN FUTURO.
- RÁPIDO
- QUE PUEDA CARGAR
- RESISTENTE
- AUTONOMIA
- LLANTAS PEQUEÑAS
- DESPEJE SUFICIENTE PARA MOVERSE EN UN TERRENO AGRÍCOLA.
- QUE SE RECARGUE DE MANERA SOLAR
- QUE LOS ELEMENTOS PARA LABORES SEAN DESMONTABLES
- QUE TENGA BUENA PRESENTACIÓN

3.1.3 Ponderación de los requerimientos del cliente.

En el cuadro 2 se muestra el peso que se dio a cada requerimiento analizando la importancia de cada uno.

Cuadro 2. Ponderación de los requerimientos.

REQUERIMIENTOS DESEABLES	REQUERIMIENTOS DESEABLES	REQUERIMIENTOS DESEABLES										NUMERO DE (+)	PESO RELATIVO X100
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J		
(A)ECONÓMICO FUTURO	EN	0	0	0	0	+	0	+	0	+	3	6.52	
(B)RÁPIDO		+	0	0	+	+	0	+	0	+	5	10.87	
(C)QUE PUEDA CARGAR		+	+	0	+	+	+	+	+	+	9	19.57	

(D)RESISTENTE	+	+	0		+	+	+	+	+	+	8	17.39
(E)AUTONOMIA	+	+	0	0		+	+	+	+	+	7	15.22
(F)LLANTAS PEQUEÑAS	0	0	0	0	0		0	+	0	+	2	4.35
(G)DESPEJE SUFICIENTE	+	+	0	0	+	+		+	+	+	7	15.22
(H)QUE SE RECARGUE	0	0	0	0	0	0	0		0	+	1	2.17
(I)QUE LOS ELEMENTOS PARA LABORES SEAN DESMONTABLES	+	0	0	0	0	+	0	+		+	4	8.7
(J)QUE TENGA BUENA PRESENTACIÓN	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
											46	100

Podemos notar que se dio preferencia a las características de carácter más funcional: la capacidad de carga, la resistencia y el despeje del sistema.

3.1.4 Estudio comparativo.

Esta etapa se utilizó para comparar productos actuales que realizan labores similares buscando que permita mejoras en la calidad del diseño propuesto. A continuación, se mencionan estos productos de manera general:

- ▶ i. eco robot, robot de campo



Figura 8. Diseño conceptual de eco robot.

Empresa: ecoRobotix, Essert-Pittet, Suiza

Página web: <http://www.ecorobotix.com/>

Producto: ligeros robots autónomos inicialmente para el deshierbe

eco robot robot campo concepto

Área de uso: Las pruebas de campo en Suiza; el próximo año en Alemania

Función: Una plataforma robótica para la escarda de hileras espaciadas, que incluye algoritmos avanzados de reconocimiento de malas hierbas, brazos robóticos rápidos, tecnología de sensores avanzados, de alta eficiencia energética y de comunicaciones inalámbricas

Pruebas: En la actualidad, con la remolacha azucarera, pero prevé ampliar a la colza, el girasol, el maíz y la soya

Disponibilidad: primeras máquinas disponibles para la venta a finales de 2015

Precio: Cerca de 15'000 euros (\$ 18.750) por robot

► ii. BoniRob robot de campo



Figura 9. Bonirobot (robot agrícola).

Compañía: Amazone-Werke GmbH, Hasbergen, Alemania

Página web: <http://info.amazone.de/DisplayInfo.aspx?id=14033>

Producto: BoniRob robot de campo

Amazone-Bosch BoniRob ligero robot de campo

Área de uso: Trabajo sobre maíz y trigo parcelas experimentales en Alemania

Función: robot autónomo de campo omnidireccionales que trabajan en "rebaños" para múltiples propósitos.

Pruebas: Múltiples usos robot ligero para el deshierbe, la aplicación de fertilizantes, la inspección está desarrollando con Robert Bosch GmbH

Disponibilidad: Sólo dos desarrollados; no hay planes anunciados para su comercialización en este momento

► iii. Rowbot



Figura 10. Rowbot, robot agrícola para la aplicación de nitrógeno en maíz.

Empresa: Rowbot, Minneapolis, MN

Página web: <http://rowbot.com>

Producto: Rowbot es una plataforma multi-uso de auto-conducción que viaja entre hileras de maíz, por ejemplo: la aplicación de fertilizantes de nitrógeno en sincronía con las necesidades de maíz. También puede recopilar datos de los sensores para informar tanto trabajo actual y futuro. GPS y varios sensores evitan el pisoteo del cultivo por parte del robot.

Rowbot en campo de maíz. Rowbots trabajan en equipos para aplicar el fertilizante de nitrógeno en sincronía con las necesidades de precisión

Campo de uso: US Corn Belt

Función: Rowbot viaja entre las filas de maíz - a menudo bajo el dosel de hojas - para aplicar fertilizante nitrogenado y también para sembrar cultivos de cobertura.

Pruebas: Trabajo en conjunto con la robótica de Carnegie en el desarrollo de Rowbot.

Disponibilidad: Comenzó prueba de la comercialización de este año por los servicios de nitrógeno y la siembra de cultivos de cobertura en temporada baja; plan para ampliar el alcance de los servicios en 2015.

A continuación, se resume en el cuadro 3 la comparación entre estos productos para las características de interés principales de nuestro diseño desplegadas en el cuadro 4.

Cuadro 3. Comparación entre las opciones comerciales (benchmarking).

Listado de requerimientos obligatorios y deseables	Observaciones	Productos de referencia		
		i	ii	iii
A	6.52	3	2	3
B	10.87	4	4	3
C	19.57	4	4	3
D	17.39	3	4	4
E	15.22	4	4	4
F	4.35	3	2	3
G	15.22	4	4	2
H	2.17	4	0	0
I	8.7	3	3	2
J	0	3	4	3

Cuadro 4. Requerimientos planteados para el diseño.

(A)ECONÓMICO EN FUTURO
(B)RÁPIDO
(C)QUE PUEDA CARGAR
(D)RESISTENTE
(E)AUTONOMIA
(F)LLANTAS PEQUEÑAS
(G)DESPEJE SUFICIENTE
(H)QUE SE RECARGUE
(I)QUE LOS ELEMENTOS PARA LABORES SEAN DESMONTABLES
(J)QUE TENGA BUENA PRESENTACIÓN

3.1.5 Traducción de los requerimientos del cliente en términos mensurables.

En esta sección se asignó a cada requerimiento las unidades en las que se medirían, esto para tener forma de hacer comparaciones en el diseño.

- A. Precio de desarrollo (pesos)
- B. Velocidad de trabajo deseada (km/h)
- C. Carga de trabajo (kg).
- D. Peso sin deformaciones o fracturas (kg).
- E. Tiempo de trabajo independiente (h).
- F. Diámetro de las llantas (cm).
- G. Distancia del suelo al chasis del vehículo (cm).

Las letras en mayúscula corresponden a cada requerimiento expresado en el cuadro 4.

3.1.6 Fijación de las metas de diseño.

Se procedió a proponer los alcances deseados en cada requerimiento, esto expresándolo en una cantidad que sirva como objetivo del diseño.

- A. Que el precio de desarrollo no supere los 100 mil pesos
- B. Que pueda trabajar a una velocidad de 6 km/h.
- C. Que sea capaz de trabajar con una carga de 20 kg.

- D. Que pueda soportar golpes y caídas sin romperse con el peso de 20 kg.
- E. Que pueda realizar sus labores durante una hora de manera independiente.
- F. Llantas de diámetro no mayor a 50 cm.
- G. Despeje mayor a 25 cm.

Con la obtención de las metas de diseño ahora se tienen parámetros para iniciar los cálculos de algunos componentes, pero antes esos componentes deben ser propuestos de acuerdo a las funciones que cumplirá el equipo.

3.1.7 Estructura de funciones

Como función principal con este vehículo se pretende realizar actividades agrícolas, pero para ello debe cumplir con otras actividades que en conjunto generaran el movimiento y el trabajo deseado. En el siguiente diagrama encontramos la función principal y las entradas y salidas que se tienen en el proceso de la función principal, el carro tendrá como entradas principales la fuente de energía eléctrica, el material que usara, y tres señales principales a través de sensores que se montaran para que tenga la capacidad de trabajar de manera autónoma. Por otro lado, las salidas que se quieren obtener es tener un terreno sembrado, y conocer la posición y la velocidad durante el tiempo para retroalimentar el sistema.



Figura 11. Diagrama de la función principal o global.

Una vez descritas las funciones principales tenemos todas las funciones particulares necesarias para que se dé el trabajo adecuado, a continuación, se muestra el diagrama de subfunciones que describe gráficamente las

interacciones de cada actividad durante el proceso de colocación de semillas en el terreno, esto para disminuir la complejidad de la función principal. Por complejidad queremos decir la falta relativa de transparencia de la relación entre las entradas y las salidas, la intrincación relativa de los procesos físicos necesarios y los números relativamente grandes de montaje y componentes implicados.

Como un sistema técnico puede ser dividido en subsistemas y elementos, así una función global o compleja puede ser descompuesta en sub-funciones de menor complejidad. La combinación de sub-funciones individuales resultantes en una estructura de función representan la función global.

Para resolver estas funciones se propone utilizar un sistema electrónico adecuado para el control del movimiento del vehículo, en este trabajo se describen las acciones realizadas para el prototipo cumpla con la función del desplazamiento, esto como primera parte del proyecto. Para ello se tiene un diseño previo, el cual se tomó como base para el desarrollo (Figura 12).

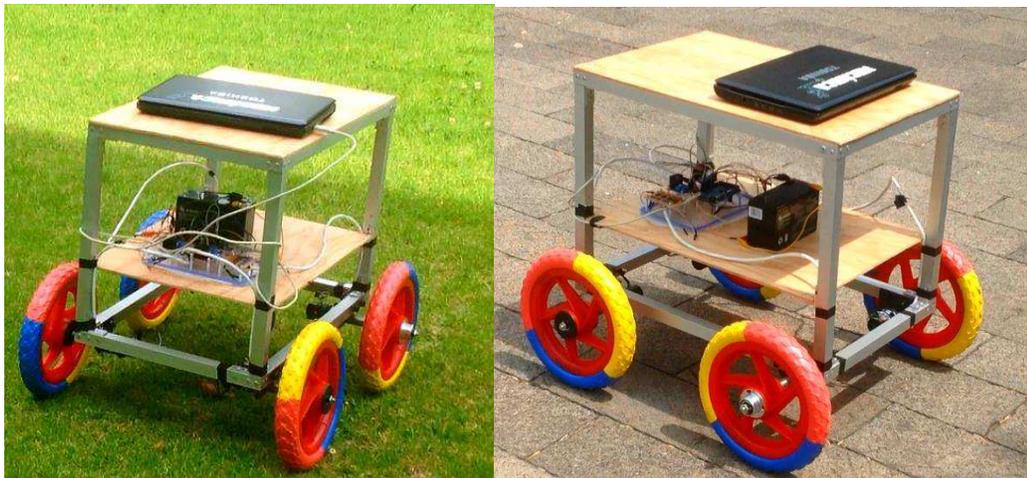


Figura 12. Primer prototipo Robot agricultor

A continuación se describen los componentes principales del primer prototipo.

- Chasis. Se construyó una estructura de soporte y rigidez a base de un PTR de aluminio de 1"x 1", de dimensiones 60 cm x 40 cm x 40 cm (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).



Figura 13. Chasis del primer prototipo.

- Base de componentes. Se le colocó la cubierta de madera que sirve de base para los componentes electrónicos.
- Instalación de la transmisión. Como primera opción se construyó la transmisión consistente en el motor, una base para la fijación del motor, bujes para el acoplamiento del eje del motor al eje de la llanta (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).



Figura 14. Rueda y motor del primer prototipo.

- Fuente de poder: Se montó la fuente de poder seleccionada en el apartado de metodología (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.15**).



Figura 15. Fuente de poder

- Puente H. Se montaron los puentes H seleccionados (figura 16).

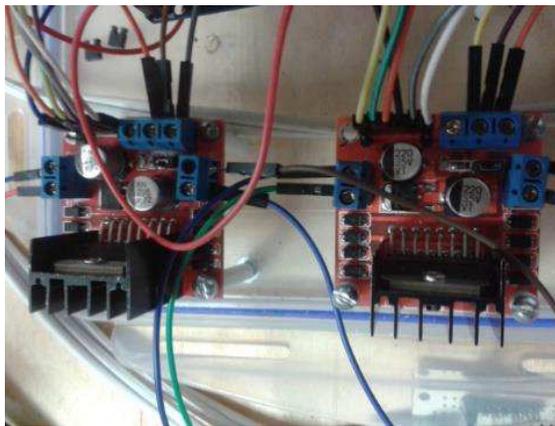


Figura 16. Controlador L298N

A continuación en la figura 17 se describe en un diagrama de flujo la conexión entre los componentes mencionados anteriormente.

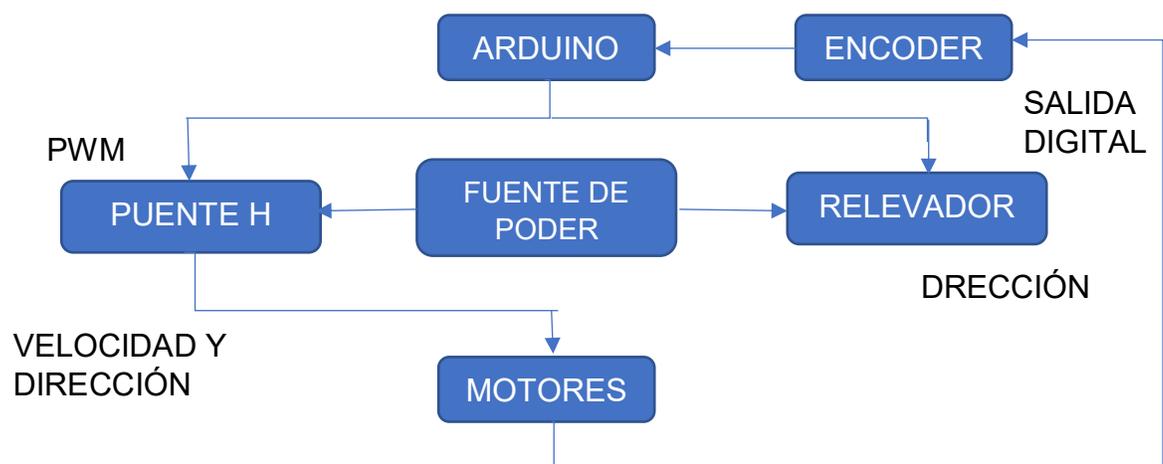


Figura 17. Diagrama de control

La construcción de este primer prototipo concluyó con las siguientes recomendaciones:

- Utilizar motores más eficientes y ruedas más pequeñas.
- Reducir las dimensiones del prototipo de tal forma que se adapte a las condiciones de trabajo a las cuales será sometido.
- Mejorar el diseño del prototipo.
- Desarrollar contadores de pulsos que nos permitan un mejor control de la trayectoria del vehículo.
- Hacer uso del sensor MPU-9150 para corregir la trayectoria. Así como, de sensores de proximidad para evitar posibles daños al vehículo.

Tomando en cuenta estas recomendaciones y además considerando la tarea de siembra de maíz se realizaron las mejoras necesarias al vehículo. En la tabla 5 se enlistan los principios de funcionamiento seleccionados para cumplir con esta función.

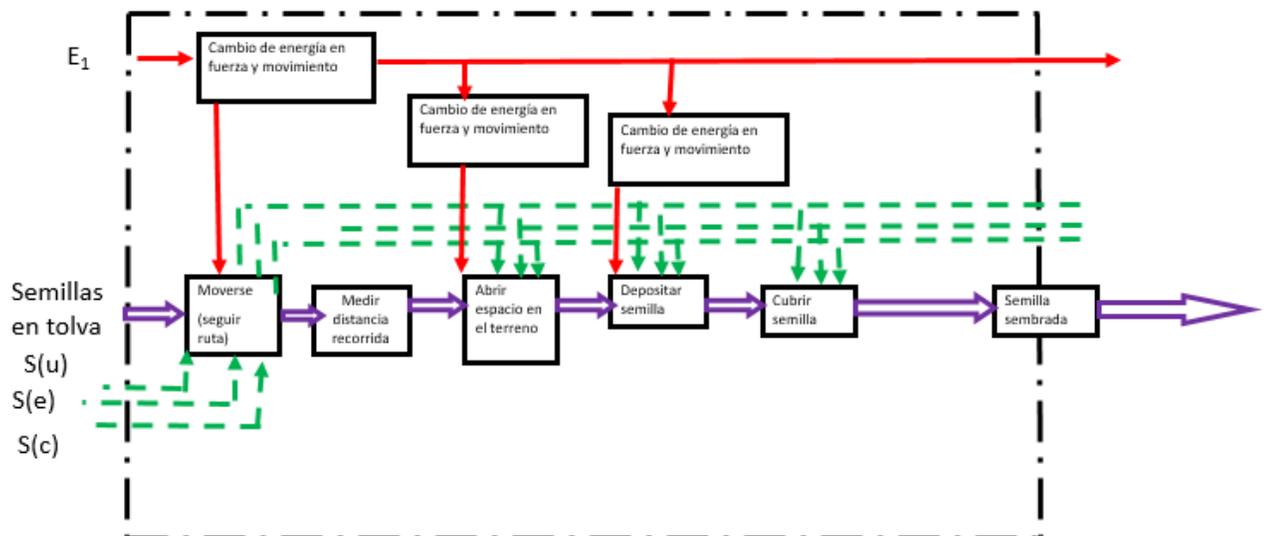


Figura 18. Diagrama que incluye todas las subfunciones y relaciones que se buscan en la máquina a diseñar.

El primer paso fue seleccionar motores más eficientes, cuyas características se describen en el apartado 3.2.2. Para proteger los motores se decidió elevar el vehículo y diseñar una transmisión mecánica hasta las ruedas. Para lograr una mayor eficiencia energética el prototipo requiere además de una estructura ligera y resistente para soportar todos los componentes tanto electrónicos como mecánicos. Para el movimiento podemos utilizar, bandas, engranes o cadenas; además los ejes en las ruedas y los motores deben ser fabricados para poder acoplarlos, se pueden tener una transmisión directa del movimiento o utilizar rodamientos para soportar las cargas que puedan generarse.

Se tiene entonces un diseño de tipo adaptativo, En el caso de diseños adaptativos, el punto de partida es la estructura de funciones de la solución existente obtenida mediante el análisis de los elementos. Esto ayuda a desarrollar variantes a fin de abrir el sendero para otras soluciones en subsiguientes optimizaciones y desarrollar productos de módulo. La identificación de las relaciones funcionales puede facilitarse preguntando por el problema correcto, en el cuadro 5 se muestran los principios de funcionamiento tomados en cuenta.

Cuadro 5. Principios de funcionamiento propuestos para cumplir con cada subfunción.

Funciones/soluciones	1	2	3
Accionamiento	Motorreductor	Motor eléctrico (sin reducción)	
Transmisión de movimiento	Bandas	engranes	Cadena
Soporte de cargas en los ejes	Chumaceras	rodamientos	
colocación de semillas	Neumático	Mecánico	

De estas opciones podemos conseguir varias alternativas mediante la combinación de principios:

Variante 1: 1,2,1,1

Variante 2: 1,3,1,1

Variante 3: 1,1,2,1

Variante 4: 1,3,2,2

Variante 5: 1,2,2,2

De cada variante se dejó de lado la opción de usar un motor eléctrico sin reducción, ya que esto implicaría complicaciones que pueden evitarse con el motorreductor, por lo cual es una alternativa mucho más conveniente. En el cuadro 6 se muestra la evaluación de las diferentes variables.

Cuadro 6. Evaluación de las variantes de diseño seleccionadas para el vehículo.

Variantes de solución (S _v)	Compatible con la tarea global	Cumple los requisitos de la especificación	Realizable en principio	Dentro de los costos permisibles	Incorpora directamente medidas de seguridad	Preferida por la compañía de diseño	Información adecuada	Observaciones	Decisión
V ₁	1	+	+	+	-	+	-	+	-
V ₂	2	+	+	+	-	+	+	+	+
V ₃	3	+	+	-	+	-	-	+	-
V ₄	4	+	+	+	+	+	+	+	+
V ₅	5	+	+	+	-	+	+	+	+

CRITERIO DE SELECCIÓN:

(+) Si

(-) No

(?) Falta de información
(re-evaluar solución)

(!) Comprobar especificación para cambios

DESICIÓN:

(+) Solución perseguida

(-) Solución eliminada

(?) Colectar información

(!) Comprobar especificación

El mismo cuadro 6 sirvió como una evaluación binaria, dejando como mejor opción a la variante 4 la cual se resume en el cuadro 7, tomando en cuenta el

número de +, esta variante tiene la ventaja de tener la transmisión por cadena, y colocación de semillas de manera mecánica, lo cual ajusta mejor con los costos deseados, y cumplen bien su función. Además de que se cuenta con rodamientos, para evitar problemas que ocurren cuando no se tienen fuerzas por efecto de las cargas sobre los ejes.

Cuadro 7. Propuesta seleccionada.

Función	Principio
Accionamiento	Motorreductor
Transmisión de movimiento	Cadena
Soporte de cargas en los ejes colocación de semillas	Rodamientos Mecánico

A continuación, se muestra el diseño propuesto tomando en cuenta las recomendaciones, así como los análisis realizados.

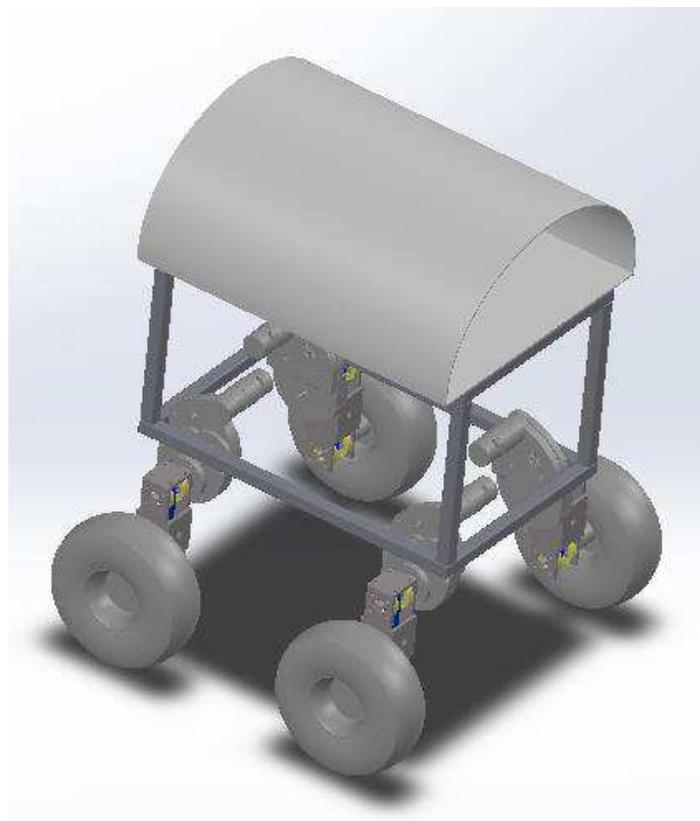


Figura 19. Dibujo del ugv propuesto.

En la creación del concepto de un vehículo, es muy importante decidir el medio por el cual se moverá., En este caso se disidió utilizar ruedas y además se optó

por un vehículo tipo skid-steer por su simplicidad mecánica. Además de que se buscó lograr el objetivo sin tomar en cuenta el aspecto estético de la máquina, dándole un enorme peso a la economía de los componentes, así como la funcionalidad. Por ello el tamaño del vehículo se determinó de tal manera que pudiera transitar entre surcos de un cultivo o en los pasillos de un invernadero. Uno de los vehículos más presentes son los rover.

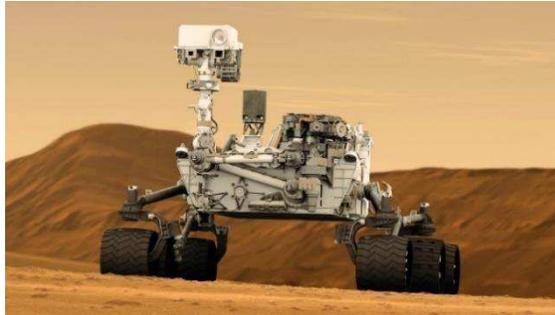


Figura 20. Curiosity, robot tipo rover utilizado en la exploración de Marte.

Los Pequeños robots errantes (rover) son herramientas efectivas para reunir información de campo en cultivos tales como nutrientes en el suelo, humedad, temperatura y crecimiento de plantas. Estos robots son capaces de cargar varios sensores y su pequeño tamaño es ventajoso porque pueden circular entre surcos sin dañar a las plantas. (Taniwaki et al, 2008)

Así como hay diferentes formas en las que un robot se puede mover, la locomoción es una característica complicada. La configuración óptima de un robot depende fuertemente del ambiente de trabajo (Billingsley et al., 2008).

La mayoría de los vehículos terrestres utilizan llantas como sistema de locomoción; los robots móviles explotan este tipo de sistema de locomoción porque es un diseño mecánico simple y tiene una muy alta eficiencia de potencia comparada con locomociones de patas. Vidoni et al, analizaron 4 configuraciones diferentes de sistemas de locomoción para un robot pequeño de 1.30 m por 0.5 m, concluyendo que los de orugas son los más estables, seguidos de los sistemas convencionales de ruedas, además concluye que los sistemas de orugas ocasionan problemas como incremento en la erosión del suelo, sobre todo

en los giros. Tomando en cuenta además, los costos de las orugas, se consideró un sistema de 4 llantas como la mejor opción. La medida de ancho del vehículo se propuso de 60 cm ya que los pasillos de un invernadero o el espacio libre entre surcos tienen dicha distancia, por lo cual no puede ser mayor a este valor.

Una vez obtenidos los parámetros importantes que influyen en la forma y tamaño del prototipo se realizó el diseño de los elementos y mecanismos del vehículo en el software de diseño asistido por computadora (CAD) Inventor profesional 2012 de Autodesk el cual se observa en la figura 21. Esto sirvió como un guía para determinar los componentes necesarios, su ubicación y las dimensiones iniciales.



Figura 21. Dibujo 3D de del prototipo del vehículo.

Una de las mejoras fue la inclusión de encoders para la medición de las revoluciones, así como sensores ultrasónicos para medir distancias y de esta manera proteger al vehículo de posibles colisiones y sobre todo sirvió para el desarrollo de un programa de visión artificial que controlará el vehículo, de manera automática.

3.2 Diseño de detalle

En el diseño de detalle se realizan los cálculos principales partiendo de los parámetros de diseño entre ellos: la potencia necesaria y velocidad de avance.

3.2.1 selección de las llantas

Para poder seleccionar un motor que pueda darnos la rotación necesaria para alcanzar la velocidad de avance máxima propuesta, es necesario conocer el diámetro de las llantas que se usarán, por ello como primer paso se seleccionaron llantas que pudieran soportar una carga normal de 20 kg, suponiendo que la carga se distribuirá de manera equitativa en las cuatro ruedas. Se seleccionaron llantas de 0.26 m diámetro y se optó por el uso de neumáticos sobre llantas sólidas. Esto siguiendo los requerimientos planteados en la etapa de diseño conceptual.



Figura 22. Llantas seleccionadas.

3.2.2 Motor

La fuente de potencia del vehículo será el motor. Según recomendaciones de la Sociedad de Técnicos de Automoción, 2011, en el diseño de vehículos eléctricos pueden notarse ciertos requerimientos, de la misma forma que se le piden dimensiones razonables, también debe tener una gran robustez mecánica y térmica. Además, recomiendan que el conjunto del vehículo, pero sobre todo el motor, sea de fácil mantenimiento y suficientemente accesible.

Comparado con un vehículo de combustión en la fase de diseño de un vehículo eléctrico no hace falta dimensionar el motor para las condiciones extremas de uso, sino solamente para las condiciones habituales o nominales.

Por las condiciones de los terrenos agrícolas es necesaria la tracción en las cuatro ruedas, en caminos en mal estado en los que los vehículos 2WD no pueden pasar de forma satisfactoria, los vehículos 4WD demuestran un excelente rendimiento: , ya que si sí las ruedas delanteras encuentran algún obstáculo, las ruedas traseras empujan desde atrás o si sí las ruedas traseras han caído en un lugar embarrado, las ruedas delanteras tiran del vehículo.

En general se tienen los siguientes requisitos de los motores electricos para vehiculos:

- Alta potencia especifica
- Alta densidad de energia (tamaño y peso reducidos)
- Alta capacidad de sobrecarga (alto par de arranque)
- Alta eficiencia (superior al 90% en condiciones nominales)
- Amplia gama de velocidades
- Operación en los cuatro cuadrantes
- Control sencillo
- Niveles de ruido y vibraciones bajos
- Para con pocas variaciones
- Robustez mecanica y termica elevadas
- Fabricacion y mantenimiento facil
- Bajo coste

Para seleccionar el motor se consideraron dos aspectos:

1. La potencia. Para calcular la potencia se consideró una carga máxima de 60 kg y , este peso fue el límite de la suma tanto de la estructura del vehículo como de los dispositivos de siembra y labranza. Se utilizó la ecuación:

$$P = F * v \dots\dots\dots(1)$$

Donde: P-pontencia, W; F-Fuerza, N; v-velocidad; m*s⁻¹

Y se consideró una velocidad para las labores de 4 km*h⁻¹, que es un valor aceptable comparado con la velocidad típica a la que se realizan las labores de

manera convencional. Para fines de transporte se pretende que la velocidad máxima a la que puedan moverse el vehículo sea de 6 km*h⁻¹.

Convirtiendo las unidades de la velocidad tenemos:

$$v = 4 \left(\frac{km}{h} \right) \left(\frac{1000}{3600} \right) = 1.11 \text{ m/s}$$

Para la fuerza obtenemos el peso generado por una masa total de 60 kg.

$$F = m * g = 60 \text{ kg} * 9.81 \text{ m} * \text{s}^{-2} = 588.60 \text{ N} \dots \dots \dots (2)$$

Donde: F-fuerza, N; m-masa, kg; g-constante de aceleración de la gravedad, m*s⁻².

Finalmente, la potencia necesaria usando la ecuación 1 es:

$$P = (588.6 \text{ N}) \left(1.111 \frac{m}{s} \right) = 653.94 \text{ W}$$

Esta es la potencia total necesaria mínima sin tener en cuenta el patinaje o la tracción real con el suelo. Tomando en cuenta esto se propone utilizar 2 motores:

$$\frac{653.935}{2} = 326.97 \text{ W}$$

2. Velocidad angular. La velocidad máxima requerida para este vehículo es de 6 km*h⁻¹.

Para calcular la velocidad angular de un elemento que gira, por ejemplo, la velocidad de un punto de la periferia de una rueda o de un eje, se debe aplicar la fórmula:

$$v = \omega \cdot r \dots \dots \dots (3)$$

Donde: la velocidad lineal, **v**, se expresa en m*s⁻¹, cuando la velocidad angular **ω** se expresa en rad*s⁻¹ y el radio **r** en m.

El diámetro de las ruedas es de 0.26 m por lo tanto r = 0.13m

La velocidad propuesta del vehículo es de v = 1.667 m/s

Si despejamos entonces velocidad angular (ω) de la ecuación 3.

$$\omega = v/r = 1.667 / 0.13 = 12.8231 \text{ rad*s}^{-1}$$

Ahora para determinar la velocidad del motor de un vehículo se expresa en revoluciones por minuto, r.p.m., y en este caso se utiliza la letra n para identificarla.

La relación entre ambas es:

$$\omega = \frac{\pi * n}{30} \dots\dots\dots(4)$$

Donde: ω - velocidad angular, rad*s-1; n-velocidad angular en revoluciones por minuto, rpm.

Despejando a n de la ecuación 4:

$$n = \frac{30 * \omega}{\pi} = \frac{30 * 12.8231}{\pi} = 122.452 \quad r.p.m.$$

Por tanto, la velocidad necesaria del motorreductor es de 122 r.p.m.

Con esta información se procedió a buscar un motor. Los motores eléctricos seleccionados en el mercado tienen una potencia de 490 W y una velocidad angular de 140 rpm alimentados a 12 V (Figura 23). Estos cumplen con los requerimientos de diseño propuestos y proporcionan algo de potencia extra, además al reducir la velocidad ganamos torque. Estos motores ofrecen la ventaja de contar con una reducción de velocidad por engranes. El consumo de corriente es alto variando desde los 2 A hasta los 70 A en paro por carga, esto es cuando se les presenta una carga con el torque suficiente para detener el giro del motor, en su mejor desempeño, la máxima eficiencia consume una corriente de alrededor de 10 A.



Figura 23. Motorreductores seleccionados.

Ya adquiridos los motores, se determinó la velocidad angular de estos a la salida de la reducción con ayuda de un tacómetro de contacto mostrado en la figura 24, para corroborar dicha velocidad. La relación entre la parte conducida y la parte conductora fue de 1.36, con diámetros de 4.5 y 3.3 cm. La velocidad del tacómetro fue de 190 rpm, dando así una velocidad de 139.33 rpm para el motor.

Tomando esto en cuenta se optó por mantener la relación de la transmisión por cadena en 1, esto debido a que la velocidad determinada para lograr la velocidad máxima del vehículo a 6 km/h es de 127.35 rpm, con la velocidad real dada por el motor se tiene una velocidad superior, de 6.56 km/h muy cercana a la de diseño.



Figura 24. Tipo de tacómetro utilizado analógico y de contacto.

Para estimar el torque se usó el valor de un peso recomendado en los vehículos que usan los motores de 60 kg, esto tomando en cuenta que es para dos motores, nos deja 30 kg por motor. Usando de nuevo la ecuación 2.

$$F = m * g$$

Donde m; masa y g; aceleración de la gravedad. Sustituyendo:

$$F = (30 \text{ kg}) * \left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) = 294.3 \text{ N}$$

Calculamos la potencia de este motor:

$$P = F * v$$

Donde P=potencia, F=fuerza, y v=velocidad; v=1.666 m/s. Sustituyendo:

$$P = (294.3 \text{ N}) * \left(1.666 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right) = 490.3038 \text{ W}$$

Para calcular el torque tenemos lo siguiente:

$$T = P/\omega \dots \dots \dots (5)$$

Donde: T=torque, ω =velocidad angular. $\omega=14.66 \text{ rad/s}$.

$$T = \frac{490.3038 \text{ W}}{14.66 \text{ rad/s}} = 33.445 \text{ N * m}$$

En resumen, los motores tienen una velocidad angular a la salida de 139.3 rpm, con un torque estimado de 33.5 Nm.

3.2.3 sistema de transmisión.

El sistema de transmisión seleccionado es por cadena. También tomando en cuenta los costos, se seleccionaron componentes disponibles en el mercado

nacional, y se adecuaron para lograr una reducción del par de los motores que nos permita tener un mejor manejo del peso de los componentes.

Para evitar deslizamientos se utilizan cadenas que se traban en los dientes de las catarinas motrices, lo que equivale a un par de engranes conectados. La relación de engranaje de una cadena es la misma que la de un tren de engranes. El mecanismo de transmisión de una bicicleta es un ejemplo de cadena de transmisión. Las cadenas permiten controlar varios ejes usando sólo una rueda, con lo que se logra una transmisión múltiple. No son tan silenciosas como la banda dentada reguladora de tiempo, pero se pueden usar en pares de rotación mayores (Bolton, 2013).

La relación de transmisión se calculó tomando en cuenta la velocidad deseada y la velocidad máxima ofrecida por el motor, debido a que los valores son muy cercanos, y a las ventajas como reducir costos, tener una velocidad mayor, se optó por mantener la relación 1:1.

Velocidad motriz: = 140 rpm, Velocidad de la rueda accionada: = 120

$$i = \frac{\text{velocidad motriz}}{\text{velocidad inducida}} = \frac{140}{122} = 1.147 \approx 1 \dots\dots\dots(6)$$

Para transmitir el movimiento se utilizaron dos catarinas motrices de 18 dientes. Se hizo el cálculo para la transmisión por medio de cadena y catarinas.

Potencia de diseño.

$$N_D = N_{nom} * F_s \dots\dots\dots(7)$$

Donde:

N_{nom} – potencia nominal, hp;

F_s – factor de servicio, adimensional.

Como factor de servicio tenemos 1.3, obtenido de tablas (Shigley,2012), para motor eléctrico con poco choque. $N_{nom}=490.3 \text{ W}=0.658 \text{ hp}$.

$$N_D =(0.658)(1.3)=0.8554 \text{ hp.}$$

Tomando en cuenta el valor de 140 rpm. Utilizando la potencia y la velocidad del motor, podemos seleccionar tentativamente a través de un cuadro (Mott, 2004) una cadena de una hilera, se propone usar una catarina motriz de 18 dientes (la velocidad mínima de giro es de 100 rpm, potencia 0.84 hp), número 40, esto por disponibilidad comercial y las dimensiones; además de que no existe un impacto importante en los costos.

Tenemos entonces la potencia corregida con un factor de corrección $C_1 = 1.05$ para una catarina de 18 dientes, esto queda:

$$N_{\text{nom correg}} = N_{\text{cadena}} \cdot C_1 \dots\dots\dots(8)$$

Donde:

N_{cadena} – potencia transmitida por la cadena, hp;

C_1 – factor de corrección del número de dientes, adimensional;

$$N_{\text{nom correg}} = 0.85 \cdot 1.05 = 0.8925 \text{ hp};$$

Debido a que la transmisión será de 1:1, la catarina conducida tendrá las mismas características, número 40 y 18 dientes. En tablas (Mott, 2004) verificamos que una cadena de este número a 140 rpm, tiene una capacidad de potencia nominal de 0.97 aproximadamente, por lo tanto cumple con las necesidades de nuestro sistema de transmisión.

La longitud de la cadena se determina por:

$$\ell = \frac{Z_1 + Z_2}{2} + \frac{2C}{t_c} + \frac{t_c (Z_1 + Z_2)^2}{4\pi^2 \cdot C} \dots\dots\dots(9)$$

donde:

Z_1 y Z_2 - número de dientes en la rueda menor y mayor respectivamente; ambos son 18.

C – distancia entre centros, pulgadas; 5.75 pulgadas.

t_c - paso de la cadena, pulg. 0.5 pulgadas.

$$l = 18 + 2(5.75/0.5) + ((0.5)(36)^2 / 4\pi^2(5.75))$$

$$l = 43.85$$

esto es 44 eslabones.

El tipo de lubricación se determina en función de la **velocidad de operación**.

La velocidad de la cadena es:

$$V = \frac{t_c \cdot Z_1 \cdot n}{60\,000} \dots\dots\dots(10)$$

donde:

V – velocidad promedio de la cadena, m/s;

Z_1 - número de dientes en la rueda motriz, adim; 18

n – velocidad angular de la rueda motriz, rpm; 140 rpm

t_c - paso de la cadena, mm. 12.7 mm.

$$V = ((12.7\text{mm})(18)(140))/60000 = 0.5334 \text{ m/s}$$

Con esto ingresamos a tablas de diseño y obtenemos el tipo de lubricación: tipo 1, manual con aceitera o brocha.

También se diseñaron elementos para colocar bujes y poder fijar los elementos de la transmisión, así como un brazo de transmisión que permite colocar los motores de forma elevada (Figura 25).

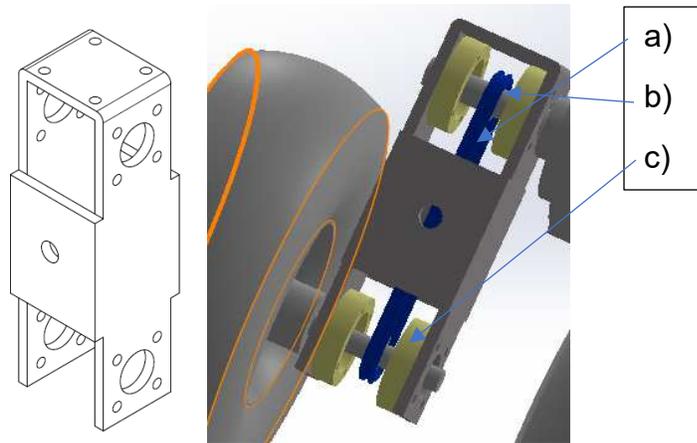


Figura 25. Ubicación de la cadena (a) (azul), las catarinas(b) y los rodamientos(c) en el UGV.

3.2.4 Selección de rodamientos

Siempre que hay desplazamiento de una superficie que está en contacto con otra, ya sea por rotación o deslizamiento, las fuerzas de fricción producidas generan calor que desperdicia energía y produce desgaste. La función de los cojinetes o chumaceras (también conocidos como rodamientos) es guiar el movimiento de una parte respecto a otra con mínima fricción y máxima exactitud. Es de particular importancia la necesidad de proporcionar un soporte adecuado a los ejes rotacionales, es decir, un soporte a las cargas radiales. El término cojinete de empuje designa los cojinetes que permiten soportar fuerzas a lo largo de un eje cuando el movimiento relativo es una rotación (Bolton, 2013).

Para seleccionar estos componentes lo primero fue elegir el tipo de rodamientos aptos para el vehículo. Se optó por rodamientos de bolas de una hilera, suficientes para las cargas presentes.

Primero se seleccionó la duración en horas de vida de los rodamientos, basándonos en recomendaciones de la literatura tenemos como parámetro 3000 horas, las cuales se consideran adecuadas. Para obtener la duración en número de revoluciones usamos:

$$L_d = (h)(rpm)\left(\frac{60min}{h}\right) \dots \dots \dots (11)$$

Donde L_d =duración de diseño en revoluciones totales, h =vida en horas, rpm =velocidad de rotación del eje.

$$Ld = (3000)(140)\left(\frac{60min}{h}\right) = 25200000$$

$$C = Pd\left(\frac{Ld}{10^6}\right)^{\frac{1}{k}} \dots\dots\dots(12)$$

Donde C=carga dinámica; Pd=Carga estática radial, pd=147.15 N=33.08, valor para un peso de 15 kg, en cada apoyo; k=factor para elementos rodantes, k=3 para rodamientos de bolas.

$$C = (33.08)\left(\frac{25.2 \times 10^6}{10^6}\right)^{\frac{1}{3}} = 96.984 \text{ lb}$$

Con estos valores es posible buscar en catálogos comerciales rodamientos que cumplan con el trabajo. Del catálogo de la marca Timken se seleccionó el rodamiento más pequeño ya que cumplen sin problema con lo deseado.

DIMENSIONS – TOLERANCES

Bearing Number		Bore d				Outside Diameter D				Width C		Fillet Radius ⁽¹⁾		Wt.		Static Load Rating C ₀		Extended Dynamic Load Rating C _E ⁽²⁾		
standard	stainless	mm	in.	tolerance +0.000 mm to minus	mm	in.	tolerance +0.000 mm to minus	mm	in.	tolerance +0.000 mm to minus	mm	in.	mm	in.	kg	lbs.	N	lbs.	N	lbs.
33K3	A33K3	3.175	0.1250	0.008	0.0003	9.525	0.3750	0.010	0.0004	3.96	0.156	0.3	0.012	0.005	0.01	212	48	710	160	
33K4	A33K4	3.175	0.1250	0.008	0.0003	12.700	0.5000	0.010	0.0004	4.37	0.172	0.3	0.012	0.005	0.01	490	110	1430	325	
33K5	A33K5	4.762	0.1875	0.008	0.0003	12.700	0.5000	0.010	0.0004	3.96	0.156	0.3	0.012	0.005	0.01	490	110	1430	325	
S1K7	AS1K7	6.350	0.2500	0.008	0.0003	15.875	0.6250	0.010	0.0004	4.98	0.196	0.3	0.012	0.005	0.01	560	125	1630	365	
S1K	AS1K	6.350	0.2500	0.008	0.0003	19.050	0.7500	0.010	0.0004	5.56	0.219	0.4	0.016	0.009	0.02	1160	260	3100	695	
S3K	AS3K	9.525	0.3750	0.008	0.0003	22.225	0.8750	0.010	0.0004	5.56	0.219	0.4	0.016	0.009	0.02	1400	312	3650	830	
S5K	AS5K	12.700	0.5000	0.008	0.0003	28.575	1.1250	0.010	0.0004	6.35	0.250	0.4	0.016	0.018	0.04	2240	500	5600	1270	
S7K	AS7K	15.875	0.6250	0.008	0.0003	34.925	1.3750	0.013	0.0005	7.14	0.281	0.8	0.031	0.032	0.07	3050	682	7500	1700	
S8K	—	19.050	0.7500	0.010	0.0004	41.275	1.6250	0.013	0.0005	7.92	0.312	0.8	0.031	0.050	0.11	4400	1000	10400	2320	
S9K	—	22.225	0.8750	0.010	0.0004	47.625	1.8750	0.013	0.0005	9.52	0.375	0.8	0.031	0.064	0.14	4900	1120	11000	2500	
S10K	—	25.400	1.0000	0.010	0.0004	50.800	2.0000	0.013	0.0005	9.52	0.375	0.8	0.031	0.082	0.18	4900	1120	11000	2500	
S11K	—	28.575	1.1250	0.010	0.0004	53.975	2.1250	0.013	0.0005	9.52	0.375	0.8	0.031	0.091	0.20	5400	1220	11800	2650	
S12K	—	31.750	1.2500	0.013	0.0005	57.150	2.2500	0.013	0.0005	9.52	0.375	0.8	0.031	0.100	0.22	6000	1340	12200	2750	

⁽¹⁾ Maximum shaft or housing fillet radius that bearing corners will clear.
⁽²⁾ Based on 10⁶ revolutions of calculated fatigue life.

Figura 26. Información de rodamientos del manual de la marca Timken.

Estos rodamientos tienen un diámetro interior de 0.125 pulgadas, y un diámetro exterior de 0.375 pulgadas. Sin embargo se determinó que las dimensiones eran demasiado pequeñas para el eje de una rueda y puede dar problemas con el mantenimiento, armado y manufactura de las piezas, por lo cual se usaron los rodamientos estándar número S7K de diámetro interior 0.625 pulgadas, y diámetro exterior 1.3750 pulgadas.

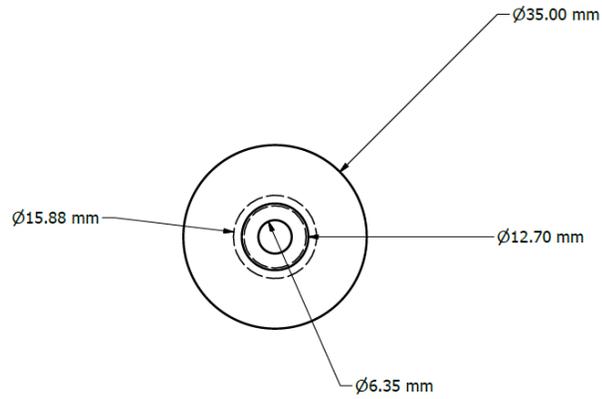


Figura 27. Dimensiones principales del rodamiento implementado en el vehículo.

Se diseñaron ejes de transmisión para las ruedas de un diámetro de 5/8 de pulgada (Figura 28).

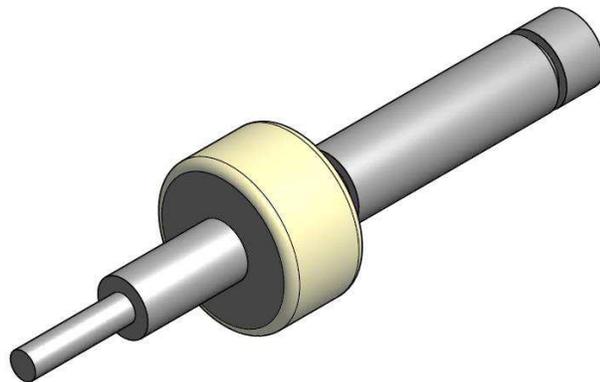
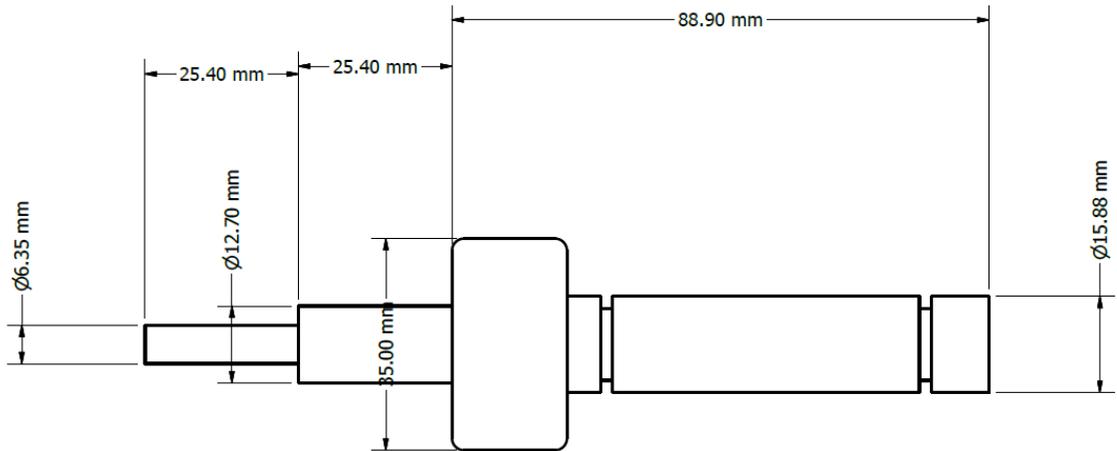


Figura 28. Rodamiento montado en el eje.

3.2.5 chasis.

Para el diseño del chasis se tomó en cuenta una carga modelada de 60 kg, se buscó que fuera ligero para reducir el peso del vehículo, pero resistente a deformaciones. Por estos motivos se seleccionó el perfil cuadrado de aluminio de 1 pulgada como material. La estructura se limitó a un arreglo rectangular que cumpliera con las dimensiones buscadas, 30cm x 60cm x 20cm a manera de paralelepípedo sin paredes, unidos por pijas, principalmente por simplicidad y para lograr una estructura ligera.

3.2.6 Mecanismo de siembra

Uno de los objetivos principales de la plataforma robótica de tipo skid steer que se está desarrollando, es que tenga la capacidad de sembrar maíz en un terreno previamente labrado y preparado, para ello fue necesario encontrar un sistema que permitiera dosificar la semilla y que abra el espacio suficiente en la tierra, además de tapar la semilla al final.

Especificaciones requeridas

- De acuerdo a las recomendaciones técnicas de siembra y manejo en el cultivo de maíz en México la densidad de siembra en temporal oscila entre las 50,000 y las 55,000 plantas por Ha, si además de esto se tiene que la distancia recomendada entre hileras no deberá exceder los 90 cm, por lo cual la distancia deseada entre semillas es de 20 cm.
- La profundidad de siembra del maíz deberá estar entre los 3 y los 7 cm, lo cual dependerá de la humedad contenida en el suelo.

Por otra parte, en cuanto al sistema de siembra se desea que sea:

- Diseño compacto en peso y tamaño
- De fácil mantenimiento
- De fácil construcción y manufacturación
- De funcionamiento simple

- Bajo costo

Se desarrollaron dos sistemas de siembra de manera conceptual, y se adaptó también un modelo de sembradora de jardín (figura 32).

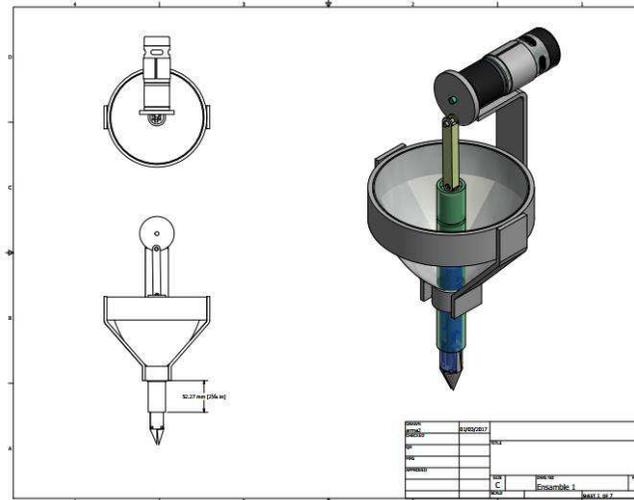


Figura 29. Diseño conceptual de mecanismo de siembra, por biela-manivela.

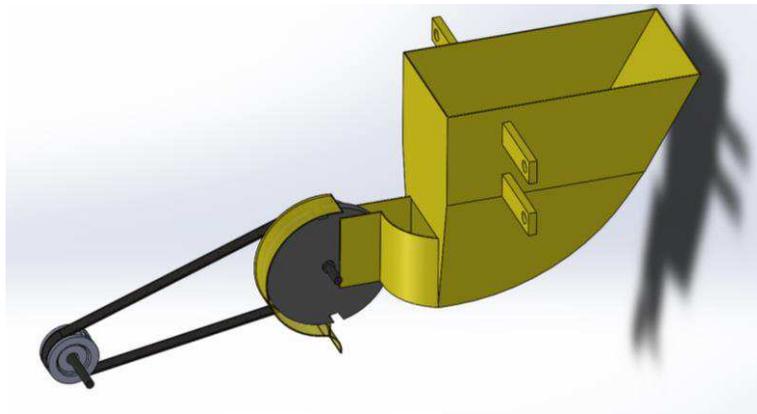


Figura 30. Diseño conceptual de dosificador por disco vertical y tolva para semillas.



Figura 31. Diseño conceptual actuador para microlabranza.

De los mecanismos presentados, se construyó un prototipo de bajo costo del mostrado en la figura 29. Este mecanismo mostró buen desempeño en la dosificación, sin embargo, al igual que para el abridor de la figura 31, son de tipo vertical, por lo que su instalación es más complicada.

El mecanismo de dosificación de la figura 30, está basado en sistemas mecánicos que se utilizan actualmente en la siembra mecanizada, entre las ventajas esta la familiaridad, y la presencia de sistemas ya construidos. Dado estas ventajas se optó por un sistema de este tipo.

Se recurrió a la búsqueda de máquinas existentes que pudieran ser acopladas, entre las opciones estaba la adaptación de una sembradora de tipo manual.

La siembra de maíz se suele hacer a una profundidad alrededor de los 50 mm, ya que una profundidad mayor puede beneficiar a la germinación de las semillas como fue reportado en diversos estudios (Knappenberger et al, 2012), y una profundidad menor a esta afecta bastante. Las diferentes profundidades de siembrano afectan directamente el rendimiento del grano de maíz, ya que las plantas compensan la reducción de densidad siembra por un mayor rendimiento por planta de maíz. No obstante, si hay más plantas emergen de una profundidad de siembra más profunda, en última instancia será beneficioso para la cantidad de rendimiento debido a la capacidad de las plantas para compensar la reducida densidad de la masa se limita a un cierto rango. (Knappenberger et al, 2012).

Basándose en lo anterior se determinó que una profundidad de 5 cm sería suficiente y que reduciría la fuerza de tracción necesaria para abrir el suelo.



Figura 32. Sembradora Earthway.

Se utilizó el modelo 1001B de la marca Earthway, debido a que tiene los elementos principales buscados y por su disponibilidad en el mercado nacional, además el tamaño de esta máquina la hace ideal para su acople al vehículo skid steer. Contiene 6 discos de siembra fáciles de cambiar para poder sembrar maíz, frijol, chícharo, rábano, zanahoria y remolacha. Además de estas puede sembrar otros vegetales, con tamaños de semilla similares. Tiene un abridor ajustable para sembrar la semilla a la profundidad deseada. Las semillas se cubren por medio de una cadena y una rueda compactadora. Es muy ligera lo que hace más sencilla su manipulación, los materiales de los que está construida de aluminio y tiene componentes de plástico y por lo tanto es resistente a la corrosión.



Figura 33. Abridor y cadena de la sembradora Earthway 1001b.

3.2.7 Sistema electrónico.

El sistema electrónico del vehículo está compuesto por elementos que son alimentados por energía eléctrica permitiendo el funcionamiento de los sensores, actuadores y procesadores, que se encuentran a bordo del vehículo.

Incluye principalmente la alimentación (batería de 12V), los motores para el movimiento, tarjeta de control Arduino MEGA, actuadores y sensores.

Para el funcionamiento del vehículo se utilizaron, algunos sensores de bajo costo, que fueron implementados para permitir la realización de las funciones como desplazamiento, dosificación de semillas, navegación autónoma entre plantas, y viraje.

Los componentes principales de este sistema son: dos motores de Power Wheels usados para el giro de las llantas, descritos anteriormente, una batería, un motor marca motor faulhaber con torque de 17.54 kg.cm para el dosificador de semillas, dos sensores ultrasónicos para detectar plantas u obstáculos, una unidad de medida inercial (IMU), tarjeta de control Arduino MEGA, drivers de puente H para control de los motores, una cámara logitech modelo c920 y una computadora marca DELL procesador Intel core i7.

Los componentes principales de este sistema son: dos motores usados para el giro de las llantas, descritos anteriormente, la batería, un motor para el dosificador de semillas, sensores ultrasónicos para detectar plantas u obstáculos, una unidad de medida inercial (IMU), tarjeta de control arduino mega, drivers de puente h para control de los motores, cámara.

3.2.8 drivers.

Una vez seleccionados los motores adecuados, se seleccionó el driver modelo IBT-3 para el control de la velocidad a través de PWM (pulse width modulation, por sus siglas en inglés) los parámetros tomados en cuenta para la selección de este componente, fueron el funcionamiento a 12 V, la disipación de potencia, y sobre todo la intensidad de corriente, según la información del fabricante, el motor seleccionado puede llegar a alcanzar amperajes de hasta de 40 Amperes, lo cual es un consumo anormal, que se da cuando el motor es forzado a detenerse. Esta

situación es esperada en las condiciones de trabajo del vehículo, ya que puede existir un atascamiento o con la presencia de un obstáculo grande.

El driver usado tiene las siguientes características:

Parámetros principales del módulo driver de puente H para motores de alta potencia, modelo IBT-3:

- Temperatura de operación: 0-70 °C
- Disipación de potencia: 100 W
- Tipo: Drive IC
- Aplicación: juguetes electrónicos
- Voltaje de alimentación: 5V-15V
- Numero de modelo: IBT-3
- Intensidad de corriente: 50 A.

Características:

- Driver de puente H MOSFET de alta corriente.
- Con señal PWM del microcontrolador aislada, protección efectiva para el microcontrolador.
- Frecuencia de entrada de PWM de dos vías de hasta 200kHz
- Indicador de encendido.



Figura 34. Driver para control de motores IBT-3.

Se analizó la configuración de manejo del PWM en los drivers IBT-3 adquiridos. Estos controladores de puente H, funcionan con dos señales, cada señal puede ser digital o analógica, para producir movimiento se envía una señal analógica con el valor PWM deseado, mientras que a la otra entrada se le envía una señal digital, que debe estar en apagado o cero. Para generar el giro en sentido a las manecillas del reloj (CW, por sus siglas en inglés) la entrada número uno debe ser activada con algún valor de PWM entre 0 y 250 y la número dos debe estar apagada. Para el giro en sentido contrario a las manecillas del reloj la entrada uno debe estar apagada y la entrada dos activada con algún valor de PWM de entre 0 y 250, y para paro total del motor las dos entradas deben estar apagadas (cuadro 8).

Cuadro 8. Configuración de manejo IBT-3

ENTRADA	CW	CCW	STOP
1	PWM	OFF	OFF
2	OFF	PWM	OFF

Una vez conocida la configuración de los motores se dio paso a las pruebas del control de los motores.

También se utilizó el driver L298n para controlar los giros del motor utilizado en el dosificador de semilla, el cual es controlado también por la tarjeta arduino y es alimentado por una batería de 12 V. En la figura 36 se muestra la conexión de éstos.

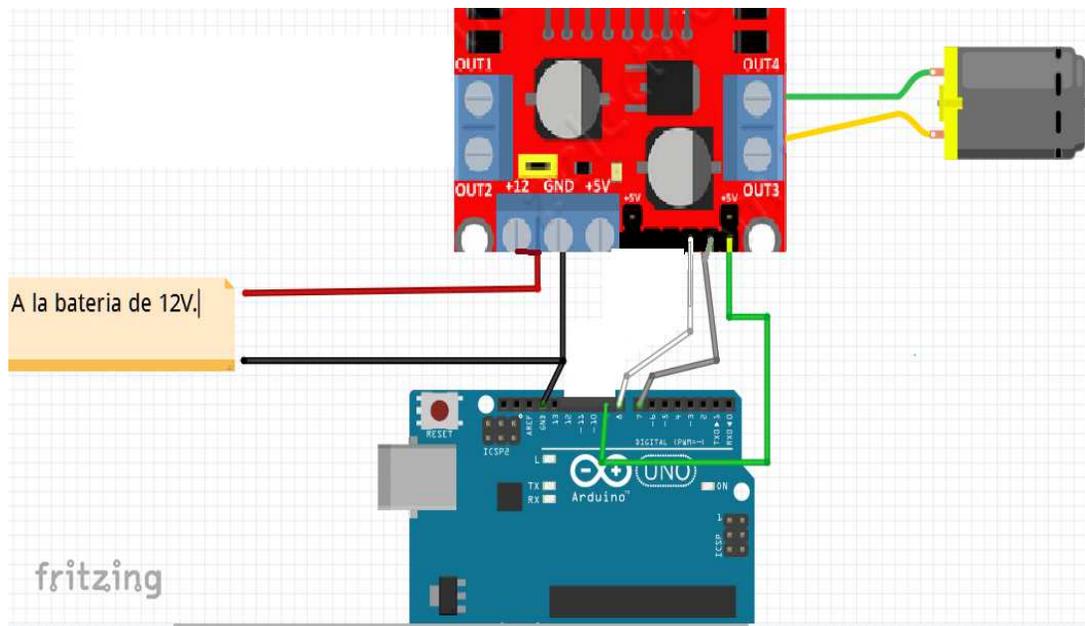


Figura 35. Conexión del driver L298n al arduino para controlar el giro del motorreductor.

3.2.9 Tarjeta de control.

Como menciona Daniel Cressey en su columna para la revista nature, “age of the arduino”, arduino es uno de muchos dispositivos computacionales de bajo costo y altamente configurable, que han transformado el campo de la electrónica con de tipo hecho en casa y hazlo tú mismo. Incrementalmente, están transformando la comunidad científica también. Entre las ventajas presentes en este dispositivo se encuentran:

- No se necesita experiencia para implementarlo.
- Bajo costo.
- Su popularidad ofrece mucha información disponible.

Según David White (científico de computo en University College London) una cosa que realmente no quieres es estar resolviendo problemas técnicos que otras personas ya han resuelto. Te ahorrara mucho tiempo si eliges soluciones estándar. Puedes simplemente aprovechar la popularidad de estos dispositivos, hay mucha información disponible (Nature, 2017).

Se seleccionó esta opción por su versatilidad para realizar proyectos sin conocimientos especializados en electrónica y en particular por contar con pines exclusivos para PWM resulta ideal para el control de velocidades de los motores para esta aplicación.

Arduino es una placa electrónica basada en el microcontrolador Atmega2560. Cuenta con 54 pines digitales de entrada / salida (de los cuales 15 se pueden utilizar como salidas PWM), 16 entradas analógicas, 4 UARTs (hardware puertos serie), un 16 MHz del oscilador de cristal, una conexión USB, un conector de alimentación, un header ICSP, y un botón de reinicio. Contiene todo lo necesario para apoyar el microcontrolador; simplemente conectarlo a un ordenador con un cable USB o el poder con un adaptador de CA o la batería a CC para empezar.

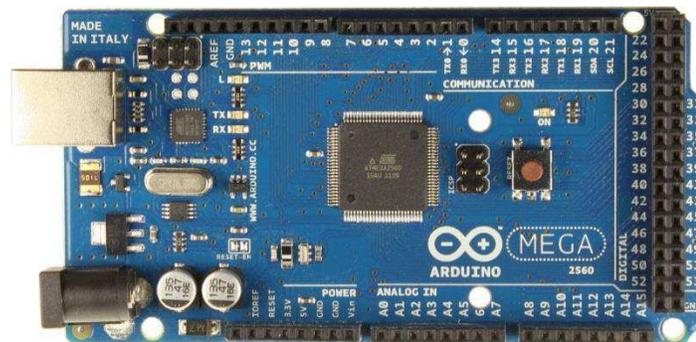


Figura 36. Arduino MEGA 2560.

Para la conexión de los sensores se utilizaron dos tarjetas de este tipo comunicadas entre sí.

3.2.10 Encoders

Para lograr la dosificación de semilla deseada es necesario controlar la velocidad angular del motor utilizado y así mantener la distancia entre semillas.

Como elemento sensible del vehículo se decidió usar el Encoder óptico, que el motor faulhaber tiene, el modelo de este Encoder es EE-SX1103, en la figura 37 se presenta su diagrama de conexión.

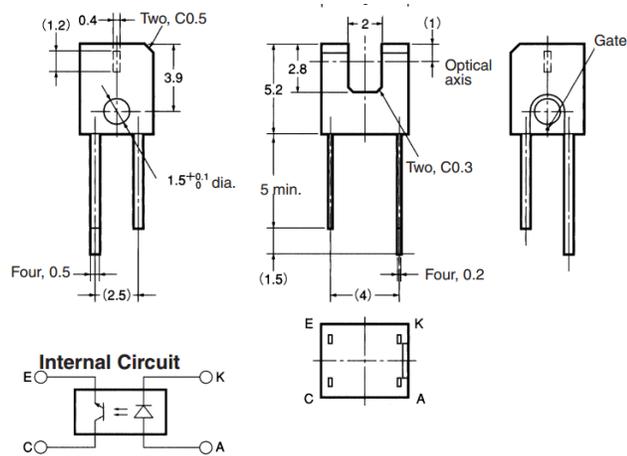


Figura 37. Características técnicas del Encoder EE-SX1103.

En este tipo de motorreductor con Encoder no puede leerse de forma directa los pulsos con arduino; para cada canal (A o B) debe hacerse un circuito eléctrico que tiene los siguientes componentes:

- 1 resistencia de 1 k Ω .
- 2 resistencias de 10 k Ω .
- 1 resistencia de 120 Ω .
- 1 transistor 2N2222.

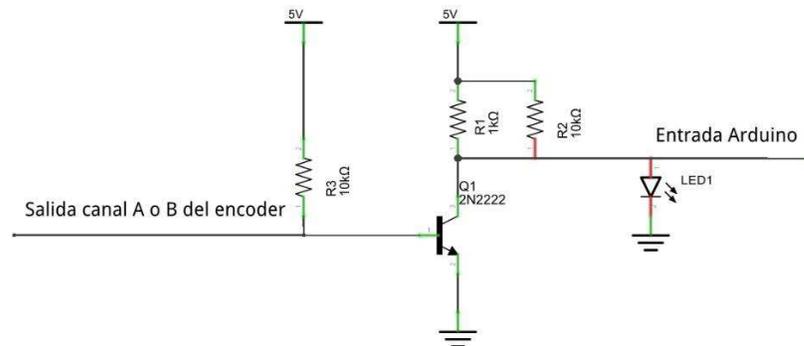


Figura 38. Diagrama eléctrico para la conexión del encoder.

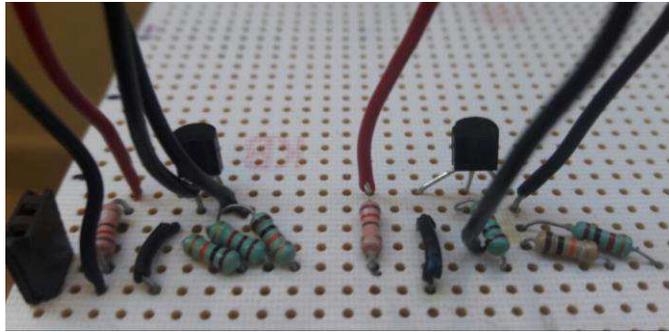


Figura 39. Soldadura de los componentes para el circuito..

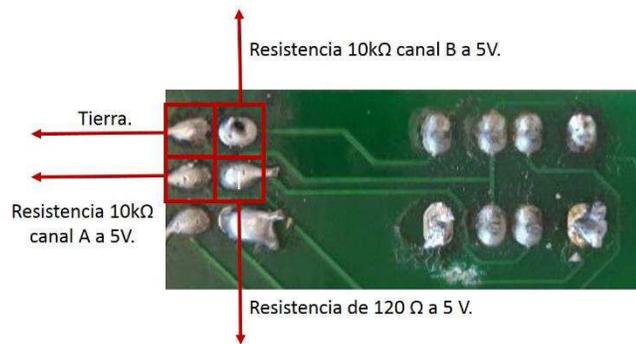


Figura 40. Conexión de los canales A y B, tierra y 5V del Encoder.

El encoder se colocó en uno de los ejes motrices del robot multitareas para que pueda leer las revoluciones a las que gira la rueda y así determinar la distancia recorrida a ciertas vueltas de esta. La distancia recorrida es igual a multiplicar el diámetro de la rueda por el número pi, sin considerar el patinaje.

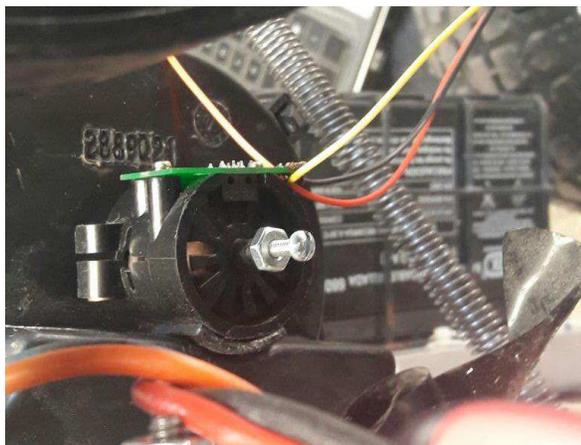


Figura 41. Encoder conectado al eje motriz de la rueda.

3.2.11 Cámara web.



Figura 42. Cámara Logitech c920 utilizada, en el sistema de visión.

El uso de sensores a bordo es totalmente necesario para permitir el aumento en el nivel de autonomía de las máquinas agrícolas. Entre las opciones disponibles para obtener la guía de un vehículo, se encuentran el control por GPS, el uso de sensores lidar (laser), el uso de encoders de gran resolución, y el uso de cámaras. Cada uno de estos métodos tiene numerosos pros y contras.

El sistema que ha desarrollado mejores resultados es el GPS, esta tecnología se ha implementado ya en tractores y máquinas grandes, sin embargo a pesar de esta ventaja, los costos por el uso de estos sistemas son elevados; además de esto su funcionamiento se ve afectado en situaciones bajo cubierta, debido a la dificultad del sistema para conectar con los satélites, este tipo de condiciones están presentes en los invernaderos por ejemplo, lo cual limita de gran manera la aplicación de esta tecnología en determinadas labores agrícolas.

Así dentro de esta gama de sensores utilizados en la guía de robots, el que ofrece más ventajas para este proyecto es el uso de visión artificial. Esta tiene la ventaja de poder desarrollarse con menos recursos económicos y ofrece resultados muy buenos para trabajos como la cosecha, monitoreo de cultivos e incluso fertilización o aspersión de agroquímicos. Dentro de los sistemas que ofrecen más información son los de visión artificial.

En la automatización agrícola, algunos sistemas de visión han sido implementados para localizar frutos y cosechar, uno de los enfoques para resolver este problema, es mover el mecanismo de cosecha hacia el objetivo, este enfoque permite una continua e incremental retroalimentación de información visual y correcciones, es también conocido como control servo visual. (Hutchinson et al., 1996; Marchand, Spindler, & Chaumette, 2005).

El sensor principal para la navegación entre plantas del robot es un cámara web de la marca Logitech modelo C920, la cual es utilizada para identificar las plantas o un chaleco de seguimiento. Lo anterior se logró modificando el algoritmo de visión artificial para identificación de plantas de jitomate propuesto por Chávez, 2016. Las características de desglosan en el cuadro 9.

Cuadro 9. Características Cámara Logitech c920 HD pro.

Máxima resolución de video	1920x1080 pixeles
calidad de fotografía	15 MP
Tipo de enfoque	Autoenfoco de 20 pasos
Corrección de iluminación	Automática
Compresión de video	H.264
Fps	30
Comunicación	Usb 2.0
Lente	Carl zeiss

3.2.12 Unidad de medida inercial (IMU)

La unidad de medida inercial utilizada incorpora los sensores acelerómetro, giroscopio y magnetómetro. Para el desarrollo de este proyecto nos enfocamos al uso del magnetómetro, usando sus lecturas para guiar al vehículo en una dirección específica durante la siembra y para medir giros de 90 grados durante los virajes.



Figura 43. IMU MPU 9250.

La IMU es una unidad de medición inercial (del inglés *inertial measurement unit*), en nuestro caso la IMU que utilizaremos es MPU 9250, el cual tiene varios sensores, entre ellos un acelerómetro, un giroscopio y un magnetómetro.

La IMU es el componente principal de los sistemas de navegación inercial usados en aviones, naves espaciales, buques y misiles guiados entre otros.

Los sensores MPU-9250 son IMU de 9DOF fabricado por Invensense. Internamente, el MPU-9250 está formado por acelerómetro de 3DOF y un giroscopio de 3DOF, y un magnetómetro AK8963 de 3DOF fabricado por Asahi Kasei Microdevices Corporation.

La comunicación en ambos modelos puede realizarse tanto por bus SPI como por bus I2C, por lo que es sencillo obtener los datos medidos. La tensión de alimentación es de bajo voltaje entre 2.4 a 3.6V.

Esta IMU consume 3.5mA, con todos los sensores y el DMP activados. Dispone de un sensor de temperatura embebido, un reloj de alta precisión e interrupciones programables. También puede conectarse con otros dispositivos I2C.

El rango del acelerómetro puede ser ajustado a $\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$, y $\pm 16g$, el del giroscopio a ± 250 , ± 500 , ± 1000 , and $\pm 2000^\circ \cdot s^{-1}$, y el del magnetómetro hasta $\pm 4800\mu T$.

El MPU-9250 incorpora un procesador interno (DMP Digital Motion Processor) que ejecuta complejos algoritmos de MotionFusion para combinar las mediciones de los sensores internos, evitando tener que realizar los filtros de forma exterior.

Acelerómetro: La aceleración se mide mediante el cambio de capacitancia. Tiene una masa fija a un resorte que permite moverse solo en un eje entre dos placas fijas. Cuando hay una aceleración en cualquier eje, la masa se mueve y provoca un cambio de capacitancia entre esas placas, este cambio es medido y procesado para calcular el valor correspondiente de aceleración.

Giroscopio: EL giroscopio mide el movimiento angular usando el efecto Coriolis. Cuando una masa se está moviendo en una dirección angular, con una velocidad, se produce una fuerza que es el efecto Coriolis el cual varia la capacitancia de unas placas fijas y el cambio de estas se convierte en la medición.

Magnetómetro: Este mide el campo magnético de la tierra usando el efecto Hall o efecto de resistencia magnética.

Si tenemos una placa conductiva y hacemos circular corriente a través de esta los electrones fluirán de un lado al otro de la placa en línea recta. Ahora sí un campo magnético se acerca a la placa el flujo de electrones no fluirá de en línea recta, hará que el flujo positivo circule de un lado de la placa y el negativo del otro; si se mide un voltaje entre estas dos que corresponde a la fuerza del campo magnético.

Los pines de la IMU deben conectarse de la siguiente manera:

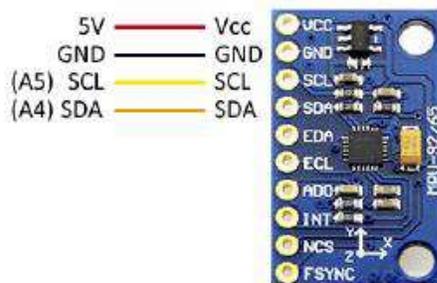


Figura 44. Pines utilizados para la conexión de la IMU.

VCC--> 3.3V/5V Alimentación

GND--> GND Tierra

SCL-->A5 Pulsos de reloj

SDA-->A4 Pulso de información

INT-->D2 Interrupción (Puede no usarse)

Para enviar la información de los sensores al Arduino se utiliza el protocolo I2C, el cual es un protocolo de comunicación de dos cables, muy fácil de usar y es utilizado por muchos dispositivos. La comunicación se hace teniendo dispositivos maestros y esclavos y el límite de dispositivos a utilizar es en base a el número de bits a utilizar.

En este protocolo cada dispositivo tiene un ID único o una única dirección y es así como el maestro puede elegir con cuál de ellos comunicarse. Se utilizan dos cables, uno llamado Serial Clock (SCL) y Serial Data(SDA). El primero es un pulso que sincroniza la transferencia de información entre dispositivos y es generado por el dispositivo maestro, el otro cable es el que lleva la información a transmitir.

3.2.13 Sistema de alimentación eléctrica.

El sistema de alimentación se compone por las baterías de 12 V y 12 A*h⁻¹ y el cableado que lleva la energía a todos los componentes. Se instalaron dos baterías en paralelo y se ubicaron en el centro del vehículo para mantener equilibrado el peso, inicialmente se utilizaron baterías de plomo con un peso considerable, y menor duración. Las baterías instaladas al final son de litio con un peso mucho menor y una duración equivalente a las dos pilas de plomo entre 1.75 y 3.5 horas (Para un consumo de 10 a 20 A).

3.3 Construcción.

Durante la etapa de construcción se utilizaron los talleres de la Universidad Autónoma Chapingo aunque algunas piezas se mandaron a elaborar en talleres cercanos.

3.3.1 chasis.

El chasis se elaboró de 12 piezas de aluminio hechas de perfil cuadrado de perfil tubular rectangular (PTR) de 1" x 1".

La estructura tiene 29 cm de altura, para ello se cortaron las barras verticales que se volvieron a unir después a las bases, con un taladro se hicieron los barrenos para los tornillos. Todo se unió con tornillos y tuercas, para permitir que sea más práctico el desarme en caso de requerirlo para modificaciones futuras (figura 45).



Figura 45. Estructura principal primer prototipo(izquierda), final(derecha).

3.3.2 sistema de transmisión.

Brazos de soporte motriz. Se fabricaron también, los soportes de las ruedas hechos de aluminio para mantener ligera la estructura del vehículo (figura 3446), se hicieron de solera de 0.25" x 2" con dimensiones de 20cm x 5cm x 7cm, se dobló y se perforo hasta tener las piezas individuales que se unieron a través de soldadura especial. Estas piezas permitirán el ajuste de la altura de despeje del skid steer.

Se adecuaron los rodamientos colocándoles bujes hechos de nylamid, esto con 4 perforaciones encordadas para fijarlos, de este mismo material se realizaron otros para sostener los ejes.



Figura 46. Bujes, rodamientos y brazos de soporte de las ruedas.

Se modificaron las llantas para hacerlas fijas acoplando un buje en lugar de los baleros y poder accionarlas a través del motor (Figura 47).



Figura 47. Buje acoplado a las llantas.

Para el accionamiento de las ruedas se diseñó una flecha y un buje de nylamid (figura 48) los cuales se instalaron a la salida de la reducción de los motores para permitir transmitir la potencia por medio de una catarina y cadena a otro eje inducido que está instalado en las ruedas (figura 50), esto tomando en cuenta que son cuatro ruedas y cuatro motoreductores que requerirá su propio eje y juego de rodamientos, para fijar las catarinas se hicieron desbastes en la geometría de los ejes con la finalidad de poner seguros. Las flechas de ruedas y transmisión se hicieron con material de 5/8" de diámetro de acero 1018, los bujes de nylamid de 40mm x 2.54cm con barrenos de 5/8".



*Figura 48. Ejes motriz a la salida de la reducción del motor, con buje(izquierda).
Ejes inducidos para las ruedas, con desbastes para fijar las piezas(derecha).*



Figura 49. Brazos de soporte de las ruedas y la transmisión.

Se hicieron barrenos y cuerdas para tornillos que puedan fijar las catarinas en los ejes (figura 50). Se comenzó con el ensamblaje de todos los componentes disponibles.



Figura 50. Catarinas del sistema de transmisión.

Una de las mejoras más importantes que se realizó al vehículo fue la transmisión por cadena a las 4 ruedas, Este sistema de transmisión de potencia quedó armado para posteriormente montarse a la plataforma (Figura 51). Los brazos de soporte se colocaron en posición angulada, buscando un ángulo de 45°. Cada motor acciona dos ruedas por medio de cadenas, brindándole al sistema doble tracción. Además variando la velocidad angular en cada se logra girar el vehículo en la dirección deseada.



Figura 51. Montaje del sistema de transmisión.

3.3.3 Adaptación del mecanismo de siembra

Para que el sistema tenga la capacidad de ser programable se cambió el medio motriz por el cual se accionaba el sistema de dosificación de semillas, el cual consistía en una rueda en la parte de enfrente que al ir girando transmitía movimiento a través de una banda al disco dosificador de semilla. Este sistema cambió por un motor eléctrico que puede variar su velocidad a través de PWM, conectado a la placa arduino.

Se utilizó un motorreductor con encoder marca Faulhaber (figura 52). En la tabla 10 se muestran las características del motorreductor utilizado.



Figura 52. Motorreductor Faulhaber.

Cuadro 10. Características motorreductor Faulhaber.

Modelo	2342L012CR
Longitud	42 mm
Diámetro	30 mm
Diámetro de eje	6 mm
Longitud del eje	35 mm
Potencia	17 W
Voltaje de funcionamiento	12 V
Torque	17.54 kg.cm
Velocidad sin carga	120 rpm (después reducción de engranajes)
Corriente sin carga	75 mA
Corriente con carga	1400 mA
Relación de engranajes	1/64
Encoder	OPTO
Fase Encoder	A-B Dual
Resolución del Encoder	I2CPR

Para acoplar el motorreductor al eje del disco dosificador se modificó el eje en el cual van montados los discos de dosificación, se diseñó y construyó una pieza

para fijar el eje del motor con el eje del disco dosificador, esta pieza es de nylamid; además de una placa de aluminio para fijar el motor en la sembradora por medio de tornillos.

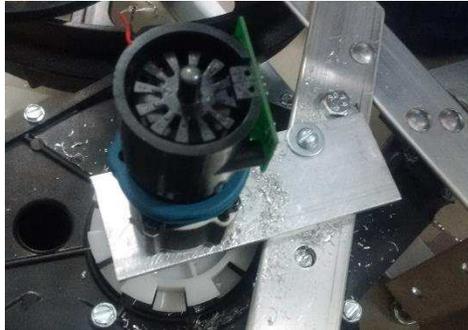


Figura 53. Placas colocadas para sujetar el motor a la sembradora.

Para el acoplamiento de la sembradora al vehículo skid steer se probó primero una posición en la parte de en medio del vehículo, pero después de las mejoras y la reubicación de los componentes electrónicos de control y las baterías, se optó por acoplarla en la parte trasera, para ello fue necesario colocar una placa entre las llantas que permitiera asegurar el mecanismo, esto hace que las llantas sean la referencia del abridor y de esta manera la profundidad se mantiene estable siempre que las dos llantas traseras estén en contacto con el suelo. El otro límite de la profundidad es la rueda tapadora.

Para lograr que el abridor rompa el suelo, se colocó un resorte que lo jala hacia el suelo. La tensión generada es suficiente para abrir una línea sobre la que se va sembrando.



Figura 54. Posición de la sembradora.

3.3.4 Conexión del sistema electrónico

Los componentes electrónicos se montaron en una tabla de acrílico y se unieron mediante tornillos, las conexiones a arduino se hicieron mediante jumpers y la alimentación de energía mediante cables.

Se instalaron los drivers (4 módulos), un par de relevadores, dos arduino MEGA (2560) y una barra de terminales sobre un tablero con un interruptor principal, que detiene la alimentación del circuito de control y para el movimiento del vehículo, la fuente de alimentación seleccionada es una batería de litio de 12 V, 12 A.

Este tablero se encargará de controlar la trayectoria del vehículo, así como de las tareas y actividades tales como el monitoreo de un cultivo y control de implemento de siembra.

IV. RESULTADOS

4.1 Sistema de Control del vehículo.

Como parte principal de los resultados se describe la implementación de algunos algoritmos y programas creados para el control y funcionamiento del vehículo. el enfoque fue resolver el funcionamiento de manera práctica, pero con posibilidad de ser mejorado en futuros trabajos que continuarán el desarrollo de este vehículo. En el cuadro 11 se muestra una descripción de los componentes principales.

Cuadro 11. Resumen de los componentes del UGV,

Componente	Descripción
Estructura	La estructura del vehículo es de perfil tubular rectangular (PTR) de aluminio de 1" x 1", y uniones atornilladas. La cubierta para proteger los componentes eléctricos es de madera y acrílico.
Llantas	Ruedas neumáticas de 0.26 m de diámetro. Utilizada para carga.
Transmisión	Por cadenas y catarinas paso 25 con una relación de transmisión 1:1 y rodamientos 5/8" para soportar las cargas en los ejes.
Motores	Voltaje 12 V Velocidad 139 rpm Potencia(estimada) 490 W Consumo corriente 2-70 A Capacidad de carga recomendada: 59 kg.
Torque	(estimado) 33.5 Nm
Velocidad	6 km/h
Fuente de poder	2 baterías 12 Volts a 7 amperes
Circuitos	<p>Circuito distribuidor de conexiones de voltaje</p> <p>Tienen como única función, distribuir y conjuntar las conexiones correspondientes a la alimentación de los puentes H, de los motores, así como de los módulos relevadores.</p> <p>Circuito distribuidor de conexiones de voltaje</p> <p>Tienen como única función, distribuir y conjuntar las conexiones correspondientes a la alimentación de los drivers y motores.</p> <p>Módulo de control</p> <p>El módulo de control está compuesto por la placa arduino, destinada al control de todos los procesos para el correcto posicionamiento del robot.</p>
Control	<p>Driver IBT-3</p> <p>Este circuito está diseñado para utilizar pwm en un motor, se usó uno para cada motor individual. Hasta 50 A.</p> <p>Encoder EE-SX1103</p> <p>Como elemento sensible del vehículo se decidió usar el encoder óptico, que el motor instalado tiene.</p> <p>Arduino Mega 2560</p>

Se selecciona esta opción por su versatilidad para realizar proyectos y en particular por contar con pines exclusivos para PWM resulta ideal para el control de velocidades de los motores para esta aplicación.

IMU MPU-9250

MPU-9250 está formado por acelerómetro de 3DOF y un giroscopio de 3DOF, y un magnetómetro AK8963 de 3DOF fabricado por Asahi Kasei Microdevices Corporation.

Programación

Mando principal realizado en C++ con la inclusión de la librería OpenCV en sus versiones 3.0 y 3.1. El desarrollo se hizo en visualStudio 2013. Lenguaje de programación Arduino basado en Wiring, así como en el cargador de arranque (bootloader) que es ejecutado en la placa. El microcontrolador de la placa se programa a través de un computador, haciendo uso de comunicación serial mediante un convertidor de niveles RS-232 a TTL serial. (Arduino)

Computadora.

Computadora.

El sistema de control principal fue desarrollado y probado en una computadora Dell con 8 Gb de memoria ram, procesador Intel CORE i7, y el sistema operativo Windows 10. El entorno de desarrollo fue Visual Studio 2013 de Microsoft en conjunto con la librería OpenCV en su versión 3.0. y 3.1.

Hardware. El hardware desarrollado es el UGV construido, el cuál ha sido probado en campos de maíz del campo experimental de la UACh, comprobando su buena tracción en terrenos con plantas de maíz aporcado. En resumen es un vehículo eléctrico con una capacidad de carga de 60 kg, capaz de desplazarse a velocidades de hasta 6 km*h⁻¹.



Figura 55. Estado del prototipo durante el Field Robot Event 2017.

Control del robot. El control del vehículo se desarrolló utilizando el lenguaje de programación C++, además del lenguaje de arduino. Se trabajó en cada sensor y actuador de manera independiente, después de conseguir el funcionamiento adecuado, se integró todo en 2 arduinos.

Funciones programadas. El robot fue programado para cumplir funciones necesarias para la labor de siembra y monitoreo. La función principal es el desplazamiento, esta puede realizarse por medio de un control bluetooth, o siguiendo a una persona que tenga puesto un chaleco especial de color amarillo fosforescente. Estas funciones se activan por medio de combinaciones específicas de botones en el robot. Adicionalmente el vehículo puede asperjar usando el control remoto.

Pero la función principal es la siembra automática que se hace de manera recta y a una distancia específica.

Programación de sensores y actuadores en Arduino. Los sensores y actuadores fueron programados de manera específica para poder ser combinados en el sistema, para cumplir las funciones especificadas en partes anteriores.

Programación de mando principal en C++. En el siguiente diagrama de flujo se muestra el funcionamiento del control principal, este fue programado en C++ y requiere de la comunicación bluetooth entre la computadora del vehículo y el joystick.

El joystick seleccionado fue el dualshock 4 de Sony, entre las ventajas encontradas esta la intuitividad, ergonómico, pad táctil, fácil de conseguir o reemplazar, pero sobre todo la distancia máxima probada de alrededor de 20 metros sin obstáculos.



Figura 56. Control bluetooth Sony.

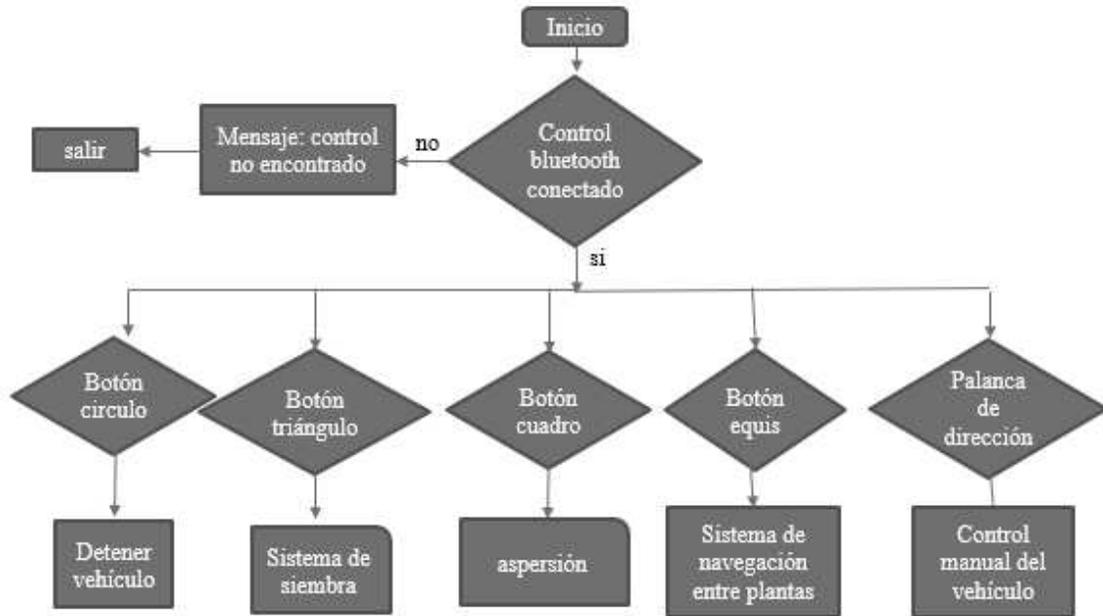


Figura 57. Diagrama de flujo del control principal del robot.

En el caso del control joystick lo primero que hace el sistema es detectar la presencia del joystick bluetooth, en caso de que el control no esté conectado el programa muestra un mensaje y se cierra. Si existe comunicación con el joystick el programa está en espera de que los botones sean presionados.

Para los movimientos del robot se utiliza la palanca izquierda; cuando se mueve hacia arriba el vehículo se desplaza hacia adelante; cuando se mueve la palanca hacia abajo el vehículo se desplaza hacia atrás, los movimientos a la derecha e izquierda generan un desplazamiento en esas direcciones con un radio amplio de giro, es decir un giro abierto. Para realizar giros sobre su propio eje se utilizan los gatillos R2 y L2 del joystick, el botón R2 genera un giro hacia la derecha y el botón L2 un giro hacia la izquierda.

El botón círculo se utiliza para detener el vehículo por completo, mandando una señal a los motores para que se queden en ese estado de reposo hasta que se active algún botón de movimiento.

Cuando el vehículo se está desplazando en este modo manual, podemos activar actuadores para la aspersion y la dosificación de semillas o fertilizante. Para el aspersor se utiliza el botón cuadro y para la dosificación del tornillo sinfín se usa el triángulo. Con el botón X activamos el sistema autónomo de navegación entre plantas, este sistema le permite al vehículo identificar el punto medio entre surcos sembrados para desplazarse de manera autónoma, mientras la cámara detecta las plantas y la computadora calcula el punto a seguir, los sensores ultrasónicos detectan la presencia de plantas a los lados del vehículo, una vez que no detecten nada durante un tiempo determinado, el vehículo realiza el viraje y avanza hacia el siguiente surco. Esto se puede usar para hacer aplicaciones de manera autónoma.

Presionando el botón triángulo y X al mismo tiempo se activa el sistema de siembra, el robot comienza a sembrar siguiendo la última dirección hacia la que vio, hasta que llega a una distancia específica en donde vira y regresa sembrando.

Sistema de Visión Artificial. El sistema de visión artificial programado le permite al vehículo navegar de manera autónoma entre plantas, esto se hizo implementando un tipo de control conocido como servo visual, este utiliza la visión artificial para determinar los movimientos de motores.

Para implementar control servovisual fue necesario definir las características geométricas del chaleco que se utilizarían para el sistema de seguimiento, esto se hizo haciendo el cálculo de las coordenadas del centro de gravedad de la imagen obtenida, tomando en cuenta el área más grande presente y despreciando las demás, lo cual ha utilizado en la creación de sistemas robóticos para el cultivo de frutos (Barth *et al*, 2016) de esta manera no importa si está en movimiento y el tamaño y forma de la figura que se sigue cambia. Esta característica es la guía ya que define un punto en el espacio bidimensional. El valor deseado de este punto es en el centro de las coordenadas de la imagen, tomando en cuenta solo la coordenada x. Este valor se actualiza dentro del ciclo para cada cuadro de video capturado.

Usando esta sola característica geométrica para el algoritmo de control servo visual es posible alcanzar un objetivo visible, está probado que el problema de movimiento puede ser resuelto con un enfoque sencillo y simplista. (Barth *et al*, 2016).

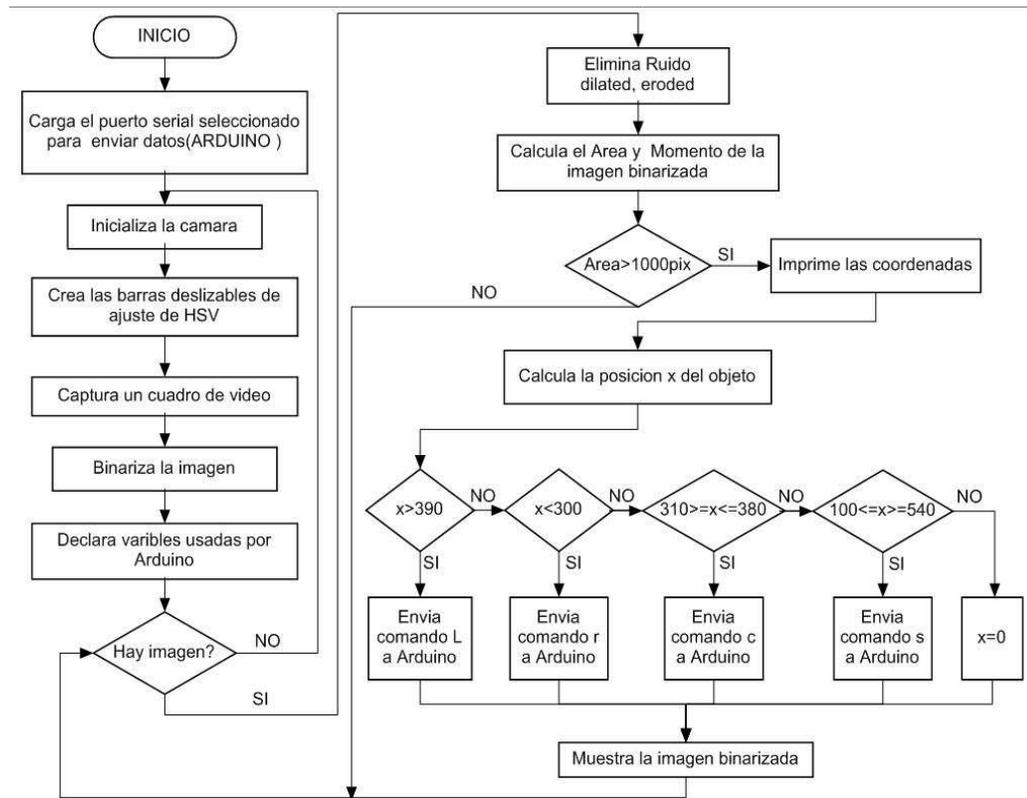


Figura 58. Diagrama de flujo del control servovisual implementado.

En la figura 58 observamos el funcionamiento del sistema de control para la navegación autónoma, calculando la coordenada del centro de masas y comparándolo con valores establecidos como rangos de acción determina si el vehículo debe girar a la derecha (envía una “r”), hacia la izquierda (envía una “L”) o seguir de frente (envía una “c”).

Después de probar el algoritmo de control servo visual en condiciones ambientales variables, sobre todo de iluminación haciendo que el robot se mueva de una zona de sombra a una zona iluminada a pleno sol, se determinó que el sistema se veía afectado. Para resolver problema se implementó y mejoró en el sistema el algoritmo desarrollado por Chávez, 2016 en el posgrado de Ingeniería

Agrícola y Uso Integral del Agua para la segmentación de cultivos en invernadero, los resultados fueron muy favorables, permitiendo al robot seguir una ruta en condiciones reales de un campo sembrado con maíz en el campo experimental de la UACH. Las ventajas que ofrece son muchas, como ahorro de recursos de CPU, respuesta en tiempo real rápida, desempeñando su navegación guiada de muy buena forma; sin embargo, está limitado por la presencia de obstáculos, los cuales no pueden ser detectados aun, para este tipo de interacción con el medio será necesario que en un futuro se incluya en el robot la función de mapeo y localización simultanea (SLAM: simultaneous localization and mapping) además de otros sensores.

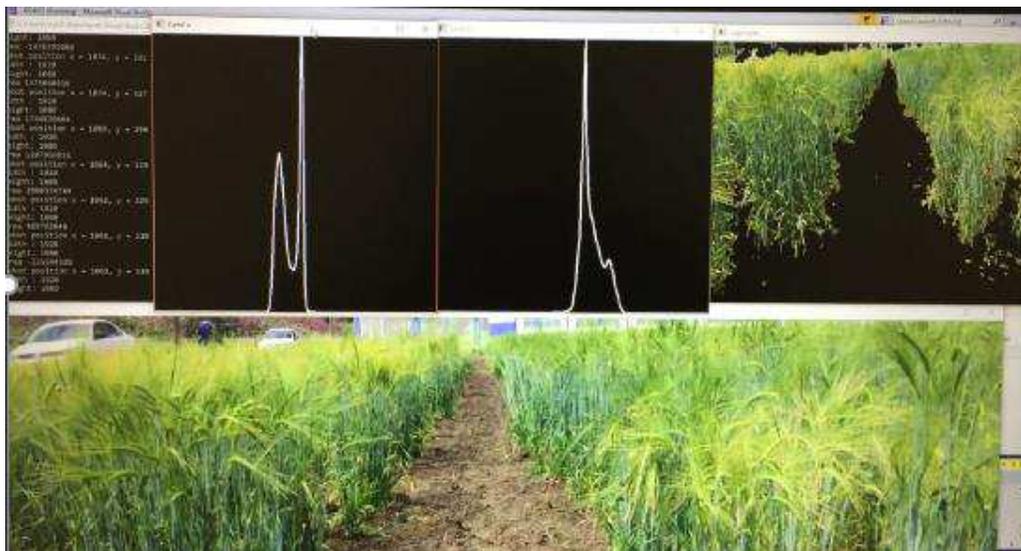


Figura 59. Información mostrada por el software de control servovisual.

La presencia de librerías para el desarrollo de robots es muy importante, sin embargo es necesario combinar estas herramientas para lograr el desempeño de una máquina, tomando en cuenta el conocimiento del medio de trabajo presente en el campo agrícola para desarrollar soluciones a problemas de automatización de las labores.

El control está basado en un sistema de visión por computadora utilizando las librerías de OpenCV y Visual Studio, en el espacio de color CIE Lab. Se utilizaron sensores ultrasónicos para detectar la presencia de objetos cercanos al vehículo, como las plantas sembradas, por ejemplo, encoders para monitoreo de la

velocidad y para control de posición del vehículo y un magnetómetro para el cálculo de los giros. Se realizó el control de velocidad mediante modulación de ancho de pulso (PWM, por sus siglas en inglés). Se programó el control con un joystick bluetooth. Se incluyó un magnetómetro para el cálculo de giros y ruta.

V. CONCLUSIONES

Se diseñó y construyó un UGV con una capacidad de carga de 60 kg, y una velocidad de trabajo de $4 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ tomando en cuenta las condiciones presentes en los terrenos agrícolas, las decisiones se hicieron basándose en la información disponible.

Se diseñaron y se llevaron a cabo adaptaciones para colocar un mecanismo para abrir el suelo con la finalidad de poder colocar en él semillas de maíz.

Se diseñaron y llevaron a cabo adaptaciones en una sembradora de jardín para que esta pueda ser arrastrada por el vehículo de manera centrada a través de un terreno preparado para la siembra.

Se realizaron adaptaciones al sistema de dosificación de semillas, con lo cual el sistema puede ser controlado de manera electrónica, esto incluye un encoder para conocer las revoluciones a las que gira el motor.

Se realizó la programación de un control manual, a través de un joystick por comunicación bluetooth, este mando principal es intuitivo y fácil de aprender a usar, a través de él se pueden realizar acciones complementarias como aspersión, y dosificación de fertilizantes, además de poder acceder al modo de navegación entre surcos y al modo de siembra.

Se implementó un sistema de control servo visual, combinado con la segmentación de las plantas adaptable a los cambios de iluminación, que permite el uso de una cámara no especializada y de bajo costo, este sistema identifica un punto guía en la parte central del surco. Puede ser usado también para que una persona le guíe el camino, esto siguiendo un chaleco fosforescente.

Se construyó un prototipo que funciona como auxiliar para diversas actividades agrícolas, el cual es fácil de operar, y no requiere mantenimiento especializado, y que además es seguro de usar.

Se corroboró el desempeño del vehículo en terrenos de la universidad Autónoma Chapingo, con un funcionamiento adecuado, siempre que la cámara se encontraba en la posición adecuada.

El vehículo tiene una autonomía limitada, que le permite seguir rutas, pero no tiene la capacidad de interactuar con elementos como obstáculos, o animales. Así que requiere de un operador humano que se encuentre en la zona de trabajo junto con él.

RECOMENDACIONES

La plataforma construida busca dar los primeros pasos en la automatización de procesos agrícolas con desarrollos tecnológicos realizados en la Universidad Autónoma Chapingo, México, por lo que se considera que la inversión en instrumentación para la localización y mapeo simultaneo (SLAM) del vehículo es necesaria.

Se recomienda la instalación de encoders absolutos en cada una de las llantas, para aplicar la odometría para el SLAM.

La implementación de un sistema de visión artificial para SLAM de código abierto, LSD SLAM, esto permitirá que el vehículo se mueva de manera más precisa y se puedan planear rutas dentro de un invernadero o en los surcos de una parcela sembrada.

La instalación de un sensor LIDAR rotatorio para complementar el sistema de visión artificial.

Se recomienda trabajar el sistema de control para implementar en él las ecuaciones que describen su movimiento.

La fabricación de una cubierta que haga que el vehículo sea más llamativo, y mantenga a los componentes aislados de polvo y partículas dañinas.

La instalación de una computadora embebida con características adecuadas para el procesamiento de imágenes. Como mínimo se plantea: memoria de video dedicado de 3 gb, 8 gb de memoria RAM, procesadores recientes de 5 núcleos o más.

VI. LITERATURA CITADA

1. Asimopoulos, N., Parisses, C., Smyrnaio, A., & Germanidis, N. (2013). Autonomous vehicle for saffron harvesting. *Procedia Technology*, 8 (Haicta), 175-182. <http://dx.doi.org/10.1016/j.protcy.2013.11.025>.
2. Auat Cheein, F. A., & Carelli, F. (2013). Agricultural robotics: unmanned robotic service units in agricultural tasks. *Industrial Electronics Magazine, IEEE*, 7(3), 48-58.
3. Bak, T., & Jakobsen, H. (2004). Agricultural robotic platform with four wheel steering for weed detection. *Biosystems Engineering*, 87(2), 125-136. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2003.10.009>.
4. Bakker, T., Asselt, K., Bontsema, J., Müller, J., & Straten, G. (2010). Systematic design of an autonomous platform for robotic weeding. *Journal of Terramechanics*, 47(2), 63-73. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jterra.2009.06.002>.
5. Barth, Ruud; Hemming, Jochen; van Henten, Eldert J. (2016). Design of an eye-in-hand sensing and servo control framework for harvesting robotics in dense vegetation. *Biosystems Engineering*, 146(1), 71-84. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.12.001>
6. Bechar, A. (2010). Robotics in horticultural field production. *Stewart Postharvest Review*, 6(3), 1-11.
7. Bechar, A. ; Vigneault, C. (2016). Agricultural robots for field operations: Concepts and components. *Biosystems Engineering*. 149(1), 94-111. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.06.014>.
8. Bechar, A.; Vigneault, C. (2017). Agricultural robots for field operations. Part 2: Operations and systems. *Biosystems Engineering*, 153(1), 110-128. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.11.004>.
9. Bell, T. (2000). Automatic tractor guidance using carrier-phase differential GPS. *Computers and Electronics in Agriculture*, 25(1-2), p. 53-66.
10. Billingsley, J., Visala, A., & Dunn, M. (2008). Robotics in agriculture and forestry. In B. Siciliano, & O. Khatib (Eds.), *Springer handbook of robotics*

- (pp. 1065-1077). Berlin, Germany: Springer-Verlag.
http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-30301-5_47.
11. Billingsley, J., Visala, A., & Dunn, M. (2008). Robotics in agriculture and forestry. In B. Siciliano, & O. Khatib (Eds.), Springer handbook of robotics (pp. 1065-1077). Berlin, Germany: Springer-Verlag.
http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-30301-5_47.
 12. Bolton, W. (2013). Mecatrónica: sistemas de control electrónico en la ingeniería mecánica y eléctrica. México: Alfaomega.
 13. Canakci, M., & Akinci, I. (2006). Energy use pattern analyses of greenhouse vegetable production. *Energy*, 31(8–9), 1243-1256. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2005.05.021>
 14. Canning, J. R., Edwards, D. B., & Anderson, M. J. (2004). Development of a fuzzy logic controller for autonomous forest path navigation. *Transactions of the Asae*, 47(1), 301-310.
 15. Chavez, A. (2016). Reconocimiento automático del tallo en el cultivo de tomate en invernadero mediante vision por computadora (Tesis de maestría). Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, México.
 16. Dario P; Dillman R; Christensen H I (2004). EURON Research Roadmaps. Robotics: European Research Agenda
 17. De-An, Z., Jidong, L., Wei, J., Ying, Z., & Yu, C. (2011). Design and control of an apple harvesting robot. *Biosystems Engineering*, 110(2), 112-122. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2011.07.005>.
 18. De-An, Z.; Jidong, L.; Wei, J.; Ying, Z.; Yu, C. (2011). Design and control of an apple harvesting robot. *Biosystems Engineering*, 110(2), 112-122.
 19. Deutschman, A. et al. (1987). Diseño de Máquinas (teoría y práctica). México: Ed. Continental.
 20. English, A., Ross, P., Ball, D., & Corke, P. (2014). Vision-based guidance for robot navigation in agriculture. *IEEE international conference on robotics & automation*, Hong Kong, China (pp. 1693-1698).
 21. Ferdoush, S.; Li, X. (2014). Wireless Sensor Network System Design Using Raspberry Pi and Arduino for Environmental Monitoring Applications. *Procedia Computer Science*, 34(1), 103-110. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2014.07.059>.

22. Fernandez, R., Salinas, C., Montes, H., & Sarria, J. (2014). Multisensory system for fruit harvesting robots. Experimental testing in natural scenarios and with different kinds of crops. *Sensors*, 14(12), 23885-23904.
23. Gobor, Z., Schulze Lammers, P., & Martinov, M. (2013). Development of a mechatronic intra-row weeding system with rotational hoeing tools: theoretical approach and simulation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 98(1), 166-174. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2013.08.008>.
24. Gonzalez-de-Soto, M.; Emmi, L.; Benavides, C.; Garcia, I.; Gonzalez-de-Santos, P. (2016). Reducing air pollution with hybrid-powered robotic tractors for precision agriculture. *Biosystems Engineering*, 143(1), 79-94. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.01.008>.
25. Greenman, J., Holland, O., Kelly, I., Kendall, K., McFarland, D., & Melhuish, C. (2003). Towards robot autonomy in the natural world: a robot in predator's clothing. *Mechatronics*, 13(3), 195-228. [http://dx.doi.org/10.1016/S0957-4158\(01\)00045-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0957-4158(01)00045-9).
26. Hague, T., Marchant, J. A., & Tillett, N. D. (2000). Ground based sensing systems for autonomous agricultural vehicles. *Computers and Electronics in Agriculture*, 25(1-2), 11-28.
27. Halachmi, I., Adan, I. J. B. F., Van Der Wal, J., Van Beek, P., & Heesterbeek, J. A. P. (2003). Designing the optimal robotic milking barn by applying a queuing network approach. *Agricultural Systems*, 76(2), 681-696.
28. Hamner, B., Bergerman, M., & Singh, S. (2011). Autonomous orchard vehicles for specialty crops production. In 2011 ASABE international meeting. Louisville, Kentucky: ASABE. Recuperado de http://www.ri.cmu.edu/pub_files/2011/7/20110808. ASABE.Autonomous_orchard_vehicles.pdf.
29. Hamza M A; Anderson W K (2005). Soil compaction in cropping systems a review of the nature, causes and possible solutions. *Soil and Tillage Research*, 82(2), 121–145.

30. Hansen, B. G. (2015). Robotic milking-farmer experiences and adoption rate in Jaeren, Norway. *Journal of Rural Studies*, 41(1), 109-117.
31. Hemming, J., Ruizendaal, J., Hofstee, J. W., & van Henten, E. J. (2014). Fruit detectability analysis for different camera positions in sweet-pepper. *Sensors*, 14(4), 6032-6044.
32. Hutchinson, S., Hager, G., & Corke, P. (1996). A tutorial on visual servo control. *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, 12, 651-670.
33. Jensen E S; Vejre H; Bu" gel S H; Emanuelsson J (Eds.) (2002). *Visioner for fremtidens jordbrug. [Visions for future agriculture]*. Center for Økologi og Miljø, Gads Forlag.
34. Jeon, H. Y. ; Tian, Lei F. (2009). Direct application end effector for a precise weed control robot. *Biosystems Engineering*, 104(4), 458-464. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.09.005>.
35. Klose, R., M€oller, K., Vielst€adte, C., & Ruckelshausen, A. (2010). Modular system architecture for individual plant phenotyping with an autonomous field robot. In *Proc. of international conference on machine control & guidance, Bonn, Germany* (pp. 299-307).
36. Knappenberger, T., Köller, K. (2012). Spatial assessment of the correlation of seeding depth with emergence and yield of corn. *Precision Agriculture*, 13(2), 163-180.
37. Kolbach, R., Kerrisk, K. L., Garcia, S. C., & Dhand, N. K. (2013). Effects of bail activation sequence and feed availability on cow traffic and milk harvesting capacity in a robotic rotary dairy. *Journal of Dairy Science*, 96(4), p. 2137-2146.
38. Kondo, N., Yamamoto, K., Yata, K., & Kurita, M. (2008). A machine vision for tomato cluster harvesting robot. Paper number: 084044. In 2008 ASABE annual international meeting. Providence, Rhode Island, USA: ASABE. <http://dx.doi.org/10.13031/2013.24691>.
39. Marchand, E., Spindler, F., & Chaumette, F. (2005). Visp for visual servoing: a generic software platform with a wide class of robot control skills. *Robotics Automation Magazine, IEEE*, 12(1), 40-52.

40. Melander, B. ;Lattanzi, B.; Pannacci, E. (2015) Intelligent versus non-intelligent mechanical intra-row weed control in transplanted onion and cabbage. *Crop Protection*, 72(1), 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2015.02.017>.
41. Nof, S. Y. (2009). *Handbook of automation* (1st ed.). Springer.
42. Nonami, K. et al. (eds). (2013) *Autonomous Control Systems and Vehicles, Intelligent Systems. Control and Automation: Science and Engineering*, 65(1). DOI 10.1007/978-4-431-54276-6_13, Springer Japan
43. Ortíz-Cañavate, J. (2003). *Las máquinas agrícolas y su aplicación. España: Mundi-Prensa.*
44. Pérez-Ruíz, M.; Slaughter, D. C.; Fathallah, F. A.; Gliever, C. J.; Miller, B. J. (2014). Co-robotic intra-row weed control system. *Biosystems Engineering*, 126(1), 45-55. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.07.009>.
45. Reina, G.; Milella, A.; Rouveure, R. ; Nielsen, M. ; Worst, R.; Blas, M. R. (2016) Ambient awareness for agricultural robotic vehicles. *Biosystems Engineering*, 146(1), 114-132.
46. Reinecke, M., Grothaus, H., Hembach, G., Scheuren, S., & Hartanto, R. (2013). Dynamic and distributed infield-planning system for harvesting. *Proc. of American Society of Agricultural and Biological Engineers annual international meeting ASABE, Kansas City, Missouri, USA* (pp. 156-160).
47. Rodriguez, G., & Weisbin, C. R. (2003). A new method to evaluate human-robot system performance. *Autonomous Robots*, 14(2-3), 165-178.
48. Rovira-Mas, F., Chatterjee, I., & Saiz-Rubio, V. (2015). The role of GNSS in the navigation strategies of cost-effective agricultural robots. *Computers and Electronics in Agriculture*, 112, 172-183.
49. Schueller, J. K. (2006). *CIGR handbook of agricultural engineering* (Vol. VI). CIGR-The International Commission of Agricultural Engineering.
50. Sheridan, T. B. (2016). Human-robot Interaction: Status and challenges. *Human Factors*, 58(4), 525-532.
51. Shigley J. E. et al. (2012). *Diseño en ingeniería mecánica. México: MCGRAW HILL.*

52. Slaughter, D. C., Giles, D. K., & Downey, D. (2008). Autonomous robotic weed control systems: a review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 61(1), 63-78. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2007.05.008>.
53. Smith, W.; Peng, H. (2013). Modeling of wheel–soil interaction over rough terrain using the discrete element method. *Journal of Terramechanics*, 50(5–6), 277-287. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2013.09.002>.
54. Sørensen, C.G.; Jørgensen, R.N.; Maagaard, J.; Bertelsen, K.K.; Dalgaard, L.; Nørremark, M.; (2010) Conceptual and user-centric design guidelines for a plant nursing robot. *Biosystems Engineering*, 105(1), 119-129. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.10.002>.
55. Steinfeld, A. (2004). Interface lessons for fully and semiautonomous mobile robots. In Paper presented at the IEEE international conference on robotics and automation.
56. Taniwaki, M.; Iida, M.; Kang, D.; Tanaka, M.; Izumi, T.; Umeda, M. (2008). Walking behaviour of a hexapod robot using a wind direction detector. *Biosystems Engineering*, 100(4), 516-523. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2008.04.017>.
57. Tarokh, M., Ho, H. D., & Bouloubasis, A. (2013). Systematic kinematics analysis and balance control of high mobility rovers over rough terrain. *Robotics and Autonomous Systems*, 61(1), 13-24. <http://dx.doi.org/10.1016/j.robot.2012.09.010>.
58. Tervo, K., & Koivo, H. N. (2014). Adaptation of the humanmachine interface to the human skill and Dynamic characteristics. *IFAC Proceedings Volumes*, 47(3), 3539-3544.
59. Thuilot, B., Cariou, C., Martinet, P., & Berducat, M. (2002). Automatic guidance of a farm tractor relying on a single CPDGPS. *Autonomous Robots*, 13(1), p. 53-71.
60. Tobe, F. (2015). Are ag robots ready? 27 companies profiled. Available from <http://www.therobotreport.com/news/ag-intransition-from-precision-ag-to-full-autonomy>.

61. Van Henten, E. J., Van Tuijl, B. A. J., Hemming, J., Kornet, J. G., Bontsema, J., & Van Os, E. A. (2003). Field Test of an Autonomous Cucumber Picking Robot. *Biosystems Engineering*, 86(3), 305-313. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2003.08.002>
62. Van Henten, E. J., Bac, C. W., Hemming, J., & Edan, Y. (2013). Robotics in protected cultivation. *IFAC Proceedings Volumes*, 46(18), 170-177.
63. Vidoni, R., Bietresato, M., Gasparetto, A., Mazzetto, F. (2015). Evaluation and stability comparison of different vehicle configurations for robotic agricultural operations on side-slopes. *Biosystems Engineering*, 129(1), 197-211. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.10.003>.
64. Yaghoubi, S., Akbarzadeh, N. A., Bazargani, S. S., Bazargani, S. S., Bamizan, M., & Asl, M. I. (2013). Autonomous robots for agricultural tasks and farm assignment and future trends in agro robots. *International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering IJMME-IJENS*, 13(03), 1-6. Retrieved from http://www.ijens.org/Vol_13_I_03/134301-1303-8989-IJMME-IJENS.pdf.
65. Zhang, Q. (2013). Opportunity of robotics in specialty crop production. *IFAC Proceedings Volumes*, 46(4), p. 38-39.

Web

- Nature. (2017). Age of the arduino. vol. 544; p. 125-126. Recuperado de https://www.nature.com/polopoly_fs/1.21768!/menu/main/topColumns/topLeftColumn/pdf/544125a.pdf
- FAO. (Enero 2016). Tendencias actuales. Crecimiento de la población humana y cambios demográficos. Recuperado de <http://www.fao.org/docrep/003/x9601s/x9601s04.htm>
- FAO. (Enero 2016). Food, Nutrition and Agriculture. Food for the Future. Recuperado de <http://www.fao.org/docrep/u3550t/u3550t00.htm#Contents>.
- FAO. (2016). El maíz en los trópicos: mejoramiento y producción. Recuperado de <http://www.fao.org/docrep/003/x7650s/x7650s00.htm#toc>.