

## Diseño de un prototipo de chasis de ancho variable para una cultivadora agrícola Design of a variable width chassis prototype for an agricultural cultivator

Carlos Roberto Martínez-Martínez<sup>1</sup>

Rommel Raeder Cortés-Leiva<sup>2</sup>

Alexander Adolfo Juárez-Osorio<sup>3</sup>

DOI:

Fecha de recepción: 13-07-2023 Fecha de aceptación: 29-08-2023

### Resumen

Se presenta el diseño de un chasis para una cultivadora agrícola, con un enfoque en el ajuste rápido del ancho entre surcos, dada la diversidad de anchos de siembra que se encuentran en los campos de El Salvador, y las diversas necesidades que enfrentan los agricultores según el tipo de cultivo, el sistema de riego y la maquinaria disponible. Se propone un nuevo diseño de chasis que permite un ajuste rápido y preciso del ancho entre surcos, al mismo tiempo que soporta las condiciones adversas del terreno y facilita el trabajo del operador. Se utilizó una metodología híbrida que combina el análisis de resultados de operación de una máquina de prueba, previamente desarrollada, y el diseño teórico de nuevas características para el ajuste variable, utilizando ecuaciones de ingeniería mecánica para realizar cálculos de eficiencia del implemento, la distribución de esfuerzos en el chasis, las fuerzas cortantes en los pernos y los requisitos de potencia. Los resultados confirman la viabilidad operativa del diseño propuesto, como un primer acercamiento sobre la temática de evaluación del diseño; materiales y resistencias de cultivadoras agrícolas, a su vez que orientan el futuro desarrollo de prototipos para pruebas en terreno. Esta investigación sienta las bases para el desarrollo de implementos agrícolas innovadores y adaptables con el potencial de mejorar las prácticas agrícolas a nivel nacional, lo que representa una contribución significativa al sector agrícola.

**Palabras clave:** Caña de azúcar, implementos de labranza, agricultura mecanizada, control de malezas, labranza de conservación.

### Abstract

This paper presents the design of a chassis for an agricultural cultivator, focusing on the quick adjustment of row width. This addresses the diversity of planting widths found in the fields of El Salvador and the various needs faced by farmers based on the type of crop, irrigation system, and available machinery. A new chassis design is proposed that allows for rapid and precise adjustment of row width while supporting adverse terrain conditions and facilitating operator work.

A hybrid methodology was employed, combining the analysis of operation results from a previously developed test machine and the theoretical design of new variable adjustment features. Mechanical engineering equations were used to calculate implement efficiency, stress distribution in the chassis, cutting forces on bolts, and power requirements.

The results confirm the operational feasibility of the proposed design as an initial approach to evaluating design aspects, materials, and strengths of agricultural cultivators. They also guide the future development of prototypes for field testing. This research lays the groundwork for the development of innovative and adaptable agricultural implements with the potential to improve national agricultural practices, making a significant contribution to the agricultural sector.

**Keywords:** Sugar cane, tillage implements, mechanized agriculture, weed control, conservation tillage.

- 
1. Maestro en Ciencias, especialidad en Fisiología Vegetal y Producción de cosechas, Docente-investigador, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Católica de El Salvador. ORCID <https://orcid.org/0000-0002-6098-8765>. Email: carlos.martinez@catolica.edu.sv
  2. Ingeniero Mecánico, especialista en Mantenimiento Industrial, Docente-investigador, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Católica de El Salvador, El Salvador. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5082-1606>. Email: rommel.cortez@catolica.edu.sv
  3. Maestro en Administración Estratégica de empresas, docente-investigador, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Católica de El Salvador. ORCID: <https://0000-0003-2746-9493>. Email: alexander.juarez@catolica.edu.sv

## 1. Introducción

La producción agrícola en El Salvador presenta múltiples desafíos, entre los que destaca el requerimiento de un distanciamiento preciso entre surcos, que puede variar en función del tipo de cultivo, el sistema de riego y la maquinaria disponible. Para la mayoría de los agricultores, en particular aquellos que operan en micro parcelas o en áreas de pequeña escala, esta variabilidad se convierte en un obstáculo significativo para la eficiencia de la labranza mecanizada. Esta situación se agrava debido a que la adaptación de la maquinaria agrícola a estas variaciones a menudo conduce a un desgaste prematuro de sus componentes, representando un incremento en costo económico y de tiempo. Para superar estas dificultades, el presente trabajo propone el diseño de un chasis mejorado para una cultivadora agrícola. El presente trabajo propone el diseño un nuevo tipo de chasis ajuste rápido y preciso del ancho entre surcos, con la capacidad de soportar condiciones de terreno adversas y facilitar la labor del operario, el cual se acopla al tractor y utiliza su potencia hidráulica para modificar la distancia entre las secciones de la cultivadora. Este ajuste es posible gracias a la implementación de bastidores articulados en forma de tijera que, mediante el uso de un cilindro hidráulico, permiten expandir o contraer la distancia entre las secciones de la máquina. Esta estrategia no solo ofrece una solución a un problema existente, sino que también abre el camino para el desarrollo de

nuevos implementos agrícolas asequibles para productores salvadoreños y adaptables a las condiciones de suelos pesados de su respectiva región. Este avance tiene el potencial de facilitar considerablemente las prácticas agrícolas locales, representando un importante aporte para el sector.

Una cultivadora de caña de azúcar es una herramienta agrícola específicamente diseñada para optimizar las labores de mantenimiento, desempeñando en cada paso varias tareas que mejoran la salud y la productividad del cultivo, entre las que se encuentra el escarificado del suelo entre los surcos, una práctica conocida como cultivo inter-surco (Morugán *et al.*, 2020). Esta labor ayuda a combatir las malezas que, al competir por los recursos abióticos y los nutrientes en el suelo, representan un desafío significativo para la productividad de los cultivos (Rao *et al.*, 2015). Simultáneamente, dicha labranza incorpora materia orgánica en el suelo, un elemento vital para mantener su fertilidad y estructura a largo plazo (Lal, 2015), también mejora la textura del suelo y promueve la infiltración del agua, un aspecto particularmente importante en regiones donde el cultivo de caña de azúcar es regado. La aireación del suelo también se ve favorecida por este tipo de labor, favoreciendo el desarrollo de las raíces de la planta (Bodner *et al.*, 2013). Además, la acción de las cultivadoras permite la eliminación de raíces no productivas, lo que conduce a una mayor canalización

de los recursos del suelo hacia las raíces que son más jóvenes y productivas, mejorando de esta manera la eficiencia en el crecimiento de la caña de azúcar.

Los agricultores salvadoreños han utilizado durante décadas implementos de diseño norteamericano para la labranza de suelos. Entre estos se incluyen rastras de tiro, rastras de tres puntos, arados tipo chisel, arados de discos rotativos, arados de vertederas y arados de cinceles subsoladores. Recientemente y con el objetivo de mejorar la eficiencia en los cultivos de surco, algunos fabricantes de Sur América (Marchesan, 2013) han construido máquinas cultivadoras ajustables por estribos. Sin embargo, estas no facilitan la adaptación rápida del implemento a un modelo de agricultura parcelaria dado que, para llevar a cabo dicha labor, es necesario desarmar varios componentes de las máquinas. Por otro lado, Zykin & Lazutkina (2019) llevaron a cabo un diseño adaptado de un cultivador en hileras. Este implemento, equipado con cuerpos de trabajo combinados, permite el control de malezas entre las hileras en una sola pasada, logrando el cultivo completo de las zonas protectoras de los cultivos. La distancia de caída del suelo y la ubicación de los discos planos en los grupos adyacentes del cultivador en hileras, permiten cubrir completamente las plantas de malezas con una capa de suelo sin dañar las plantas cultivadas. Algunos autores han comprobado esto teóricamente. En

el caso de Abbaspour-Gilandeh *et al.* (2012) propusieron el diseño de un cultivador de alta velocidad entre hileras, con el objetivo de que la velocidad de labranza no influya de manera significativa en la profundidad de penetración y roturación del suelo. El diseño resultó en un chasis de marco unitario, una cuchilla de disco montada en un varillaje de suspensión y un barrido plano mediante estribos. Este diseño, no obstante, es una simplificación del conocido arado de chisel, similar al enfoque que adoptó Pérez-Ruiz *et al.* (2013), quienes además incorporaron un aspersor electrónico de agroquímicos para depositar fertilizantes hidrosolubles al suelo durante la labranza. A pesar de que los trabajos mencionados aportan modelos reales de modificación a los diseños disponibles de maquinaria, otros autores se limitan a sugerir estrategias de utilización de implementos ya existentes. Tal es el caso de Marrero *et al.* (2017), quienes propusieron un esquema de adquisición de maquinaria para la mecanización de la caña de azúcar, con un enfoque agroecológico y de sostenibilidad. Este enfoque pretende garantizar la disminución o prevención de los efectos negativos que produce el uso de la maquinaria sobre el medio ambiente. De igual forma, Villablanca *et al.* (2014) se limitaron a ofrecer recomendaciones técnicas y reportaron una recopilación sobre buenas prácticas de manejo de diferentes maquinarias ya existentes, basándose en un proyecto de investigación de dos años en una provincia africana.

Un estudio realizado por Balsari *et al.* (2018) examinó cómo varios tipos de suelo y condiciones de trabajo afectan la eficiencia de las cultivadoras comunes. Su contribución se enfocó en cómo la interacción entre la maquinaria y el suelo puede afectar la eficiencia de labranza, proporcionando una base de conocimientos para el diseño de implementos agrícolas. Sin embargo, su enfoque generalizado sobre tipos de suelo y condiciones de trabajo no aborda las necesidades específicas de cultivos particulares, como la caña de azúcar. Por otro lado, la cultivadora de ancho variable que se propone en este artículo está diseñada teniendo en cuenta las características del cultivo en cuestión, como su distribución en hileras y su ciclo de crecimiento.

Hosseini *et al.* (2022) examinaron cómo diseñar y optimizar los cinceles de los cultivadores para aumentar la eficiencia energética y la calidad de la labranza, indicaron además que el rendimiento de la maquinaria puede verse significativamente afectado por factores de diseño ergonómico, como la disposición y accesibilidad de los controles, la comodidad del operador y la facilidad de mantenimiento de la máquina. Sin embargo, este método no considera otros componentes estructurales que pueden optimizarse para mejorar el rendimiento del implemento, de acuerdo con suelos pesados que son típicos del territorio salvadoreño. En forma similar, Wang *et al.* (2022) idearon un método de optimización multiobjetivo para el

diseño de maquinaria agrícola, en términos de considerar diversos factores como la eficiencia energética, calidad de labranza, durabilidad de la maquinaria, e impacto ambiental. Sin embargo, este último trabajo no proporciona una solución específica para la mejora de la mecanización en cultivos de caña de azúcar en cuanto a su mantenimiento y posible variación de anchuras de surcos.

La ingeniería mecánica proporciona criterios esenciales para el diseño y ensayo de nuevas estructuras de maquinaria agrícola. Este proceso implica un análisis detallado de la dinámica de las estructuras, mecanismos y sistemas implicados. El análisis de elementos finitos (FEA), un enfoque comúnmente utilizado, se encarga de calcular la distribución de esfuerzos y deformaciones en la estructura, lo que ayuda a identificar áreas de alta tensión y posibles puntos de falla (Cook *et al.*, 2001). Además, se evalúa la resistencia de las soldaduras, puntos críticos en la estructura que pueden estar sujetos a esfuerzos intensos y vibraciones (Çevik, 2021), utilizando principios de mecánica de materiales (Beer *et al.*, 2014). En el diseño de maquinaria agrícola, el esfuerzo de tiro es un factor determinante. Máquinas de tracción como tractores deben generar y resistir grandes fuerzas de tiro, influenciadas por aspectos como la potencia del motor, la tracción de los neumáticos y el peso de la máquina (Varas, 2019). Para confirmar la veracidad de los modelos matemáticos empleados en estos

cálculos, se puede recurrir a datos confiables del Laboratorio de Prueba de Tractores de la Universidad de Nebraska-Lincoln, que realiza mediciones de arrastre y otros parámetros de eficiencia mecánica del motor y sistema hidráulico (Hoy & Kocher, 2020). La eficiencia de labranza, medida en términos de la energía requerida para labrar una determinada área de suelo en un cierto período de tiempo, también es considerada, y está influenciada por factores como las características del suelo, las condiciones de trabajo y las características de la máquina agrícola. Aunado al análisis teórico y numérico, es esencial la creación de modelos a escala y prototipos funcionales en el desarrollo de maquinaria agrícola. Los modelos a escala facilitan una visión física del diseño de la máquina, permitiendo una evaluación rápida de aspectos como la ergonomía, accesibilidad y estética. Estos también pueden usarse para realizar pruebas de concepto y validar hipótesis de diseño antes de la construcción del prototipo funcional (Orosz *et al.*, 2020).

## 2. Materiales y Métodos

El estudio se realizó en tres etapas diferentes. Durante la primera etapa, se evaluó el resultado de la operación de la máquina preexistente de pruebas que consistía en una cultivadora de surco alto, de enganche tipo “tres puntos” y provista de cuatro secciones rotativas de discos agrícolas. Se comprobó la resistencia del diseño de las patas de las secciones, sus materiales y la soldadura utilizada, luego de

que la máquina fue sometida a las demandas reales del trabajo agrícola. También se evaluó la capacidad del prototipo para resistir tensiones sin mostrar signos de deformación o fallo estructural. Otro aspecto que se comprobó en campo fue la relación entre robustez y peso, verificando que la cultivadora pudiera ser operada eficientemente por tractores de potencias entre los 75 y 90 HP. Con esta evaluación se obtuvo una comprensión detallada de las capacidades y limitaciones del prototipo, proporcionando así una base informada para las fases subsecuentes del estudio.

La segunda etapa de la investigación se centró en el desarrollo de un diseño teórico de características mejoradas para hacer posible el ancho ajustable del chasis. Para ello, se determinó la potencia de tiro requerida para operar la máquina, tomando como base la longitud de las secciones rotativas del implemento y la resistencia al desplazamiento que las secciones de discos ejercían durante la labranza; con este resultado, se definieron parámetros como el ancho de corte y el área efectiva de la ras- tra. Usando la fórmula de la tracción unitaria estandarizada, se determinó la fuerza requerida para la operación de la máquina. Posteriormente, se calculó la potencia demandada por la barra de arrastre, tomando como referencia la velocidad de avance del tractor y otras constantes asociadas a la eficiencia de trabajo en campo. El rendimiento se calculó con base en factores como la longitud del ancho de cor-

te, la velocidad del tractor y la eficiencia calculada del proceso.

En la tercera etapa, se construyó un prototipo a escala 1:2, el material escogido fue acero bajo norma ASTM, presentado en forma de tubo estructural cuadrado. Se utilizó un proceso de soldadura eléctrica por arco para unir las piezas. Se calculó el esfuerzo normal o de tensión al que se sometía la estructura, asegurándose de que los valores obtenidos se mantuvieran dentro de los límites seguros para el material. Finalmente, se determinó la fuerza cortante en pernos y en el punto de unión entre el bastidor y sus bridas, usando para ello la ecuación de esfuerzos, la tensión de arrastre y otras constantes estructurales típicas de dicha norma. Estos cálculos permitieron definir las especificaciones técnicas de los pernos a utilizar, garantizando la integridad y eficiencia del ensamblaje.

### 3. Resultados y Discusión

La máquina de prueba (Figura 1) se usó como prueba de concepto para evaluar la resistencia del material utilizado para construir el chasis. La estructura estaba formada por secciones de tubo cuadrado de acero ASTM de 7.62 cm de ancho. Se colocaron patas de 80 cm de altura en el interior (comparar Figura 3A), que, junto con los ejes de 20 cm de altura de las secciones de disco, constituían una altura total de 1 metro. La altura de las patas se fijó para evitar daños mecánicos a los tallos lignificados de las plantas durante el tránsito del tractor a través de la plantación, dado que, durante

la temporada seca y el inicio de la temporada lluviosa, los tallos comúnmente poseen entre 20 a 60 cm de altura. A pesar de que el tallo podía tener una altura cercana a un metro y tener hojas flexibles, esto no fue ideal en la práctica porque el proceso de amacollamiento de la planta genera retoños laterales que podrían ser dañados por el corte de discos en los laterales de los surcos. Los cañales con una altura total máxima de 1 metro tuvieron los mejores resultados. Las patas, hechas de planchas de acero ASTM de 1,9 cm de espesor y de 30 cm de ancho por 80 cm de alto, se unieron a una chumacera de doble balero mediante piezas de ángulo. Este implemento fue evaluado luego de más de 300 horas de trabajo real en suelo franco arcilloso. Las secciones de discos (Figura 3B) se articulaban alrededor de una barra central agrícola de 3.18 cm de diámetro, carretes separadores de 20 cm de diámetro y 4 discos de corte agrícola de acero de 56 cm de diámetro, todos sujetos a las patas. La profundidad de corte del suelo efectiva fue de 18 cm con esta configuración. Incluso en suelos pesados de tipo franco-arcilloso, los resultados fueron satisfactorios, lo que permitió la rotura y pulido del suelo en una sola pasada, evitando la formación de grietas superficiales y la desecación del horizonte agrícola (Figura 2, izquierda).

**Figura 1**

*Implemento de prueba de concepto*



**Figura 2**

*Resultado de prueba de concepto*



Gracias a la pulverización mecánica y a la incorporación de desechos de cosecha como materia orgánica, este prototipo también ayudó a reducir la incidencia de plagas de suelo, en correspondencia con los resultados obtenidos por Astudillo (2020). Los surcos creados por los discos de la cultivadora elevaban el suelo agrícola en la zona de desarrollo radicular de la caña de azúcar. Esto redujo la sus-

ceptibilidad a la erosión eólica, el gasto y el desperdicio de agua de riego, y aumentó la retención de humedad como resultado de la textura porosa del suelo después de la labranza.

La máquina de prueba funcionó con gran eficiencia y no generó una carga excesiva para el tractor, que pudo operar a una velocidad promedio de 9 km/h a 2,400 rpm, que es una velocidad estándar para este tipo de maquinaria

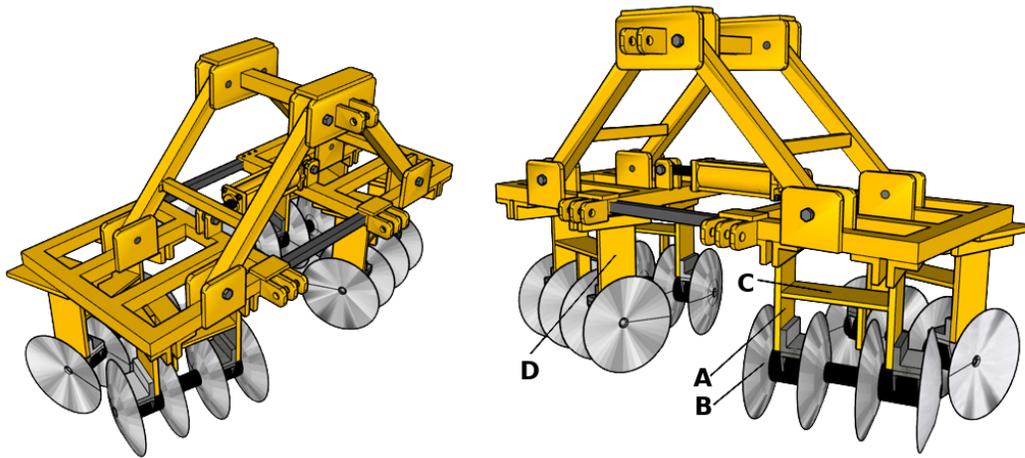
(Al-Sayed & Ahmed, 2022). El implemento prototipo se acopló al tractor mediante enganches de tres puntos, lo cual facilitó su levantamiento y transporte, así como la realización de virajes en las cabeceras de los surcos (Figura 2, derecha); debido a que estos elementos demostraron no tener deterioro alguno después de ser sometidos a labranza, fueron retomados posteriormente en el diseño del modelo conceptual del prototipo (Figura 4 B y D).

Tras obtener resultados positivos con la prueba de concepto, se decidió emplear los mis-

mos criterios de selección de material y diseño de componentes fundamentales, como las patas y el chasis, para desarrollar un chasis de ancho variable. Se diseñaron dos bastidores de 100 cm por 75 cm (Figura 4 C), unidos por cuatro brazos articulados sobre un eje común, que a su vez tenía el acople al tercer punto del tractor. Juntos, formaron una estructura piramidal (Figura 4 A) que permitió una distribución equitativa de las fuerzas y facilitó el ajuste de la distancia entre las secciones de discos según el ancho de los surcos del cultivo.

### Figura 3

*Diseño de cultivadora con secciones de disco*



Los pares de brazos anclados a cada bastidor se unieron mediante un tubo cuadrado soldado (Figura 4 G), para volver la estructura más sólida mediante la distribución de las fuerzas de expansión y retracción. La adaptación del ancho se logró mediante una botella hidráulica (Figura 4 J) conectada a los controles del tractor, permitiendo su fácil manipulación por parte del operador. Esta botella se colocó

en el centro de los bastidores para distribuir proporcionalmente la fuerza de expansión y retracción. Cada bastidor contó con un punto de acople para el brazo del tractor y se le incorporó una camisa interna en su lado anterior y posterior. Esto permitía la inserción de una barra deslizante para mantener la geometría piramidal del implemento (Figura 4 F y H). En la parte posterior, tanto la barra deslizante

como la estructura del bastidor fueron dotadas con perforaciones para la colocación de pasadores de seguridad (Figura 4 I), con el fin de prevenir cambios accidentales en la distancia entre las secciones. La ubicación de estos pasadores en el borde externo del chasis favorecía el acceso del operario.

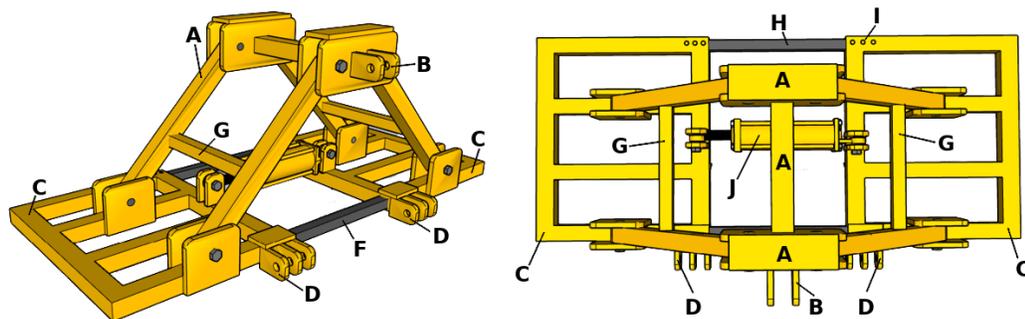
Para fortalecer la estructura, las patas se reforzaron internamente con una plancha horizontal formando una estructura en "H" (Figura 3 C). Se unieron al chasis mediante pernos insertados en las ranuras de dos ángulos contrapuestos soldados al bastidor, configurados de antemano en una posición ligeramente diagonal para proporcionar el ángulo de ataque adecuado a la sección de discos. El ángulo de las secciones delanteras estaba opuesto entre sí (Figura 3 A y D) para que los discos pudieran aporcar con tierra y materia orgánica al

surco central de caña. Las secciones traseras también estaban invertidas con respecto a las frontales, para regresar la tierra labrada a su posición original y prevenir la inversión excesiva de horizontes del suelo; dado que la concavidad de los discos estaba orientada hacia afuera, podía realizarse aporco de los surcos laterales en un mismo paso de la máquina.

En la práctica agrícola, la eficiencia y efectividad del laboreo del suelo dependen, en gran medida, de la adecuada configuración del ángulo de ataque en los discos de las rastras agrícolas (Bolintineanu *et. al.*, 2020). Este ángulo de ataque, definido como el ángulo entre la dirección de movimiento de la máquina y la posición del disco, generalmente se encuentra dentro de un rango entre 10 y 20 grados, ajustándose según las condiciones del suelo, las propiedades del cultivo y las condiciones climáticas.

**Figura 4**

*Detalle de diseño de chasis articulado*



Un ángulo de ataque empíricamente establecido en 17 grados demostró ser particularmente eficiente en el manejo de cultivos de caña de azúcar. Este ángulo específico permite una

eliminación efectiva de la maleza, al mismo tiempo que mantiene una perturbación mínima de los horizontes del suelo. Específicamente, al evitar un volteo excesivo del suelo,

se conserva la estructura del suelo principalmente cuando la capa agrícola y el subsuelo tienen diferente textura y fertilidad. Además, la configuración del ángulo de ataque a 17 grados evita la generación de aporques excesivamente altos, lo cual es contraproducente cuando la cosecha es mecanizada, debido a que dificulta el tránsito de la maquinaria.

El modelo del chasis diseñado fue construido como un modelo representativo a escala 1:2, con el fin de analizar el comportamiento de los bastidores durante el desplazamiento de cierre y apertura del ancho variable. Como resultado, pudo observarse que, durante las pruebas, las piezas tuvieron una movilidad fluida y la estructura de prueba no tuvo deformaciones (Figura 5).

### Figura 5

*Prototipo de chasis a escala 1:2, construido a partir del diseño conceptual*



*Nota.* A la izquierda se muestra la apertura máxima de labranza entre surcos; y a la derecha, la mínima.

#### a. Cálculo de potencia del tractor

La potencia que se transmitió a la rastra a través del trabajo del tractor depende de diversas variables, incluyendo el tipo de suelo, el ancho de corte del implemento empleado, la resistencia al desplazamiento, el peso del equipo, la profundidad de operación y la velocidad de la misma. Al calcular la potencia, se tuvieron en cuenta las demandas más elevadas. En el caso de estudio en cuestión, la rastra o bastidor de discos presentaba un ancho de corte de 2.1 metros. No obstante, su área efectiva de corte estaba compuesta por cuatro secciones de discos diseñados para pulir el

suelo, cada una con un ancho de 0.62 metros, lo que resultó en un total lineal de 2.48 metros. Para determinar la fuerza requerida o la tracción generada por el tractor, se utilizó la fórmula [1], que es el producto de la tracción unitaria y el ancho de corte (Duran, 2001).

$$F = T_u \times A_c \quad [1]$$

Se utilizó el valor de la tracción unitaria estandarizada por SENA (1985) para una rastra pulidora de dimensiones reducidas, es decir, con menos de 22 discos que operan a una profundidad de entre 10 a 15 centímetros. Se determinó que el requerimiento mínimo de

fuerza era de 268 Kg/m para una rastra de tipo tándem con 4 cuerpos o secciones. Al sustituir este valor en la fórmula [2], se calculó el valor correspondiente en Kilogramos-fuerza (Kgf).

$$F = \left(268 \frac{Kg}{m}\right) \times (2.48m) = 664.64Kgf \quad [2]$$

Para determinar la potencia demandada, se recurrió a la fórmula de potencia, que utiliza la fuerza calculada en [2] para multiplicarla por la velocidad de avance del tractor, según se indica en la ecuación [3]. Considerando que 1 caballo de fuerza (Hp) es equivalente a 4.562 Kgf/min (Budynas, 2012), estos se multiplicaron por 60 para convertirlos a Kgf/h, con el propósito de que el sistema de unidades fuera compatible con la velocidad de desplazamiento del tractor durante las pruebas, que era de 9 Km/h, lo cual proporcionó el valor de 273.72 Kgf/h. En este contexto, el factor de conversión utilizado en este caso fue de 273.72 Kgf/h para convertir a Hp, que se empleó para dividir el resultado de la potencia demandada y obtener la potencia en Hp, tal y como se muestra en la ecuación correspondiente.

$$P = \frac{F \times V \times 1Hp}{273.72 \frac{Kgf}{h}} = \frac{664.64Kgf \times 9.0 \frac{Km}{h} \times 1Hp}{273.72 \frac{Kgf}{h}} = 21.85Hp \quad [3]$$

Conforme a los resultados derivados de la ecuación [3], se estableció que la potencia requerida en la barra de arrastre era de 21.85 Hp, lo estuvo en concordancia con el buen funcionamiento de la cultivadora que fungió como prueba de concepto, que fue operada sin

dificultades por un tractor John Deere 2040, modelo 1981. Este tractor, según especificaciones del Laboratorio Oficial de Pruebas de Tractores de la Universidad de Nebraska-Lincoln (NTTL, 1980), dispone en la barra de tiro, de una capacidad de arrastre de 33.31 Hp en su quinta velocidad, lo cual es superior a la potencia requerida en [3].

### b. Cálculo de eficiencia del implemento

El rendimiento de las rastras agrícolas de discos se determinó mediante la fórmula para el cálculo de eficiencia [4] en forma semejante a como lo estimó Jara (2023).

$$R = \frac{L_c \times V \times E}{A_s} \times \left(1 \frac{Ha}{10,000m}\right) \quad [4]$$

Para el cálculo del rendimiento de campo (R), expresado en hectáreas por hora, se consideraron factores como la longitud del ancho de corte por paso de labranza (Lc) en metros, la velocidad (V) a la que se desplazó el tractor en km/hora, y la eficiencia (E), correspondiente al 80% (Scolaro *et. al.* 2021). Adicionalmente, se tomó en cuenta el área superficial del terreno (As) en metros cuadrados. Una vez establecida esta área, se aplicó un factor de conversión para cambiar las unidades de metros a hectáreas. Con base en estos datos, se pudo calcular el rendimiento de campo (R) que brindó la rastra, al introducir los valores específicos del dispositivo en la ecuación. Estos valores comprendieron un ancho de corte de 2.01 metros y una velocidad de trabajo del tractor de 7.5 km/hora,

equivalentes a 7,500 metros por hora. Por simplificación, se evaluó el rendimiento para una sola hectárea de trabajo.

$$R = \frac{(2.01m) \times (7,500 \frac{m}{h}) \times (0.8) \times 1Ha}{10,000m^2} = 1.21 \frac{Ha}{h} \quad [5]$$

El rendimiento aproximado fue de 1.21 hectáreas por hora [5]. Considerando que la jornada laboral estándar consta de 40 horas hombre por semana, se podría estimar una capacidad de trabajo de 48.4 hectáreas semanales.

### c. Esfuerzos en el bastidor de la cultivadora

La construcción se realizó empleando acero estructural ASTM, siguiendo las normas correspondientes. Este material se presentó en forma de tubo estructural cuadrado de 7.62 cm por lado y chapa de 0.6 cm en su sección transversal. Para el ensamblaje se utilizó soldadura eléctrica por arco con electrodo E7018 (Andino, 2020). El esfuerzo normal o de tensión se calculó utilizando la fórmula [6] de acuerdo con Armata *et. al.* (2022), donde el esfuerzo normal o de tensión " $\sigma_x$ ", expresado en N/m<sup>2</sup>, se definió como el cociente de la fuerza de tracción " $F_x$ " calculado en previamente en [2], y dividido en esta ocasión entre el área de trabajo expresada en metros cuadrados " $A_x$ ".

$$\sigma_x = \frac{F_x}{A_w} = \frac{664.64N}{0.75m^2} = 886.19 \frac{N}{m^2} \quad [6]$$

Este esfuerzo representaba la carga a la que se sometió la estructura en un área específica del suelo y, simultáneamente, la resistencia

de los elementos del implemento que se pretendía utilizar. Asimismo, era imperativo que este esfuerzo no superara el límite de fluencia estándar de 4x10<sup>8</sup> N/m<sup>2</sup> para el acero soldado que conformó el bastidor (Cruz, 2023). Esto implica que existía un valor máximo de esfuerzo que no debía ser sobrepasado durante la operación del implemento.

### d. Fuerzas de corte en pernos

El esfuerzo cortante se calculó de forma similar al esfuerzo de tensión, pero en función del área superficial de contacto de las fuerzas (Polo *et. al.*, 2020). En esta instancia particular, se observó un esfuerzo cortante doble en el perno de unión entre el bastidor y su respectiva brida que es el punto de sujeción con el bastidor. Con base a la fuerza calculada en [2], la fórmula del esfuerzo cortante en función del diámetro " $d$ " de 0.119 m del perno, multiplicado además por el factor de conversión de mil mega pascales, la ecuación resultante fue [7].

$$\tau = \frac{F}{\pi d^2} \times 1000 \frac{MPa}{\frac{N}{m^2}} = \frac{664.64Kgf}{3.1416 \times 0.119m^2} \times 1000 \frac{MPa}{\frac{N}{m^2}} = 586.06MPa \quad [7]$$

De acuerdo con los límites estandarizados de resistencia para pernos de acero (Rubio, 2007), se determinó que debe usarse pernos de dureza grado 8, ya que sólo éstos podrían soportar los esfuerzos de corte encontrados.

## 4. Conclusiones

El diseño mejorado del chasis de la cultivadora agrícola, con ajuste rápido del ancho en-

tre surcos, cumplió con criterios de eficiencia para la labranza mecanizada en suelos pesados y con la viabilidad de su construcción en términos de su sencillo diseño con asequibles y relativamente económicos. Los resultados respaldan su capacidad para adaptarse a diferentes condiciones de suelo, facilitar la siembra, mejorar la retención de humedad y reducir la erosión y las plagas de suelo. Además, puede ser operado de manera rápida por un tractor mediano y asequible de entre 80 a 100 Hp, lo que es recomendable para continuar con futuras etapas de pruebas en terreno. La cultivadora diseñada contribuye a mejorar las prácticas agrícolas, aumentar la productividad

y promover el desarrollo sostenible del sector agrícola en El Salvador. Este trabajo sienta las bases para un proceso de análisis, diseño y evaluación de prototipos para el desarrollo de implementos agrícolas innovadores y adaptables, ofreciendo una opción práctica y económica para los agricultores de menor escala. Para futuros trabajos, se recomienda estudiar el desempeño de distintas aleaciones de acero y tipos de soldadura en implementos que se hayan construido a partir de este modelo conceptual y que se hayan probado en campo durante condiciones reales de trabajo durante un tiempo conveniente de prueba.

## 5. Referencias

- Abbaspour-Gilandeh, Y.; Fazel-Niari, Z.; Shahgoli, G. & Bavafa, M. (2012). Design and construction of a high-speed inter-row cultivator. *In Applied Mechanics and Materials, 110*, pp. 4914-4918. Trans Tech Publications Ltd. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.110-116.4914>.
- Al-Sayed, A. B. & Ahmed, M. A. A. (2022). Effect of Forward Speed and Soil Type in Massey Ferguson Tractor (Model 290) Performance. *Diyala Agricultural Sciences Journal (DASJ)*, 14(2). <https://dx.doi.org/10.52951/dasj.22140204>.
- Andino-Vásquez, D. C. (2020). *Evaluación de la resistencia al desgaste de los recubrimientos obtenidos con electrodos: E7018, E6013, E6011. bajo la norma técnica ASTM G83-96.* <https://dx.doi.org/10.6421/http://dspace.espace.edu.ec/handle/123456789/14570>.
- Armenta, M. A. O.; Cárdenas, E. E. V.; Fong, H. F. A. & Pérez, A. I. M. (2022). Diseño, análisis y fabricación de una plataforma para pruebas de desgaste. *En XXVIII Congreso Internacional Anual de la SOMIM*. Bogotá.
- Astudillo-Ávila, R. A. (2020). *Criterios técnicos para la selección de maquinaria agrícola en el Valle de Cañete*. Universidad Agraria de la Molina, Perú. <https://hdl.handle.net/20.500.12996/4602>.

- Balsari, P.; Biglia, A.; Comba, L.; Sacco, D.; Alcatrao, L. E.; Varani, M. (...) & Aimonino, D. R. (2021). Performance analysis of a tractor-power harrow system under different working conditions. *Biosystems Engineering*, 202, 28-41. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.11.009>.
- Beer, F. P.; Johnston, E. R.; DeWolf, J. T. & Mazurek, D. F. (2014). *Mechanics of Materials*. McGraw-Hill.
- Bodner, G.; Nakhforoosh, A. & Kaul, H.P. (2013). Management of crop water under drought: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 33(2), 429-446. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0283-4>.
- Bolintineanu, G.; Voicea, I.; Cujbescu, D.; Persu, C.; Găgeanu, I. & Ungureanu, N. (2020). Heavy disc harrow testing with integrated transport train for tractors of 80-100 hp. Annals of the University of Craiova-Agriculture, *Montanology, Cadastre Series*, 49(2), 355-360. <https://anale.agro-craiova.ro/index.php/aamc/article/download/983/929>.
- Budynas, R. G. & Nisbett, J. K. (2012). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley* (10a ed.). McGraw Hill México.
- Çevik, B. (2021). Manual metal arc welding of dissimilar 30MnB5 and S 235 low alloyed steels for agricultural applications. *Materials Testing*, 63(11), 999-1006. <https://doi.org/10.1515/mt-2021-0033>.
- Cook, R. D.; Malkus, D. S.; Plesha, M. E. & Witt, R. J. (2001). *Concepts and applications of finite element analysis*. John Wiley & Sons.
- Cruz-Pérez, C. L. (2023). *Aplicación de soldadura con electrodo revestido en unión a tope de barras de refuerzo grado 60 NTP 341.031*, Trujillo-Perú, 2022.
- Durán-García, H. M. (2001). Efecto de las condiciones físicas del suelo y de las rejas de sembradora de cereales en el valor de la fuerza que provoca su rotura pasiva. *Interciencia*, 26(9), 391-393. [https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0378-18442001000900004](https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-18442001000900004).
- Hosseini, H.; Farzad, A.; Majeed, F.; Hensel, O. & Nasirahmadi, A. (2022). Multi-objective optimal design and development of a four-bar mechanism for weed control. *Machines*, 10(3), 198.
- Hoy, R. M. & Kocher, M. F. (2020). *The Nebraska Tractor Test Laboratory: 100 Years of Service*. American Society of Agricultural and Biological Engineers. <https://doi.org/10.3390/machines10030198>.

- Jara, M. (2023). Dimensionamiento del parque de maquinaria agrícola para la labranza convencional, en la Provincia de Huari. *Repositorio UNASAM*, Perú. <http://repositorio.unasam.edu.pe/handle/UNASAM/5671>
- Lal, R. (2015). Soil management in relation to sustainable agriculture and ecosystem services. *Food Policy*, 36(1), 72-87. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2010.11.025>.
- Marchesan, J.C. (2013). *Escarificador de suelo*. (U.S. Patent: BR102013018153B1)
- Marrero, J. A. G.; González, L. & Pérez, A. (2017). Propuesta de un sistema de máquinas e implementos para la mecanización del cultivo caña de azúcar, con enfoque agroecológico y de sostenibilidad. *Ojeando la Agenda*, (50), 5. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6266023>
- Morugán-Coronado, A.; Linares, C.; Gómez-López, M. D.; Faz, Á. & Zornoza, R. (2020). The impact of intercropping, tillage and fertilizer type on soil and crop yield in fruit orchards under Mediterranean conditions: *A meta-analysis of field studies*. *Agricultural Systems*, 178, 102736. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2019.102736>
- Nebraska Tractor Test Lab. (1980). "Test 1350: John Deere 2040 Diesel 8-Speed". Nebraska Tractor Tests.1669. <https://digitalcommons.unl.edu/tractormuseumlit/1669>
- Orosz, T.; Rassõlkin, A.; Kallaste, A.; Arsénio, P.; Pánek, D.; Kaska, J. & Karban, P. (2020). Robust design optimization and emerging technologies for electrical machines: Challenges and open problems. *Applied Sciences*, 10(19), 6653. <https://doi.org/10.3390/app10196653>.
- Perez-Ruiz, M.; Carballido, J.; Agüera, J. & Rodríguez-Lizana, A. (2013). Development and evaluation of a combined cultivator and band sprayer with a row-centering RTK-GPS guidance system. *Sensors Journal*, 13(3), 3313-3330. <https://doi.org/10.3390/s130303313>.
- Polo-Cano, K.; Rodríguez-Heilbron, C. & Roldán-Mckinley, J. (2020). Diseño de dispositivo mecánico para determinar el torque de inserción de mini implantes dentales. *Revista UIS Ingenierías*, 19(4), 181-197. <https://doi.org/10.18273/revuin.v19n4-2020016>.
- Rao, A. N.; Johnson, D. E.; Sivaprasad, B.; Ladha, J. K. & Mortimer, A. M. (2015). Weed management in direct-seeded rice. *Advances in Agronomy*, 130, 153-216. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(06\)93004-1](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(06)93004-1).
- Rubio, S. L. & Herrera, M. M. (2007). Comportamiento de los conectores de cortante tipo tornillo de resistencia grado dos para una sección compuesta con concreto de 28 MPa. *Ingeniería e Investigación*, 27(2), 18-25. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=64327204>

- Scolaro, E.; Beligoj, M.; Estevez, M. P.; Alberti, L.; Renzi, M. & Mattetti, M. (2021). Electrification of agricultural machinery: *A review. IEEE Access*, 9, 164520-164541. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3135037>.
- Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA). (1985). *Preparación de suelos: Roturación con rastra de disco pesada*. Ed. Buga: SENA. Colombia.
- Tekeste, M. Z.; Balvanz, L. R.; Hatfield, J. L. & Ghorbani, S. (2019). Discrete element modeling of cultivator sweep-to-soil interaction: Worn and hardened edges effects on soil-tool forces and soil flow. *Journal of terramechanics*, 82, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2018.11.001>.
- Ulrich, K. & Eppinger, S. (2011). *Product Design and Development*. McGraw-Hill Education.
- Varas, E. (2019). *Gestión de costos de mantenimiento y operación de equipos mineros basado en el mejoramiento de la vida útil de componentes*. <http://dspace.unitru.edu.pe/handle/UNITRU/14410>
- Villablanca, A.; Allende, M. & Riquelme, J. (2014). *Experiencias en el uso de maquinarias agrícolas en la provincia de Arica. Centro de Información de Recursos Naturales, CEDOC-CIREN*.
- Zykin, E. & Lazutkina, S. (2019). Theoretical and experimental substantiation of the design parameters for the working body of a row cultivator. *E3S Web of Conferences*, 126, p. 00051. EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912600051>