

03-032

DESIGN OF A MECHANIZED ALTERNATIVE TO THE PLANTING PROCESS OF FRUIT TREES IN FAMILY CULTIVATION LANDS

Malón Litago, Hugo ⁽¹⁾; Guallar Carbo, Javier ⁽²⁾; García-Ramos, Javier ⁽¹⁾; Bone Garasa, Antonio ⁽¹⁾; Videgain Marco, Maria ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Universidad de Zaragoza, ⁽²⁾ Grado en Ingeniería Agroalimentaria y del Medio Rural

The current trend in fruit growing is to make more intensive plantations. On the other hand, adjusted profits in the fruit sector require the search for cost reduction. Therefore, it is necessary to look for a new mechanical alternative, which is more efficient than the current planting process (manual planting), but controlling costs at all times. Currently, commercial alternatives have a high cost, mainly due to the need for high-precision GPS (Global Positioning System). The present study is focused on the search for a new process to establish fruit plantations in family cultivation lands compared to the alternative that currently exists, which is a manual planting operation. Concretely, the aim of the study is to obtain an alternative based on the development of a methodology and the mechanization of the planting process that improves the efficiency of the current system of planting fruit trees manually, while reducing costs with respect to commercial alternatives. In order to meet this aim, it is necessary to obtain the design of an agricultural implement that meets a series of requirements of precision, work capacity, mechanical resistance and dimensions, which have been defined during the study.

Keywords: design; agricultural implement; FEM; plantation of fruit trees; cost; mechanisation

DISEÑO DE UNA ALTERNATIVA MECANIZADA DEL PROCESO DE PLANTACIÓN DE FRUTALES EN EXPLOTACIONES AGRÍCOLAS FAMILIARES

La tendencia actual en fruticultura es hacer plantaciones más intensivas. Los beneficios ajustados en el sector frutícola, con lleva a la búsqueda de la reducción de costes. Por ello, hay que buscar una nueva alternativa mecánica que sea más eficiente que el proceso de plantación actual (plantación manual), pero controlando los costes en todo momento. Actualmente, las alternativas comerciales tienen un elevado coste, debido principalmente por la necesidad de GPS (Global Positioning System) de alta precisión. El presente estudio se centra en la búsqueda de un nuevo proceso de establecer plantaciones frutales en explotaciones agrícolas familiares, frente a la alternativa que actualmente existe, la cual es una operación de plantación manual. Concretamente, el objetivo del estudio es desarrollar una alternativa basada en el desarrollo de una metodología y la mecanización del proceso que mejore la eficiencia del sistema actual de plantar frutales de forma manual, al mismo tiempo que se reducen costes con respecto alternativas comerciales. Para ello es necesario obtener el diseño de un apero agrícola que cumpla con una serie de requisitos referentes a precisión, capacidad de trabajo, resistencia mecánica y dimensiones, definidas durante el estudio

Palabras clave: diseño; apero agrícola; MEF; plantación de frutales; costes; mecanización



© 2023 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. Introducción

La tendencia actual en fruticultura es hacer plantaciones más intensivas. Los beneficios ajustados en el sector frutícola, con lleva a la búsqueda de la reducción de costes. Por ello, hay que buscar una nueva alternativa mecánica que sea más eficiente que el proceso de plantación actual (plantación manual), pero controlando los costes en todo momento.

Actualmente, las alternativas comerciales tienen un elevado coste, debido principalmente por la necesidad de GPS (Global Positioning System) de alta precisión.

Las explotaciones frutícolas familiares no tienen capacidad para hacer frente al gasto de implementar sistemas con GPS, ni son competitiva si continúan con un proceso de plantación manual. Por ello, este tipo de explotaciones requiere del desarrollo de una metodología y aperos que permitan mecanizar la labor de plantación de árboles frutales, consiguiendo un proceso eficiente y con un coste ajustado a sus posibilidades.

2. Objetivos

El objetivo general del estudio es desarrollar una alternativa basada en la mecanización del proceso de plantar frutales que mejore la eficiencia del sistema actual en explotaciones familiares, el cual se realiza de forma manual, al mismo tiempo que se reducen costes con respecto alternativas comerciales.

Con el fin de alcanzar el objetivo general del estudio, se definen una serie de objetivos específicos, los cuales son:

- Desarrollo de una metodología y un sistema mecanizado para la plantación de frutales
- Obtener un apero con un coste de operación de plantar frutales menores que el sistema actual y que las opciones comerciales mecánicas actuales.
- Obtener un apero que cumpla los requisitos impuestos en el proyecto, referentes a precisión, capacidad de trabajo, resistencia mecánica y dimensiones

3. Requisitos mínimos del apero

Previo al diseño del aparato que hará posible la mecanización de la labor de plantado de frutales, es necesario definir los requisitos mínimos que debe cumplir el apero. A continuación, se describen los requisitos definidos en el estudio.

3.1 Carga máxima en el tripuntal trasero

El sistema mecanizado para el plantado de frutales es un apero que se acoplará al tripuntal trasero de un tractor (figura 1). En el caso estudiado, la explotación agrícola dispone de dos tractores, concretamente un John Deere 6115MC y un John Deere 5090GN. De ellos el caso más desfavorable el tractor John Deere 5090GN, el cual tiene una capacidad máxima de elevación en los ganchos del tripuntal trasero de 2.540kg.

3.2 Dimensiones del acople del apero

Las dimensiones del tripuntal trasero de los tractores está definida por la norma UNE 68006-1:2003. La normativa se divide en categorías según la potencia de la toma de fuerza a régimen nominal del motor. Cada categoría tiene unas dimensiones del tripuntal trasero específicas con unos márgenes de tolerancias. En el caso del estudio el tractor John Deere 6115MC pertenece a la categoría II y IIIN, mientras que el tractor John Deere 5090GN pertenece a la categoría I/II. En el estudio, se define que las dimensiones del acople al

tripuntal del apero para la mecanización del proceso de plantado de frutales deben ser las correspondiente a la categoría II, a la cual pertenecen los dos modelos de tractor disponibles en la explotación.

Figura 1. Vista trasera, incluido tripuntal, de tractor John Deere 5090GN (John Deere (n.d.))



3.3 Resistencia del apero

El apero diseñado debe cumplir los requerimientos mínimos estructurales para que este no se rompa durante su uso. El coeficiente de seguridad de la estructura resistente del apero debe ser superior a 3 con respecto al límite elástico del material, debido a que en el análisis estructural a realizar en el estudio no se van a considerar estados de fatiga, ni de carga dinámica. Un coeficiente de seguridad de 3 con respecto al límite elástico del material en un análisis estático implica vida infinita a fatiga. (Serraller, 2017) En cuanto a los desplazamientos no se definen requerimientos máximos.

3.4 Anchura máxima del apero

En referencia las dimensiones de circulación, entre la cuales se incluyen la anchura de circulación, el Real Decreto 2822/1998, de 23 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento General de Vehículos, establece las pautas a seguir. En función de las pautas definidas en el Real Decreto 2822/1998 y de anchura de los tractores (2,49m el tractor John Deere 6115MC y 1,95m el tractor John Deere 5090GN), se define que la anchura máxima del apero debe ser de 2,61m, que requeriría de autorización especial, o de 2,55m que no requeriría de autorización especial.

3.5 Precisión del apero

En cuanto a la separación entre árboles de la misma fila, Ramón-Fernández (1996) indica que una variación de 10 a 20 cm entre árboles de la misma fila no complica su manejo posterior. Por ello, se escoge 15 cm, el valor intermedio de los indicados, como máximo error.

4 Diseño del apero para mecanización de la labor de plantado de frutales

Definidos los requisitos técnicos del apero se procede con el diseño y análisis del apero que permite realizar la labor de plantación de frutales de forma mecanizada.

4.1 Diseño del apero

A partir de las dimensiones impuestas se procede a realizar el diseño inicial del apero. Concretamente en la figura 1 se muestra el diseño inicial de la estructura resistente que conforma el apero.

Figura 2. Diseño inicial de la estructura resistente del apero

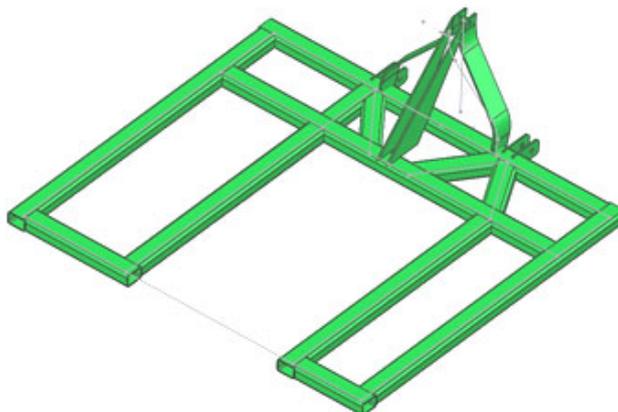


Figura 3. Púa

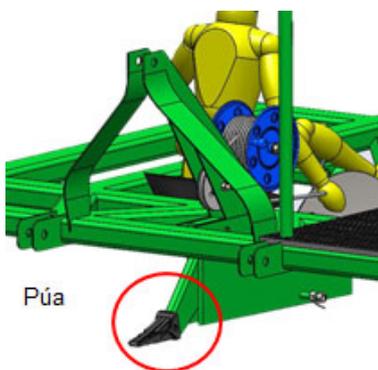


Figura 4. Chapas y rejas

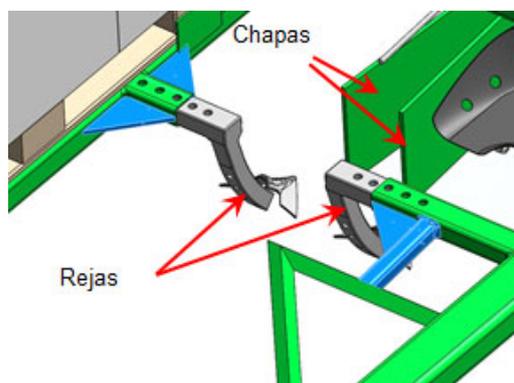


Figura 5. Diseño de acople de disco

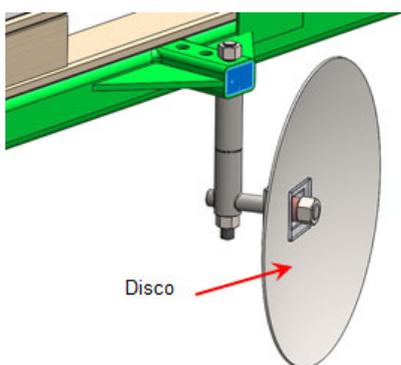
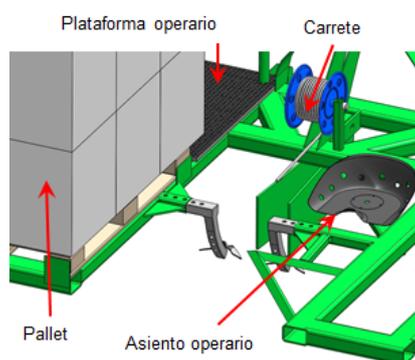


Figura 6. Zonas de carga y operarios y carrete del sistema de medición



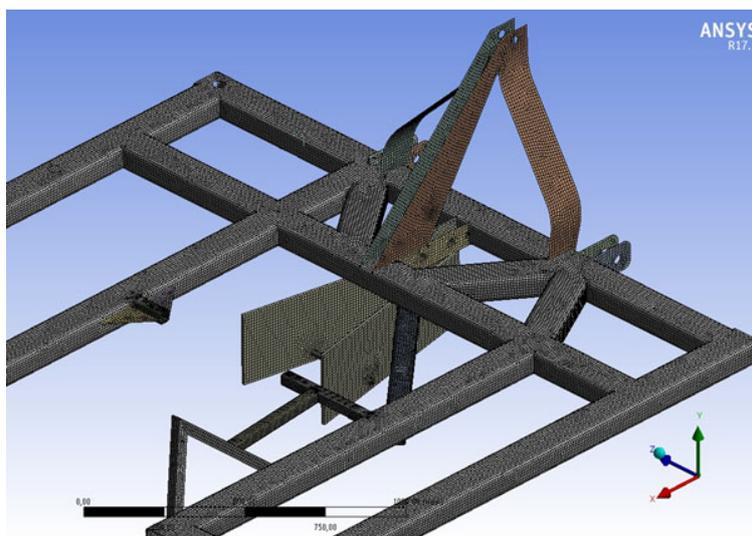
4.2 Análisis numérico del apero

El análisis del diseño del apero para la mecanización de la labor de plantado de frutales se ha realizado mediante técnicas numéricas basadas en el Método de los Elementos Finitos. Esta técnica es aplicada frecuentemente en el análisis estructural de aperos agrícolas (Vidal; 2011; Lim, 2015; Malon, 2015; Malon, 2016; Malon 2020).

En el estudio el software empleado ha sido ANSYS, en su versión R17.1.

La discretización del modelo ha sido realizada con elementos tipo placa de 4 nodos (Shell) para la totalidad de los componentes, con la excepción de conjunto púa y chapas de apertura, que han sido discretizados con elementos volumétricos al no cumplir con la relación de aspecto necesaria para los elementos tipos Shell. Tras la realización de un análisis de sensibilidad de malla, se ha seleccionado un tamaño de malla 10mm para la totalidad de los elementos. En la figura 7, se muestra el modelo discretizado empleado en el análisis numérico.

Figura 7. Discretización del modelo numérico



El material asignado a los componentes en el estudio es acero S275JR, el cual presenta un límite elástico de 275 MPa como mínimo, según la norma EN 10025-2:2019.

En referencia a las condiciones de contorno, se ha reproducido el anclaje del apero al tractor mediante el tripuntal trasero (figura 8). Concretamente, se han considerado las tres zonas de unión como rotulas fijas, restringiendo la totalidad de los desplazamientos y permitiendo los giros. En la figura 8, se muestran las zonas donde se han aplicado las condiciones de contorno al modelo.

El caso de carga analizado corresponde al funcionamiento del apero, el cual está compuesto por seis fuerzas, como son:

- *Fuerza de la reja subsolador (púa)*. La fuerza que ejerce la tierra sobre la reja del subsolador es calculada con la ecuación propuesta por Boto (2006) (1). Considerando, que el subsolador rompe 30cm de tierra (p), se obtiene que la fuerza de la reja del subsolador es de 8,4kN.

$$F(N) = 280 * p(cm) \quad (1)$$

- *Fuerza de resistencia de la tierra a cerrar el surco*. Felipe (2017) establecen que la densidad aparente del suelo es de 1,5 g/cm³. Por otro lado, el volumen que desplaza la cuña es de 30 cm * 75/2 cm * 25 cm, lo que equivale a 28.125 cm³, por lo que la masa que se desplaza con las chapas es de 42,18 kg. Con estos datos se puede calcular que la fuerza que soportan las chapas que van en la reja del subsolador y que evitan que se cierre el surco es de 250 N por chapa.

- *Fuerza del disco.* La fuerza unitaria por sección de labranza (N/cm²) que hacen los discos que entierran la planta se ha obtenido de la ecuación que proponen Boto (2006) (2). En el estudio se ha considerado una velocidad máxima de plantado de 3 km/h, obteniendo una fuerza en cada disco de 5,5 N/cm².

$$F(N/cm^2) = 5,2 + 0,039 * v^2 (km/h) \quad (2)$$

- *Peso de un operario.* Se ha considerado que el peso de cada operario es de 1000N, considerando tanto su peso corporal como la ropa de trabajo.
- *Peso de las plantas.* El peso de las plantas que puede ir encima del pale se ha obtenido pesando una planta y multiplicando por el número de plantas que van en el pale. El peso de una planta es de 200 gr. Cada caja contiene 42 plantas y encima del palé hay 12 cajas. El resultado obtenido es que el peso de las plantas es de 1.000N
- *Gravedad.* Para finalizar hay que indicar que en los cálculos numéricos se ha incluido la gravedad.

La distribución de las fuerzas consideradas en el caso de carga estudiado se muestra en la figura 9.

Figura 8. Condiciones de contorno

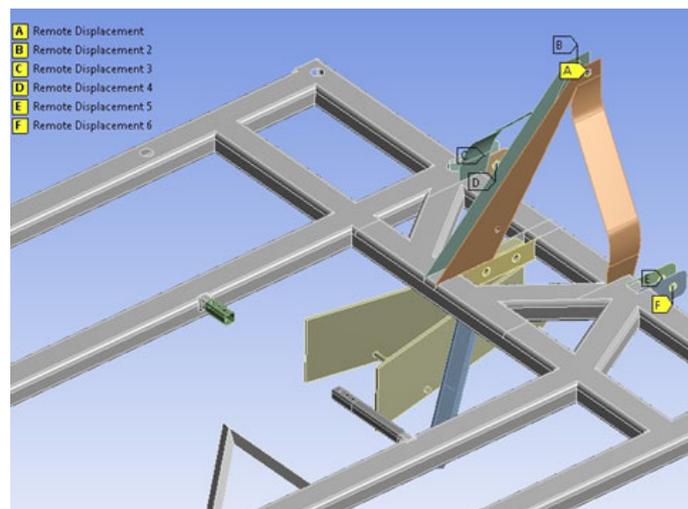
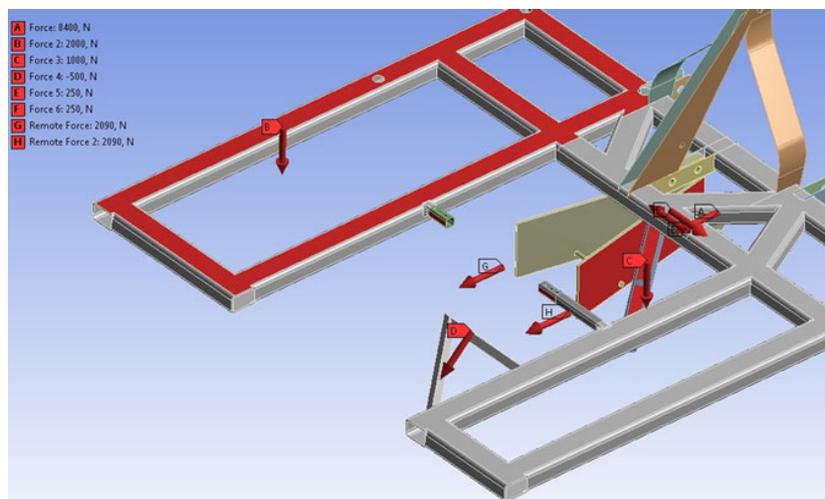
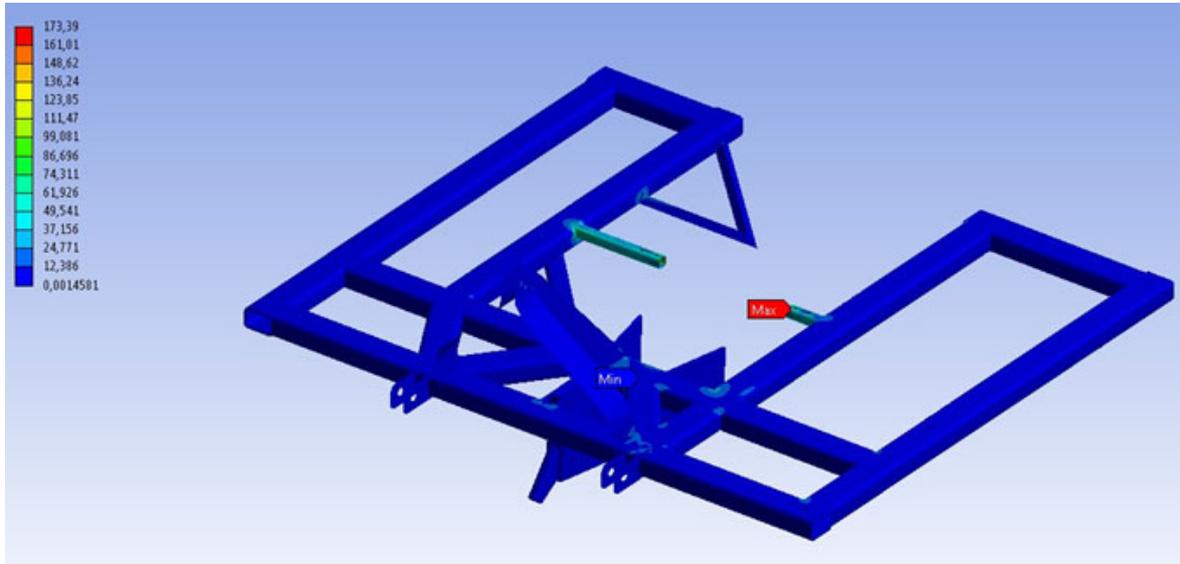


Figura 9. Fuerzas aplicadas



El resultado del análisis del diseño inicial ha evidenciado que el chasis del apero estaba sobredimensionado, con la excepción de los soportes de los discos, donde se obtuvieron valores máximos de Tensiones de Von Mises de 173,39 MPa (Figura 10). Estos valores de tensiones proporcionan un Coeficiente de seguridad mínimo inferior a 1,6, por lo que el diseño ha requerido de un proceso de optimización.

Figura 10. Tensiones equivalentes de VonMises en el diseño inicial



En el proceso de optimización se han modificado los soportes de los discos y la reja, incluyendo al diseño escuadras de refuerzo, y se han reducido espesores en los componentes estructurales del chasis. Los resultados obtenidos tras la fase de optimización, mostrados en la figura 11, evidencian una reducción sustancial de las tensiones equivalente de Von Mises existentes en el apero, siendo el valor máximo obtenido de 77,95 MPa. Concretamente, las tensiones máximas se han localizado en el soporte del disco de la derecha, como se muestra en la figura 12, obtenido un coeficiente de seguridad mínimo de 3,5, que cumple con el coeficiente de seguridad objetivo del estudio.

Figura 11. Tensiones equivalentes de Von Mises en el diseño optimizado

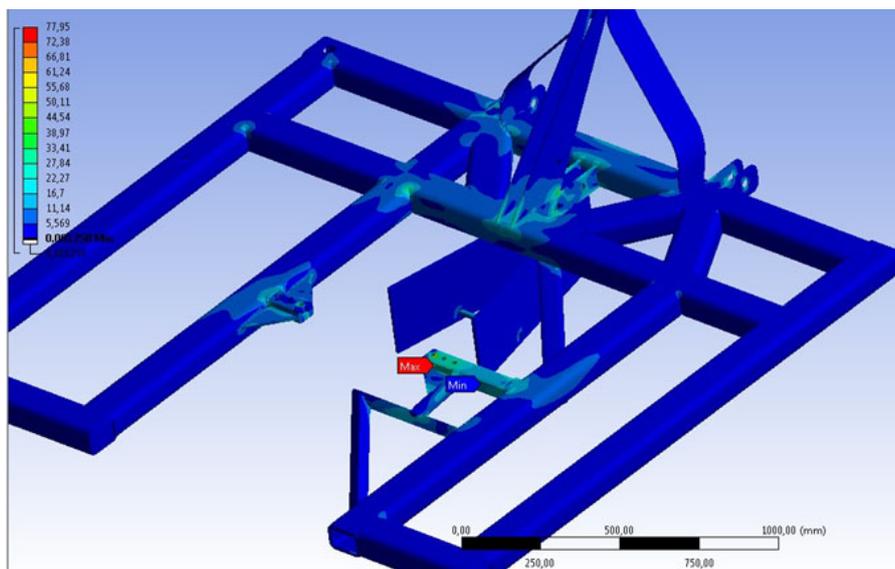
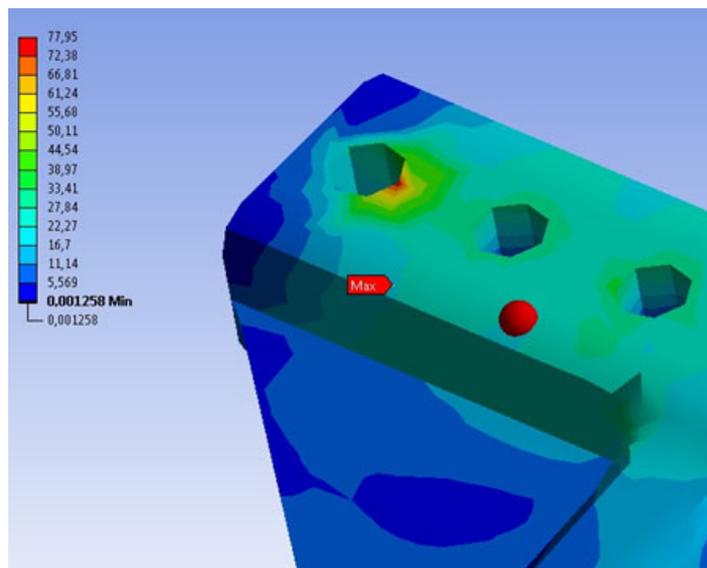


Figura 12. Tensiones equivalentes de Von Mises en el soporte del disco



5. Metodología desarrollada para la plantación de frutales

Para el desarrollo de la metodología para la labor de plantar frutales mediante mecanización han sido analizados diferentes sistemas, los cuales buscan marcar de forma manual o mecánica la distancia entre árboles. De los sistemas analizados únicamente han sido seleccionados tres (Cuadrícula semicompleta con reja, Cuadrícula completa con reja y Cuadrícula con caña), debido a la inaccesibilidad o por no cumplir con los requisitos mínimos tras experiencias de otras personas, del resto de sistemas.

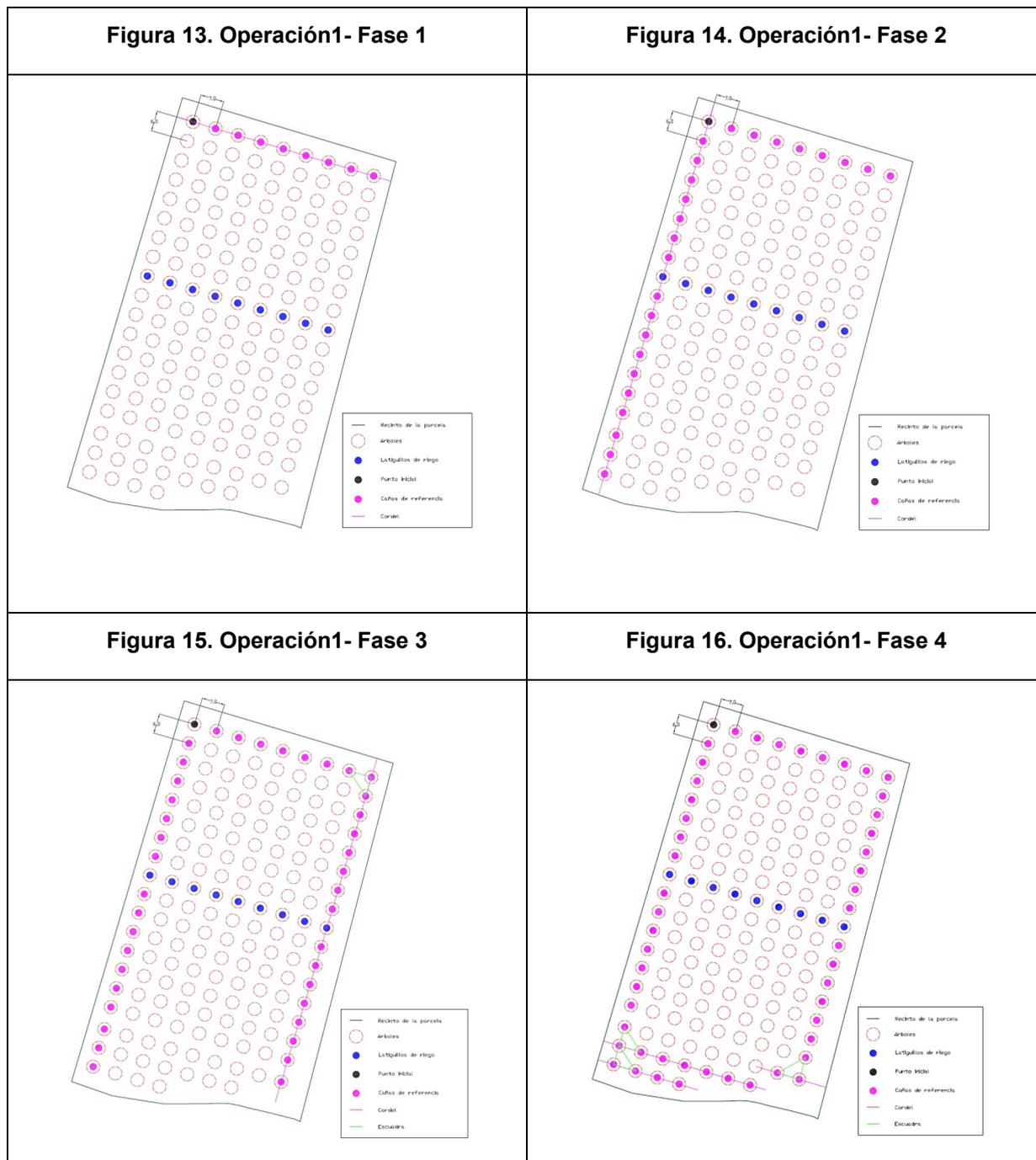
Finalmente, la metodología desarrollada se fundamenta en el sistema de referencia de cuadrícula semicompleta con reja. Adicionalmente, al apero se le acopla un rollo de cable en el cual se marcan las distancias entre los árboles. Al avanzar el tractor a una velocidad de 3km/h, el rollo de cable se va extendiendo por la línea de plantación de los árboles, introduciendo el operario un árbol en cada marca del rollo de cable.

El sistema de marcaje de cuadrícula semicompleta con reja consta de dos operaciones, según Fernández-Escobar (1996). La primera operación consiste en marcar la posición de los arboles perimetrales, mientras que en la segunda se marca la posición de los arboles con una distancia constante entre filas y árboles de la misma fila.

Con el fin de analizar los tiempos empleados y la precisión de los por los tres métodos descritos se ha realizado un ensayo en campo. La parcela donde se han llevado a cabo los ensayos tiene una superficie de 0,79ha, y se encuentra dentro de la concentración parcelaria de Canal Calanda-Alcañiz. El marco empleado para la prueba en campo es de 7x6 dejando en los lindes 5 metros para maniobrabilidad. Con ello se obtiene un total de 164 plantas.

A continuación, se expone el proceso de marcaje y plantación realizado con el sistema de referencia de cuadrícula semicompleta con reja en el ensayo en campo. En primer lugar, se comenzó con el marcaje de los arboles perimetrales, operación 1, que consta de 4 fases. La primera consiste en marcar los arboles más externos con una distancia de 7 metros, dejando una distancia de 5 metros al margen de la parcela (figura 13). Posteriormente se procede a marcar los arboles más externos con una distancia de 6 metros entre ellos, los cuales se sitúan en una fila paralela al margen de la parcela de 5 metros (figura 14). La tercera fase consiste en marcar la segunda fila perimetral de árboles

con una distancia de 6 metros entre sí. La fila creada en la fase 3 es paralela a la fila marcada en la fase 2, independientemente del linde la parcela (figura 15). El proceso finaliza con la cuarta fase en la cual se marca la posición de los árboles más externos con una distancia entre ellos de 7 metros. En esta fase, como en la fase 3, la fila no es paralela al margen de la parcela, sino que es paralela la fila marcada en la fase 1 (figura 16).



En la segunda operación se realizaría la plantación de los árboles, al recorrer con el apero las diferentes filas equidistantes a 7 metros (figura 17). La posición de las plantas queda marcada en un rollo con cable, en el cual se marca la distancia entre plantas, en este caso 6 metros. El cable se extiende conforme el tractor avanza por cada una de las filas equidistantes a 7 metros (figura 18).

Figura 17. Operación 2 de la metodología aplicada

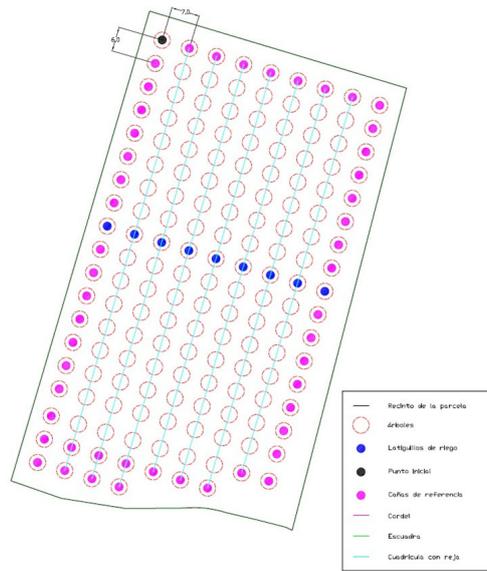


Figura 18. Cable extendido finalizada la operación 2



Figura 19. Apero usado en los ensayos de campo



El apero empleado en los ensayos en campo no se corresponde con el diseño del estudio, debido a que no ha sido posible desarrollar el apero a tiempo para la realización de los ensayos en campo. El apero empleado (figura 19) difiere bastante del diseño del diseño obtenido en el estudio, no obstante, permite analizar los tiempos y precisión de las diferentes metodologías planteadas, ya que son independientes del apero empleado

La tabla 1 muestra los tiempos empleados en la realización del marcado y plantación de los tres sistemas seleccionados, así como el número de operarios necesarios. Como se puede comprobar el sistema seleccionado, Sistema de plantación manual con cuadrícula semicompleta con reja es el que requiere de un menor tiempo de trabajo.

Tabla 1. Tiempo y operarios requeridos de los sistemas de marcado seleccionados

Operación	Cuadrícula semicompleta con reja		Cuadrícula completa con reja		Cuadrícula con caña	
	Tiempo (h)	Operarios	Tiempo (h)	Operarios	Tiempo (h)	Operarios
1	1	3	1	3	1	3
2	0,4	3	0,4	1		
3			0,3	3		
4					0,9	3

Para obtener la precisión de cada proceso de plantado, se realizan 50 mediciones de forma aleatoria y repartida por toda la superficie tanto de la cota 6 metros como la cota 7 metros. Los resultados se analizan estadísticamente obteniendo el intervalo de confianza al 95% y considerando la muestra como una población de datos que siguen una regresión normal o campana de Gauss. El análisis estadístico de las mediciones ha proporcionado como resultado un intervalo de confianza al 95% para la media de 7 metros de 7,06-7,01, mientras que para la media de 6 metros el resultado del intervalo de confianza es de 6,07-6,00.

6 Verificación de requisitos

Una vez obtenido el diseño definitivo del apero para la mecanización del proceso de plantación de frutales en una explotación agrícola familiar y se ha definido la metodología a aplicar en el proceso de plantación, se ha procedido a verificar el cumplimiento de los requisitos definidos en el proyecto.

6.1 Carga máxima en el tripuntal trasero

El peso más desfavorable del apero es de 716 kg. Este peso se ha obtenido comprobando todas las situaciones posibles y se ha tenido en cuenta el peso de personas, planta, elementos, ...El tractor más desfavorable para levantar el apero es el tractor John Deere 5090GN, cuya carga máxima de elevación en los ganchos del tripuntal trasero es de 2540 kg. Por lo tanto, este tractor puede elevar el apero

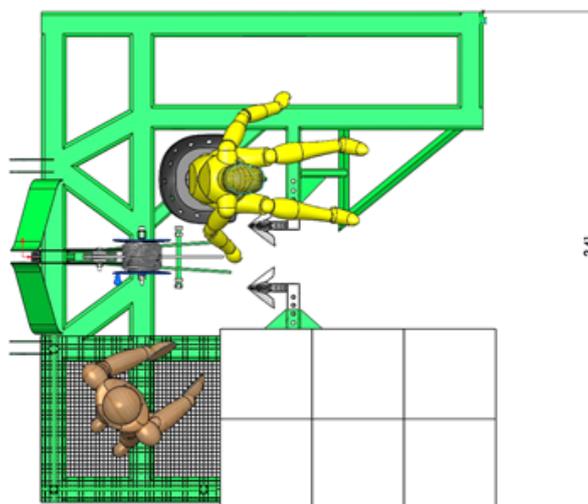
6.2 Dimensiones del acople del apero

Las dimensiones del tripuntal trasero usadas en el diseño de este apero pertenecen a la categoría II, siendo esta categoría la que tienen los tractores que dispone el propietario de la explotación.

6.3 Resistencia del apero

En el apartado 4.2 se ha comprobado que el coeficiente de seguridad del apero es superior a 3,5 en todo momento, que cumple con el coeficiente de seguridad objetivo del estudio, evitando así problemas de fatiga en la estructura.

Figura 20. Diseño de apero para la mecanización de la labor de plantación de frutales



6.4 Anchura máxima del apero

La dimensión máxima del apero para circulación por carretera es de 2,41 metros (figura20) y, por lo tanto, es inferior a la máxima permitida que es 2,61 m, que requeriría de autorización especial, o de 2,55m que no requeriría de autorización especial.

6.5 Precisión del apero

El análisis estadístico de las mediciones en campo ha proporcionado un intervalo de confianza al 95% para la media de 7 metros de 7,06-7,01, mientras que para la media de 6 metros el resultado del intervalo de confianza es de 6,07-6,00. En ambos casos se cumple con el error máximo admisible de 15cm, objeto del estudio.

7 Conclusiones

En el trabajo se ha estudiado la mecanización de la labor de plantar árboles frutales en explotaciones agrícolas familiares.

Como resultado se ha obtenido una nueva metodología y un sistema mecanizado que permite realizar la labor de plantar árboles frutales de forma mecanizada, frente a la alternativa que actualmente existe, la cual es una operación de plantación manual.

En el proceso se ha diseñado un apero median técnicas numéricas basadas el Método de los Elementos Finitos, que presenta un coste de operación de plantar frutales menores que el sistema actual y que las opciones comerciales mecánicas actuales

El diseño obtenido cumple con la totalidad de los requisitos los requisitos técnicos impuestos en el proyecto, referentes a precisión, capacidad de trabajo, resistencia mecánica y dimensiones.

El desarrollo del nuevo sistema mecanizado para el suministro de alimento sólidos ha permitido obtener una reducción del tiempo necesario en alimentar a los terneros del 66%,

pasando de 30 minutos con el sistema manual empleado previo al estudio a los 10 minutos empleados con el nuevo sistema mecanizado desarrollado.

Para finalizar, indicar que el trabajo realizado se ha centrado en una explotación concreta, si bien, el trabajo realizado es fácilmente reproducible en cualquier otra instalación donde se requiera realizar plantaciones de frutales.

Referencias

- Boto Fidalgo, J. A., & López Díez, J. (2006). La mecanización agraria: principios y aplicaciones. Universidad de León.
- España. Real Decreto 2822/1998, de 23 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento General de Vehículos. *Boletín Oficial del Estado*, 26 de septiembre de 1999, núm. 22, pp. 1-163.
- Felipe, A. J., Rius Sant, X., & Rubio Cabetas, M. J. (2017). El cultivo del almendro: el almendro II.
- Fernández-Escobar, R. (1996). Planificación y diseño de plantaciones frutales. Mundi--Prensa Libros.
- John Deere. Tractor 5090GN (n.d.). Obtenido el 15 de abril de 2003, desde <https://www.deere.es/es/tractores/peque%C3%B1o/tractores-de-la-serie-5-para-cultivos-de-alto-valor/5090gn/>.
- Lim G. S. & Lee B. Y., "Study on the impact analysis of front loader for tractor," Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, vol. 16, no. 8, pp. 5051–5059, 2015
- Malón H., Aguirre A., Boné A., Vidal M. and García-Ramos F., "Design and testing of an agricultural implement for underground application of rodenticide bait," Sensors, vol. 15, no. 1, pp. 2006–2020, 2015.
- Malon, H. Garcia-Ramos, F.J., Vidal, M. & Bone, A. (2016) Design and optimization of a chassis for an Air-assisted Sprayer with two fans using the Finite Element Method. Project Management and engineering research. DOI: 10.1007/978-3-319-26459-2_8
- Malon H., Ayuda A., Garcia-Ramos, F.J., Vidal, M. & Cuartero J. Application of Low-Cost Sensors for the Development of a Methodology to Design Front-End Loaders for Tractors. Journal of Sensors. Volume 2020, Article ID 3504389, 13 pages. <https://doi.org/10.1155/2020/3504389>
- Serraller Sanchez, F. (2017). Diseño y ensayo de máquinas y sistemas integrados de fabricación. Universidad de Zaragoza.
- Vidal, M. Bone, A. Garcia-Ramos, F.J. Malon, H & Villacampa, R. (2011) Desarrollo de máquina para la aplicación localizada de cebo rodenticidas en parcelas agrícolas. En: Libro de resúmenes del XV International Congress on Project Engineering. ISBN 978-84-615-4542-1

Comunicación alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible

