

Ingeniería asistida por computadora: una metodología innovadora para el diseño de herramientas agrícolas para la agricultura familiar

Computer-aided engineering: an innovative methodology for the design of agricultural tools for family farming

Juan Martin Montoya Fernández ¹, PhD. Germán Leonardo García Monsalve ¹,
Ing. Mauricio Arango Correa ¹, Santiago Parada Duque ¹

¹ Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Departamento de Ingeniería Mecánica, Grupo de Investigación de Diseño Mecánico Computacional, DIMEC, Medellín, Colombia.

Correspondencia: dimec_med@unal.edu.co

Recibido: 25 julio 2024. Aceptado: 27 diciembre 2024. Publicado: 01 enero 2025.

Cómo citar: J. M. Montoya Fernández, G. L. García Monsalve, M. Arango Correa, y S. Parada Duque, «Ingeniería asistida por computadora: una metodología innovadora para el diseño de herramientas agrícolas para la agricultura familiar», RCTA, vol. 1, n.º 45, pp. 125–136, ene. 2025.

Recuperado de <https://ojs.unipamplona.edu.co/index.php/rcta/article/view/3237>

Derechos de autor 2025 Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada (RCTA).
Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0.



Resumen: En este estudio se desarrolló una herramienta agrícola manual optimizada mediante el uso de tecnologías de diseño asistido por computadora (CAD), manufactura asistida por computadora (CAM) y análisis de elementos finitos (FEA) que se llevaron a cabo en diferentes etapas de diseño complementarias. Se partió de un prototipo físico existente que mediante procesos de ingeniería inversa generó un modelo CAD detallado y escalado con especificaciones funcionales de diseño. Posteriormente, se utilizó un proceso de fabricación aditiva (impresión 3D) de bajo costo para crear un prototipo funcional a partir del modelo CAD previo. Para estimar el desempeño mecánico y durabilidad del prototipo de la herramienta, se realizó un Análisis de Elementos Finitos (FEA) simulando las cargas a las que estaría sometida durante el uso. Los resultados obtenidos mediante la simulación FEA proporcionaron un diseño óptimo de la herramienta y validar su desempeño. El prototipo de herramienta optimizado por dichos procesos FEA se sometió nuevamente a impresión 3D con fines de generar un modelo funcional para la fabricación de la herramienta agrícola en procesos de manufactura por fundición en arena. Las herramientas manufacturadas en los procesos de fundición fueron utilizadas en actividades agrícolas convencionales cerrando el ciclo de diseño establecido en este estudio. Se concluye que el enfoque innovador, que combinó las etapas de diseño computacional y fabricación aditiva ofreció múltiples ventajas debido a las iteraciones de diseño de forma rápida y económica, antes de construir la primera herramienta por fundición. Además, facilitó la optimización de la geometría, tamaño y peso del prototipo de la herramienta considerando aspectos ergonómicos y desempeño en las actividades agrícolas proyectadas. Finalmente, la metodología implementada es viable para la creación de nuevas herramientas agrícolas, evitando procesos adicionales de manufactura de alto costo, como el maquinado por arranque de viruta o de fabricación de moldes para procesos de forja o de troquelado optimizando el costo de diseño.

Palabras clave: Optimización del diseño, Metodología de diseño, Elementos finitos, Manufactura aditiva.

Abstract: In this study, a manual agricultural tool was optimized using computer-aided design (CAD), computer-aided manufacturing (CAM), and finite element analysis (FEA) technologies, which were carried out in different complementary design stages. The process began with an existing physical prototype, which, through reverse engineering processes, generated a detailed and scaled CAD model with functional design specifications. Subsequently, a low-cost additive manufacturing process (3D printing) was used to create a functional prototype from the previous CAD model. To estimate the mechanical performance and durability of the tool prototype, a Finite Element Analysis (FEA) was performed, simulating the loads it would be subjected to during use. The results obtained through the FEA simulation provided an optimal design for the tool and validated its performance. The tool prototype optimized by these FEA processes was again subjected to 3D printing to generate a functional model for the manufacturing of the agricultural tool through sand casting processes. The tools manufactured in the casting processes were used in conventional agricultural activities, closing the design cycle established in this study. It is concluded that the innovative approach, which combined the stages of computational design and additive manufacturing, offered multiple advantages due to the rapid and economical design iterations before constructing the first tool by casting. Additionally, it facilitated the optimization of the geometry, size, and weight of the tool prototype, considering ergonomic aspects and performance in the projected agricultural activities. Finally, the implemented methodology is viable for the creation of new agricultural tools, avoiding additional high-cost manufacturing processes, such as chip removal machining or mold manufacturing for forging or stamping processes, optimizing the design cost.

Keywords: Design optimization, Design methodology, Finite elements, Additive manufacturing.

1. INTRODUCCIÓN.

La agricultura familiar (AF) que incluye a los pequeños y medianos productores, enfrenta grandes desafíos con la dependencia de herramientas que, en muchas ocasiones, no están adaptadas a las condiciones específicas del terreno, clima, cultivos, además, se desconocen características técnicas importantes como funcionalidad, versatilidad, ergonomía, y cuidado del suelo. Estas herramientas, poco comerciales con métodos de manufactura no masiva, han sido altamente efectivas para abordar los desafíos particulares de los agricultores, dado que las herramientas importadas no siempre cumplen con las funciones específicas [1].

La introducción de herramientas agrícolas optimizadas utilizando técnicas de ingeniería asistida por computadora no solo predice mejoras en el rendimiento de las herramientas manuales, sino que también podría evaluar el incremento en la productividad que lograrían los pequeños agricultores sin requerir inversiones significativas en maquinaria pesada. Por ejemplo, el uso de azadas más ligeras y con mangos más largos en lugar de las

tradicionales, considerando las dimensiones antropométricas del usuario, han reducido significativamente el tiempo para realizar labores agrícolas y el esfuerzo físico requerido. En situaciones de escasos recursos, las familias agricultoras en la AF realizan adaptaciones en las herramientas desgastadas para cumplir con otras funciones, optimizando los recursos financieros, pero no necesariamente se protege al usuario, ni la sostenibilidad del suelo. También, el diseño de azadas específicas (empuje/arrastre, púas o con ruedas) para labores agrícolas como el deshierbe, puede ahorrar tiempo e incrementar la productividad, siempre y cuando las herramientas sean culturalmente aceptadas y financieramente accesibles. En el diseño de herramientas manuales existen directrices internacionales y algunos criterios para su selección en labores agrícolas que deberían considerarse como: funcionalidad; requerimientos de energía/potencia; versatilidad; período de trabajo; costos y durabilidad; mantenimiento; aspectos culturales y antropométricos, entre otros [1].

El Análisis de Elementos Finitos (FEA), ampliamente utilizado en ingeniería mecánica y civil, ha sido adoptado limitadamente en el sector agrícola. Sin embargo, su uso en la ingeniería agrícola es relevante, ya que permite evaluar los esfuerzos y deformaciones a los que podría estar sometida la herramienta en las labores agrícolas. Esto es fundamental para la mejora continua de diseños, dado que garantiza la sostenibilidad de las herramientas, el respeto en los biomas y el incremento en la productividad agrícola sin expandir las tierras cultivables como lo ha estudiado [16].

En el estudio presentado por [5], el uso de tecnologías CAD, CAM y FEA ha mostrado su efectividad para evaluar y prever la resistencia mecánica y durabilidad de herramientas agrícolas manuales, sometidos a estudios de fatiga. En dicho estudio, se presenta una metodología detallada para evaluar los esfuerzos y deformaciones a los que podrían estar expuestos las herramientas cuando se someten a cargas reales, utilizando herramientas computacionales para las respectivas simulaciones por elementos finitos.

Este trabajo presenta la optimización de un prototipo de herramienta agrícola manual ya existente utilizando las herramientas de diseño CAD, CAM y FEA. El proceso de ingeniería inversa con escáner 3D fue clave para generar el prototipo virtual CAD detallado y el correspondiente archivo STL que fueron utilizados para los procesos de manufactura aditiva 3D y para las simulaciones por FEA. El proceso de ingeniería inversa redujo los tiempos para mejorar el diseño de la herramienta, antes de generarse el prototipo final de la herramienta optimizado. También, se evaluó la resistencia mecánica del prototipo mediante el análisis de terreno, aspectos funcionales, ergonómicos y de desempeño en las labores agrícolas, validando la metodología de diseño empleada. Adicionalmente, el prototipo de herramienta optimizado, validado y verificado en campo ha sido manufacturado con procesos de fundición en molde de arena, en pequeños lotes, como alternativa de fabricación a las herramientas comerciales obtenidas por procesos convencionales. En este sentido la técnica del FEA, permitió un refinamiento continuo a un producto ya existente como lo ha estudiado [7].

2. METODOLOGÍA

A continuación, se describen las etapas del proceso de optimización del prototipo de la herramienta

agrícola utilizada para las modelaciones computacionales CAD/CAM/CAE, partiendo de un prototipo funcional existente. En la (Figura 1), se ilustra la metodología tomada como referencia para el ciclo de optimización de la herramienta agrícola, en un diagrama de bloques.

Ingeniería Inversa: A partir de un prototipo físico existente, se realizó un proceso de ingeniería inversa para generar un modelo digital en CAD que capturara las especificaciones geométricas y funcionales de la herramienta. Este modelo fue validado utilizando el Análisis de Elementos Finitos (FEA), simulando las condiciones de trabajo reales para identificar y corregir áreas críticas.

Prototipado mediante manufactura aditiva: Posteriormente, se utilizó un proceso de impresión 3D para generar un prototipo funcional del modelo CAD, verificando las dimensiones y evaluando su funcionalidad física.

Pruebas de campo: Se realizaron pruebas en condiciones agrícolas reales para comprobar el desempeño del prototipo. Basado en los resultados obtenidos, se ajustó el diseño de la herramienta para optimizar su funcionalidad y ergonomía.

Fabricación final: Finalmente, se llevó a cabo la fabricación de la herramienta optimizada en materiales que garantizan resistencia y durabilidad, cumpliendo con los estándares de calidad para su uso en el campo

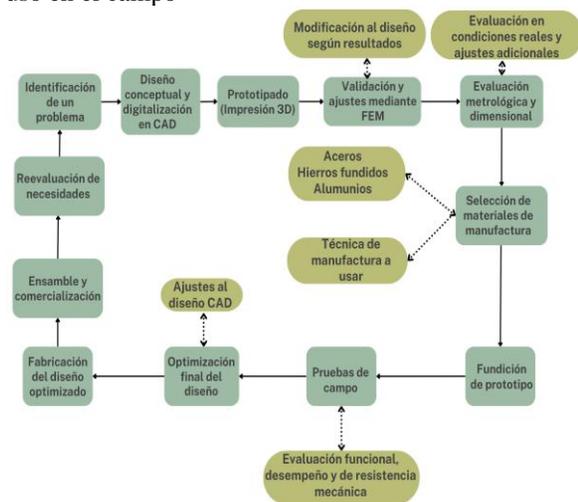


Fig. 1. Metodología de diseño CAD/CAM/CAE para el diseño y fabricación una herramienta agrícola manual. Adaptada de [14]

2.1. Etapas.

2.1.1. Creación del Modelo CAD.

El modelo CAD como es un proceso en la etapa de diseño correspondiente a la ingeniería inversa de utilizado en el diseño de herramientas agrícolas manuales, que permitió reconstruir digitalmente el prototipo físico para realizar ajustes de diseño antes de su manufactura. Este proceso, apoyado por tecnologías como el CAD y el análisis por elementos finitos (FEA), facilitó la identificación de errores, la optimización de geometría y la viabilidad del diseño final, actividades fundamentales en el diseño óptimo de la herramienta agrícola [18]. El modelo CAD no solo permitió visualizar y ajustar la geometría, sino que también permitió realizar los análisis de resistencia mecánica mediante otras técnicas de simulación CAE como el análisis de elementos finitos.

2.1.2. Análisis del Modelo CAD en la Etapa Previa (Ingeniería Inversa).

En la etapa inicial de ingeniería inversa, la digitalización del prototipo físico se consideró de gran relevancia. El modelo CAD se creó a partir de las mediciones físicas, utilizando tecnologías de ingeniería inversa como el escáner 3D apoyado en cálculos manuales, generando el modelo CAD detallado del prototipo (diseño de detalle). Este modelo digital permitió realizar los ajustes en las tolerancias y dimensiones críticas, garantizando el proceso de manufactura (diseño para la manufactura), cumpliendo con las especificaciones requeridas [19], la precisión y la funcionalidad del prototipo [7]. En la (Figura 1), se ilustra el CAD digital del prototipo inicial tomado como referencia para el proceso de reingeniería.

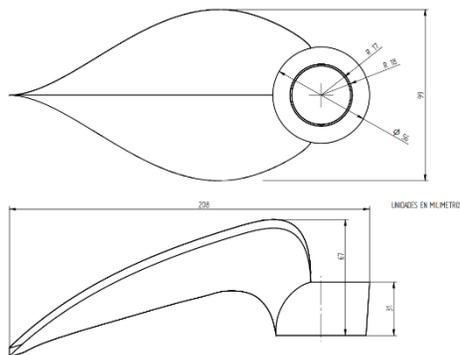


Fig. 2. Plano de azada surcadora inicial antes de reingeniería, (Autores).

2.1.3. Análisis del Modelo CAD Durante el Proceso de Diseño y Optimización.

Durante el proceso de diseño, el modelo CAD facilitó la optimización de la geometría del prototipo. Este análisis identificó las interferencias y permitió ajustar las restricciones geométricas y dimensiones del prototipo, con el propósito de optimizar el diseño y garantizar las propiedades mecánicas considerando el peso, material y zonas de concentración de esfuerzos en la herramienta, entre otras propiedades. [8], [5].

2.1.4. Análisis del Modelo CAD Después de la Fabricación.

Una vez fabricado el prototipo físico en materiales como aluminio o hierro fundido, es esencial comparar el modelo digital con el físico mediante mediciones precisas. Esta comparación ayuda a verificar la precisión del proceso de fabricación y a realizar ajustes en el modelo CAD si se detectan desviaciones en las mediciones [10]. Este enfoque permite corregir problemas menores y optimizar la producción en serie, lo que es crucial en la fabricación de herramientas agrícolas manuales que deben soportar condiciones de trabajo severas [5].

2.1.5. Importancia del Análisis del Modelo CAD en Todo el Proceso.

El análisis del modelo CAD en todas las fases del proceso de diseño de la herramienta garantizó la precisión eficiencia y funcionalidad. La transformación del modelo CAD inicial evolucionó a través del proceso de diseño con estrategias de iteración, interacción y trabajo colaborativo a un modelo y/o prototipo optimizado para la manufactura (diseño para la manufactura), debido al soporte en modelación computacional recibido por la integración de las técnicas de diseño CAD y FEA. Dicha interacción de CAD/FEA permitió la reducción de los costos y tiempos de desarrollo del diseño del prototipo de la herramienta agrícola [18]. Finalmente, la evaluación por el método de elementos finitos permitió validar y verificar las condiciones mecánicas del prototipo durante el impacto de la punta con el suelo simulando condiciones reales de operación en las actividades agrícolas para diferentes materiales [5].

2.2. Análisis FEM (Finite Element Method).

El análisis por Elementos Finitos (FEM) como se mencionó anteriormente utilizando las estrategias de iteración, interacción y colaborativas entre las técnicas CAD/FEM ha sido fundamental para la optimización del prototipo en un entorno digital mediante los procesos de simulación

computacional, ahorrando costos, tiempos de procesamiento y optimización de los prototipos intermedios y finales. La integración computacional CAD/FEM permitió la generación de prototipos/modelos optimizados para impresión 3D de hilo con PLA de bajo costo (diseño de detalle) y los manufacturados con materiales metálicos mediante procesos de fundición de aluminio, fundición nodular y de otros aceros (diseño para la manufactura), prediciendo su comportamiento y desempeño mecánico [9], mediante simulación del entorno de operación. A continuación, se describe el procedimiento llevado a cabo para la implementación del FEM en la interrelación con la etapa de ingeniería inversa para el prototipo de herramienta agrícola.

2.2.1. FEM en la Etapa Previa (Ingeniería Inversa).

En la fase inicial de ingeniería inversa de un prototipo físico, el FEM identificó las limitaciones y zonas críticas del prototipo de referencia. Esta identificación condujo los procesos de mejora y de optimización hacia una perspectiva estructural y funcional.

Prototipo físico: Antes de modelar en CAD, se analizó la distribución de cargas y concentración de esfuerzos y deformaciones sobre el prototipo inicial, considerando condiciones reales, para establecer de manera más precisa, las condiciones de frontera para el análisis FEM.

Áreas críticas: En el prototipo físico se analizaron las zonas sometidas a desgaste y daños estructurales, mientras que con uso temprano del FEM se logró predecir las zonas de concentración de esfuerzos y deformaciones direccionando el proceso de optimización del prototipo.

Mejoras en el diseño: Una vez realizado el análisis y mediciones al prototipo físico, se ajustó el modelo CAD considerando las zonas críticas. A continuación, el modelo CAD mejorado se sometió a evaluaciones mediante, en procesos iterativos FEM [17]. El análisis FEM en esta etapa avanzada de la ingeniería inversa validó y verificó con mayor precisión el comportamiento del prototipo de herramienta agrícolas, al momento del impacto con el suelo. [12], analizó el comportamiento de un subsolador en suelos no homogéneos con modelación computacional FEM, que le permitió prever fallas en el diseño y realizar ajustes en la geometría mejorando el desempeño en condiciones reales.

2.2.2. FEM Durante el Proceso de Diseño y Optimización.

Durante la fase de diseño en CAD, el análisis FEM se utilizó como técnica computacional iterativa e interactiva para optimizar la geometría del modelo, mejorando la resistencia mecánica y durabilidad de la herramienta. Durante este ciclo iterativo e interactivo se logró la optimización del peso, tamaño, geometría y costo de fabricación de prototipos finales, de la herramienta agrícola en simulando condiciones severas de operación.

Materiales de la herramienta: los materiales definidos para el modelado computacional son los mismos utilizado en la manufactura del prototipo. Las propiedades mecánicas de los materiales de las herramientas (módulo de Young, límite elástico) influyeron en las modelaciones por FEM, generando cambios en los modelos CAD [20].

Condiciones de contorno y carga: la simulación FEM se realizó considerando las condiciones reales durante la operación como la distribución de fuerzas de impacto y la confiabilidad de los resultados dependió de la estimación de las mismas.

Análisis y rediseño: se consideraron los resultados FEM (esfuerzos, deformaciones, factores de seguridad), para reforzar o no el diseño de las áreas dependiendo de la mayor o menor concentración de esfuerzos y deformaciones acorde con la teoría de fallas establecida que en este caso ha sido la de Von Mises. Esta etapa se consideró fundamental para encontrar el equilibrio entre resistencia y eficiencia. El análisis topológico también jugó un papel crucial, eliminando material innecesario en zonas que no soportaban esfuerzos considerables. [12], resaltó la importancia de esta optimización en el diseño de herramientas agrícolas, a través de la modelación FEM para evaluar y mejorar la eficiencia del subsolador, garantizando la eficacia en la labor agrícola.

2.2.3. FEM Después de la Fabricación.

El análisis FEM demostró su relevancia una vez que el prototipo/herramienta se ha fabricado. Permitted verificar y validar la precisión de las simulaciones y facilitó la realización de ajustes antes de iniciar un proceso productivo.

Pruebas reales: Tras la fabricación inicial con materiales como las aleaciones de aluminio o de hierro fundido, para una herramienta agrícola manual como la azada, se instrumentaron pruebas de

por impacto y los resultados se compararon con los análisis FEM para verificar, validar y/o comparar las condiciones de simulación.

Factores de seguridad: Los factores de seguridad seleccionados deben validarse bajo las condiciones experimentales, para las zonas críticas y de ser necesario, se realizan los ajustes al modelo CAD antes del proceso productivo [7].

Control de calidad: El análisis FEM se utilizó para la predicción de vida a la fatiga por desgaste en las azadas y para analizar fallas para un tiempo promedio de operación en labores agrícolas con el fin de realizar modificaciones para asegurar la resistencia mecánica al impacto con el suelo y la confiabilidad de futuros prototipos/herramientas. [12], evaluó los resultados del análisis FEM en la identificación de fallas por desgaste para unas condiciones específicas del suelo, que le permitió realizar ajustes al diseño antes de llevar a cabo una producción en masa de herramientas.

2.2.4. Importancia del FEM en Todo el Proceso.

El análisis FEM permitió reducir la cantidad de prototipos físicos y pruebas destructivas, disminuyendo los costos y tiempos de optimización. Por otro lado, la identificación de potenciales fallas desde el diseño inicial, garantizó la fabricación de un prototipo/herramienta más seguro y confiable, optimizando el material, peso, geometría.

2.3. Prototipado y Fundición.

La manufactura de una herramienta agrícola manual La etapa de manufactura del prototipo/herramienta agrícola manual se consideró una etapa crítica en el desarrollo que influyó de manera directa en su desempeño y confiabilidad. Se tuvieron en cuenta varias consideraciones desde la etapa de ingeniería inversa hasta la etapa de fabricación final, asegurando que cada etapa de optimización del diseño hasta la producción se realice de manera eficiente y precisa [15].

2.3.1. Proceso de Manufactura Inicial Prototipado en 3D.

En esta investigación, el primer paso de manufactura en la interacción e iteración CAD/CAM fue la creación de un prototipo en impresión 3D, con PLA (ácido poliláctico) de bajo costo. Este prototipo permitió verificar especificaciones técnicas, funcionales y de desempeño como: tamaño, peso, geometría,

ergonomía, distribución de masa, superficies de contacto y de desgaste, entre otras, sin afectar los costos de fundición iniciales.

Del diseño CAD: A partir del modelo optimizado en CAD (diseño virtual final de detalle), se generó un prototipo 3D (virtual) conservando fielmente las dimensiones, forma, peso y geometría, ergonomía, del diseño final, aún no validado, ni verificado ni optimizado. Sin embargo, este paso fue clave para identificar posibles errores y desajustes en la fase previa a la modelación FEM, justo antes de su fabricación final [6].

Evaluación del prototipo: El prototipo se sometió a pruebas experimentales en un entorno controlado para verificar su funcionalidad y desempeño considerando condiciones reales de operación. Esta etapa permitió realizar ajustes y mejoras claves en dimensiones, forma, peso, geometría, ergonomía y desempeño, resistencia mecánica, justo antes de avanzar a la etapa de manufactura final [3].

2.3.2. Fabricación por Fundición Inicial en Aluminio o Fundición de hierro o fundición nodular.

Tras validar y verificar el prototipo en 3D final, el siguiente paso fue realizar una fundición funcional (prototipo funcional) inicial de la herramienta en aleación de aluminio para evaluar en pruebas de campo. Sin embargo, esta herramienta inicial se consideró el prototipo para fundir otros materiales en materiales fundidos: fundición nodular, fundiciones de hierro, otros aceros fundidos, optimizando costos. Este proceso en la etapa de fabricación de prototipos funcionales permitió evaluar el desempeño real de la herramienta en labores agrícolas. Es de anotar que el prototipo se había sometido en la etapa anterior a las pruebas de simulación computacional para validar y verificar su resistencia mecánica y el desempeño en un entorno digital.

Moldeo en molde arena: Para el proceso de fundición en molde de arena, se realizó un molde de arena para el vaciado del material fundido y generar el prototipo funcional del diseño optimizado. Para el prototipo en fundición de aluminio, el modelo corresponde a un prototipo impreso en 3D con hilo de PLA. Este paso intermedio de la fabricación de prototipos (en fundición de aluminio) que, a su vez, se utilizaron como modelos para generar otros prototipos funcionales (fundición de hierro, nodular, blanca, gris, de aceros, entre otros.) para fabricar herramientas agrícolas manuales. Esta técnica de

fundición fue utilizada como alternativa de fabricación económica en molde individual o de pequeñas cantidades dada su disponibilidad. [13].

Fundición del material: el material fundido es vaciado hacia el molde de arena generado en el paso anterior. Una vez se ha solidificado el material vaciado en el molde se obtiene la pieza, o prototipo funcional, por fundición en molde de arena. El material de fundición es seleccionado de acuerdo con las especificaciones de propiedades mecánicas a las cuales se ha modelado computacionalmente, en un entorno virtual, el diseño final. La fundición de aluminio permitió obtener piezas con buena relación peso-resistencia, costo-beneficio, rendimiento-desempeño, apropiado para herramientas de uso manual [2].

Acabado de la herramienta: Una vez fundidas las piezas, se eliminaron las rebabas, defectos e imperfecciones y se realizan los ajustes necesarios para optimizar la geometría de la herramienta. La herramienta se sometió a pruebas iniciales de resistencia y desempeño para asegurar funcionalidad y confiabilidad en labores agrícolas reales [15].

2.4. Optimización del Diseño de la Herramienta para la Producción en pequeños lotes (Fundición de Aceros, de Hierro, blanca o nodular)

Una vez probada, validada y verificada la funcionalidad y desempeño de la herramienta fundida en condiciones reales, se procedió a fabricar la herramienta en acero o fundiciones de hierro, con altas propiedades mecánicas, de confiabilidad, desempeño y predicción de vida útil a la fatiga infinita, apta para utilizar en condiciones de alta exigencia en las labores agrícolas. El costo de estas herramientas fue superior a las de fundición de aluminio, más complejas para fundir, sin embargo, su costo aún es competitivo con las herramientas producidas por procesos tradicionales (forja, doblado, troquelado) y en masa.

Pruebas de campo: Con los resultados de las pruebas para el prototipo fundido en aluminio, se realizaron los primeros ajustes de detalle al modelo CAD virtual para mejorar resistencia, ergonomía y eficiencia de la herramienta, concentración de esfuerzos y deformaciones y algunos detalles de diseño como los ángulos del filo, según la aplicación agrícola [6].

Producción en materiales finales: Una vez realizadas las mejoras al prototipo final, probado,

validado, verificado y mejorado, con alguna iteración e interacción computacional CAD/FEM en su etapa final madura, en caso de ser necesario la herramienta es fundida en aleaciones de acero o fundiciones de hierro, utilizando moldes en arena para estos materiales. Este proceso incluyó un control de calidad riguroso para asegurar que se cumplan las especificaciones con que debe cumplir el diseño de la herramienta [13].

Post-fundición y acabado: Posterior a la fundición en los materiales finales, la herramienta se sometió a un proceso riguroso de acabado superficial para eliminar rebabas, imperfecciones, fallas y ajustar adecuadamente todas las herramientas. En situaciones críticas de defectos y/o fallas las herramientas se han corregido, sin embargo, si el diseño no cumple con dichas especificaciones, la herramienta se ha rechazado. [2].

2.5. Importancia del Proceso de Manufactura en Herramientas Agrícolas Manuales.

La etapa de manufactura en este proceso de optimización de herramientas agrícolas ha sido el paso final para consolidar el diseño de una herramienta agrícola manual. El proceso evidenció que el diseño desarrollado durante las etapas previas (CAD/CAM y mediante el análisis FEM) generó un diseño de herramienta que satisface los requerimientos solicitados de ergonomía, desempeño y confiabilidad para trabajo exigente en pendientes en la AF. Las simulaciones computacionales por FEM previeron el comportamiento y desempeño mecánico funcional y confiable para diferentes materiales (fundiciones de aluminio, de aceros, nodular, gris, entre otras.) cuando la punta de la herramienta impacta con el suelo. Las simulaciones de Von Mises se emplearon para determinar y valorar las áreas críticas donde se concentran los mayores esfuerzos y deformaciones, asegurando que los esfuerzos no superen los límites elásticos de los materiales seleccionados, evitando las fallas prematuras durante su uso. [5].

La selección correcta de materiales, la calidad de la fundición y los ajustes posteriores realizados a los modelos finales CAD y a los prototipos funcionales probados fabricados por procesos de fundición, validados, probados y verificados mediante estrategias de iteración, interacción e integración cíclica de herramientas computacionales CAD/CAM/FEM evidenciaron su eficacia en la optimización del diseño de las herramientas agrícolas. La optimización puede perfeccionar el diseño de modo que se reduzca la carga física de los campesinos y aumente la productividad [15].

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1. Modelo CAD.

Se partió de un prototipo físico existente correspondiente a una herramienta agrícola manual, fabricada mediante un proceso de fundición. Mediante técnicas de ingeniería inversa, la herramienta es escaneada generando un prototipo virtual CAD en 3D, permitiendo obtener los parámetros detallados de su superficie. El modelo CAD estandarizado tomado como referencia inicial se utilizó para el análisis y optimización de la herramienta. En la (figura 3), se presenta el modelo CAD en 3D resultante una vez se ha realizado la aplicación de la ingeniería inversa por escaneo.



Fig. 3. Modelo CAD estandarizado, [11].

A partir del modelo CAD generado, se obtienen los planos de la herramienta. Este proceso de ingeniería inversa permitió ahorrar tiempo en el ciclo de optimización del diseño, facilitó realizar los ajustes en el modelo y redujo el margen de error. Después del escaneo, se corroboraron las medidas y se realizaron los ajustes necesarios, entre ellos el cambio y mejora geométrica de las dimensiones del agujero del buje donde se ensambla el cabo, para su estandarización. En este caso se modifica la dimensión y geometría interna del cono interior a una medida estándar comercial con el fin de facilitar el ensamble del cabo comercial con la herramienta, optimizada evitando un impacto cultural negativo por el simple hecho de cambiar un diámetro. Sin embargo, siguiendo una directriz para el diseño de herramientas agrícolas el diámetro del cabo juega un papel importante en su diseño, en lo relacionado con la ergonomía, cuando se brinda un agarre adecuado, acorde con las dimensiones antropométricas del agricultor.

3.2 Manufactura aditiva.

El modelo CAD de la herramienta fue utilizado para generar un prototipo físico mediante impresión 3D.

Este prototipo permitió validar las dimensiones y geometría de la herramienta antes de proceder a su manufactura final. La precisión de la impresión 3D fue vital para detectar posibles inconsistencias o errores en las medidas, lo que facilitó la realización de ajustes en fases tempranas del proceso de optimización de la herramienta agrícola. En la (figura 4), se presentan algunos prototipos obtenidos mediante impresión 3D con diferencias geométricas y dimensionales que ilustran cambios que se incorporan cuando computacionalmente se interactúa con las herramientas computacionales CAD/CAM/CAE en la etapa de optimización de un prototipo.



Fig. 4. Prototipos iniciales mediante impresión 3D, (autores).

Durante la revisión del prototipo impreso, se corroboraron aspectos clave como la ergonomía y el ajuste entre piezas, particularmente en áreas como el agujero del buje para el ensamble del cabo, la geometría que va de acuerdo con las especificaciones a cumplir por parte del diseño, el tamaño, verificación dimensional, entre otros. El uso de la manufactura aditiva 3D de bajo costo con hilo de PLA, permitió obtener una representación física del diseño que facilitó la visualización y manipulación de la herramienta en condiciones simuladas de uso, lo que ayudó a prever el comportamiento de la herramienta en el campo.



Fig. 5. prototipo mediante impresión 3D con correcciones en las medidas del ojal, (autores)

El prototipo impreso fue esencial para confirmar que las características del diseño cumplieran con los requerimientos funcionales, permitiendo hacer los ajustes necesarios antes de avanzar con la manufactura en materiales finales, como lo fueron cambios en el diámetro del agujero del buje, o las geometrías poco ergonómicas que surgieron luego de cambios iniciales según se ilustra en la (figura 5).

En la (Figura 6), se ilustra un diseño final más optimizado comparado con las ilustraciones de las impresiones 3D de las (figuras 4) y (figura 5). En particular el diseño presenta mejoras en su geometría, en el diámetro del buje y en el cuerpo. Se ha mejorado también las zonas de concentración de esfuerzos dado que en las (figuras 4) y (figura 5) se tienen zonas cercanas al buje y al cuerpo con altas concentración de esfuerzos porque no se tienen superficies de empalme suave y acorde a los cambios de sección. Todas estas mejoras se realizaron sobre los CAD antes de llevar nuevamente a procesos de impresión 3D.



Fig. 6. Prototipo final mediante impresión 3D, (autores)

3.3 Verificación mediante FEM.

Los análisis computacionales indicaron que en el prototipo de la (figura 6) la geometría en la punta de la herramienta evita la concentración y favorece la distribución de esfuerzos en zonas más amplias, garantizando la disipación adecuadamente de la energía de deformación durante su funcionamiento. Esto asegura que los materiales se mantengan principalmente en sus rangos elásticos, [5].

Las simulaciones FEM, durante el proceso de optimización de la herramienta en una etapa avanzada del diseño ha facilitado la evaluación comparativa de los esfuerzos máximos de Von Mises que se presentaron para las mismas condiciones operativas en labores agrícolas con herramientas de diferentes materiales. En la Tabla que se ilustra en la (Figura 7), el esfuerzo máximo concentrado sobre diferentes zonas de la herramienta aplicando la teoría de fallas de Von

Misses no superan el esfuerzo elástico para ninguno de los materiales evaluados.

Material	Von Mises Stress (MPa)	Elastic limit (MPa)
AlSi/SAE 4140	16.30	675.00
AlSi/SAE 4130	16.30	460.00
AlSi/SAE 1060	16.30	427.00
Annealed nodular cast iron	15.17	275.79
Normalized nodular cast iron	15.17	482.63
Aluminum A356 permanent mold cast	8.39	179.01

Fig. 7. Esfuerzos elásticos de von Mises para distintos materiales evaluados mediante FEM, [5].

En la (figura 8) utilizando la modelación FEM, se ilustran las zonas de concentración de esfuerzos máximos en el cuerpo para una herramienta de fundición nodular, evaluados mediante la teoría de fallas de Von Misses. El valor del esfuerzo máximo corresponde a 15.17 Mpa, mientras que el valor del límite elástico para dicha fundición nodular es de 482.63 Mpa que indica que los esfuerzos que se concentran en algunas zonas localizadas sobre la nervadura central de la herramienta y cercanas al buje donde se aloja el cabo son completamente elásticos y significativamente inferiores al valor del límite elástico del material de la herramienta. Por lo tanto, la herramienta solo está expuesta a esfuerzos elásticos mínimos que no superan el límite a la fluencia del material.

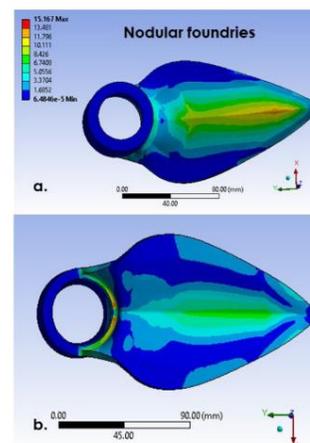


Fig. 8. esfuerzos de Von Mises para una fundición de hierro nodular, [5].

Por otro lado, al evaluar la geometría de la herramienta de la (figura 8), mediante el análisis FEM, se puede verificar cómo se distribuyen los esfuerzos en ciertos materiales, tomando como referencia que, en algunos momentos, un operador puede aplicar hasta 300 W de potencia a una herramienta agrícola [5]. Los resultados obtenidos muestran que la geometría cumple con los requisitos establecidos, lo que confirma el éxito del proceso de

ingeniería inversa, desde la creación del modelo CAD y el prototipo en 3D, hasta la primera fabricación del modelo en un material inicial como el aluminio.

3.4. Fundición en aluminio.

Una vez obtenido el modelo final a partir de la impresión 3D, se utilizó este prototipo como base para realizar la fundición en aluminio de la (figura 9). Este paso fue vital para validar la geometría y las especificaciones del modelo impreso. La fundición permitió evaluar el comportamiento del diseño en un material más resistente y adecuado para su uso en el campo.



Fig. 9. Prototipo en fundición de aluminio, con molde en impresión 3D, (autores)

El proceso de fundición se llevó a cabo utilizando un molde creado a partir del prototipo impreso, garantizando así que las dimensiones y características del modelo se mantuvieran en la pieza final. Esta metodología permitió confirmar que el diseño no solo era viable en un entorno digital, sino también en condiciones de manufactura reales.

La pieza fundida fue analizada para verificar la precisión de las dimensiones y la integridad estructural, asegurando que cumpliera con los requerimientos necesarios para su desempeño en el trabajo agrícola. Esta validación es fundamental para garantizar que la azada surcadora sea efectiva y durable en condiciones de uso intensivo.

3.5. Fundición en hierro.

Luego de la realización de pruebas de campo con el modelo de aluminio, se verificaron aspectos cruciales como la ergonomía y las medidas de la herramienta. Estas pruebas permitieron evaluar el rendimiento del diseño en condiciones reales de uso agrícola, asegurando que la azada surcadora

cumpliera con los requisitos funcionales y de confort necesarios para el trabajo en el campo.

Los resultados obtenidos confirmaron que el modelo en aluminio era adecuado en términos de dimensiones y ergonomía. Sin embargo, para garantizar una mayor durabilidad y resistencia, se optó por realizar la fundición final en hierro, según la (figura 10). Este cambio de material responde a la necesidad de contar con una herramienta que resista condiciones de trabajo intensivas y prolongadas, características comunes en las labores agrícolas.

La fundición en hierro asegurará que la azada surcadora mantenga su integridad estructural, minimizando el desgaste y prolongando su vida útil. Con esta decisión, se busca no solo mejorar la funcionalidad de la herramienta, sino también ofrecer una solución más robusta y eficiente para los agricultores.



Fig. 10. Fundición final en hierro fundido ASTM A536, (autores)

3.6. Pruebas de campo.

Se utilizó la herramienta manufacturada en procesos de fundición nodular en pruebas de campo, con el fin de validar su funcionamiento, rendimiento y postura ergonómica. Los resultados, de acuerdo con las condiciones del terreno, mostraron resultados positivos, que han permitido retroalimentar ajustes finales a su diseño, como apriete del cabo, escalamiento y peso para facilitar trabajos específicos de campo. Incluso, la herramienta fue probada por comunidad femenina, que ha aceptado dicha herramienta para procesos de distribución de fertilizantes, homogeneización del suelo labrado y cultivo de hortalizas, entre otros.



Fig. 11. Campesina haciendo uso de la azada surcadora, (autores)

4. CONCLUSIONES

La aplicación de la ingeniería inversa permitió un desarrollo eficiente del modelo CAD, capturando con precisión las dimensiones y características de la herramienta agrícola. Este enfoque optimizó el proceso de diseño, reduciendo el tiempo y el margen de error en comparación con el diseño tradicional.

La fabricación de un prototipo mediante impresión 3D es una etapa crucial para validar la ergonomía y funcionalidad del diseño. Realizar pruebas en un prototipo en impresión 3D permite identificar y corregir deficiencias antes de una manufactura final, lo que asegura una herramienta más efectiva para la población objetivo.

Las pruebas de campo con un prototipo fabricado en aluminio confirmaron la necesidad de utilizar materiales más robustos para la herramienta final. Optar por una fundición en hierro garantizó una mayor durabilidad y resistencia, alineándose con los requerimientos del sector agrícola.

El análisis por elementos finitos (FEA) y las pruebas de campo demostraron ser fundamentales para garantizar la funcionalidad y seguridad de la herramienta, asegurando su rendimiento en condiciones agrícolas intensivas. Esta metodología no solo permite el desarrollo de herramientas agrícolas más eficientes, sino que también establece un protocolo replicable para el diseño y fabricación de otras herramientas manuales, contribuyendo a mejorar la productividad y condiciones de trabajo de los agricultores.

RECONOCIMIENTOS

A la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, por financiar el proyecto de investigación “Centro de Excelencia (CE) para la Innovación en

Mecanización y Opciones Energéticas para la Agricultura Familiar”. (Código Hermes: 52937).

Grupo de Investigación de Diseño Mecánico Computacional (DIMEC)

Correos: dimec_med@unal.edu.co;
 glgarcia@unal.edu.co

Director DIMEC: Germán Leonardo García Monsalve

Teléfono: (+57) 3017215804; (+57) 6044306204

REFERENCIAS

- [1] J. E. Ashburner y J. Kienzle, *Agricultural hand tools in emergencies: guidelines for technical and field officers*, 2013.
- [2] J. Campbell, *Complete casting handbook: metal casting processes, metallurgy, techniques and design*. Elsevier: Butterworth-Heinemann, 2015.
- [3] C. K. Chua y K. F. Leong, *3D Printing and Additive Manufacturing*. World Scientific Publishing Company, 2014.
- [4] R. D. Cook, D. S. Malkus, y M. E. Plesha, *Concepts and applications of finite element analysis*, John Wiley & Sons, 2001.
- [5] L. Delgado-Bejarano, H. González-Sánchez, y G. García-Monsalve, “Stress Evaluation Using Finite Elements in a Manual Agricultural Tool,” *Ingeniería e Investigación*, vol. 44, no. 2, 2024, pp. e104844.
- [6] I. Gibson, D. Rosen, y B. Stucker, *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*. Springer New York, 2015.
- [7] S. Graziosi, F. Ferrise, G. P. Furtado, y M. Bordegoni, “Reverse engineering of interactive mechanical interfaces for product experience design,” *Virtual and Physical Prototyping*, vol. 9, no. 2, 2014, pp. 65-79.
- [8] H. Guo, S. Liu, H. Pan, Y. Liu, X. Tong, y B. Guo, “ComplexGen: CAD Reconstruction by B-Rep Chain Complex Generation,” *ArXiv.org*, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://arxiv.org/abs/2205.14573>.
- [9] K. J. Bathe, *Finite element procedures*, 2007.
- [10] J. Liu, “An adaptive process of reverse engineering from point clouds to CAD models,” *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, vol. 33, no. 9, 2020, pp. 840-858.
- [11] L. F. Gil Bedoya, G. Jiménez Narváez, G. García Monsalve, y H. González Sánchez, *Herramienta agrícola para formar surcos en el suelo*, Patente No. NC2020/0015840,

- República de Colombia Superintendencia de Industria y Comercio, 2020.
- [12] A. M. Mouazen y M. Neményi, “Finite element analysis of subsoiler cutting in non-homogeneous sandy loam soil,” *Soil and Tillage Research*, vol. 51, no. 1-2, 1999, pp. 1-15.
- [13] P. E. Black, J. T. Kohser, y R. A. DeGarmo, *Materials and processes in manufacturing: global edition*, Hoboken, NJ: Wiley, 2017.
- [14] J. P. Ramírez, D. A. Enríquez, L. F. Gil Bedoya, y N. A. V. Molina, “Diseño y manufactura de una unión para la fijación adhesiva del ensamble de un prototipo de chasis go kart,” *Investigación Formativa en Ingeniería*, vol. 591, 2020.
- [15] S. Kalpakjian y S. Schmid, *Manufacturing Engineering & Technology*, Pearson Higher Ed, 2013.
- [16] N. S. Velloso, A. L. Gonçalves Costa, R. L. Rodrigues Magalhães, F. Lúcio Santos, y E. Tavares de Andrade, “The Finite Element Method Applied to Agricultural Engineering: A Review,” *Current Agriculture Research Journal*, vol. 6, no. 3, 2018, pp. 286-299.
- [17] O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor, y J. Z. Zhu, *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*, Elsevier, 2005.
- [18] Z. Zhang, M. Zhao, Z. Shen, Y. Wang, X. Jia, y D. M. Yan, “Interactive reverse engineering of CAD models,” *Computer Aided Geometric Design*, vol. 111, 2024, pp. 102339.
- [19] T. Várady, R. R. Martin, y J. Cox, “Reverse engineering of geometric models—an introduction,” *Computer-Aided Design*, vol. 29, no. 4, 1997, pp. 255-268.
- [20] *The Finite Element Method*, Google Books, 2014. [En línea]. Disponible en: <https://books.google.com>.