

Diseño y Optimización del Timón de un Surcador Aplicando Elemento Finito y Templado Simulado

Design and Optimization of a Furrower Shank Using Finite Element and Simulated Annealing

Mariana Concepción Flores-Torres¹, Cynthia Patricia Guerrero-Méndez¹, Alberto Saldaña-Robles², Donato Reyes-Ramírez³, Víctor Alfonso Alcántar-Camarena¹✉

¹Universidad Politécnica Bicentenario, ²Universidad de Guanajuato, ³Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Campus León

RESUMEN

En este trabajo se propone el diseño y la optimización del timón de un surcador. El objetivo principal es diseñar el elemento con una adecuada resistencia estructural y características geométricas que permitan la reducción de su masa sin comprometer su resistencia. El diseño del surcador se realizó en un paquete de CAD tomando como referencia dimensiones de implementos similares. En primera instancia, un estudio teórico-numérico del estado de esfuerzo normal del diseño inicial del surcador sometido a carga se llevó a cabo. El análisis de resultados mostró una alta correlación (R^2) entre los obtenidos numéricamente en comparación con los teóricos. Posteriormente, el proceso de optimización del timón se realizó empleando dos metodologías distintas: 1) un Diseño Central Compuesto (DCC) en combinación con Metodología de Superficie de Respuesta (MSR), métodos de exploración integrados en el software de elemento finito; y 2) el método de optimización de Templado Simulado (TS). Ambas metodologías ofrecen resultados similares logrando una reducción de masa de hasta 25 % respecto al diseño inicial.

PALABRAS CLAVE: simulación; diseño estructural; elemento finito; optimización.

ABSTRACT

In this work, the design and optimization of the shank of a furrower are proposed. The main objective is to design the element with adequate structural resistance and geometric characteristics that allow it to reduce its mass without compromising its resistance. The furrower design was made in a CAD package taking as reference dimensions of similar implements. In the first instance, a theoretical-numerical study of the state of normal stress of the initial design of the furrower under load was carried out. The analysis of results showed a high correlation (R^2) between those obtained numerically compared to the theoretical ones. Subsequently, the rudder optimization process was carried out using two different methodologies: 1) a Central Composite Design (CCD) in combination with Response Surface Methodology (RSM), exploration methods integrated in the finite element software; and 2) the Simulated Annealing optimization method (SA). Both methodologies offer similar results achieving a mass reduction of up to 25% compared to the initial design.

KEYWORDS: simulation; structural design; finite element; optimization.

Correspondencia:

DESTINATARIO: Víctor Alfonso Alcántar-Camarena
INSTITUCIÓN: Universidad Politécnica Bicentenario
DIRECCIÓN: Silao-Romita km 2, C. P. 36283, colonia San Juan de los Durán, Silao, Guanajuato, México
CORREO ELECTRÓNICO: valcantarc@upbicentenario.edu.mx

Fecha de recepción: 30 de abril de 2021. **Fecha de aceptación:** 8 de diciembre de 2021. **Fecha de publicación:** 13 de diciembre de 2021.



I. INTRODUCCIÓN

El surcador es un implemento agrícola empleado para la elaboración de surcos utilizados en la siembra o para el drenaje. La profundidad del surco depende del cultivo a sembrar y la distancia entre surcos está en función del marco de siembra utilizado [1]. El surcador se puede ajustar para obtener la altura y ancho requeridos con un adecuado perfil simétrico respecto a su eje. Este implemento agrícola se acopla a tractores de diferentes potencias y puede romper, pulverizar y surcar en un solo paso. Su diseño se caracteriza por una estructura rígida, sencilla y resistente.

En la literatura se encuentran diferentes estudios en los cuales se presenta la influencia que tiene el diseño del surcador en los parámetros de operación. Mamman y Oni [2] investigaron de forma experimental el desempeño de la fuerza de tiro en surcadores de cincel geoméricamente similares. Los parámetros de diseño de la herramienta considerados son el ángulo de la punta, el ángulo de deslizamiento y la altura del filo de corte. Por otro lado, los parámetros de operación fueron la velocidad de desplazamiento de la herramienta y la profundidad de labranza. A partir de los resultados obtenidos, los autores desarrollaron una ecuación general con la cual es posible predecir la fuerza de tiro en función de los parámetros de operación y la geometría del surcador.

Medeiros *et al.* [3] evaluaron la viabilidad técnica y el rendimiento de surcadores rotativos en trabajo de siembra directa y se compararon con surcadores de mango. Se implementó un diseño factorial con tres modelos de surcadores rotativos, dos valores de revoluciones por unidad de desplazamiento lineal y dos velocidades de avance. La principal ventaja de un surcador rotativo es que requiere menor fuerza vertical para realizar la misma operación que un surcador de mango. Barzegar *et al.* [4] propusieron disminuir la fuerza de tiro de los surcadores utilizando revestimientos superficiales de polímero UHMWPE. A modo de comparación, fabricaron un surcador de acero con la misma forma y dimensión que el surcador recubierto de plástico. Las pruebas experimentales se desarrollaron en un contenedor de arcilla pesada. Los autores determinaron que el revestimiento, un polímero de baja adherencia y fricción superficial, puede reducir la fuerza de tiro requerida.

Singh *et al.* [5] investigaron la relación entre diferentes tipos de surcadores y parámetros, como el tipo de suelo, la

fuerza de tiro, el porcentaje de germinación respecto a la velocidad operativa y la profundidad de las operaciones. Como resultado, fue posible determinar la combinación de parámetros más adecuada en el proceso de surcado para realizar recomendaciones a los fabricantes y productores.

También existen estudios en los cuales se hace uso de herramientas computacionales CAD y CAE para mejorar el diseño en las máquinas agrícolas. Jakasania *et al.* [6] han propuesto el diseño de un subsolador parabólico empleando una herramienta CAD. Posteriormente, desarrollaron un análisis estático estructural aplicando el método de elemento finito. Las condiciones de carga y restricciones se establecen a partir de los datos reportados en campo.

Los resultados del análisis revelan que los esfuerzos de tensión que se ejercen en el subsolador están por debajo del límite elástico del material y se determinó un factor de seguridad de 1.59. Por lo tanto, el diseño propuesto podría emplearse para el desarrollo de un subsolador. Kadam y Chhapkhane [7] emplearon una herramienta CAD para modificar el diseño de un subsolador. Posteriormente, emplearon el paquete de elemento finito ANSYS para realizar un análisis estructural del diseño propuesto. Los autores resaltan que el nuevo diseño reduce el esfuerzo del tractor y es de fácil mantenimiento, entre otras ventajas. Jahanbakhshi y Heidarbeigi [8] hicieron una simulación por elemento finito de un brazo de eslabón inferior de tractores MF399 y MF285. Estos elementos se utilizan para sujetar herramientas a los tractores agrícolas. Durante las operaciones de trabajo, los eslabones se encuentran sujetos a diferentes fuerzas. Por lo anterior, se utilizó el programa ANSYS para realizar análisis estáticos, modales y de fatiga. Los resultados obtenidos pueden ser empleados para optimizar el proceso de diseño.

El objetivo de un sistema agrícola moderno es economizar el consumo de energía y reducir los costos. Una forma de contribuir con esta meta es disminuir la masa de ciertos elementos estructurales de la maquinaria agrícola. Saldaña *et al.* [9] propusieron un modelo 3D de una retroexcavadora agrícola, analizaron su resistencia empleando un software de elemento finito y compararon las respuestas con análisis teóricos. Los autores demostraron que empleando el método de superficie de respuesta en conjunto con redes neuronales artificiales es posible reducir la masa (de 446.3 kg a 335.4 kg) de los principales

componentes de la retroexcavadora agrícola, como son cucharón, brazo, pluma y eslabones. Por lo anterior, en el presente artículo se desarrolla el análisis numérico de la estructura principal de un surcador, a la cual se le conoce como timón. El modelo numérico es comparado con soluciones teóricas para su validación. Posteriormente, se busca generar un diseño geométrico óptimo. El proceso de optimización se realiza de dos formas distintas. En primer lugar, con un diseño central compuesto en conjunto con el método de superficie de respuesta integrados como elementos de exploración auxiliares al paquete de elemento finito. Como proceso alterno se implementa el método de templado simulado, con el objetivo de comparar ambas soluciones. Los resultados de la optimización con MSR y templado simulado mostraron una reducción de masa de 25 % y 31 %, respectivamente, en comparación con el diseño inicial.

II. METODOLOGÍA

El diseño estructural del timón se realizó en seis etapas. En la primera se analizaron los diferentes elementos que componen un timón surcador de profundidad, así como las geometrías y dimensiones comerciales; en la segunda se desarrolló un modelo 3D del timón con ayuda de un paquete CAD; en la tercera se llevó a cabo un análisis teórico del timón; en la cuarta se realizó un análisis numérico del elemento sometido a carga y se comparó el estado de esfuerzo normal de los resultados numéricos y teóricos; en la quinta se llevó a cabo la reducción de masa del timón a partir de un diseño central compuesto (DCC) en combinación con superficie de respuesta (MSR) y, finalmente, en la sexta etapa se aplicó el método de optimización de templado simulado y se comparó con los resultados obtenidos por DCC. Estos pasos son detallados en las siguientes secciones.

Análisis de los componentes

En el mercado se encuentran diversos modelos y geometrías de surcadores, cuyos principales componentes son las placas porta barra, el timón o brazo, la reja y vertedera. En el presente estudio se toma como referencia el timón surcador de profundidad (Figura 1). El diseño del timón propuesto para el surcador tiene las siguientes dimensiones: una altura de 609.6 mm (24 pulgadas), ancho de 76.2 mm (3 pulgadas) y espesor de 25.4 mm (1 pulgada), valores típicos de implementos agrícolas similares.

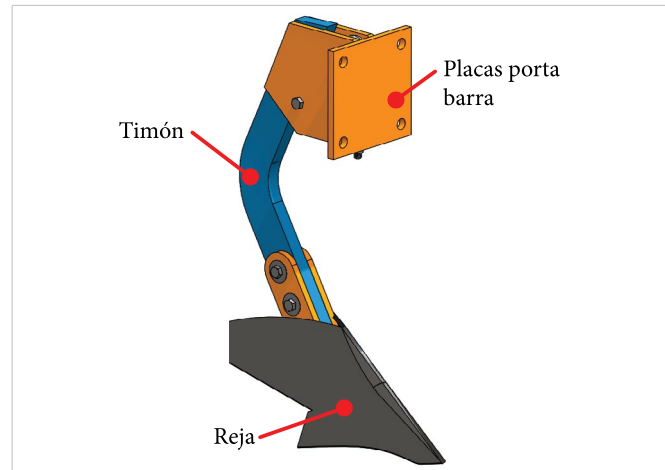


Figura 1. Componentes principales de un surcador.

Modelado geométrico

Una vez que se revisaron los principales componentes de un surcador, se observó que el timón es el elemento de mayor longitud. Este elemento debe ser diseñado con un mínimo y asegurar su resistencia bajo condiciones. La geometría propuesta se muestra en la Figura 2. Los principales parámetros dimensionales de este modelo son la altura (h), ancho (a), espesor (t), radio interior (r_i) y radio exterior (r_o).

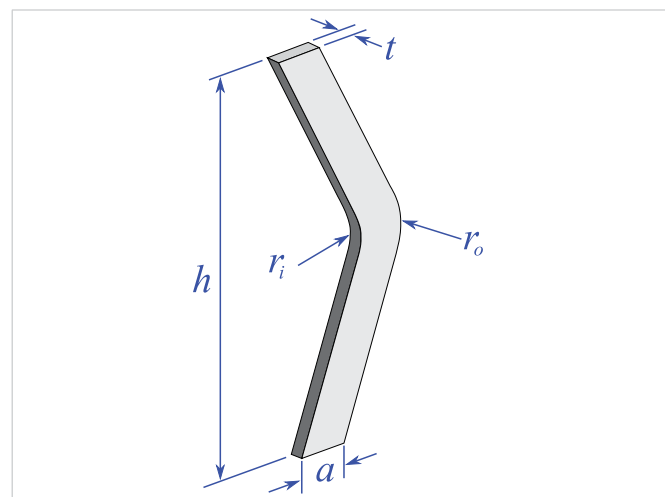


Figura 2. Modelado CAD del timón.

Análisis teórico

Al analizar las condiciones de operación se observa que la parte superior del timón está completamente restringida por el bastidor del implemento. Por otro lado, la parte inferior es sometida a la fuerza de reacción que ejerce el suelo sobre el surcador (Figura 3). Esta fuerza

es proporcional a la fuerza de tiro del tractor. Singh *et al.* [5] evaluaron la fuerza de tiro sobre tres diferentes surcadores. La mayor fuerza se presentó en el surcador de profundidad modelo IISR con una carga $F = 2330$ N. Este valor es considerado para los análisis teóricos y numéricos. En cuanto a la solución teórica, el caso de estudio puede modelarse simplificando el problema mediante el uso de la teoría de viga curva sometida a flexión. Los esfuerzos críticos se presentan en las fibras internas y externas de este elemento [10]. Por lo tanto, los esfuerzos normales se determinan con la Ecuación (1)

$$\sigma = \frac{F}{A} + \frac{Mc}{Aer} \quad (1)$$

donde σ es el esfuerzo normal debida a la flexión, M es el momento flexionante, c es la distancia del eje neutro hacia cualquier punto a lo largo del ancho, A es el área de sección transversal de la viga, e es la distancia del eje centroidal (r_c) al eje neutro (r_n), F es la fuerza aplicada y M el momento flexionante.

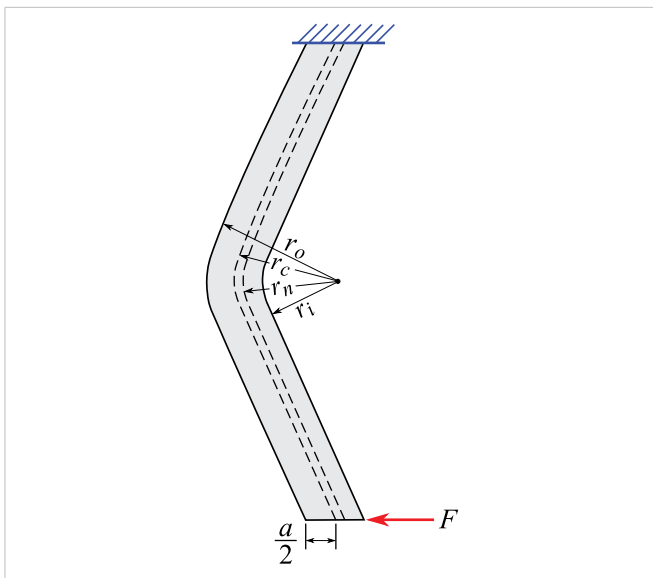


Figura 3. Condiciones de frontera de la viga curva.

El criterio de Pugsley es empleado para determinar el factor de seguridad mínimo que requiere la estructura [11]. En la Ecuación (2) se muestra este criterio, donde N representa el factor mínimo que debe cumplir el elemento mecánico; N_x es un coeficiente de seguridad que está en función de la calidad de los materiales, mantenimiento, inspección, control sobre la carga aplicada e información sobre las soluciones; N_y es un coeficiente

de seguridad que considera el peligro potencial para las personas y las consecuencias del impacto económico si se llegara a presentar la falla. Para el presente diseño se determinó que el factor de seguridad mínimo es de 1.43.

$$N = N_x N_y \quad (2)$$

Análisis numérico

El modelo de elemento finito del timón fue desarrollado en el programa ANSYS 2021 R1. Se generó una malla con 1340 elementos. Como se puede observar en la Figura 4, se aplica un refinado en la sección central de geometría, ya que en esta zona se presenta la máxima concentración de esfuerzos. Se emplea el elemento SOLID 186, el cual es un elemento 3D de alto orden.

Está definido por 20 nodos y cuenta con tres grados de libertad por nodo: traslaciones en las direcciones x , y , z . El elemento admite plasticidad, hiperelasticidad, fluencia, endurecimiento por deformación, grandes deflexiones y gran capacidad de deformación. Como se indicó anteriormente, la parte superior es completamente restringida y la carga se aplica en la parte inferior del modelo.

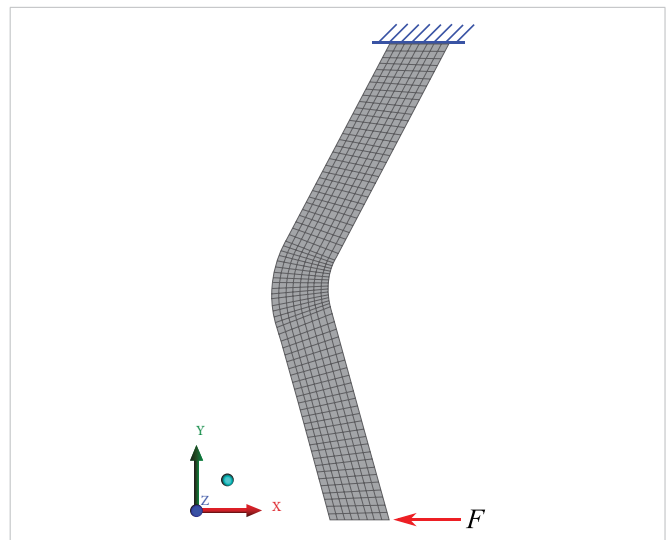


Figura 4. Modelo de elemento finito de la viga curva.

Se considera que el timón es fabricado con el material ASTM A36. Para el análisis numérico se requieren las propiedades del módulo de elasticidad (E), razón de Poisson (ν), esfuerzo de cedencia (S_y) y densidad (ρ). En la Tabla 1 se listan los valores de las propiedades mecánicas antes mencionadas.

TABLA 1 [12]
PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ACERO ASTM A36

PROPIEDAD	UNIDADES	VALOR
Módulo de elasticidad, E	GPa	200
Razón de Poisson, ν		0.26
Esfuerzo de cedencia, S_y	MPa	250
Densidad, ρ	g/cm^3	7.80

Reducción de masa

Una vez generado el modelo de elemento finito, se utilizó la técnica de DCC bajo la metodología de superficie de respuesta. El objetivo es estudiar el comportamiento de la masa, el factor de seguridad y los esfuerzos de von Mises al considerar el espesor, radio interior y radio exterior como variables de diseño. MSR es una poderosa herramienta matemática y estadística que se emplea para optimizar el proceso y evaluar la importancia de las variables de diseño y sus efectos en las respuestas. Por otro lado, el DCC, combinado con MSR, es una técnica basada en múltiples variables que conduce a una mejor predicción de las respuestas de salida, utilizando un menor número de pruebas [13].

En el paquete ANSYS se parametrizaron tres variables de diseño del timón del surcador (espesor, radio exterior y radio interior) (Figura 2) y se empleó un DCC para estudiar el efecto de la combinación entre las variables de diseño sobre el esfuerzo, el factor de seguridad y la masa. A cada parámetro de diseño se le asignó un valor máximo y mínimo (acorde a diseños de implementos similares), resultando del DCC 16 pruebas experimentales para este estudio (16 diversas combinaciones entre los parámetros de diseño), considerando valores comerciales para los espesores de placa.

Implementación de templado simulado

El templado simulado (TS) es un método de optimización que puede ser usado para resolver una amplia variedad de problemas [14]. Cuando se aplica este método, la estructura del material representa una solución codificada del problema y la temperatura se usa para determinar cómo se distribuyen las nuevas soluciones y cuándo se aceptan. Cada iteración consta de dos pasos: 1) se perturba la solución y 2) se evalúa la calidad de la solución. Para la evaluación se debe definir una función de error (función objetivo). La solución actual puede ser remplazada por la nueva solución con una cierta probabilidad. En la literatura se pueden encontrar crite-

rios específicos que deben tenerse en cuenta para aceptar una solución cada vez que ha sido perturbada [15].

En este artículo se implementa el algoritmo de templado simulado utilizando la extensión Wintempla [16], la cual se emplea junto con Microsoft Visual Studio para crear aplicaciones de escritorio con C++. Los parámetros empleados para el algoritmo son: 2500 temperaturas, 100 iteraciones por temperatura, temperatura inicial 10, temperatura final $1E-6$, enfriamiento exponencial y criterio de convergencia de $1E-9$. Las variables de diseño son consideradas continuas con los siguientes rangos: $76.2 \leq r_i \leq i 80.8$ mm, $147.5 \leq r_o \leq 163.0$ mm y $12.7 \leq t \leq 38.1$ mm. La Ecuación (3) muestra la función objetivo propuesta,

$$F_{obj} = [n - N] + F_p \quad (3)$$

donde n es el factor de seguridad obtenido a partir de la solución teórica, N factor de seguridad mínimo requerido para el diseño y F_p es un factor de penalización. Este último parámetro inicia con un valor de 0, sin embargo, si se llegara a cumplir la condición $n < N$, el factor de penalización toma un valor elevado. Esta operación incrementa el valor de la función objetivo, aumentando el error de la solución e indicando al algoritmo que los valores de las variables de diseño no son óptimos

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados del análisis teórico y numérico para el modelo inicial, considerando un radio interno de 76.2 mm, radio exterior de 147.5 mm, un espesor de 25.4 mm y altura de 609.6 mm, se muestran a continuación. La Figura 5a muestra los esfuerzos normales de la solución numérica del timón. Debido a las condiciones de frontera, las fibras del radio interior están sometidas a tensión. Por otro lado, las fibras del radio exterior se encuentran a compresión. La Figura 5b presenta una comparación de los esfuerzos normales máximos obtenidos de forma teórica y numérica. El coeficiente de correlación entre la respuesta teórica y numérica es $R^2 = 0.998$.

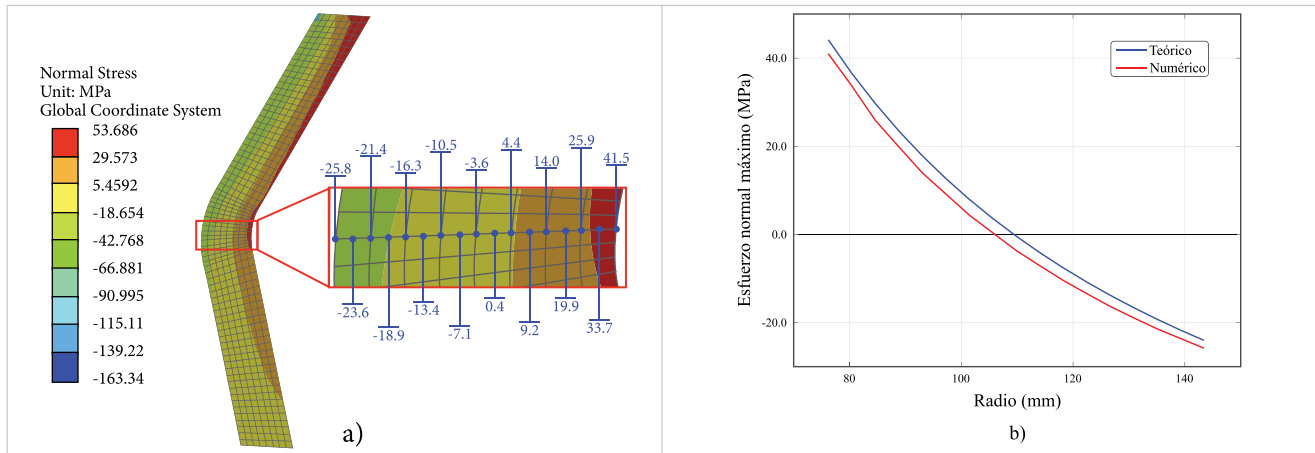


Figura 5. a) Estado de esfuerzos normales obtenidos con el software de elemento finito. b) Comparación de los esfuerzos normales máximos teóricos y numéricos.

La **Tabla 2** lista los resultados obtenidos de forma numérica. El radio interno, externo y el espesor corresponden a los parámetros de entrada. Como parámetros de salida se tiene al factor de seguridad, el esfuerzo de von Mises (σ_{vM}) y la masa del timón. La primera línea corresponde a la solución con los parámetros iniciales.

Estas dimensiones se obtuvieron de implementos similares acorde con la literatura. Posteriormente se listan los 16 puntos de diseño evaluados a través del DCC para la reducción de la masa. En la última línea se muestran los valores para la solución obtenida con el método de optimización de templado simulado (TS).

TABLA 2
SOLUCIÓN NUMÉRICA PARA LOS DIFERENTES PUNTOS DE DISEÑO

PUNTOS DE DISEÑO	PARÁMETROS DE ENTRADA			PARÁMETROS DE SALIDA			
	r_i (mm)	r_o (mm)	t (mm)	FACTOR DE SEGURIDAD	σ_{vM} (MPa)	MASA (kg)	REDUCCIÓN DE MASA (%)
Inicial	76.20	147.5	25.4	1.95	128.0	9.20	-
1	76.20	147.5	19.05	1.55	160.3	6.90	25.0
2	78.50	150.0	12.7	1.03	240.9	4.59	50.1
3	78.50	150.0	38.1	2.82	88.5	13.79	49.9 (I)
4	79.65	150.0	25.4	1.95	128.0	9.20	0.0
5	80.80	150.0	12.7	1.03	241.8	4.60	50.0
6	80.80	150.0	38.1	2.82	88.5	13.80	50.0 (I)
7	78.50	156.5	25.4	1.94	128.2	9.19	0.1
8	79.65	156.5	12.7	1.04	240.1	4.59	50.1
9	79.65	156.5	25.4	1.91	128.2	9.19	0.1
10	79.65	156.5	38.1	2.82	88.5	13.78	49.8 (I)
11	80.80	156.5	25.4	1.95	128.2	9.19	0.1
12	78.50	163.0	12.7	1.04	238.8	4.59	50.1
13	78.50	163.0	38.1	2.82	88.3	13.77	49.7 (I)
14	79.65	163.0	25.4	1.95	127.8	9.18	0.2
15	80.80	163.0	12.7	1.03	240.4	4.59	50.1
16	80.80	163.0	38.1	2.82	88.3	13.77	49.7 (I)
17	80.40	150.9	17.5	1.43	174.6	6.33	31.2
TS	80.40	150.9	17.5	1.43	174.6	6.33	31.2

(I) Puntos de diseño donde se presenta un incremento de la masa respecto al valor inicial.

La **Tabla 2** muestra los puntos de diseño obtenidos del DCC en ANSYS, considerando valores comerciales de espesor de placa de acero (variables discretas) y también muestra la evaluación con la solución óptima arrojada por el método de templado simulado (TS) considerando variables continuas. De acuerdo con los primeros 16 puntos de diseño mostrados en la tabla anterior, el candidato corresponde al punto 1 para la reducción de masa y una resistencia adecuada. Este punto permite una disminución de masa del 25 % respecto a las condiciones de diseño iniciales. Además, se cuenta con un factor de seguridad mínimo de 1.55, valor que cumple con el criterio de Pugsley, presentando un esfuerzo de von Mises de 160 MPa que se encuentra por debajo del esfuerzo de cedencia del material seleccionado para la fabricación del timón (250 MPa).

Por otro lado, los parámetros de diseño obtenidos con templado simulado ofrecen una reducción de masa de 31 % y un factor de seguridad de 1.43. Sin embargo, el método de TS se trabajó con variables continuas en los rangos mencionados anteriormente, mientras que en ANSYS se hizo uso de espesores comerciales (variables discretas) y al trabajar con espesores comerciales se reducen costos de manufactura. Por lo anterior, el punto de diseño 17 de la **Tabla 2** se evaluó numéricamente a los mismos parámetros de diseño del timón obtenidos por TS para el caso óptimo. Los resultados muestran que por ambos métodos se obtiene la misma respuesta. Sin embargo, en el mercado no se encuentran placas de

17.5 mm de espesor para la fabricación del timón. Se tendría que realizar un maquinado adicional para conseguir este valor, lo cual implica un gasto extra en la fabricación de la pieza.

La mejor opción es considerar el espesor de 19.05 mm (3/4 de pulgada), espesor disponible en catálogos comerciales (punto de diseño 1, **Tabla 2**). Con esto se reducen los costos de manufactura, ofreciendo una adecuada resistencia a un mínimo peso. En la **Tabla 2** también se muestran algunos puntos de diseño (3, 6, 10, 13 y 16) que ofrecen factores de seguridad por arriba del criterio seleccionado (1.43). Sin embargo, estos puntos de diseño incrementan el peso de la pieza, el costo de adquisición del material y la manufactura, en comparación con el punto de diseño 1.

Una vez validado del modelo numérico del timón con el esfuerzo normal determinado con la teoría de la viga curva, se emplea el esfuerzo de von Mises para verificar el factor de seguridad. La **Figura 6a** muestra el gráfico de superficie de respuesta, en donde se puede observar el efecto del radio exterior y el espesor sobre el esfuerzo de von Mises. Por otro lado, la **Figura 6b** ilustra la respuesta de estos mismos parámetros sobre la masa de la estructura. En ambas gráficas es evidente que la variación en el espesor impacta enormemente en la respuesta del esfuerzo y la masa. En cambio, el radio exterior no parece tener un efecto significativo sobre estos parámetros.

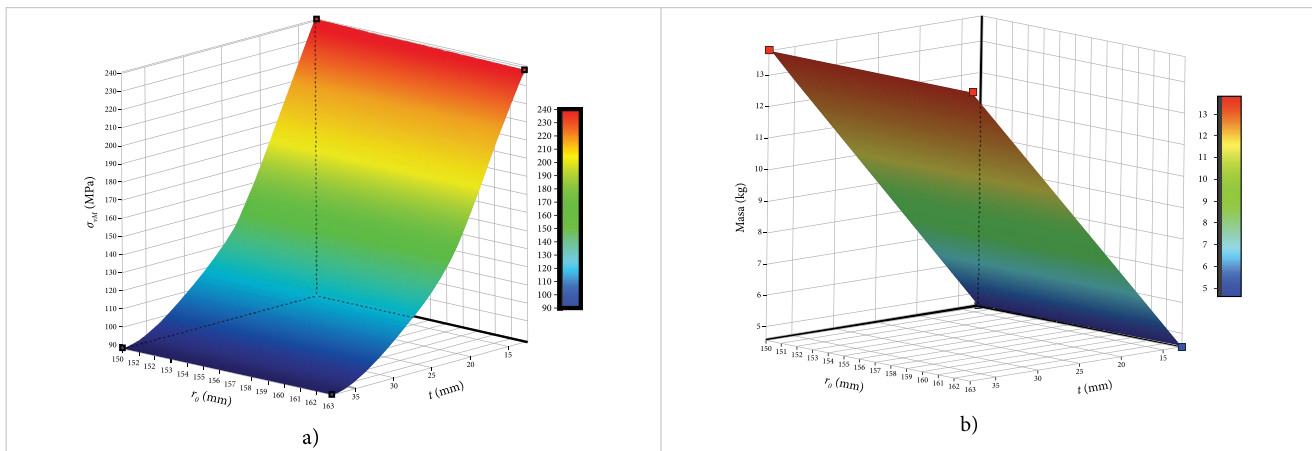


Figura 6. Gráficos de superficie de respuesta para: a) el esfuerzo de von Mises y b) la masa de la estructura.

Finalmente, la **Figura 7** exhibe la relación entre el espesor y el factor de seguridad del timón. Como se puede observar, para lograr un factor de seguridad cercano a 1.43 se requiere un espesor comercial de 19.05 mm. Al

incrementar el espesor, se incrementa el factor de seguridad. Sin embargo, lo anterior implica un incremento en la masa de la estructura, los costos de material y los costos de manufactura.

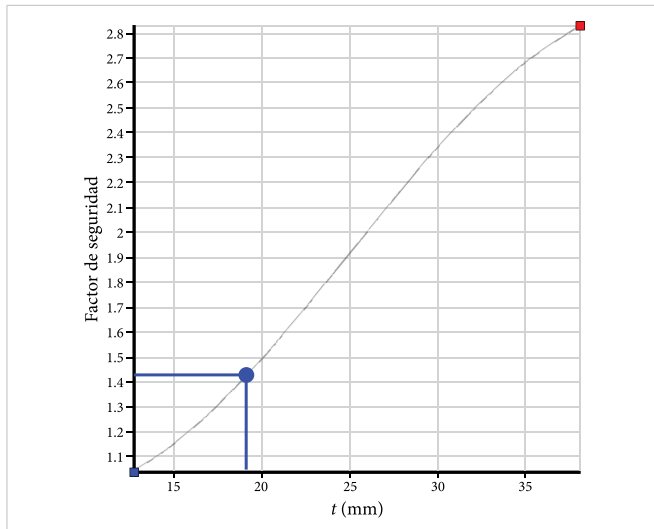


Figura 7. Relación entre el espesor y el factor de seguridad de la estructura.

IV. CONCLUSIONES

Uno de los elementos más importantes de un surcador es el timón. Este elemento puede ser geoméricamente optimizado para tener una adecuada resistencia a un mínimo peso, lo que reduce los costos de adquisición de material y manufactura. En el presente artículo se llevó a cabo de forma satisfactoria el diseño y optimización del timón de un surcador, empleando el método de elemento finito para el diseño del timón, el cual se validó de forma teórica. La optimización del timón se realizó aplicado dos métodos de optimización: un DCC en conjunto con MSR y el método TS.

Se desarrolló un modelo de elemento finito del timón del surcador bajo carga y se compararon los resultados con cálculos teóricos. Los resultados teórico-numéricos mostraron una alta correlación (0.998), lo que permitió la validación del modelo. La optimización usando TS y DCC en combinación con MSR muestran resultados similares y por ambas metodologías fue posible reducir la masa del timón en un 31 % respecto al inicial, respetando el criterio de seguridad establecido por el método de Pugsley (1.43), considerando un radio interior de 80.4 mm, radio exterior de 150.9 mm y espesor de 17.5 mm para el timón.

Estos resultados se obtuvieron considerando al espesor como una variable continua. Sin embargo, sopesar un espesor no comercial involucra costos adicionales en la manufactura. Por lo anterior, el punto de diseño 1 de la optimización, empleando DCC en combinación

con MSR, se considera el mejor punto de diseño, con el cual es posible reducir la masa inicial un 25% con una resistencia adecuada (factor de seguridad de 1.55) con un radio interior de 76.20 mm, radio exterior de 147.50 mm y espesor de 19.05 mm (espesor comercial). El templado simulado podría emplearse en el proceso de diseño óptimo cuando no sea posible acceder a herramientas numéricas y al diseño de experimentos.

REFERENCIAS

- [1] M. W. Barreiro, "Evaluación de tecnologías de preparación de suelos con tracción animal", *Revista Ingeniería Agrícola*, vol. 6, no. 1, pp. 9-13, 2017.
- [2] E. Mamman y K. C. Oni, "Draught performance of a range of model chisel furrowers", *Agric. Eng. Int.: CIGR J.*, vol. VII, 2005.
- [3] F. A. Medeiros, A. V. d. Reis, A. L. T. Machado, R. L. T. Machado y G. Stefanello, "Use of walking tractor powered rotary tiller in no-tillage system", *Revista Ciência Agronômica*, vol. 46, no. 1, pp. 54-63, 2015, doi: 10.1590/S1806-66902015000100007.
- [4] M. Barzegar, S. Hashemi, H. Nazokdast y R. Karimi, "Evaluating the draft force and soil-tool adhesion of a UHMW-PE coated furrower", *Soil Tillage Res.*, vol. 163, pp. 160-167, 2016, doi: 10.1016/j.still.2016.05.016.
- [5] S. Singh, A. Tripathi y A. K. Singh, "Performance evaluation of furrow openers for sugarcane planting in sub-tropical India", *Agric. Eng. Int.: CIGR J.*, vol. 20, no. 1, pp. 56-62, 2018, <https://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/view/4040/2693>.
- [6] R. Jakasania, A. Vadher y R. Yadav, "Structural analysis of parabolic type subsoiler using CAD software", *Int. j. sci. environ.*, vol. 5, no. 5, pp. 3415-3422, 2016, <https://www.ijset.net/journal/1323.pdf>.
- [7] A. Kadam y N. Chhapkhane, "Design and analysis of subsoiler", *Int. j. modern trends eng. sci.*, vol. 4, no. 1, pp. 11-14, 2017.
- [8] A. Jahanbakhshi y K. Heidarbeigi, "Simulation and mechanical stress analysis of the lower link arm of a tractor using finite element method", *J Fail. Anal. and Preven.*, vol. 19, no. 6, pp. 1666-1672, 2019, doi: 10.1007/s11668-019-00763-2.

- [9] A. Saldaña-Robles, A. Bustos-Gaytán, J. Diosdado- De la Peña, A. Saldaña-Robles, V. Alcántar-Camarena, A. Balvantín-García y N. Saldaña-Robles, “Structural design of an agricultural backhoe using TA, FEA, RSM and ANN”, *Comput Electron Agric*, vol. 172, pp. 105278, 2020, doi: [10.1016/j.compag.2020.105278](https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105278).
- [10] J. E. Shigley, *Shigley's mechanical engineering design*. McGraw-Hill Education, 2011.
- [11] L. C. Ríos y E. Roncancio, “Análisis y desarrollo de un programa de selección rápida de factores de seguridad, para diseño de elementos mecánicos”, *Scientia et technica*, vol. 1, no. 1, pp. 255-260, 2007.
- [12] MatWeb®, “MatWeb Property data”. Matbew.com. <http://www.matweb.com/index.aspx> (consultada febrero 10, 2021).
- [13] J. P. Maran y S. Manikandan, “Response surface modeling and optimization of process parameters for aqueous extraction of pigments from prickly pear (*Opuntia ficus-indica*) fruit”, *Dyes and Pigments*, vol. 95, no. 3, pp. 465-472, 2012, doi: [10.1016/j.dyepig.2012.06.007](https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2012.06.007).
- [14] F. Crimins, “Numerical recipes in C++: The art of scientific computing”, *Appl Biochem Biotechnol*, vol. 104, no. 1, p. 95, 2003, doi: [10.1007/s12010-003-0001-6](https://doi.org/10.1007/s12010-003-0001-6).
- [15] S. Ledesma, G. Aviña-Cervantes y R. Sanchez, “Practical considerations for simulated annealing implementation”, en *Simulated annealing*, C. M. Tan, Ed., IntertechOpen, 2008, cap. 20, pp. 401-420.
- [16] *Wintempla*. (2021), S. Ledesma. (Consultado marzo 3, 2021). [En línea]. Disponible: <http://www.sintesis.ugto.mx>