

Diseño de hoja de sierra circular para el corte de madera

Circular saw blade design for wood cutting

Eyleen B. González Ortega ^a, Ángel J. Morales Robles ^b, Martín Ortiz Domínguez ^c, Jorge Zuno Silva ^d

Abstract:

This study outlines the design and optimization process of a circular saw blade specifically engineered for wood cutting, with the objective of enhancing its structural and dynamic performance. A thorough literature review was initially conducted to evaluate the primary factors that influence wood machining, which are intricately linked to tool geometry, cutting conditions, and the physical properties of the workpiece. Building upon these insights, a design proposal was formulated utilizing a three-dimensional model of a 10-inch circular saw blade, developed in SolidWorks. Subsequent to the design phase, structural, fatigue, and modal analyses were executed utilizing ANSYS software. The outcomes of these simulations informed the optimization of various geometric parameters, including the tooth geometry by adjusting the rake angle, relief angle, and gullet angle, as well as the design and arrangement of expansion slots in a keyhole shape. The final design incorporated S-shaped slots, which enhanced the natural frequency of the blade and mitigated vibration during cutting operations. Additionally, surface treatments, such as nitriding, were evaluated to improve wear resistance and prolong the service life of the tool.

Keywords:

Circular saw, design, nitriding, fatigue, vibration modes, stress

Resumen:

El presente trabajo aborda el proceso de diseño y optimización de una hoja de sierra circular para el corte de madera, con el objetivo de mejorar su desempeño estructural y dinámico. En primera instancia, se realizó una revisión bibliográfica detallada de los factores que influyen en el mecanizado de madera, los cuales están relacionados con la geometría de la herramienta, las condiciones de operación y las propiedades de la pieza de trabajo. Con base en este análisis, se desarrolló una propuesta de diseño mediante un modelo tridimensional de una sierra circular de 10 pulgadas en el software SolidWorks. Posteriormente, se llevaron a cabo análisis estructurales, de fatiga y de modos de vibración en el software ANSYS. A partir de los resultados obtenidos en las simulaciones, se optimizaron diversos parámetros geométricos, incluyendo la geometría del diente —ajustando los ángulos de ataque, alivio y de garganta— así como la disposición y forma de las hendiduras de expansión tipo "ojo de cerradura". El diseño final incorporó además ranuras en forma de S, que permitieron incrementar la frecuencia natural de la herramienta y reducir las vibraciones durante el corte. Finalmente, se consideraron tratamientos superficiales como la nitruración para mejorar la resistencia al desgaste y prolongar la vida útil de la herramienta.

Palabras Clave:

Sierra circular, diseño, nitruración, fatiga, modos de vibrar, esfuerzo

^a Autor de Correspondencia, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Escuela Superior de Ciudad Sahagún | Ciudad Sahagún-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0009-0004-1967-6462>, Email: eyleen_gonzalez@uaeh.edu.mx

^b Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Escuela Superior de Ciudad Sahagún | Ciudad Sahagún-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0009-0003-6810-6565>, Email: mo298963@uaeh.edu.mx

^c Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Área Académica de Ciencias de la Tierra | Pachuca de Soto-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0000-0003-4475-9804>, Email: martin_ortiz@uaeh.edu.mx

^d Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Escuela Superior de Apan | Apan-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0000-0002-1997-5399>, Email: jorge_zuno@uaeh.edu.mx

Introducción

En la actualidad las sierras circulares son una herramienta fundamental en la industria de procesamiento de la madera tanto en el sector primario (aserrado) como en el secundario (fabricación de muebles y paneles), esto debido a su capacidad para realizar cortes longitudinales y transversales en distintos tipos de madera mediante procesos relativamente simples, lo que las ha consolidado como una solución eficiente dentro de los procesos de mecanizado. Es importante mencionar que el desempeño de las sierras circulares depende de múltiples factores entre los que destacan la geometría del diente, el material de la hoja, las condiciones de operación y las propiedades del material de corte.

Numerosos estudios demuestran inequívocamente que la geometría de la herramienta de corte desempeña un papel crucial en factores como la calidad de la superficie (Kilic et al., 2006), el consumo de energía (Kminiak & Kubš, 2016), la generación de virutas (Ekevad et al., 2012) y el desgaste del filo de corte (Porankiewicz et al., 2005). Además, el comportamiento dinámico de la cuchilla durante el corte, especialmente en lo que respecta a la vibración y la resonancia, influye directamente en la precisión del mecanizado y la longevidad de la herramienta (Feng et al., 2020; Li, 2012). Dada esta evidencia, implementar estrategias de diseño y optimización robustas que tengan en cuenta el comportamiento mecánico y dinámico de las hojas de sierra no solo es beneficioso, sino que es esencial para lograr un rendimiento óptimo.

El avance de las herramientas de diseño asistido por ordenador (CAD/CAE) ha transformado realmente nuestra forma de abordar las complejidades del diseño y la ingeniería. Al permitir analizar y mejorar diversos parámetros mediante simulaciones estructurales y modales, estas herramientas han aliviado considerablemente la carga que suponen los costes de creación de prototipos físicos. En este proyecto, se concentra en el diseño minucioso y la optimización de una hoja de sierra circular de 10 pulgadas específica para el corte de madera. Es muy importante la precisión y la eficacia en este proceso, por lo que se realizó una exhaustiva revisión bibliográfica sobre los factores que influyen en el rendimiento de corte. A partir de ahí, se creó un diseño de sierra cuidadosamente optimizado en SolidWorks, seguido de detallados análisis estructurales, de fatiga y de frecuencia natural con ANSYS. El objetivo es garantizar que las soluciones no sólo cumplan los requisitos técnicos, sino que también se ajusten a las necesidades de quienes las van a utilizar.

El diseño final ha incorporado cuidadosamente ajustes en la geometría de los dientes y las ranuras de expansión, incluyendo ranuras en forma de ojo de cerradura y en forma de S, que trabajan para mejorar la estabilidad dinámica de la herramienta (Gau et al., 2014). Además, para abordar las preocupaciones sobre la resistencia al desgaste y la durabilidad, proponemos la aplicación de tratamientos superficiales como la nitruración para prolongar la vida útil de la herramienta (Morgado-González et al., 2021).

El proceso de corte de madera con sierras circulares está profundamente influido por una multitud de factores interrelacionados que determinan no sólo la eficacia de las operaciones de mecanizado, sino también el desgaste de las herramientas de corte, la calidad de la superficie acabada y el consumo total de energía. Estos factores críticos se clasifican elegantemente en tres áreas principales: las propiedades inherentes de la pieza, los parámetros de corte específicos empleados durante la operación y las características distintivas de la propia herramienta de corte. Al abarcar y optimizar cada uno de estos elementos, se puede mejorar el rendimiento del proceso de corte, garantizando la precisión, la durabilidad y la sostenibilidad en las prácticas de trabajo de la madera (Çakmak & Malkoçoğlu, 2019).

Pieza de trabajo

La influencia de los factores relacionados con la pieza de trabajo en la transformación de la madera es sustancial, especialmente en lo que respecta a la elección de la materia prima. La investigación ha puesto de relieve que las diferentes especies de madera pueden afectar significativamente a aspectos clave del procesamiento, como el desgaste de la herramienta (Porankiewicz et al., 2005), la potencia de corte (Eyma et al., 2004) y el acabado superficial resultante (Laina et al., 2017). Si se comprenden estos efectos, es posible optimizar las técnicas de procesamiento y mejorar la eficiencia general.

Las principales especies utilizadas en los sectores industrial primario y secundario se pueden clasificar en tres grupos: maderas blandas (pino *Pinus* spp., abeto *Picea* spp., cedro *Cedrus* spp.), maderas duras (roble *Quercus* spp., caoba *Swietenia* spp., teca *Tectona grandis*, nogal *Juglans* spp.) y maderas tropicales (ipe *Handroanthus* spp., palo de rosa *Dalbergia* spp., balsa *Ochroma pyramidale*). Cada especie presenta propiedades físicas y mecánicas particulares que afectan el desempeño de las herramientas de corte.

Las maderas blandas suelen ser más fáciles de trabajar con herramientas manuales o eléctricas, aunque tienden a astillarse si no se manipulan adecuadamente, y algunas presentan resinas que pueden obstruir las herramientas. Por otro lado, las maderas duras y densas requieren cuchillas bien afiladas, preferentemente de carburo, para mantener la eficiencia del corte y reducir el desgaste. Las maderas tropicales presentan una gran variabilidad; mientras que especies como el ipé son extremadamente densas y duras, otras como la balsa o el palo de rosa son más fáciles de mecanizar.

Diversas investigaciones han analizado el desgaste de herramientas de corte al trabajar con distintas especies de madera, concluyendo que no existe una correlación lineal entre el desgaste y la densidad de la madera, ni con el contenido mineral, como el silicio. En su lugar, se ha identificado que la corrosividad a alta temperatura (HTC, por sus siglas en inglés) tiene una correlación directa con el desgaste de las herramientas. A través de análisis termogravimétricos (TGA), se ha calculado un parámetro denominado RMW (Porankiewicz, 2003), que mostró una relación lineal con el desgaste. La HTC demostró ser un factor más influyente que la densidad o la contaminación por silicio, y se atribuyó principalmente a la presencia de resinas naturales en los vasos de la madera (Porankiewicz et al., 2005).

El acabado superficial es otro parámetro crítico en el mecanizado de la madera, ya que influye en la apariencia del producto final —aspecto fundamental en la fabricación de muebles y productos decorativos—, además de mejorar la adhesión de pinturas y barnices, que protegen la madera de la humedad y partículas externas. También incide en la calidad de uniones estructurales, ya que una superficie uniforme favorece el contacto entre piezas, y en el desempeño funcional, al reducir las fuerzas de fricción. Además, un mal acabado puede aumentar los costos de producción debido a retrabajos o productos rechazados.

La rugosidad superficial de la madera está influenciada tanto por la especie como por la orientación de la veta. Las diferencias en rugosidad se deben a la estructura anatómica de cada especie, considerando aspectos como la porosidad y el tamaño y forma del grano (Kilic et al., 2006). La orientación de la veta también juega un papel importante: los cortes tangenciales (perpendiculares a la veta) suelen generar mayores irregularidades debido a que el mecanizado atraviesa directamente las fibras (Vitosy t  et al., 2015).

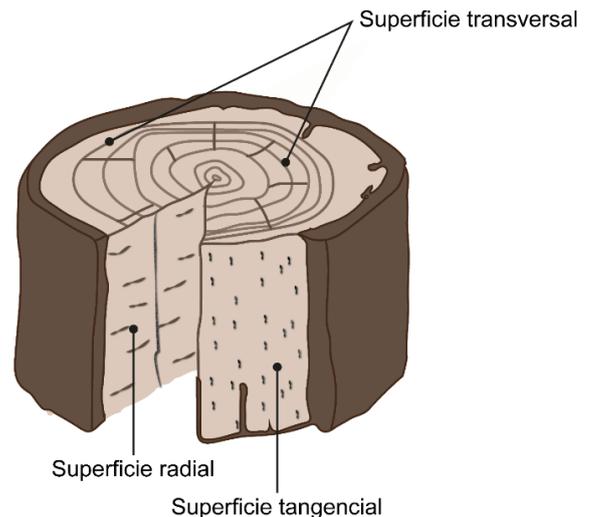


Figura 1. Principales direcciones de la madera. Fuente: Elaboración propia.

El consumo energético de las herramientas también se ve afectado por características de la pieza de trabajo, influyendo directamente en la potencia de corte requerida. La densidad de la madera tiene una relación proporcional con la potencia de corte (Kminiak & Kubš, 2016), mientras que la orientación de la veta puede reducir el consumo energético cuando se realiza el corte en dirección paralela a esta (Orłowski et al., 2012). En contraste, las características anatómicas internas no han mostrado tener relación significativa con la potencia requerida (Steppe et al., 2004).

Finalmente, la humedad de la madera es un aspecto clave durante el corte. A bajas temperaturas, la humedad puede congelarse dentro de la estructura de la madera, lo que incrementa su dureza, el desgaste de la herramienta y la demanda energética (Hernández et al., 2014). Para mitigar estos efectos en condiciones bajo cero, se recomienda utilizar herramientas más duras, hojas bien afiladas, o incorporar procesos previos que reduzcan el contenido de humedad en la madera.

Se reconoce que el acero es un recurso natural no renovable, lo que subraya la importancia de proteger del desgaste y la corrosión las herramientas de corte y los componentes de las industrias mecánica y automovilística. El proceso de producción utiliza diversos recursos naturales y genera contaminantes, entre ellos sustancias nocivas que pueden entrar en las masas de agua y gases de efecto invernadero que contribuyen al cambio climático. Sin embargo, la industria siderúrgica también tiene una importante oportunidad para impulsar el progreso en la transición energética y apoyar los esfuerzos mundiales hacia economías libres de carbono.

En particular, los esfuerzos para reducir las aproximadamente 1.8 toneladas de CO₂ producidas por cada tonelada de acero fabricado en todo el mundo pueden conducir a prácticas más sostenibles y a un impacto positivo en el medio ambiente.

En presente trabajo de investigación, se propone el diseño, optimización y manufactura de una hoja de sierra circular de 10 pulgadas de diámetro utilizando el software de diseño SolidWorks, para la empresa ARIA SAUBER que se dedica a la fabricación de muebles de madera. Para la manufactura de la hoja de sierra se ha seleccionado un acero de bajo contenido en carbono ASTM A36. Se aplicó el tratamiento termoquímico de nitruración de baño en sales para incrementar sus propiedades tribológicas superficiales como es la dureza superficial, El tratamiento, no sólo prolonga la vida útil de la hoja de sierra circular, fabricada con acero de bajo costo, sino que también contribuye a reducir el consumo de acero y las emisiones de CO₂. Además, se realizaron análisis de fatiga estructural y modos de vibración para evaluar el rendimiento y la fiabilidad del diseño propuesto.

Consideraciones teóricas sobre el diseño de la sierra circular

Condiciones de corte

Los parámetros de corte en sierras circulares influyen directamente en la eficiencia, calidad del mecanizado y vida útil de la herramienta. Entre los más importantes se encuentran la velocidad del husillo, la velocidad de corte, la velocidad de avance y la fuerza de corte (ver Figura 2).

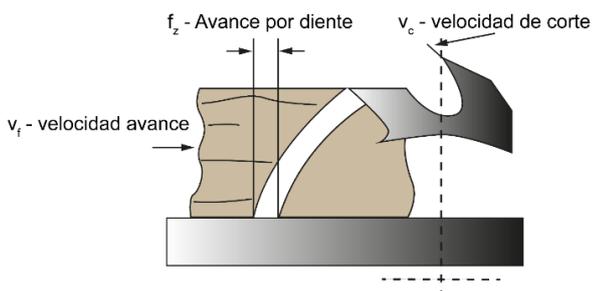


Figura 2. Parámetros de corte de una sierra circular. Fuente: Elaboración propia.

Velocidad del husillo

Comprender las revoluciones por minuto (rpm) del husillo de una máquina herramienta es vital para el éxito de su mecanizado, y es completamente normal buscar claridad sobre este tema. El valor de rpm no es sólo un número;

refleja el cuidadoso equilibrio que deben mantener su máquina y la herramienta de corte. Es importante reconocer que este límite está fijado por el diseño de la máquina y el diámetro de la herramienta, ya que forzar demasiado estas velocidades puede provocar inestabilidad, vibraciones e incluso posibles fracturas del disco. Queremos ayudarle a evitar estos problemas, asegurándonos de que obtiene los mejores resultados al tiempo que protege su equipo. Siguiendo las directrices de rpm recomendadas, puede trabajar con confianza, sabiendo que está optimizando tanto la precisión como la longevidad de sus herramientas.

Velocidad de corte

Para el caso de la velocidad tangencial en el filo del diente de la sierra (herramienta), está directamente relacionada con el desgaste, la temperatura y la calidad superficial. Se calcula como:

$$v_c = \frac{\pi \times D \times rpm}{1000 \times 60} \text{ [m/s]}$$

donde D es el diámetro de la hoja [mm] y v_c se expresa en m/s.

Velocidad de avance

Es la velocidad a la que la sierra se introduce en el material y depende del número de dientes z y del avance por diente f_z.

$$v_f = \frac{f_z \times rpm \times z}{1000} \text{ [m/min]}$$

Un avance excesivo deteriora la superficie y provoca sobrecarga en los filos. La Tabla 1 resume los valores recomendados según el tipo de madera y proveedor.

Tabla 1: Velocidad de corte recomendada para diversos materiales. Fuente: Elaboración propia.

Materiales	Velocidad de corte [m/s]	
	min	máx
Madera blanda	70	100
Madera dura	70	90
MDF	60	80
Contrachapado	60	80
Madera contrachapada dura	60	80
Conglomerado	60	120

Fuerza de corte y potencia

En cuanto a la fuerza de corte F de la sierra circular depende del ancho de la viruta b , el espesor h y la resistencia al corte del material K :

$$F = \frac{K \cdot b \cdot h \cdot v_f}{60 \cdot v_c}$$

La potencia de corte se calcula como:

$$P_c = \frac{F \cdot v_c}{1000}$$

La eficacia de una sierra circular viene determinada en gran medida por la selección adecuada de sus características de diseño. Estos aspectos afectan no sólo a la calidad del corte, sino también a la longevidad de la herramienta, el consumo de energía, los niveles de ruido, la evacuación de virutas y la estabilidad durante el funcionamiento. A continuación, se indican los parámetros geométricos y funcionales clave que deben tenerse en cuenta al diseñar sierras circulares destinadas al corte de madera.

Diámetro de la hoja de sierra

El diámetro de la hoja influye tanto en la velocidad a la que corta como en su capacidad para penetrar en los materiales. Aunque se trata de un factor importante, normalmente no puede modificarse a voluntad, ya que está limitado por las especificaciones del equipo que utiliza la herramienta. Las sierras circulares comerciales emplean diámetros normalizados que varían entre 85 y 650 mm, siendo 184 mm un tamaño común para herramientas portátiles y estaciones de trabajo ligeras.

La velocidad tangencial máxima recomendada para una hoja de sierra depende del material y su diámetro, y debe mantenerse por debajo de los límites de seguridad para evitar deformaciones, fracturas o riesgos de accidente. Fragassa et al. (2019) reportan rangos seguros de velocidad y recomiendan velocidades periféricas que varían entre 60 y 100 m/s dependiendo del diámetro y aplicación.

Ancho de corte (espesor de la hoja)

El ancho de corte, o kerf, está directamente relacionado con la rigidez de la hoja y la disipación del calor generado durante el corte. Un mayor espesor proporciona mayor rigidez y reduce las vibraciones, pero también incrementa la fricción, el consumo energético y la pérdida de material.

La elección de este parámetro requiere un equilibrio entre rigidez estructural y eficiencia de corte.

Las diferencias térmicas durante el proceso (más calor en la periferia y menor en el centro) generan tensiones que pueden inducir vibraciones indeseadas. Svoreň et al. (2017) señalaron que el diseño óptimo del ancho debe considerar tanto la resistencia térmica como la rigidez estructural de la sierra. En la Tabla 2 se presentan los valores típicos recomendados por fabricantes, basados en el diámetro de la hoja (Fragassa et al., 2019).

Tabla 2. Ancho de la hoja en función del diámetro (adaptado de Fragassa et al., 2019)

Diámetro (mm)	Ancho típico (mm)
100 – 199	1.8 – 2.2
200 – 349	2.2 – 2.8
350 – 449	3.2
450 – 599	3.5
600 – 750	4.0

Número de dientes

El número de dientes de una herramienta de corte desempeña un papel fundamental en el proceso de mecanizado, ya que influye en factores como la calidad del acabado, la velocidad de corte, la generación de virutas, el desgaste de la herramienta y los niveles de ruido. Entendemos que conseguir un corte limpio y preciso es a menudo esencial, especialmente en proyectos que implican madera fina y tableros laminados. Optar por un mayor número de dientes puede mejorar enormemente la experiencia de corte y, en última instancia, obtener mejores resultados en su trabajo.

Por otro lado, un número reducido permite una mayor remoción de material, ideal para cortes rápidos y maderas duras. Kopecký et al. (2022) analizaron el efecto del número de dientes sobre las fuerzas de corte utilizando dinamometría tridimensional en maderas blandas (abeto) y duras (roble europeo). Sus resultados indicaron que el aumento en el número de dientes disminuye la fuerza por diente, pero no reduce significativamente la fuerza total de corte. Por lo tanto, se sugiere un compromiso en el rango de 40 a 60 dientes para lograr un equilibrio entre velocidad, calidad de corte y vida útil de la herramienta.

Además, la investigación realizada por Nasir & Cool (2020) reveló que un mayor número de dientes en las hojas de sierra puede aumentar significativamente la generación de calor durante las operaciones de corte. Este calor intensificado puede aumentar el riesgo de quemaduras en el material y provocar una molestia

acumulación de resina, lo que puede comprometer la calidad del producto acabado. Del mismo modo, Kvietskova et al. (2015) descubrieron que un mayor número de dientes puede contribuir a una notable reducción del ruido producido por la sierra, creando un entorno de trabajo más silencioso. Sin embargo, es importante señalar que este efecto de reducción del ruido disminuye a medida que la herramienta experimenta un desgaste progresivo, lo que subraya la importancia de un mantenimiento regular para un rendimiento óptimo.

Tamaño de la garganta

La garganta desempeña un papel crucial en la gestión del espacio entre los dientes, alojando y evacuando eficazmente las virutas producidas durante las operaciones de corte. Su diseño debe adaptarse al volumen específico y al tipo de virutas generadas. Por ejemplo, las astillas más largas suelen producirse al cortar madera verde, mientras que la madera seca tiende a generar astillas más cortas y quebradizas (Ekevad et al., 2012). Para garantizar un rendimiento óptimo, es importante mantener el volumen de astillas dentro de la capacidad de la garganta. Cuando se supera esta capacidad, puede producirse compresión, aumento de la fricción, temperaturas elevadas y pérdida potencial de precisión, lo que en última instancia provoca un desgaste acelerado del equipo (Naylor, 2014). Si tenemos en cuenta estas consideraciones de diseño, podemos mejorar la eficiencia y prolongar la vida útil de la herramienta. Una garganta más grande se recomienda para cortes longitudinales y maderas blandas, mientras que una garganta más pequeña es suficiente para cortes precisos o transversales.

Ángulo de ataque (ángulo de gancho)

El ángulo de ataque es un parámetro importante que describe la inclinación de la cara de corte del diente en relación con una línea radial de la hoja. Puede clasificarse como positivo (orientado hacia adelante), cero o negativo (orientado hacia atrás). Este ángulo influye significativamente en la agresividad del corte, la fuerza necesaria para cortar y la calidad general del acabado. Ajustando cuidadosamente el ángulo de ataque, se puede optimizar el rendimiento de corte adaptado a materiales específicos y a los resultados deseados.

Çakmak & Malkoçoğlu (2019) reportaron que ángulos positivos altos son adecuados para maderas blandas, ya que permiten cortes rápidos y menor resistencia. En cambio, para maderas duras o tableros densos se prefieren ángulos bajos o negativos, ya que mejoran la estabilidad del corte y reducen el desgaste. Yang et al. (2019) encontraron que ángulos mayores también disminuyen el calor generado, lo que prolonga la vida útil

de la herramienta, aunque incrementan el riesgo de fractura del diente a altas velocidades.

Fragassa et al. (2019) recomiendan los siguientes valores prácticos:

- 15°–25°: madera blanda y dura.
- 5°–15°: MDF, aglomerados.
- 0°–5°: contrachapados y tableros plastificados.
- < 0°: melaminas o materiales compuestos con aluminio.

Ángulo de despeje superior

Este ángulo (también llamado ángulo de alivio) permite que el diente se retire del material sin contacto innecesario con la superficie recién cortada. Cuanto más duro sea el material, menor debe ser el ángulo. Este parámetro también depende del espesor de la pieza: para piezas gruesas (>80 mm) debe aumentarse el ángulo, y para piezas delgadas (<40 mm) debe reducirse ligeramente.

Ranuras o "slots"

Las ranuras son cortes radiales ubicados en el cuerpo de la sierra que tienen como objetivo reducir vibraciones, disipar calor y modificar la frecuencia natural de la herramienta. Estas pueden tener diversas formas y longitudes. Operar la sierra a una velocidad angular cercana a su frecuencia natural puede inducir resonancia, causando inestabilidad, ruido excesivo y posibles daños (S. Li et al., 2016). Por otro lado, Feng et al. (2020) demostraron que aumentar la longitud de las ranuras eleva la frecuencia natural, pero también incrementa la deformación máxima, lo que puede afectar la precisión del corte. Y. Li (2012) indicó que el ancho de las ranuras tiene poca influencia dinámica, por lo que se recomienda mantenerlo reducido para no comprometer la rigidez de la hoja. Yang et al. (2019) y Salovsky & Rebezniuk (2022) observaron que las mayores concentraciones de esfuerzo se ubican detrás de los dientes y bajo su raíz. Las ranuras ayudan a redistribuir estas tensiones, previniendo el agrietamiento por fatiga.

Geometría de los dientes

La forma de los dientes influye en el tipo de corte, la calidad superficial y el tipo de madera a trabajar:

- **Recto (FZ):** ideal para cortes longitudinales y alta velocidad.
- **Biselado (WZ):** preferido en cortes transversales y materiales laminados.
- **Trapezoidal:** usado en cortes precisos y dimensionado de paneles.

- **Cónico:** útil en sierras de incisión para cortes limpios sin astillado.

Para cortes a lo largo de la veta se recomienda una garganta grande y menor número de dientes, mientras que para cortes transversales se emplean más dientes y gargantas pequeñas (Çakmak & Malkoçoğlu, 2019).

Simulación y optimización

La simulación numérica y la optimización estructural han adquirido un papel fundamental en el diseño avanzado de herramientas de corte, particularmente en sierras circulares sometidas a condiciones de operación exigentes. A través del método de elementos finitos (FEM), es posible predecir con alta precisión el comportamiento dinámico de una hoja de sierra, considerando factores como la geometría, los materiales y las condiciones de frontera. Sin embargo, para que estas simulaciones reflejen con fidelidad el comportamiento real del sistema, es necesario actualizar el modelo numérico mediante datos experimentales, en un proceso conocido como model updating. Esta etapa permite reducir significativamente las discrepancias entre los resultados experimentales y numéricos, mejorando la confiabilidad de las simulaciones subsecuentes.

Tras validar el modelo, se da paso al proceso de optimización estructural. Este proceso permite refinar las variables de diseño, incluidos parámetros geométricos clave como el número, la posición y las dimensiones de las ranuras internas o radiales. El objetivo principal de esta optimización es mejorar la separación entre las frecuencias de vibración naturales de la sierra y su velocidad de funcionamiento. Al conseguirlo, se evitan eficazmente los fenómenos de resonancia, reduciendo significativamente tanto los niveles de vibración como de ruido. Este enfoque constructivo no sólo eleva el rendimiento dinámico de la sierra, sino que también prolonga su vida útil y garantiza la seguridad de las operaciones.

En estudios recientes, se ha demostrado que la combinación de simulación, actualización de modelos y optimización puede generar mejoras sustanciales en el diseño. Por ejemplo, tras aplicar estas técnicas a una sierra circular con ranuras anulares internas, se logró reducir la diferencia entre las frecuencias naturales simuladas y medidas de más del 37% a menos del 5%. Además, las configuraciones optimizadas permitieron alejar las frecuencias naturales del valor operativo de 500 Hz, minimizando así el riesgo de resonancia. Los análisis de esfuerzo realizados sobre los modelos optimizados confirmaron que las tensiones inducidas se mantenían

por debajo del límite elástico del acero 65Mn, lo cual garantiza la integridad estructural del componente (Gau, Chen, & Hwang, 2014).

En conjunto, estas herramientas permiten abordar el diseño de sierras circulares desde un enfoque multidisciplinario, que combina mecánica computacional, caracterización experimental y técnicas de optimización. El resultado es un diseño robusto, eficiente y adaptado a los desafíos de operación en contextos industriales de alta exigencia.

Simulación del diente

Para evaluar la respuesta mecánica de un diente de sierra circular durante el proceso de corte, se realizó una simulación por elementos finitos utilizando el software ANSYS. El objetivo de esta simulación era analizar la interacción entre el diente de sierra y el material cortado, centrándose en aspectos como la distribución de tensiones, la deformación y los posibles puntos de fallo. Mediante la aplicación de condiciones de contorno apropiadas y la definición precisa de las propiedades del material dentro del modelo, se pueden obtener valiosos conocimientos sobre el rendimiento y la durabilidad del diente de sierra en diversos escenarios operativos. Esta metodología contribuye a la optimización del diseño, mejorando tanto la eficiencia como la longevidad en aplicaciones prácticas. Este análisis se enfocó tanto en el comportamiento estructural bajo carga estática como en la resistencia del componente ante condiciones de carga cíclica, considerando el uso de acero estructural como material base.

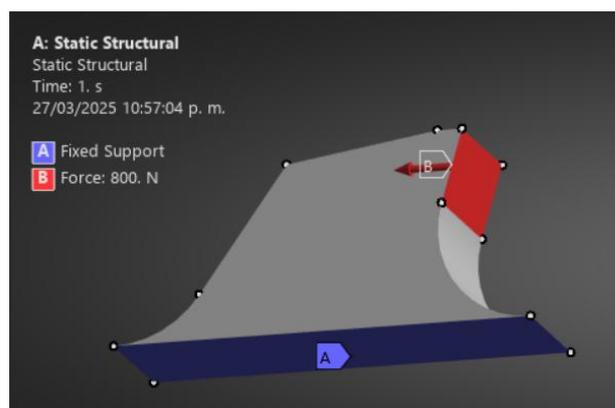


Figura 3. Parámetros del diente de una sierra circular. Fuente: Elaboración propia.

Para el estudio, se modeló un diente representativo de la geometría real empleada en la herramienta. La base del diente fue fijada completamente, representando su unión

con el cuerpo de la hoja de sierra, mientras que sobre la cara de ataque se aplicó una fuerza de 800 N orientada horizontalmente hacia el interior del modelo (ver Figura 3). Esta condición simula el esfuerzo ejercido por el contacto entre el diente y la madera durante el corte. La malla fue generada con elementos tetraédricos, aplicando un refinamiento localizado en las zonas de mayor curvatura y alrededor del área de aplicación de la carga, para capturar de manera precisa las concentraciones de esfuerzos.

En primera instancia, se realizó un análisis estructural estático que permitió obtener la distribución del esfuerzo equivalente de von Mises. Los resultados mostraron que el valor máximo de esfuerzo fue de 182.94 MPa, localizado en la zona posterior del diente, justo en el área de transición entre la cara de ataque y la raíz del diente. Esta región coincide con el punto de aplicación de la carga y constituye una zona crítica debido a su geometría aguda y a la proximidad con superficies de cambio de sección. En contraste, los valores mínimos se ubicaron en la base del diente, alcanzando apenas 0.00076 MPa, lo cual es coherente con la condición de restricción impuesta (ver Figura 4).

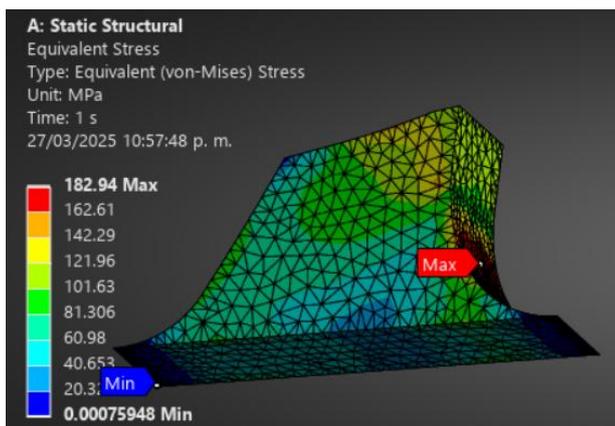


Figura 4. Distribución del esfuerzo equivalente de von Mises en el modelo. El esfuerzo máximo es de 182.94 MPa y el mínimo es de 0.00076 MPa. Fuente: Elaboración propia.

Tras los resultados del análisis estático, se llevó a cabo una investigación posterior para evaluar la resistencia a la fatiga del componente utilizando el módulo de análisis de fatiga del mismo software. En este análisis se emplearon condiciones de carga totalmente alternas ($R = -1$), que sirven como enfoque conservador para simular las condiciones de servicio del mundo real caracterizadas por cargas repetitivas. Se adoptó el criterio de vida infinita y se consideró el límite de fatiga del acero estructural, típicamente en el orden de 250 MPa para ciclos elevados. Los resultados del análisis de fatiga arrojaron un factor de seguridad mínimo de 0.9424 (ver Figura 5), localizado

nuevamente en la región donde se presentó el mayor esfuerzo estático.

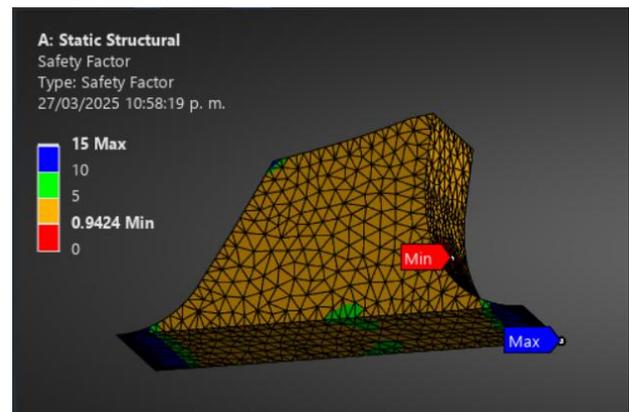


Figura 5. Análisis de fatiga arroja un factor de seguridad de 0.9424. Fuente: Elaboración propia.

Este valor sugiere que, si el componente es sometido a cargas repetidas en esa zona, existe una probabilidad significativa de iniciación de grietas por fatiga. En cambio, en otras regiones de la geometría los factores de seguridad fueron considerablemente mayores (superiores a 10), indicando que la mayor parte del componente trabaja en un régimen completamente seguro desde el punto de vista de fatiga.

La simulación permitió identificar con claridad la zona más vulnerable del diseño y demuestra la importancia de realizar un análisis detallado de los dientes de la sierra, especialmente si se desea garantizar su durabilidad bajo operación continua. En base a estos resultados, se recomienda realizar ajustes en la geometría del diente, tales como aumentar el radio de curvatura en la raíz o modificar ligeramente el ángulo de ataque, con el fin de redistribuir las tensiones y mejorar el desempeño a fatiga. Asimismo, se sugiere evaluar la aplicación de tratamientos térmicos o recubrimientos superficiales que aumenten la resistencia del material al desgaste y a la propagación de grietas.

Optimización del diseño del diente

Se ejecutó un proceso de optimización mediante simulaciones de elementos finitos para mejorar significativamente el rendimiento estructural de los dientes de sierra circulares. Los objetivos clave eran maximizar eficazmente el factor de seguridad a la fatiga y minimizar la tensión equivalente de von Mises en condiciones de carga que simulan con precisión el proceso de corte. Para ello, se definieron cinco parámetros geométricos del diente como variables de entrada:

- P1 – Espesor de soporte (mm)
- P2 – Ángulo de ataque (°)
- P3 – Ángulo de alivio (°)
- P4 – Ángulo de garganta (°)
- P5 – Radio de garganta (mm)

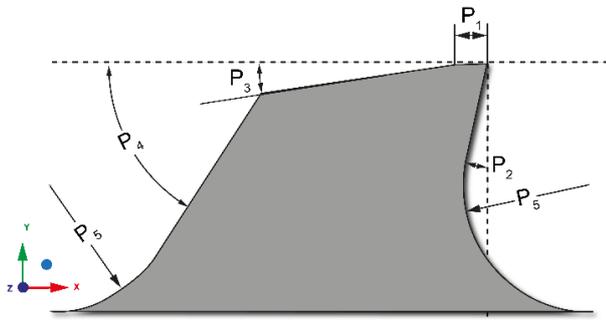


Figura 6. Parámetros geométricos principales del diente. Fuente: Elaboración propia.

Estos parámetros se variaron dentro de rangos definidos a partir de recomendaciones técnicas y limitaciones de manufactura (ver Figura 6). Se utilizó un enfoque sistemático para explorar combinaciones de estos parámetros y se generaron más de 250 configuraciones geométricas distintas. Para cada configuración, se construyó el modelo tridimensional del diente y se aplicaron las condiciones de frontera previamente definidas: soporte fijo en la base y una carga de 800 N aplicada sobre la cara activa del diente.

Los análisis se realizaron en el entorno ANSYS Workbench, aplicando inicialmente el análisis estático estructural para determinar la tensión máxima equivalente (MPa) de cada diseño. A continuación, se utilizó el módulo de análisis de fatiga para evaluar el factor de seguridad mínimo bajo cargas totalmente alternantes ($R = -1$), con la hipótesis de vida infinita. El material seleccionado fue el acero estructural, cuyas propiedades mecánicas sirvieron de base para los criterios relativos a la resistencia a la fatiga.

Con base en los resultados obtenidos del análisis por elementos finitos y la evaluación del desempeño estructural del diente, se seleccionaron tres puntos candidatos que mostraron los mejores valores de factor de seguridad mínimo y menores esfuerzos equivalentes en la región de diseño. Estos puntos representan configuraciones cercanas al óptimo dentro del espacio multidimensional definido por los parámetros geométricos del diente.

La Tabla 3 presenta los valores de los parámetros para cada punto candidato, junto con su correspondiente factor

de seguridad y esfuerzo de von Mises. Asimismo, se muestra la variación porcentual respecto al punto de referencia (considerado el óptimo alcanzado durante la exploración).

Tabla 3. Comparación de parámetros geométricos y resultados del análisis estructural para dos candidatos de diseño, respecto al diseño de referencia. Fuente: Elaboración propia.

Parámetro	Referencia	Candidato 1	Candidato 2
P1 – Soporte (mm)	1.70	1.80	1.80
P2 – Ángulo de ataque (°)	282	280	280
P3 – Ángulo de alivio (°)	174	174	173
P4 – Ángulo de garganta (°)	115	115	115
P5 – Radio de garganta (mm)	2.7155	2.7156	2.7157
Factor de seguridad mínimo	1.0681	1.0755 (+0.69%)	1.0724 (+0.40%)
Esfuerzo equivalente máx. (MPa)	161.41	160.30 (-0.69%)	160.76 (-0.40%)

Este proceso de optimización facilitó el establecimiento de directrices bien definidas para el diseño geométrico del diente, mejorando así la resistencia y durabilidad del componente bajo cargas repetitivas, lo cual es vital para el rendimiento de las herramientas de corte rotativas.

Ranuras tipo ojo de cerradura

Se realizó un análisis de elementos finitos (AEF) para estudiar las respuestas térmicas, estructurales y dinámicas de una hoja de sierra circular destinada al corte de madera. Esta simulación permitió evaluar los efectos interactivos de las condiciones térmicas y mecánicas que experimenta la herramienta durante su funcionamiento, junto con sus propiedades modales, para mejorar su rendimiento.

Se ha llevado a cabo una simulación térmica en estado estacionario para comprender mejor el comportamiento de la hoja de sierra circular durante el corte de madera. Al aplicar una carga térmica a los bordes de corte de los dientes, esta simulación modela eficazmente la fricción generada durante el contacto con el material, lo que mejora nuestra comprensión del rendimiento de la hoja y las posibles áreas de mejora. Los resultados, mostrados en la Figura 7, indican que la temperatura máxima se concentra en la punta de los dientes, alcanzando valores cercanos a los 800 °C. Esta zona de mayor temperatura coincide con las áreas de máxima interacción, observándose una disipación progresiva del calor hacia el centro del disco. Las ranuras tipo ojo de cerradura,

incorporadas en el diseño, favorecen la disipación térmica al actuar como canales de alivio térmico.

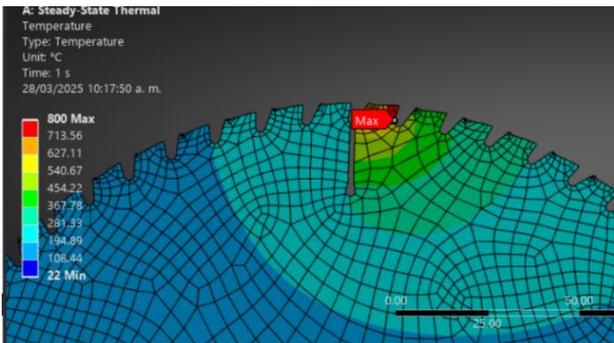


Figura 7. Resultado del análisis térmico en estado estacionario. La temperatura máxima se localiza en la punta del diente, alcanzando los 800°C. Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente, se llevó a cabo un análisis estructural estático considerando las condiciones térmicas anteriores y las solicitaciones mecánicas propias de la operación. Como se observa en la Figura 8, la deformación total máxima es de 0.31218 mm y se localiza nuevamente en la punta de uno de los dientes, en proximidad a una ranura radial. Esta deformación, aunque moderada, puede afectar la precisión del corte si no se controla térmicamente, provocando desviaciones y mayor desgaste en el filo.

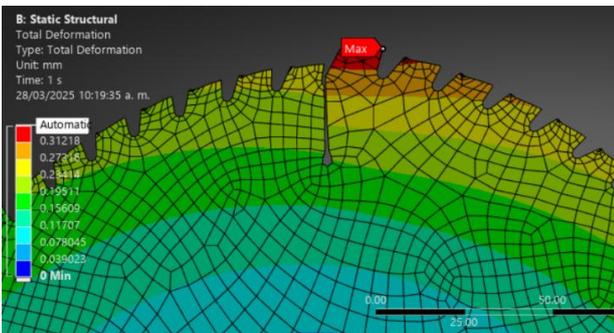


Figura 8. Resultado del análisis estructural estático. La máxima deformación de 0.31218 mm ocurre en la zona más solicitada térmica y mecánicamente. Fuente: Elaboración propia.

El análisis modal permitió identificar las frecuencias naturales y los modos de vibración de la hoja. En particular, la Figura 9 muestra el segundo modo de vibración a una frecuencia de 185.32 Hz, con una deformación significativa en el borde exterior del disco. Esta frecuencia es crítica, ya que su cercanía con la frecuencia operativa puede inducir fenómenos de

resonancia, comprometiendo la integridad estructural de la herramienta. Las primeras seis frecuencias naturales, mostradas en la tabla incluida, varían entre 184.93 Hz y 539.46 Hz, lo cual proporciona un margen de seguridad que debe ser considerado en el diseño final.

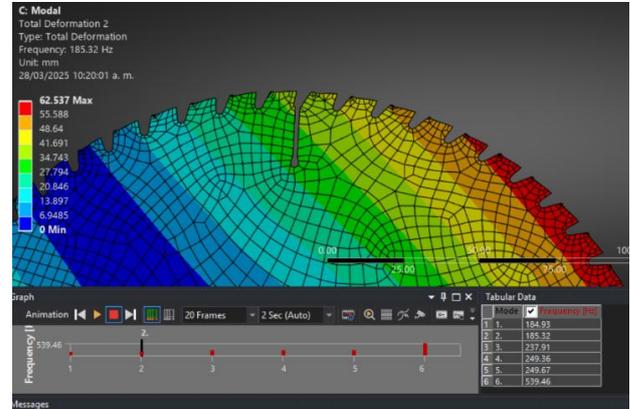


Figura 9. Segundo modo de vibración (185.32 Hz) de la hoja de sierra circular. Se observa deformación importante en el borde, influenciado por la geometría de las ranuras. Fuente: Elaboración propia.

A partir de los resultados anteriores, se desarrolló un proceso de optimización paramétrica considerando las siguientes variables geométricas (ver Figura 10):

- P6 – Ancho de ranura (mm)
- P7 – Diámetro (mm)
- P8 – Longitud (mm)
- P9 – Número de ranuras

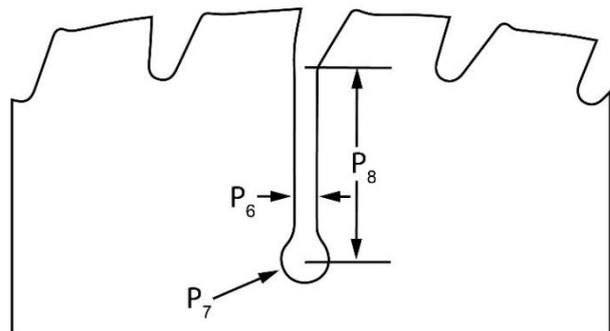


Figura 10. Parámetros geométricos principales de la ranura tipo ojo de cerradura. Fuente: Elaboración propia.

Los resultados permitieron identificar configuraciones óptimas que maximizan la estabilidad dinámica y minimizan la deformación estructural, considerando como prioritarios los valores más bajos de deformación y los más altos de frecuencia natural.

La Tabla 4 se resumen los tres mejores candidatos obtenidos en el estudio de optimización. El punto 1 se destaca por presentar la menor deformación (0.3426 mm), siendo ideal para aplicaciones donde la precisión del corte es crítica. Por otro lado, el punto 3 ofrece las frecuencias naturales más elevadas (185.12 y 185.32 Hz), lo que lo convierte en la mejor opción para minimizar el riesgo de resonancia. El punto 2 representa una alternativa balanceada entre ambos criterios. Esta evaluación revela un compromiso inherente entre rigidez estructural y estabilidad dinámica, por lo que la elección del diseño final dependerá del enfoque funcional del sistema.

Tabla 4. Comparación entre los tres mejores puntos candidatos de la optimización. El punto 1 prioriza rigidez, el punto 3 estabilidad dinámica y el punto 2 un equilibrio entre ambos. Fuente: Elaboración propia.

Parámetro	Referencia	Candidato 1	Candidato 2
P6 – Ancho (mm)	2.25	2.25	2.25
P7 – Diámetro	4.25	4.5	4.5
P8 – Longitud (mm)	23	19	18
P9 – Número de ranuras	3	3	3

Ranuras en forma de S

Con el objetivo de mejorar el desempeño dinámico de la hoja de sierra circular, se incorporaron ranuras en forma de “S” distribuidas simétricamente sobre el cuerpo del disco. Estas ranuras fueron diseñadas para incrementar la flexibilidad localizada y así reducir la concentración de tensiones, además de contribuir a la estabilidad dinámica del sistema durante el corte.

Se realizó una simulación estructural en ANSYS para comprender la deformación total de la hoja de sierra circular bajo carga estática. Aplicando una carga que simula las fuerzas de corte encontradas durante el mecanizado, podemos obtener información valiosa sobre el comportamiento de la hoja. El centro de la hoja se fijó en este estudio, representando su montaje real en el eje del husillo. Este análisis pretende responder a las preocupaciones sobre el rendimiento y la durabilidad, ayudando en última instancia a los usuarios a obtener mejores resultados y prolongar la vida útil de sus herramientas.

La Figura 11 muestra la distribución de deformaciones. La deformación máxima fue de 0.022 mm, localizada en una de las ranuras externas, mientras que la mínima se

encontró en el centro del disco. El gradiente de colores refleja una distribución esperada, con mayor deformación hacia la periferia.

Este resultado indica que el diseño presenta una buena rigidez estructural. Las ranuras ayudan a distribuir las tensiones sin comprometer la integridad del disco.

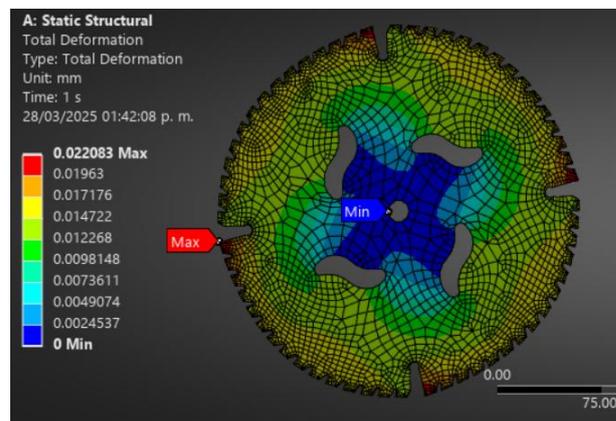


Figura 11. Deformación total del modelo simulado. El valor máximo de deformación es de 0.022 mm, localizado en una de las ranuras exteriores. Fuente: Elaboración propia.

Se realizó un análisis modal utilizando el software ANSYS, con condiciones de contorno fijas aplicadas en la zona central de montaje. La Figura 12 muestra claramente el segundo modo de vibración, asociado a una frecuencia natural de 174.11 Hz. Los resultados revelan que las deformaciones máximas se concentran en las regiones interdentadas cercanas al borde exterior, especialmente entre las ranuras. Este análisis pone de relieve de forma decisiva las características vibratorias de la estructura, proporcionando información crítica para optimizar tanto el rendimiento como la durabilidad. Este modo fue de particular interés por su proximidad a posibles frecuencias de excitación inducidas por el motor de rotación.

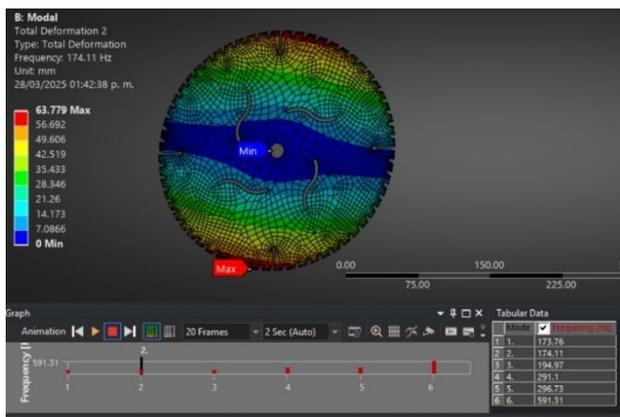


Figura 12. Primer modo de vibración del modelo con una frecuencia natural de 174.11 Hz. Se muestra la deformación modal normalizada para visualizar el comportamiento dinámico. Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente, se llevó a cabo un proceso de optimización paramétrica, donde se variaron los parámetros geométricos de las ranuras en forma de S (ver Figura 12):

- P10 – Ancho de ranura (mm)
- P11 – Radio 1 (mm)
- P12 – Radio 2 (mm)
- P13 – Angulo (°)

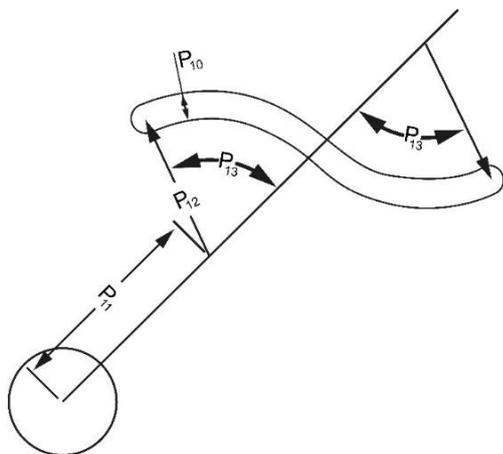


Figura 12. Parámetros geométricos de la ranura tipo S. Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 5 se presentan los resultados de tres puntos candidatos. El diseño óptimo seleccionado (Punto Candidato 1) obtuvo una frecuencia en el segundo modo de 182.6 Hz, con mejoras también en el primero (182.14 Hz) y tercer modo (208.62 Hz), en comparación con otros diseños evaluados.

Este enfoque permitió obtener una configuración geométrica más robusta frente a vibraciones, sin comprometer la rigidez estructural general del disco.

Tabla 5. Comparación de parámetros geométricos y resultados del análisis estructural para dos candidatos de diseño, respecto al diseño de referencia. Fuente: Elaboración propia.

Parámetro / Criterio	Candidato 1	Candidato 2	Candidato 3
P10 - Ancho (mm)	4.205	4.341	3.665
P11 – Radio 1 (mm)	45.635	49.422	49.504
P12 – Radio 2 (mm)	30.602	30.602	24.430
P13 – Ángulo de ranura (°)	51.702	51.872	52.602
Frecuencia 1 (Hz)	182.14	181.12	180.51
Variación respecto al ref. (%)	0.00%	-0.56%	-0.90%
Frecuencia 2 (Hz)	182.60	182.04	180.92
Variación respecto al ref. (%)	0.00%	-0.30%	-0.92%
Frecuencia 3 (Hz)	208.62	208.82	208.52
Variación respecto al ref. (%)	0.00%	+0.10%	-0.05%

Nitruración de baño en sales

Una vez optimizada el disco de sierra, se le aplicó el tratamiento termoquímico de nitruración en baño en sales, comenzando con el tratamiento térmico de la sierra a una temperatura de aproximadamente 350°C. A este tratamiento inicial le sigue el establecimiento de una zona de difusión protectora en un baño de nitruración mantenido a 580°C, compuesto por sal fundida. Durante este proceso, se permite que tanto el nitrógeno como el carbono penetren en la superficie de la sierra. Para obtener las propiedades deseadas del material, es esencial regular cuidadosamente la composición química de la sal fundida. La duración del tratamiento fue de dos horas. Una vez concluido el periodo de tratamiento, el templado de los componentes se realizó con agua. Finalmente, la sierra se sumerge en un baño de oxidación conocido como Tenifer QPQ, después de aplicar la nitruración de baño en sales. El proceso Tenifer, permitió que la sierra adquiera una resistencia a la corrosión

extremadamente alta, que supera a los recubrimientos galvanizados.

Conclusión

En este trabajo se propuso un diseño optimizado de una hoja de sierra circular para corte de madera, basado en un enfoque multifísico de simulación y análisis de desempeño estructural, térmico y dinámico. A partir del modelado por elementos finitos (FEA), se evaluaron las condiciones reales de operación de la herramienta, permitiendo identificar las zonas críticas de acumulación térmica y deformación mecánica.

Se implementaron tres estrategias geométricas clave en el diseño:

- La optimización del perfil del diente,
- La incorporación de ranuras radiales tipo ojo de cerradura, y
- La introducción de ranuras tipo "S" en el cuerpo del disco.

Estas características fueron ajustadas mediante un estudio paramétrico que consideró más de 170 combinaciones geométricas, con el objetivo de minimizar la deformación estructural y maximizar las frecuencias naturales, reduciendo así el riesgo de resonancia y mejorando la estabilidad del sistema.

Los resultados permitieron identificar configuraciones geométricas óptimas que equilibran la rigidez, la disipación térmica y el comportamiento vibracional de la hoja de sierra. En particular, se seleccionaron tres puntos candidatos como diseños de referencia, destacando uno por su mínima deformación y otro por sus elevadas frecuencias naturales.

Se propone un conjunto de parámetros de diseño para la fabricación del disco, incluyendo el número y tipo de ranuras, el perfil del diente y dimensiones clave del cuerpo de corte, lo cual constituye una base sólida para el desarrollo de herramientas de corte de alto desempeño orientadas a aplicaciones industriales exigentes (ver Tabla 6).

Finalmente, se implemento el tratamiento termoquímico de nitruración de baño en sales, para prolonga la vida útil de la hoja de sierra circular para reducir el consumo de acero y las emisiones de CO₂.

Tabla 6. Parámetros geométricos de la sierra circular de 10 in/ 60 t optimizados. Fuente: Elaboración propia.

Parámetro	Dimensiones
Diente	
P1 – Soporte (mm)	1.80
P2 – Ángulo de ataque (°)	280
P3 – Ángulo de alivio (°)	173
P4 – Ángulo de garganta (°)	115
P5 – Radio de garganta (mm)	2.7157
Ranura tipo ojo de sierra	
P4 – Ancho (mm)	2.25
P5 – Diámetro	4.5
P6 – Longitud (mm)	18
Ranura con forma de S	
P7 - Ancho (mm)	4.341
P8 – Radio 1 (mm)	49.422
P9 – Radio 2 (mm)	30.602
P10 - Ángulo de ranura (°)	51.872

Referencias

- Çakmak, A., & Malkoçoğlu, A. (2019). Importance of saw blade geometry and technic conditions in machining of wood materials in circular saw machines. *Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 8(2), 114–124. <https://doi.org/10.17100/nevbiltek.441857>
- Ekevad, M., Marklund, B., & Gren, P. (2012). Wood-chip formation in circular saw blades studied by high-speed photography. *Wood Material Science & Engineering*, 7(3), 115–119. <https://doi.org/10.1080/17480272.2011.629057>
- Eyma, F., Méausoone, P.-J., & Martin, P. (2004). Study of the properties of thirteen tropical wood species to improve the prediction of cutting forces in mode B. *Annals of forest science*, 61(1), 55–64. <https://hal.science/hal-00883828/document>
- Feng, W., Zhang, J., Zhou, H., & Di, H. (2020). Investigation on the vibration characteristics of circular saw blade with different slots. *1633(1)*, 012006. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1633/1/012006>
- Fragassa, , C., Lucisano, G., Marinkovic, D., & Campana, G. (2019). A practical guideline in the design and use of woodworking tools. *FME TRANSACTIONS*, 47(3), 487–495. <https://scindeks.ceon.rs/Article.aspx?artid=1451-20921903487F>
- Gau, W.-H., Chen, K.-N., & Hwang, Y.-L. (2014). Model Updating and Structural Optimization of Circular Saw Blades with Internal Slots. *Advances in Mechanical Engineering*, 6, 546496. <https://doi.org/10.1155/2014/546496>
- Hernández, R. E., Passarini, L., & Koubaa, A. (2014). Effects of temperature and moisture content on selected wood mechanical properties involved in the chipping process. *Wood Science and Technology*, 48, 1281–1301. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00226-014-0673-9>
- Kilic, M., Hiziroglu, S., & Burdurlu, E. (2006). Effect of machining on surface roughness of wood. *Building and environment*, 41(8), 1074–1078. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.05.008>

- Kopecký, Z., Novák, V., Hlášková, L., & Rak, J. (2022). Impact of Circular Saw Blade Design on Forces During Cross-Cutting of Wood. *Drvna industrija*, 73(4), 475–483. <https://doi.org/10.5552/drvind.2022.2142>
- Kováč, J., Kuvik, T., Melicherčík, J., & Krilek, J. (2022). The influence of the coating on the saw blade on the energy intensity of cross-cutting of wood. *Coatings*, 12(12), 1803. <https://doi.org/10.3390/coatings12121803>
- Kminiak, R., & Kubš, J. (2016). Cutting power during cross-cutting of selected wood species with a circular saw. *BioResources*, 11(4), 10528–10539. <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/cutting-power-during-cross-cutting-of-selected-wood-species-with-a-circular-saw/>
- Laina, R., Sanz-Lobera, A., Villasante, A., López-Espí, P., Martínez-Rojas, J. A., Alpuente, J., Sánchez-Montero, R., & Vignote, S. (2017). Effect of the anatomical structure, wood properties and machining conditions on surface roughness of wood. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 19(2), 203–212. <https://revistas.ubiobio.cl/index.php/MCT/article/view/2758>
- Li, S., Wang, C., Zheng, L., Wang, Y., Xu, X., & Ding, F. (2016). Dynamic stability of cemented carbide circular saw blades for woodcutting. *Journal of Materials Processing Technology*, 238, 108–123. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.07.018>
- Li, Y. (2012). Influence of radial slots on the vibration characteristics of circular saw blade. *Applied Mechanics and Materials*, 226, 232–236. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.226-228.232>
- Morgado-González, I., Ortiz-Domínguez, M., Gómez-Vargas, O., Cardoso-Legorreta, E., García-Serrano, J., Bárcenas-Castañeda, M., Castellanos-Escamilla, V., Moreno-González, G., & Solís-Romero, J. (2021). Effect of thermochemical treatments on the surface hardening of a circular saw blade: A microstructure comparison of nitride layers, boride layers and TiN coating formed on ASTM A1011 steel. *Microscopy and Microanalysis*, 27(S1), 2372–2374. <https://doi.org/10.1017/S1431927621008527>
- Orłowski, K., Ochrymiuk, T., & Chuchała, D. (2012). On some approaches to cutting power estimation while wood sawing. *Annals of WULS, Forestry and Wood Technology*, 129–134. <https://wulsannals.com/article/72419/en>
- Porankiewicz, B. (2003). A method to evaluate the chemical properties of particleboard to anticipate and minimize cutting tool wear. *Wood Science and Technology*, 37, 47–58. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00226-003-0166-8>
- Porankiewicz, B., Sandak, J., & Tanaka, C. (2005). Factors influencing steel tool wear when milling wood. *Wood Science and Technology*, 39, 225–234. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00226-004-0282-0>
- Salovsky, S., & Rebezniuk, I. (2022). The study of the influence of compensation slot parameters on the noise level of circular wood-cutting saws. https://proligno.ro/ro/articles/2022/2/SALOVSKY_Final.pdf
- Steppe, K., Cnudde, V., Girard, C., Lemeur, R., Cnudde, J.-P., & Jacobs, P. (2004). Use of X-ray computed microtomography for non-invasive determination of wood anatomical characteristics. *Journal of structural biology*, 148(1), 11–21. <https://doi.org/10.1016/j.jsb.2004.05.001>
- Svoren, J., Javorek, E., Krajčovičová, M., Klobušiaková, K., Kubovský, I., & Kminiak, R. (2017). The effect of the circular saw blade body structure on the concentric distribution of the temperature along the radius during the wood cutting process. *Wood Res*, 62(3), 427–436. <https://www.woodresearch.sk/wr/201703/08.pdf>
- Vitosytė, J., Ukvalbergienė, K., & Keturakis, G. (2015). Wood surface roughness: An impact of wood species, grain direction and grit size. *Materials science*, 21(2), 255–259. <https://doi.org/10.5755/j01.ms.21.2.5882>
- Yang, X., Deng, F., Deng, W., Xi, P., Tan, C., & Lu, X. (2019). Optimization of designing on cutter parameters of PCD saw blades by simulation analysis. *Journal of Superhard Materials*, 41, 60–68. <https://doi.org/10.3103/S106345761901009X>