

PROCESAMIENTO DE NUBES DE PUNTOS PARA TALLADO DE MADERA EN 3D CON TECNOLOGÍA LÁSER

*Mariana Sáenz Padilla, Isidro Robledo Vega**

Tecnológico Nacional de México
Instituto Tecnológico de Chihuahua
División de Estudios de Posgrado e Investigación
Ave. Tecnológico #2909, Col. 10 de mayo, Chihuahua, México
Tel. +52(614)201-2014
[msaenz, irobledo]@itchihuahua.edu.mx
*Autor de Correspondencia

RESUMEN

En este artículo se presenta un sistema de tallado de madera con tecnología láser utilizando datos obtenidos mediante el procesamiento de nubes de puntos tridimensionales adquiridas mediante escáneres 3D, creadas con programas CAD o generadas por software. En este trabajo se construyó el prototipo del sistema de tallado de madera con láser y se desarrolló un procedimiento para procesar los datos del modelo tridimensional del objeto que se desea reproducir. Este procedimiento logra extraer rebanadas directas de las nubes de puntos del modelo tridimensional y genera el Código-G para cada rebanada. Se modificó una impresora 3D sustituyendo el extrusor con un módulo láser y se realizaron pruebas con diferentes tipos de madera para la determinación de los parámetros de operación del sistema. La experimentación realizada permitió determinar que la madera de nogal es más apropiada para el tallado con láser que la madera de pino, el triplay y MDF.

Palabras Clave: procesamiento de nubes de puntos, tallado de madera con láser.

ABSTRACT

In this article we present a wood carving system with laser technology using data obtained by processing three-dimensional point clouds acquired by means of 3D scanners, created with CAD programs or generated by software. In this work we built the prototype of the laser wood carving system and a procedure was developed to process the data of the three-dimensional model of the object to be reproduced. This procedure extracts slices directly from the point clouds of the three-dimensional model and generates the G-Code for each slice. A 3D printer was modified by replacing the extruder with a laser module and tests were carried out with different types of wood to determine the operating parameters of the system. The experimentation carried out made it possible to determine that walnut wood is more suitable for laser carving than pine wood, plywood and MDF.

Keywords: point cloud processing, laser wood carving.

1. INTRODUCCIÓN

La creación de modelos tridimensionales a partir de piezas ya existentes es de utilidad para un amplio rango de aplicaciones; también es conocido como ingeniería inversa [1] y ha llamado la atención debido a las formas complejas que se pueden

producir y al amplio campo de materiales al que se puede llegar [2], por ejemplo, la impresión en 3D, pero tiene la desventaja de que cada impresora está hecha para un cierto tipo de materiales. El láser ha sido considerado hasta hace poco solo como un instrumento de corte, pero ya es posible obtener gradientes de profundidad mediante el control de las frecuencias de pulsación, la velocidad y la potencia del haz. Además, si se toma en cuenta la absorción del material y se ajustan los parámetros de funcionamiento, se pueden procesar diferentes materiales con una misma herramienta.

En la universidad Qingdao, Yang et. al. [3] desarrollaron un sistema que genera modelos para impresoras 3D a partir del procesamiento de imágenes binarias de dibujos o patrones que se superponen en la madera para realizar tallados artísticos. Zhang et al. [4] desarrollaron un procedimiento para tallar modelos de madera en 3D con un sistema CNC de 5 ejes con el objetivo de agilizar la producción de piezas. En el lado comercial, las máquinas láser *Trotec* [5] realizan grabados en madera y logran obtener cierta profundidad en el tallado de la madera variando la potencia del láser. Por su parte, J. López et al. [6] utiliza rayos láser para hacer un desgaste superficial en piezas tridimensionales talladas en piedra con la finalidad de limpiar su superficie.

En este trabajo se construyó el prototipo de un sistema con tecnología láser para el tallado secuencial por capas aplicado a bloques de madera, sin la necesidad de emplear diferentes herramientas, como lo hace una fresadora CNC. El prototipo de tallado de madera con láser permite realizar la recreación de piezas en tres dimensiones. La principal contribución de este trabajo es el desarrollo de un procedimiento que genera el Código G directamente de una nube de puntos, evitando el proceso de enmallado en la reconstrucción del modelo tridimensional. Para la generación del Código G se realiza un proceso inverso a la impresión 3D ya que el propósito es devastar material de un bloque de madera en lugar de agregarlo.

2. ADQUISICIÓN DE DATOS TRIDIMENSIONALES

Todo sistema de adquisición de datos tridimensionales tiene limitaciones, los métodos sin contacto son más rápidos, aunque

ningún escáner 3D puede satisfacer todas las demandas de digitalización [7]. Las imágenes de rango y las nubes de puntos son las estructuras de datos tridimensionales más utilizadas. Una nube de puntos puede ofrecer visualizaciones de la estructura tridimensional del objeto escaneado de forma inmediata, contienen un gran volumen de información que no se ha interpretado y del que a veces resulta difícil extraer datos específicos. Dependiendo del sistema de adquisición y de cómo interprete el entorno, muchas veces se pueden capturar puntos que no forman parte del objeto de interés, ocasionando que el objeto tenga deformaciones. Estos puntos son considerados ruido y se puede realizar un proceso de filtrado, eliminando los puntos muy alejados del objeto o puntos muy cercanos entre sí [8]. En esta investigación se usó un escáner 3D Sense 1, de la compañía 3D Systems que utiliza la tecnología de medición de tiempo de vuelo de un rayo láser para obtener los datos tridimensionales. La figura 1 muestra lo complejo que puede ser el proceso de escaneo de un objeto utilizando el escáner 3D Sense 1, se puede observar el ruido generado durante el proceso de adquisición producido por la iluminación deficiente y el movimiento del escáner.

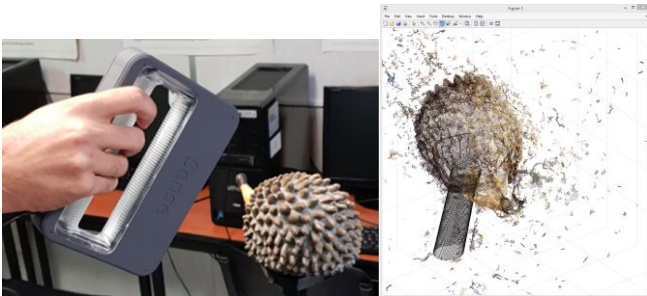


Figura 1.- Adquisición de datos tridimensionales con el escáner 3D Sense 1.

Los datos tridimensionales producidos por el escáner son almacenados en archivos con formato .ply y .obj con la intención de procesar directamente la nube de puntos. En la figura 2 se muestra la nube de puntos de otro objeto escaneado, fue necesario procesar los datos para la rotación de los ejes, eliminar la base donde se montó el objeto seleccionando una región de interés, además del filtrado para la eliminación de ruido. El procesamiento y visualización de la nube de puntos fue realizado en Matlab.

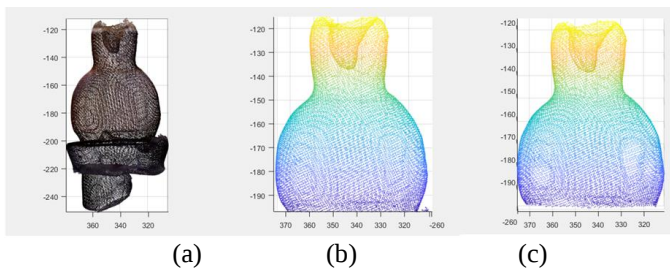


Figura 2.- Objeto escaneado: a) Aplicación de rotación a los ejes, b) Región de interés y c) Filtrado de la nube de puntos.

Se considera también la obtención de datos tridimensionales por medio de la generación artificial de objetos utilizando programas de CAD o por medio de software como Matlab. En este trabajo se utilizó un programa en Matlab que genera una pirámide de base cuadrada, mostrada en la figura 3, que permite realizar experimentos para el ajuste de diferentes parámetros del proceso.

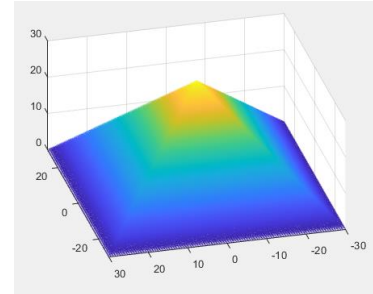


Figura 3.- Nube de puntos de una pirámide generada en Matlab.

3. REBANADO DE LA NUBE DE PUNTOS

Las impresoras 3D comerciales utilizan un software proporcionado por el fabricante que les permita procesar los datos de archivos en formato de estereolitografía (STL) y convertirlos en Código G, siendo éste el formato estándar usado por las máquinas de control numérico. Este software toma los datos del modelo tridimensional y los va seccionando o rebanando en uno de los tres ejes, lo que da como resultado rebanadas en dos dimensiones (X,Y), pero ordenadas de acuerdo a su posición en el eje Z. Para cada rebanada se generan los comandos de movimiento del cabezal de la impresora y los códigos especiales para el control del extrusor, abanicos y otros elementos. Existen diferentes programas como Slic3er, Ultimaker Cura, CraftWare, entre otros, que funcionan con diferentes impresoras.

La geometría de las piezas es un factor importante ya que solo se cuenta con movimiento del módulo láser en tres ejes, esto representa limitaciones para la generación de ciertas piezas, similares a la que tienen las impresoras 3D. En este caso, el tallado láser se verá limitado a la reproducción de piezas con superficies cuyo vector normal tenga una pendiente positiva con respecto a la horizontal. Se debe analizar la geometría del objeto que se desea tallar y seleccionar el eje que será utilizado para seccionar la nube de puntos de manera que se cumpla con la restricción mencionada. En el caso del objeto escaneado, mostrado en la figura 2, se tendría que seleccionar el eje X, tallando la mitad de la pieza para luego girarlo y tallar la otra mitad. Esto es posible si se tiene un buen sistema para la sujeción del bloque de madera sobre la cama del sistema CNC. Se debe tomar en cuenta que el sistema CNC mueve el módulo láser sobre el eje Z para ir devastando el bloque de madera en el

cual será tallada la pieza, por lo que la pieza deberá rotarse de acuerdo al eje seleccionado para realizar el rebanado, haciendo que coincida con el eje Z. En el caso de la pirámide de la figura 3 se puede realizar el rebanado directamente sobre el eje Z.

Es necesario definir el concepto de *avance* para la obtención de las rebanadas de una nube de puntos tridimensionales, con el fin de generar el Código G para el proceso de tallado de madera con láser. Este concepto es la forma análoga en que las impresoras 3D hacen una capa de impresión. El avance se calcula definiendo el alto de la rebanada de la nube de puntos tridimensionales que se extraerá para proyectarlos sobre el plano horizontal y formar una imagen en dos dimensiones para cada rebanada.

$$\text{Avance} = \text{alto de la rebanada} \quad (1)$$

$$\text{Número de rebanadas} = \frac{\text{alto de la pieza}}{\text{avance}} \quad (2)$$

El avance es importante y depende de la densidad de la nube de puntos. A mayor densidad, menor puede ser el avance. El alto de la pieza se define con los valores de coordenadas de los puntos mínimo y máximo sobre el eje seleccionado para rebanar la nube de puntos. Tomando como referencia el eje Z para obtener las rebanadas, entonces se seleccionan todos los puntos dentro del rango especificado por el avance, iniciando en la coordenada máxima en Z y avanzando rebanada por rebanada hasta la coordenada mínima. Al tomar solo las coordenadas (X,Y) de los puntos dentro de la rebanada se obtiene su proyección sobre el plano horizontal. Después se define el contorno de la rebanada uniéndolos puntos en la frontera por medio de la función *boundary* de Matlab. La figura 4-1 muestra una rebanada de una nube de puntos tridimensionales, la figura 4-2 muestra los puntos de la rebanada proyectados sobre el plano horizontal y la figura 4-3 muestra la unión de los puntos en la frontera para formar el contorno de la rebanada.

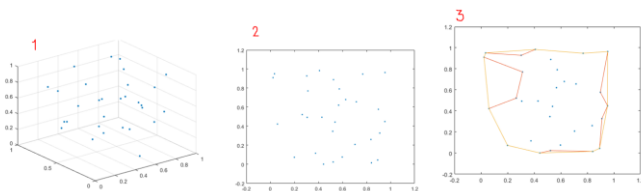


Figura 4.- 1) Rebanada de una nube de puntos. 2) Puntos de la rebanada proyectados sobre el plano horizontal. 3) Unión de puntos en la frontera para generar el contorno.

El procesamiento de las rebanadas es acumulativo, es decir, se van acumulando los puntos de las rebanadas anteriores para evitar los problemas al calcular los contornos en presencia de secciones convexas o formadas solo por paredes de puntos. Así, la densidad de puntos es mayor y se mejora la precisión en la definición del contorno.

Se genera una silueta binaria utilizando el contorno de la rebanada, es decir, una imagen donde el fondo es blanco y la silueta de la rebanada de la pieza es negro. En la figura 5 se muestran imágenes binarias generadas para las rebanadas del objeto escaneado. El color negro indica la zona por la que se desea pase el láser encendido para que haga un desgaste progresivo hasta llegar a la última rebanada que es predominantemente blanca, lo que significa que solo está procesando las orillas de la pieza, dándole profundidad.

En la figura 6 vemos cómo se inicia el corte por la parte más alta sobre el eje Z de la nube de puntos de la pirámide, en la primera imagen de la línea superior muestra solo la punta de la pirámide y la última imagen de la línea muestra la base de la pirámide.

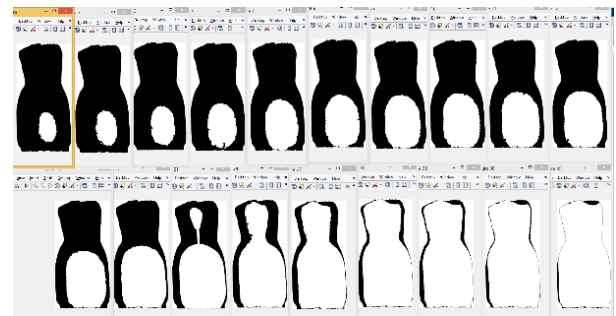


Figura 5.- Siluetas binarias de cada rebanada de la nube de puntos del objeto escaneado.



Figura 6.- Rebanado de la nube de puntos de la pirámide a lo largo del eje Z.

4. GENERACIÓN DEL CÓDIGO G

El Código G es lenguaje estándar de descripción de operaciones para máquinas de control numérico (CNC). Por lo general, los programas de CAD tienen extensiones de software o *plugins* que permiten generar el Código G de un modelo tridimensional. Existen otras aplicaciones que generan el Código G a partir de archivos de CAD en diferentes formatos como DXF (AutoCAD) o STL (Esterolitografía). Como se mencionó anteriormente, el software de las impresoras 3D convierte archivos STL a Código G con comandos especiales para el control del extrusor, los abanicos y otros elementos. Así también existen instrucciones específicas para el control de un módulo láser. Algunas aplicaciones de software gráfico como Inkscape tienen *plugins* que permiten generar Código G para grabadoras láser a partir de dibujos o imágenes. Las grabadoras láser trabajan en 2D y logran devastar cierta profundidad en el material variando la intensidad del rayo láser.

En esta investigación se utilizó GRBL Laser, es una aplicación especializada en generar Código G para máquinas de corte láser. Esta aplicación toma las imágenes binarias rasterizadas de las rebanadas de la nube de puntos y genera las trayectorias que guían al módulo láser en la máquina CNC. El uso de una impresora 3D, en la que se sustituyó el extrusor con el módulo láser, obligó a realizar adaptaciones a la tarjeta de control de la impresora 3D para generar la señal que encienda y apague el módulo láser utilizando el puerto que controla el abanico del extrusor. Esta modificación obliga a realizar cambios en el Código G para enviar los comandos requeridos y activar el puerto utilizado para controlar el módulo láser. Se desarrolló una aplicación en lenguaje Python para realizar los ajustes al Código G. Estos ajustes consisten en sustituir algunos comandos e insertar nuevas instrucciones.

Para generar el Código G con la aplicación GRBL Laser se requiere definir datos de inicio como:

- 1) El espesor del material con el que se va a trabajar, se refiere al tamaño físico del bloque de madera que se va a tallar, específicamente la altura.
- 2) La distancia de trabajo del emisor láser, es la distancia del emisor láser a la superficie del bloque de madera donde se desea la mayor concentración de energía.
- 3) El formato del archivo de entrada.
- 4) El avance o alto de las rebanadas de la nube de puntos.
- 5) Repeticiones, se refiere al número de veces que debe pasar el láser sobre la superficie del bloque de madera para lograr el avance especificado.

Para calcular la coordenada inicial sobre el eje Z donde se debe colocar el módulo láser, es necesario conocer las medidas del espesor del material, la distancia de trabajo del emisor láser, el origen o punto cero del eje cartesiano de la máquina CNC (Hcero) y la altura de la placa de aluminio (Hplaca) colocada para proteger la base de trabajo de la impresora 3D. Estas medidas se muestran en la figura 7. La coordenada inicial sobre el eje Z se obtiene con la siguiente fórmula:

$$inicZ = \text{espesor del bloque} + \text{dist. trab. láser} - (Hcero + Hplaca) \quad (3)$$

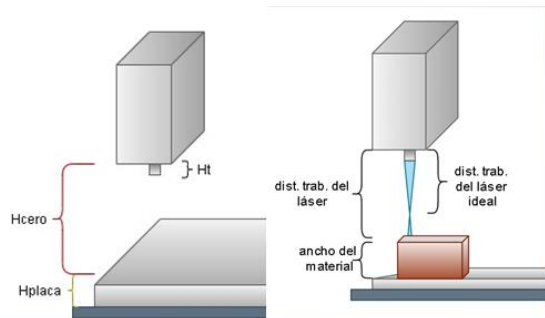


Figura 7.- Medidas para calcular la coordenada inicial sobre el eje Z para ubicar el módulo láser.

El valor calculado *inicZ* es el punto donde se ubica el cabezal del láser para que inicie con el desgaste de la madera y es muy importante ya que, si las distancias no son exactas, el devastado de la madera no será correcto. El cabezal del módulo láser se va moviendo hacia abajo sobre el eje Z según el avance estimado. El rayo láser debe realizar varias pasadas o repeticiones para lograr la profundidad o avance requerido. El número de repeticiones se debe estimar experimentalmente de acuerdo al tipo de madera que se va a tallar. Las pruebas deberán determinar el avance o profundidad devastada en cada repetición (*Ap*) y con el avance estimado (*Ae*) se puede estimar el número de repeticiones:

$$\text{Repeticiones} = \frac{Ae}{Ap} \quad (4)$$

Los valores calculados en las ecuaciones (3) y (4) serán utilizados para modificar el Código G generado por la aplicación GRBL Láser. Se prepara un archivo de Código G por cada rebanada y se ejecuta el número de repeticiones o pasadas necesarias para lograr el avance o alto de la rebanada. Los ajustes realizados a las primeras líneas del Código G se muestran en la figura 8, a la izquierda se encuentra el Código G original y a la derecha el código modificado.

G90 G0 X0 Y0 M3 S0 F1000 G0 X50.65 Y0.05 S0	G90 G21 M106 S0 G0 Z79.8000 F1000 G0 X50.65 Y0.05
---	--

Figura 8.- Ajuste de las primeras líneas del Código-G.

El comando G90 indica Modo Absoluto, es decir, que todos los valores de las coordenadas X,Y serán referidos al punto de origen. Se sustituyen el comando G0, que indica desplazamiento rápido y directo para mover el cabezal a la posición cero en X (X0) y cero en Y (Y0), y el comando M3 que ordena encender el láser, por los comandos G21, para definir las dimensiones en milímetros, el comando M106 que indica el encendido del abanico de la impresora, en este caso es el puerto donde se conectó el láser. Y se agrega el comando G0 Z79.8, que mueve el cabezal a la coordenada especificada sobre el eje Z. Cada rebanada de la nube de puntos inicia en una posición en el eje Z definida por el avance. El comando F1000 indica Velocidad del movimiento del cabezal en milímetros por minuto y el comando de la última línea indica que se mueva rápidamente (G0) a la coordenada (X=50.65, Y=0.05).

El programa que realiza los ajustes al Código G, calcula la coordenada en Z para cada rebanada. Al inicio del archivo de Código G de cada rebanada se coloca la coordenada en Z que debe de tener el cabezal del láser y al final se asegura de apagar el módulo láser para poder regresar hasta el inicio.

La figura 9 muestra los ajustes realizados en las demás líneas del código G que se encargan de encender, apagar y mover el módulo láser, se observan tres líneas del código original y las siete líneas que las sustituyen en el código modificado.

F	N05 G1 X0.1 S90	N06 M106 S90
		N07 G1 X0.1
G	N06 G0 X0.1 Y0.1 S0	N08 M106 S0
		N09 G4 P200
		N10 G0 X0.1 Y0.1
H	N07 G1 X50.65 S90	N11 M106 S90
		N12 G1 X50.65

Figura 9.- Ajustes al Código-G para mover, encender y apagar el módulo láser.

Para modificar la línea F es necesario que el comando M106 se encuentre en una línea nueva, es decir, que la línea inicie con esta instrucción y enseguida tenga la velocidad de giro, que indica la potencia del láser. La línea G del código original, indica que un movimiento a la coordenada (0.1,0.1) y luego apagar el abanico, mientras que en el código modificado primero se le da la instrucción de apagarse (M106 S0), luego con el comando G4 se detiene el movimiento y con la instrucción P200 se le indica que se mantenga detenido por 200 milisegundos, este tiempo es necesario para apagar el emisor láser debido a que no lo hace de forma instantánea, y finalmente se mueve a la coordenada (0.1,0.1). La línea H se modifica de manera similar a la línea F. Estos cambios se realizan de forma repetitiva en todo el archivo de Código G, para cada movimiento del láser.

Las líneas finales el Código G original, mostradas en la figura 10, contienen el comando M5 que apaga el abanico, este se sustituye por el comando M106 S0.

```
M5
G0 X0 Y0
```

Figura 10.- Líneas finales del Código-G original.

5. EXPERIMENTOS DE TALLADO EN MADERA

Asegurado el correcto funcionamiento del prototipo del sistema de tallado en madera con tecnología láser, se realizaron las primeras pruebas con el Código G modificado para tallar el objeto escaneado utilizando madera de pino, los resultados se muestran en la figura 11.



Figura 11.- Prueba de tallado del objeto escaneado.

El carbón es producto de la interacción del rayo láser con la madera, es un efecto típico del proceso. Las zonas más oscuras muestran el resultado justo después de haber sido procesado. Las zonas que se ven más claras fueron limpiadas con una lija fina para madera de grano 120. Por ser la primera prueba se empezó a recopilar información sobre la profundidad devastada por el láser con una sola pasada.

Se realizó otra prueba utilizando la nube de puntos de la pirámide con el objetivo de experimentar el tallado de superficies planas utilizando diferentes tipos de madera. Los resultados se muestran en la figura 12, se puede observar que la madera de triplay (figura 12d) no es adecuada para el tallado láser por la combustión de los químicos utilizados para unir las capas. Los mejores resultados se obtuvieron con la madera de nogal (figura 12b)



Figura 12.- Tallado de la pirámide en a) madera de pino y b) madera de nogal c) MDF y d) triplay.

Se hizo otra prueba con los datos de la pirámide para tallar un bloque de madera de pino de 20mm de altura, se crearon veinte

rebanadas y se hicieron 10 repeticiones por rebanada. Los resultados se muestran en la figura 13.

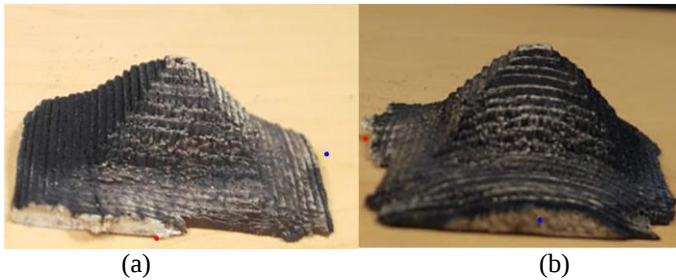


Figura 13.- Pirámide tallada con 20 repeticiones por rebanada.
(a) Vista frontal y (b) vista lateral.

El Código G generado por GRBL Laser para las rebanadas de la nube de puntos de la pirámide define el movimiento del cabezal del sistema CNC con trazos paralelos sobre el eje Y. La figura 14 muestra una vista frontal con dos ligeras pendientes en (a) y una vista lateral con un arco hacia abajo en (b). Estos son los efectos que produce el encendido y apagado del módulo láser al realizar varias pasadas sobre el mismo eje.

El tiempo para tallar el objeto completo depende del número de rebanadas y el número de repeticiones por cada rebanada para lograr el avance deseado. Para tallar la pirámide en un bloque de madera de pino con 20 rebanadas y 10 repeticiones por rebanada, tomó 103 horas en realizarse. El tiempo para tallar la pirámide en un bloque de madera de pino con 20 rebanadas y 4 repeticiones por rebanada fue de 41 horas. Para la madera de pino, se requirieron 10 repeticiones para lograr un avance de 1mm, mientras que, para la madera de nogal, se requirieron 29 repeticiones para el avance de 1 mm.



Figura 14.- Pirámide tallada en madera de pino. (a) Vista frontal y (b) vista lateral.

6. CONCLUSIONES

Se desarrolló el prototipo de un sistema de tallado de madera con tecnología láser de modelos tridimensionales de objetos. Se analizaron diferentes métodos para generar modelos tridimensionales de objetos, el primero por medio de un escáner tridimensional, otro método fue generar una nube de puntos tridimensionales de un objeto de forma artificial con un programa desarrollado en Matlab, también se pueden diseñar los modelos tridimensionales de objetos utilizando programas de CAD. Se desarrolló un procedimiento que permite procesar

la nube de puntos del modelo tridimensional del objeto para ser tallado en madera. Este procedimiento consiste en obtener rebanadas de la nube de puntos y proyectarlas sobre un plano en dos dimensiones para obtener una imagen binaria por cada rebanada que sirve para determinar que partes de la madera debe ser talladas. Las imágenes binarias rasterizadas se convierten en Código G utilizando la aplicación GRBL Láser para procesarlo en el prototipo del sistema CNC. Se utilizó una impresora 3D, sustituyendo el extrusor con un módulo láser de 10 watts. Fue necesario adecuar el Código G obtenido de las rebanadas de las nubes de puntos para que pudiera ser procesado en el prototipo del sistema de tallado en madera.

Se realizaron experimentos de tallado en madera de diferentes objetos. Se generó el modelo tridimensional de un objeto con superficies irregulares utilizando un escáner tridimensional, se obtuvieron las rebanadas de la nube de puntos y se realizaron pruebas con el sistema de tallado. Se realizaron otras pruebas con el modelo tridimensional de una pirámide de base rectangular generado por software, se obtuvieron las rebanadas de la nube de puntos y se generó el Código G para cada rebanada. El uso de un modelo generado por software es más eficiente, ya que evita tener que realizar el pre-procesamiento de las nubes de puntos para eliminar el ruido generado durante el proceso de escaneo. Se realizaron varios experimentos con el modelo de la pirámide generado por software que permitieron determinar el ajuste de parámetros de funcionamiento del sistema de tallado utilizando diferentes configuraciones y tipos de madera.

El alto de la rebanada de la nube de puntos define el avance del cabezal del sistema CNC sobre el eje Z, para lograr ese avance el láser debe realizar varias pasadas para devastar el material necesario. El proceso repetitivo produce variaciones en el avance que dependen de la dirección en que se mueve el módulo láser. También se debe considerar que el encendido y el apagado del láser utilizado no es inmediato. Además, al encenderlo su potencia es muy baja y se va incrementando gradualmente. Esto se puede determinar en las pruebas realizadas ya que, en la vista frontal de la pirámide tallada, las líneas son más rectas donde el encendido y apagado se hacía con menos frecuencia, es decir, permanecía encendido a lo largo de todo el movimiento. Se observa una línea curva en la vista lateral, donde hay encendidos y apagados constantes. En trabajos futuros se considera mejorar la generación de las rutas del Código G que permita mantener encendido el módulo láser, sin interrupciones, para mantener la potencia constante y lograr un mayor avance en cada pasada. Esto también puede disminuir el tiempo total requerido para tallar el objeto.

Los resultados obtenidos tuvieron variaciones debido a las propiedades isotrópicas de la madera, que varían no solo de acuerdo con el tipo, sino también por épocas del crecimiento y condiciones climatológicas, siendo la madera de nogal la más adecuada para el proceso de tallado con láser.

7. REFERENCIAS

- [1] Y. T. Jun y V. H. Raja, *Extracting geometric attributes directly from scanned data sets for feature recognition*, vol. 15, International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2002.
- [2] E. P. Hernández, *Técnicas de relleno de huecos en superficies adquiridas mediante Escaners 3D*, España: Tesis Doctoral, UNED. Universidad Nacional de Educación a Distancia (España), 2011.
- [3] E. J. Yang, S. He y L. Lu, «Binary Image Carving for 3D Printing,» *Computer-Aided Design*, pp. 191-201, September 2019..
- [4] L. Zhang, Q. J. Liu, t. Y. Wang, H. B. Li y W. Tian, «Structural Design and Improvement of Spindle in Five-Axis Wood Engraving Machine,» *Key Engineenring Materials*, vol. 693, pp. 200-2004, 2016.
- [5] Trotec Laser GmbH, «Trotec Laser,» Trodat Trotec Holding GmbH, jun 2020. [En línea]. Available: <https://www.troteclaser.com/en-us/knowledge/tips-for-laser-users/wood-material-handling/>. [Último acceso: 30 jun 2020].
- [6] A. J. López, J. Lamas, J. S. Pozo-Antonio, T. Rivas y A. Ramil, «Development of processing strategies for 3D controlled laser ablation: Application to the cleaning of stonework surfaces,» *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 126, p. 105897, 2020.
- [7] A. M. Wolfgang BOEHLER, Artist, *3D SCANNING INSTRUMENTS*. [Art]. i3mainz, Institute for Spatial Information and Surveying Technology, FH Mainz, University of Applied Sciences.
- [8] R. H. Chandelier, *3D Modeling of Buildings: Outstanding Sites*, Great Britain, USA: Wiley & Sons, Inc., 2014.