

Máquina CNC (Control Numérico Computarizado) de 3 ejes para el grabado de placas conmemorativas

J. Francisco Campoverde (panchitocam@hotmail.com) – Carlos Obando (cobando@utn.edu.ec)
Universidad Técnica Del Norte (UTN)

Resumen — La elaboración del presente trabajo tiene como finalidad, diseñar y construir una máquina CNC de (Control Numérico Computarizado), para grabar placas conmemorativas por medio del fresado de un motor de altas revoluciones, mejorando la calidad y el proceso de grabado de todo tipo de números, letras y gráficos que se necesite. Dicha máquina se conecta vía USB a un ordenador, en el cual se diseña o se desarrolla el bosquejo por medio de un software vectorial, para generar y obtener un archivo en “código G” de la imagen utilizada. Este archivo guardado es leído por la tarjeta de control numérico, la misma que hace interfaz con el ordenador y gobierna todo el sistema eléctrico y de control de la máquina CNC por medio del software “MACH3”, el cual se encarga del control por software de la máquina en tiempo real. Una vez que entra la tarjeta de control en ejecución, envía señales a cada uno de los controladores de los motores, que generan el movimiento de los mecanismos implementados en los ejes (X, Y, Z) de la máquina. Obteniendo finalmente la movilidad del motor de grabado en los tres ejes de desplazamiento para grabar y mecanizar un bosquejo o diseño en la placa seleccionada y ubicada en la mesa de trabajo.

Índices—Coordenadas, control numérico computarizado, desplazamiento, diseño por computadora, ejes, fresado, grabado, máquina herramienta, manufactura.

I. INTRODUCCIÓN

EL objetivo principal de este trabajo de investigación es de diseñar y construir una máquina CNC de 3 ejes, la cual grave placas conmemorativas mediante el diseño por software. Dicha máquina servirá específicamente para el grabado de placas y su construcción se enfoca en disminuir costos, con dimensiones aproximadas y ajustables al área de trabajo para el grabado.

Para el desplazamiento de los 3 ejes, se utilizará un par de guías o rieles en cada eje, incluyendo tornillos de bolas recirculantes en el intermedio, acoplados con motores de paso, los cuales darán el principal movimiento lineal en la dirección de cada eje (X, Y, Z).

Esta investigación está basada en el estudio de grabado de placas, con el apoyo de los diferentes artesanos de la ciudad de Ibarra, exclusivamente del taller de Joyería Campoverde.

Gonzalo Campoverde, propietario del taller, artesanos de Imbabura.
Francisco Campoverde, egresado de la carrera en Ingeniería en Mecatrónica de la Universidad Técnica del Norte (Ibarra - Ecuador).
(panchitocam@hotmail.com)

Para el control de los ejes de la máquina se utilizará un módulo CNC, el cual se encargará de controlar los 3 motores de pasos con sus respectivos controladores. Incluyendo la interfaz entre la máquina y el computador, para ejecutar un software adecuado para el diseño y grabado de la placa.

II. ELEMENTOS GENERALES DE UNA MÁQUINA CNC

- Mesa de trabajo
- Cabezal de corte
- Husillo o motor de fresado
- Carros de desplazamiento de los tres ejes

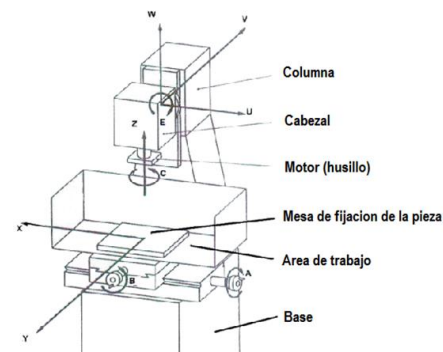


Figura 1. Partes de una fresadora CNC

A. Ejes principales de trabajo

- Eje X: Movimiento longitudinal de la herramienta en sentido (horizontal)
- Eje Y: Movimiento transversal de la mesa en sentido (horizontal)
- Eje Z: Movimiento perpendicular de la herramienta en sentido (vertical)

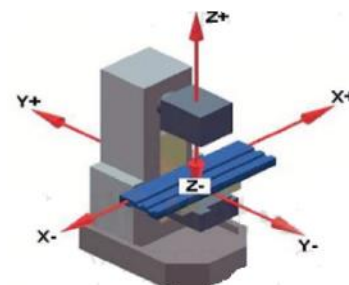


Figura 2. Ejes principales de una CNC

B. Sistemas de transmisión

- Transmisión por tornillo de bolas



Figura 3. Tornillo de bolas (Balls screw)

- Guías lineales



Figura 4. Guías lineales – rodamientos lineales

C. Motores o actuadores para la transmisión

Motores de paso híbridos combinan las mejores características de los de reluctancia variable y de imán permanente.

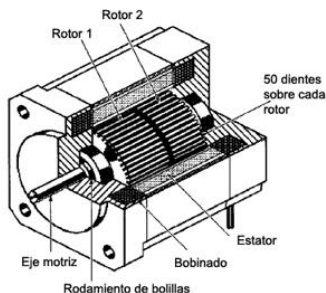


Figura 5. Ejemplo de motor híbrido de pasos

D. Motor de grabado o husillo principal

El husillo principal es un motor que posee altas revoluciones y un torque apreciable, el cual se lo utiliza para el grabado de las placas



Figura 6. Motor de grabado de altas revoluciones

E. COMPONENTES PARA EL CONTROL DEL SISTEMA CNC

1) Drivers o controladores para motores de paso

Los drivers son controladores electrónicos compactos, ideales y especialmente fabricados para el control y funcionamiento de un motor



Figura 7. Controlador para motor de pasos

2) Fuentes de alimentación

Las fuentes de alimentación son las encargadas de brindar el voltaje y la corriente necesaria para el funcionamiento de todo el sistema eléctrico CNC.



Figura 8. Fuente de alimentación

3) Tarjeta de control CNC

Una tarjeta de control CNC es la que permite calibrar, configurar e interpretar los comandos de programación enviados y generados desde un software, para convertirlos en señales eléctricas y de control.



Figura 9. Tarjeta de control CNC

4) SOFTWARE DE CONTROL CNC

El software de control al momento de seleccionarlo, debe tener la funcionalidad de ordenar, manipular, monitorear y calibrar la máquina CNC en tiempo real



Figura 10. Software de control CNC

5) SOFTWARE DE DISEÑO

Es útil para abrir, seleccionar y editar cualquier variedad de imágenes en cuanto a su formato se refiere, esto nos da la disponibilidad de crear placas con un sin número de diseños



Figura 11. Software de diseño vectorial

III. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN

La estructura de una máquina CNC en general cuenta con una mesa de trabajo la cual soporta y sujeta la placa y un puente o cabezal (fijo o móvil), el cual mantiene los elementos mecánicos de los ejes “X” y “Z”. Las dimensiones de la máquina originan el área de trabajo y la robustez de la estructura depende del peso de los mecanismos y del tipo de material que se va a mecanizar o grabar.

En este caso la máquina CNC de tres ejes está diseñada con un puente fijo (eje “X”), el cual permite aumentar la rigidez de la estructura de la máquina, para una buena estabilidad en el grabado. El diseño de los laterales que soportan al eje “X” brinda un buen apoyo simétrico con respecto a la suma de las cargas que conforman el eje “X” y el eje “Z”; el diseño realizado se presenta en la figura a continuación.

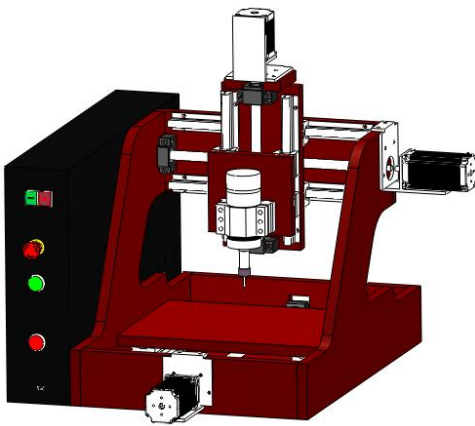


Fig. 12. Diseño de la máquina CNC de tres ejes

A. Dimensiones y área de trabajo

Las dimensiones de la máquina CNC de tres ejes conforman un papel importante para el área de trabajo y la función que desempeñará la máquina, como es el caso de grabar placas. A continuación se detalla las medidas que relacionan el recorrido de cada uno de los ejes, los límites del área de grabado y las dimensiones de la estructura que conforman la máquina CNC:

- a. Dimensiones de la máquina
 - 60 cm de altura
 - 40 cm de ancho
 - 60 cm de profundidad
- b. Área de trabajo
 - 210 mm en el eje X
 - 240 mm en el eje Y
 - 150 mm en el eje Z
- c. Recorrido máximo de cada eje
 - 310 mm de recorrido en el eje X
 - 440 mm de recorrido en el eje Y
 - 230 mm de recorrido en el eje Z

B. Parámetros para el grabado

1) Cálculo de la velocidad de corte (V_c):

$$V_c \text{ [m/min]} = (D \times \pi \times n) / 1000$$

Dónde:

$D = 2\text{mm}$ Diámetro de corte de la fresa
 $n = 12000 \text{ RPM}$ Revoluciones del motor de grabado

2) Cálculo de la velocidad de avance (V_f):

Este cálculo corresponde a la velocidad que avanza la herramienta de corte con respecto a la pieza en el plano X-Y.

$$V_f \text{ [mm/min]} = f_z \times n \times Z_c$$

Dónde:

$f_z = 0.008\text{mm}$ Avance por diente (dato del fabricante)
 $n = 12000\text{RPM}$ Revoluciones del motor de grabado
 $Z = 2$ Numero de dientes de la fresa (dato del fabricante)

3) Cálculo de la fuerza de corte (F_c):

La fuerza de corte parte de una formula aproximada, la cual depende de un factor llamado presión específica de corte (K_c):

$$F_c[\text{N}] = K_c \times A_c$$

Dónde:

A_c = Área de corte
 K_c = presión específica de corte

C. Cálculos y montaje de los tres ejes

Una carga estática es la fuerza que actúa sobre cierto objeto y en donde puede existir cierta deformación o rotura. Se propone identificar las fuerzas resultantes, las cuales se forman de la suma de las cargas que soportan cada uno de los tres ejes de la máquina y así determinar los esfuerzos que ejercen los sistemas mecánicos, como son las guías lineales y los tornillos de bolas, que sirven para el desplazamiento y transmisión lineal en el sentido de cada eje.

1) Fuerza resultante del eje Z



Figura 13. Imagen del diseño y la masa del eje “Z”

$$F_z = W_z + F_c$$

Dónde:

F_z = Fuerza resultante y la carga total que soporta el eje “Z”
 W_z = Peso de la estructura del eje y de sus elementos
 F_c = Fuerza de corte que se presenta en el grabado

Para determinar el peso total que soporta cada uno de los ejes, se debe partir de la suma de todas las masas de cada uno de los elementos que conforman cada eje.

2) Fuerza resultante del eje X

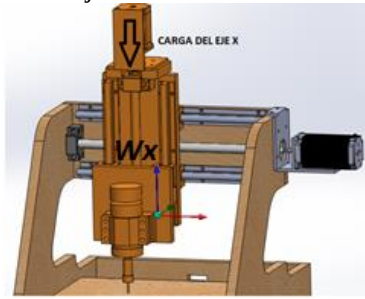


Figura 14. Imagen del diseño y la masa del eje "X"

$$\begin{aligned} \llbracket \text{masa} \rrbracket_x &= m_z + m_{(\text{motor } z)} + m_{\text{estructura}} + m_{\text{elementos}} \\ \llbracket \text{masa} \rrbracket_x &= 2.6\text{kg} + 1.05\text{kg} + 0.6\text{kg} + 4.7\text{kg} \\ \llbracket \text{masa} \rrbracket_x &= 8.95\text{kg} \\ W_x &= 9\text{kg} \times 9.8 \text{ m/s}^2 \\ W_x &= 88[\text{N}] \\ F_x &= 88[\text{N}] + 100[\text{N}] \\ F_x &= 188[\text{N}] \end{aligned}$$

3) Fuerza resultante del eje Y

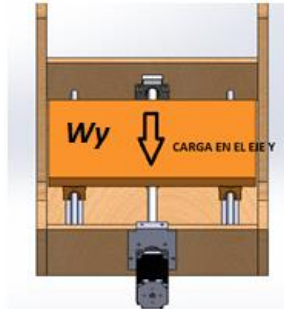


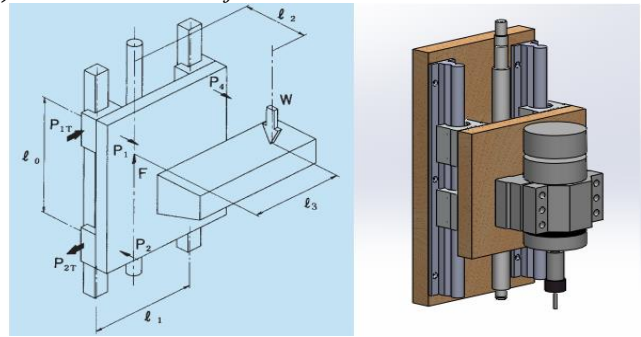
Figura 15. Imagen del diseño y la masa del eje "Y"

$$\begin{aligned} \llbracket \text{masa} \rrbracket_y &= m_{\text{estructura}} + m_{\text{elementos}} \\ \llbracket \text{masa} \rrbracket_y &= 1\text{kg} + 1.5\text{kg} \\ \llbracket \text{masa} \rrbracket_y &= 2.5\text{kg} \\ W_y &= 2.5\text{kg} \times 9.8 \text{ m/s}^2 \\ W_y &= 24.5[\text{N}] \\ F_y &= 24.5[\text{N}] + 100[\text{N}] \\ F_y &= 125[\text{N}] \end{aligned}$$

D.Desplazamiento de los ejes por guías lineales

Para el diseño de las bancadas de los tres ejes (X, Y, Z) de la máquina CNC, debemos tomar en cuenta las fuerzas y reacciones que actúan en los sistemas de guías lineales. Para el traslado y dirección de cada eje se utilizara el catalogo del fabricante (THK, The Mark of Linear Motion) para el cálculo y formulación de los parámetros del movimiento lineal.

1) Guías lineales del eje "Z"



- Tipo de movimiento: Horizontal
- Longitud axial entre rodamientos lineales: $l_0=180\text{mm}$
- Longitud entre guías lineales: $l_1=280\text{mm}$

Se ha utilizado el software para cálculo de diseño llamado MDSolid (Mechanics of Deformable Solids Software), para analizar y escoger la gráfica con la magnitud del momento flector más crítico o mayor, que se da en el “Eje X”.

Dicha magnitud o momento es $M = 5993 \text{ N}\cdot\text{mm}^2$, la cual nos ayuda a encontrar aproximadamente el diámetro mínimo que deben tener cada uno de los rieles o guías lineales de los ejes de la máquina CNC.

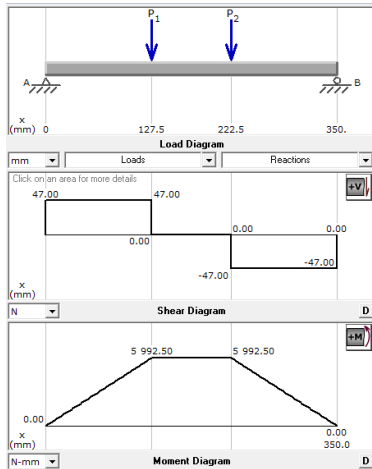


Figura 19. Diagrama de esfuerzos cortantes y momentos flectores

a) Esfuerzo normal máximo:

$$\sigma_{\max} = S_y/n$$

Dónde:

$S_y = 276 \text{ [N/([mm])}^2]$ Es la resistencia a la fluencia del acero AISI 301 (material que se compone las guías lineales)
 $n = 2$ Es el factor de seguridad

Entonces se obtiene el esfuerzo normal máximo para un factor de seguridad promedio $n = 2$ para elementos con cargas dinámicas:

Esfuerzo con respecto al módulo de sección para una viga redonda:

$$S = M/\sigma_{\max}$$

Cálculo y despeje del diámetro del módulo de sección para el eje $S = (\pi \times d^3)/32$:

$$d_{\min} = \sqrt[3]{(32 \times S)/\pi}$$

E. Transmisión de movimiento por tornillos de bolas

Los tres ejes de la máquina CNC, están conformados por tornillos de bolas “ballscrew” de la marca (SKF) para la transmisión de movimiento. El tornillo de bolas se asemeja al trabajo que realiza el tornillo sin fin y sirve para transformar el movimiento giratorio que produce el motor de pasos, a un movimiento lineal.

- Diámetro del tornillo $d_2 = 16\text{mm}$
- Paso o avance del tornillo por revolución $Ph = 5\text{mm}$
- Carga dinámica dada por el fabricante $Ca = 7.8 \text{ KN}$

1) Vida útil nominal del tornillo de bolas

La vida útil nominal del tornillo de bolas da a conocer el número de revoluciones aproximado que alcanza a dar el husillo o tornillo, antes de que haya la presencia de signos de fatiga en la superficie de la misma.

$$L_{10} = (Ca/F_m)^{1/3}$$

Dónde:

La capacidad de carga dinámica (fabricante) $Ca = 7800\text{N}$

La carga o peso que soporta $F_m = F_x$

Para la carga o el peso (F_m) que soporta el tornillo de bolas, se ha elegido el peso más crítico, que en este caso es la carga ($F_x = 188\text{N}$) que se produce en el “Eje X”.

2) Velocidad crítica

La velocidad crítica determina la velocidad límite o revoluciones máximas que debe girar el tornillo para transmitir el movimiento.

$$n_{cr} = 49 \times [10]^{1/6} \times (f_1 \times d_2)/l^{1/2}$$

Dónde:

La longitud libre a recorrer o tamaño del tornillo $l = 350\text{mm}$

El diámetro del tornillo de bolas $d_2 = 16\text{mm}$

El factor de corrección dada por el fabricante $f_1 = 0.8$

3) Par de entrada en funcionamiento estable

Es la magnitud de par necesario, para iniciar la rotación del tornillo de bolas.

$$T = (F \times Ph)/(2000 \times \pi \times n_p)$$

Dónde:

La Carga máxima $F = F_x$

El paso o avance del tornillo $Ph = 5\text{mm}$

La eficiencia $N_p = 0.9$

4) Potencia en funcionamiento estable

Se determina la potencia necesaria para realizar la transmisión lineal por medio del tornillo de bolas y desplazar la carga. Vale recalcar que la siguiente ecuación depende de la velocidad que toma la bancada para ser trasladada.

$$P = (\mu \times F \times V)/n_p \times [10]^{1/3}$$

Dónde:

El coeficiente de fricción $\mu = 0.2$

La velocidad del carro o del eje $V = 0.03 \text{ m/s}$

5) Velocidad de trabajo estable para el tornillo de bolas

Es la velocidad que debe tomar o girar el tornillo de bolas para realizar un buen grabado, tomando en cuenta la eficiencia, el desgaste y la estabilidad de los mecanismos de la máquina CNC, al realizar el mecanizado.

$$n = (60 \times P)/(2\pi \times T)$$

F. Análisis por el método de elementos finitos

Para el análisis de la estructura de la máquina CNC, nos basamos en el estudio y simulación de elementos finitos realizado por el software de diseño avanzado “SolidWorks”, el cual nos muestra los cálculos y resultados apreciables del diseño, como son la tensión máxima de Von Mises, la deformación máxima, el mallado y estructura de elementos finitos.

1) La estructura es sometida a un estudio estático, componiéndose de una sujeción de geometría fija en la base de la máquina.

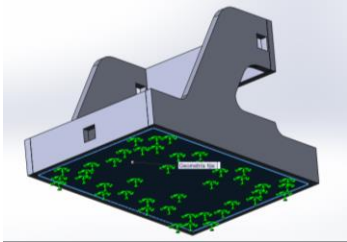


Figura 20. Estudio en SolidWorks, sujeción geometría fija

2) Se aplicó una fuerza de 340 N en la parte superior del cabezal, ya que es la parte más crítica de la estructura y en donde se aplica la mayor carga de los elementos de los ejes “X” y “Z”.

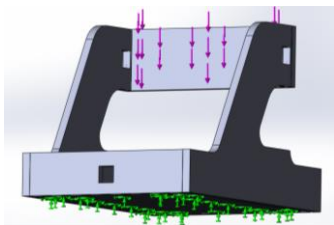


Figura 21. Estudio en SolidWorks, aplicación de una fuerza o carga

3) Malla sólida estándar con un total de 17111 nodos y 9047 elementos aproximadamente en el análisis.

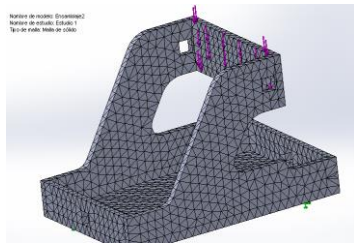


Figura 22. Estudio en SolidWorks, creación del mallado

4) La tensión máxima de Von Mises = 1.188MPa, es el máximo esfuerzo que puede soportar la estructura en el punto crítico mostrado con falla elástica.

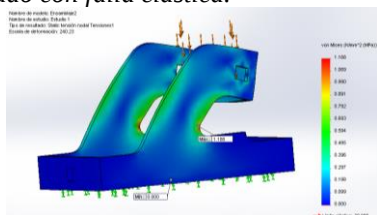


Figura 23. Estudio en SolidWorks, tensión de Von Mises

5) Gracias a este estudio y análisis por software podemos identificar un factor de seguridad mínimo con el criterio de Von Mises de un valor $n=16$.

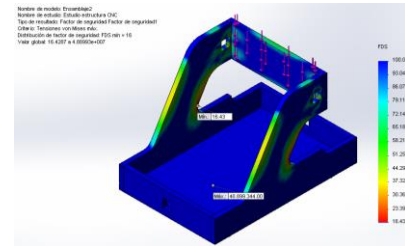


Figura 24. Estudio en SolidWorks, factor de seguridad

G. Modelado matemático del movimiento que realizan los tres ejes de la máquina CNC

A continuación se muestra la parte del modelo matemático, que representa el desplazamiento principal que realiza cada uno de los tres ejes, como es el giro del motor eléctrico o actuador, que impulsa un tornillo de bolas por el cual se transmite la fuerza y potencia necesaria para mover cada eje linealmente.

1) Función transferencia para un motor eléctrico DC

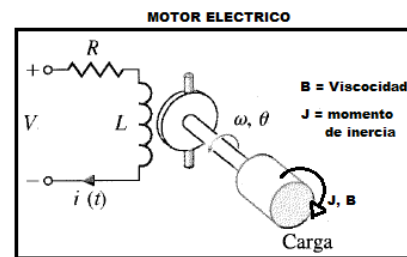


Figura 25. Diagrama electromecánico de un motor DC

a) Ecuación del par electromagnético

Esta ecuación tiene relación entre la corriente de funcionamiento del motor y el par que entrega el motor, siendo K_m la constante de par proporcional.

$$T_m = K_m \times I_a(s)$$

b) Ecuación para el circuito interno del motor

La ecuación viene dada por los parámetros eléctricos internos como la resistencia, inductancia, voltaje y corriente que circulan por el circuito y las bobinas del motor.

$$V_a(s) = (R_a + L_a \cdot s) I_a(s)$$

c) Ecuación Mecánica

El funcionamiento eléctrico del motor es generado por la corriente y voltaje inducido, moviendo el eje del motor y entregando un torque o fuerza torsional para mover una carga. Dicho torque está relacionado con el momento de inercia del eje, más el factor de viscosidad entre el eje y la superficie, con la velocidad angular.

$$T_m = (J \cdot s + b) \omega(s)$$

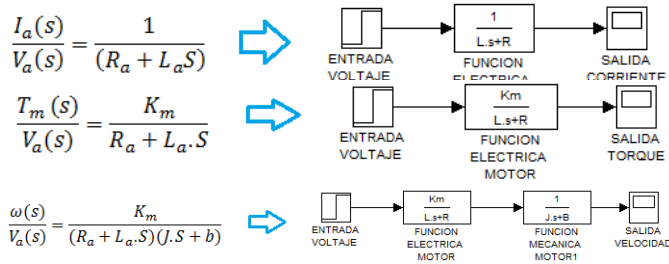


Figura 26. Funciones transferencia para un motor

2) Función transferencia para el husillo o tornillo de bolas

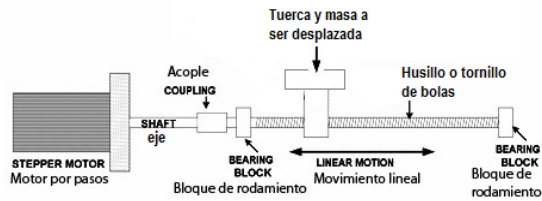


Figura 27. Sistema rotación (motor) – traslación (tornillo de bolas)

a) Par torsional en un sistema giratorio:

Entonces se define que el par en un movimiento rotacional, tomando en cuenta la ley de Newton, es igual al producto de la inercia por la segunda derivada del desplazamiento angular, más la presencia de fricción viscosa en producto con la primera derivada del desplazamiento angular:

$$T(s) = J \times \theta'' + B \times \theta'$$

b) Inercia para un sistema de rotación – traslación:

$$J = M \left(\frac{L}{2\pi} \right)^2$$

Dónde:

Masa o carga a ser trasladada → $M = 9 \text{ kg}$

Paso diametral del husillo de bolas → $L = 5 \text{ mm}$

c) Fricción Viscosa para un sistema rotacional

$$B = \frac{T_m}{\omega}$$

Dónde:

El torque que entrega el motor → $T_m = 2.8 \text{ N.m}$

La velocidad de giro del sistema → $\omega = 5.14 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$

d) Función Transferencia sistema (motor – husillo de bolas)

$$T(s) = J \times \theta s^2 + B \times \theta s$$

$$T(s) = \left(M \left(\frac{L}{2\pi} \right)^2 \cdot s^2 + \frac{T_m}{\omega} \cdot s \right) \theta$$

$$\frac{\text{salida (desplazamiento angular)}}{\text{entrada (torque del motor)}} = G(s) = \frac{\theta(s)}{T(s)}$$

3) Función transferencia de la tuerca para el desplazamiento lineal

a) Desplazamiento lineal:

$$X(s) = 5 \text{ mm}$$

b) Desplazamiento angular:

$$\theta(s) = 1 \text{ rev} = 360^\circ = 2\pi \text{ rad}$$

c) Función transferencia

$$\frac{\text{salida (desplazamiento lineal)}}{\text{entrada (desplazamiento angular)}} = H(s) = \frac{X(s)}{\theta(s)} = \frac{5}{2\pi}$$

4) Diagrama de bloques del sistema en general

El sistema en general de la máquina CNC, se centra en el movimiento o desplazamiento de cada eje, ya que estos cumplen la función de posicionar la herramienta de corte en las coordenadas exactas para realizar el mecanizado. A continuación se muestra el diagrama de bloques general del sistema a ser controlado por medio de simulink de Matlab.

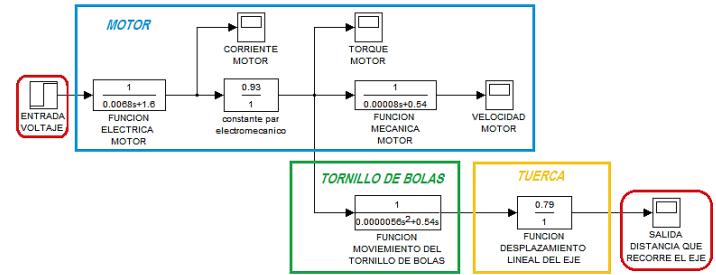


Figura 28. Diagrama de bloques general del sistema

IV. CONCLUSIÓN

Gracias a una minuciosa investigación sobre los cálculos y argumentos válidos que tiene una máquina herramienta por control numérico, se logró concluir con el diseño y construcción de una máquina CNC de tres ejes, dedicada al grabado de placas conmemorativas.

V. AGRADECIMIENTO

El autor agradece la colaboración prestada al ingeniero Carlos Obando por la orientación de este proyecto, y a todas aquellas personas que de una u otra manera, colaboraron en la realización de esta investigación.

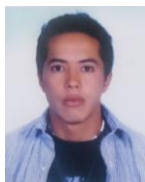
VI. REFERENCIAS

ACT_MOTORS. (2008). *CHANGZHOU ACT MOTOR CO.*
OBTENIDO DE MOTORS AND DRIVERS:
[HTTP://WWW.ACT-MOTOR.COM](http://www.act-motor.com)

Albert, A. (2011). *Understanding CNC Routers: Demystifying CNC Wood Router Technology.* Canada: FPIInnovations.

- Artsoft. (2001). *Artsoft*. Obtenido de <http://www.machsupport.com/about-us/>
<http://www.machsupport.com/about-us/>
- Benjamin C. Kuo. (1996). *Sistemas de Control Automatico*. Pretince - Hall.
- De_maquinas_y_herramientas. (2012). *De maquinas y herramientas*. Obtenido de <http://www.demaquinasyherramientas.com/mecanizado/fresas-tipos-y-usos>
- Guillermo Castro. (2008). *Mecanizado de alta velocidad*. Obtenido de http://campus.fi.uba.ar/file.php/295/Material_Complementario/Mecanizado_de_Alta_Velocidad.pdf
- Iñigo Zuluaga. (2014). *Manual Inkscape*. Obtenido de txapuzas_blogspot: https://dl.dropboxusercontent.com/u/23923366/Gcodetools_Help_ES.pdf
- Roberto L. Mott. (2006). *Diseno de elementos de maquinas*. Mexico: Pearson educacion.
- Sandvik_AB. (2000). *formulas del fresado*. Obtenido de Sandvik: http://www.sandvik.coromant.com/es-es/knowledge/milling/formulas_and_definitions/the_milling_process/
- SKF. (2001). *Catalogo_Husillos de bolas*. Obtenido de SKF: www.skf.com

VII. BIOGRAFÍA



Francisco Campoverde, reside en la ciudad Ibarra-Ecuador, nació el 28 de Octubre de 1989. Realizó sus estudios secundarios en la Academia Militar “San Diego” donde obtuvo el título de Bachiller en la especialidad de Físico – Matemático. Egreso en la Universidad Técnica del Norte en la carrera de Ingeniería en Mecatrónica en el 2014.

Áreas de interés: Desarrollo de proyectos, Robótica, Electrónica, microcontroladores, Automatización y Control industrial. (panchitocam@hotmail.com).



Carlos Obando, nació en la ciudad de Ibarra el 8 de Octubre de 1986. Realizó sus estudios secundarios en la Unidad Educativa “La Salle” donde obtuvo el título de Bachiller en la especialidad de Físico – Matemático. Culminó sus estudios en la Universidad Técnica del Norte en la carrera de Ingeniería en Mecatrónica en el 2011. Fue Presidente del Club de Robótica UTN en el periodo 2009 – 2010. Actualmente es egresado de la maestría en Tecnologías para la Gestión y Práctica Docente en la Pontificia Universidad Católica del Ecuador.

Áreas de interés: robótica, automatización industrial, PLC's, microcontroladores, programación. (cobando@utn.edu.ec).

CNC machine (Computer Numerical Control)

3-axis to engraving plaques

J. Francisco Campoverde (panchitocam@hotmail.com) – Carlos Obando (cobando@utn.edu.ec)
Technical University of North (UTN)

Overview - The present study aims to design and build a machine CNC (computer numerical Control), for recording commemorative plates by means of a motor of high speed milling, improving the quality and process of all types of numbers, letters and graphics you need. The machine is connected via USB to a computer, which is designed or sketch by vector software, is developed to generate and obtain a file in "G code" of the image used. This saved file is read by the card numerical control, the same who interface with the computer and governs the entire electrical system and control of the CNC machine by "MACH3" software, which is in charge of control by the machine software in real time. Once it enters the control board in execution, it sends signals to each of the controllers of the engines, causing the movement of the mechanisms implemented in the (X, Y, Z) axes of the machine. Finely obtaining mobility of engine recorded in the three axes of displacement to record and machined a sketch or design on the plate selected and located on the work area.

Indexes - Coordinates, computerized numerical control, displacement, design by computer, shafts, milling, engraving, machine tool, manufacturing.

I. INTRODUCTION

THE main objective of this research is to design and build a 3 axis CNC machine, which record plaques using design software. This machine will serve specifically for engraving plates and construction focuses on reducing costs, with adjustable and approximate dimensions to the work area for engraving.

For the movement of the 3 axes, is used a couple of guides or Rails on each axis, including intermediate recirculating ball screws, coupled with step motors, which will give the main linear motion in the direction of each axis (X, Y, Z).

This research is based on the study of engraving plates, with the support of different artisans of the city of Ibarra, only Campoverde Jewelry Workshop. Gonzalo Campoverde, owner of the shop, craft Imbabura. Campoverde Francisco, graduated from the race in Mechatronic Engineering at the Technical University of the North (Ibarra - Ecuador). (panchitocam@hotmail.com)

A CNC module, which is responsible for controlling 3 steps with their respective controller's engines will be used for the control of the axes of the machine. Including the interface between the machine and the computer, to run a software suitable for the design and engraving plate.

II. GENERAL ELEMENTS OF A CNC MACHINE

- Work table
- Cutting head
- Motor or spindle of milling
- The three axles shift trucks

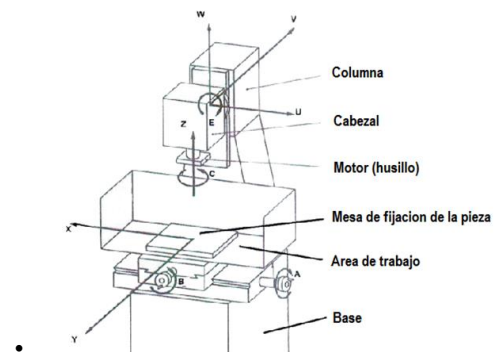


Figure 1. Parts of a CNC milling machine

A. Main working axes

- Axis X: longitudinal movement of the tool (horizontal)
- Axis Y: transverse movement of the table (horizontal)
- Axis Z: movement perpendicular tool (vertical)

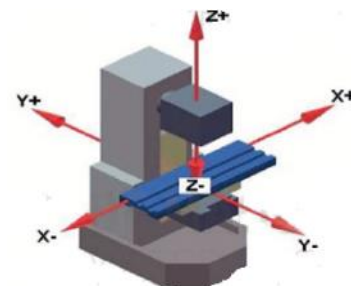


Figure 2. Principal axes of a CNC

B. Transmission systems

• Ball screw transmission



Figure 3. Screw balls (Balls screw)

• Linear guides



Figure 4. Linear guides - linear bearings

C. Motors or actuators for transmission

Hybrid step motors combine the best features of the variable reluctance and permanent magnet.

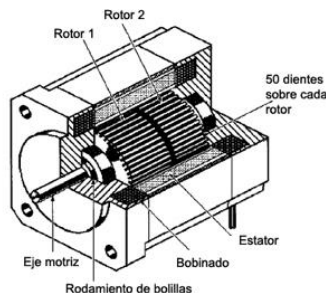


Figure 5. Example of motor hybrid stepper

D. Engraving or main spindle motor

The main spindle is an engine that has high revs and appreciable torque, which is used for cutting of plates



Figure 6. Motor high speed engraving

E. Components for the control of the CNC system

1) Drivers or drivers for step motors

The drivers are compact, ideal and specially made electronic controllers for the control and operation of an engine



Figure 7. Driver for stepper motor

2) Power supplies

Power supplies are in charge of providing the voltage and the current required for the operation of all electrical system CNC.



Figure 8. Power supply

3) CNC control card

A CNC control card is the one that allows to calibrate, configure and interpret the programming commands sent and generated from software, to convert them into electrical signals and control.



Figure 9. CNC control card

4) CNC CONTROL SOFTWARE

The control software to select it, must have the functionality of sort, manipulate, monitor and calibrate the CNC machine in real time



Figure 10. CNC control software

5) Design SOFTWARE

It is useful to open, select and edit any variety of images in your format is concerned, this gives us the availability of create plates with a number of designs



Figure 11. Vector design software

III. DESIGN AND CONSTRUCTION

The structure of a CNC machine in general has a work table which supports and holds the plate and a bridge or head (fixed or mobile), which maintains the mechanical elements of the axes "X" and "Z". The dimensions of the machine originating the work area and the solidity of the structure depends on the weight of the mechanisms and the type of material being machined or record.

In this case the three axis CNC machine is designed with a fixed bridge ("x-axis"), which allows to increase the rigidity of the structure of the machine, for stability in the engraving. The design of the sides that support the "X" axis provides good support symmetric with respect to the sum of the charges that make up the "X" axis and the axis 'Z'; the design is presented in the figure below.

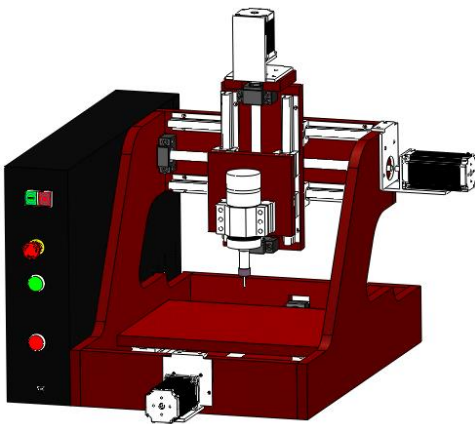


Fig. 12. Design of three-axis CNC machine

A. Dimensions and work area

The dimensions of the three axis CNC machine form an important role in the work area and the role that play machine, as it is the case of burn plates. Then outlined the measures that relate the journey of each one of the shafts, the limits of engraving area and the dimensions of the structure that make up CNC machine:

- a. Dimensiones de la máquina
 - 60 cm de altura
 - 40 cm de ancho
 - 60 cm de profundidad
- b. Área de trabajo
 - 210 mm en el eje X
 - 240 mm en el eje Y
 - 150 mm en el eje Z
- c. Recorrido máximo de cada eje
 - 310 mm de recorrido en el eje X
 - 440 mm de recorrido en el eje Y
 - 230 mm de recorrido en el eje Z

B. Parameters for engraving

1) Calculation of the speed of cut (V_c):

$$V_c [\text{m/min}] = (D \times \pi \times n) / 1000$$

Where:

$D = 2\text{mm}$ diameter of the cutter cutting
 $n = 12000 \text{ RPM}$ revolutions of print engine

2) Calculation of speed (V_f):

This estimate corresponds to the speed that advances with respect to the workpiece cutting tool in the X-Y plane.

$$V_f [\text{mm/min}] = f_z \times n \times Z_c$$

Where:

$f_z = 0.008\text{mm}$ feed per tooth (data from manufacturer)
 $n = 12000\text{RPM}$ the print engine speed
 $Z = 2$ number of teeth of the milling cutter (data from manufacturer)

3) (F_c) cutting force calculation:

Shearing force part of an approximate formula, which depends on a factor called specific pressure of Court (K_c):

$$F_c[\text{N}] = K_c \times A_c$$

Where:

A_c = Area of court

K_c = specific pressure of cutting

C. Calculation and installation of three shafts

A static charge is the force that acts on certain object and where there may be some deformation or breakage. Aims to identify the resulting forces, which are formed from the sum of the loads that support each of the three axes of the machine and thus determine the efforts exerted mechanical systems, such as the linear Rails and screws of balls, which are used for linear transmission in the direction of each axis and displacement.

1) Force resulting from the Z axis



Figure 13. Image of the design and the mass of the "Z" axis

$$F_z = W_z + F_c$$

Where:

F_z = resultant force and the total load that supports the "z-axis"

W_z = weight of the structure of the axis and its elements

F_c = cutting force presenting the engraving

To determine the total weight that supports each of the axes, you must split the sum of all the masses of each of the elements that make up each axis.

2) Resulting from the X axis forced

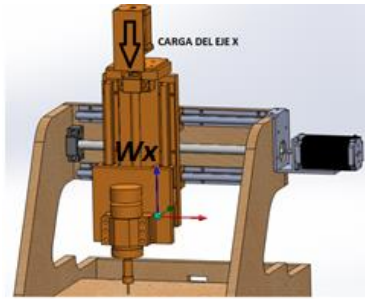


Figure 14. Image of the design and the mass of the "X" axis

$$\begin{aligned} \llbracket \text{masa} \rrbracket_x &= m_z + m_{(\text{motor } z)} + m_{\text{estructura}} + m_{\text{elementos}} \\ \llbracket \text{masa} \rrbracket_x &= 2.6\text{kg} + 1.05\text{kg} + 0.6\text{kg} + 4.7\text{kg} \\ \llbracket \text{masa} \rrbracket_x &= 8.95\text{kg} \\ W_x &= 9\text{kg} \times 9.8 \text{ m/s}^2 \\ W_x &= 88[\text{N}] \\ F_x &= 88[\text{N}] + 100[\text{N}] \\ F_x &= 188[\text{N}] \end{aligned}$$

3) Force resulting from the shaft and



Figure 15. Image of the design and the mass of the shaft "And"

$$\begin{aligned} \llbracket \text{masa} \rrbracket_y &= m_{\text{estructura}} + m_{\text{elementos}} \\ \llbracket \text{masa} \rrbracket_y &= 1\text{kg} + 1.5\text{kg} \\ \llbracket \text{masa} \rrbracket_y &= 2.5\text{kg} \\ W_y &= 2.5\text{kg} \times 9.8 \text{ m/s}^2 \\ W_y &= 24.5[\text{N}] \\ F_y &= 24.5[\text{N}] + 100[\text{N}] \\ F_y &= 125[\text{N}] \end{aligned}$$

D. Displacement of axes for linear guides

For the design of the seats of the three axes (X, Y, Z) of the CNC machine, we must take into account the forces and reactions that Act on systems of linear guides. For transfer and direction of each axis using the catalog of the manufacturer (THK, The Mark of Linear Motion) for the calculation and formulation of the parameters of the linear movement.

1) "Z" axis-linear guides

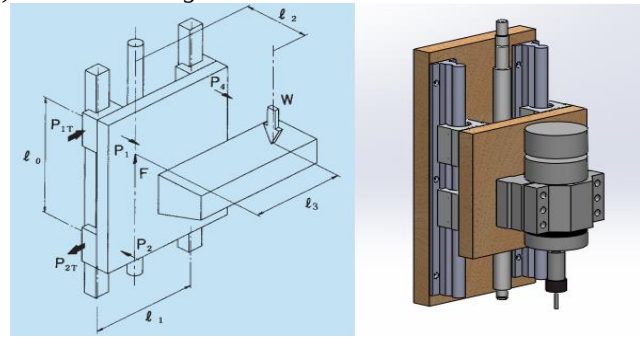


Figure 16. Parameters that determine the "Z" axis loads

$$\begin{aligned} P_1 \sim P_4 &= -(P_2 \sim P_3) = W / 2 \times l_2 / l_0 \\ P_{1T} \sim P_{4T} &= W / 2 \times l_3 / l_0 \end{aligned}$$

- Movement type: Vertical
- Axial length between linear bearings: $l_0 = 57\text{mm}$
- Length between linear guides: $l_1 = 103\text{mm}$
- Length between the transmission and the engraving engine: $l_2 = 73\text{mm}$

2) The "X" axis-linear guides

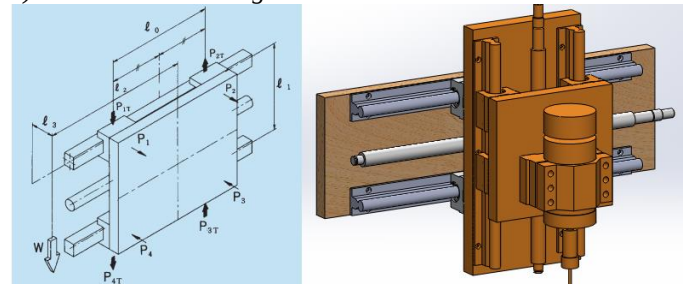


Figure 17. Parameters that determine the loads of the "X" axis

$$\begin{aligned} P_1 \sim P_4 &= W/2 \times l_3/l_1 \\ P_{1T} \sim P_{4T} &= W/4 + W/2 \times l_2/l_0 \\ P_{2T} \sim P_{3T} &= W/4 - W/2 \times l_2/l_0 \end{aligned}$$

- Type of movement: Horizontal (from left to right)
- Axial length between linear bearings: $l_0 = 95\text{mm}$
- Length between linear guides: $l_1 = 107\text{mm}$
- Length between the fence and the center of mass of the total load in Z: $l_3 = 35\text{mm}$

3) Axis linear guides 'And'

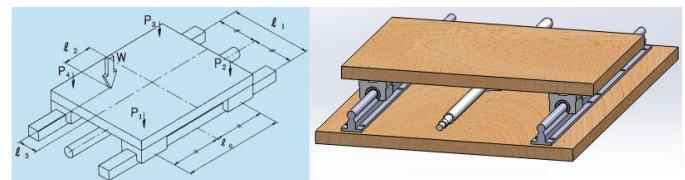


Figure 18. Parameters that determine the axle loads "And"

$$\begin{aligned} P_1 &= W/4 + W/2 \times l_2/l_0 - W/2 \times l_3/l_1 \\ P_2 &= W/4 - W/2 \times l_2/l_0 - W/2 \times l_3/l_1 \\ P_3 &= W/4 - W/2 \times l_2/l_0 + W/2 \times l_3/l_1 \\ P_4 &= W/4 + W/2 \times l_2/l_0 + W/2 \times l_3/l_1 \end{aligned}$$

- Type of movement: Horizontal
- Axial length between linear bearings: $l_0 = 180\text{mm}$
- Length between linear guides: $l_1 = 280\text{mm}$

Software has been used for calculation of design called MDSolid (Mechanics of Deformable Solids Software), to analyze and choose the graph with the magnitude of the bending moment more critical or higher, which is given in the "X axis".

Such magnitude or moment is $M = 5993\text{ N.mm}^2$, which helps us to find approximately the minimum diameter which must have each of the rails or linear guides of the axis of the CNC machine.

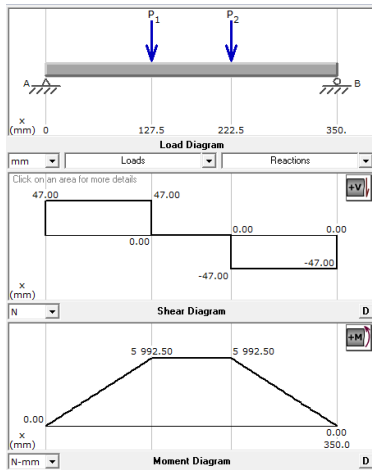


Figure 19. Shear and bending moment diagram

a) *Maximum normal effort:*

$$\sigma_{\max} = S_y/n$$

Where:

$S_y = 276\text{ [N/mm}^2\text{]}$ is the Steel AISI 301 creep resistance (material which is made up of linear guides)
 $n = 2$ is the safety factor

Then you get the maximum for a safety factor of normal force average $n = 2$ for elements with dynamic loads:

Effort with respect to the section for a round beam module:

$$S = M/\sigma_{\max}$$

Calculation and clearance of the diameter of the section for the S-axis module = $(\pi \times d^3) / 32$:

$$d_{\min} = \sqrt[3]{(32 \times S)/\pi}$$

E. Transmission of movement for ball screws

The three axes of CNC machine, are formed by screws of balls "ballscrew" brand (SKF) for the transmission of movement. Ball screw is similar to the work that makes the worm screw and serves to transform the twisting motion that produces stepper, to linear motion motor.

- Diameter of $d_2 = 16\text{mm}$
- Step or screw feed per revolution $Ph = 5\text{mm}$
- Dynamic load given by the manufacturer $Ca = 7.8\text{ KN}$

1) Rated ball screw life

The nominal life of the ball screw gives to know the approximate number of revolutions which reaches to screw or screw until there is the presence of signs of fatigue on the surface of it.

$$L_{10} = (Ca/F_m)^3$$

Where:

The dynamic capacity (manufacturer) $AC = 7800\text{N}$

The load or weight that supports $F_m = F_x$

To load or the weight (F_m) that supports the ball screw, has been chosen the most critical weight, which in this case is the load ($F_x = 188\text{N}$) that occurs in the "X axis".

2) Speed review

The critical speed determines the speed limit or maximum speed that should turn the screw to convey movement.

$$n_{cr} = 49 \times \sqrt[6]{(f_1 \times d_2)/l}$$

Where:

Free to visit length or size of the screw $l = 350\text{mm}$

The diameter of the screw ball $d_2 = 16\text{mm}$

The correction given by manufacturer f_1 factor = 0.8

3) Pair of stable operation

It is the magnitude of torque required to start the rotation of the ball screw.

$$T = (F \times Ph)/(2000 \times \pi \times n_p)$$

Where:

The load Max $F = F_x$

The passage or progress of the screw $Ph = 5\text{mm}$

n_p efficiency = 0.9

4) Power in stable operation

Determine the power needed to perform the linear transmission by means of the ball screw and move the load. It is noted that the following equation depends on the speed that takes the base to be moved.

$$P = (\mu \times F \times V)/n_p \times \sqrt[3]{10}$$

Where:

Friction coefficient $\mu = 0.2$

Truck or V axis speed = 0.03 m/s

5) Working stable for ball screw speed

It is the speed you should take or turn the ball screw to make a good print, taking into account efficiency, wear and the stability of the mechanisms of the CNC machine, to make the machining.

$$n = (60 \times P)/(2\pi \times T)$$

F. Analysis by finite element method

For the analysis of the structure of the CNC machine based on finite element simulation and the study carried out by the software's advanced design "SolidWorks", which shows the calculations and results significant design, such as maximum Von Mises, the maximum deformation stress, the meshing and finite element structure.

1) Structure is subjected to a static study, consisting of a grip of geometry on the base of the machine.

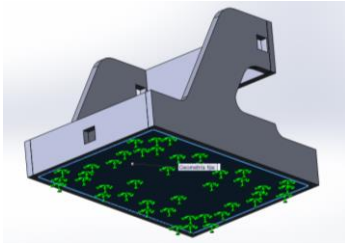


Figure 20. Study in SolidWorks, clamping fixed geometry

2) A force of 340 N was applied at the top of the head, which is the most critical part of the structure and which applies the greatest burden of the elements of the "X" axis and z.

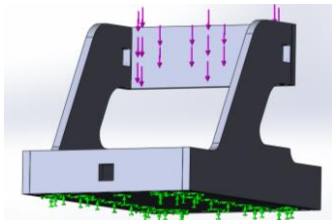


Figure 21. Study in SolidWorks, application of a force or load

3) Standard solid mesh with a total of 17111 nodes and 9047 elements about the analysis.

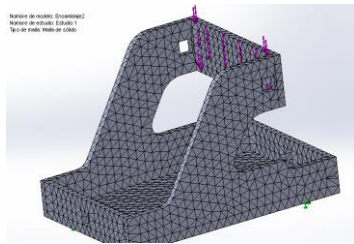


Figure 22. Study in SolidWorks, creation of the grid

4) The maximum Von Mises stress = 1.188MPa, is the maximum effort that can support the structure at the critical point shown with elastic failure.

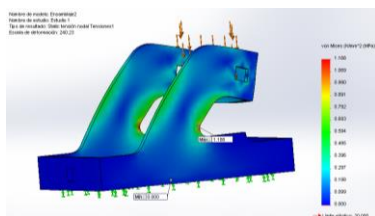


Figure 23. Study in SolidWorks, Von Mises stress

5) Thanks to this study and analysis software can identify a minimum factor of safety with the criterion of Von Mises of a value $n = 16$.

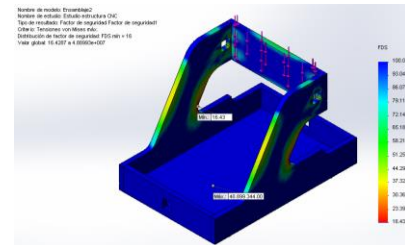


Figure 24. Study in SolidWorks, safety factor

G. Mathematical modelling of the movement carried out the three-axis CNC machine

Below is the part of the mathematical model, which represents the main offset that performs each of the three axes, such as the rotation of the actuator or electric motor, which drives a ball screw which spreads the strength and power required to move each axis using the straight-line method.

1) Function transfer to an electric motor DC

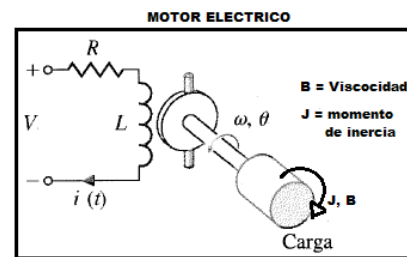


Figure 25. Electromechanical diagram of a DC motor

a) Equation of the electromagnetic couple

This equation has relationship between operating of motor current and torque that gives the engine, being proportional torque constant K_m .

$$T_m = K_m \times I_a(s)$$

b) Equation for the internal of the motor circuit

The equation is given by the electrical internal parameters such as resistance, inductance, voltage and current that circulate in the circuit and the motor coils.

$$V_a(s) = (R_a + L_a \cdot s) I_a(s)$$

c) Mechanical equation

Electric operation of the motor is generated by the current and voltage induced, by moving the motor shaft and delivering a torque or torsional force to move a load. This torque is related to the moment of inertia of the shaft, more factor of viscosity between the shaft and the surface, with the angular velocity.

$$T_m = (J_s + b) \omega(s)$$

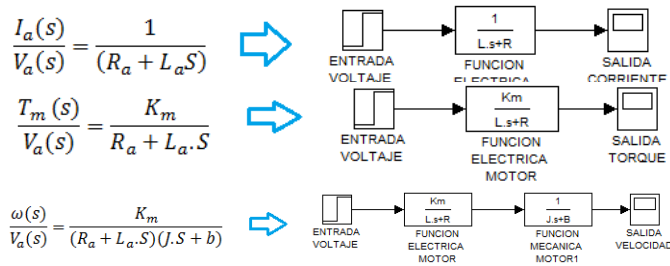


Figure 26. Transfer to a motor functions

2) Function transfer for the screw or ball screw

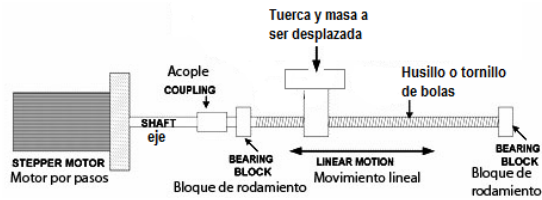


Figure 27. System rotation (motor) - translation (ball screw)

a) Torsional torque in a rotating system:

Then it is defined that the pair in a rotational movement, taking into account the law of Newton, is equal to the product of the inertia by the second derivative of the angular displacement, more the presence of viscous friction in product with the first derivative of the angular displacement:

$$T(s) = J \times \theta'' + B \times \theta'$$

b) Inertia for a rotation system - translation:

$$J = M \left(\frac{L}{2\pi} \right)^2$$

Where:

Mass or load to be moved $M = 9 \text{ kg}$

Step diameter of ball screw spindles $L = 5 \text{ mm}$

c) Viscose friction for a rotational system

$$B = \frac{T_m}{\omega}$$

Where:

The torque delivered engine $\rightarrow T_m = 2.8 \text{ N.m}$

The rotational speed of the system $\rightarrow \omega = 5.14 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$

d) Function transfer system (engine - ball screw)

$$T(s) = J \times \theta s^2 + B \times \theta s$$

$$T(s) = \left(M \left(\frac{L}{2\pi} \right)^2 \cdot s^2 + \frac{T_m}{\omega} \cdot s \right) \theta$$

$$\frac{\text{output (angular displacement)}}{\text{input (engine torque)}} = G(s) = \frac{\theta(s)}{T(s)}$$

3) Function the nut for the linear displacement transfer

a) Linear displacement:

$$X(s) = 5 \text{ mm}$$

b) Angular displacement:

$$\theta(s) = 1 \text{ rev} = 360^\circ = 2\pi \text{ rad}$$

c) Function transfer

$$\frac{\text{output (linear movement)}}{\text{input (angular displacement)}} = H(s) = \frac{X(s)}{\theta(s)} = \frac{5}{2\pi}$$

4) Diagram of the system blocks in general

System general CNC machine, focuses on the movement or displacement of each axis, since these play the role of position cutter in the exact coordinates for machining. Here the general block diagram of the system is to be controlled by means of Matlab simulink.

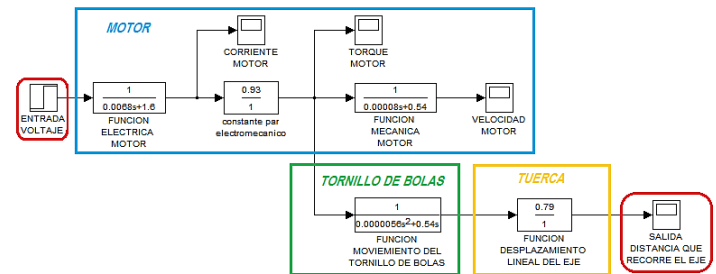


Figure 28. General block diagram of the system

IV. CONCLUSION

Thanks to a thorough investigation about the calculations and valid arguments is a machine tool numerical control, was concluded with the design and construction of a three axis CNC machine, dedicated to the engraving of commemorative plaques.

V. THANKS

The author thanks the collaboration to engineer Carlos Obando by the orientation of this project, and all those who in one way or another, collaborated in this research.

VI. REFERENCES

- ACT_MOTORS. (2008). *CHANGZHOU ACT MOTOR CO.* OBTENIDO DE MOTORS AND DRIVERS: [HTTP://WWW.ACT-MOTOR.COM](http://www.act-motor.com)
- Albert, A. (2011). *Understanding CNC Routers: Demystifying CNC Wood Router Technology.* Canada: FPInnovations.
- Artsoft. (2001). Artsoft. Obtenido de <http://www.machsupport.com/about-us/>: <http://www.machsupport.com/about-us/>
- Benjamin C. Kuo. (1996). *Sistemas de Control Automatico.* Pretince - Hall.

- De_maquinas_y_herramientas. (2012). *De maquinas y herramientas*. Obtenido de <http://www.demaquinasyherramientas.com/mecanizado/fresas-tipos-y-usos>
- Guillermo Castro. (2008). *Mecanizado de alta velocidad*. Obtenido de http://campus.fi.uba.ar/file.php/295/Material_Complementario/Mecanizado_de_Alta_Velocidad.pdf
- Iñigo Zuluaga. (2014). *Manual Inkscape*. Obtenido de txapuzas_blogspot: https://dl.dropboxusercontent.com/u/23923366/Gcodetools_Help_ES.pdf
- Roberto L. Mott. (2006). *Diseno de elementos de maquinas*. Mexico: Pearson educacion.
- Sandvik_AB. (2000). *formulas del fresado*. Obtenido de Sandvik: http://www.sandvik.coromant.com/es-es/knowledge/milling/formulas_and_definitions/the_milling_process/
- SKF. (2001). *Catalogo_Husillos de bolas*. Obtenido de SKF: www.skf.com

VII. BIOGRAPHY



Francisco Campoverde, resides in the city of Ibarra-Ecuador, born on October 28, 1989. Studied secondary military Academy "San Diego", where he obtained the degree of Bachelor in physical - mathematical specialty. Exit at Northern Technical University in engineering in Mechatronics in 2014.

Areas of interest: development of projects, robotics, electronics, microcontrollers, automation and industrial Control. (panchitocam@hotmail.com).



Carlos Obando, was born in the city of Ibarra on October 8, 1986. He studied secondary unit educational "La Salle" where he obtained the degree of Bachelor in physical - mathematical specialty. Ended his studies in Northern Technical University in engineering in Mechatronics in 2011. He was President of the Club of Robotics UTN in 2009-2010. Currently he is a graduate of master in technologies for management and practice teaching at the Pontifical Catholic University of Ecuador.

Areas of interest: Robotics, industrial automation, PLC's, microcontrollers, programming. (cobando@utn.edu.ec).