

DISEÑO MECÁNICO DE UNA MÁQUINA DE TRES GRADOS DE LIBERTAD PARA LA FABRICACIÓN DE CIRCUITOS IMPRESOS

MECHANICAL DESIGN OF A THREE DEGREES OF FREEDOM MACHINE FOR PRINTED CIRCUITS BOARD MANUFACTURE

Rogelio N. Fuentes Ortega

Instituto Politécnico Nacional/Centro de Investigación e Innovación Tecnológica
frogelio1807@yahoo.com.mx

Viridiana G. Hernández Herrera

Instituto Politécnico Nacional/Centro de Investigación e Innovación Tecnológica
vhernandezhe@ipn.mx

Octavio Sánchez García

Instituto Politécnico Nacional/Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada
osanchez0112@gmail.com

Moisés V. Márquez Olivera

Instituto Politécnico Nacional/Centro de Investigación e Innovación Tecnológica
yom91@hotmail.com

Héctor A. Flores Ávalos

Instituto Politécnico Nacional/Centro de Investigación e Innovación Tecnológica
hfloresa@ipn.mx

Laura G. Marrujo-García

Instituto Politécnico Nacional/Centro de Investigación e Innovación Tecnológica
lgmarrujo@gmail.com

Resumen

El presente proyecto de investigación tiene como objetivo diseñar una máquina CNC de tres ejes que permita la manufactura de circuitos impresos PCB (Printed Circuit Board). El diseño propuesto busca minimizar las vibraciones mecánicas y realizar la correcta alineación de los ejes X, Y, Z con la finalidad de obtener mayor precisión en el maquinado de las pistas que conforman al PCB, este planteamiento surge debido a que la estructura tiende a oscilar originando frecuencias resonantes naturales durante el desplazamiento del mecanismo en los

diferentes ejes, si bien estas vibraciones no representan un daño en la estructura de la máquina, ocasionan tensiones en los husillos y en el bastidor que afecta la precisión del maquinado de pistas y vías del PCB, para validar que la propuesta atiende esta problemática, se realizó un análisis de frecuencia como parte del elemento finito (MEF) en SolidWorks, simulando las vibraciones que se presentan en la estructura de la máquina. Los resultados de este estudio permitieron realizar modificaciones en el diseño, las cuales ayudaron a minimizar las vibraciones anteriormente mencionadas.

Palabra(s) Clave: PCB, Circuito Impreso, vibraciones, Diseño Mecánico, Máquina, elemento mecánico.

Abstract

The objective of this research project is to design a three axis CNC machine that allows the manufacture of printed circuits PCB (Printed Circuit Board). The proposed design seeks to minimize mechanical vibrations and perform the correct alignment of the X, Y, Z axes in order to obtain greater precision in the machining of the PCB tracks, this approach arises because the structure tends to oscillate originating natural resonant frequencies during the movement of the mechanism in the different axes, although these vibrations do not represent a damage in the structure of the machine, they cause tensions in the spindles and in the frame that affects the precision of the machining of PCB tracks , to validate that the proposal meet this problem, a frequency analysis was carried out as part of the finite element (MEF) in SolidWorks, simulating the vibrations that occur in the structure of the machine. The results of this study allowed to make modifications in the design, which helped to minimize the above-mentioned vibrations.

Keywords: *PCB, Printed Circuit, vibrations, Mechanical design, machine, mechanical element.*

1. Introducción

Las máquinas-herramienta de Control Numérico Computarizado (CNC) son equipos tecnológicos importantes en el campo de la industria de corte de metales

y construcción de maquinaria, en el mercado se puede encontrar una gama de máquinas CNC con diferentes aplicaciones como: ablación láser, grabado en madera, corte de acrílico, corte de acero o grabado de circuitos electrónicos, cabe destacar que dependiendo del número de ejes o bien los grados de libertad, estas máquinas son capaces de generar formas más complejas en la pieza maquinada (Li, Shrivastava, Gao, & Zhang, 2004). El diseño industrial de máquinas-herramienta CNC es cada vez más importante e innovador, evolucionando el desarrollo tecnológico en estas máquinas para ofrecer nuevas dimensiones y aplicaciones a los productos mecatrónicos, logrando maquinados complejos de mayor precisión y mejores acabados superficiales en las piezas manufacturadas (Yang & Cheng, 2017).

Una aplicación específica y de interés para este proyecto, es utilizar el principio de las máquinas CNC para la manufactura de circuitos impresos PCB, dado que los PCB son la base de interconexión entre componentes para obtener una aplicación final. El alto índice de México como participante en la generación de circuitos impresos crea una oportunidad de inversión de alrededor 607 millones de dólares al año, únicamente para la fabricación de televisores. Si se considera que al momento esos insumos son importados, fabricar circuitos impresos se vuelve un rubro estratégico en el cual nuestro país puede impactar de forma positiva dentro de la cadena de valor de la industria electrónica.

Por ende, diseñar e implementar una máquina para mencionada aplicación tiene como objetivo hacer eficiente en tiempo y calidad la manufactura de circuitos impresos. En comparación con el método de planchado tradicional, una máquina para manufacturar PCB, tiene las siguientes ventajas (Jia, Ma, Song, Wang, & Liu, 2017):

- Tiempos de fabricación se reducen en un rango aproximado de 70-90%.
- Mejora en la precisión del grosor de las pistas de 0.1 mm o 0.004 in.
- Se mejora la calidad y complejidad de los circuitos.

Ahora bien, para poder obtener estas ventajas, la máquina de manufactura PCB debe ser concebida desde su diseño como una estructura con mínimo nivel de

vibraciones, ya que, si se considera que todos los cuerpos que poseen masa y elasticidad son capaces de vibrar, la mayoría de las máquinas y las estructuras experimentan vibraciones y su diseño requiere consideraciones de su conducta oscilatoria, puesto que si alguna de las fuentes de vibración presenta frecuencias coincidentes con una de las frecuencias naturales del elemento estructural, dicho elemento entraría en resonancia, la cual se caracteriza por una amplitud de vibración excesiva, que puede dañar la estructura. Por lo tanto, es necesario conocer las diferentes frecuencias naturales o modos de vibración de los elementos estructurales para evitar las condiciones de resonancia (Ocampo & Jesús Deras, 2015). Además, minimizar las vibraciones permiten reducir errores de manufactura en el producto final, ya que, de no considerarse, el porcentaje de tolerancia en el maquinado de vías y conexiones en el PCB se incrementará afectando a la precisión y repetibilidad del producto.

Luego entonces, es necesario realizar un análisis exhaustivo de las oscilaciones existentes en la estructura de mencionada máquina. Actualmente, los softwares de diseño mecánico permiten realizar este estudio por medio de simulaciones, sin necesidad de llegar al prototipo que representaría un gasto. Particularmente, "SOLIDWORKS Simulation" (Gómez, 2008) es una herramienta de análisis estructural que utiliza el método de análisis de elementos finitos para predecir el comportamiento físico de estructuras probando virtualmente modelos. "Simulation" proporciona capacidades de análisis lineales, no lineales estáticas y dinámicas (Corporation, 2018). La simulación de movimiento con cargas dinámicas por medio de la herramienta mencionada, es de interés para este proyecto, ya que de acuerdo con la literatura es un análisis generalmente utilizado en aplicaciones de máquinas de mecanizado de alta velocidad para minimizar energía en los movimientos o conocer las frecuencias de oscilación de las estructuras, sin embargo, el problema es encontrar una malla óptima de elementos finitos así como contar con los recursos computacionales para el cálculo estructural (Such, Jiménez-Octavio, Carnicero, & Sánchez-Rebollo, 2015).

Con esta problemática en mente, el presente trabajo consiste en el diseño de una máquina para la manufactura de circuitos impresos (CImp-01), que desde la etapa

de diseño contemple reducir las vibraciones en la estructura de la máquina de PCB, comprobándose mediante el análisis de elemento finito, aplicando un estudio de frecuencia para analizar la simulación de la resonancia en la estructura de la Clmp-01. La estructura está formada por elementos estructurales como perfiles tubulares extruidos y barras de acero, que serán capaces de soportar condiciones de cargas estáticas, como ejemplo, el peso propio de la estructura.

Por otro parte, la estructura puede ser afectada por cargas dinámicas como pueden ser las vibraciones, que en este caso tienen un comportamiento con respecto al tiempo ya que se amortiguan y desvanecen con el tiempo.

2. Métodos

El análisis de la estructura se realizó en SolidWorks aplicando cargas estáticas y dinámicas, las cuales utilizan un solver que se encarga de resolver ecuaciones diferenciales a partir de los grados de libertad en cada nodo existente en la malla. La simulación brinda dos opciones para resolver el conjunto de ecuaciones algebraicas; métodos de solución iterativos o directos. Para este proyecto se utiliza el solucionador iterativo FFEPlus, el cual utiliza técnicas de aproximación para resolver el problema, en cada iteración asume una solución y calcula el error asociado para esta, las iteraciones continúan hasta que el error se encuentre dentro del rango de fallo determinado por el usuario en las configuraciones de la generación de los nodos en el mallado.

El método de simulación de elemento finito se genera por medio de los siguientes seis pasos:

- **Definir geometría:** Se debe definir si el análisis será realizado a una pieza o a un ensamble.
- **Definir el material:** En este punto se establecen las propiedades mecánicas a la geometría en estudio, con el objetivo de realizar un análisis más apegado a las condiciones reales de fabricación.
- **Definir el tipo de estudio:** La paquetería de diseño contempla diferentes tipos de estudio que se le pueden realizar a una estructura, a manera de

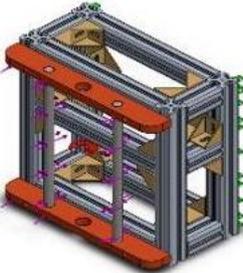
ejemplo se tiene el análisis estático, el análisis de pandeo o el análisis de frecuencia.

- **Restricciones:** Se debe determinar que parte del elemento en análisis va a tener una condición de fijación, movimientos de traslación o rotación.
- **Cargas:** Son las condiciones de operación como la gravedad, fuerzas, presión y definir el tipo de malla.
- **Resultados:** Por último, se obtiene la validación de la estructura para las condiciones de operación y manufactura preestablecidos.

Geometría

Para el estudio se define un ensamble que representa al bastidor que conforma el eje Y de la máquina de prototipado PCB, con las propiedades mostradas en la tabla 1.

Tabla 1 Propiedades del bastidor que conforma el eje Y de la CImp-01.

	
Nombre del modelo: Armadura Y 2.0	
Tratar como	Propiedades volumétricas
Sólido	Masa: 9.98092 kg Volumen: 0.000369664 m ³ Densidad: 2700 kg/m ³

Material

Se consideraron dos materiales de acuerdo con el uso final esperado, acero al carbono para las guías riel, y, aluminio 6063-O para todos los demás elementos de la estructura. Se realizó la configuración de nueve propiedades para cada material, con los valores mostrados en tablas 2 y 3.

Tabla 2 Parámetros de configuración para el aluminio 6063-O.

Barra extruida de aluminio 6063-O	
Propiedad	Valor
Módulo elástico	69000.00067 N/mm ²
Coefficiente de Poisson	0.33 N/D
Módulo cortante	25799.99977 N/mm ²
Densidad de masa	2700 kg/m ³
Límite de tracción	89.99999727 N/mm ²
Coefficiente de expansión térmica	2.3e-05 °K ⁻¹
Límite elástico	41.36854376 N/mm ²
Calor específico	900 J/(kg·K)
Conductividad térmica	218 W/(m·K)

Tabla 3 Parámetros de configuración para el Acero al carbono.

Acero al carbono	
Propiedad	Valor
Módulo elástico	210000 N/mm ²
Coefficiente de Poisson	0.28 N/D
Módulo cortante	79000 N/mm ²
Densidad de masa	7800 kg/m ³
Límite de tracción	399.826 N/mm ²
Coefficiente de expansión térmica	1.3e-05 K ⁻¹
Límite elástico	220.594 N/mm ²
Calor específico	440 J/(kg·K)
Conductividad térmica	43 W/(m·K)

Tipo de estudio

El análisis de interés en este trabajo es el de frecuencia, configurado con los parámetros mostrados en la tabla 4, el cual realiza una aproximación de las vibraciones a las que estará sometida la estructura. Se seleccionó el solver “FFEPlus” considerando que los grados de libertad esperados para esta estructura supera los 100,000, este solver resultará eficaz.

Se configuró la malla con base en la curvatura debido a que los elementos mecánicos que componen la estructura del bastidor tienen radios y chaflanes. Si se seleccionara un mallado estándar, la simulación generaría errores de definición.

Tabla 4 Análisis de frecuencia de la Clmp-01.

Tipo de malla	Malla sólida
Número de frecuencias	3
Tipo de solver	FFEPlus
Muelle blando:	Activar
Opciones de unión rígida incompatibles	Automático
Opción térmica	Incluir cargas térmicas
Temperatura a tensión cero	298 K
Presión de fluidos desde SOLIDWORKS Flow Simulation	Desactivar

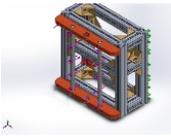
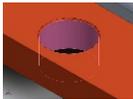
Restricciones

Se configuró la sujeción en configuración de geometría fija en las cuatro caras inferiores del perfil estructural, de tal forma que la estructura no se desplace durante el momento de torsión y carga centrífugas.

Cargas

Considerando que los motores que desplazarán la herramienta de corte en la Clmp-01, generan dos tipos de carga en la estructura (Corredor & Pineda, 2010), fuerza de torsión y fuerza centrífuga, se definió para el análisis las siguientes consideraciones (tabla 5).

Tabla 5 Condiciones de carga para el análisis de la Clmp-01.

Nombre de carga	Cargar imagen	Detalles de carga	
Torsión-1		Entidades: Referencia: Tipo: Valor:	2 cara(s) Cara< 1 > Aplicar momento torsor 0.282 N.m
Centrífuga-1		Centrífuga, Ref: Velocidad angular: Aceleración angular:	Cara< 1 > 6000 rpm 120 rpm^2

Para realizar el análisis de frecuencia se utilizó la paquetería de diseño SolidWorks en su versión 2018, en un equipo de cómputo con las características de desempeño de 24 GB en memoria RAM, procesador core i7, sistema operativo a 64 bits y tarjeta gráfica GeForce GTX 1050.

3. Resultados

En el presente capítulo, se describe el diseño propuesto para la Cimp-01, así como los resultados obtenidos del análisis de frecuencias. Como parte de los resultados se tiene el diseño en SolidWorks de los elementos que conforman la Cimp-01 (figura 1), se partió de un plano en 2D (croquis) con la finalidad de generar un sólido 3D con las dimensiones reales de cada elemento que conforma la estructura de la máquina.

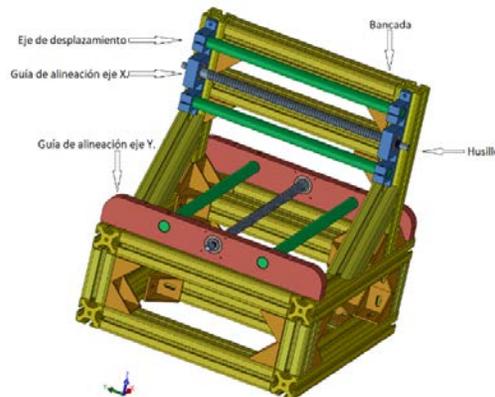


Figura 1 Croquizado y extrusión, alienadora de guías y centrador de husillo.

Diseño de la estructura mecánica

Para el diseño mecánico se contemplaron tres aspectos importantes como es la supresión de vibraciones, alineación de ejes X, Y, Z y robustez en bastidor. Dividiendo así este diseño en seis piezas fundamentales:

- **Bastidor.** Para el diseño del bastidor se realizó el croquis de perfiles de aluminio estructural, considerando en el diseño un material que tuviera la resistencia y robustez adecuada para minimizar las vibraciones, ya que esta estructura da soporte a los sistemas de transmisión y recibe la carga de los esfuerzos generados por el accionar de los motores.
- **Guías de alineación para riel y husillo.** Derivado de un estudio de mercado de máquinas similares a la propuesta en este trabajo, se identificó que es de suma importancia tener los ejes y husillos alineados, puesto que, de ello depende que las dimensiones de las pistas al manufacturar el PCB sean del mismo ancho en cualquier punto de la placa.

- **Acoplamiento de eje de corte.** El eje encargado de transportar a la herramienta de corte, eje Z, es uno de los elementos que recibe mayor carga pues en este va acoplado el husillo, los rieles de alineación y la herramienta. Además de ser el eje donde se presentan más vibraciones como efecto del funcionamiento de la herramienta y el accionamiento de algún de los tres ejes X, Y o Z.
- **Elementos de unión.** La máquina de prototipado PCB que se diseñó emplea para su ensamble elementos de unión desmontables, como, tornillos milimétricos tipo Allen, bujes, seguros y acoples para los motores.
- **Elementos de transmisión de movimiento.** Los cuales se encargan de transferir el movimiento desde los motores hasta el efector final, estos a su vez, se dividen según su transmisión en lineal, circular o mixta. En específico, los elementos de transmisión que componen la Clmp-01 son elementos de transmisión mixta, husillos de bolas de diferentes longitudes para cada eje.
- **Motores.** Los motores contemplados para este proyecto son motores sin escobillas de corriente directa (BLDC Brushless Direct Current), característicos por su alta eficiencia energética y mínimo mantenimiento.

Una vez que se dibujaron todos los elementos mecánicos se procedió a el ensamble (figura 2) virtual de la máquina, quedando esta con dimensiones para X-400 mm, Y-400 mm y Z-300 mm, finalmente se hace el explosionado con animación de la primera propuesta de la máquina.

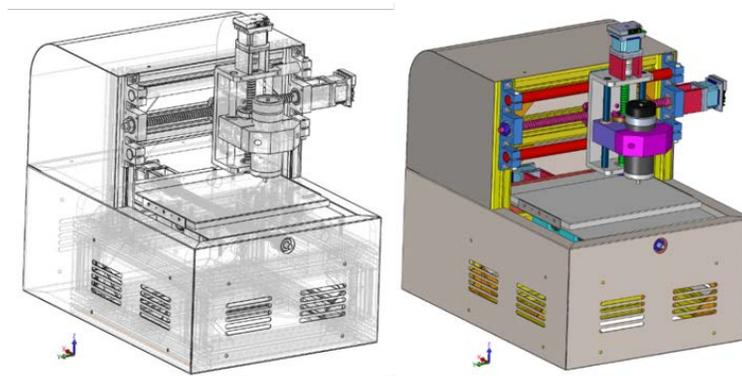


Figura 2 Diseño de la Clmp-01.

Análisis de vibraciones

El estudio de elemento finito en SolidWorks tiene múltiples aplicaciones como análisis estático, térmico, estudio de frecuencia, pandeo, caída, fatiga, diseño de recipiente a presión, dinámica lineal y no lineal. Para esta investigación se hizo un estudio de Método del Elemento Finito o (MEF), aplicando un análisis de frecuencias, el cual consiste en diseñar y ensamblar los elementos mecánicos que integran la máquina de PCB, con la finalidad de identificar las frecuencias resonantes que pudieran afectar el mecanizado de las pistas de los circuitos impresos PCB. Hecho esto, se realiza un mallado y se configura el *solver*, para generar el estudio de frecuencias, el cual permite aplicar cargas a la estructura de la máquina y al sistema de transmisión tornillo sin fin- tuerca que se utiliza para mover los ejes X, Y, Z.

Una vez ensamblados los elementos diseñados, se generó en la base de la CImp-01 una malla con un rango de tamaño para los elementos cuadráticos de 5.67–28.38 mm, generando la malla mostrada en la figura 3, con un total de 983979 nodos, 567798 elementos y coeficiente máximo de aspecto 135.27 (tabla 6).



Figura 3 Mallado de la estructura de la CImp-01.

Tabla 6 Características de la malla generada para la estructura de la CImp-01.

Tipo de malla	Malla sólida
Mallado utilizado	Malla basada en curvatura
Tamaño máximo de elemento	28.3862 mm
Tamaño mínimo del elemento	5.67724 mm
Trazado de calidad de malla	Elementos cuadráticos
Número total de nodos	983979
Número total de elementos	567798
Cociente máximo de aspecto	135.27

Los valores a los que se sometió la estructura de la Clmp-01 para el análisis de vibraciones fueron, 6000 RPM para la centrífuga, representando para el motor BLDC de desplazamiento en “Y” el 100% de su funcionamiento (máxima velocidad), para torsión se aplican 0.282 N.m el cual es el torque que ejerce un motor y, por último, para frecuencia de desplazamiento se asignó un valor de 4000 Hz. Se encontraron tres resultados de forma modal y tres para frecuencias naturales. La tabla 7 muestra los resultados de forma modal y se hace la comparación de los resultados de acuerdo con los parámetros establecidos.

Tabla 7 Resultados de forma modal.

Frecuencia nº.	rad/s	Hertz	Segundos
1	16726	2662.1	0.00037564
2	16743	2664.7	0.00037527
3	19070	3035.1	0.00032948

El desplazamiento 1 (figura 4) presenta una frecuencia de 2662.1 Hz, en ese instante, la escala de deformación por torque y centrífuga es de 0.00394396 en 0.00037554 segundos, en el modo 2 y 3 de desplazamiento las lecturas son similares por lo que podemos deducir que la estructura soporta las cargas establecidas.

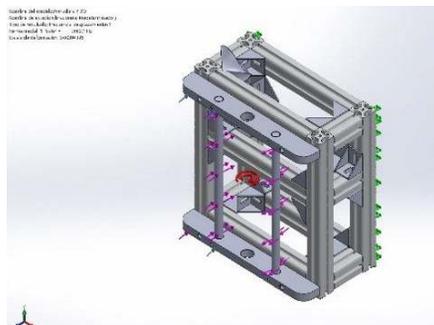
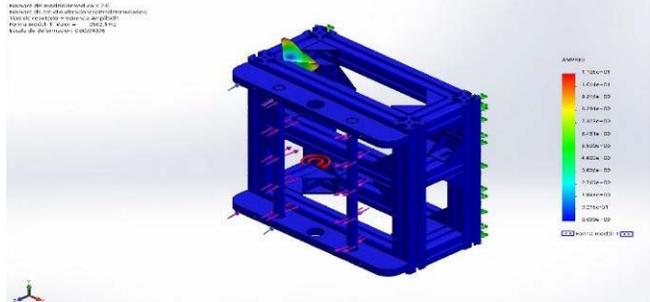


Figura 4 Armadura Y 2.0-vibraciones-Desplazamientos-Desplazamientos1.

En este análisis la amplitud resultante es de 2662.1 Hz, mientras que la deformación mínima es de 0.000e+00 y la deformación máxima de 1.106e+01, es decir que la escala de deformación se encuentra 0.00394396 (tabla 8).

Tabla 8 Análisis de las amplitudes.

Nombre	Tipo	Mín.	Máy.
Amplitud1	AMPRES: Amplitud resultante Plot para forma modal: 1(Valor = 2662.1 Hz)	0.000e+00 Nodo: 111393	1.106e+01 Nodo: 64255
 <p>Armadura Y 2.0-vibraciones-Amplitud-Amplitud1</p>			
Nombre	Tipo	Mín.	Máy.
Amplitud2	AMPRES: Amplitud resultante Plot para forma modal: 2(Valor = 2664.72 Hz)	0.000e+00 Nodo: 111393	1.107e+01 Nodo: 80663

En la tabla 9 y figura 5 podemos observar las frecuencias de la fuerza centrífuga, la cual se muestra como una carga inercial con una trayectoria casi constante del modo uno al modo dos.

Tabla 9 Frecuencia de la fuerza centrífuga.

Nombre de estudio:vibraciones			
Nº de modo	Frecuencia(Rad/seg)	Frecuencia(Hertz)	Período(Segundos)
1	16726	2662.1	0.00037564
2	16743	2664.7	0.00037527
3	19070	3035.1	0.00032948

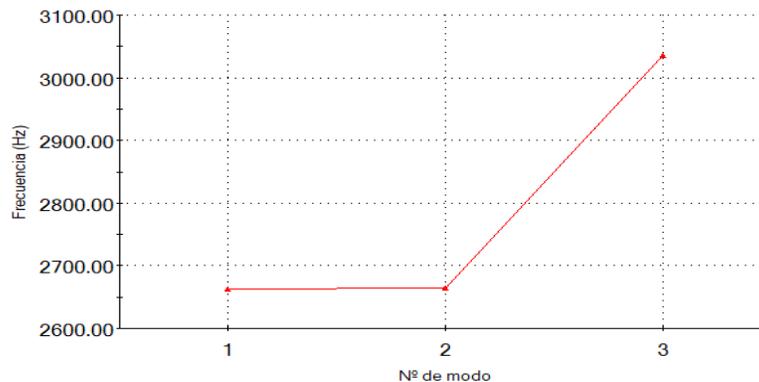
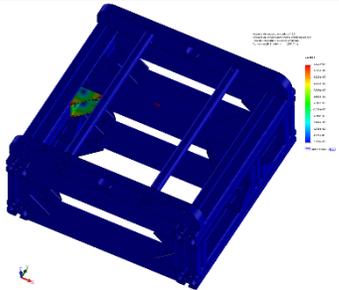
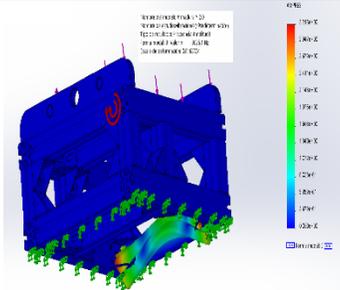
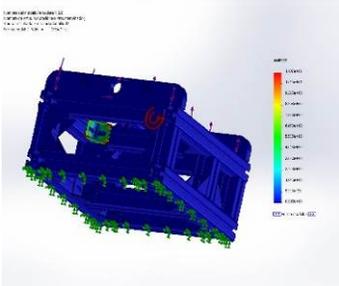
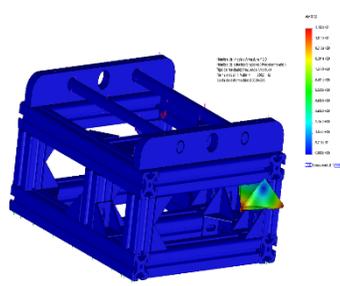


Figura 5 Comportamiento de la fuerza centrífuga.

Por otra parte, se observan las deformaciones resultantes del análisis de frecuencia, donde la estructura se ve afectada por la resonancia en algunos perfiles, cabe mencionar que SolidWorks tiene una escala que lleva al modelo a su máxima resonancia, poniendo a las estructuras al borde de la destrucción. En la tabla 10 se observa que la base de la Clmp-01 está casi en su totalidad de color azul, lo cual indica que la estructura resiste las cargas aplicadas, realizando una validación para comenzar con la fabricación de la estructura.

Tabla 10 Análisis de frecuencias en la estructura de la Clmp-01.

	<p>Deformación en escuadra de unión el cual se encuentra en escala verde y no representa riesgo.</p>		<p>Deformación en perfil estructural, escala de color verde y azul, no representa riesgo de fractura.</p>
	<p>Deformación en escuadra de unión el cual se encuentra en escala verde y no representa riesgo.</p>		<p>Deformación en escuadra de unión el cual se encuentra en escala verde y no representa riesgo.</p>

4. Discusión

Con base en el análisis de la propuesta realizada en el presente trabajo de investigación, enmarcada en la optimización del diseño mecánico de una máquina de prototipado de PCB, es posible decir que:

- La simulación realizada al diseño propuesto para la estructura de las piezas sólidas que permiten sujeción, alineación de husillo y ejes del riel, muestra que al someterse a una carga centrífuga de 4000 Hz se obtiene como resultado una atenuación del ruido vibratorio de 58.5%, es decir que, la simulación presenta una frecuencia de 1660 Hz, lo cual se ve reflejado visualmente en las imágenes de la tabla 10, pudiendo observar que la

estructura de la Clmp-01 está de color azul lo que indica que se encuentra dentro del marco de tolerancia para validar el elemento analizado.

- El diseño dimensional de cada una de las piezas propuestas en este trabajo muestran una diferencia considerable con respecto a las máquinas de prototipado de PCB de gama baja, lo cual se ve reflejado al momento de aplicar una carga de torsión de 4000 Hz, simulando la carga máxima que el motor ejercería para el movimiento del eje; la simulación de elemento finito muestra una frecuencia promedio general de 3035 Hz, lo que representa una disminución de frecuencia de la estructura completa de 24.12%, lo cual es posible validar visualmente en la simulación debido a que las piezas de la estructura durante el estudio presentan nuevamente niveles de color azul, lo cual implica que durante el funcionamiento se estima que no habrá deformación en las diferentes piezas.

Finalmente y basado en los resultados obtenidos del estudio de vibraciones obtenido empleando elemento finito en SolidWorks, es posible decir que el diseño de la estructura propuesta se mantiene dentro de los límites de tolerancia para asegurar que las piezas no serán sometidas a cargas que podrían deformarlas, ya que durante el estudio de simulación se sometió a la carga máxima ejercida por el motor, por lo que se concluye que la estructura es estable y puede continuar con el paso de manufactura y ensamblado.

Una vez que se tiene un diseño de la estructura de la mesa de coordenadas que permitirá soportar el desplazamiento de la plataforma en la que irán montadas las tarjetas fenólicas para su desbaste y barrenado, es posible comenzar con la segunda fase del proyecto, lo cual incluye las siguientes actividades:

- Compra de materiales considerando las características y dimensiones propuestas: perfiles de aluminio, tornillos sin fin, guías, tornillos, piezas de sujeción, tornillos embalados entre otras piezas.
- Manufactura en torno y fresadora CNC de piezas únicas y que por tanto no se encuentran a nivel comercial debido a que las dimensiones propuestas no son estándar o bien forman o son una pieza original.

- Ensamblado de las piezas para concluir con una estructura en físico.
- Incluir el sistema electrónico en el que se incluyen los motores y controladores, así como la creación de la interfaz de comunicación intuitiva para su control y manejo.

5. Bibliografía y Referencias

- [1] Corporation, S. (06/09/2018): <https://www.solidworks.com/product/solidworks-simulation>.
- [2] Corredor, J. M., & Pineda, A. F. (2010). Diseño de control robusto de velocidad de motores brushless para robótica aérea.
- [3] Gómez, S. (2008). El gran libro de SolidWorks.
- [4] Jia, Z.-y., Ma, J.-w., Song, D.-n., Wang, F.-j., & Liu, W. (2017). A review of contouring-error reduction method in multi-axis CNC machining. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*.
- [5] Li, J., Shrivastava, P., Gao, Z., & Zhang, H.-C. (2004). Printed circuit board recycling: a state-of-the-art survey. *IEEE transactions on electronics packaging manufacturing*, 27(1), 33-42.
- [6] Ocampo, J. R., & de Jesús Deras, I. (2015). Aplicación Integrada para Construcción de PCBs mediante Tecnología CNC y Ajuste Automático a la Superficie. *Innovare: Revista de ciencia y tecnología*, 3(1), 27-41.
- [7] Such, M., Jiménez-Octavio, J., Carnicero, A., & Sánchez-Rebollo, C. (2015). Simulación de cargas móviles sobre estructuras mediante un mallado móvil de elementos finitos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 31(4), 212-217.
- [8] Yang, X., & Cheng, K. (2017). Investigation on the Industrial Design Approach for CNC Machine Tools and Its Implementation and Application Perspectives. *Procedia Manufacturing*, 11, 1454-1462: <http://www.science-direct.com/science/article/pii/S2351978917304845>.