

APLICACIÓN DEL MODELO DE CUATRO FASES EN EL DESARROLLO DE UNA FRESADORA CNC

APPLICATION OF THE FOUR-PHASE MODEL IN THE CONSTRUCTION OF A CNC MILLING MACHINE

Luis Alberto Valdéz Aguilar

Tecnológico Nacional de México/I. T. de Apizaco
<https://orcid.org/0009-0000-4722-6443>
l10370680@apizaco.tecnm.mx

Raúl Cortés Maldonado

Tecnológico Nacional de México/I. T. de Apizaco
<https://orcid.org/0000-0001-8463-1325>
raul.cm@apizaco.tecnm.mx

Carlos Bueno Avendaño

Tecnológico Nacional de México/I. T. de Apizaco
<https://orcid.org/0000-0003-3203-5884>
carlos.ba@apizaco.tecnm.mx

Raquel Ramírez Amador

Tecnológico Nacional de México/I. T. de Apizaco
<https://orcid.org/0000-0003-0716-4596>
raquel.ra@apizaco.tecnm.mx

Haydee Patricia Martínez Hernández

Tecnológico Nacional de México/I. T. de Apizaco
<https://orcid.org/0000-0001-8863-4689>
haydee.mh@apizaco.tecnm.mx

DOI: <https://doi.org/10.61273/neyart.v3i1.92>

| Recibido: 01/03/2023 | Aceptado: 08/04/2023 | Publicado: 15/05/2025

Esta obra está bajo
una licencia internacional
Creative Commons Atribución 4.0.



Resumen: En este trabajo se aplica el modelo de cuatro fases, definición de producto, diseño conceptual, diseño de materialización y diseño a detalle para la construcción de una fresadora CNC (control numérico por computadora) para el maquinado de piezas en fibra de densidad media (MDF) de 2.5-12mm de espesor, el trabajo contribuye a mostrar la aplicación metodológica establecida por Pahl & Beitz en un ejemplo real de diseño en ingeniería. La fresadora CNC se construye con una estructura de aluminio de 20×40mm y 20×20mm, así como MDF de 12mm de espesor que brinda la posibilidad de maquinar modelos a partir de diseños CAD en 2D y 3D, el espacio de trabajo efectivo (x, y, z) es de 270×270×50mm. El maquinado de piezas se realiza a partir del movimiento traslacional que realiza el sistema de movimiento de la fresadora sobre el plano x-y y la altura definida sobre el eje z, así como del movimiento rotacional del husillo del sistema de corte. Se presentan las vistas isométricas del diseño CAD de los sistemas de movimiento sobre los ejes x, y, z y de la mesa de maquinado. El control de la fresadora CNC se realiza mediante una tarjeta Arduino uno, una placa CNC shield para Arduino, controladores para motor a pasos, motores a paso de 1.8°. Todos los componentes son comerciales, lo que permite desarrollar un prototipo de bajo costo. Finalmente, se describe el proceso de operación de la máquina, así como la hoja de proceso para el maquinado de piezas.

Palabras clave: Diseño CAD, Fresadora CNC, Modelo de cuatro fases.

Abstract: In this work, the four-phase model is applied, product definition, conceptual design, materialization design and detailed design for the construction of a CNC (computer numerical control) milling machine for machining parts in medium density fiberboard (MDF) of 2.5-12mm thick, the work contributes to show the methodological application established by Pahl & Beitz in a real example of engineering design. The CNC milling machine is built with a 20×40mm and 20×20mm aluminum structure, as well as 12mm thick MDF that provides the possibility of machining models from 2D and 3D CAD designs, the effective workspace (x, y, z) is 270×270×50mm. The machining of parts is carried out from the translational movement that the milling machine movement system performs on the x-y plane and the height defined on the z axis, as well as the rotational movement of the cutting system spindle. Isometric views of the CAD design of the movement systems on the x, y, z axes and the machining table are presented. The CNC milling machine is controlled by an Arduino Uno card, a CNC Shield board for Arduino, stepper motor drivers, 1.8° stepper motors. All components are commercial, which allows the development of a low-cost prototype. Finally, the machine operation process is described, as well as the process sheet for machining parts.

Keywords: CAD design, CNC milling machine, Four-phase model.

INTRODUCCIÓN

El proceso de creación y desarrollo de un producto o máquina a partir de funciones específicas es una de las tareas más complejas e interesantes en el ámbito de la ingeniería. En este proceso multidisciplinario la teoría de máquinas y mecanismos, control de calidad, cálculo y simulación, ergonomía, entre otras, se integran para obtener un producto que se ajusta a las necesidades de un proyecto [1-5]. Las metodologías de diseño de productos o máquinas pueden clasificarse en dos grupos (Cross, 2021), el primero corresponde a las metodologías descriptivas, algunas de ellas son las propuestas por Cross (Cross, 2021), Ferrer Real (Ferrer Real, 2007), French (French, 1971) y Roozenburg & Eekels (Roozenburg & Eekels, 1995). Estas metodologías se enfocan en describir la secuencia de actividades tal y como ocurren durante el proceso de diseño. El segundo grupo corresponde al de metodologías prescriptivas que se caracterizan por ser sistemáticas o algorítmicas y responder a la pregunta ¿Cómo hacerlo? (Romero, Martí, & Romeva, s. f.). Algunas de las metodologías prescriptivas más conocidas para el proceso de creación y desarrollo de un producto son el modelo de cuatro fases de Pahl y Beitz (Pahl, Beitz, Feldhusen, & Grote, 2007), el

método de diseño de Ulrich y Eppinger (Ulrich, 2013), la norma alemana VDI 2222 (Richtlinie, 1977) y VDI 2221 (Guideline, 1987), entre otras.

El modelo de cuatro fases establecido por Pahl & Beitz para el diseño de una máquina o producto ha sido un referente en la ingeniería de diseño y ha sido aplicado en diferentes contextos [2,14-22], consiste en descomponer el diseño en una serie de pasos secuenciales para fomentar la generación de múltiples soluciones, seleccionando la que se ajuste más a los objetivos del proyecto (Pahl et al., 2007). La primera fase del modelo es la definición de producto donde se establece la lista de aspectos y requerimientos del producto final, esta etapa es fundamental en el proceso de diseño, el resultado de esta etapa es un documento de especificación. La segunda etapa es el diseño conceptual, donde a partir de las especificaciones del producto se plantean y evalúan alternativas de principio de solución, también recibe el nombre de concepto de producto. Esta etapa se considera la más crítica ya que aproximadamente el 80% de los costos del producto se determina durante esta fase (Mayda & Borklu, 2014; Pahl et al., 2007). La tercera etapa es el diseño de materialización, también llamada configuración de diseño, presenta un panorama general de los componentes, piezas, dimensiones, materiales, entre otros, para el proceso de montaje. La última etapa es el diseño a detalle que consiste en definir la configuración final de las piezas, tales como formas, dimensiones y componentes del diseño, así como la selección definitiva del material. También se prepara la documentación del producto para la fabricación, los resultados de esta actividad se dan mediante los planos de piezas, los listados de componentes y los esquemas de montaje (Pahl et al., 2007).

El modelo de cuatro fases es flexible y puede adaptarse fácilmente a diferentes productos y proyectos (Borges & Rodrigues, 2010; Çavdar, Börkli, Çavdar, & Sezer, 2019; Civelek, Brem, Fritz, & Zimmermann, 2024; Weiss & Hari, 2015), esto la convierte en una herramienta valiosa en la ingeniería de diseño, donde se busca desarrollar productos innovadores y competitivos en el mercado (Civelek et al., 2024; Weiss & Hari, 2015). Diferentes metodologías para el desarrollo de productos y máquinas han sido aplicadas en el desarrollo e implementación de máquinas CNC [24-31]. Dichas máquinas son ampliamente utilizadas en procesos industriales de manufactura y en instituciones educativas, ya que facilitan el maquinado preciso de modelos complejos de piezas en materiales como metal, madera, plástico, entre otros [24, 32-34], incrementando la producción en masa al disminuir los tiempos de operación. El maquinado de piezas puede realizarse por arranque de viruta mediante el movimiento de

distintas herramientas rotativas perfiladas accionadas mecánicamente (Pelayo & Trejo, 2023; Rattat, 2017).

En este trabajo se aplica la metodología de cuatro fases para el diseño e implementación de una fresadora CNC para MDF de 2.5 – 12mm de tres ejes, el control se realiza mediante Arduino Uno (Arduino, 2024) y motores a paso. La fresadora CNC está enfocada al mecanizado de piezas a través de modelos 2D y tiene por objeto atender la necesidad de optimizar tiempos, recursos económicos e infraestructura de microempresarios, artesanos y emprendedores que laboran con materiales de baja densidad, tal como lo es el MDF en espesores de 2.5 a 12mm, mejorando la calidad de los productos que ofertan. Por otra parte, la fresadora CNC que se presenta, también tiene por objeto aportar a los estudiantes de ingeniería un procedimiento claro y conciso que les permita desarrollar su propia máquina CNC a un bajo costo para maquinar piezas con base en diseños elaborados en software de diseño asistido por computadora (CAD) que desarrollan en asignaturas como diseño asistido por computadora, mecanismos, diseños de elementos mecánicos, manufactura avanzada, por mencionar algunas.

DESARROLLO

El presente trabajo se enmarca en el paradigma cuantitativo, con un enfoque aplicado que tiene como objetivo la implementación de una fresadora CNC mediante la aplicación del modelo de cuatro fases para el desarrollo de un producto, el esquema general se muestra en la Figura 1, en cada etapa se plantean los resultados esperados de acuerdo con Pahl & Beitz (Pahl et al., 2007).



Figura 1. Modelo de cuatro fases para el diseño de una máquina o producto.

Fuente. Elaboración propia con base en [7].

Definición del producto. La fresadora CNC debe cumplir con las funciones de cortar, perforar y desbastar MDF de 2.5 a 12 mm a través de movimientos en el espacio (ejes x , y , z), se considera un área de corte máxima de 27×27 cm. Con el objetivo de trasladar fácilmente el prototipo, sus dimensiones finales no deben sobrepasar 80x80x30 cm. Los materiales disponibles para el desarrollo de la fresadora

son: motores a paso de 1.8° por paso, fuente de 12 V, MDF de 12 mm, microcontrolador, controladores para motor A4988 que integra dos puentes H (*A4988 Stepper User Guide*, 2024; *CNC/3-Axis Stepper Motor Shield User Guide*, 2024; Culda, Muncut (Wisznovszky), & Erdodi, 2021), banda dentada, tornillo sin fin. La fresadora CNC debe operar con energía eléctrica de 120 V de corriente alterna y frecuencia de 60 Hz con un consumo máximo de potencia de 200 W.

Diseño conceptual. A partir de las especificaciones establecidas en la definición del producto se elabora el diseño conceptual que presenta el principio de solución y la estructura funcional del mismo, ver Figura 2a). Los elementos entrantes en la fresadora CNC son la energía eléctrica de 120 V a.c., una placa de MDF con dimensiones máximas de 27×27 cm y el código de pieza a maquinarse. Las salidas son el MDF maquinado que contiene el diseño elaborado mediante CAD y el MDF desbastado.

Diseño de materialización. La Figura 2b) muestra las alternativas de diseño realizadas en SolidWorks (*3D CAD Design Software | SOLIDWORKS*, 2024) para los tres elementos principales del prototipo: sistema de corte, sistema de movimiento de los ejes y soporte de máquina. Para el sistema de corte se consideraron tres opciones, en cada caso se consideró un tipo de herramienta en particular. La primera es un spindle con masa de 1.2 kg y potencia de 300 W, su precio aproximado es de 184 USD («300W Spindle Kit for CNC Router Masuter Pro & Masuter 3», 2024). El segundo es un router de 1.5 kg y 550 W de potencia, el precio es de aproximadamente 75 USD («Bosch - Router GKF 550 127V 550W con 2 pinzas : Amazon.com.mx: Herramientas y Mejoras del Hogar», 2024) y el tercero es un Dremel 3000 de 0.6 kg y 130 W de potencia, su precio aproximado de 60 USD («Dremel 3000-N/10 Herramienta Rotativa 3000PA con 10 Accesorios : Amazon.com.mx: Herramientas y Mejoras del Hogar», 2024); en los tres casos es posible utilizar fresas para realizar el corte. En lo referente al sistema de movimiento de los ejes se propone utilizar un motor a paso de 1.8° grados por paso y un sistema de bandas para el sistema de transición en las tres alternativas del sistema de corte. Para el soporte de la máquina también se propusieron tres alternativas de diseño, la primera considera el uso de ejes acerados, la segunda es la implementación de tubos cuadrados de acero y la tercera utiliza perfiles de aluminio.

Después de analizar la potencia y costos de cada alternativa para el sistema de corte se eligió el Dremel 3000, ya que cuenta con la potencia necesaria para cortar MDF de 2.5 a 12 mm, es ligero, accesible económicamente y presenta el menor consumo de energía eléctrica (Wu, 2023). Asimismo, es una herramienta que no sobrepasa los 20 cm de longitud y tiene un ancho de 5 cm, esto la hace una herramienta que optimiza el área de corte definido. Para el sistema de movimiento se utilizan motores paso a paso de

1.8° que operan a 0.4 A (Jiang et al., 2023), estos son suficientes para mover cada uno de los ejes con buena precisión. También se considera el uso de poleas dentadas para los ejes x , y debido a que son más económicas en comparación a una varilla, las únicas piezas adicionales que se necesitan son los tensores para fijar la banda y las poleas tensoras. En el eje z se utiliza una varilla roscada, esto se debe a la necesidad de soportar el peso adicional del Dremel cuando se mueve verticalmente. En cuanto al soporte de la máquina, las opciones uno y dos utilizan rodamientos metálicos que suelen desgastarse muy rápido debido a la fricción. Por tal motivo se seleccionó el perfil de aluminio, donde pueden usarse ruedas de plástico, además de que puede ajustarse con mayor facilidad en comparación con las otras dos alternativas. Por lo antes mencionado, se concluye que la mejor alternativa de diseño para los tres elementos principales del prototipo es la que se presenta en la columna tres (diseño definitivo).

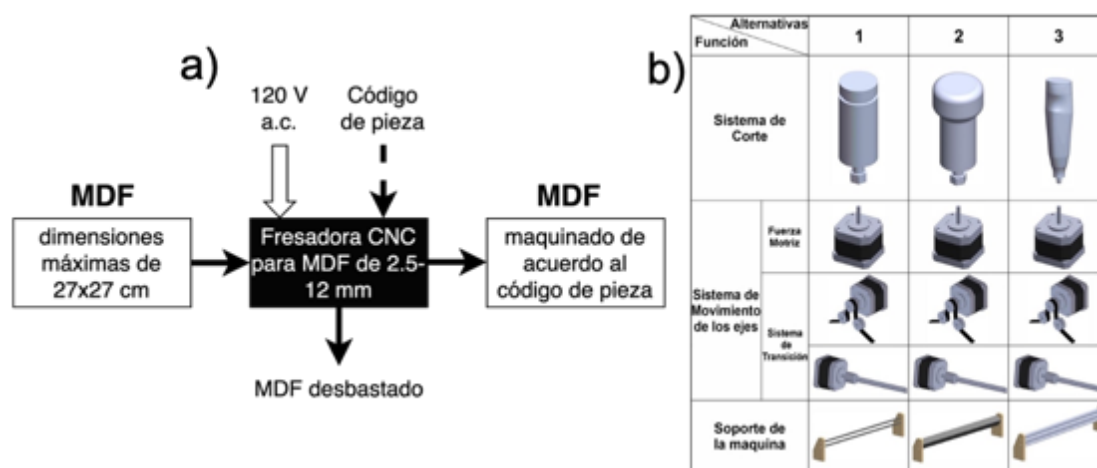


Figura 2. a) Diagrama a bloques del diseño conceptual. b) Diseños preliminares elaborados en SolidWorks (3D CAD Design Software | SOLIDWORKS, 2024) para el sistema de corte, sistema de movimiento de los ejes y soporte de la máquina.

Fuente. Elaboración propia.

Diseño a detalle. El prototipo se realiza con placas de MDF debido a que es un material fácil de adquirir y manipular (Sütcü & Karagöz, 2012), está constituido por tres etapas con las siguientes funciones («Diseño Mecánico de la Estructura para un Router CNC», s. f.): la primera consiste en proporcionar los movimientos en los ejes x , y , z junto con el sistema de deslizamiento lineal. La segunda función es sujetar la máquina de corte, que en este caso es un Dremel 3000. La tercera consiste en sujetar el MDF, evitando el movimiento u oscilaciones de la misma al entrar en contacto con la fresa. La Figura 3a) muestra la vista isométrica del sistema de movimiento del eje x , este se conforma de un motor paso a paso, una polea

dentada de 20 dientes, dos poleas tensoras, 8 ruedas tipo V-Slot, 2 tornillos M3, 4 tornillos M5, 6 tuercas M5, 18 arandelas M5, 8 separadores para las ruedas. El movimiento lineal en dirección horizontal x implica el uso de un sistema de deslizamiento, el cual proporciona el movimiento a lo largo de dicha dirección. Para realizar la tarea de deslizamiento se utiliza un motor paso a paso fijado a la placa 2 de dicho eje, la fijación se realiza con dos tornillos M3 y una polea de 20 dientes fijada a su eje en combinación con una banda dentada Gt2 de 6 mm abierta. El carro que se mueve de manera libre está constituido de dos placas de MDF de 12mm unidas por 4 tornillos M5 en los que se colocan los 8 separadores con sus respectivas ruedas, las 4 ruedas inferiores utilizan separadores excéntricos para ajustar la presión que las ruedas ejercen sobre los perfiles de aluminio.

La Figura 3b) muestra la vista isométrica del sistema de movimiento del eje y , este se conforma de 2 motores paso a paso, 2 poleas dentadas de 20 dientes, 4 poleas tensoras, 4 perfiles de aluminio 20×40 mm y 50cm de longitud. También se consideran 8 ruedas tipo V-Slot, 4 tornillos M3, 12 Tornillos M5, 20 arandelas M5, 16 tornillos M6, 8 separadores para las ruedas (no se muestran en la figura). El desplazamiento en la dirección y es similar al desplazamiento en la dirección x . Al sistema se le integra una serie de ruedas V-Slot, las cuales permiten el movimiento traslacional en esta dirección sin algún tipo de obstrucción, también brindan estabilidad al momento de realizar el maquinado. El sistema de movimiento en y se encuentra unido al sistema de movimiento en x por medio de dos perfiles de aluminio unidos a dos placas de MDF de 12 mm de espesor llamadas placas laterales. Este eje se traslada a través de dos perfiles impulsados por dos motores paso a paso con su respectiva banda, los motores en cada extremo permiten mantener el equilibrio en la máquina completa evitando la aparición de vibraciones. La Figura 3c) muestra la vista isométrica del sistema de movimiento sobre el eje z con el soporte para el Dremel, este se conforma de un motor paso a paso, una polea dentada de 20 dientes, una polea dentada de 60 dientes, un rodamiento con diámetro interno de 8 mm y otro con soporte, una varilla sin fin, 2 perfiles de aluminio 20×20 mm y 25 cm de longitud. También se consideran 4 ruedas tipo V-Slot, 2 tornillos M3, 2 tornillos M4, 18 tornillos M5, 6 tornillos tipo “T” M5, 2 arandelas M5 (no se muestran en la figura). El sistema de movimiento en dirección z proporciona un desplazamiento vertical y es el responsable de llevar a cabo la profundidad de corte en la pieza de trabajo. Este sistema utiliza un tornillo sin fin que pasa por el centro de dos rodamientos y su respectiva tuerca acme con soporte fijado con dos tornillos M4 a la placa de MDF ubicada en la parte superior. El movimiento de giro que genera el motor paso a paso se transmite de la polea dentada de 40 dientes a la de 20 dientes que se encuentra fijada a la

varilla sin fin por medio de una banda cerrada de 228 mm, esto produce un movimiento lineal. El sistema de movimiento en z se une con el sistema de movimiento en x por medio de dos perfiles de aluminio de 20×20 mm fijados a la placa conocida como Placa para Dremel (PpD). La unión se realiza con 6 tornillos M5 de 16 mm y 6 tuercas en tipo T. Para poder fijar el Dremel en la PpD, se realizaron perforaciones de 5mm en la placa para colocar los soportes utilizando 4 tornillos M5. Los soportes son fabricados mediante impresión 3D y tienen un orificio en el centro del mismo tamaño que el diámetro del Dremel, cuenta con un orificio para tornillo Allen M5 de 2 cm cada uno que atraviesan los soportes en su grosor, estos tornillos se aprietan para fijar la herramienta de corte.

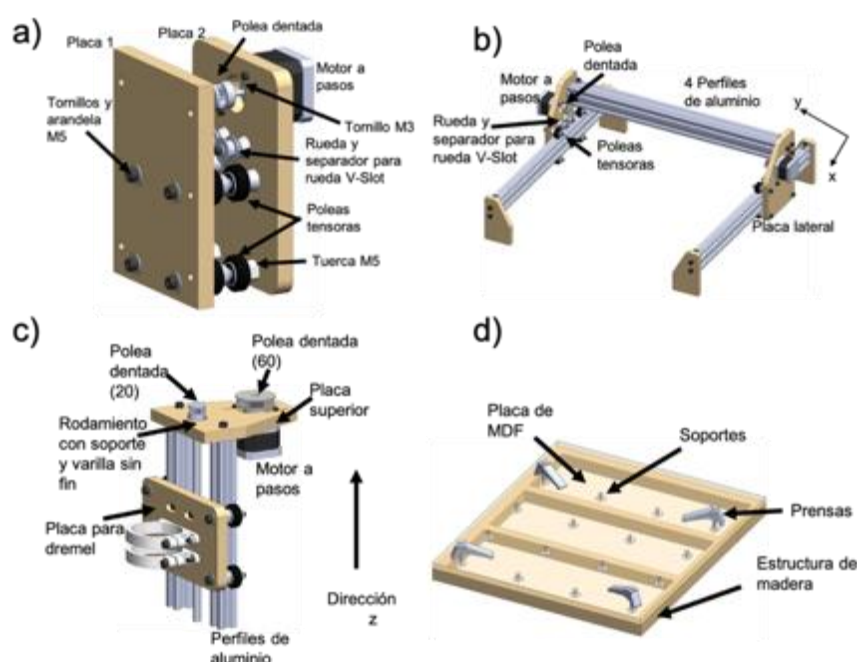


Figura 3. a) Sistema completo de movimiento del eje x. b) Sistema completo de movimiento del eje y. c) Sistema completo de movimiento del eje z. d) Sistema completo de la mesa de maquinado.

Fuente. Elaboración propia.

La Figura 3d) muestra la vista isométrica de la mesa de maquinado que está constituida por una placa de MDF de 12 mm de espesor y dimensiones de 44×50 cm que se encuentra unida a una estructura de madera de las mismas dimensiones. Dicha estructura está hecha con tiras de madera de 20×30 mm. También se muestran las 16 tuercas de inserto que constituyen los soportes para el material, en ellas se colocan las prensas para sujetar a la mesa de trabajo el material a maquinar. El diseño de la mesa de maquinado tiene el objetivo de fijar los materiales a ella para poder maquinarlos, así como unir el sistema

de movimiento del eje y a la misma. De esta manera, la mesa de maquinado también tiene la función de ser un soporte adicional de la fresadora CNC, ayudando a mantener estabilidad de toda la estructura durante el proceso de maquinado.

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

El proceso de ensamble CAD del sistema de movimiento espacial de cada uno de los sistemas descritos se muestra en la Figura 4a), el ensamble físico se realiza con placas de MDF. Para el eje x se cortaron 2 placas de 11×15cm, para el eje y se cortaron 6 placas, 2 de 12×16.5cm y 4 de 6×10cm. Para el eje z se cortó una placa de 11×13cm y una segunda de 10×15cm (ver Figura 4b)). Las perforaciones y desbastes de cada placa se hicieron con la ayuda de un taladro y dremel, respectivamente. Los soportes, separadores, poleas dentadas, ruedas V-Slot, poleas tensoras y banda dentada se imprimieron en 3D con filamento PLA. También se utilizaron tornillos, pijas, arandelas, tuercas, rodamientos, perfiles de aluminio y varilla roscada con su respectiva tuerca acme (no se muestran en la figura).

En el desarrollo del proyecto se utilizó una tarjeta Arduino uno (Arduino, 2024), una placa CNC shield para Arduino (*CNC/3-Axis Stepper Motor Shield User Guide*, 2024), controladores para motor a pasos (*A4988 Stepper User Guide*, 2024), motores a paso comerciales de 1.8° que corresponde a 200 pasos por revolución, fuente de alimentación de 12V dc y conectores. Los motores a paso se han utilizado en configuración de 1/8 de paso para los ejes x e y y de 1/2 paso para el eje z . En este eje se utiliza una varilla de 4 hilos con un desplazamiento de 8mm, los pasos por milímetro en este eje se calculan cómo (Conti, 2013):

$$pp_{mm} = \frac{p_m \cdot \mu_p}{r_{vv}} \quad (1)$$

Donde pp_{mm} son los pasos por milímetro, p_m son los pasos del motor, μ_p es la cantidad de micropasos y r_{vv} es el recorrido de la varilla por vuelta. Al sustituir los valores $p_m = 200$, $\mu_p = 2$ y $r_{vv} = 8$ se obtiene $pp_{mm} = 50$. Debido a que en este eje se utiliza una polea de 60 dientes en el eje del motor y otra de 20 dientes en la varilla roscada se tiene una relación de 3:1, esto es, por cada 50 pasos que da el motor, la varilla roscada recorre tres milímetros, se requieren 16 pasos para que la varilla se desplace un milímetro. Para el caso de los ejes x e y se utilizan una banda dentada Gt2 y poleas de 20 dientes, la forma de calcular los pasos por milímetro es (Conti, 2013),

$$pp_{mm} = \frac{p_m \cdot \mu_p}{p_c \cdot N_d} \quad (2)$$

Donde pp_{mm} son los pasos por milímetro, p_m son los pasos del motor, μ_p es la cantidad micropasos, p_c es el paso de la correa y N_d es el número de dientes de la polea. Al sustituir los valores $p_m = 200$, $\mu_p = 8$ y $p_c = 2$ y $N_d = 20$ se obtiene $pp_{mm} = 40$. Los valores obtenidos se utilizan para configurar el software Universal G-Code Sender (2023) que controla la fresadora CNC.

Por otro lado, es necesario calcular el voltaje de referencia para el correcto movimiento del motor mediante el controlador A4988 y un puente H. El controlador incorpora un control de corriente PWM para el puente H, este limita la corriente de carga I_{TRIP} a un valor deseado. El valor máximo para la limitación de la corriente se identifica como $I_{TRIPMAX}$ y se relaciona con el voltaje de entrada del pin REF del controlador, V_{REF} , mediante la ecuación («DMOS Microstepping Driver with Translator and Overcurrent Protection», 2024),

$$V_{REF} = I_{TRIPMAX}(8 \cdot R_S) \quad (3)$$

Donde R_S es la resistencia de detección [35]. La corriente nominal para los motores utilizados es de 0.4A y la resistencia de detección del driver es de 0.1Ω , con estos valores y a partir de la Ec. 3 se obtiene $V_{REF} = 0.32V$, este valor se configura con el potenciómetro que se incluye en el driver. El diagrama general de conexiones se muestra en la Figura 4c). El Dremel se conecta a los 110V que alimentan la fuente de alimentación de 12V, en ambos se implementa un interruptor para permitir el flujo cuando este sea requerido. Los controladores se conectan a la placa CNC shield con sus respectivos motores. A su vez, la placa se conecta al Arduino Uno, el cual cuenta con un conector hembra tipo B que comunica a la computadora (PC) a través de un puerto USB.

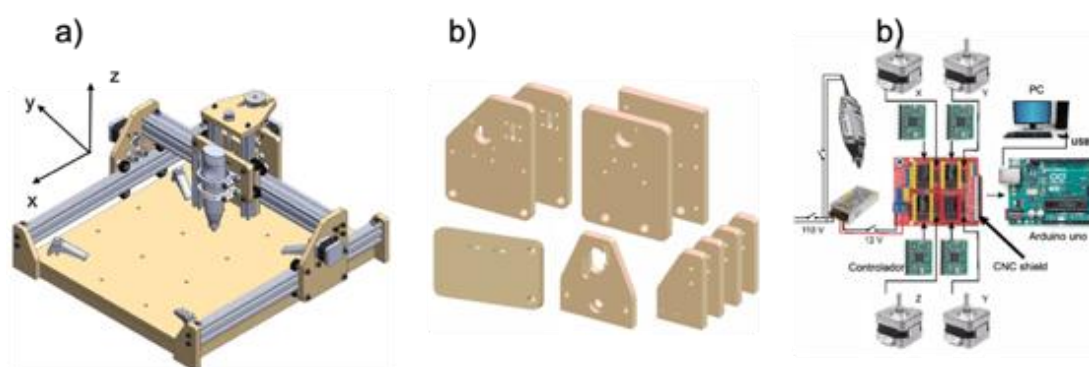


Figura 4. a) Diseño CAD de la fresadora CNC completa. b) Placas para ensamblar la estructura. c) Diagrama general de conexiones de componentes eléctricos y electrónicos para la Fresadora CNC.

Fuente. Elaboración propia

El ensamble de la fresadora CNC y la conexión eléctrica se realizó de forma satisfactoria, la versión final se muestra en la Figura 4. El proceso de maquinado de una pieza en el diagrama de flujo de la Figura 4. El primer paso es realizar el diseño CAD de la pieza, el segundo paso es exportar el diseño CAD con extensión DXF (Formato de Intercambio de Dibujos) a un programa CAM. El tercer paso es realizar la configuración todos los procesos de mecanizado para elaborar la pieza requerida en programa CAM, por ejemplo, configurar el corte, desbaste y perforación, profundidad, velocidad y herramienta para el corte, así como la profundidad por pasada, entre otros. Si la configuración de los procesos de mecanizado ha sido finalizada se procede a generar el código de programación (código G). A continuación, a través de la interfaz Universal G-Code Sender, se carga programa y se ajustan los parámetros a cero de tal modo que el dremel tenga la ubicación x_0 , y_0 , z_0 , tanto en el software como físicamente. También en la Figura 4 se presenta la hoja de proceso para el maquinado de una pieza hexagonal, las columnas uno y dos muestran las operaciones a realizar (desbaste, perforación, corte), así como los parámetros de operación: velocidad de corte (V_c), velocidad de bajada con la que la fresa se introduce en el material a maquinar (V_b) y profundidad de pasada en milímetros, respectivamente. En la columna se indica la información relacionada con el tipo de herramienta de corte a utilizar y la columna cuatro muestra el esquema de cada proceso.

La fresadora CNC que se ha desarrollado cumple con el objetivo de cortar MDF de 2.5-12 mm. Durante el proceso de maquinado puede ocurrir un calentamiento sobre el eje del Dremel y la fresa, ante esta situación se realizan desbastes de profundidad no mayor a 1mm para evitar un sobrecalentamiento en el dremel. En las pruebas que se realizaron se observó un trabajo continuo de la fresadora CNC de hasta 2 horas en MDF de 5mm. Un video sobre la puesta en operación de la fresadora CNC desarrollada puede consultarse en (Cortés-Maldonado, 2023). Finalmente, es importante mencionar que en el desarrollo del proyecto se utilizaron materiales comerciales, lo que permite que el costo final aproximado del proyecto sea de 250 USD.

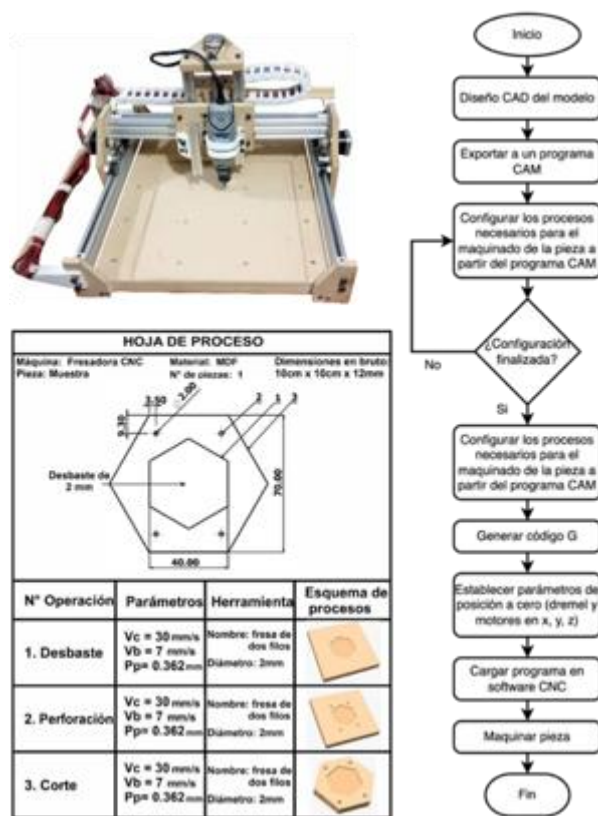


Figura 5. Fresadora CNC desarrollada, diagrama de flujo y hoja de proceso para el maquinado de piezas.

Fuente. Elaboración propia.

CONCLUSIONES

En este trabajo se aplicó de forma satisfactoria el modelo de cuatro fases para el diseño e implementación de una fresadora CNC para MDF de 2.5 – 12 mm de tres ejes. La fresadora está enfocada en el mecanizado de piezas a partir de modelos 2D y 3D. Las dimensiones finales de la máquina propuesta son 580 mm en ancho, 320 mm en altura y profundidad de 510 mm, el espacio de trabajo en los ejes x, y, z es de 270×270×50 mm, la velocidad de corte es de 30 mm/s y la velocidad de rotación del husillo es de 9,600 rpm. Su capacidad para producir piezas complejas con alta precisión la convierte en una herramienta útil para micro y pequeñas empresas que se dedican a la elaboración de artesanías en MDF, ya que les permite optimizar tiempos, recursos económicos e infraestructura, mejorando la calidad de los productos que oferta. Asimismo, el trabajo presentado contribuye a mostrar la aplicación metodológica establecida por Pahl & Beitz en un ejemplo real de diseño en ingeniería que puede ser incorporado en la formación de

estudiantes de ingeniería. En la implementación de la fresadora se integraron materiales y elementos comerciales lo que da como resultado una máquina económicamente accesible.

TRABAJO A FUTURO

El trabajo desarrollado establece un punto de partida para incorporar herramientas tecnológicas emergentes en el proceso de maquinado, tal como la integración de sistemas de monitoreo mediante el internet de las cosas (IoT) que permitan el ajuste dinámico de parámetros como velocidad de rotación del husillo, así como el avance y profundidad del sistema de corte.

Adicionalmente, el modelo de cuatro fases ha demostrado ser una metodología flexible y estructurada que promueve buenas prácticas de diseño modular y escalabilidad, lo cual facilita la reproducción de proyectos tanto en contextos industriales como académicos. Como parte de los trabajos a futuro se propone aplicar el modelo de cuatro fases en el diseño de otros sistemas mecatrónicos complejos, tales como el diseño de brazos robóticos, sistemas de automatización, impresoras 3D o incluso hornos de oxidación.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al TecNM/Instituto Tecnológico de Apizaco las facilidades brindadas para el desarrollo del trabajo.

REFERENCIAS

- 3D CAD Design Software | SOLIDWORKS*. (2024). Recuperado de <https://www.solidworks.com/>
- 300W Spindle Kit for CNC Router Masuter Pro & Masuter 3 [Comercio electrónico]. (2024). Recuperado de FoxAlien website: https://www.foxalien.com/products/300w-spindle-kit-for-cnc-router-3018-se-v2?srsId=AfmBOoo3q-n1of6YMaKqujZzockalcgKkIflobTNGE_JPr4Bz1pZQE_6
- A4988 Stepper User Guide*. (2024). HandsOn Tech. Recuperado de <https://www.handsontec.com/dataspecs/module/A4988.pdf>
- Aitcheson, R., Friedman, J., & Seebom, T. (2005). 3-Axis CNC Milling in Architectural Design. *International Journal of Architectural Computing*, 3(2), 161-180. <https://doi.org/10.1260/1478077054214460>
- Arduino. (2024). *UNO R3*. Recuperado de <https://docs.arduino.cc/hardware/uno-rev3/>

- Borges, F. M., & Rodrigues, C. L. P. (2010). Pontos passíveis de melhoria no método de projeto de produto de Pahl e Beitz. *Gestão & Produção*, 17(2), 271-281. <https://doi.org/10.1590/S0104-530X2010000200005>
- Bosch—Router GKF 550 127V 550W con 2 pinzas: Amazon.com.mx: Herramientas y Mejoras del Hogar [Comercio electrónico]. (2024). Recuperado de Bosch—Router GKF 550 127V 550W con 2 pinzas: Amazon.com.mx: Herramientas y Mejoras del Hogar website: https://www.amazon.com.mx/Fresadora-Cantos-GKF-550-Bosch/dp/B08BWBLWN8/ref=sr_1_4?dib=eyJ2IjoiMSJ9.YWNqEjE9yJQ30BgrfEwuwRBdL-7ysnPSIUstM0_KD0yW4lNKNcC3kPwIRA5caN6wxQ9hi82WHgabdinQ-6_dbzhgBKosOvE3thR_j2QOx79vKy94rRgm8eYmyEn6VEmASAdT5xtlNZAmEnA3zIsOcYxhkU5&th=1
- Carneiro, V., Rangel, B., Lino Alves, J., & Barata Da Rocha, A. (2023). The Path to Integrated Project Design (IPD) Through the Examples of Industrial/Product/Engineering Design: A Review. En B. Rangel, A. S. Guimarães, J. Moreira Da Costa, & J. P. Poças Martins (Eds.), *Integrated Project Design* (pp. 167-196). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-32425-3_7
- Çavdar, F. Y., Börklü, H. R., Çavdar, K., & Sezer, H. K. (2019). The design process of the complex Special Utility Vehicle using the methodical design approach. *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, 13(4), JAMDSM0070-JAMDSM0070. <https://doi.org/10.1299/jamdsm.2019jamdsm0070>

- Civelek, F., Brem, A., Fritz, K.-P., & Zimmermann, A. (2024). Product Development Processes for Individualized Products: A Case Study. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 71, 6190-6204. <https://doi.org/10.1109/TEM.2023.3277019>
- CNC/3-Axis Stepper Motor Shield User Guide. (2024). HandsOn Tech. Recuperado de <https://www.handsontec.com/dataspecs/module/cnc-3axis-shield.pdf>
- Conti, F. (2013). *Motores Paso a Paso*. Libreria y Editorial Alsina. Recuperado de <https://books.google.com.mx/books?id=Ycd6jgEACAAJ>
- Cortés-Maldonado, R. (2023, mayo 28). CNC. Recuperado de https://apizacotecnm-my.sharepoint.com/:v/g/personal/raul_cm_apizaco_tecnm_mx/ES-5ZtEXew5Fq6hEbQlbyUQBNkpjTyMYVzLJG_6PeClbEA?e=4FKlTE
- Cross, N. (2021). *Engineering Design Methods: Strategies for Product Design*. Wiley. Recuperado de <https://books.google.com.mx/books?id=O-cSEAAQBAJ>
- Culda, L., Muncut (Wisznovszky), E., & Erdodi, G. (2021). Transforming 3D printed CNC prototype into a plotter. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1169(1), 012013. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1169/1/012013>
- Davim, J. P., Clemente, V. C., & Silva, S. (2009). Surface roughness aspects in milling MDF (medium density fibreboard). *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 40(1-2), 49-55. <https://doi.org/10.1007/s00170-007-1318-z>
- Diseño Mecánico de la Estructura para un Router CNC [Repositorio]. (s. f.). Recuperado de Repositorio Digital Facultad de Ingeniería, UNAM website: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/handle/132.248.52.100/5355>

DMOS Microstepping Driver with Translator and Overcurrent Protection. (2024). Recuperado de DMOS

Microstepping Driver with Translator—A4988 | Allegro MicroSystems website:

<https://www.allegromicro.com/en/products/motor-drivers/brush-dc-motor-drivers/a4988>

Dremel 3000-N/10 Herramienta Rotativa 3000PA con 10 Accesorios: Amazon.com.mx: Herramientas y

Mejoras del Hogar [Comercio electrónico]. (2024). Recuperado de Dremel 3000-N/10

Herramienta Rotativa 3000PA con 10 Accesorios: Amazon.com.mx: Herramientas y Mejoras del

Hogar website: [https://www.amazon.com.mx/3000-N-10-Herramienta-Rotativa-](https://www.amazon.com.mx/3000-N-10-Herramienta-Rotativa-Accesorios/dp/B00XVPTPFW/ref=sr_1_1?__mk_es_MX=%C3%85M%C3%85%C5%BD%C3%95%C3%91&crid=2O1VJW2YZZJ9D&dib=eyJ2IjoiMSJ9.M-BKGVVth-OWMvduRVFy69xwbEFPSEs9NMd-rriXV6sFaJwToUaPpAGwvWUnWFFlfube2ESM628YBq4fB6d)

[Accesorios/dp/B00XVPTPFW/ref=sr_1_1?__mk_es_MX=%C3%85M%C3%85%C5%BD%C3](https://www.amazon.com.mx/3000-N-10-Herramienta-Rotativa-Accesorios/dp/B00XVPTPFW/ref=sr_1_1?__mk_es_MX=%C3%85M%C3%85%C5%BD%C3%95%C3%91&crid=2O1VJW2YZZJ9D&dib=eyJ2IjoiMSJ9.M-BKGVVth-OWMvduRVFy69xwbEFPSEs9NMd-rriXV6sFaJwToUaPpAGwvWUnWFFlfube2ESM628YBq4fB6d)

[%95%C3%91&crid=2O1VJW2YZZJ9D&dib=eyJ2IjoiMSJ9.M-BKGVVth-](https://www.amazon.com.mx/3000-N-10-Herramienta-Rotativa-Accesorios/dp/B00XVPTPFW/ref=sr_1_1?__mk_es_MX=%C3%85M%C3%85%C5%BD%C3%95%C3%91&crid=2O1VJW2YZZJ9D&dib=eyJ2IjoiMSJ9.M-BKGVVth-OWMvduRVFy69xwbEFPSEs9NMd-rriXV6sFaJwToUaPpAGwvWUnWFFlfube2ESM628YBq4fB6d)

[OWMvduRVFy69xwbEFPSEs9NMd-](https://www.amazon.com.mx/3000-N-10-Herramienta-Rotativa-Accesorios/dp/B00XVPTPFW/ref=sr_1_1?__mk_es_MX=%C3%85M%C3%85%C5%BD%C3%95%C3%91&crid=2O1VJW2YZZJ9D&dib=eyJ2IjoiMSJ9.M-BKGVVth-OWMvduRVFy69xwbEFPSEs9NMd-rriXV6sFaJwToUaPpAGwvWUnWFFlfube2ESM628YBq4fB6d)

[rriXV6sFaJwToUaPpAGwvWUnWFFlfube2ESM628YBq4fB6d](https://www.amazon.com.mx/3000-N-10-Herramienta-Rotativa-Accesorios/dp/B00XVPTPFW/ref=sr_1_1?__mk_es_MX=%C3%85M%C3%85%C5%BD%C3%95%C3%91&crid=2O1VJW2YZZJ9D&dib=eyJ2IjoiMSJ9.M-BKGVVth-OWMvduRVFy69xwbEFPSEs9NMd-rriXV6sFaJwToUaPpAGwvWUnWFFlfube2ESM628YBq4fB6d)

Ferrer Real, I. (2007). *Contribución metodológica en técnicas de diseñar para fabricación*.

French, M. J. (1971). *Engineering Design: The Conceptual Stage*. Heinemann Educational. Recuperado

de <https://books.google.com.mx/books?id=gkuEQgAACAAJ>

Goetz, S., Hartung, J., Schleich, B., & Wartzack, S. (2019). Robustness Evaluation of Product Concepts

based on Function Structures. *Proceedings of the Design Society: International Conference on*

Engineering Design, 1(1), 3521-3530. <https://doi.org/10.1017/dsi.2019.359>

Goetz, S., Schleich, B., & Wartzack, S. (2020). Integration of robust and tolerance design in early stages

of the product development process. *Research in Engineering Design*, 31(2), 157-173.

<https://doi.org/10.1007/s00163-019-00328-2>

Guideline, V. (1987). 2221: Systematic Approach to the Design of Technical Systems and Products.

Düsseldorf: VDI, 17-25.

- Isa, H., Rahman, M. A., Hazmilah, H., Sihombing, H., Saptari, A., Baharudin, A. B., & Syaheera, A. (2013). Ergonomic Design of CNC Milling Machine for Safe Working Posture. *Applied Mechanics and Materials*, 465-466, 60-64. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.465-466.60>
- Jiang, S.-B., Chuang, H.-C., Kung, C.-W., Deng, X.-G., Shen, Y.-P., & Chen, L.-W. (2023). Innovative Microstepping Motor Controller With Excitation Angle-Current Dual-Loop Feedback Control. *IEEE Access*, 11, 62382-62393. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3288023>
- Kannengiesser, U., & Gero, J. S. (2017). Can Pahl and Beitz' systematic approach be a predictive model of designing? *Design Science*, 3, e24. <https://doi.org/10.1017/dsj.2017.24>
- Mayda, M., & Börklü, H. R. (2014). An integration of TRIZ and the systematic approach of Pahl and Beitz for innovative conceptual design process. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 36(4), 859-870. <https://doi.org/10.1007/s40430-013-0106-y>
- Mayda, M., & Borklu, H. R. (2014). Development of an innovative conceptual design process by using Pahl and Beitz's systematic design, TRIZ and QFD. *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, 8(3), JAMDSM0031-JAMDSM0031. <https://doi.org/10.1299/jamdsm.2014jamdsm0031>
- Mendes, L. A., Back, N., & Oliveira, G. H. C. (2009). Designing automated test systems: An adapted methodology inspired on Pahl and Beitz's systematic approach. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 25(6), 945-950. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2009.04.006>
- Paehler, L., & Matthiesen, S. (2024). Mapping the landscape of product models in embodiment design. *Research in Engineering Design*, 35(3), 289-310. <https://doi.org/10.1007/s00163-024-00433-x>

- Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J., & Grote, K. H. (2007). *Engineering Design: A Systematic Approach*. Springer London. Recuperado de <https://books.google.com.mx/books?id=57aWTCE3gE0C>
- Pelayo, G. U., & Trejo, D. O. (2023). *Procesos de mecanizado convencional*. Aula Magna Proyecto clave McGraw Hill. Recuperado de <https://books.google.com.mx/books?id=BZ7hEAAAQBAJ>
- Rattat, C. (2017). *CNC Milling for Makers: Basics—Techniques—Applications*. Rocky Nook. Recuperado de <https://books.google.com.mx/books?id=d3srDwAAQBAJ>
- Richtlinie, V. (1977). 2222 Blatt 1: Konstruktionsmethodik. *Konzipieren technischer Systeme und Produkte, Düsseldorf: VDI-Verlag*.
- Romero, E. B., Martí, L. F., & Romeva, C. R. (s. f.). *PLAN DE INVESTIGACIÓN*.
- Romeva, C. R., & Upc, U. E. (2010). *Diseño concurrente*. UPC, S.L., Edicions. Recuperado de <https://books.google.com.ec/books?id=IeaPng4UWdgC>
- Roozenburg, N. F. M., & Eekels, J. (1995). *Product Design: Fundamentals and Methods*. Wiley. Recuperado de <https://books.google.com.mx/books?id=4p8nAQAAMAAJ>
- Shneor, Y. (2018). Reconfigurable machine tool: CNC machine for milling, grinding and polishing. *Procedia Manufacturing*, 21, 221-227. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.114>
- Soeprapto, E. F., Fatmawati, A., & Puspitorini, P. (2023). *Innovation of batik fixation machine with Pahl and Beitz methods*. 2706(1). AIP Publishing.
- Stone, R. B., & Wood, K. L. (1999). *Development of a functional basis for design*. 19739, 261-275. American Society of Mechanical Engineers.
- Sütcü, A., & Karagöz, Ü. (2012). Effect of machining parameters on surface quality after face milling of MDF. *Wood Research*, 57(2), 231-240.

- Ulrich, K. T. (2013). *Diseño y desarrollo de productos: Quinta edición*. McGraw-Hill/Interamericana Editores S.A. de C.V. Recuperado de <https://books.google.com.mx/books?id=XwJyswEACAAJ>
- Universidad Autónoma de Manizales, Colombia, Mejía-López, J. A., Ruiz-Guzmán, O. A., Universidad Nacional de Colombia, Gaviria-Ocampo, L. N., Centro de Procesos Industriales y Construcción, Servicio Nacional de aprendizaje Sena, Manizales, Colombia, ... Universidad Nacional de Colombia. (2019). Aplicación de metodología “DESIGN THINKING” en el desarrollo de cortadora automática CNC para MIPYMES de confección. *Revista UIS Ingenierías*, 18(3), 157-168. <https://doi.org/10.18273/revuin.v18n3-2019016>
- Wang, K., Tan, R., Peng, Q., Wang, F., Shao, P., & Gao, Z. (2021). A holistic method of complex product development based on a neural network-aided technological evolution system. *Advanced Engineering Informatics*, 48, 101294.
- Wang, K.-C., Jung-Chin Liang, & Yu-Cai Lin. (2008). Form design of CNC machine tools using SVM-Kansei engineering model. *2008 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, 143-149. Singapore, Singapore: IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICSMC.2008.4811265>
- Wei, Q. (2013). *Design and analysis of a small-scale cost-effective CNC milling machine*.
- Weiss, M. P., & Hari, A. (2015). Extension of the Pahl & Beitz Systematic Method for Conceptual Design of a New Product. *Procedia CIRP*, 36, 254-260. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.03.010>
- Winder. (2023, diciembre 1). Home [Página web pública]. Recuperado de GitHub website: <https://github.com/winder/Universal-G-Code-Sender/wiki/>
- Wu, H. (2023). *Design of autonomous robotic system for removal of porcupine crab spines*.

Wynn, D., & Clarkson, J. (2005). Models of designing. En *Design process improvement: A review of current practice* (pp. 34-59). Springer.

TABLA TRABAJO COLABORATIVO

Rol	Autor (es)
Conceptualización	Luis Alberto Valdéz Aguilar, Raúl Cortés Maldonado
Metodología	Raúl Cortés Maldonado
Software	Luis Alberto Valdéz Aguilar
Validación	Raúl Cortés Maldonado, Raquel Ramírez-Amador, Haydee Patricia Martínez-Hernández
Análisis Formal	Luis Alberto Valdéz-Aguilar, Raúl Cortés Maldonado, Carlos Bueno Avendaño
Investigación	Raúl Cortés Maldonado
Recursos	Luis Alberto Valdéz Aguilar
Curación de datos	Raquel Ramírez Amador, Haydee Patricia Martínez Hernández
Escritura - Preparación del borrador original	Raúl Cortés Maldonado, Raquel Ramírez-Amador, Haydee Patricia Martínez-Hernández
Escritura - Revisión y edición	Raúl Cortés Maldonado, Carlos Bueno Avendaño