

SISTEMA DE MOVIMIENTO GIRATORIO Y SELECCIÓN DE CUATRO EXTRUSORES PARA UNA IMPRESORA 3D

Jorge Méndez*, Richard Portilla†, Daniel Álvarez‡, Christian Vásquez§,

*Carrera de Ingeniería en Mecatrónica, Universidad Técnica del Norte, Email: jemendeze@utn.edu.ec

†Carrera de Ingeniería en Mecatrónica, Universidad Técnica del Norte, Email: rdportillaf@utn.edu.ec

‡Carrera de Ingeniería en Mecatrónica, Universidad Técnica del Norte, Email: daalvarez@utn.edu.ec

§Carrera de Ingeniería en Mecatrónica, Universidad Técnica del Norte, Email: crvasquez@utn.edu.ec

Abstract—This paper presents a 3D Printer multiextruder system, which through its rotating movement allows the selection of 4 extruder heads, allowing to work with only one head at time, preventing the other three heads extruders interrupt the printing process. This system, being removable and lightweight, is easily coupled to the movement generation system on the X, Y, Z axes of the 3D printer, and thanks to its resolution, excellent printing qualities are obtained, even printing more than a single color and / or material. With the multi-extrusion system, it is possible to work with several types of materials, such as filaments as ABS, PLA, Carbon Fiber type, or obtaining flexibility thanks to the TPU.

Keywords: Impresión 3D, FDM, termoplásticos, multicabezal, extremo caliente hexagonal, motor a pasos, plataforma caliente, DUET, firmware.

I. INTRODUCCIÓN

La impresión 3D ha experimentado un fuerte crecimiento en los últimos años ya que es una tecnología que funciona muy diferente, comparada con las tres técnicas principales de fabricación de objetos. La aplicación del esculpido, fresado o perforación requiere la utilización de numerosas herramientas, máquinas y diferentes materiales. Por lo tanto la impresión 3D permite fabricar objetos mediante la superposición de capas sucesivas (fabricación aditiva); así la impresión 3D viene a ser una opción barata y una solución para quienes requieran fabricar objetos en infinidad de materiales empleando poco tiempo. La impresión 3D se lleva a cabo con la ayuda de una impresora 3D. Ésta máquina puede variar en forma, tamaño, costos, técnica utilizada, etc.; y siempre está relacionada con sistemas informáticos indispensables para el proceso de impresión, pues permiten preparar el archivo 3D del objeto (diseño CAD) y controlar la máquina durante todo el proceso de impresión.

El Modelado por Deposición Fundida (FDM), es el proceso de impresión 3D más antiguo y consiste en depositar sucesivamente un filamento termoplástico. Las impresoras que trabajan con ésta tecnología usan una boquilla de extrusión a través de la cual pasa el filamento. El material se funde a más de 185°C y es depositado sobre una base caliente en capas muy finas (0,2mm de grosor), permitiendo que la capa anterior depositada se endurezca y se adhiera a la siguiente capa desde

la base a la cima. Los materiales utilizados por la FDM son generalmente termoplásticos como ABS o PLA [1].

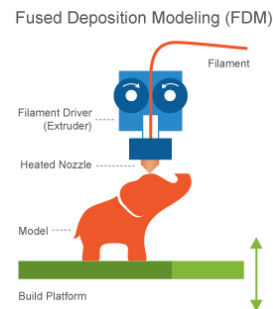


Figura 1. Proceso de impresión mediante tecnología FDM.

II. METODOLOGÍA

Los pasos que se seguirán en el diseño del sistema multiextrusor se enlistan a continuación:

- Requisitos funcionales
- Requisitos de diseño
- Selección de componentes
- Diseño mecánico
- Simulación
- Configuración de parámetros en el firmware
- Pruebas de funcionamiento

A. Requisitos funcionales

Las funciones que realiza el sistema multiextrusor son las siguientes:

- Movimiento giratorio para la selección y posición de cuatro cabezales extrusores.
- Acarreo del filamento termo polímero sólido hacia cada fundidor.
- Extrusión de termo polímeros como PLA, ABS, TPU, etc.
- Calentamiento de la plataforma caliente.
- Posicionamiento manual/automático de cada cabezal extrusor.
- Lectura de memorias externas MicroSD.
- Configuración de temperatura, velocidad de extrusión y posición de los extrusores.

B. Requisitos de diseño

Se establecen los parámetros tomando como base a las especificaciones establecidas.

Alimentación de la máquina	110V AC
Dimensiones de la máquina	87cm*85cm*100cm
Área de trabajo	400mm*400mm*400mm
Estructura mecánica	Estructura rígida
Material de extrusión	Filamentos termoplásticos
Tipo de software	OpenSource
Temperatura de trabajo	> 200°C
Otras características	Interfaz gráfica HMI

Tabla 1. Requisitos de diseño de la impresora 3D multiextrusor.

C. Selección de componentes

En la Tabla 2 se enlistan, la tecnología y todos los componentes seleccionados.

Elemento	Características
Tipo de extrusión	Directa
Extremo Caliente	Metálico hexagonal
Cartucho calentador	12V, 30W
Sensor de temperatura	Termistor EPCOS 100K Ω
Motor	A pasos Nema(17-23)
Mecanismo acarreo	MK8
Tarjeta de control	Duet Ethernet
Base caliente	Base de caucho de silicona
Drivers	Pololu DRV8825
Fuente-acarreo	12V, 12A
Fuente-calentadores	12V, 12A
Cableado	#16(11A, 264W)
Protecciones	Fusible: 9A

Tabla 2. Componentes seleccionados.

1) Selección del motor para cada cabezal de extrusión:

Teniendo en cuenta la viscosidad del filamento y de la geometría del fundidor, se calculó las caídas de presión en el extremo caliente, es decir la potencia necesaria en el sistema de acarreo, para que la fuerza aplicada al filamento sea mayor a la presión ejercida en la boquilla [2].

Debido a que el material fundido se adhiere a las paredes del fundidor, el flujo está sometido a un esfuerzo cortante; donde la caída de presión total es igual a la suma de la caída de presión en la entrada y la caída de presión en la boquilla [3].

Además se toma en cuenta al flujo como isotérmico (temperatura constante) e hidrodinámico (velocidad constante a lo largo del canal), también se considera al filamento como un fluido newtoniano (viscosidad constante) el cuál fluye constantemente independientemente del tiempo [3].

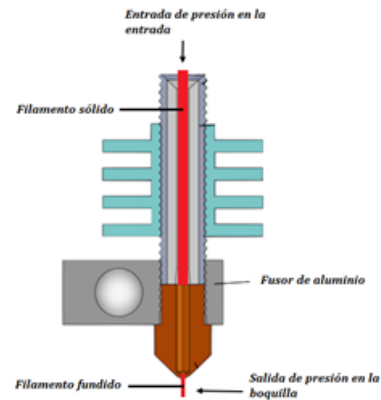


Figura 2. Elementos del extremo caliente o fundidor.

La caída de presión total es:

$$\Delta P_T = \Delta P_e + \Delta P_b \quad (1)$$

Donde ΔP_T = caída de presión total, ΔP_e = caída de presión en la entrada, y ΔP_b = caída de presión en la boquilla.

Se calcula la caída de presión tanto en la entrada del extremo caliente como en la boquilla siguiendo el proceso realizado por [3] en la ecuación (2).

$$\Delta P = \frac{8 * v * L * \eta}{R^2} \quad (2)$$

Donde η = Viscosidad del material= 10^3 Pa.s (Viscosidad para termopolímeros fundidos), R_1 = radio del fundidor= 1mm, R_2 = radio de la boquilla= 0,2mm, L_1 = longitud del fundidor= 49,49mm, L_2 = longitud de la boquilla= 12mm v = velocidad del polímero= 50mm/s (tomado por medición). Obteniendo los siguientes resultados:

$$\Delta P_e = 1,74 * 10^7 \text{ Pa}$$

$$\Delta P_b = 1,2 * 10^8 \text{ Pa}$$

$$\Delta P_T = 1,374 * 10^8 \text{ Pa} \quad (1).$$

Se determina la fuerza que necesita el filamento en la entrada mediante la ecuación (3).

$$F = \Delta P_T * A \quad (3)$$

Dónde A= Área de la sección circular de radio R_2 (radio de la boquilla).

$$F = 1,374 * 10^8 \text{ Pa} * \pi(0,0002\text{m})^2 = 17,266\text{N}$$

El torque necesario T que debe aplicar el motor para acarrear el filamento y posteriormente extruirlo, se calcula con la ecuación (4), en donde r = 5.6mm es el radio aproximado del engrane que se acopla con el eje del motor.

$$T = F * r \quad (4)$$

$$T = 17,266\text{N} * 0,0056\text{m} = 0,097\text{N.m}$$

Se selecciona el motor Nema 17(0,56N.m), cubriendo el torque mínimo de 0,097 N.m.

La potencia disipada por el motor Nema 17 se calcula con la ecuación (5), donde I = corriente nominal del motor= 1,5A, R = resistencia de la bobina del motor= 2,8 Ω .

$$P = I^2 * R \quad (5)$$

$$P = 1,5A^2 * 2,8\Omega = 6,3W \quad (5)$$

En la Tabla 3 se enlistan los pesos aproximados de cada elemento del que forman parte cada cabezal extrusor.

Elemento	Masa(kg)	Peso(N)
Motor	0,3	2,943
Extrusor	0,01	0,0981
Mk8	0,136	1,334
Ventilador	0,10	0,981
Total	0,546	5,356

Tabla 3. Peso del Cabezal Extrusor

D. Diseño del cabezal multiextrusor

Requerimientos para el diseño del cabezal multiextrusor:

- Manejar 4 extrusores.
- Sistema de selección de extrusores mediante movimiento giratorio.
- Sistema liviano.
- Adaptable al sistema de movimiento en X, Y, Z.
- Fácil ensamblaje y mantenimiento.
- Fabricado con materiales resistentes.

1) Distribución geométrica de los cabezales extrusores:

Según el requerimiento de diseño de un sistema giratorio, se diseña un plato circular en el que van ubicados los cabezales extrusores, tomando en cuenta:

- La longitud total del cabezal extrusor, desde la entrada del extrusor hasta la boquilla.
- Una distancia de seguridad desde el centro del plato circular, en la que está ubicado el sistema de transmisión, es decir los motores de los cabezales extrusores están ubicados a una distancia de seguridad de 52mm del centro del plato circular.
- Los motores de los cabezales extrusores están separados entre sí un cierto ángulo ya que el plato circular tiene una distribución uniforme de pesos; por lo tanto, se divide los 360° para 5 partes iguales, es decir un ángulo de 72°, ya que son cuatro los cabezales extrusores, y el quinto elemento es para la disposición de todo el cableado eléctrico de los cabezales extrusores.

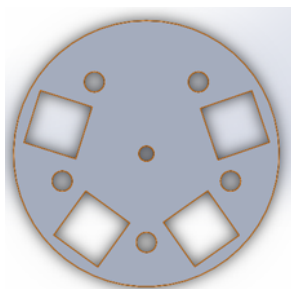


Figura 3. Geometría del plato circular.

2) *Selección del material del plato circular:* Se selecciona el aluminio 6061 TS, por sus características que es no corrosivo, liviano y resistente.

3) *Movimiento del cabezal multiextrusor:* Para la generación del movimiento del plato del cabezal multiextrusor se utiliza un sistema de transmisión de movimiento de tipo piñón-engrane (reductor), ya que éste sistema permite aumentar el torque y reducir la velocidad, utilizando un motor lo más pequeño posible.

4) *Cálculo del torque necesario para el movimiento del plato:* Para encontrar el torque que aplica el motor y vencer la inercia del plato y poder moverlo, se considera al plato como un disco que tiene un momento de inercia. Ya que los cabezales extrusores junto con el correspondiente cableado eléctrico están distribuidos uniformemente en el plato; la masa total del plato es igual a la suma de las masas del material del plato, los cabezales extrusores y la masa del cableado eléctrico del sistema multiextrusor.

$$m_p = m_{Al} + 5 * m_E \quad (6)$$

Donde m_p = masa total del plato, m_{Al} = masa del material del plato(Aluminio), m_E = masa de todo un cabezal extrusor.

$$m_p = 0,5kg + 5 * (0,546Kg) = 3,23kg \quad (6)$$

El momento de inercia que posee un disco rígido, con respecto a un eje perpendicular al plano y que pasa por su centro, según [4] se calcula mediante la ecuación 7.

$$I = \frac{m_p * R^2}{2} = \frac{3,23kg * (0,105m)^2}{2} = 0,018kg * m^2 \quad (7)$$

Donde R= radio del plato= 10,5cm.

Al considerarse que a la salida de la transmisión de movimiento se necesita un mayor torque que a la entrada, el plato no deberá moverse a velocidades tan altas, es decir el plato deberá moverse a velocidades intermedias, evitando así que el motor pierda pasos, o que se produzca algún atascamiento en la parte de engranes. Por lo tanto se requiere que el plato gire aproximadamente a 300rev/min, la cual se considera como una velocidad intermedia.

El movimiento del plato al tener una aceleración, se calcula su aceleración angular, mediante la ecuación del movimiento circular uniformemente acelerado:

$$\omega^2 = \omega_o^2 + 2 * \alpha * \theta \quad (8)$$

Donde ω^2 = velocidad angular final del plato= 480rev/s= 50,27rad/s, ω_o^2 = velocidad angular inicial del plato= 0rad/s, θ = desplazamiento angular de un cabezal extrusor= 72°*(3)=216°= 3,77rad/s.

Con la aceleración de $\alpha = 335,16rad/s^2$ (8), se calcula el torque en la salida del sistema de transmisión, mediante la ecuación (9):

$$T^2 = I * \alpha \quad (9)$$

Donde T_2 = torque aplicado en el eje de rotación del plato, I = momento de inercia del plato= $0,018kg \cdot m^2$, α = aceleración angular.

El torque resultante es igual a 6,03 N.m.

5) *Diseño del sistema de transmisión engrane-piñón*: Para el diseño de la transmisión engrane-piñón se toma como dato de referencia el torque de 6,03N.m Por criterio de diseñador, ya que se necesita reducir la velocidad y aumentar el torque, el torque a la entrada del sistema se calcula mediante la ecuación (10).

$$T_1 = \frac{T_2}{4} = 1,5075N.m \quad (10)$$

Siguiendo el proceso de [5], se diseñó un par de engranes para transmitir movimiento, desde un piñón fijo al eje del motor del multicabezal, hacia un engrane empotrado en el plato. Por facilidad de fabricación y manera silenciosa de trabajar se usará un perfil de involuta de 20° a profundidad completa. Ya que existe aumento de torque y una reducción de velocidad, la velocidad angular de la salida $\omega_p = 201,06rad/s$, la velocidad angular de la entrada $\omega_e = 50,27rad/s$, y por criterio de diseñador, el número de dientes del piñón $Z_p = 10$, número de dientes del engrane $Z_e = 40$ y el módulo $m = 1,5$. Con los datos obtenidos se determinan los diámetros primitivos (d_p), según la ecuación (11):

$$d_p = Z * m \quad (11)$$

$$d_{pp} = 10mm * (1,5) = 0,015m$$

$$d_{pe} = 40mm * (1,5) = 0,06m$$

Con los diámetros primitivos se encuentra el diámetro entre centros mediante la ecuación (12):

$$d_c = \frac{d_{pp} + d_{pe}}{2} = \frac{0,015m + 0,06m}{2} = 0,038m \quad (12)$$

Resistencia del diente

Con el número de revoluciones del piñón $n_p = 1920$ rev/min y el número de revoluciones del engrane $n_e = 480$ rev/min, se determina la velocidad periférica lineal en el diámetro primitivo con la ecuación (13):

$$V = \frac{d_p * Z * n}{60} \quad (13)$$

$$V_p = 4,8m/s$$

$$V_e = 19,2m/s$$

Posteriormente, se calcula la fuerza F a transmitir en caballos de vapor, mediante la ecuación (14):

$$F = \frac{T * \omega}{735W \left[\frac{s}{kg * m} \right]} \quad (14)$$

$$F_p = 0,412kg * m/s$$

$$F_e = 0,412kg * m/s$$

Se calcula la presión o esfuerzo tangencial para el diente con la ecuación (15):

$$P = \frac{75 * F}{V} \quad (15)$$

$$P_p = 6,43kg$$

$$P_e = 1,61kg$$

Se encuentra la carga de seguridad o coeficiente de trabajo por flexión mediante la ecuación(16):

$$C = \frac{P}{m^2 * 1,52} \quad (16)$$

$$C_p = 1,88kg * mm^2$$

$$C_e = 0,47kg * mm^2$$

Finalmente se procede a seleccionar el material del aluminio, idóneo para fabricar los engranes de acuerdo al coeficiente de trabajo obtenido.

6) *Selección de rodamientos*: Se selecciona mediante catálogo los rodamientos 6201; ya que de acuerdo a sus dimensiones se acopla fácilmente al engrane, además de que puede soportar tranquilamente la carga dinámica del plato y del engrane.

7) *Selección del motor para el movimiento del sistema multicabezal*: Conociendo el dato del torque necesario en la entrada del sistema de transmisión de 1,5075 N.m, se selecciona un motor Nema23 de 1,9 N.m, cubriendo el torque requerido.

8) *Diseño del eje del cabezal multiextrusor*: Los requerimientos para el diseño del eje que sostendrá el plato del cabezal multicabezal, son los siguientes:

- Diámetro del eje de la placa igual a 12mm (Rodamiento 6201).
- Fabricación de material liviano y resistente.

9) *Análisis de la carga a la que se encuentra sometida el eje*: El eje de 38mm de longitud va a estar sometido a una carga puntual de 32N, correspondiente al peso del cabezal multiextrusor completo.

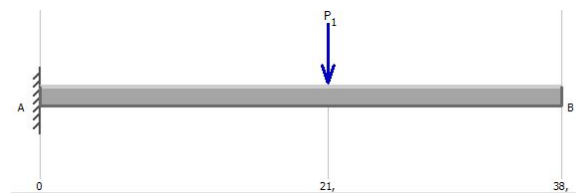


Figura 4. Análisis de la carga en el eje de la placa.

Con la ayuda de un software de simulación, se obtiene la fuerza cortante máxima y el momento flector.

Obteniendo los siguientes resultados:

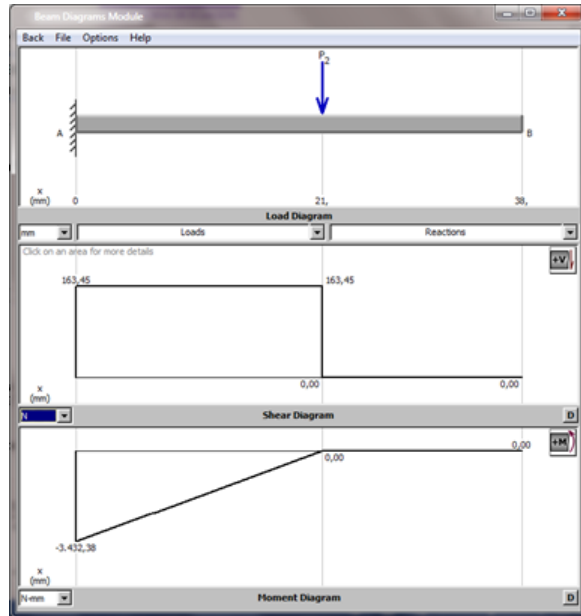


Figura 5. Análisis de la fuerza cortante máxima y el momento flector máximo.

10) *Cálculo del mayor esfuerzo que sufre el eje debido a la flexión:* El mayor esfuerzo que sufre el eje debido a flexión se calcula con la ecuación (17) según [6].

$$\sigma = \frac{M}{S} \quad (17)$$

Donde σ = esfuerzo a flexión, M = momento flector, S = módulo de sección.

Para calcular el módulo de sección se utiliza la ecuación (18) según (L. Mott, 2004).

$$S = 0,024(D_E^3 - D_I^3) \quad (18)$$

Donde D_E = diámetro externo de la sección = 13mm, D_I = diámetro interno de la sección = 0mm.

$$S = 52,72 \text{ mm}^3$$

Y se calcula el esfuerzo:

$$\sigma = \frac{3432,38 \text{ N}\cdot\text{mm}}{52,72 \text{ mm}^3} = 65,10 \text{ MPa} \quad (17)$$

Finalmente se calcula el factor de seguridad N mediante la ecuación (19) según [7]; y con referencia a la resistencia a la fluencia de la aleación del aluminio 6061T6 ($S_y = 270 \text{ MPa}$).

$$N = \frac{S_y}{\sigma} \quad (19)$$

$$N = 4,14$$

11) *Diseño del eje mediante cálculo de elementos finitos:* Para validar el factor de seguridad obtenido analíticamente, se simuló mediante el software SolidWorks a través del método de elementos finitos.

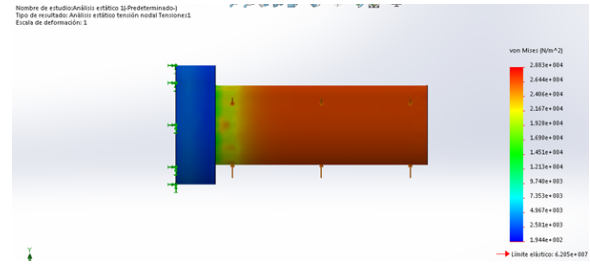


Figura 6. Deformación unitaria del eje.

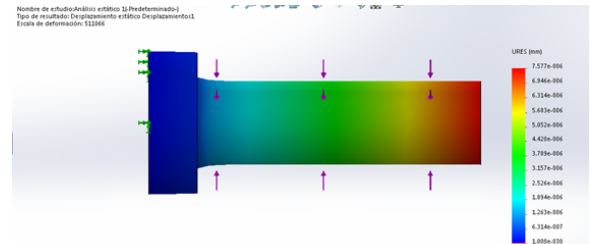


Figura 7. Desplazamiento del eje en el eje de las abscisas.

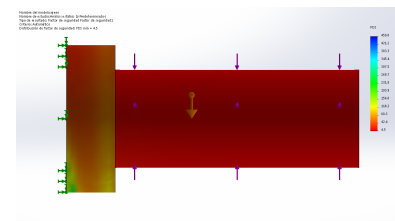


Figura 8. Factor de seguridad.

Datos obtenidos:

Límite elástico = $23,87 \text{ N/m}^2$

Desplazamiento = 14,57mm

Factor de seguridad = 5,1

Se comprobó que el factor de seguridad calculado analíticamente si se aproxima al calculado en la simulación, asegurando que la simulación mediante elementos finitos es correcta, validando el modelo.

E. Configuración de parámetros en el firmware

1) *Control de la impresora 3D:* El sistema de control funciona a través de un software (open source) que envía información a la tarjeta de control Duet, los drivers reciben las señales y controlan los motores, mientras que los sensores de temperatura hacen la retroalimentación.

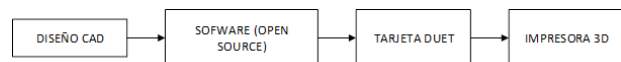


Figura 9. Esquema del sistema de control de la impresora 3D multiextrusor.

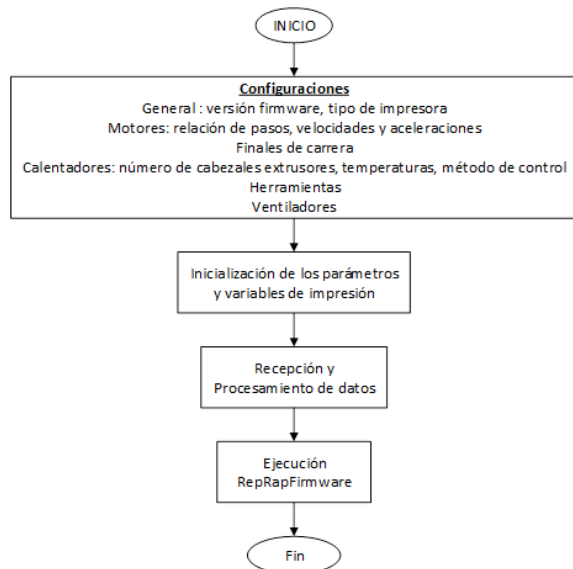


Figura 10. Flujograma del sistema de control general de la máquina.

2) *Cálculo de la relación de pasos para el control de motores de los cabezales extrusores:* Para controlar el desplazamiento de cada uno de los motores de los extrusores se calcula los pasos por milímetro, mediante la ecuación (20).

$$P_{mm} = \frac{P_{motor} * microP}{\phi * \pi} \quad (20)$$

Donde P_{motor} = pasos por revolución del motor = 200 (Motor Nema17), $microP$ = micropasos del driver = 16, ϕ = diámetro efectivo del engrane = 11mm (Mecanismo MK8).

$$P_{motor} = 95,6 \text{ pasos/mm}$$

Se obtiene un valor de 95,6 pasos/mm el cual se incluye en la configuración del firmware de la tarjeta controladora Duet:

M92 E95.6:95.6:95.6:95.6:9.6:420 ; pasos por mm
 M566 E120:120:120:120:120:120 ; vel.inst.máx.(mm/min)
 M203 E1200:1200:1200:1200:1200:1200 ; vel.máx.(mm/min)
 M201 E250:250:250:250:250:250 ; acel.(mm/s²)

En donde las velocidades y aceleraciones se obtuvieron utilizando la herramienta de configuración de RepRapFirmware.

3) *Parámetros para el control de calentadores:* El sistema de control de los calentadores lo conforman los sensores de temperatura y los cartuchos calentadores. Por lo tanto, para controlar los calefactores se emplea el algoritmo de control de la temperatura que se encuentra dentro de la tarjeta controladora Duet, el cual lee la temperatura medida desde los termistores y envía una señal a los transistores MOSFET que conectan o desconectan la energía de 12V de cada uno de los cartuchos calentadores:

M143 S300 ; Temperatura máxima de los calentadores igual a 260°C.
 M305 P0 T100000 B4138 R4700 ; Parámetros +ADC del (Extrusor E0)
 M305 P1 T100000 B3500 R4700 ; Parámetros +ADC del (Extrusor E1)
 M305 P2 T100000 B3500 R4700 ; Parámetros +ADC del (Extrusor E2)

M305 P3 T100000 B3450 R4700 ; Parámetros +ADC del (Extrusor E3)
 M305 P4 T100000 B3841 R4700 ; Parámetros +ADC del (Extrusor E4)
 M305 P5 T100000 B4138 R4700 ; Parámetros +ADC del (Extrusor E5)
 M305 P6 T100000 B4138 R4700 ; Parámetros +ADC del (Extrusor E6)

Donde se midió las resistencias de los termistores a tres temperaturas diferentes y se obtuvo los correspondientes coeficientes B.

4) *Parámetros para el control de las herramientas:* Para la utilización de dos o más cabezales extrusores es necesario configurar las herramientas, que no es más que la asignación de extrusores para cada herramienta, y también se lleva a cabo la configuración de las temperaturas (°C) de activación y de standby de cada extrusor.

M563 P0 D0 H1 ; herramienta T0, extrusor E1.
 G10 P0 R200 S200 ; temperaturas activa (S) y de standby (R).
 M563 P1 D1 H2 ; herramienta T1, extrusor E2.
 G10 P1 R245 S245 ; temperaturas activa (S) y de standby (R).
 M563 P2 D2 H3 ; herramienta T2, extrusor E3.
 G10 P2 R180 S180 ; temperaturas activa (S) y de standby (R).
 M563 P3 D3 H4 ; herramienta T3, extrusor E4.
 G10 P3 R180 S180 ; temperaturas activa (S) y de standby (R).
 M563 P4 D4 H5 ; herramienta T5, extrusor E6 (motor Multicabezal)
 G10 P4 R180 S180 ; temperaturas activa (S) y de standby (R).

5) *Cálculo de la relación de pasos para el control del motor del multicabezal:* Tomando en cuenta, que el plato no dará una vuelta completa, sólo se moverá desde la posición del cabezal extrusor 1 hasta la posición del cabezal extrusor 4, y que de acuerdo a los parámetros de extrusión según la pantalla HMI, cada cambio de posición equivaldrá a 5mm de extrusión.

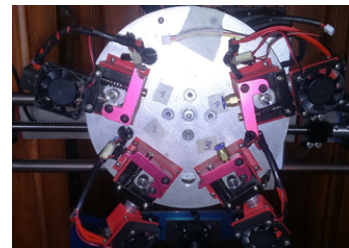


Figura 11. Posición de los cabezales extrusor.

La relación de pasos R se obtiene con la fórmula (21):

$$R = \frac{P_d}{C * R_E} \quad (21)$$

Donde P_d = configuración de pasos en el driver = 200*8, C = cantidad de extrusión en una vuelta = 25, P_d = relación del sistema de transmisión.

$$R = 256$$

Todos los parámetros y configuraciones obtenidos en esta sección forman parte del archivo "config" perteneciente al firmware definitivo de la máquina, el cual a través de la tarjeta controladora Duet, se encarga de realizar todo el control de drivers, motores, calentadores y termistores.

6) *Código para impresión multicolor:* Para la impresión de una pieza de dos o más colores se agregan el código para el cambio de herramienta de un cabezal extrusor a otro. La Tabla 4 muestra el código g que deberá ser agregado en el .gcode de la pieza a imprimir

Código	Interpretación
T5	Cambio de herramienta (Motor multicabezal)
G0 F200 E-5	Movimiento de 5mm hacia la izquierda
G92 E0	Restablecimiento de la posición actual
T1	Filamentos termoplásticos

Tabla 4. Código para impresión multicolor.

III. RESULTADOS

A. Resultado del funcionamiento del cabezal multiextrusor

Después de haber realizado las pruebas de funcionamiento se determinó que el sistema multiextrusor cumple con los requerimientos establecidos, el sistema es liviano, con un peso de de 3,23 kg, construido en aluminio, y todos los elementos que lo conforman son desmontables. El cabezal permite cambiar de posición correctamente de un cabezal extrusor a otro mediante su movimiento giratorio, de forma manual o automática. Además, a través del sistema piñón-engrane, se permite aumentar el torque de la entrada de 1,5075 Nm.y reducir la velocidad a la salida del sistema de transmisión de movimiento.

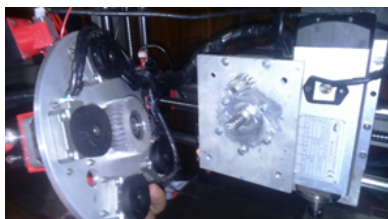


Figura 12. Sistema multiextrusor desmontado.



Figura 13. Sistema multiextrusor montado sobre el eje X.

B. Resultado del funcionamiento de un cabezal extrusor

En cuanto al funcionamiento de cada cabezal extrusor, mediante pruebas de extrusión se procedió a determinar el error de material extruido, tomado de 20 datos de extrusión de material.



Figura 14. Funcionamiento de un cabezal extrusor.

Obteniendo una media aritmética de 50,15mm, con la cual se obtiene un error de $\pm 0,15$ mm en la extrusión, correspondiente al 0,3% de error, comprobando que la relación de pasos tiene un error mínimo, extruyendo una cantidad de material casi exacta solicitada por el usuario. Además cada cabezal al contar con cartuchos calentadores, se consigue calentar rápidamente el bloque del extrusor, alcanzar altas temperaturas, y mantener la misma temperatura durante todo el proceso de impresión. También se comprobó el correcto funcionamiento del termistor ya que realiza mediciones desde 14°C hasta 300°C.

C. Prueba de impresión con un cabezal extrusor

Al haber utilizado un software opensource, (Repetier Host), para generar el slicer y por ende el código de impresión, se tomó el modelo de una mano de dimensiones similares a la de una persona adulta, en la Figura se puede observar el proceso de impresión y el modelo ya impreso.



Figura 15. Mano impresa en un color.

Tomando la resolución de 0,012mm de “Sistema de generación de movimiento para una impresora 3D multiextrusor”, la máquina empleó un tiempo de 32 horas de trabajo continuo en todo el proceso de impresión.

D. Prueba de impresión con dos cabezales extrusores

Al haber aumentado el código de cambio de herramienta según los cabezales extrusores a utilizar, el cabezal multiextrusor se movió desde la posición de un cabezal extrusor a otro. El resultado del proceso de impresión se puede apreciar en las figuras.



Figura 16. Proceso de impresión en dos colores, capa 3.



Figura 17. Proceso de impresión, capa 10.

IV. CONCLUSIONES

- El extremo caliente de tipo hexagonal permite la extrusión de materiales como PLA, ABS, PTU, ABS-Fibra de carbono, empleando largos periodos de trabajo sin ningún inconveniente.
- Al tener un sistema giratorio para la selección de los cabezales extrusores, se permite trabajar con un solo cabezal extrusor, evitando que los demás cabezales extrusores ocasionen problemas en el proceso de impresión; y al contar con un sistema de transmisión de tipo piñón-engrane, se consigue aumentar el torque a la salida del sistema, facilitando el cambio de posición de los cabezales extrusores a velocidades intermedias, evitando descuadres o atrancamientos en los ejes.
- La utilización del código abierto facilita la modificación del software, de modo que se puedan realizar configuraciones de parámetros, así el código de cambio de herramienta para el cambio de posición de cada cabezal extrusor, permitió el correcto funcionamiento del mecanismo multiextrusor en una impresora 3D.
- Se tiene un cabezal multiextrusor desmontable y liviano, acoplándose fácilmente al prototipo del sistema de generación de movimiento.
- A través del sistema multiextrusor se obtuvo objetos impresos en más de dos colores, además de que se puede trabajar con varios tipos de materiales, logrando robustez utilizando filamentos de tipo ABS, PLA, Fibra de carbono, u obteniendo flexibilidad gracias al TPU, y gracias a la resolución del prototipo del sistema de generación de movimiento al que se encuentra montando el sistema multiextrusor, se tiene una alta calidad de impresión.

REFERENCES

- [1] M. Berchon and B. Luyt, *La impresión 3D*. España: Barcelona, 2018.
- [2] S. Chancusi and P. Navarrete, *Diseño y construcción de una impresora 3D auto-replicable controlada inalámbricamente para el prototipado de piezas plásticas de bajo costo, mediante software libre*. Ecuador: Latacunga, 2014.
- [3] W. Michaeli and P. Navarrete, *Extrusion Dies for Plastics and Rubber*. New York, 1992.
- [4] F. Beer, E. Russell Johnston and W. Clausen, *Dinámica Vectorial para Ingenieros*. México, 2007.
- [5] A. Casillas, *Cálculos de Taller*. España: Madrid, 1997.
- [6] R. Budynas and J. Nisbett, *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley*. México, 2008.
- [7] L. Mott, *Diseño de Elementos de Máquinas*. México, 2004.