

# SISTEMA DE GENERACIÓN DE MOVIMIENTO PARA UN IMPRESORA 3D MULTI-EXTRUSOR

Portilla Flores Richard Daniel (rdportillaf@utn.edu.ec).  
 Mendez Estevez Jorge Eduardo (jemendeze@utn.edu.ec).  
 Ing. Christian Vásquez. MSc. (crvasquez@utn.edu.ec).  
 Ing Daniel Alavarez MSc. daalvares(@utn.edu.ec).

*Resumen*— En Este documento se presenta un sistema de generación de movimiento para una impresora 3D multi-extrusor, pudiendo ampliarse para otras aplicaciones como corte por láser, fresado o mecanizado y montaje de piezas electrónicas en placas, gracias a que su cabezal puede ser intercambiable para poderla emplear en cualquiera de las aplicaciones mencionadas.

En la generación de movimiento se empleó un sistema screwball, que permite tener una alta eficiencia en el uso de la potencia proporcionada por el motor, además a tener una alta precisión y ser usada para varios fines.

La máquina cuenta con un diseño realizado por módulos con la ventaja para el ensamblaje de la máquina, como para su mantenimiento.

*Índice de Términos*—Impresión 3D, FDM, termoplásticos, multi-cabezal, extremo caliente hexagonal, motor a pasos, plataforma caliente, DUET, firmware.

## I. INTRODUCCIÓN

Las impresoras 3D, o manufactura aditiva, han evolucionado rápidamente en los últimos años, desde el año 1976 con la creación de la impresora de inyección de tinta, la que dió paso a su evolución para pasar a la impresión con materiales, sufriendo varios cambios durante décadas en diferentes ramas de la industria [1]

En 1984 Charles Hull inventa en método de la estereolitografía “SLA”, proceso de impresión para maquetas para la prueba de prototipos antes de su fabricación en cadena, en el año de 1990 se desarrolla la técnica de creación de objeto tridimensionales mediante la superposición de capas de material fundido, el cual se solidificaba con la forma deseada posteriormente. En 2005 se desarrolla la primera impresora 3D con la capacidad de imprimir casi la totalidad de piezas que la componen en la universidad de Bath, UK[2]

Hoy en día el diseño industrial con la impresión 3D es una de las herramientas más fuertes, ya sea por la creación de prototipos o la fabricación de moldes, en menor tiempo y a bajo costo. Estando presente en la industria automotriz, medicina con la impresión de prótesis, industria aeronáutica, arquitectura, alimentación, defensa, arte, entre otras[3]

Con el inicio del proyecto RepRap, la tecnología de las impresoras 3D empezó a fortalecerse y a destacar, volviéndose un auge revolucionario a nivel mundial en la actualidad, ya que inicialmente las impresoras 3D eran únicamente utilizadas y adquiridas por universidades y centros de alta investigación privados, debido a los exorbitantes costos que representaban[4]

## II. METODOLOGÍA

Para la construcción del sistema de generación de movimiento que no solo permita describir una trayectoria para impresión 3D, sino que se pueda incorporar otras funciones que aprovechen el control numérico por computador, tales como el fresado, el corte o grabado por láser entre otros que formarán parte de la continuación del proyecto de investigación. Por lo que el sistema tiene que contar con fuerza en sus ejes de impresión y una mayor precisión en su ubicación.

Se requiere tener en cuenta que al momento de armar, desarmar, realizar mantenimiento o sufrir algún daño imprevisto la máquina, sea posible realizarlo de forma fácil y sin demora con la finalidad de ahorrar tiempo y facilidad al operario, consideración tomada como referencia a la **NORMATIVA** alemana VDI 3206.

## III. DESARROLLO

### Selección del sistema de posicionamiento

Tipo	Facilidad de montaje	Fuerza lineal	Uso de opciones en transmisión de movimiento	Mantenimiento	T.
Cartesia	3	4	4	4	15
Delta	3	2	0	5	10
Polar	4	2	4	4	14
Brazo robótico	2	2	3	3	10

*Tabla1 Selección sistema de impresión FDM*

En la tabla se califica con valores que van de 0 a 5, siendo 0 el valor con menor aceptación y el 5 con la mayor aceptación.

### Selección del sistema de posicionamiento

Característica	Sistema ScrewsBall	Sistema de polea
Mayor fuerza lineal	X	
Mayor velocidad		X
Mayor resolución	X	
Mayor precisión	X	
Menor costo		X
Mayor eficiencia	X	
Mantenimiento más sencillo		X
Mayor seguridad	X	
Mayor durabilidad	X	

<b>Mayor carrera</b>		X
<b>Total</b>	6	4

Tabla2 Selección sistema de transmisión de potencia

En la tabla 4 se califica con una X al sistema más conveniente con la característica pedida.

**Bosquejo**

Se realizan varios bosquejos del módulo ver figura 1 en donde se tiene un bosquejo sin partes que puedan separarse.

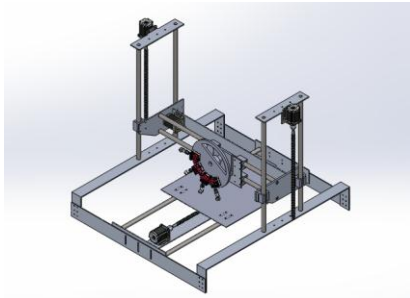


Figura 1 bosquejo inicial

Se escoge un bosquejo conformado por un sistema screwsball y más óptimo en sus dimensiones, ver figura 2, teniendo en cuenta que el sistema tendrá una carrera de 400mm.

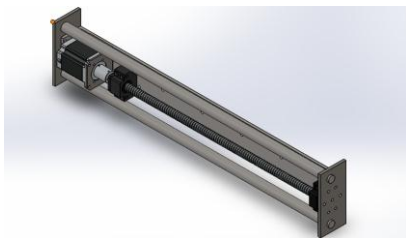


Figura2. Módulo de eje x

**Selección de la rosca**

En tornillos de potencia, screwsball a diferencia de los tornillos normales cuentan con una configuración con bolas que recirculan en el collarín reduciendo el rozamiento permitiendo aprovechar al máximo su eficiencia a diferencia de un tornillo con collarín normal, ver figura 3.

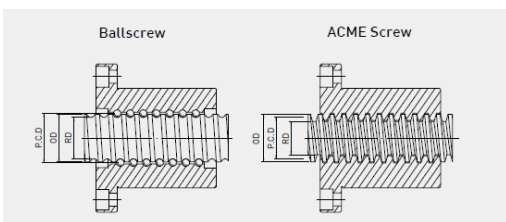


Figura3. Configuración básica de husillos de bolas y de rosca de contacto

Al escoger una rosca tipo ballscrew, se contará con la capacidad de reducir al máximo la fuerza de rozamiento en el collarín con lo que se tendrá la mayor eficiencia posible en sistema, con el cual se selecciona un tornillo con las siguientes características:

- Alto rendimiento de vida útil a bajas fricciones, bajo ruido en el funcionamiento.
- Se requiere menor potencia de funcionamiento, menor calentamiento, no tiene efecto de antideslizamiento, posicionamiento más preciso.
- Fuerzas axiales elevadas, pequeña pérdida de fricción y alta eficiencia.
- Tornillo M16, acero de rodamiento, de 55mm de carrera.
- Eficiencia cerca de 90%.



Figura4. Tornillo screwsball

**Calculo de la potencia para el motor**

Para encontrar el torque requerido se tomó siguiente formulario [5]:

Numero promedio de rpm

$$n_{av} = n_1 * \frac{t1}{100} + n_2 * \frac{t2}{100} + n_3 * \frac{t3}{100} + \dots \quad (1)$$

Teniendo como resultado 81rpms. Con lo que ya podemos calcular la carga variable y velocidad constante [5]

$$F_{bm} = \sqrt[3]{F_{b1}^3 * \frac{n1}{n_{av}} * \frac{t1}{100} * f_{p1}^3 + F_{b2}^3 * \frac{n2}{n_{av}} * \frac{t2}{100} * f_{p2}^3 + F_{b3}^3 * \frac{n3}{n_{av}} * \frac{t3}{100} \dots}$$

(2)

Teniendo  $F_{bm}=182.51N$  con lo que se calcula la precarga del sistema con la siguiente formula

$$p = \frac{F_{bm}}{2.8} \quad (3)$$

Se obtiene una precarga de 71.43 N, con lo que se puede calcular el par motor de reversa, accionamiento, y de aceleración del sistema respectivamente con las siguientes formulas [5]

$$T_M = (T_a + T_b + T_c) * \frac{N_1}{N_2} \tag{4}$$

$$T_b = \frac{F_b * t * \eta_2}{2\pi} \tag{5}$$

$$T'_a = J\alpha \tag{6}$$

Teniendo como resultado  $T_M=0.332$  Nm,  $T_a=0.184$  Nm,  $T_b=0.012$ Nm, con lo que procede al cálculo total del par motor con la siguiente formula [5]

$$T_{Ma} = T_M + T'_a \tag{7}$$

Obteniendo un par total de  $T_{Ma}= 0.321$  NM al cual se le aplica un factor de seguridad de 2 con el que se obtiene 0.7Nm de torque para generar el movimiento en el sistema.

### Diseño del eje para el modulo y

La viga está sometida a una fuerza axial por lo que tendrá una deformación a causa del peso, para realizar el diseño de esta se lo realizara de la siguiente forma:

Análisis de la carga a la que se encuentra sometida la viga, ver figura 5.

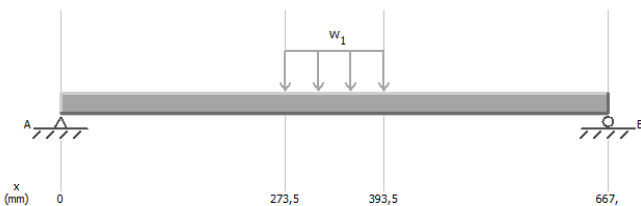


Figura 51. Diagrama de carga de la viga X, Z

- Datos para diseño de la viga
- Seccion redonda
- $W1 = 150N$ ,  $L = 0.667m$
- Acero bonificado AISI 4340, (Bohman, 2016), ver anexo 1.

Diseño de la viga mediante cálculo analítico.

Con la ayuda de un software de simulación, se obtiene la fuerza de corte máxima 75N y el momento flector máximo 25012,5 N-mm,

Calculo del mayor esfuerzo que sufre el eje, debido a la flexión.

$$\sigma = \frac{M}{S} \tag{8}$$

Se calcula el módulo de sección, que se obtiene con la siguiente formula [5]:

$$S = 0,024(D_E^3 - D_I^3) \tag{9}$$

Con lo que se obtiene un esfuerzo de  $\sigma=130,27$  Mpa y se calcula el factor de seguridad con referencia al límite elástico del acero AISI 4340 normalizado ( $S_y = 710MPa$ )

$$N = \frac{S_y}{\sigma} \tag{10}$$

Teniendo un factor de seguridad de 5.45.

### Diseño de la estructura

La estructura está diseñada para que se pueda ensamblar fácilmente los módulos, fácil maniobrabilidad en el traslado de la máquina y resistente a las cargas a actuar. Ver figura 6.



Figura 6. Estructura Fuente: Propia

El diseño de la estructura se realizará mediante el cálculo de elementos finitos.

- Material AISI 304, ver anexo 4.
- Sección cuadrada hueca.

Teniendo los siguientes resultados

- Masa: 15.94 Kg
- Peso: 159.37 N
- Densidad: 8000Kg/m<sup>3</sup>

Características del material

- Material: AISI 304
- Límite elástico: 2.06e+008 N/m<sup>2</sup>
- Límite de tracción: 5.17017e+008 N/ m<sup>2</sup>

Modulo elástico: 1.9e+011 N/ m<sup>2</sup>

Resultado de deformación

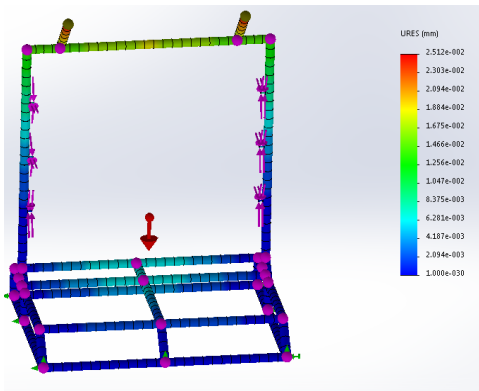


Figura 7. Se tiene una deformación máxima de 1.812e-003mm

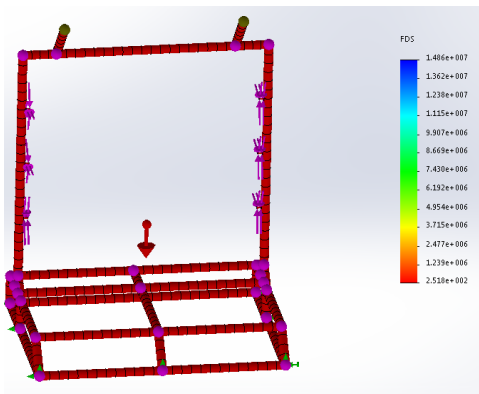


Figura 8. Se tiene un factor de seguridad de 2.5e+002

### Configuración de la relación de los motores

Para obtener la mayor precisión posible de los driver y los motores se realiza el cálculo de la relación, mismo que será introducido como parámetro en el firmware para poder obtener una medida correcta y una alta resolución evitando la pérdida de paso. La relación se la calcula de la siguiente forma.

( 11)

$$(1) \quad R = \frac{N_p}{P}$$

donde

- R: Cálculo de relación
- $N_p$ : Número de paso del driver
- P: Paso por vuelta

$$R = \frac{3200}{5} = 640$$

El valor calculado para introducir en la configuración del firmware es de 640, este cálculo podría variar al momento de probar los módulos si no se consigue las velocidades deseadas al momento de comprobar los resultados

## IV. RESULTADOS

Para obtener los resultados del sistema de generación de movimiento es importante realizar un protocolo de pruebas para verificar el cumplimiento del alcance planteado y la eficiencia de la máquina al ser sometida a pruebas.

### Evaluación de la máquina

Para evaluar el funcionamiento de la máquina se lo realizará en 6 fases las cuales son:

- Método de construcción
- Funcionamiento de los módulos sin y con carga, a baja y alta velocidad.
- Funcionamiento en conjunto de los módulos ensamblados sin y con carga.
- Facilidad de ensamblaje y mantenimiento por secciones y vibraciones.
- Funcionamiento total de la máquina
- Calidad de impresión

### Método de construcción

Una vez obtenido el bosquejo total de la máquina, diseño y planos, se toma la decisión de simular y probar la construcción de un prototipo con materiales de bajo costo para probar la eficiencia del mecanismo de los módulos. Ver figura 9.



Figura9. Modulo inicial de prueba

### Funcionamiento de los módulos sin y con carga, a baja y alta velocidad.

Para obtener un correcto funcionamiento en el sistema de generación de movimiento se hicieron pruebas, sometiendo a los módulos a varias cargas en velocidades diferentes para obtener los resultados requeridos, teniendo en cuenta que se realizaron una media 25 periodos de pruebas comprendidos cada una cuatro etapas, sin carga a bajas velocidades, sin carga a altas velocidades, con carga a bajas velocidades y con carga a altas velocidades. Ver tabla 3.

Característica	Resultado	Observación
Sin carga a bajas velocidades	Moviente suave sin pérdida de pasos	Sistema sin vibración

<b>Sin carga a altas velocidades</b>	Velocidad constante sin pérdida de pasos	Leve incremento de vibración
<b>Con carga (20Kg) a bajas velocidades</b>	Velocidad constante sin pérdida de pasos	Leve incremento de vibración
<b>Con carga (20Kg) a altas velocidades</b>	Velocidad constante sin pérdida de pasos	Leve incremento de vibración

Tabla 3. Pruebas de carga

**Funcionamiento en conjunto de los módulos ensamblados sin y con carga.**

Al ensamblar los módulos en conjunto a la estructura, la principal característica a evaluar es la correcta sincronía y bajar lo mayor posible las vibraciones en el sistema por lo que se hacen varias pruebas para obtener un correcto funcionamiento, teniendo en cuenta que se realizaron una media 25 periodos de pruebas comprendidos cada una dos etapas, una sin carga y la otra con carga. Ver tabla 4.

Prueba	Resultado
<b>Funcionamiento sin carga.</b>	Baja vibración, sin pérdida de pasos o atrancamientos, coordenadas cartesianas correctas, buena sincronía a bajas y altas velocidades
<b>Funcionamiento con carga (30 Kg)</b>	Bajas vibraciones en el sistema, sin pérdida de pasos, coordenadas cartesianas correctas, buena sincronía a bajas velocidades, leves atrancamientos a altas velocidades

Tabla 4. Resultado ensamblaje de módulos

**Facilidad de ensamblaje y mantenimiento por secciones y vibraciones.**

El sistema modular proporciona grandes ventajas al permitir un ensamblaje rápido de la máquina ya que son de dimensiones más grandes que una impresora normal, permitiendo ahorrar tiempo al trasladarla de un lugar a otro y ponerla a funcionar.

Al ser un sistema modular se facilita el mantenimiento, ya que se puede realizarlo por secciones, al surgir un percance en cualquier parte de la máquina, se soluciona solo desmontando dicha falla sin afectar todo el

sistema, contando con esta facilidad en la mayoría de componentes de la máquina.

Las vibraciones en la máquina son mínimas ya que al usar el sistema de screwball permite reducirlas al máximo, mejorando la estabilidad de la velocidad, la precisión y su funcionamiento prolongado.

**Funcionamiento total de la máquina**

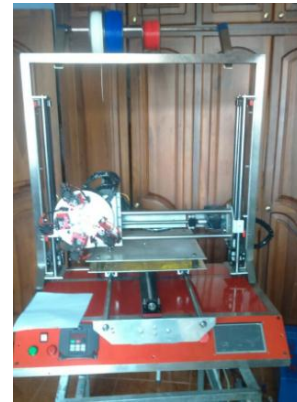


Figura 10. Impresora 3D Multi-extrusor

Para aprovechar el funcionamiento total de la máquina se realizan pruebas de impresión, comprobando la velocidad de movimiento del cabezal y los ejes para comprobar si el cálculo de las relaciones ingresadas en el firmware son las correctas para mantener la mayor velocidad posible respecto a la configuración de los pasos del driver, haciendo un estudio de las pruebas hechas para determinar la mayor velocidad, ver tabla 5.

Configuración del driver	Relación	Velocidad máxima sin pérdida de pasos	Resultado "resolución de impresión"	Observaciones
1	40	27.9 mm/s	0.025mm	Velocidad más alta en impresión, con altas vibraciones.
1/2	80	23.8 mm/s	0.0125mm	Alta velocidad de impresión, bajas vibraciones en desplazamientos en X, Y pero mayor vibración en Z.
1/4	160	18.2 mm/s	0.00625mm	Buena resolución en acabado con tiempos muy altos de impresión sin vibraciones en X, Y, y con vibraciones en Z.
1/8	320	13.5 mm/s	0.003125mm	Alta resolución en acabado con tiempos muy altos de impresión sin vibraciones.
1/16	640	7.5 mm/s	0.001562mm	Más alta resolución en acabado con tiempos muy altos de impresión sin vibraciones.

Tabla 5. Resultado de velocidades

Se toma como mejor opción configurar al driver en 1/2 los pasos para los ejes X, Y, ya que en las pruebas realizadas se obtiene la mayor velocidad posible sin tener la pérdida de pasos obteniendo una impresión de buena calidad. Mientras para el eje z se usa una configuración de 1/16, ya que en esta las vibraciones son las más bajas y al ser un eje que no se mueve a altas velocidades.

### Calidad de impresión

Al realizar las impresiones ya con las configuraciones realizadas se tiene una buena impresión al momento en que se va imprimiendo, ver figura 10.



Figura 10. Transcurso de impresión

Se obtiene una pieza con una buena calidad de impresión, ver figura 11.



Figura 2. Impresión total

### Conclusiones

- El sistema cartesiano en la generación de movimiento permite tener control total e independiente en cada uno de los ejes facilitando la traslación del cabezal a un punto deseado.
- Al tener componentes de acero inoxidable en la estructura y en los módulos como también

componentes en aluminio hacen que la máquina tenga una mejor estética como factible para el uso de aplicaciones alimenticias

- Al contar con sistema modular independiente en los ejes X, Y, Z, se consigue la facilidad de realizar el mantenimiento de cada uno de los ejes por separado cuando estos lo requieran sin tener que desmontar en su totalidad la máquina.
- La utilización de código abierto permite adaptar de forma sencilla el funcionamiento, control y automatización de un modelo de impresora a otro al ser códigos de libre acceso para su utilización de forma más rápida.
- Se obtuvo una alta resolución en las impresiones realizadas gracias al sistema de movimiento implementado screwball, el cual permite un acabado de alta calidad.
- La velocidad de impresión se ve reducida a una cuarta parte de una impresora convencional al tener solo una conversión lineal de 5 mm por cada revolución que da el motor.
- El sistema screwball empleado en los ejes de movimiento permite tener una gran fuerza lineal, la cual facilita poder emplear la máquina en otras actividades como el mecanizado de piezas mediante el fresado.
- Se consigue una buena adaptación del cabezal multi-extrusor al sistema de generación de movimiento permitiendo cumplir la función de impresión.

### V. BIBLIOGRAFÍA

- [1] *3D Printing Database*. (s.f.). Recuperado el 18 de 10 de 2017, de 3D Printing Database: <http://3dprintingdatabase.org/es/3dprinter/polar-3d-printer>
- [2] *3Dnatives*. (19 de 6 de 2017). Recuperado el 18 de 10 de 2017, de 3Dnatives: <https://www.3dnatives.com/es/tipos-impresoras-3d-fdm-190620172/>
- [3] Benchoff, B. (2015). *3D Printing Has Evolved Two Filament Standards*. Recuperado el 17 de 10 de 2017, de HACKADAY: <https://hackaday.com/2015/09/29/3d-printing-has-evolved-two-filament-standards/>
- [4] Goldenhorn, S. (2015). *Calculista de estructuras*. Buenos Aires: S.E. Obtenido de 2015
- [5] . *Tornillos de potencia*. (s.f.). Recuperado el 19 de 10 de 2017, de Ingemecanica.com: <http://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn131.html>
- [6]

I. Bohman, «Catalogo de productos,» Quito, 2016

