

Diseño de una impresora 3D de cabezales intercambiables

Design of a 3D Printer with interchangeable heads

Juan Carlos Baca Castro¹

RESUMEN:

En la presente tesis se diseña una impresora 3D de cabezales intercambiables para piezas didácticas (23x20x16 cm) en la Escuela de Ingeniería Mecánica-Eléctrica de la Universidad Cesar Vallejo en la ciudad de Trujillo. Las entrevistas a los docentes de la escuela mencionada y la revisión de normativa de diseño definieron las necesidades. Se generaron 6 conceptos alternativos para la estructura y el extrusor de la impresora evaluados mediante una matriz ponderada para hallar el concepto óptimo. Luego se aplicó diseño de configuración al concepto óptimo para así definir las dimensiones más importantes del equipo a la configuración ganadora. Luego, se procedió al diseño paramétrico en dos etapas: la primera mediante una simulación MEF (Método de Elemento Finito) en ANSYS-WORKBENCH, estática y dinámica, que parametrizaba el material de los ejes guía para obtener esfuerzos de Von Misses (σ'), factores de seguridad (FS), deformaciones (δ_{max}) y ciclos para falla; y la segunda mediante una GUI-MATLAB para obtener una velocidad óptima de impresión variando el costo de energía eléctrica y potencia de motores. Los rangos adecuados de impresión fueron de: Largo 200-300 mm, ancho 200-250 mm, alto 150-200 mm. La estructura con patín de refuerzo y la configuración con motores en la viga superior y carrete en la base resultaron óptimos. El análisis estático MEF-ANSYS favoreció al aluminio anodizado RexRoth 20x20mm con un $\sigma'=24.858$ MPa, $F_{smin}=10.057$ y $\delta_{max}=0.0516$ mm. En fatiga según Goodman se obtuvo vida infinita (106 ciclos para falla) para los ejes guía. El rango óptimo de velocidades de impresión según la GUI fue 70-80 mm/s. El presupuesto total del equipo, periodo de retorno de inversión ROI, el Valor Actual Neto (VAN) y la tasa Interna de Retorno (TIR) resultó ser 3000, 3.06%, S/.61695.91 y 16%, respectivamente. La parametrización auxiliada por software ingeniería resultó ser una excelente ayuda para la toma de decisiones al analizar los componentes críticos. El seguimiento riguroso de una metodología de diseño aseguró una secuencialidad muy saludable para el proceso total de diseño. La máquina muestra índices económicos muy promisorios para su ejecución. | **Palabras claves:** Impresión 3D, Cabezales intercambiables, Diseño paramétrico, Análisis de elementos finitos.

ABSTRACT:

In the present test a 3D printer of interchangeable heads for didactic pieces (23x20x16 cm) is designed in the School of Mechanical-Electrical Engineering of the Cesar Vallejo University in the city of Trujillo. The interviews with the teachers of the aforementioned school and the revision of the design regulations defined the needs. Six alternative concepts were generated for the structure and the extruder of the printer evaluated by a weighted matrix to find the optimal concept. Then the design of the machine was applied to the winner. Then, we proceed to the parametric design in two stages: the first by a simulation MEF (Finite Element Method) in ANSYSWORKBENCH, static and dynamic, which parameterized the material of the guide axes to get results from Von Misses (σ'), safety factors (FS), deformations (δ_{max}) and cycles for failure; and the second using GUI-MATLAB to obtain an optimal printing speed by varying the cost of electric power and engine power. The suitable printing ranges were: Length 200-300 mm, width 200-250 mm, height 150-200 mm. The structure with reinforcement skate and configuration with optimal results. The static analysis MEF-ANSYS favored RexRoth anodize aluminum 20x20mm with a $\sigma'=24.858$ MPa, $F_{smin}=10.057$ and $\delta_{max}=0.0516$ mm. In fatigue according to Goodman, infinite life was obtained (106 cycles for failure) for the guide axes. The optimal range of printing speeds according to the GUI was 70-80 mm / s. The total value of the equipment, the period of return investment, the Net Real Value (NPV) and the internal rate of Return (IRR) turned out to be 3000, 3.06%, S/.61695.91 and 16%, respectively. The auxiliary parameterization for the engineering software turned out to be an excellent aid for the decision making when analyzing the critical components. The rigorous follow-up of design methodology ensured a very healthy sequence for the total design process. The machine shows promising economic indices for its execution. | **Key words:** 3D printing, Interchangeable heads, Parametric design, Finite element analysis.

¹ Universidad César Vallejo - Estudiante de Ingeniería Mecánica Eléctrica
E-mail: bcastroj@ucvvirtual.edu.pe

1. INTRODUCCIÓN:

Las tecnologías de impresión 3D se introdujeron de manera gradual. La disponibilidad y el acceso en los campus universitarios crecieron rápidamente en los últimos 5 a 10 años, originalmente existían en pequeños grupos y comunidades cerradas, típicamente con impresoras alojadas en la universidad de ingeniería y solo accesible a los estudiantes de ingeniería o con impresoras disponibles dentro de un grupo de investigación y en particular solo para los miembros de ese grupo. Van y otros (2015).

En el Perú se escucha mucho acerca de las impresoras 3D debido a que estas ya pueden ser adquiridas para uso doméstico por cualquier persona, debido al bajo costo de estas impresoras 3D ya que las mismas pueden trabajar desde un modelo tridimensional hecho por algún CAD y así disminuyen el desperdicio de material utilizado. Molina (2016).

GARCIA, Carlos (2015), Diseño de un extrusora para filamento de impresión 3D en la universidad de Chile. Se calculó el comportamiento de una extrusora que ha sido anticipadamente diseñada y se fabricaron partes para así determinar las variables de diseño adecuadas y la geometría general para diseñar eficientemente un calefactor para extrusión de filamento, modelando a partir de diferencias finitas su rango de temperaturas en operación y poder lograr la solución de las ecuaciones desarrolladas.

DROTMAN, Dylan (2015), realizo un diseño de una extrusora de tornillo para fabricación de aditivos en la universidad de California. Se determino prototipo actual fue capaz de obtener una extrusión de bucle abierto de una boquilla de 0.2 mm de diámetro con un caudal de salida máximo de 7.14 mm/seg y mantener un perfil de temperatura controlado utilizando el control de golpe-explosión durante el proceso de extrusión.

MOLINA, Andoni (2016), Desarrollo materiales compuestos de matriz termoplástica reforzados con nanopartículas utilizando la técnica de modelado por deposición fundida. Se determinaron resistencias a la tracción desde 52.9 MPa hasta 61.2 MPa para el PLA y desde 28.3 MPa hasta 43.4 MPa para el ABS.

- Diseñar una impresora 3D con cabezales intercambiables para la fabricación de objetos tridimensionales para su uso pedagógico en los cursos de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica de la Universidad César Vallejo de Trujillo, 2017.
- Generar conceptos potenciales capaces de resolver el problema planteado.
- Identificar el concepto óptimo mediante una matriz de selección.
- Estimar las cargas de diseño.
- Diseñar paramétricamente los sistemas considerados críticos para el equipo mediante el uso del software comercial.
- Seleccionar los componentes estándar del equipo.

¿Cuál será la geometría y especificaciones técnica de una impresora 3D con capacidad de intercambiar cabezales de corte, fresado y extrusión de plástico en diferentes colores en un área no mayor a 250 mm² de base y 165 mm de altura?

2. METODOLOGÍA:

2.1. Matriz de criterios ponderados

La matriz de criterios ponderados es uno de los métodos para seleccionar opciones óptimas según criterios predefinidos prioritarios que reciben ponderación según la importancia particular del proyecto. Cada concepto o alternativa considerada es evaluada asignándole una puntuación entre 1 a 10 para cada criterio. Finalmente se realiza una sumato-

sumatoria general para obtener la alternativa/concepto ganador Childs (2000). En La Figura N° 1. Se muestra una matriz de criterios ponderados genérica.

		CONCEPTOS					
Criterio de Selección	Peso (Ponderación)	Concepto A		Concepto B		Concepto N	
		Valoración (1 a 10)	Calificación Ponderada	Valoración (1 a 10)	Calificación Ponderada	Valoración (1 a 10)	Calificación Ponderada
Aspecto 1	% de importancia del Aspecto 1	Valoración del Aspecto 1 del Concepto A	Valoración x % importancia	Valoración del Aspecto 1 del Concepto A	Valoración x % importancia	Valoración del Aspecto 1 del Concepto N	Valoración x % importancia
Aspecto 2	% de importancia del Aspecto 2	Valoración del Aspecto 2 del Concepto A	Valoración x % importancia	Valoración del Aspecto 2 del Concepto A	Valoración x % importancia	Valoración del Aspecto 2 del Concepto N	Valoración x % importancia
...
Aspecto N	% de importancia del Aspecto N	Valoración del Aspecto N del Concepto A	Valoración x % importancia	Valoración del Aspecto N del Concepto A	Valoración x % importancia	Valoración del Aspecto N del Concepto N	Valoración x % importancia
Calificación Total			Suma de Calificaciones Ponderadas		Suma de Calificaciones Ponderadas		Suma de Calificaciones Ponderadas
Ranking							

Figura N°1: Matriz de criterios Ponderados

3. VARIABLES Y CAJA NEGRA:

Para el diseño paramétrico y análisis de caja negra se usó una adaptación de la metodología propuesta por los autores Eggert (2010) y Dieter y Schmidt (2000) que propone cuatro tipos de variable para investigaciones aplicadas de diseño: variables de diseño, variables de solución, parámetros de definición de problema y variables intervinientes.

3.1 Caja Negra Estructura

La anatomía general de una impresora 3D presenta como partes principales: Estructura, Conjuntos de elementos mecánicos, sistema electromecánico. Se decidió diseñar paramétricamente la estructura al haber una gran variedad de materiales para esta. Las variables fueron categorizadas como sigue:

Parámetros de definición de problema

- Material del chasis. (Aluminio)
- Geometría general de la máquina (mm)

Variables de Diseño

- Fuerzas aplicadas (N)
- Momentos aplicados (N.m)

Variables de Solución

- Factor de seguridad global por esfuerzo (adimensional)

- Factor de seguridad global por deflexión (adimensional)

Variable interviniente

- Temperatura del Ambiente (°C)

El resumen de estas variables puede verse en la Figura N° 2 que representa el método de la caja negra (Black Box)



Figura 2: Caja negra de Variables Estructura

3.2. Caja Negra Extrusor

Las variables fueron categorizadas como sigue:

Parámetros de Definición de Problema

- Material del extrusor. (Adimensional)
- Diámetro del filamento a la entrada (mm)

Variables de Diseño

- Velocidad de entrada del filamento, V_e (mm/s)
- Diámetro de la boquilla de salida, D_s (mm)
- Temperatura de calentador, T_c (°C)

Variables de Solución

- Costo de fabricación de piezas, C_{ee} (S/.)
- Potencia de motores, P (Hp)

Variable Interviniente

- Temperatura del ambiente (°C)

El resumen de estas variables puede verse en la Figura N° 3 que representa el método de la caja negra (Black Box)



Figura 3: Caja Negra de Variables Extrusor

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Diseño Conceptual Estructura

Luego de realizar una búsqueda bibliográfica se escogieron entre 4 conceptos potenciales para la impresora 3D.

Los conceptos fueron:

Concepto A: Madera contrachapa de abedul;

Concepto B: Aluminio tubo rectangular

Concepto C: Aluminio balaustre

Concepto D: Aluminio RexRoth anodizado

Estos conceptos se pueden apreciar en la Figura N°4.

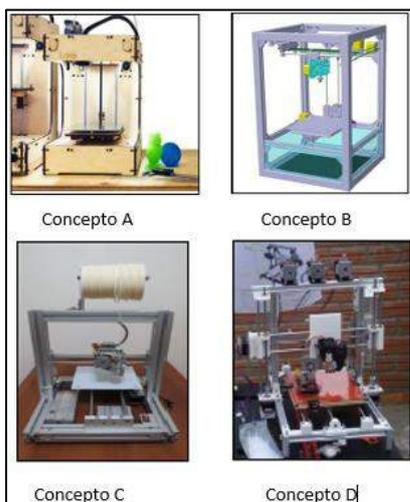


Figura 4: Conceptos de Diseño

Mediante el uso de un matriz de selección de criterios ponderados se realizó el filtrado de un concepto

óptimo para diseño y fabricación, la cual se puede apreciar en la Tabla N° 1. Los criterios de evaluación fueron: Mantenimiento, Seguridad, Ruido, Tamaño y Costo. En esta matriz se puede observar que el concepto D es el óptimo para nuestro caso.

Tabla 1: Matriz ponderada de selección Estructura

CRITERIO	PONDERA DO (%)	ESTRUCTURA MADERA CONTRACHAPA DE ABEDUL		ESTRUCTURA DE ALUMINIO TUBO RECTANGULAR AW-6068 T3 40*40*1.50 (MM)		ESTRUCTURA DE ALUMINIO BALAUSTRÉ 28*12*1.60 (MM)		ESTRUCTURA DE ALUMINIO REXROTH ANODIZADO 20*20 (MM)	
		PUNTAU CI ON DE PONDERAD O	PUNTAU CI ON DE PONDERAD O	PUNTAU CI ON DE PONDERAD O	PUNTAU CI ON DE PONDERAD O	PUNTAU CI ON DE PONDERAD O	PUNTAU CI ON DE PONDERAD O	PUNTAU CI ON DE PONDERAD O	PUNTAU CI ON DE PONDERAD O
MANTENIMIEN TO	35	4	1.4	6	2.1	2	0.7	6	2.1
SEGURIDAD	10	2	0.2	2	0.2	2	0.2	6	0.6
RUIDO	10	2	0.2	4	0.4	4	0.4	4	0.4
TAMAÑO	15	4	0.6	2	0.3	2	0.3	6	0.9
COSTO	30	2	0.6	4	1.2	2	0.6	6	1.8
TOTAL	100	14		16		12		28	

4.2. Diseño Conceptual Extrusor

Luego de realizar una búsqueda bibliográfica se escogieron entre 3 conceptos potenciales para la impresora 3D.

Los conceptos fueron:

Concepto A: Hotend tipo NF THC-01;

Concepto B: Hotend tipo WIN3RL;

Concepto C: Hotend tipo Diamond;

Estos conceptos se pueden apreciar en la Figura N°5.

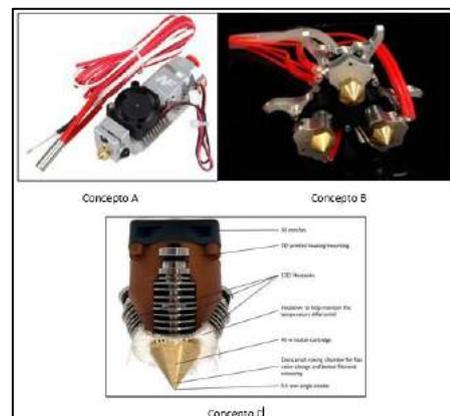


Figura 5: Conceptos de Diseño Extrusor

Mediante el uso de un matriz de selección de criterios ponderados se realizó el filtrado de un concepto

óptimo para diseño, la cual se puede apreciar en la Tabla N° 2. Los criterios de evaluación fueron: Disponibilidad, Mantenimiento, Versatilidad en gama de colores, Tamaño y Costo. En esta matriz se puede observar que el concepto C es el óptimo para nuestro caso.

Tabla 2: Matriz ponderada de selección Extrusor

DISEÑO DE IMPRESORA 3D DE CABEZALES INTERCAMBIABLES		HOTEND WIN3RL		HOTEND NF THC-01		HOTEND DIAMOND	
CRITERIO	PONDERADO (%)	PUNTUACION	PUNTUACION DE PONDERADO	PUNTUACION	PUNTUACION DE PONDERADO	PUNTUACION	PUNTUACION DE PONDERADO
DISPONIBILIDAD	35	2	0,7	4	1,4	6	2,1
MANTENIMIENTO	15	2	0,3	4	0,6	6	0,9
VERSATILIDAD EN GAMA DE COLORES	15	4	0,6	2	0,3	6	0,9
TAMAÑO	15	2	0,3	6	0,9	4	0,6
COSTO	20	2	0,4	2	0,4	6	1,2
TOTAL	100	12		18		28	

4.3. Diseño Paramétrico

4.3.1. Simulación Numérica de la Estructura

Para el análisis por elementos finitos, se utilizó análisis estático en la estructura de la impresora 3D de cabezales intercambiables como restricciones, se aplicaron al cuerpo de la estructura las cargas por peso de elementos. Para las varillas lisas verticales del eje Z se utilizó una herramienta de fatiga para analizar dinámicamente la carga alternante que reciben dichas varillas para así poder corroborar que las varillas soportaran una cantidad de ciclos antes de fallar y así también se obtuvo un factor de seguridad de 15 debido a las cargas diminutas a las que está sometido. Las cuales son mostradas en las tablas N°3 hasta la 6. Procedimientos similares pueden observarse en los trabajos de investigación previos Romero (2016).

Tabla 3: Matriz Grafica paramétrica para evaluar la variable de solución Esfuerzo de Von-Mises



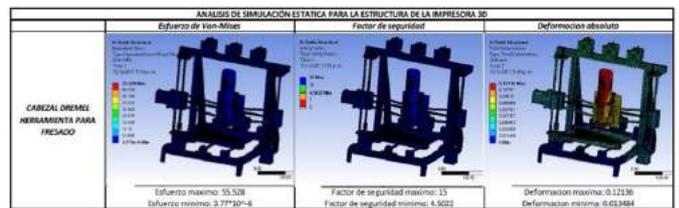
Tabla 4: Matriz Grafica paramétrica para evaluar la variable de solución Factor de seguridad



Tabla 5: Matriz Grafica paramétrica para evaluar la variable de solución Deformación absoluta



Tabla 6: Matriz Grafica paramétrica para evaluar la variable de solución para la herramienta de fresado Dremel



4.3.2. Interface Gráfica de Usuario (Matlab)

Se realizó el diseño paramétrico en MATLAB para poder observar el comportamiento de la potencia de motor requerida y costo de energía eléctrica, al modificar sus parámetros de diseño como son la velocidad de entrada de filamento, diámetro de boquilla y temperatura de fundición para luego poder determinar los parámetros óptimos que cumplan con las

recomendaciones de diseño. Procedimientos similares pueden observarse en los trabajos de investigación previos Mendoza (2015).

seleccionados los componentes estándar. Se procedió a la elaboración de los planos que se muestran en las Figuras N° 8 y 9.



Figura 6: Pantalla Principal GUI-Matlab

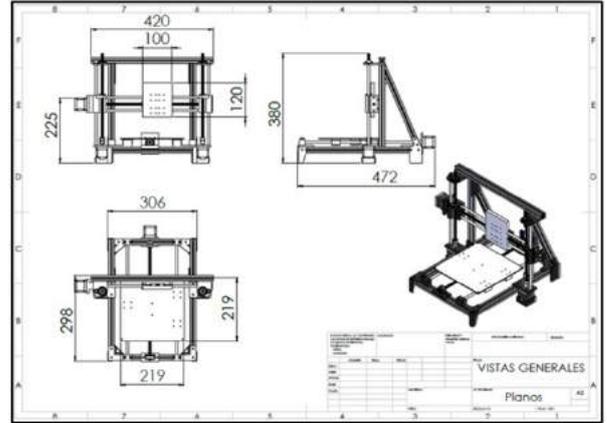


Figura 8: Plano General

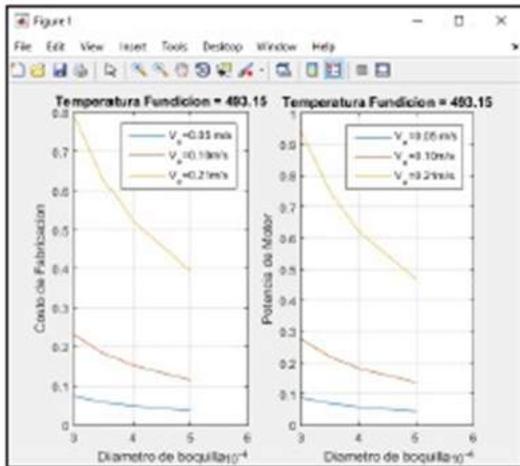


Figura 7: Grafica Paramétrica de Costo y Potencia a una temperatura de fundición de 220°C

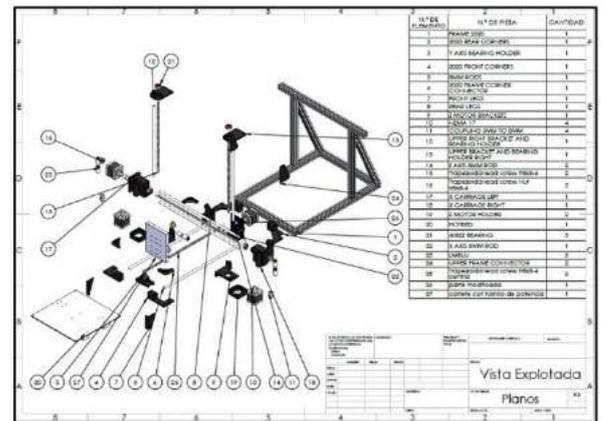


Figura 9: Plano de montaje del equipo

4.4. Selección de Equipos y Materiales

Para los materiales del equipo se consideró el Aluminio anodizado RexRoth para la estructura principal y el acero sae 1045. El Aluminio anodizado RexRoth fue seleccionado para la estructura por su disponibilidad y bajo costo. Del mismo modo se optó por motores Nema 17 de 200 pasos para así obtener el máximo desempeño en el caso de precisión.

4.5. Elaboración de Planos

Diseñadas la estructura mediante el análisis paramétrico mediante el Método del Elemento Finito y

5. CONCLUSIONES

Se puede concluir de finalizado este proyecto que:
 - El proceso inicial de obtención de necesidades mediante entrevistas, familiarización con la normativa, recomendaciones de diseño y consolidado en especificaciones de rangos deseados para las funciones del equipo, ofreció una secuencia de rigor adecuado que facultó un punto de partida para los siguientes pasos de diseño: conceptual, de configuración y paramétrico. Se corrobora la utilidad de una metodología formal de diseño conforme con trabajos de diseño previo (Dieter y otros 2000 y Eggert 2010).

- El diseño de la geometría de la estructura se apoyó en simulaciones por método de elemento finito (ANSYS) permitiendo diseñar adecuadamente la geometría final además de brindar una opción muy versátil para acercar las solicitaciones de carga a la realidad manteniendo al mismo tiempo un adecuado factor de seguridad. Con lo que se obtuvo que el factor de seguridad de 15 es muy alto debido al nivel de cargas a las que se encuentra sometida.

- El diseño paramétrico con el cabezal de dremel como herramienta para fresado arrojo muy buenos resultados, permitiendo así asegurar la decisión tomada previamente en la cual la estructura no fallara ni con la herramienta dremel. Por lo tanto por juicio ingenieril debido al poco peso del cabezal de laser se prevé que no afectara en nada la estructura de la impresora 3D de cabezales intercambiables.

- El Diseño paramétrico (Matlab®) de la variación de la Velocidad respecto del diámetro de boquilla con los parámetros de velocidad de entrada del filamento, temperatura de fundición, mostro ser una herramienta muy poderosa para la obtención de una velocidad optima (80 mm/s) en costo de energía eléctrica y potencia necesaria de motores. La influencia de estos parámetros que podía inferirse aun en forma intuitiva pudo expresarse en forma cuantitativa siguiendo adecuado rigor matemático en un cálculo de escritorio.

- El cálculo de escritorio inicial del torque de motor necesario y costo de energía eléctrica para la impresora 3D de cabezales intercambiables no solamente aseguraron unos factores de seguridad adecuados (Max:15 y Min: 10.057), sino que brindaron los valores iniciales para la simulación por elementos finitos en su anterior optimización.

6. AGRADECIMIENTOS:

A mi asesor de tesis, Dr. Jorge Antonio Olortegui Yume agradezco por su tiempo y dedicación para la culminación exitosa de este proyecto y por las enseñanzas brindadas a lo largo de la investigación.

A mi asesor de tesis, Dr. Felipe De la Rosa Bocanegra agradezco por la orientación y tiempo dedicado para poder desarrollar este proyecto de investigación.

A mis padres Juan Baca Román y Ruth Castro Ortiz expresarles mi gratitud por sus consejos, por su apoyo incondicional para forjar mi vida en un camino correcto y de sabiduría, con lo cual hoy culmino este trabajo satisfactoriamente.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- [1] Dieter, George y Schmidt, Linda. 2000. Engineering design. New york : s.n., 2000.
- [2] Drotman, Dylan. 2015. Design of a screw extruder for additive Manufacturing. California : s.n., 2015.
- [3] Eggert, Rudolph. 2010. Engineering design. New york : high peak press, 2010.
- [4] Garcia, Carlos. 2015. Diseño de una extrusora para filamento de impresion 3D. Santiago de chile : s.n., 2015.
- [5] Kayfi, Range, Ragab, Dana y Tarek, Tutunji. 2015. Mechatronic System Design Project: A 3D PRINTER CASE STUDY. Philadelphia : IEEE Jordan Conference on Applied Electrical Engineering and Computing Technologies (AEECT), 2015. págs. 1-6.
- [6] Molina, Andoni. 2016. Desarrollo de materiales compuestos de matriz termoplástica reforzados con nanoparticulas utilizando la técnica de mode-

lado por deposición fundida empleada en manufactura aditiva. Lima : s.n., 2016.

- [7] Mulaweh, Abu y I, Hosni. 2005. Integration of a fin experiment into the undergraduate heat transfer. s.l. : International journal of mechanical engineering education, 2005. págs. 83-92.
- [8] Olortegui, Jorge. 2016. 'On the use of in house built equipment for enhancement of college teaching & research'. Piura : s.n., 2016. págs. 12-17.
- [9] Pearce, Joshua. 2013. Open-source lab: How to build your own hardware and reduce research costs. Newnes : Elsevier, 2013. pág. 240. 9780124104860.
- [10] Van, Amy, y otros. 2015. How 3D Printers Support Teaching in Engineering, Technology and Beyond. s.l. : Bulletin of the Association for Information Science and Technology, 2015. págs. 16-20. Vol.42.