



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE IMPRESORA 3D DE CINCO EJES PARA EL AHORRO DE MATERIAL Y MEJORAMIENTO DE LA RESISTENCIA MECÁNICA EN PIEZAS FABRICADAS MEDIANTE EL MÉTODO DE DEPOSICIÓN DE MATERIAL FUNDIDO, DESARROLLADO EN LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE EXTENSIÓN LATACUNGA”

CHRISTIAN VINICIO FONSECA LASCANO
PABLO DANIEL MIRANDA TACO

Latacunga, 2018



ANTECEDENTES

PROTOTIPADO RÁPIDO

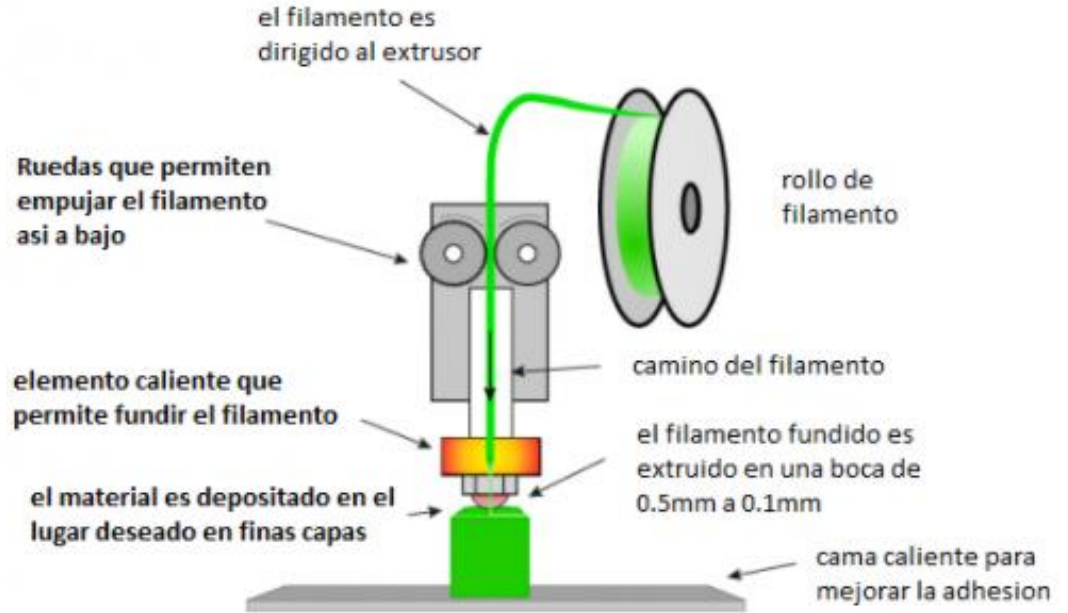
- Prototipado "Open source"

MODELADO POR DEPOSICIÓN DE MATERIAL FUNDIDO

- Beneficios
- Objeto de estudio

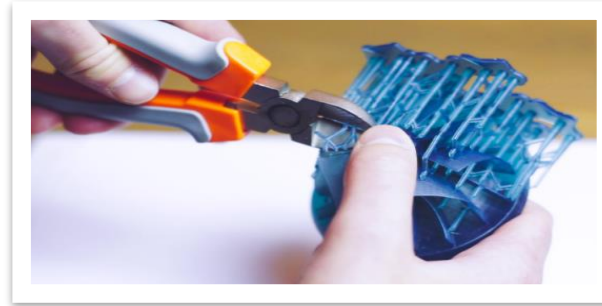
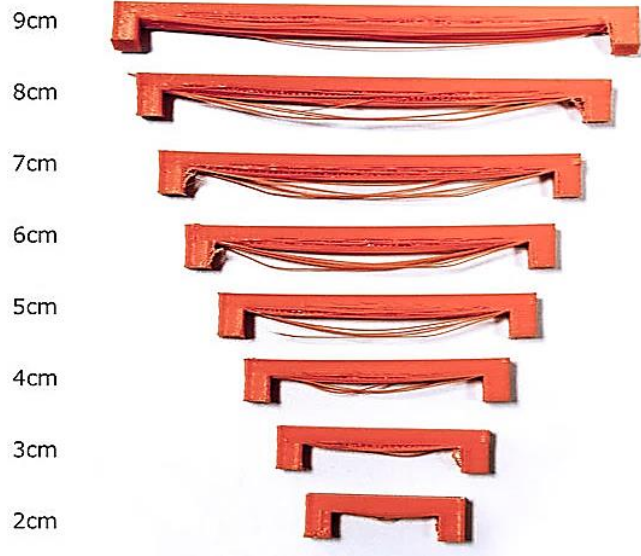
IMPRESIÓN 3D

- Maquinaria profesional
- Proyecto RepRap



PROBLEMÁTICA

- Debilidades dentro de la impresión 3D FDM:

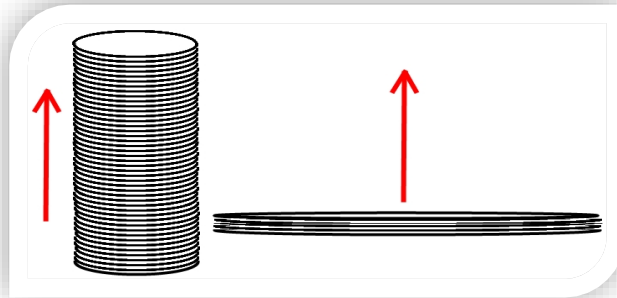


USO DE
MATERIAL
DE APOYO

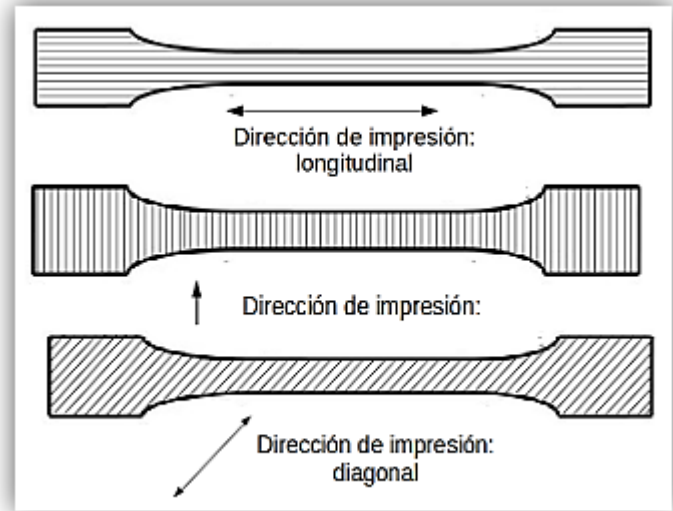
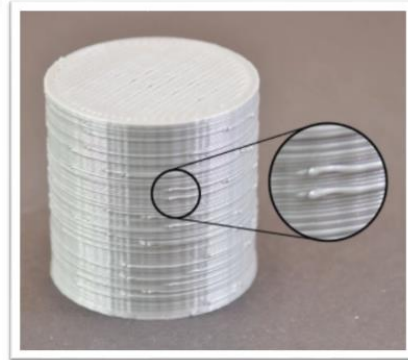


PROBLEMÁTICA

- Debilidades dentro de la impresión 3D FDM:



ORIENTACIÓN
DE CAPAS
APILADAS
REGULARMENTE



PROPUESTA Y JUSTIFICACIÓN

MAQUINARIA CNC DE CINCO EJES

INCREMENTO DE EXACTITUD

OPTIMIZACIÓN DE PROCESOS

AUGE DE LA IMPRESIÓN TRIDIMENSIONAL

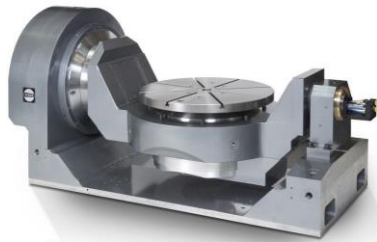
IMPLEMENTACIÓN MULTIEJE

NUEVOS SISTEMAS MECATRÓNICOS

DEPOSICIÓN DE MATERIAL FUNDIDO

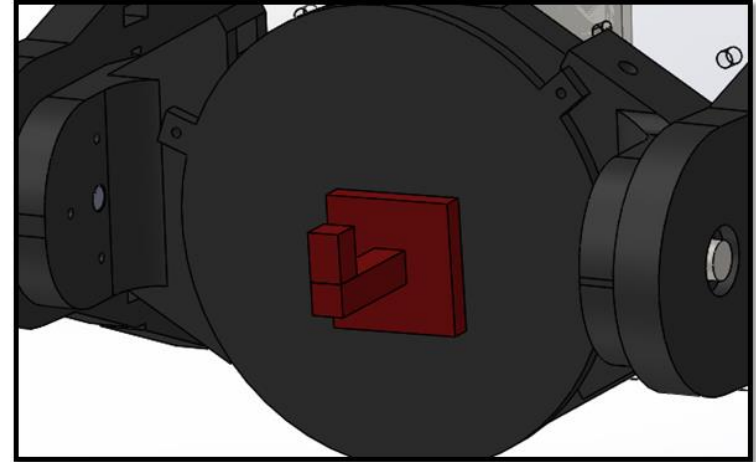
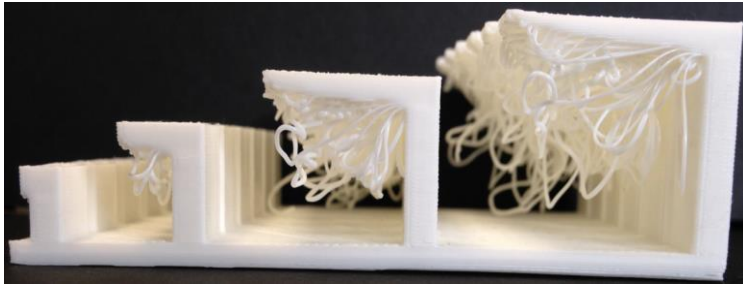
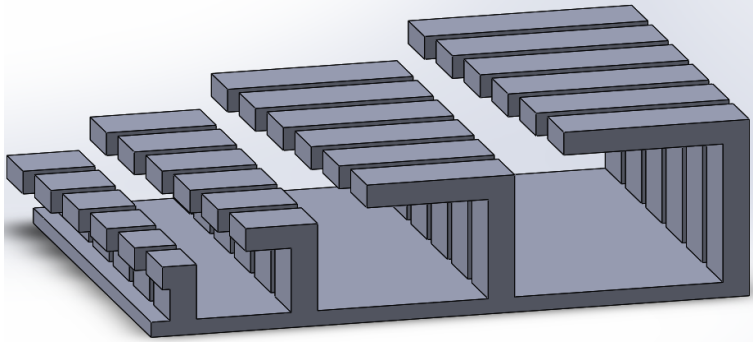
OPTIMIZACIÓN DE MATERIAL

MEJOR RESISTENCIA MECÁNICA



ESPE
ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO
CAMINO A LA EXCELENCIA

PROPUESTA AHORRO DE MATERIAL

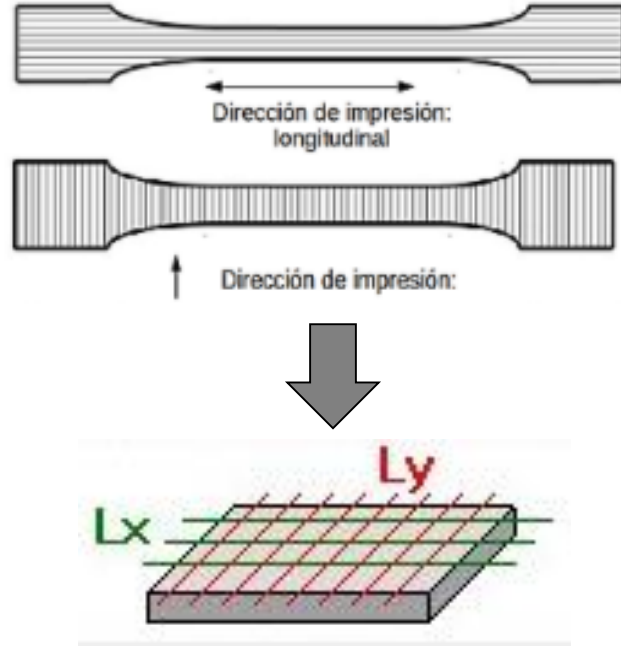


Movimientos Rotativos



ESPE
ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO
CAMINO A LA EXCELENCIA

PROPUESTA DE MEJORA DE RESISTENCIA



OBJETIVOS

- Investigar modelos de impresoras 3D que implementen mejoras hacia el desarrollo de las tecnologías multieje.
- Plantear el mecanismo y la disposición del sistema de guiado lineal y rotativo, para la fijación de sistema base.
- Efectuar la selección de alternativas para el rediseño del prototipo en aspectos mecánicos y de control electrónico.
- Construir el prototipo basado en la selección del modelo base.
- Estructurar arquitectura de control para impresión 3D de cinco ejes.
- Calibrar al sistema en búsqueda de irregularidades estructurales
- Verificar operaciones de optimización en el rediseño



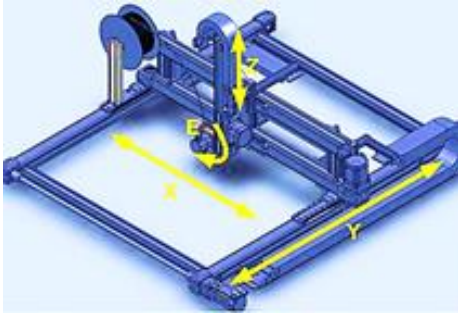

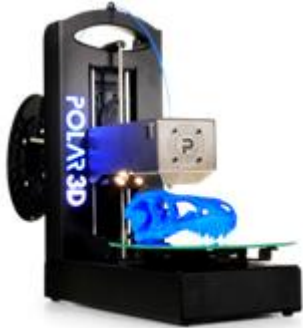
PRINCIPALES FUNDAMENTOS TEÓRICOS



OPERACIONES EN IMPRESIÓN 3D

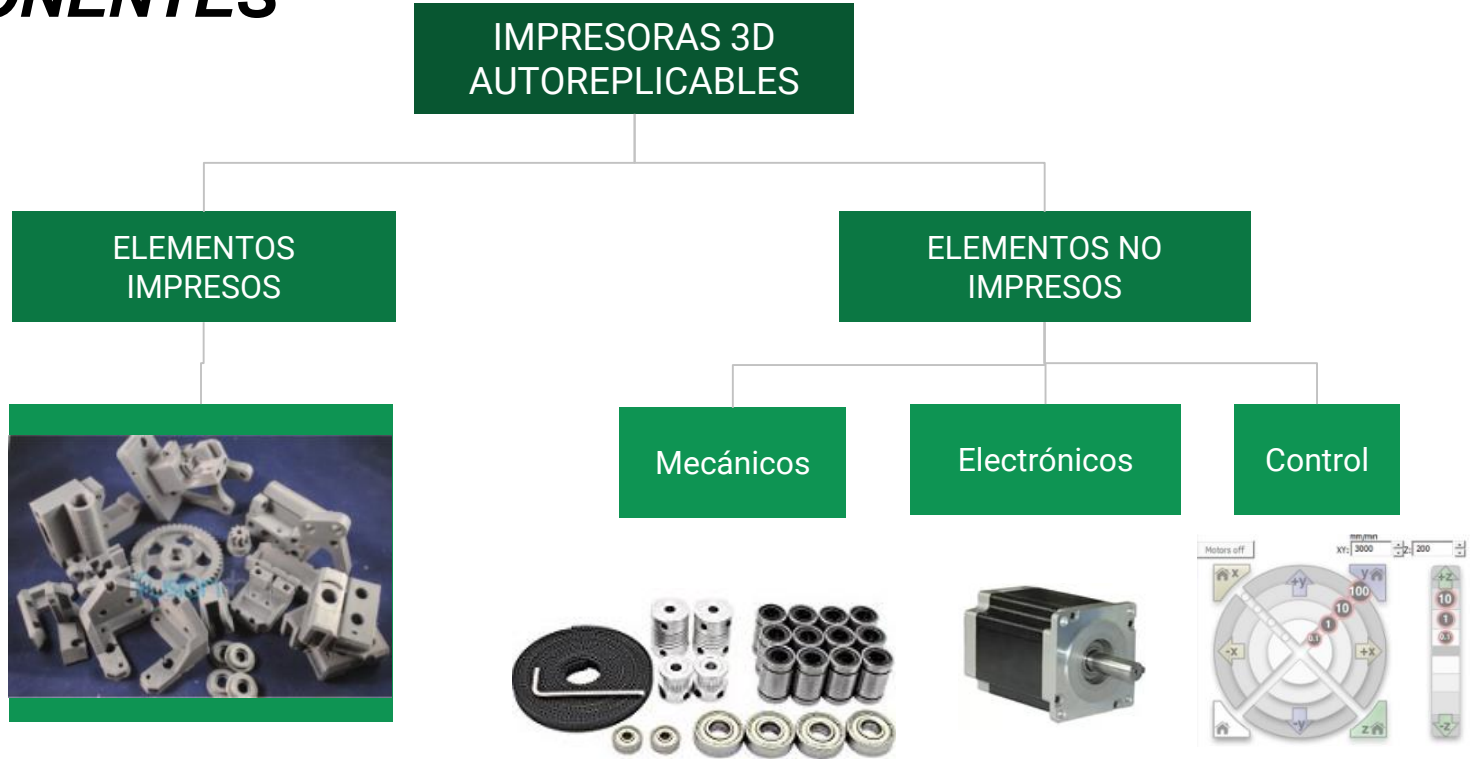


PRINCIPALES ESTRUCTURAS DE IMPRESORAS 3D

ROBOT CARTESIANO	ROBOT DELTA	POLAR
		



COMPONENTES





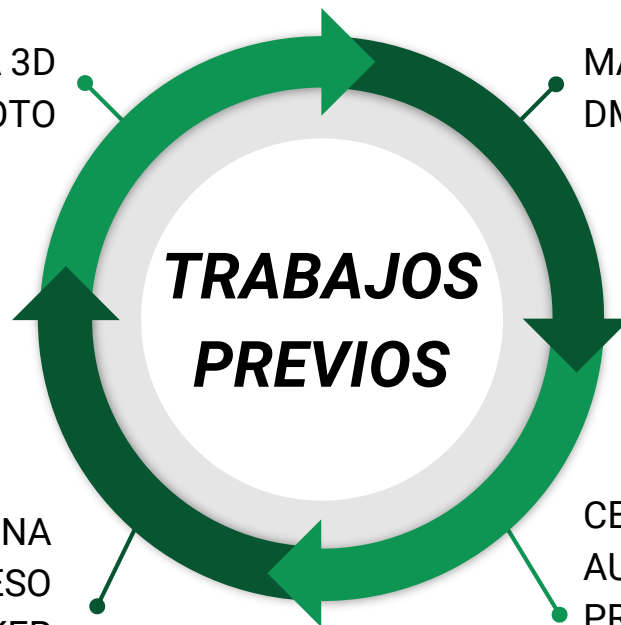
IMPRESORA 3D
ENOMOTO



MAQUINARIA
DMG MORI



MÁQUINA
MULTIPROCESO
5 AXISMAKER



CENTRO
AUTÓNOMO DE
PRODUCCIÓN
ADD+PROCESS



APLICACIONES DE LA IMPRESIÓN 3D DE CINCO EJES



MATERIAL DE IMPRESIÓN



PLA



ESPE
ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO
CAMINO A LA EXCELENCIA

ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS

Escala de calificación, ponderación y su interpretación

Calificación	% del Óptimo	Significado
0	< 35	Insatisfactorio
1	36-50	Satisfactorio
2	51-75	Bueno
3	76-89	Muy Bueno
4	90-100	Óptimo



SUBSISTEMAS DENTRO DE IMPRESORAS 3D

- *Bastidor y sistema de guiado cartesiano*
- *Mecanismos de transmisión de movimiento*
- *Cabezal de extrusión (Mecanismo extrusor y Hot End)*
- *Plataforma base y cama de deposición de material (guiado rotativo)*
- *Sistema eléctrico-electrónico*
- *Sistema de control (Firmware y software en general)*



PARÁMETROS DE SELECCIÓN DE IMPRESORA 3D BASE

Tipo de alimentación eléctrica: 110V AC

Volumen y tamaño del modelo: Máquina de ambiente de oficina

Estructura mecánica: Estructura rígida, liviana y de fácil ensamblaje

Material de extrusión: Filamentos plásticos estandarizados PLA

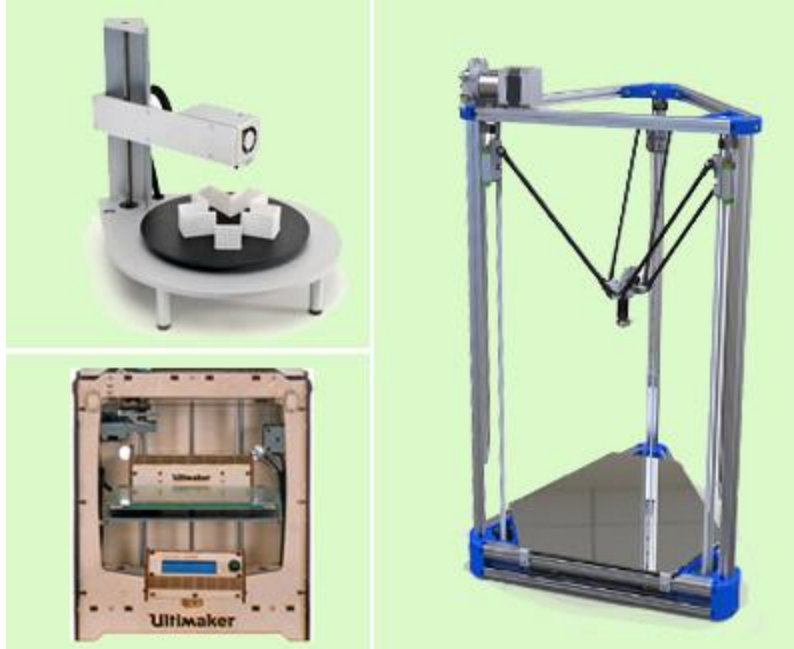
Tipo de Software: Marca de certificación de propiedad abierta

Temperatura de trabajo: Establecida en función del modelo de fundidor rediseñado

Características especiales: Disponible para adaptación y rediseño en estructura y control



Disposición del sistema de guiado de modelo base

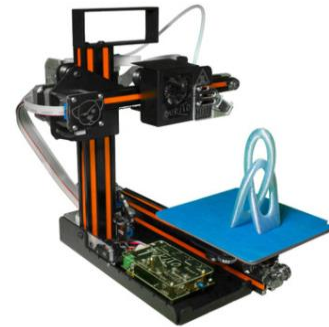


Impresoras 3D cartesianas

Mejor capacidad de rediseño

Movimiento independiente de ejes

Facilidad configuración de control

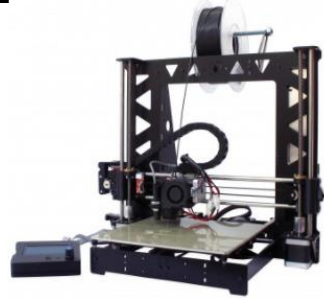


Estructura de bastidor y sistema de guiado

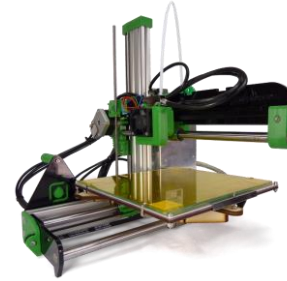
1



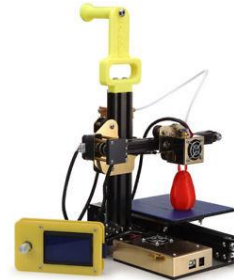
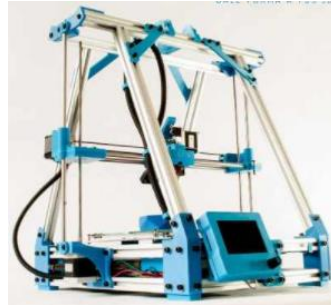
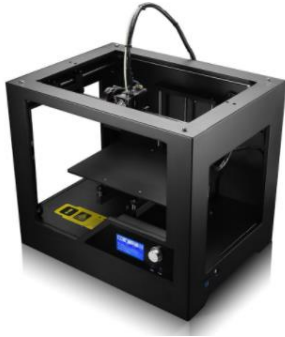
2



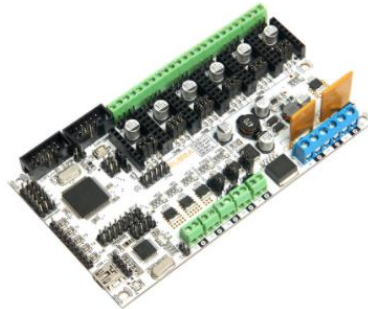
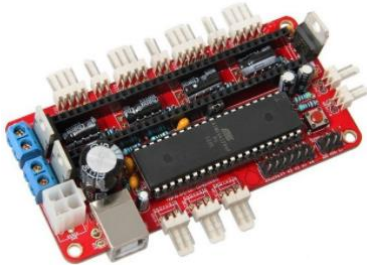
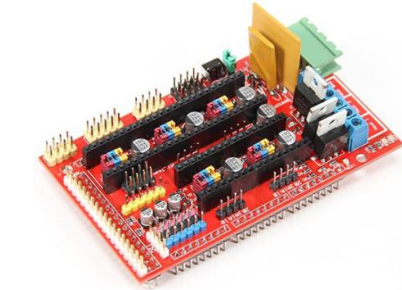
3



1. Estructura cerrada
2. Estructura en pórtico único
3. Estructura en voladizo



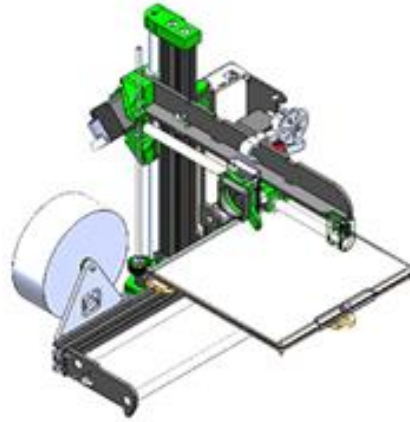
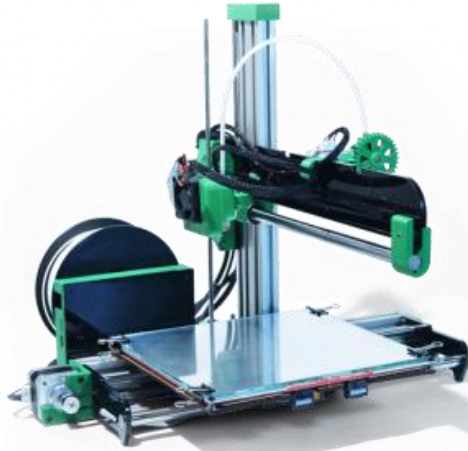
Tarjeta electrónica de control



Tarjeta	Dirvers para motor
RAMPS	5
Sanguinololu	4
Gen 7	4
SAV MKI	4
RUMBA	6
DUET-DUEX	8



Modelo base: Ormerod 2



Estructura bastidor en voladizo

Tarjeta electrónica Duet-Duex

Hardware-Software libre



ESPE
ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO
CAMINO A LA EXCELENCIA

PARÁMETROS DE READECUACIÓN DE IMPRESORA 3D BASE

Bastidor y sistema de guiado: Fácil montaje, desmontaje y rediseño. Guiado mediante ejes o rieles

Mecanismos de transmisión de movimiento: Engranajes, polea-correa dentada, tornillo-tuerca. Caja reductora

Cabezal de extrusión: Conservación de subsistema o adaptación de acuerdo a disponibilidad en el mercado

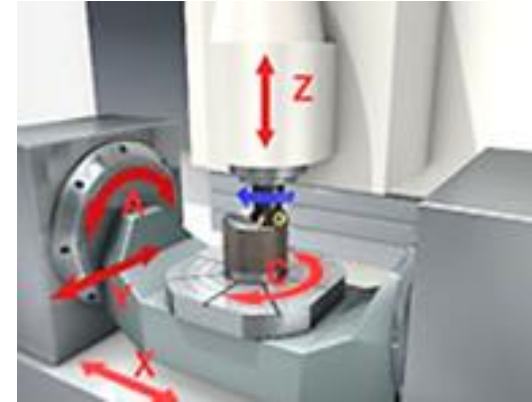
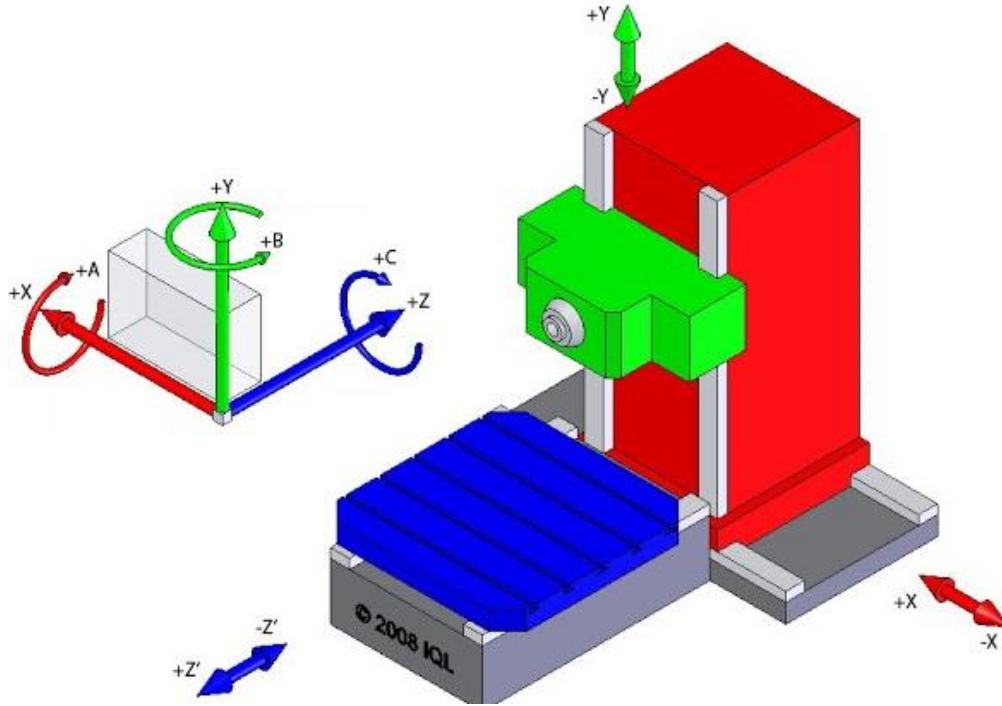
Plataforma base y cama de deposición: Fácil montaje, desmontaje y rediseño. Plataforma de apoyo robusta

Sistema eléctrico-electrónico: Soporte rediseño motores PaP, sensores posición-temperatura, calentador.

Arquitectura de control: Intérprete de códigos G de cinco ejes. Firmware e Interfaz de usuario adaptable a cambios



Disposición del sistema de guiado de cinco ejes



Mesa/mesa

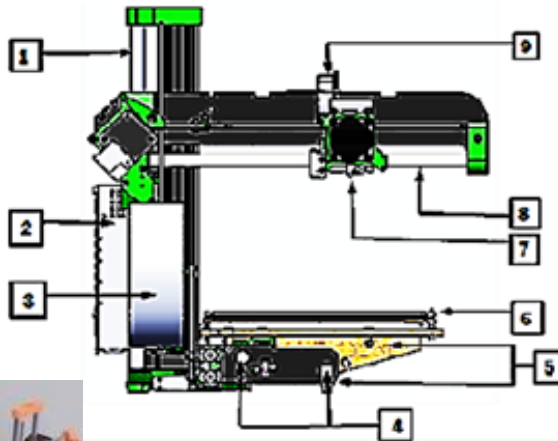
Cabezal/mesa

Cabezal/cabezal

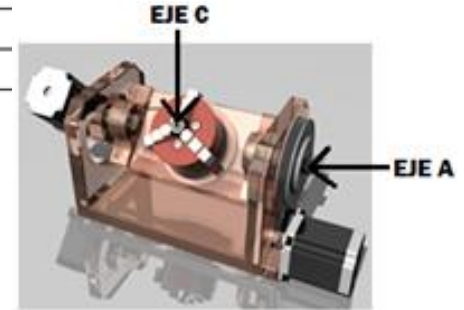
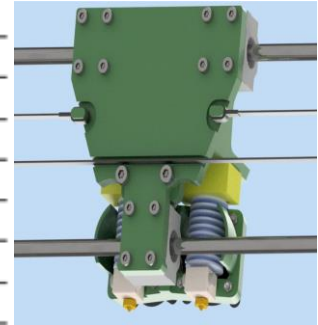


ESPE
ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO
CAMINO A LA EXCELENCIA

Subsistemas a ser conservados y modificados



Ítem	Descripción
1	Eje Z
2	Sistema electrónico de control
3	Sistema de alimentación de material
4	Eje Y
5	Plataforma móvil de eje Y
6	Cama de deposición de material
7	Hot End
8	Eje X
9	Extrusor de material



Volumen de trabajo

$$V_T = \pi * r^2 * h$$

$$V = \pi * 60^2 * 170 = 1922654.70 \text{mm}^3$$



Nombre: Plástico personalizado

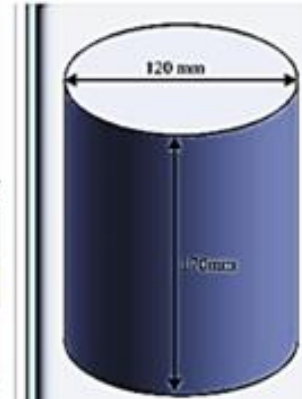
Criterio de fallos predeterminado: Tensión de von Mises máx.

Disponibilidad: *

Origen:

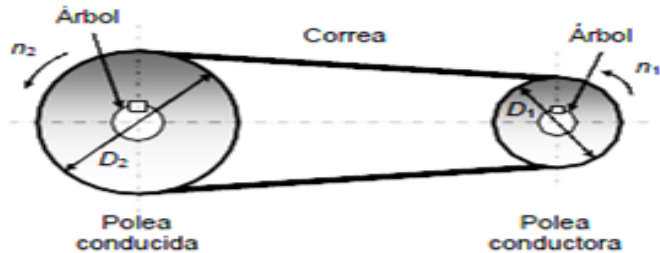
Sostenibilidad: No definido

Propiedad	Valor	Unidad
Módulo elástico	2000	N/mm ²
Coefficiente de Poisson	0.394	N/D
Módulo cortante	313.9	N/mm ²
Densidad de masa	1.250	kg/m ³
Límite de tracción	30	N/mm ²
Límite de compresión		N/mm ²
Límite elástico		N/mm ²
Coefficiente de expansión térmica		/K

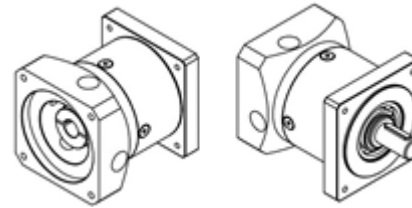


Mecanismos de transmisión de movimiento

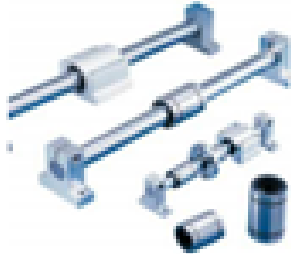
Polea- correa dentada



Engranaje planetario NEMA



Sistema de guiado

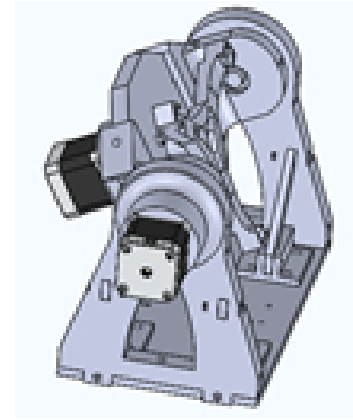
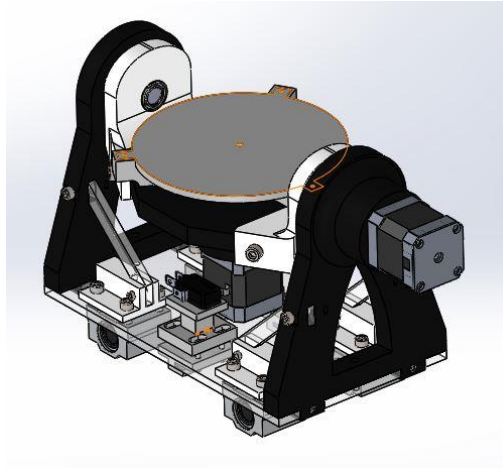
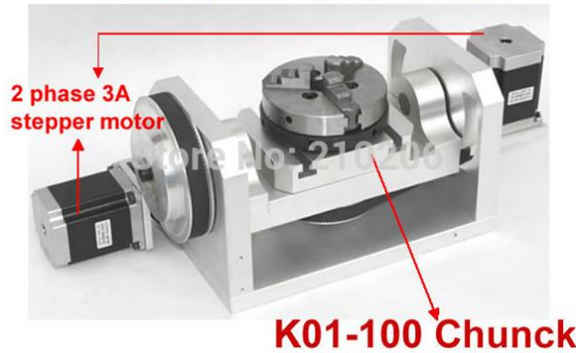


Actuador motor NEMA



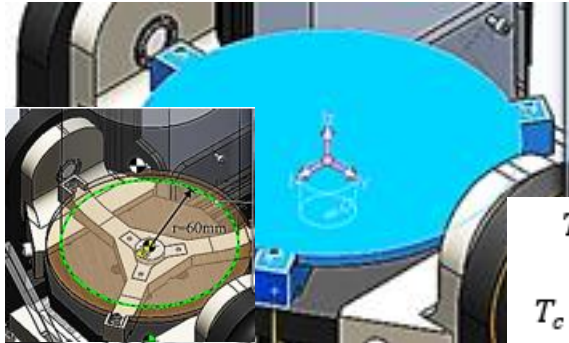
Cama de deposición de material giratoria basculante

The 4th / 5th Axis



Selección motores para ejes rotativos

Eje giratorio C

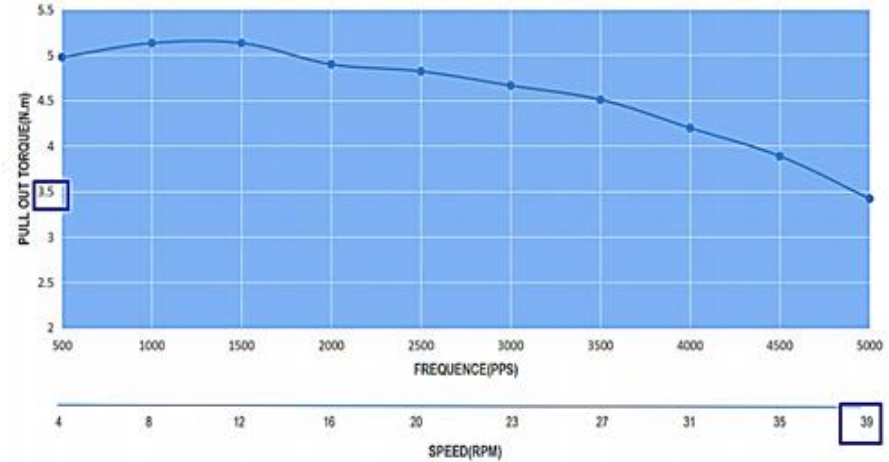


Masa = 139.62 gramos

$$V_t = \omega_M * r_m$$

$$T_c = W * x$$

$$T_c = (m_p + m_b) * g * x$$



$$\omega_M = \frac{200 \text{ mm/s}}{2.5 \text{ mm}} = 80 \frac{\text{rad}}{\text{s}} * \frac{1 \text{ rev}}{2\pi \text{ rad}} * \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} = 763.94 \text{ rpm}$$

$$T_c = (2.54 \text{ Kg}) * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 0.06 \text{ m} = 1.5 \text{ Nm}$$

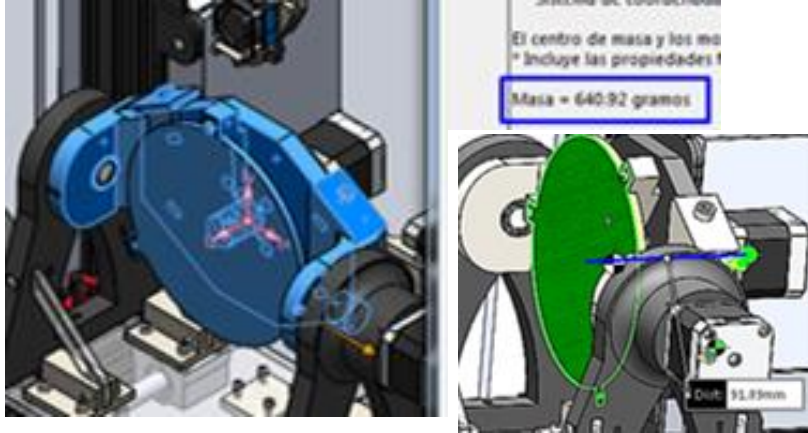
$$\omega_1 = \frac{\omega_M}{i_1} \quad \frac{\omega_M}{\omega_1} = \frac{T_1}{T_M}$$

$$T_1 = T_c * \frac{\omega_M}{\omega_1} = 1.5 \text{ Nm} * \frac{763.94 \text{ rpm}}{38.20 \text{ rpm}} = 30 \text{ Nm}$$



Selección motores para ejes rotativos

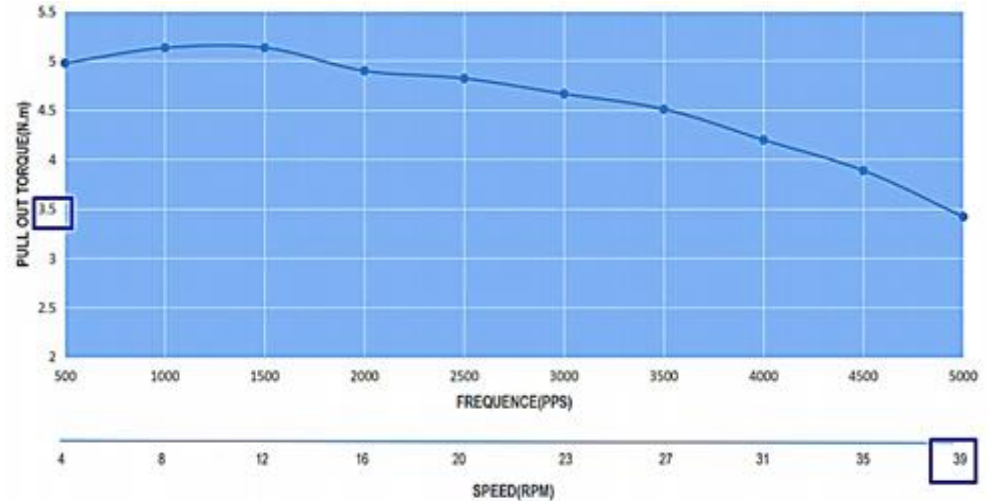
Eje basculante A



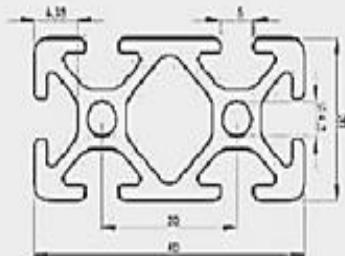
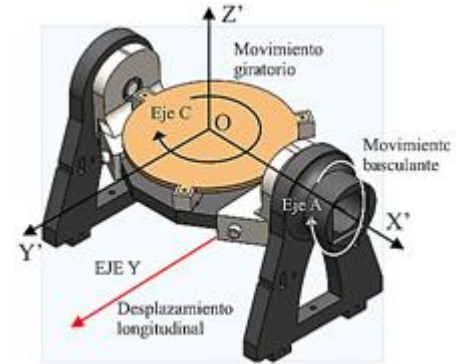
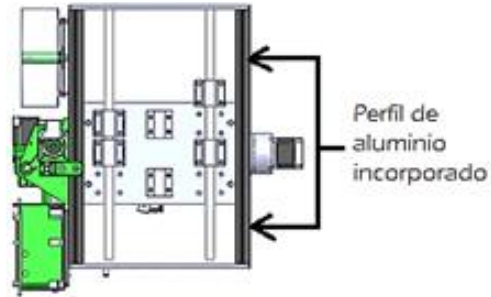
$$T_{A1} = (0.64 + 0.6) Kg * 9.81 \frac{m}{s^2} * 0.0919 m = 1.12 Nm$$

$$T_{A2} = (2.4 Kg) * 9.81 \frac{m}{s^2} * 0.085 m = 2 Nm$$

$$T_A = T_{A1} + T_{A2} \quad T_A = 1.12 Nm + 2 Nm = 3.12 Nm$$

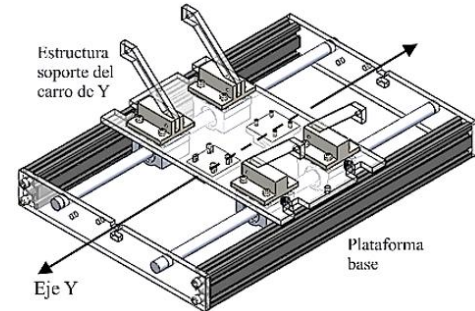


Robustez de plataforma base y diseño CAD de cama

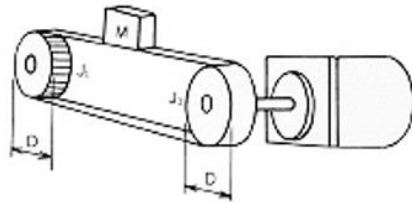
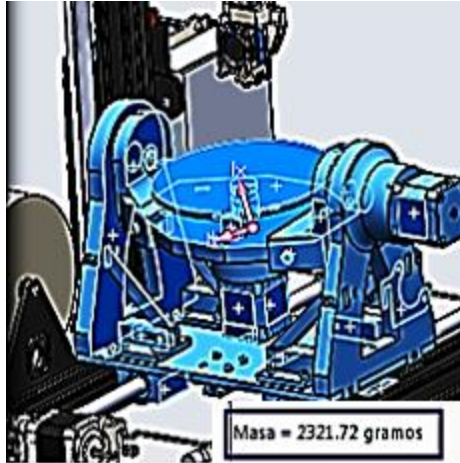


Profile 20x40 I-Type slot 5

Slot		5	mm
Mass	m	0,89	Kg/m
Moment of inertia	Ix	5,11	cm ⁴
	Iy	1,40	cm ⁴
Section modulus	Wx	2,56	cm ³
	Wy	1,40	cm ³
Surface	A	3,29	cm ²



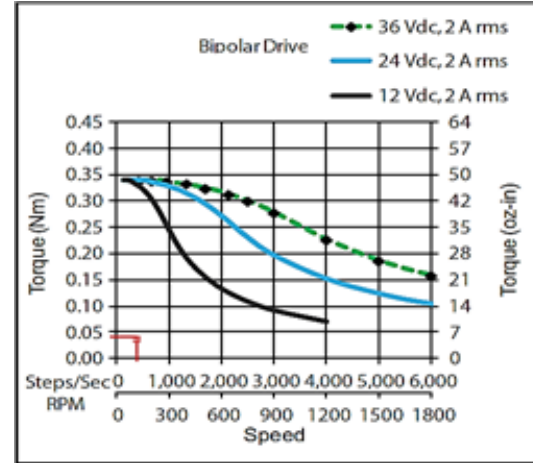
Selección motores para sistema de guiado de Y



$$T_{motor} = (T_i + T_L) * f$$

$$T_i = I_n * \left(\frac{W}{t}\right) * \pi * \theta * K$$

$$T_L = R_{polea}(m * a + F_f)$$



$$T_{motor} = \left(R_{polea}(m * a + F_f) + I_n \left(\frac{W}{t}\right) * \pi * \theta * K \right) f$$

$$T_{motor} = (6.37((2.36 + 2.4) * 9.81 + 4 * 0.8) + 76(82.87) * \pi * 0.113 * 97.73)1.4$$

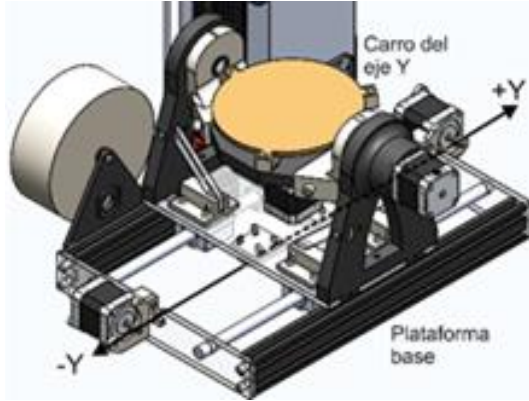
$$T_{motor} = 0.0306 \text{ Nm}$$

$$v_y = \frac{4(20 * 12 \text{ V})}{3200 \frac{\text{pasos}}{\text{rev}} * \pi * 4.8 \text{ mH} * 1.5 \text{ A}} = 13.26 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$$

$$\text{RPM} = \frac{2 * 12 \text{ V}}{3200 \frac{\text{pasos}}{\text{rev}} * \pi * 4.8 \text{ mH} * 1.5 \text{ A}} = 0.332 \frac{\text{rev}}{\text{s}} * \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} = 19.9 \text{ rpm}$$



Análisis de esfuerzos por deflexión del eje Y



$$\sigma_d = \frac{S_y}{N}$$

$$\sigma_d = 92 \text{ MPa}$$

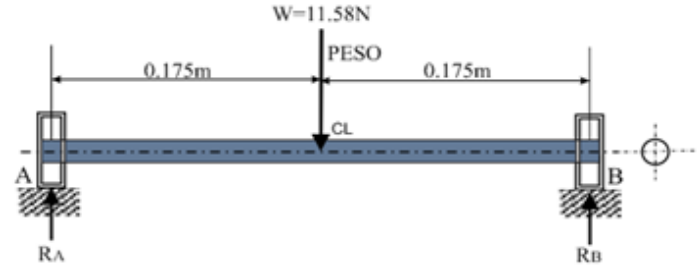
$$W = (2.36 \text{ Kg}) * (9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2})$$

$$W = 23.15 \text{ N}$$

$$M_{max} = \frac{W * L}{4}$$

$$M_{max} = 1.013 \text{ Nm}$$

$$\sigma_{max} = \frac{32 * M}{\pi * D^3}$$



Diseño de Ejes

$$D = \sqrt[3]{\frac{32 * M * N}{\pi * S_y}} \quad D \geq 4.82 \text{ mm}$$

$$\sigma_d \geq \sigma_{max}$$

$$92 \text{ MPa} \geq 5.97 \text{ MPa}$$

Material: Acero Inoxidable - 316L

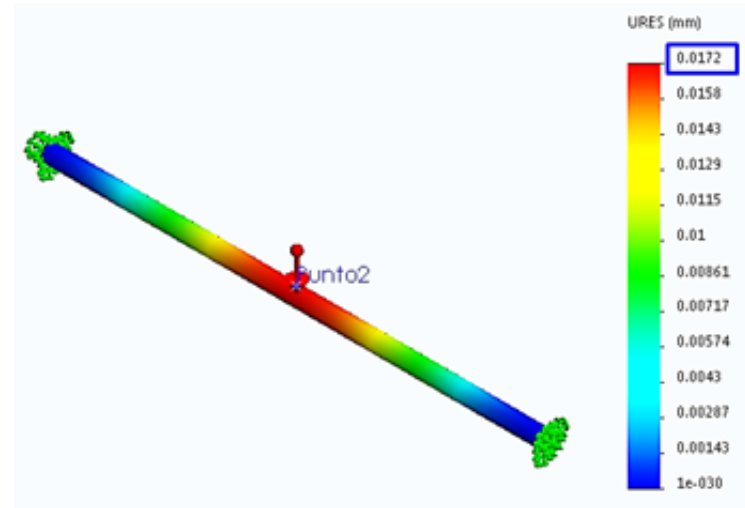
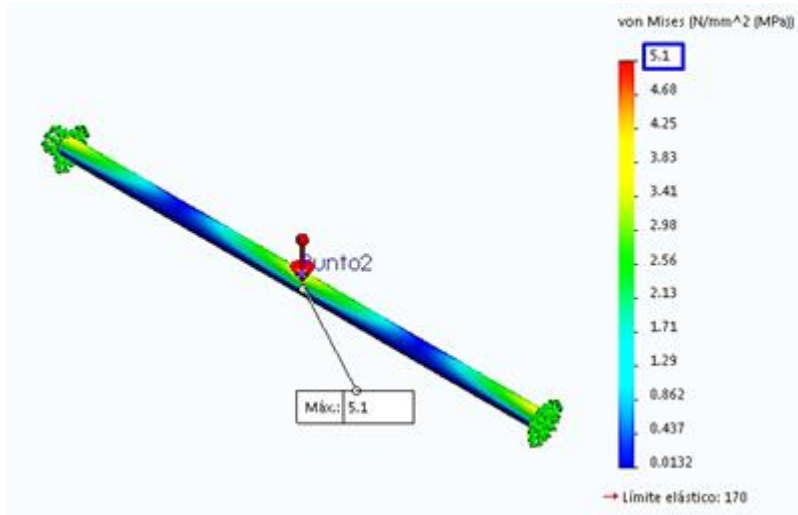
Resistencia a la fluencia (Sy): 276 MPa

Factor de seguridad (N): 3



ESPE
ESCUOLA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO
CAMINO A LA EXCELENCIA

Análisis de esfuerzos por deflexión del eje Y



$$I_y = \frac{\pi * D^4}{64}$$

$$I_y = 1.02 \times 10^{-9} \text{ m}^4$$

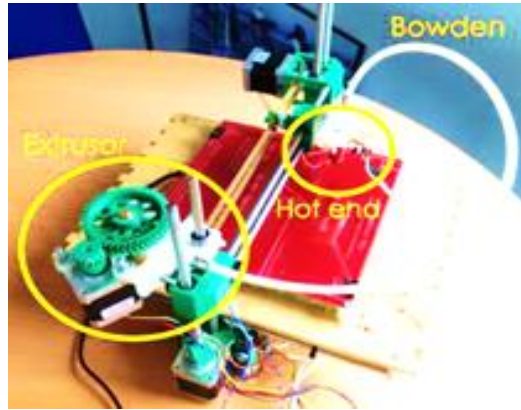
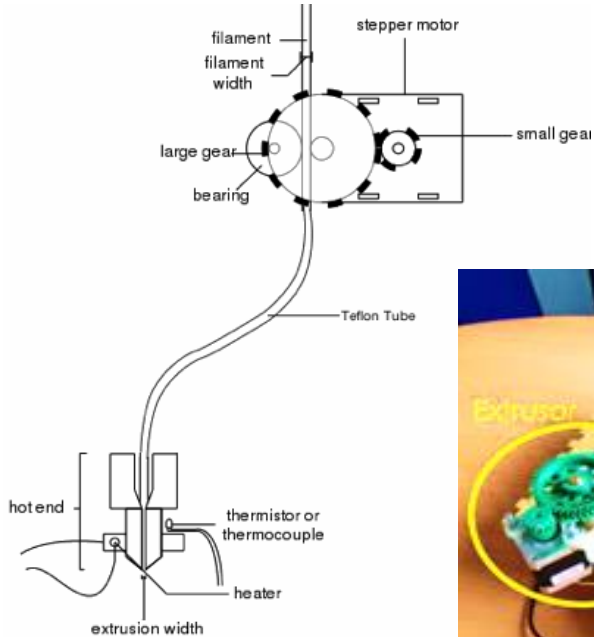
$$y_{max} = -\frac{F_y * L^3}{192 * E * I_y}$$

$$y_{max_y} = -1.26 \times 10^{-2} \text{ mm}$$

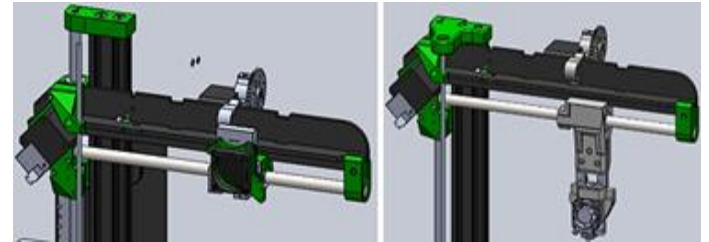
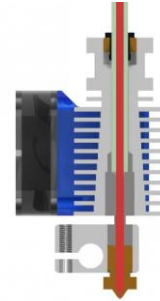


Cabezal de extrusión

Mecanismo extrusor Bowden

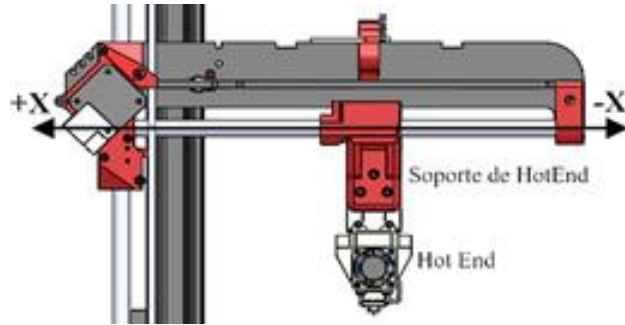


Dispositivo calentador

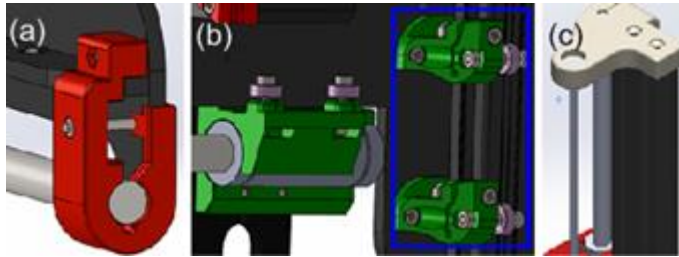


Ensamble diseño CAD

Soporte de Hot End

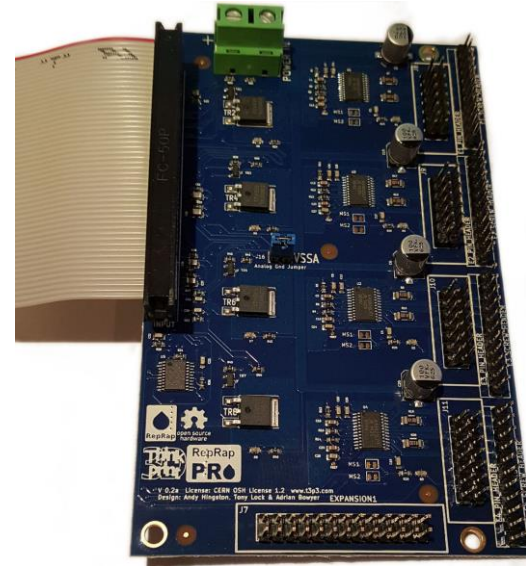
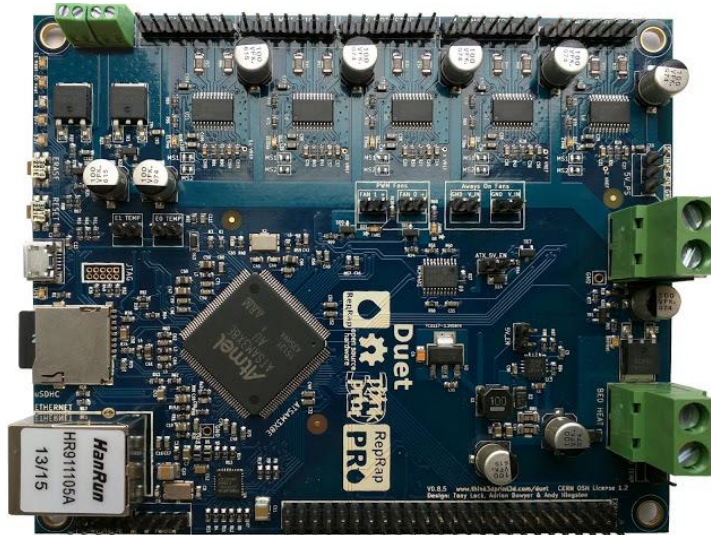


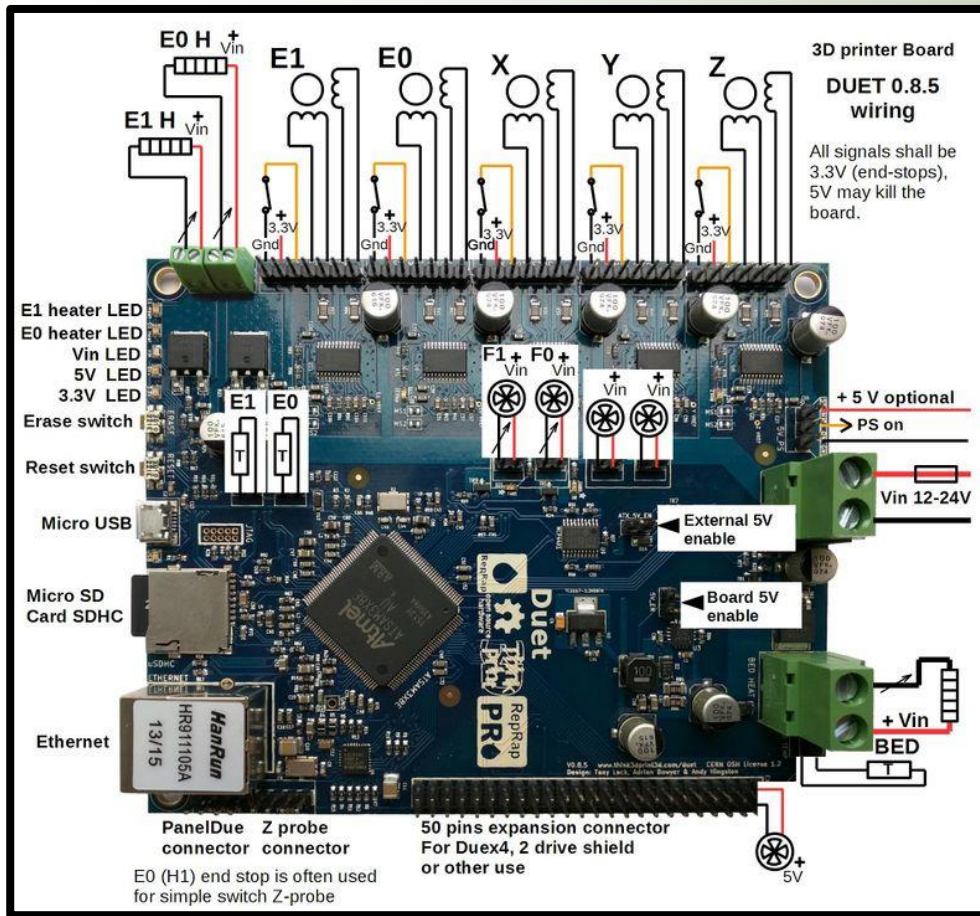
Mejoras mecánicas generales



Sistema eléctrico-electrónico

Duet 0.8.5 + Duex4

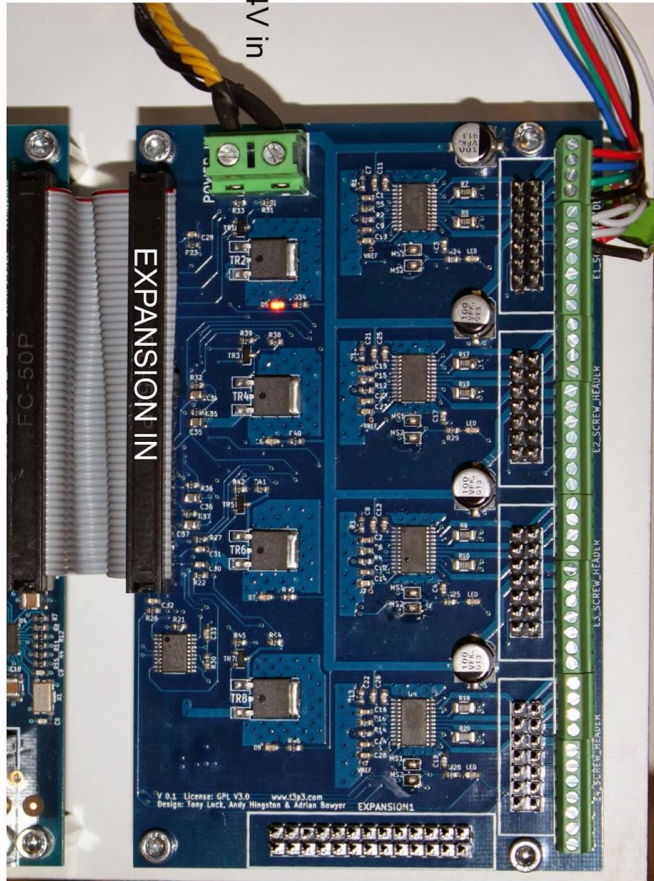




Duet 0.8.5

- 5xDriver A4982
- 5xEndStop
- 2xCalefactores
- 2xSensores
- 2xVentiladores On/Off
- 2xVentiladores PWM
- 1xHotBed





12-24V in

E1 Motor
E1 Heater
E1 Temp
E1 Stop

E2

E3

E4

Duex4 Expansion Board

- 4xDriver A4982
- 4xCalefactor
- 4xSensor
- 4xEndStop



Sistema de comunicación

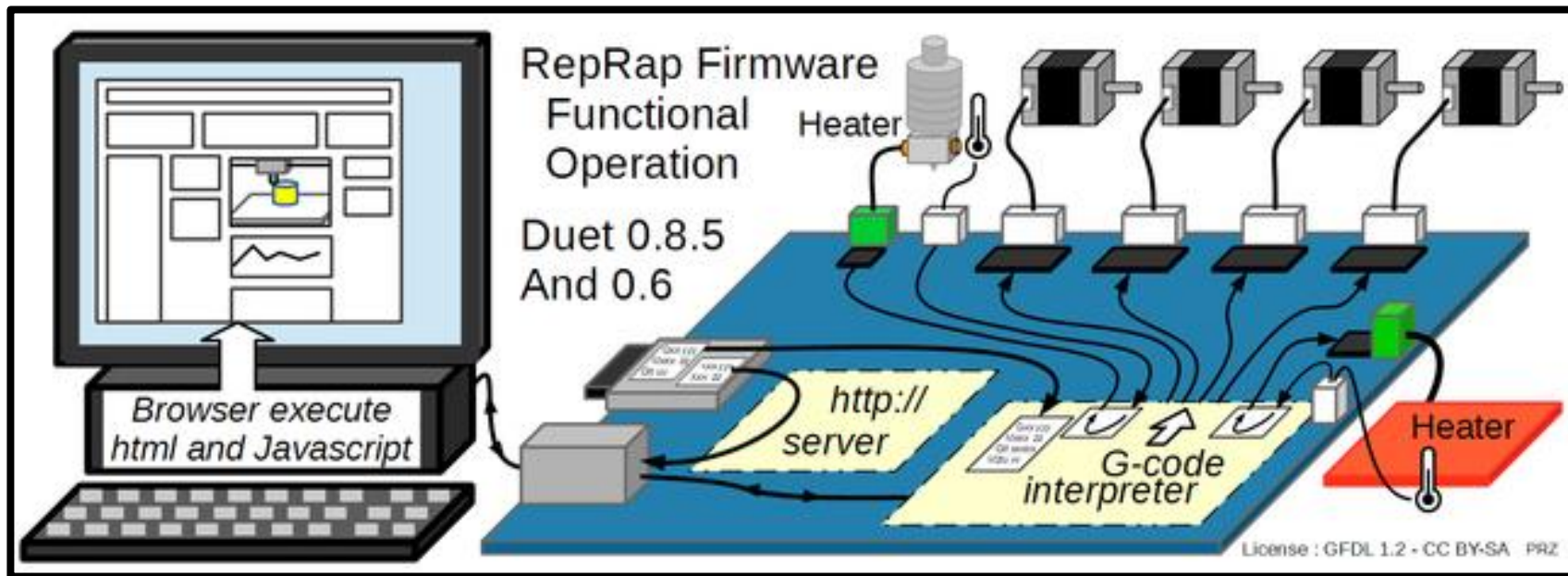
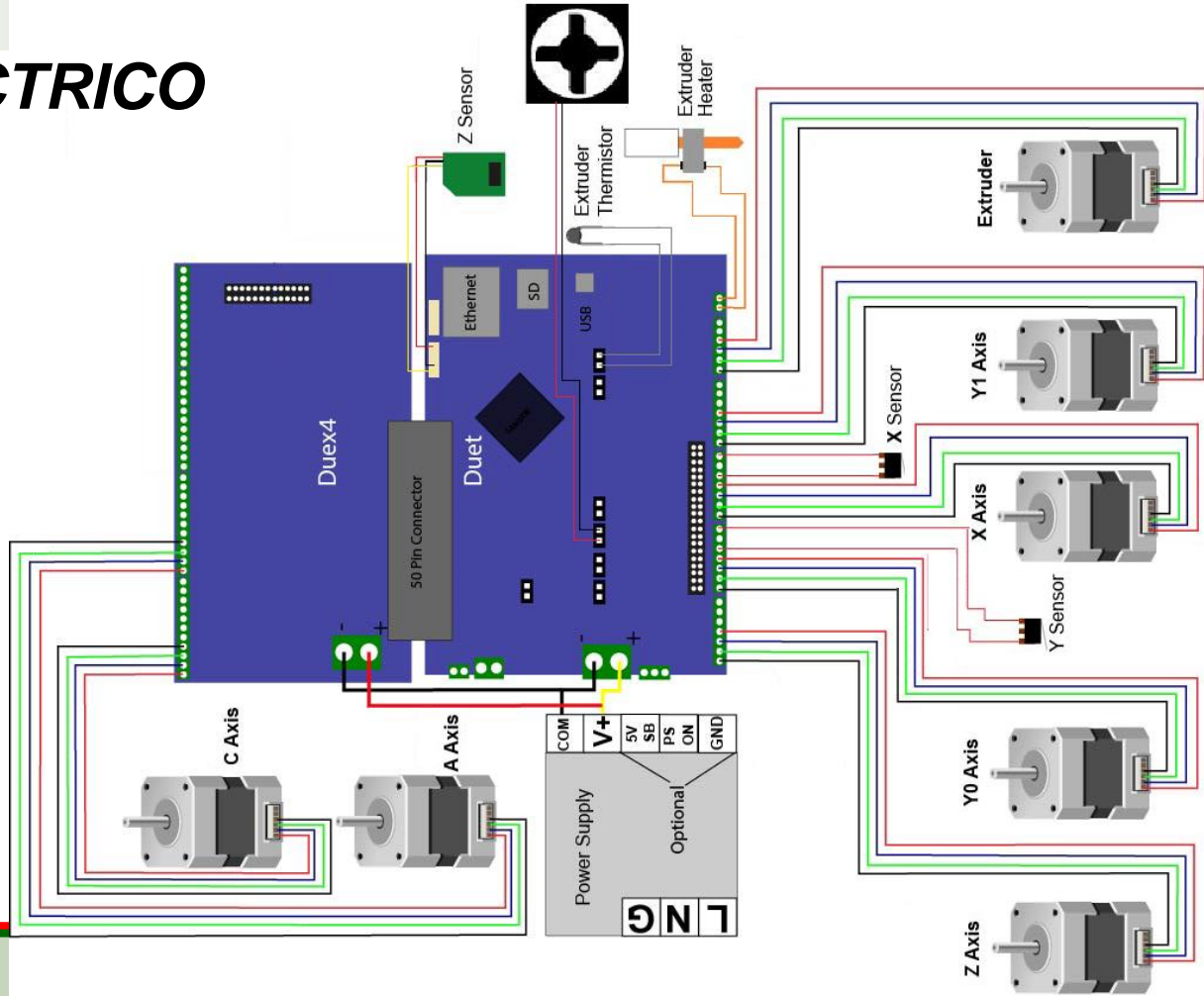


DIAGRAMA ELÉCTRICO ELECTRÓNICO

Duet 0.8.5 + Duex 4

*Diagrama electrónico
de la impresora 3D de
5 ejes*



Fuente de alimentación



Fuente de alimentación:

Input: 110/220 Vac
50-60Hz

Output: 12Vdc 20A

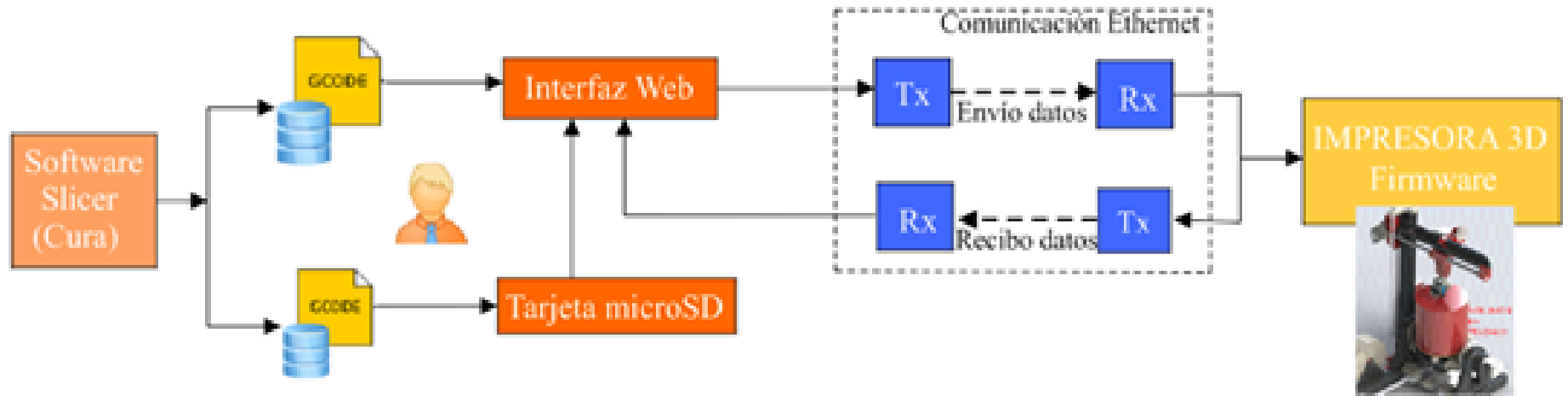


ESPE
ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO
CAMINO A LA EXCELENCIA

**ARQUITECTURA DE
CONTROL DE
IMPRESORA 3D DE CINCO
EJES**



ARQUITECTURA DE CONTROL GENERAL



SOFTWARE Slicer CURA

The screenshot displays the Ultimaker Cura software interface. The main window is titled 'Ultimaker Cura' and features a menu bar with options: Archivo, Edición, Ver, Ajustes, Extensiones, Complementos, Preferencias, and Ayuda. The interface is divided into several sections:

- Top Bar:** Includes the Cura logo, a 'Preparar' (Prepare) tab, a 'Supervisar' (Monitor) button with a help icon, and a 'Vista de sólidos' (Solid view) dropdown menu.
- Left Panel:** Contains a file explorer icon and a vertical toolbar with icons for file operations and printing.
- Center Viewport:** Shows a 3D model of a blue oval on a grid. Below it is a 2D top-down view of the same model.
- Right Panel (Ormerod Profile):**
 - Material:** A dropdown menu set to 'PLA' with a 'Comprobar compatibilidad' (Check compatibility) link below it.
 - Configuración de impresión (Print Configuration):** Includes 'Recomendado' (Recommended) and 'Personalizado' (Customized) tabs, and a 'Perfil:' dropdown set to 'Fine 0.1mm'.
 - Calidad (Quality) Section:** A dropdown menu expanded to show settings:

Altura de capa (Layer height)	0.14 mm
Altura de capa inicial (Initial layer height)	0.14 mm
Ancho de línea (Line width)	0.4 mm
Ancho de línea superior/inferior (Top/bottom line width)	0.4 mm
 - Cargue un modelo en 3D (Load a 3D model):** Shows a timer at '00 h 00 min' and a weight of '0.00 m/- 0 g'.

Cura 3.2.1

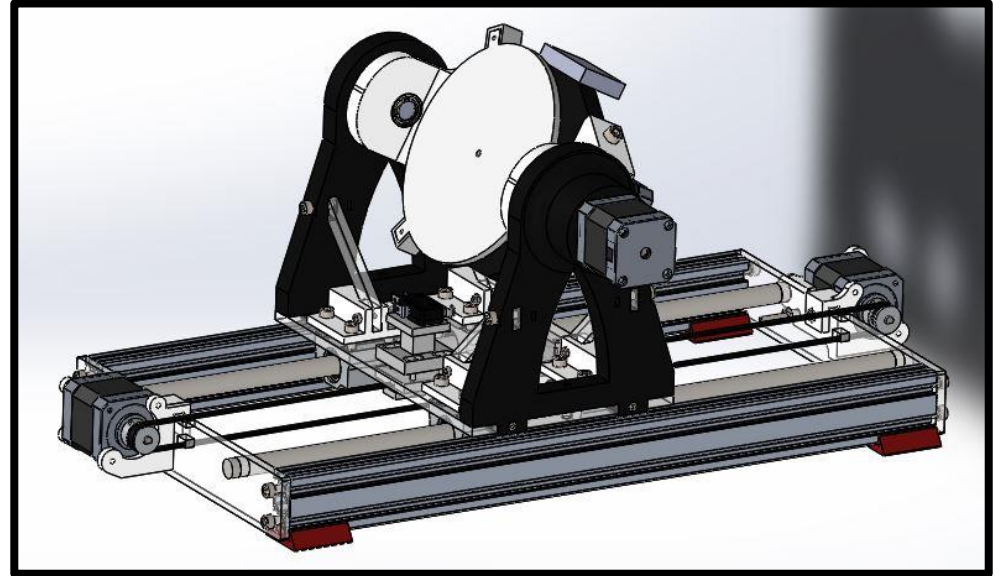
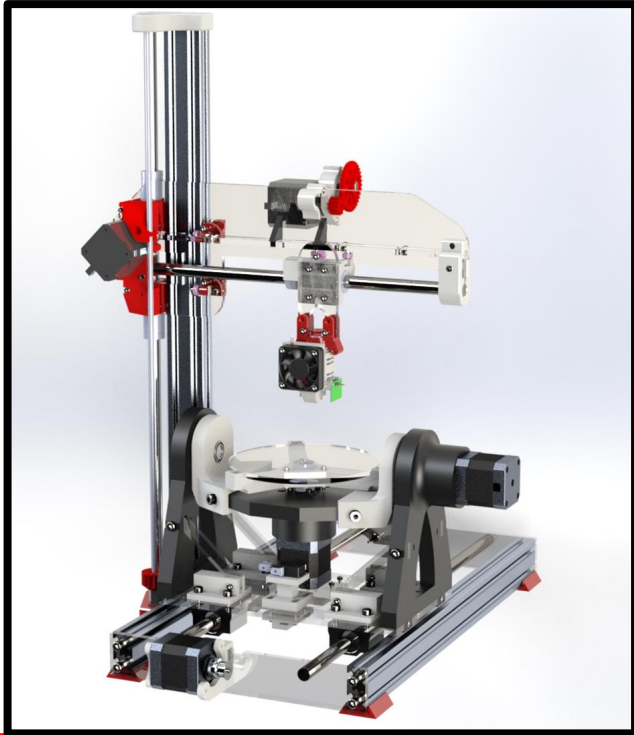


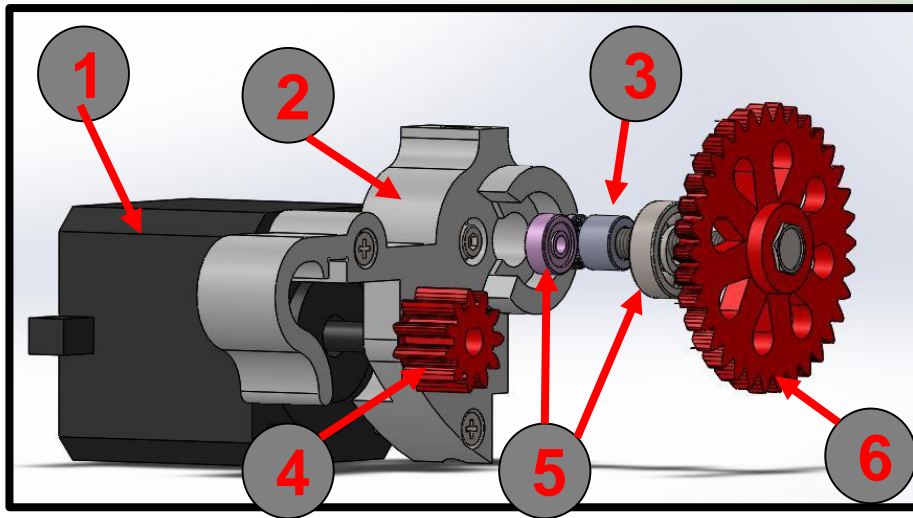
ESPE
ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO
CAMINO A LA EXCELENCIA

***IMPLEMENTACIÓN Y
CALIBRACIÓN DEL
PROTOTIPO DE IMPRESIÓN
3D DE CINCO EJES***



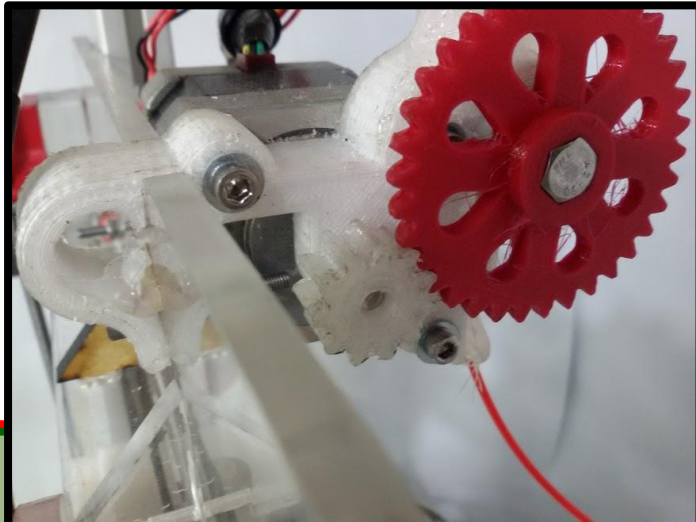
IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA MECÁNICO



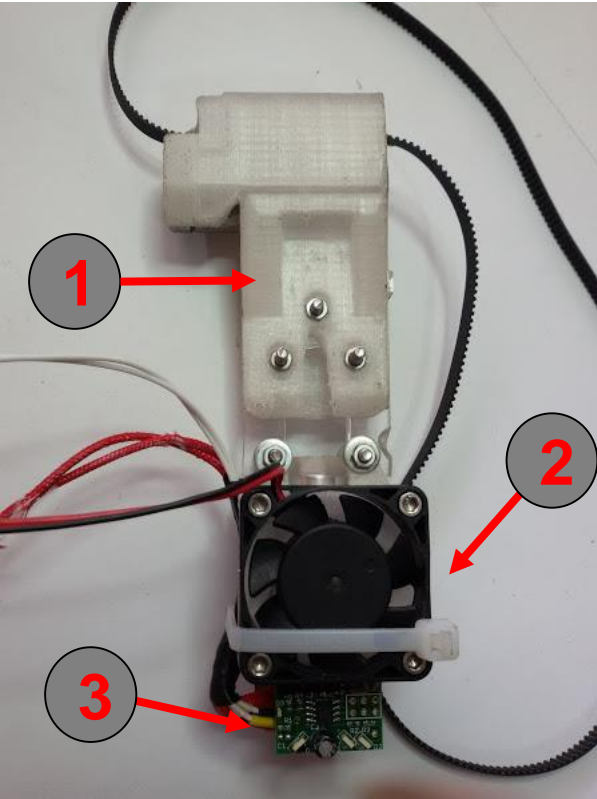


Mecanismo extrusor

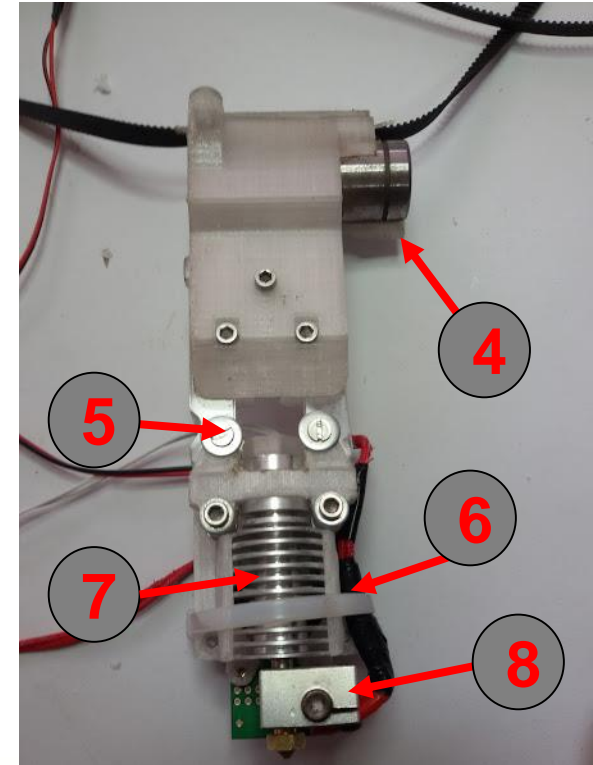
Nº	Elemento
1	Motor extrusor
2	Bloqu de extrusión
3	Rueda dentada
4	Engrane de transmisión corto
5	Rodamientos
6	Engrane de transmisión largo



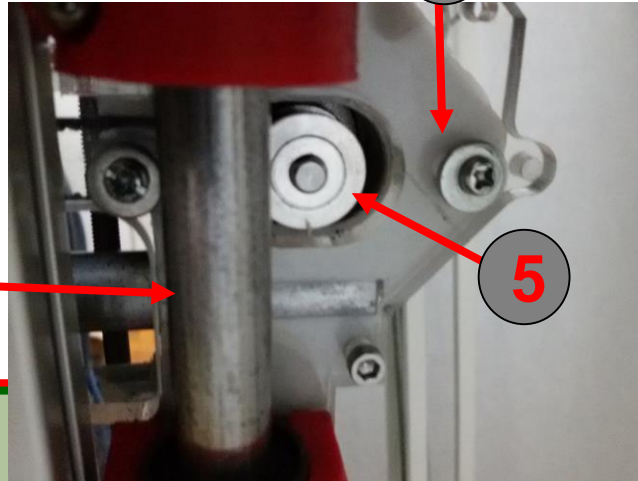
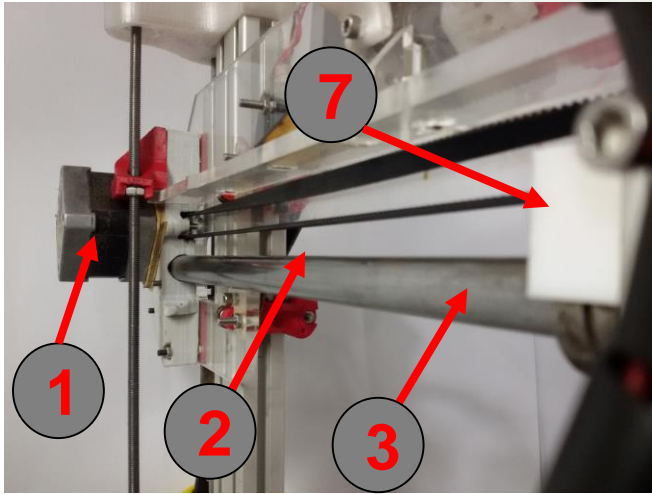
Hot End



Nº	Elemento
1	Carro de eje X
2	Ventilador
3	Z probe
4	Rodamiento X
5	Unión de acrílico
6	Sujetador de HotEnd
7	HotEnd E3D V6
8	Fundidor



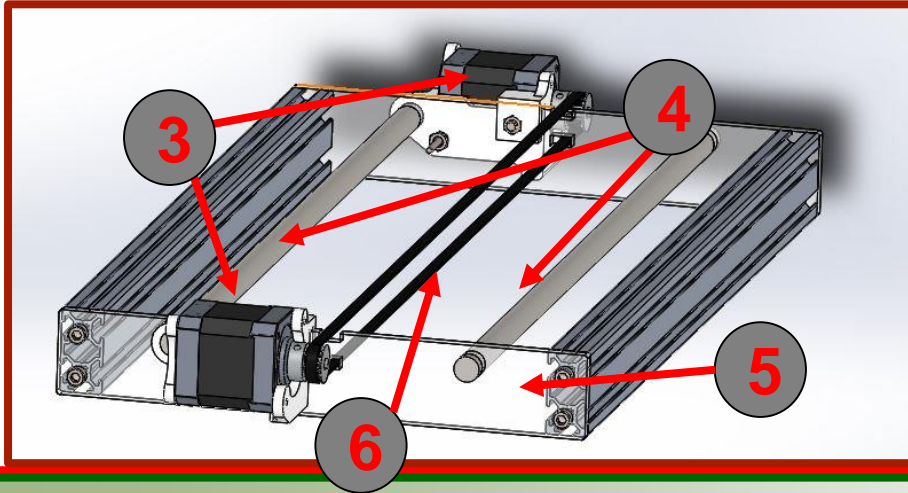
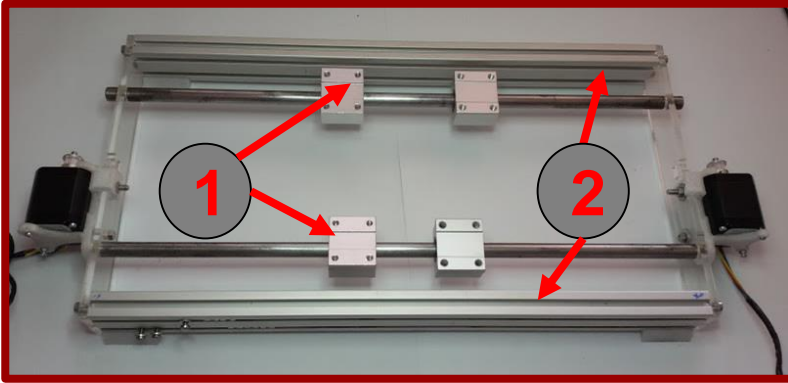
Eje X



Nº	Elemento
1	Motor Eje X
2	Correa Eje X
3	Eje guia
4	Ranuras de ajuste de banda
5	Polea detada
6	Ejez guia Z
7	Carro de X

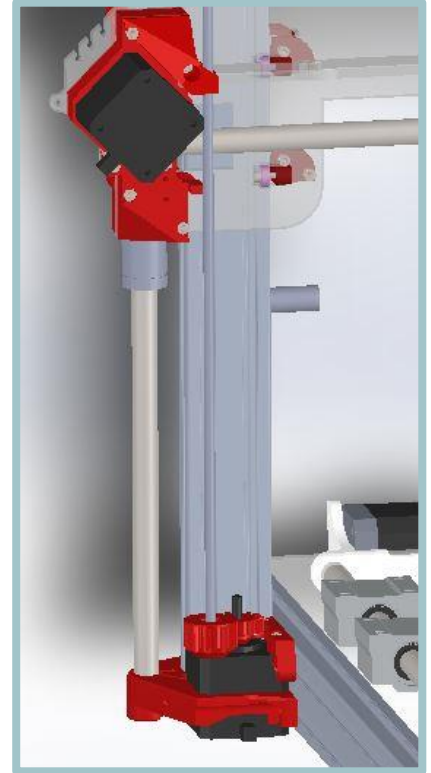


Eje Y

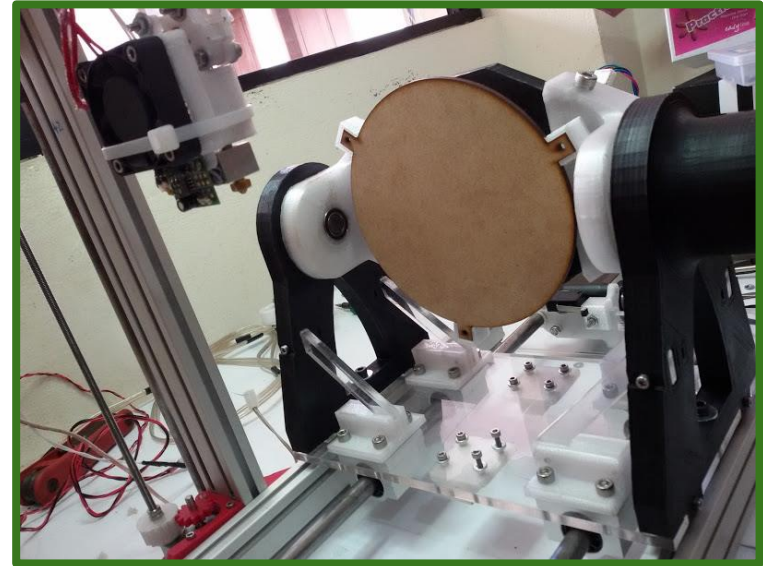
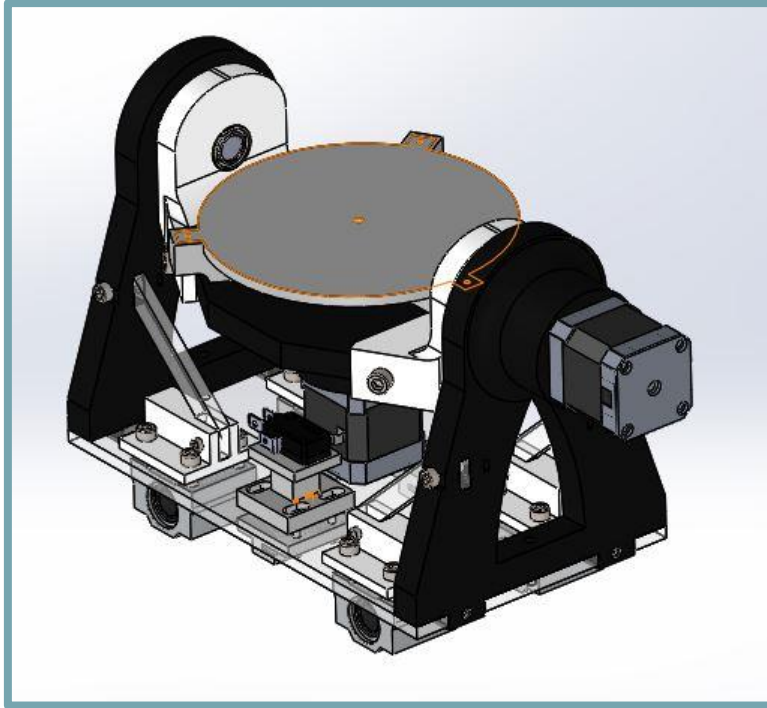


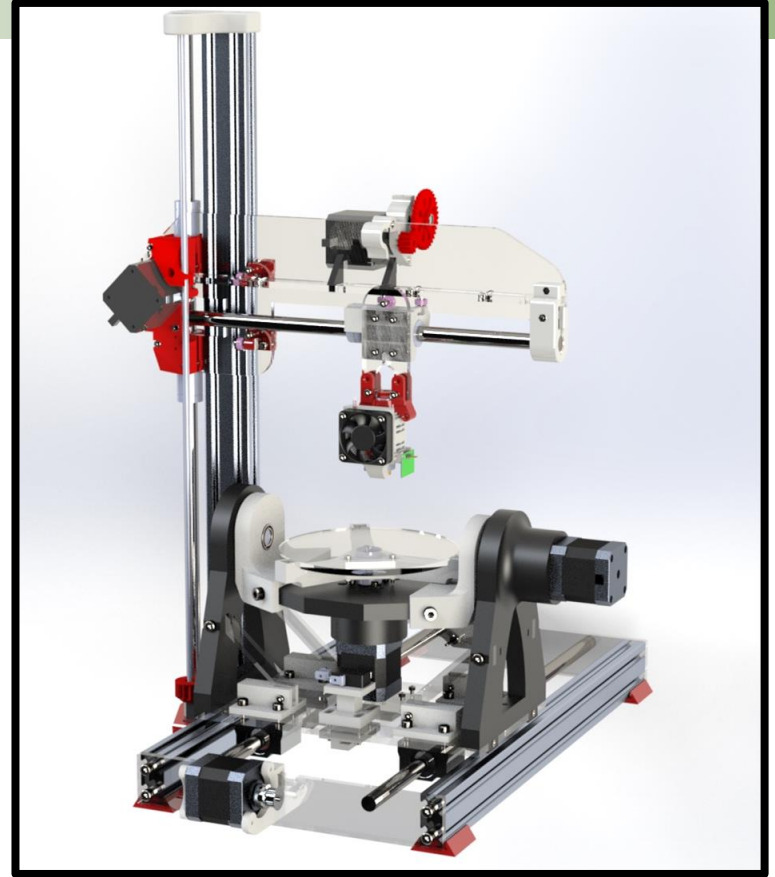
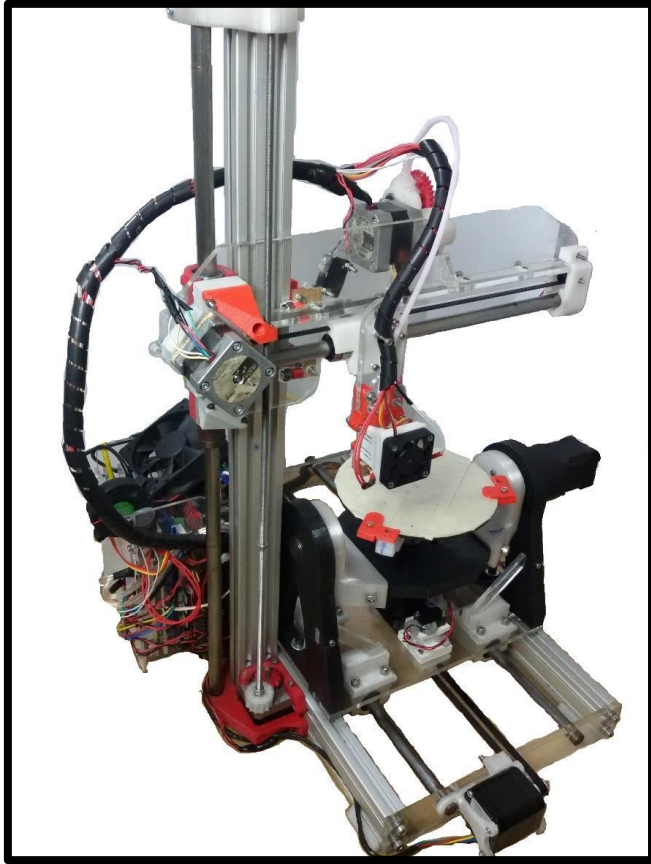
Nº	Elemento
1	Rodamientos lineales
2	Extrusiones de aluminio
3	Motores de Y
4	Ejes guías
5	Uniones de acrílico
6	Correa dentada

Eje Z




Ejes A y C



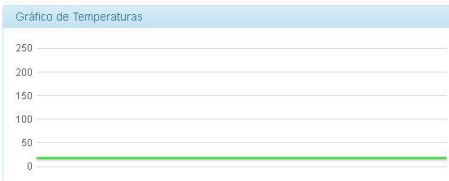


ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL

Desconectar | Enviar G-Code... | Enviar | Cargar e Imprimir | Impresora  | Disponible | Parada de emergencia

Temperaturas de Calentadores		Controlar todos	
	Actual	Activo	Standby
Calentador 1 Apagado	error	0	0
Calentador 2 Apagado (T1)	18.0 °C	0	0



Estado de la Máquina					
Posición de Carro	X	Y	Z	U	V
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Motores de Extrusores	Motor 1				
	0.0				
Sensores	Z-Probe				
	0				

Estado de la Máquina					
Posición de Carro	X	Y	Z	U	V
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Motores de Extrusores	Motor 1				
	0.0				
Sensores	Z-Probe				
	0				

- Control de Máquina
- Estado de Impresión
- Consola de G-Code
- Ficheros G-Code
- Macros
- Ajustes

Ajustar todos | Control del Carro | Equilibrado automático de la Cama

Home X | X-100 | X-10 | X-1 | X-0.1 | X+0.1 | X+1 | X+10 | X+100

Home Y | Y-100 | Y-10 | Y-1 | Y-0.1 | Y+0.1 | Y+1 | Y+10 | Y+100

Home Z | Z-100 | Z-10 | Z-1 | Z-0.1 | Z+0.1 | Z+1 | Z+10 | Z+100

Home U | U-100 | U-10 | U-1 | U-0.1 | U+0.1 | U+1 | U+10 | U+100

Home V | V-100 | V-10 | V-1 | V-0.1 | V+0.1 | V+1 | V+10 | V+100

⚠ Los ejes X, Y, Z, U, V no estan ajustados

Control del Extrusor

Macros de Usuario

- E motors off
- Extrude 5mm
- Load filament
- Retract 5mm
- Unload filament
- Unload filament - copia

Definir Herramienta Nueva

Calentado(es) Asociado(s):

Nº Herramienta: 1 2 3 4 5 6

Herramienta: 1

Motor(es) Asociado(s): 0 1 2 3 4 5

+ Añadir herramienta



[Desconectar](#)[Enviar](#)[Cargar e Imprimir](#)Impresora 

Temperaturas de Calentadores

Controlar todos ▾

	Actual	Activo	Standby
Calentador 1 Apagado	error	0 ▾	0 ▾
Calentador 2 Apagado (T1)	18.0 °C	0 ▾	0 ▾

Gráfico de Temperaturas


[Control de Máquina](#)[Estado de Impresión](#)[Consola de G-Code](#)[Ficheros G-Code](#)[Macros](#)[Ajustes](#)

Ajustar todos

Control del Carro

Equilibrado Automático de la Cama

Home X	◀ X-100	◀ X-10	◀ X-1	◀ X-0.1	X+0.1 ▶	X+1 ▶	X+10 ▶	X+100 ▶
Home Y	◀ Y-100	◀ Y-10	◀ Y-1	◀ Y-0.1	Y+0.1 ▶	Y+1 ▶	Y+10 ▶	Y+100 ▶
Home Z	◀ Z-100	◀ Z-10	◀ Z-1	◀ Z-0.1	Z+0.1 ▶	Z+1 ▶	Z+10 ▶	Z+100 ▶
Home U	◀ U-100	◀ U-10	◀ U-1	◀ U-0.1	U+0.1 ▶	U+1 ▶	U+10 ▶	U+100 ▶
Home V	◀ V-100	◀ V-10	◀ V-1	◀ V-0.1	V+0.1 ▶	V+1 ▶	V+10 ▶	V+100 ▶

 Los ejes X, Y, Z, U, V no están ajustados

Control del Extrusor

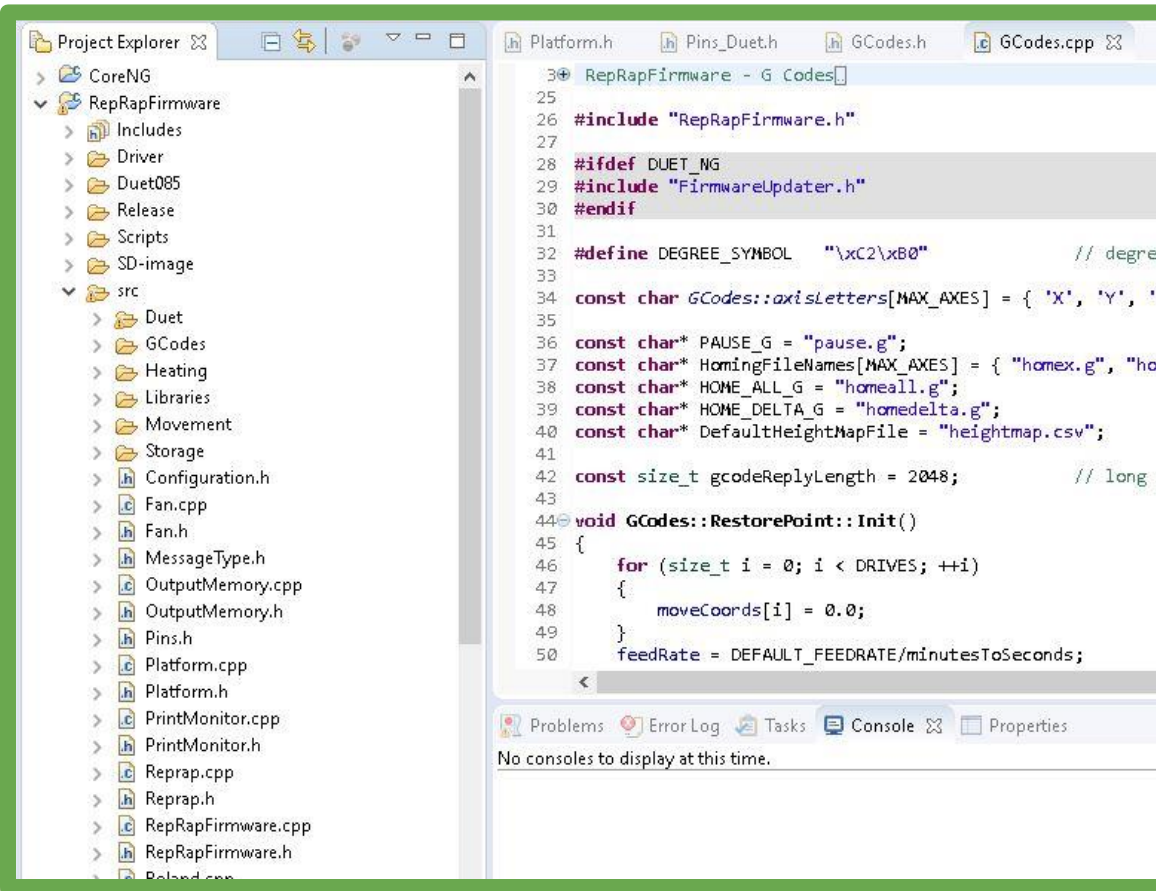


Modificación de la interfaz Web

Implementación de ejes U y V en la interfaz web

```
model.js | defaults.css | config.g
392 // XYZ UV coordinates control web para los ejes extra
393 if (geometry == "delta" && !status.coords.axesHomed[0]) {
394     $("#td_x, #td_y, #td_z").html("\n/a");
395 } else {
396     $("#td_x").html(status.coords.xyz[0].toFixed(2));
397     $("#td_y").html(status.coords.xyz[1].toFixed(2));
398     $("#td_z").html(status.coords.xyz[2].toFixed(2));
399     $("#td_u").html(status.coords.xyz[3].toFixed(2));
400     $("#td_v").html(status.coords.xyz[4].toFixed(2));
401 }
402
```


Firmware



The image shows a screenshot of an IDE (Eclipse Neon2) with a C++ project named 'RepRapFirmware'. The Project Explorer on the left shows the project structure, including folders for 'Includes', 'Driver', 'Duet085', 'Release', 'Scripts', 'SD-image', and 'src'. The 'src' folder contains sub-folders for 'Duet', 'GCodes', 'Heating', 'Libraries', 'Movement', and 'Storage', along with various header and source files. The main editor window displays the 'GCodes.cpp' file, which includes headers for 'RepRapFirmware.h' and 'FirmwareUpdater.h'. It defines a 'DEGREE_SYMBOL' and a 'GCodes::axisLetters' array. The code also defines several global constants for G-code strings and a 'GCodes::RestorePoint::Init()' function that initializes movement coordinates and feed rate.

```
25
26 #include "RepRapFirmware.h"
27
28 #ifdef DUET_NG
29 #include "FirmwareUpdater.h"
30 #endif
31
32 #define DEGREE_SYMBOL  "\xC2\xB0"           // degree
33
34 const char GCodes::axisLetters[MAX_AXES] = { 'X', 'Y', 'Z' };
35
36 const char* PAUSE_G = "pause.g";
37 const char* HomingFileNames[MAX_AXES] = { "homex.g", "homey.g", "homez.g" };
38 const char* HOME_ALL_G = "homeall.g";
39 const char* HOME_DELTA_G = "homedelta.g";
40 const char* DefaultHeightMapFile = "heightmap.csv";
41
42 const size_t gcodeReplyLength = 2048;      // long
43
44 void GCodes::RestorePoint::Init()
45 {
46     for (size_t i = 0; i < DRIVES; ++i)
47     {
48         moveCoords[i] = 0.0;
49     }
50     feedRate = DEFAULT_FEEDRATE/minutesToSeconds;
```

Estructura de programación del Firmware C++

Archivos de cabecera de las diferentes funciones, el firmware fue compilado en Eclipse Neon2



```

24
25 const size_t MAX_AXES = 6;
26 const size_t MIN_AXES = 6;
27 const size_t DELTA_AXES = 6;
28 const size_t CART_AXES = 6;
29 const size_t MaxExtruders = DRIVES - MIN_AXES;
30
31 const size_t NUM_SERIAL_CHANNELS = 3;
32 #define SERIAL_MAIN_DEVICE SerialUSB
33 #define SERIAL_AUX_DEVICE Serial
34 #define SERIAL_AUX2_DEVICE Serial1
35
36 // The numbers of entries in each array must correspond with the values of DRIVES, AXES, or
37
38 // DRIVES
39
40 const Pin ENABLE_PINS[DRIVES] = { 29, 27, X1, X0, 37, X8, 50, 47, X13 };
41 const Pin STEP_PINS[DRIVES] = { 14, 25, 5, X2, 41, 39, X4, 49, X10 };
42 const Pin DIRECTION_PINS[DRIVES] = { 15, 26, 4, X3, 35, 53, 51, 48, X11 };
43
44 // Endstops
45 // RepRapFirmware only has a single endstop per axis.
46 // Gcode defines if it is a max ("high end") or min ("low end") endstop and sets if it is a
47 const Pin END_STOP_PINS[DRIVES] = { 11, 28, 60, 31, 24, 46, 45, 44, X9 };
48

```

Aumento de los ejes de 3 a 6 para incluir U y V



```
91 const int8_t INKJET_BITS = 12; // How many nozzles? Set to -1 to disable this feature
92 const int INKJET_FIRE_MICROSECONDS = 5; // How long to fire a nozzle
93 const int INKJET_DELAY_MICROSECONDS = 800; // How long to wait before the next bit
94
95 #endif
96
97 const float MAX_FEEDRATES[DRIVES] = DRIVES_(100.0, 100.0, 3.0, 20.0, 20.0, 20.0, 20.0, 20.0, 20.0);
98 const float ACCELERATIONS[DRIVES] = DRIVES_(500.0, 500.0, 20.0, 250.0, 250.0, 250.0, 250.0, 250.0, 250.0);
99 const float DRIVE_STEPS_PER_UNIT[DRIVES] = DRIVES_(87.4890, 87.4890, 4000.0, 420.0, 420.0, 420.0, 420.0, 420.0, 420.0);
100 const float INSTANT_DVS[DRIVES] = DRIVES_(15.0, 15.0, 0.2, 2.0, 2.0, 2.0, 2.0, 2.0, 2.0);
101
102 // AXES
103
104 const size_t X_AXIS = 0, Y_AXIS = 1, Z_AXIS = 2, E0_AXIS = 3, U_AXIS = 6, V_AXIS = 7, W_AXIS = 8; // The indices of the
105 const size_t A_AXIS = 0, B_AXIS = 1, C_AXIS = 2; // The indices of the 3 tower motors of a delta printer i
106
107 const float AXIS_MINIMA[MAX_AXES] = { 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0 }; // mm
108 const float AXIS_MAXIMA[MAX_AXES] = { 230.0, 210.0, 200.0, 200.0, 400.0, 200.0 }; // mm
109
110 const float defaultPrintRadius = 50; // mm
111 const float defaultDeltaHomedHeight = 200; // mm
112
113 // Z PROBE
114
115 const float Z_PROBE_STOP_HEIGHT = 0.7; // Millimetres
116 const unsigned int Z_PROBE_AVERAGE_READINGS = 8; // We average this number of readings with IR on, and the
```



```

1 ; Ormerod 2 config file for dc42 Duet firmware 1.17e
2 ; GENERAL PREFERENCES
3 M111 S0 ; Debug off
4 G21 ; Work in millimeters
5 G90 ; Send absolute coordinates...
6 M83 ; ...but relative extruder moves
7 M555 P1 ; Set output to look like Marlin
8 M208 X-60 Y-220.7 Z0 U0 V0 W0 S1 ; Set axis minima
9 M208 X60 Y70 Z150 U95 V360 W1 S0 ; Set axis maxima
10
11 ; NETWORK
12 M550 PImpresora ; Machine name (can be anything you like)
13 M551 Preprap ; Machine password (currently not used)
14 M540 P0xDE:0xEF:0xAD:0xFE:0xED ; MAC Address
15 M552 P192.168.1.14 ; IP address (0 = use DHCP)
16 M554 P192.168.1.1 ; Gateway
17 M553 P255.255.255.0 ; Netmask
18
19 ; ENDSTOP
20 M574 X1 Y1 Z0 S1 ; Set active high endstops
21 M574 U1 V1 W1 S1
22 M558 P1 X0 Y0 U0 V0 W0 Z1 F120 H3 T6000 ; Set Z probe type to modulated, the axes for which it is
23 G31 P537 Z0 ; Set Z probe trigger value, offset and trigger height
24 ;M557 X15:215 Y15:195 S20 ; Define mesh grid
25
26 ; DRIVES
27 M584 X0 Y1:3 Z2 E4 U6 V7 W8 ; Set drive maping No modificar, solo asi funciona
28 M92 X80 Y80 Z4000 U170.695187 V170.695187 ; Set axis steps/mm
29 M906 X600 Y800 Z700 U1400 V1000 W800 E300 ; Set motor currents (mA)
30 M201 X50 Y50 Z20 U600 V600 W1000 E400 ; Accelerations (mm/s^2)
31 M203 X1800 Y1800 Z70 U1200 V2000 W4000 E1800 ; Maximum speeds (mm/min)
32 M566 X600 Y600 Z40 U600 V600 W500 E120 ; Minimum speeds mm/minute
33 M84 S30 ; Set idle timeout
34
35 ;TOOLS
36 ;M563 P0 D0 H1 ; Define tool 0
37 ;G10 P0 X0 Y0 Z0 ; Set tool 0 axis offsets
38 ;G10 P0 S0 R0 ; Set tool 0 operating and standby temperatures

```

A la derecha archivo de configuración:

sdCard:\sys\config.g

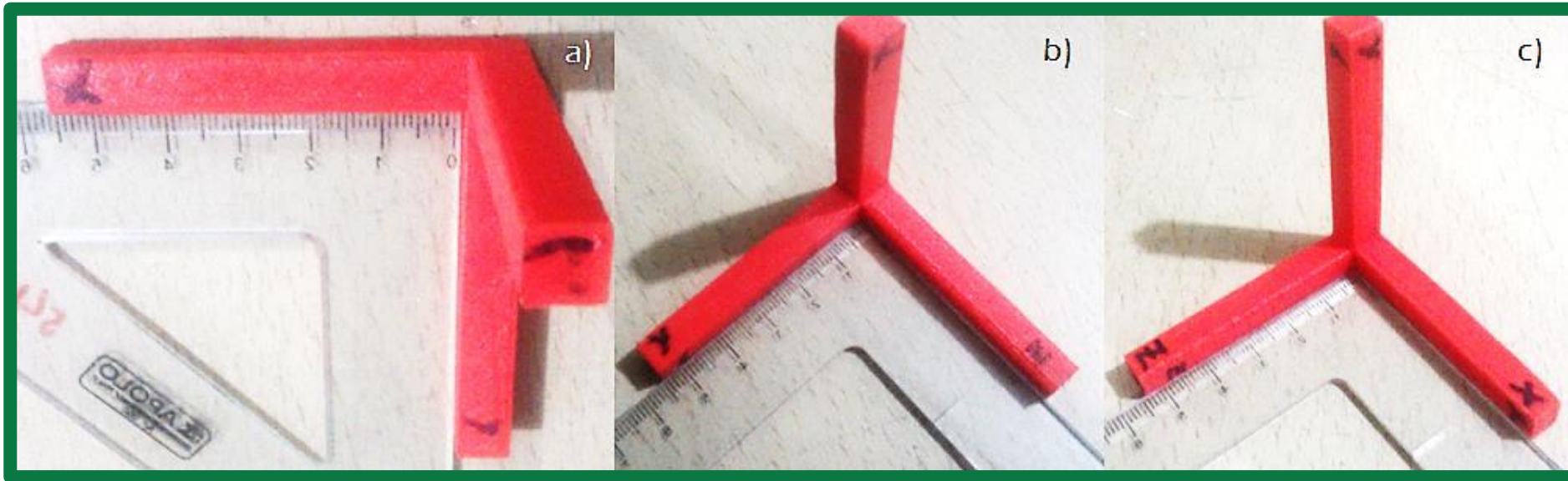
Abajo: modificación de la interfaz Web



PRUEBAS DEL PROTOTIPO DE IMPRESIÓN 3D DE CINCO EJES



PRUEBAS DE ORTOGONALIDAD EN LOS EJES (X-Y-Z)



Pruebas de desplazamiento



Ajustes de la máquina

Impresora Extruder 1

Ajustes de la impresora

X (anchura) 100 mm

Y (profundidad) 100 mm

Z (altura) 150 mm

Forma de la placa de imp... Elliptic

 Origen en el centro Plataforma caliente

Tipo de Gcode RepRap

Iniciar GCode

```
G1 Z5.0 F6000 ;Move the platform down 15m
G92 E0
G1 F200 E3
G92 E0
```

Ajustes del cabezal de impresión

X mín. 0 mm

Y mín. 0 mm

X máx. 50 mm

Y máx. 50 mm

Altura del caballete 130 mm

Número de extrusores 1

Finalizar GCode

```
M104 S0
G92 E1
G1 E-1 F300
G91
G1 Z10 F1500
G90
G1 X0 Y0 F1500
M84
```

Cerrar

Configuración de impresora en Cura

Recorridos máximos para la generación de código G



Configuración del perfil de impresión para pruebas con cinco ejes

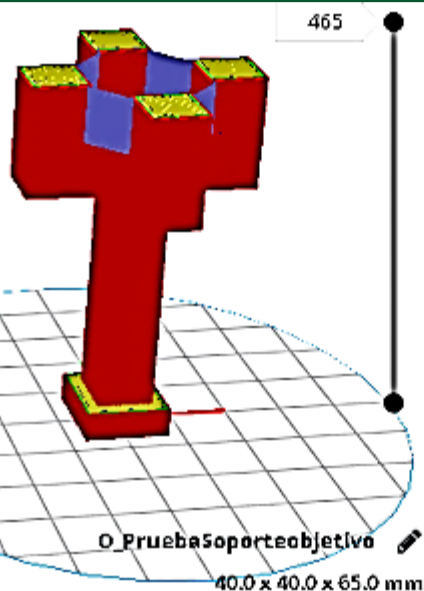
Parámetro	Valor	Unidad
Altura de capa	0.14	mm
Altura de capa inicial	0.14	mm
Ancho de línea	0.4	mm
Grosor de pared	0.8	mm
Grosor superior/inferior	1	mm
Densidad de relleno	20	mm
Temperatura	210	°C
Diámetro del material	1.75	mm
Flujo	80	%
Habilitar retracción	Sí	-
Velocidad de impresión	20	mm/s
Velocidad de desplazamiento	20	mm/s
Colocación de soporte	Tocando la placa	
Patrón de soporte	Rejilla	
Densidad del soporte	20	%

Perfil de impresora en Cura

Configuración que se utilizó en Cura para la generación del código G.



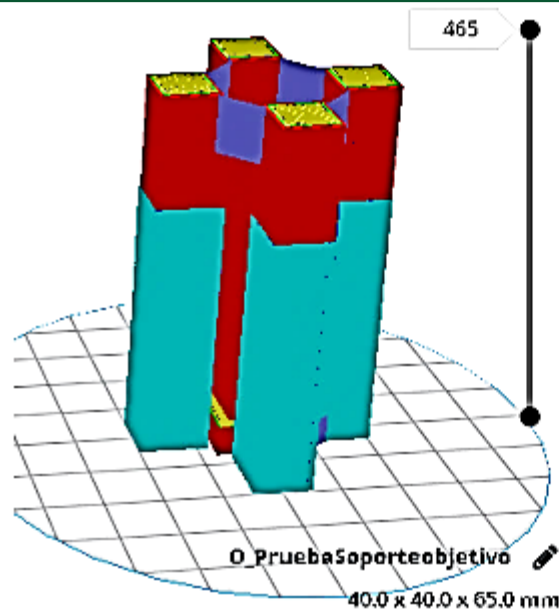
PRUEBAS DE AHORRO DE MATERIAL



- Calidad**
 - Altura de capa
 - Altura de capa inicial
 - Ancho de línea
 - Ancho de línea sup
- Perímetro**
 - Grosor de la pared
 - Grosor superior/inferior
 - Grosor superior
 - Curvas curvatura

Listo para Guardar en

03h 29min
2.63 m³ ~ 7 g/~ \$ 0.31

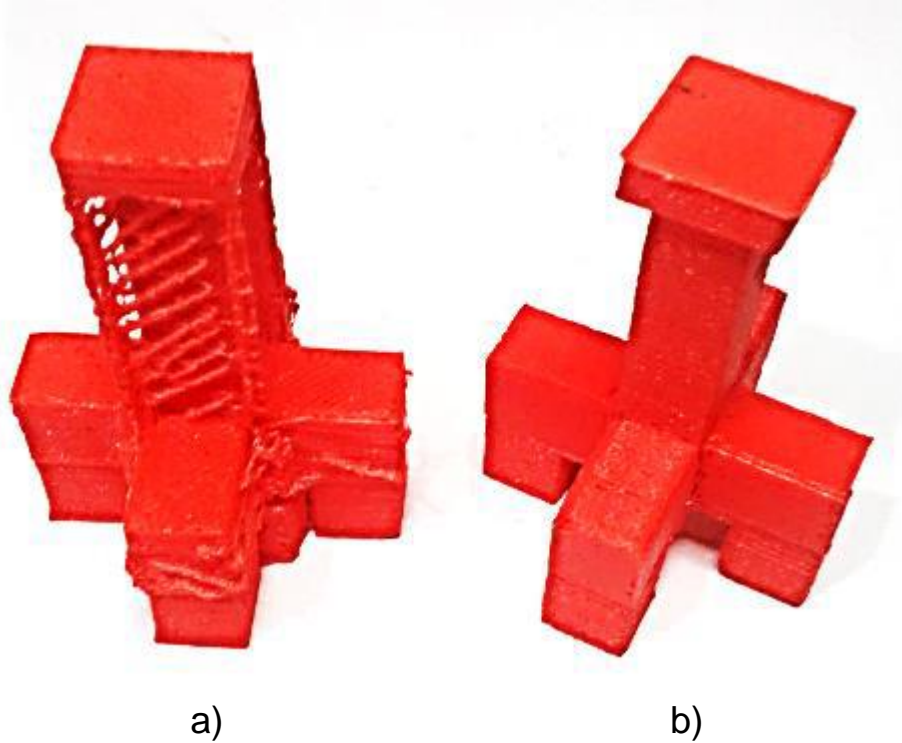


- Velocidad de desplazamiento
- Velocidad máxima de Z
- Refrigeración**
- Soporte**
 - Generar soporte
 - Colocación del soporte
 - Patrón del soporte
 - Densidad del soporte
- Adherencia de la placa de impresión**
 - Tipo adherencia...ca de impresión

Listo para Guardar en archivo

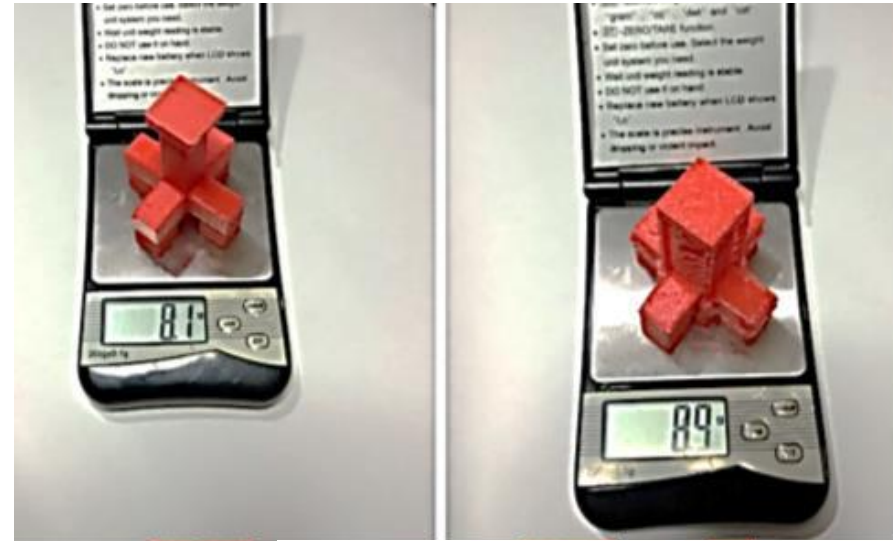
06h 02min
4.93 m³ ~ 14 g/~ \$ 0.59





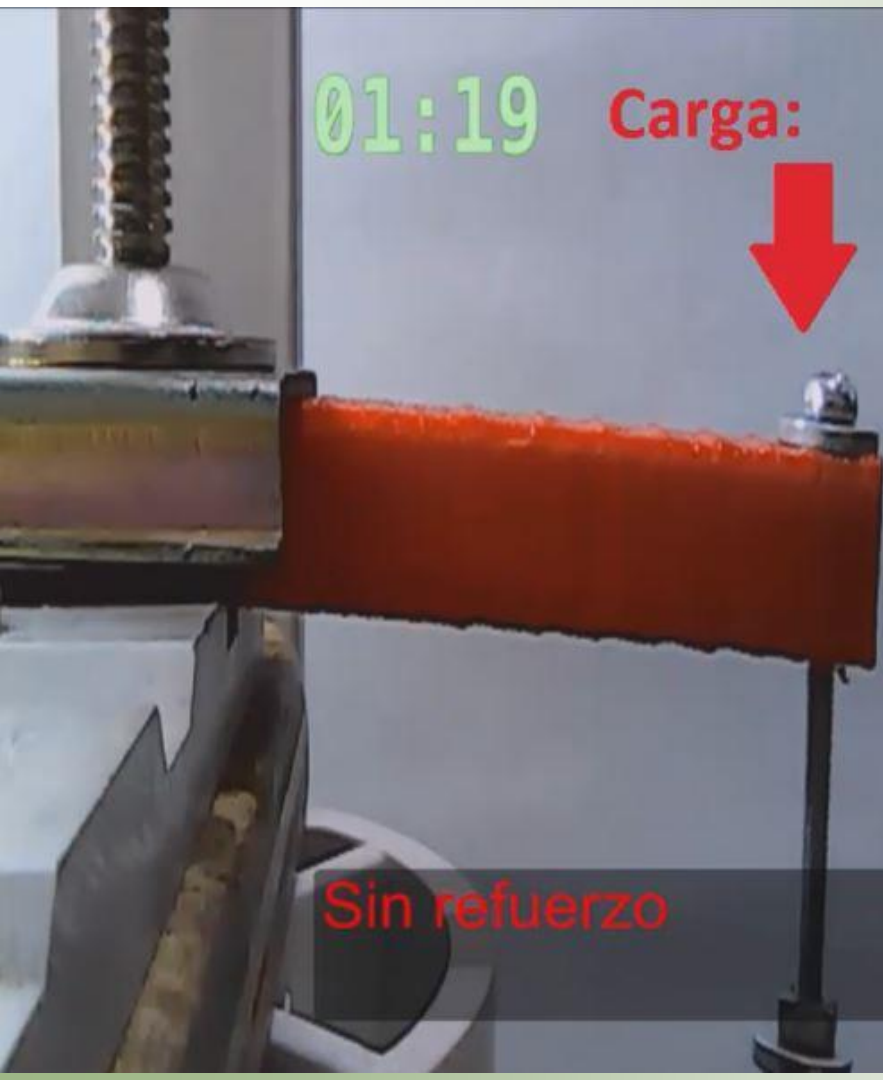
Resultado de impresión

- a) Pieza impresa con soporte(8.9gr)
- b) Pieza impresa mediante los 5 ejes(8.1gr)



01:19

Carga:



Sin refuerzo

05:56

Carga:



Con refuerzo

01:54

08:26

Fuerza de fractura de las vigas

Carga: 12.74 N



Carga: 55.86 N

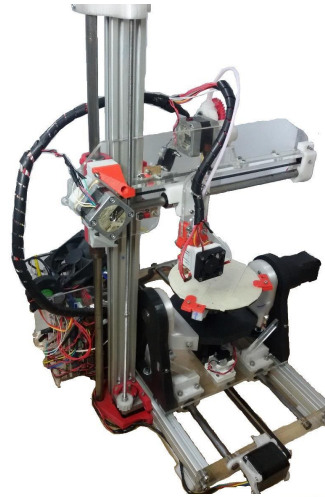


ANÁLISIS TÉCNICO - ECONÓMICO

Item	Descripción	Cant.	P. Unit. (\$)	P. Total (\$)
1	Motores PaP	5	15	105
2	Motor con caja reductora	2	33.88	67.76
3	Tarjeta de control principal	1	129.99	129.99
4	Tarjeta expansión de control	1	59.99	59.99
5	Conjunto "Hot End" y extrusor	1	85.48	85.48
6	Sensores finales de carrera	3	0.80	2.4
7	Material eléctrico/electrónico general	1	23.63	23.63
8	Fuente de alimentación	1	30	30
9	Correa y poleas dentadas	1	43	43
10	Varillas lisas de acero	3	25	75
11	Varilla roscada	1	4	4
12	Rodamientos lineales y radiales	1	93.10	93.10
13	Elementos de sujeción	1	13.10	13.10
14	Perfiles de aluminio	2	63	126
15	Piezas impresas PLA	1	239	239
16	Plancha de acrílico	1	64	64
17	Cilindro de aluminio	1	6.70	6.70
18	Cama de deposición de vidrio	1	3	3
19	Carrete de filamento	2	35	70
20	Herramientas de producción	1	25	25
21	Costos de importación	1	250	250
TOTAL				1516.15

Máquina comercial
5AxisMaker \$7000

Costo beneficio : \$ 5480



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

VALIDACIÓN DE LA HIPÓTESIS

“¿El diseño e implementación de un prototipo de impresora 3d de cinco ejes ayuda al ahorro de material y al mejoramiento de la resistencia mecánica en piezas fabricadas mediante el método de deposición de material fundido en la universidad de las fuerzas armadas ESPE extensión Latacunga?”

- Ho (Hipótesis nula): El diseño e implementación de un prototipo de impresora 3D de cinco ejes no ayuda al ahorro de material y la resistencia mecánica.*
- H1(Hipótesis alternativa): El diseño e implementación de un prototipo de impresora 3D de cinco ejes ayuda al ahorro de material y la resistencia mecánica.*



Resultados de frecuencias observadas

							SUMA
%Ahorro	8,1	8,68	14,28	12,38	15,17	14,7	73,31
%Resist.	374,95	322,59	338,46	270,99	211,72	230,30	1749,03
TOTAL	383,05	331,27	352,74	283,37	226,89	245,00	1822,34

							SUMA
%Ahorro	15,41	13,33	14,19	11,40	9,13		9,86
%Resistencia	367,64	317,95	338,55	271,98	217,77		235,15



Resultado de Chi Cuadrado para validación de hipótesis

%ahorro	3,47	1,62	0,00	0,08	4,00	2,38	
%resistencia	0,15	0,07	0,00	0,00	0,17	0,10	
TOTAL	3,61	1,69	0,00	0,09	4,17	2,48	12,04

12.04 > 11.07

v	0,005	0,01	0,025	0,05	0,95	0,975	0,99	0,995
1	0,00003935	0,000157	0,000982	0,00393	3,841	5,024	6,635	7,879
2	0,010	0,020	0,051	0,103	5,991	7,378	9,210	10,597
3	0,072	0,115	0,216	0,352	7,815	9,348	11,345	12,838
4	0,207	0,297	0,484	0,711	9,488	11,143	13,277	14,860
5	0,412	0,554	0,831	1,145	11,070	12,832	15,086	16,750
6	0,676	0,872	1,237	1,635	12,592	14,449	16,812	18,548
7	0,989	1,239	1,690	2,167	14,067	16,013	18,475	20,278
8	1,344	1,647	2,180	2,733	15,507	17,535	20,090	21,955
9	1,735	2,088	2,700	3,325	16,919	19,023	21,666	23,589
10	2,156	2,558	3,247	3,940	18,307	20,483	23,209	25,188



CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES



CONCLUSIONES

- *Se indagó acerca de la posible existencia de impresoras 3D comerciales que se puedan tomar como referencia para este proyecto mediante el análisis de su funcionamiento y estructura. Sin embargo, al principio de la investigación se encontró que, en el mercado de la manufactura aditiva, sólo existía una máquina comercial con la capacidad de impresión multiejes, la denominada 5AxisMaker. Después del respectivo análisis de la configuración de disposición de ejes de una máquina-herramienta, se llegó a la conclusión de que emular este tipo de sistema, el mismo que no es de código abierto, llevaría grandes costos de implementación, dado que dicha máquina, también tiene una configuración cabezal/cabezal que complica el rediseño, sin mencionar el impedimento principal, la ausencia de un generador de código que se adapte a la configuración mencionada.*



- *Por otro lado, se investigó acerca de prototipos industriales que estén implementando manufactura aditiva, en donde cabe destacar la máquina concebida por la empresa ENOMOTO KOGYO Co., Ltd., la cual es un híbrido entre una impresora 3D y un centro de mecanizado de 5 ejes para mejorar el acabado de la pieza fabricada, sin embargo, esta máquina está en fase de desarrollo, aunque se tiene prototipos construidos, no se encontró información útil. A nivel universitario, sólo se pudo encontrar un trabajo de investigación que modifica a una impresora de software libre para la adaptación de dos nuevos ejes, sin embargo, como se mencionó antes, también carece de la capacidad de generación de Gcode que se adapte a su configuración de ejes, limitándose únicamente a la concepción de dos geometrías únicas, dicha máquina denominada “Pentarod” sólo posee la capacidad de impresión para dichas geometrías, el sistema fue de relativa ayuda, aunque en la investigación tampoco se encontró mayor información que defina al presente trabajo.*



- *Se plantearon varias alternativas para la selección del mecanismo de guiado dinámico, para lo cual no sólo se analizaron las configuraciones multiejes, sino también la capacidad de adaptar estas configuraciones en un impresora 3D base, teniendo en cuenta limitaciones mecánicas, electrónicas y de control. Para lo cual se encontró como mejor alternativa una configuración de impresora base del tipo cartesiano y una configuración de disposición de ejes mesa/mesa.*
- *Se realizó un planteamiento de alternativas para la adaptación del mecanismo para los dos ejes adicionales en impresoras Open source RepRap, partiendo principalmente del concepto de configuración de ejes en máquinas herramientas industriales, teniendo muy en cuenta también la capacidad de adaptación del modelo de impresora 3D base, analizando sus beneficios y defectos posibles, en el ámbito electrónico, mecánico y de control, factores a considerar ya que podrían limitar este trabajo tanto para el funcionamiento como para la construcción, implementación y control del prototipo propuesto.*



- *Se realizó la selección de alternativas para la modificación de la impresora base seleccionada, en este caso, el modelo Ormerod de RepRap, para lo cual se concluyó que se debía utilizar elementos que se acoplaran al modelo original o que, a su vez, sean fácilmente adaptables, esto fue posible gracias a que el modelo base es Open source lo cual facilita también la modificación de cualquiera de sus partes mecánicas.*
- *Se implementaron los cambios diseñados para el nuevo sistema mecánico, así como también un cambio en el firmware para hacer uso de los ejes adicionales sin resultados favorables, ya que en la versión del firmware existente al principio de esta investigación solo implementaba el uso de 3 ejes (X, Y, Z) para el sistema cartesiano, sin embargo, meses después, en la comunidad RepRap se desarrolló una nueva versión del firmware el cual implementaba 3 ejes más (U, V, W) para el uso de carros adicionales independientes en X, lo cual supuso una ventaja en la implementación del control. Con el nuevo firmware se realizó los cambios precisos en la programación para tener un mejor control de los ejes adicionales.*



- *Una vez implementado el nuevo sistema mecánico y el firmware modificado, se procedió a realizar las pruebas de calibración, para lo cual se comprobó la ortogonalidad en los ejes cartesianos, así como también se probó mediante un inclinómetro los movimientos precisos del eje A como del eje C.*
- *Se verificó de manera experimental el ahorro de material al imprimir la geometría seleccionada con y sin material de soporte, en el cual se logró evidenciar realmente el ahorro de material respecto a lo teorizado en un principio. Además, se realizó un ensayo de deflexión experimental en el cual se comparó la resistencia de dos piezas fabricadas en la misma impresora, en la cual una fue impresa de manera tradicional, mientras que la segunda pieza fue impresa usando los dos ejes adicionales para darle una capa de recubrimiento, como resultado se comprobó que la pieza con revestimiento puede llegar a soportar cargas mayores.*



RECOMENDACIONES

- *Para la construcción de este prototipo se debe tomar muy en cuenta las tolerancias necesarias en cortes por láser, mecanizado e impresión 3D, ya que los errores se transmiten hacia la pieza impresa con cinco ejes.*
- *Se recomienda considerar mejorar la sujeción del eje Z para evitar vibraciones.*
- *Se recomienda la implementación de un sistema de alimentación de material ya que, si el filamento se tensiona entre el extrusor y el rollo puede afectar la trayectoria del eje X al someter a la estructura a una fuerza externa.*
- *Se recomienda eliminar el juego en la transmisión del eje Z, ya que el juego presente en los engranajes puede afectar el correcto desplazamiento en este eje.*
- *Para evitar cualquier daño en el manejo o calibración de la máquina se recomienda revisar el manual de operación y mantenimiento, en el que se detalla el manejo de los ejes adicionales para fin de evitar ruptura en la transmisión de engranes.*



- *A fin de evitar taponamiento en el extrusor, se recomienda tener un correcto perfil de impresión en el software Slicer.*
- *Para asegurar el correcto funcionamiento se recomienda realizar una prueba de ortogonalidad entre los ejes cartesianos especialmente cuando la máquina es movida de su lugar de trabajo.*
- *Para evitar sobrecalentamiento en la placa de control, se recomienda tener una adecuada ventilación tanto sobre la placa como para la fuente de alimentación.*
- *Como se menciona en el apartado 1.6, actualmente no existe un software que genere el código G para el manejo de una impresora 3D de cinco ejes, por lo cual no se puede aprovechar al 100% la funcionalidad de la máquina y debido a esto se recomienda la elaboración de un software Slicer especial para este prototipo.*



***GRACIAS POR SU
ATENCIÓN***



ESPE
ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO
CAMINO A LA EXCELENCIA