



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

INGENIERÍA MECATRÓNICA

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECATRÓNICO

Diseño y construcción de una impresora 3D tipo delta de gran volumen de trabajo para impresión multicolor FDM

Autores: Naranjo López, Jonathan Alexander
Yupangui Guerra, Diego Alexander

Director: Castellanos Villa, Santiago David PhD

Sangolquí, 24 de agosto de 2022



Contenido General

1

- INTRODUCCIÓN.

2

- FUNDAMENTO TEÓRICO.

3

- DESARROLLO.

4

- ENSAYOS Y RESULTADOS.

5

- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

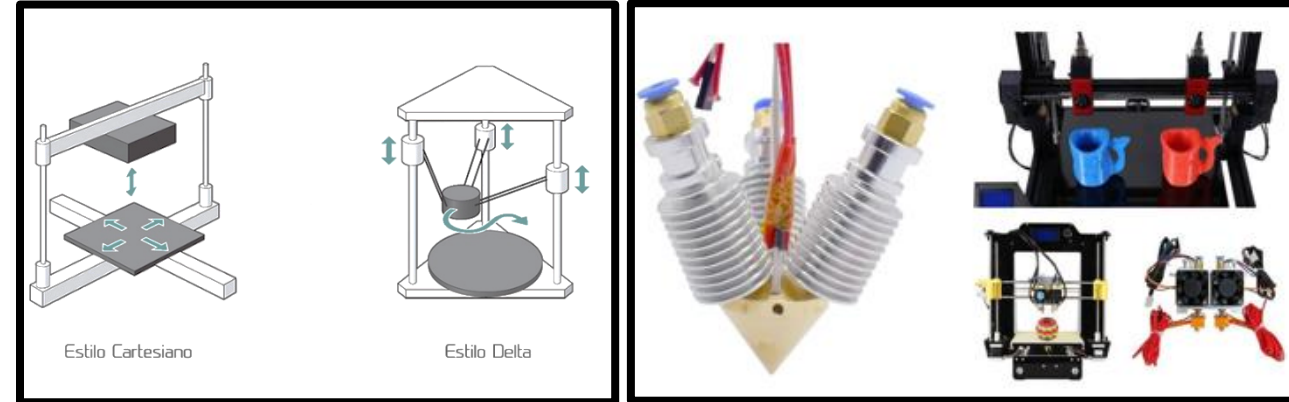


Antecedentes

Manufactura Aditiva (AM) – Impresión 3D

Fabricación de objetos tridimensionales a partir de un diseño digital, mediante la adición sucesiva de capas de un material (plásticos, metal, polvos cerámicos)

(Universidad Politécnica de Madrid, 2015).



1984
Inicio de la Manufactura Aditiva

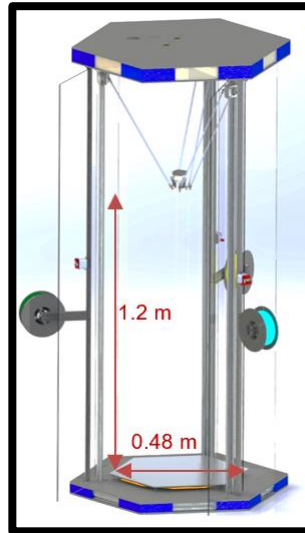
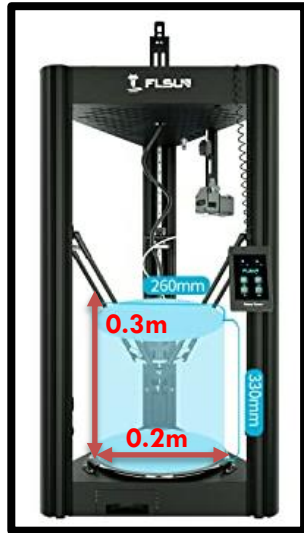
1988
Invención de la tecnología FDM

2009
Primera impresora comercializada a en forma de kit

Ecuador 2022
Impresoras 3D importadas con limitaciones de área de impresión y tecnología multicolor



Definición del problema



Laboratorio de Procesos de Manufactura:
Requerimiento de una máquina (impresora 3D) de prototipado de gran volumen



“EQUIPAMIENTO DEL LABORATORIO DE DESARROLLO DE PRODUCTOS Y TECNOLOGÍA CON UNA IMPRESORA 3D DE GRAN VOLUMEN DE TRABAJO PARA IMPRESIÓN MULTICOLOR FDM”



Objetivos

Objetivo general

Crear una impresora 3D tipo delta para la fabricación de piezas plásticas multicolor de hasta 0.2 m³ de volumen mediante el uso de tecnología FDM.

Objetivos específicos

- Analizar y establecer el diseño modular de una impresora 3D tipo delta para volúmenes de impresión de hasta 0.2 m³.
- Definir el diseño del prototipo experimental de una impresora FDM tipo delta con capacidad para fabricar piezas de hasta 0.2 m³.
- Producir el prototipo experimental de una impresora FDM tipo delta con capacidad para fabricar piezas de hasta 0.2 m³.
- Validar la capacidad del prototipo experimental para la fabricación de piezas plásticas multicolor de hasta 0.2 m³ de volumen.
- Formular los protocolos de funcionamiento, calibración y mantenimiento del modelo experimental.



Justificación e importancia

Enfoque Nacional

Contribuir con el país para el desarrollo de su propia tecnología para manufactura aditiva y a no ser dependientes de otros países.



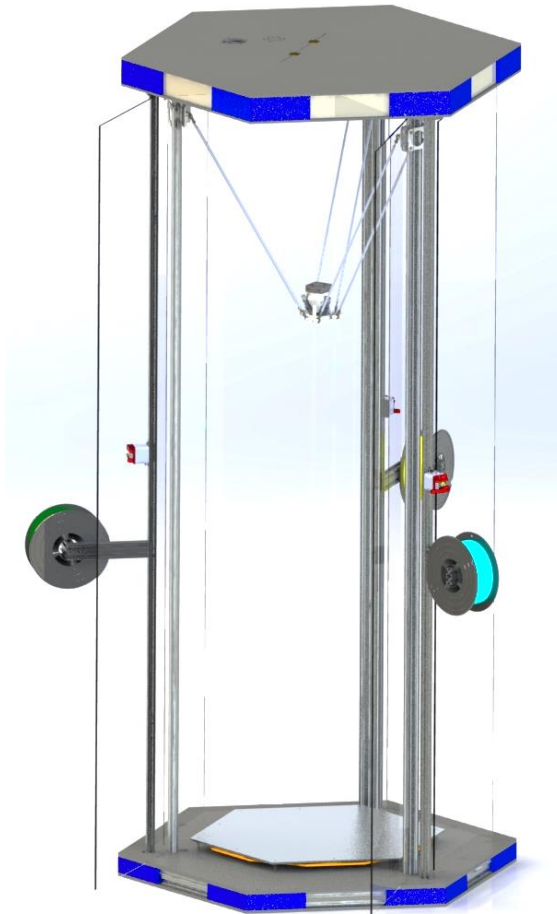
Enfoque Universitario

Colaborar con la ESPE y la comunidad universitaria en el desarrollo de tecnología de prototipado para la elaboración de proyectos.



Alcance

- El diseño del prototipo de una impresora 3D tipo delta con capacidad de imprimir piezas multicolor de 0.2 m³.
- Protocolo de pruebas de funcionamiento
- Uso de materiales entregados por el Laboratorio de Procesos de Manufactura.
- Manual del usuario, calibración y mantenimiento

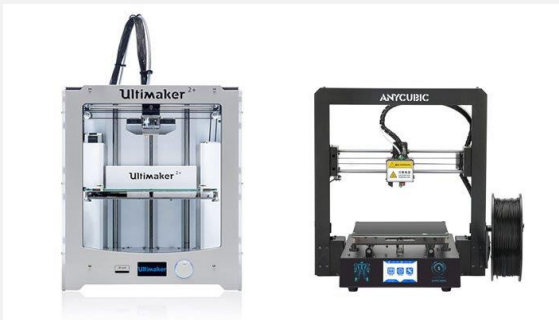


Impresoras 3D con tecnología FDM

Impresora 3D

Máquinas de control numérico CNC

Cartesiana



Delta



FDM (Fused Deposition Modelling)

Polímeros termoplásticos

PLA (Ácido Poliláctico)

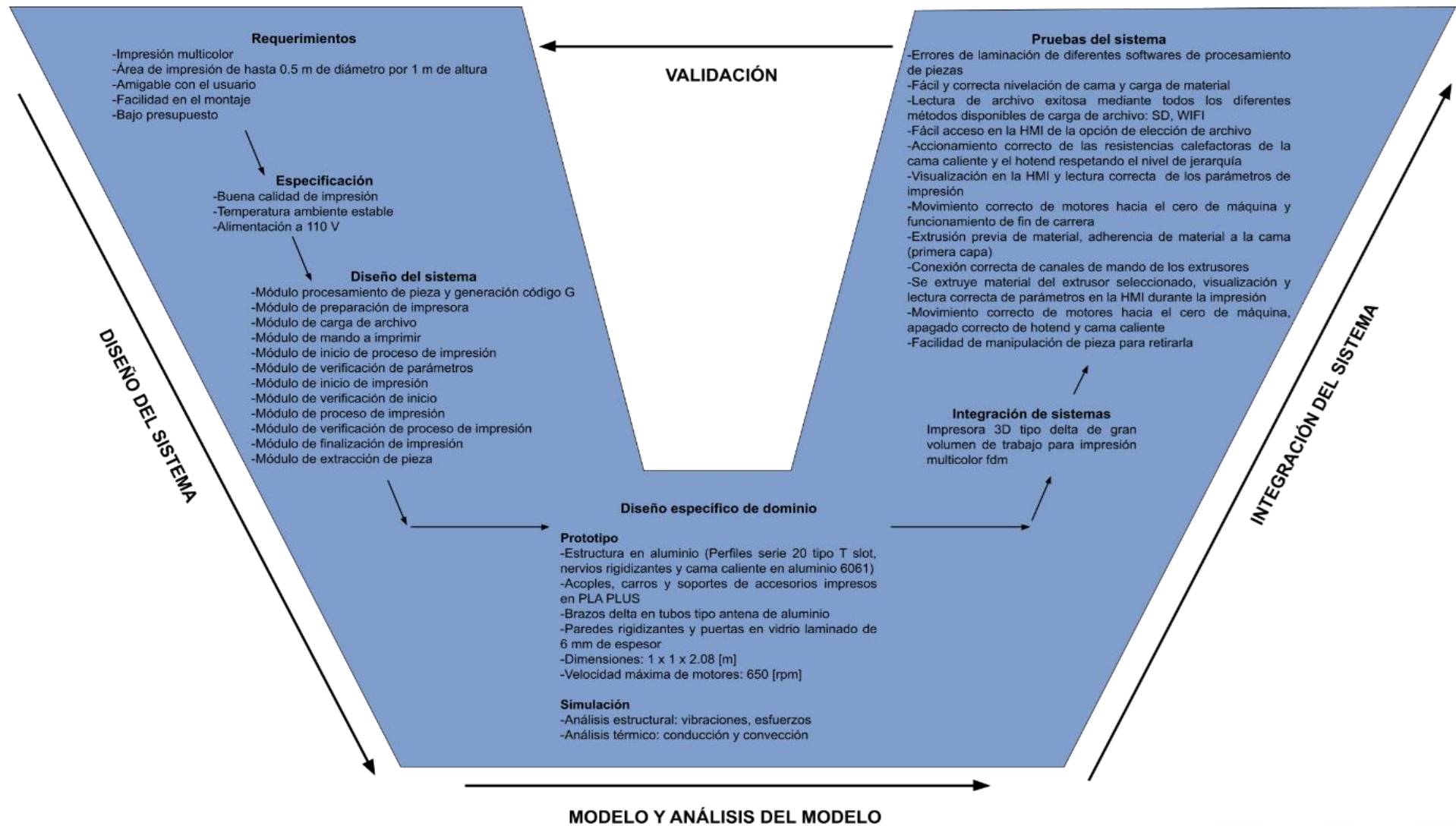


ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno)



Impresora 3D + FDM





REQUERIMIENTOS Y PARÁMETROS DE DISEÑO



Requerimientos

Impresión Multicolor
Área de impresión de hasta 0.2 m ³
Amigable con el usuario
Facilidad de montaje
Bajo costo
Control robusto
Portable
Estabilidad durante el proceso



Características técnicas

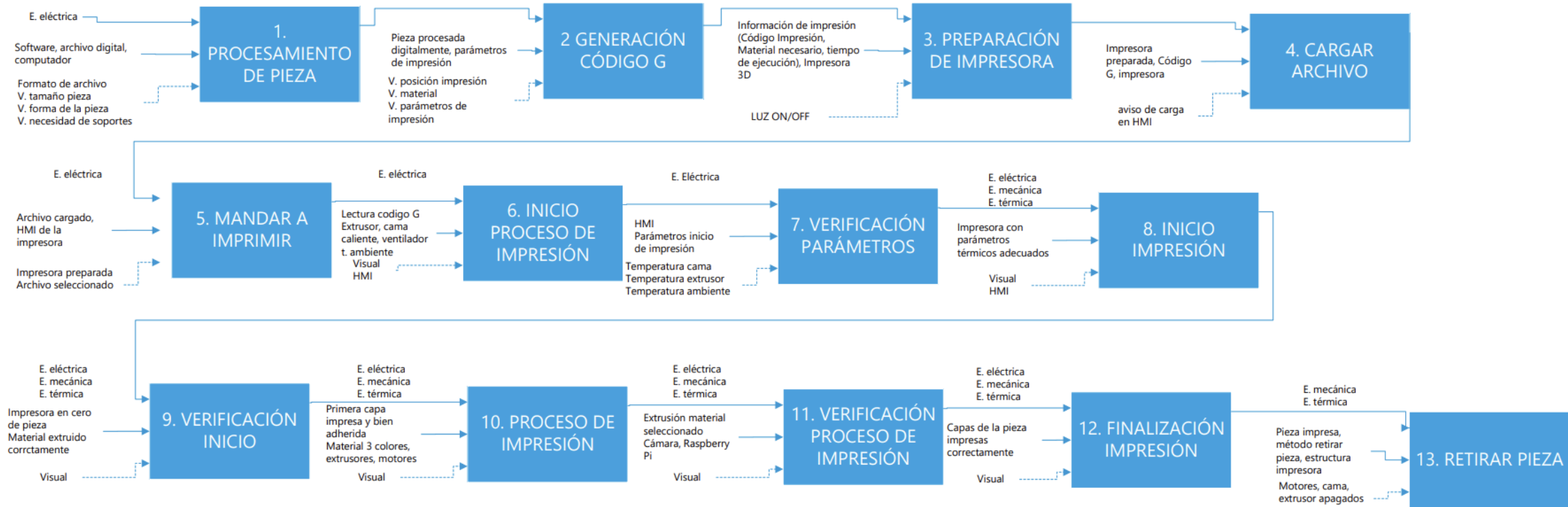
Sistema de extrusión triple
Diseño de piezas que permitan un volumen de impresión de 0.2 m ³
Interfaz fácil de usar
Diseño de juntas de elementos que faciliten el montaje y desmontaje del sistema
Procesos de manufactura más baratos que provean las características necesarias y permitan la utilización de diferentes materiales
Tarjetas de control especializadas para la aplicación
Estructura relativamente ligera
Estructura rígida que minimice las vibraciones producidas por los motores

Casa de la calidad

Row #	Max. Relationship Value in Row	Relative Weight	Weight / Importance	Quality Characteristics (a.k.a. "Functional Requirements" or "Hows")	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
1	9	15.4	8.0	Impresión multicolor	⊖	▲	○	▲	▲	○	▲	▲								
2	9	17.3	9.0	Área de impresión de 0.5 m de diámetro por 1 m de altura	▲	⊖	▲	○	⊖	○	○	○								
3	9	9.6	5.0	Amigable con el usuario	○	▲	⊖	○	▲	▲	○	▲								
4	9	13.5	7.0	Facilidad de montaje	▲	▲	▲	⊖	▲	▲	○	▲								
5	9	7.7	4.0	Bajo costo	○	○	▲	○	⊖	○	○	○								
6	9	11.5	6.0	Control robusto	○	○	▲	▲	▲	⊖	▲	▲								
7	9	5.8	3.0	Portable	▲	○	▲	○	▲	▲	▲	⊖	▲							
8	9	19.2	10.0	Estabilidad durante el proceso	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	○	⊖							
9																				
10																				
Target or Limit Value					Diamond outside	Dimensionamiento correcto	HMI intuitiva	Diseño personalizado para cada junta	Uso de procesos no convencionales	Puntos de conexión suficientes y delicados para cada pieza	Materiales resistentes / ligeros	Uso de parámetros portátiles								
Difficulty (0=Easy to Accomplish, 10=Extremely Difficult)					0	2	1	2	4	3	2	6								
Max Relationship Value in Column					9	9	9	9	9	9	9	9								
Weight / Importance					280.8	288.5	207.7	269.2	300.0	273.1	280.8	303.8								
Relative Weight					12.7	13.1	9.4	12.2	13.6	12.4	12.7	13.8								

Característica	Ponderación
Estructura rígida que minimice las vibraciones producidas por los motores	13.8
Procesos de manufactura más baratos que provean las características necesarias y permitan la utilización de diferentes materiales	13.6
Diseño de piezas que permitan un volumen de impresión de 0.2 m3	13.1
Sistema de extrusión triple	12.7
Estructura relativamente ligera	12.7
Tarjetas de control especializadas para la aplicación	12.4
Diseño de juntas de elementos que faciliten el montaje y desmontaje del sistema	12.2
Interfaz fácil de usar	9.4

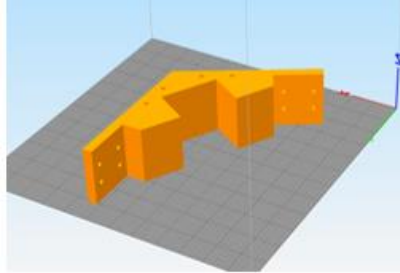




Descripción del proceso

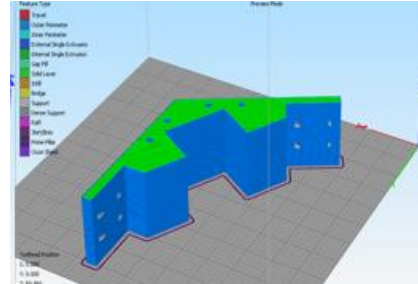
1 Diseño de la pieza

Software (SolidWorks, Fusion 360)

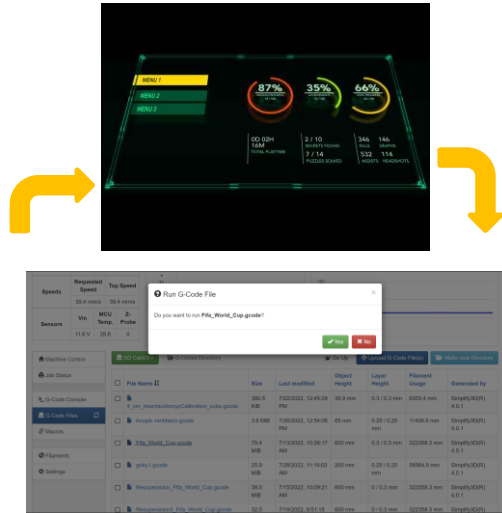


2 Procesamiento de la pieza

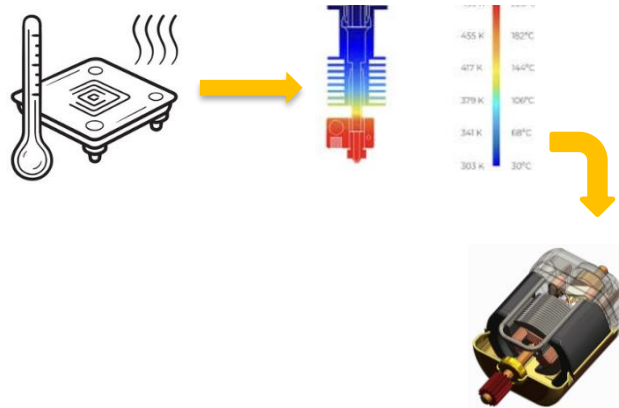
Software (Simplify 3D)



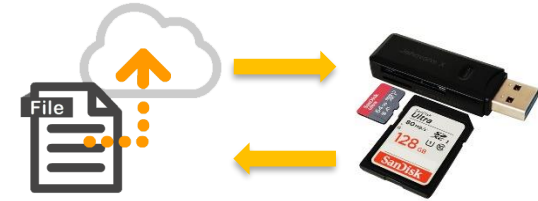
4 Mandar a imprimir



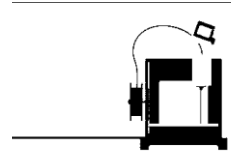
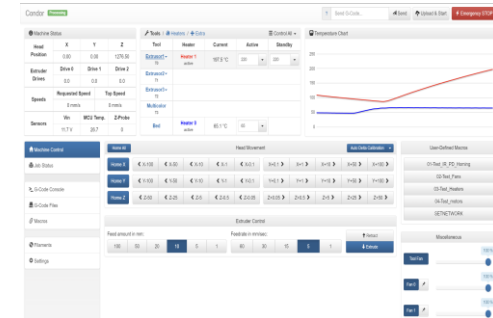
5 Inicio proceso de impresión



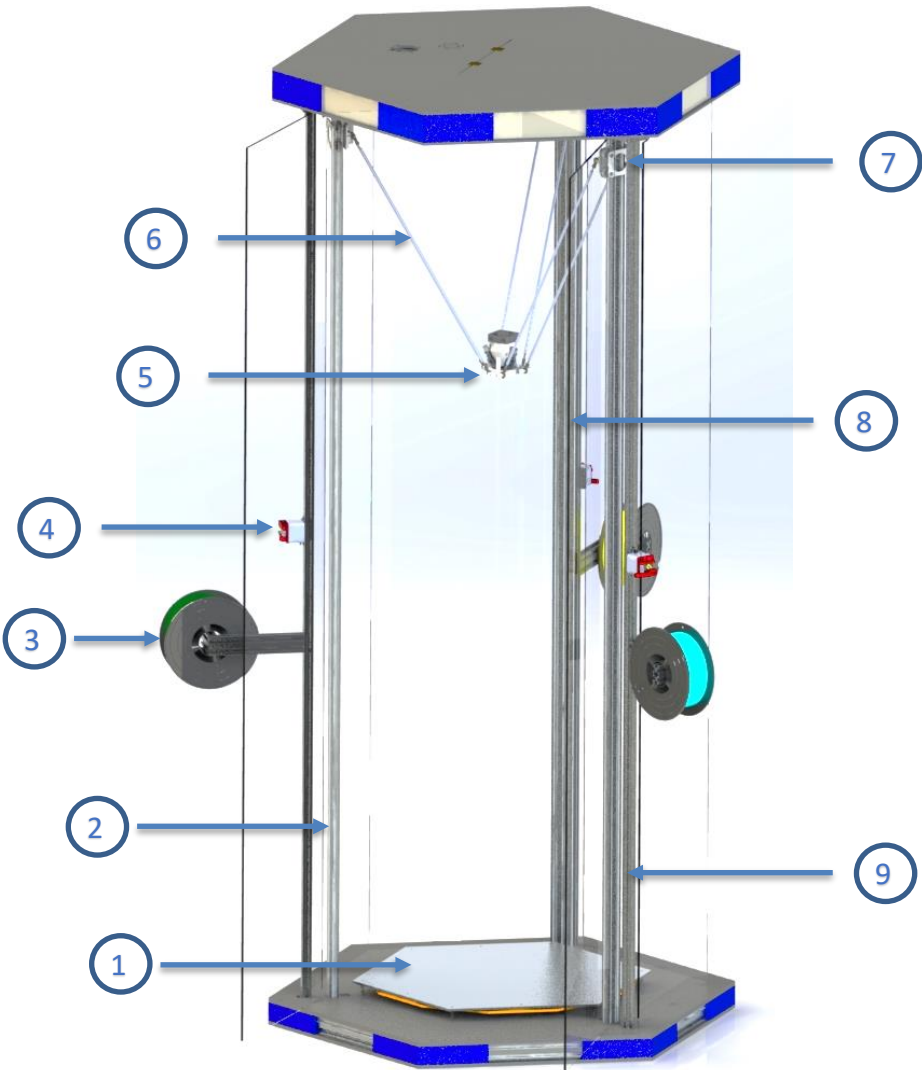
3 Cargar archivo



6 Proceso de impresión

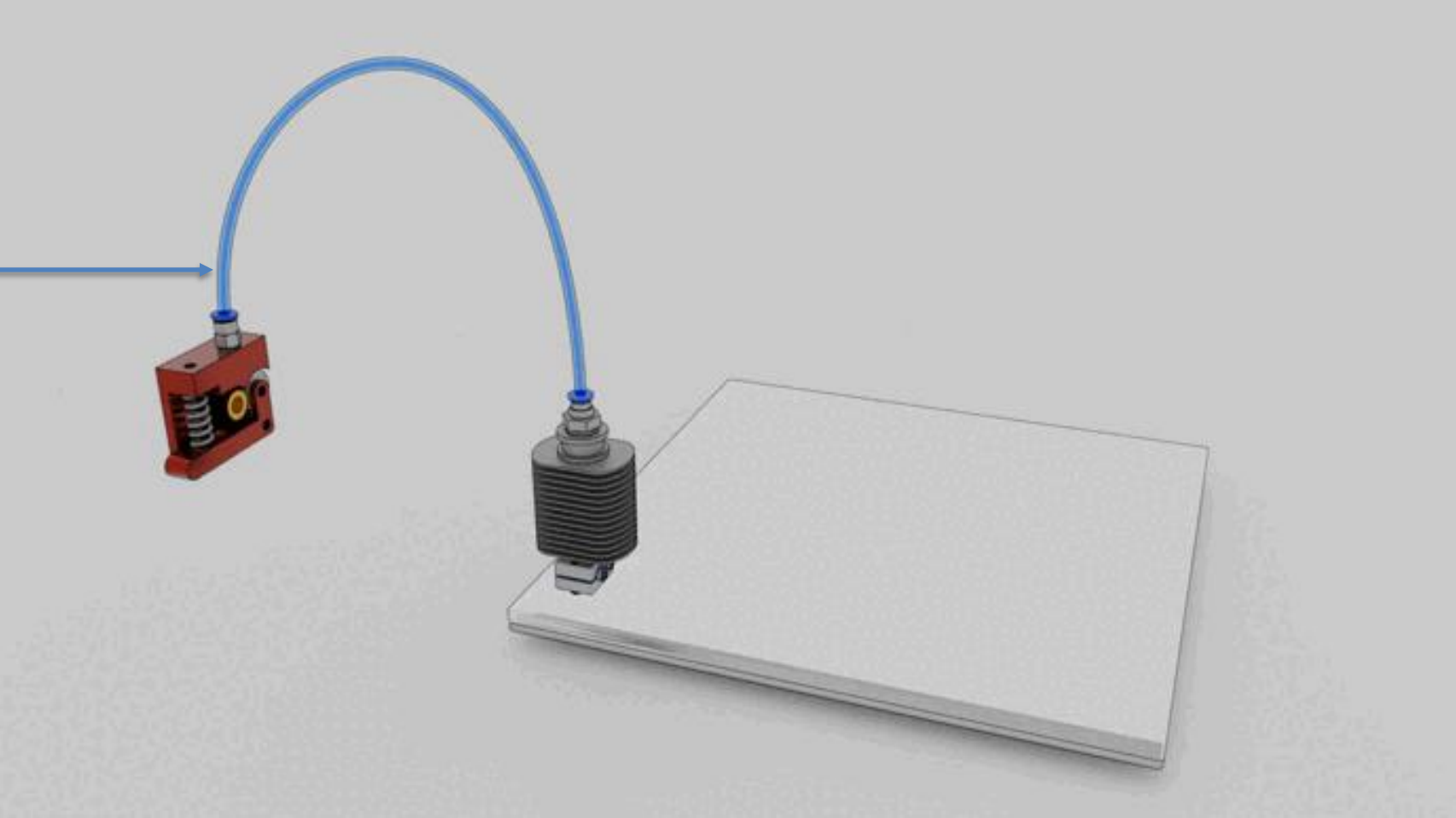
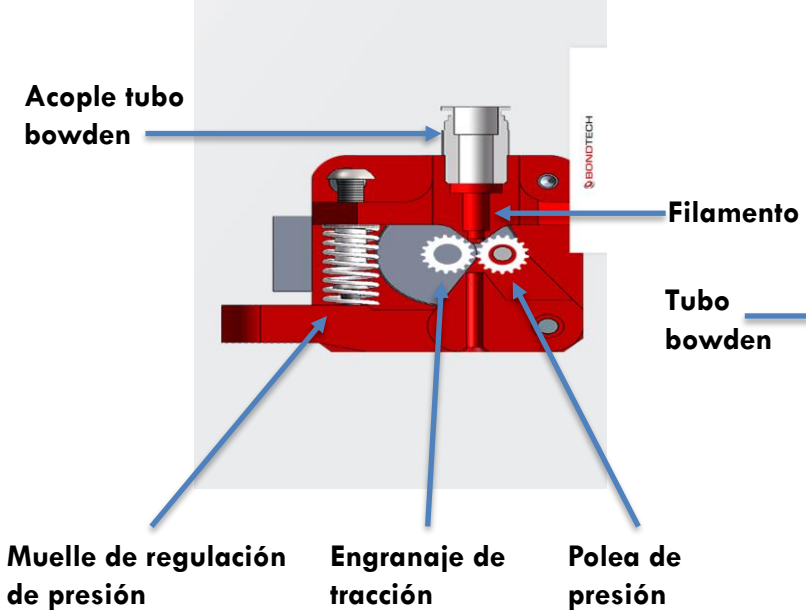


Partes Impresora 3D Delta

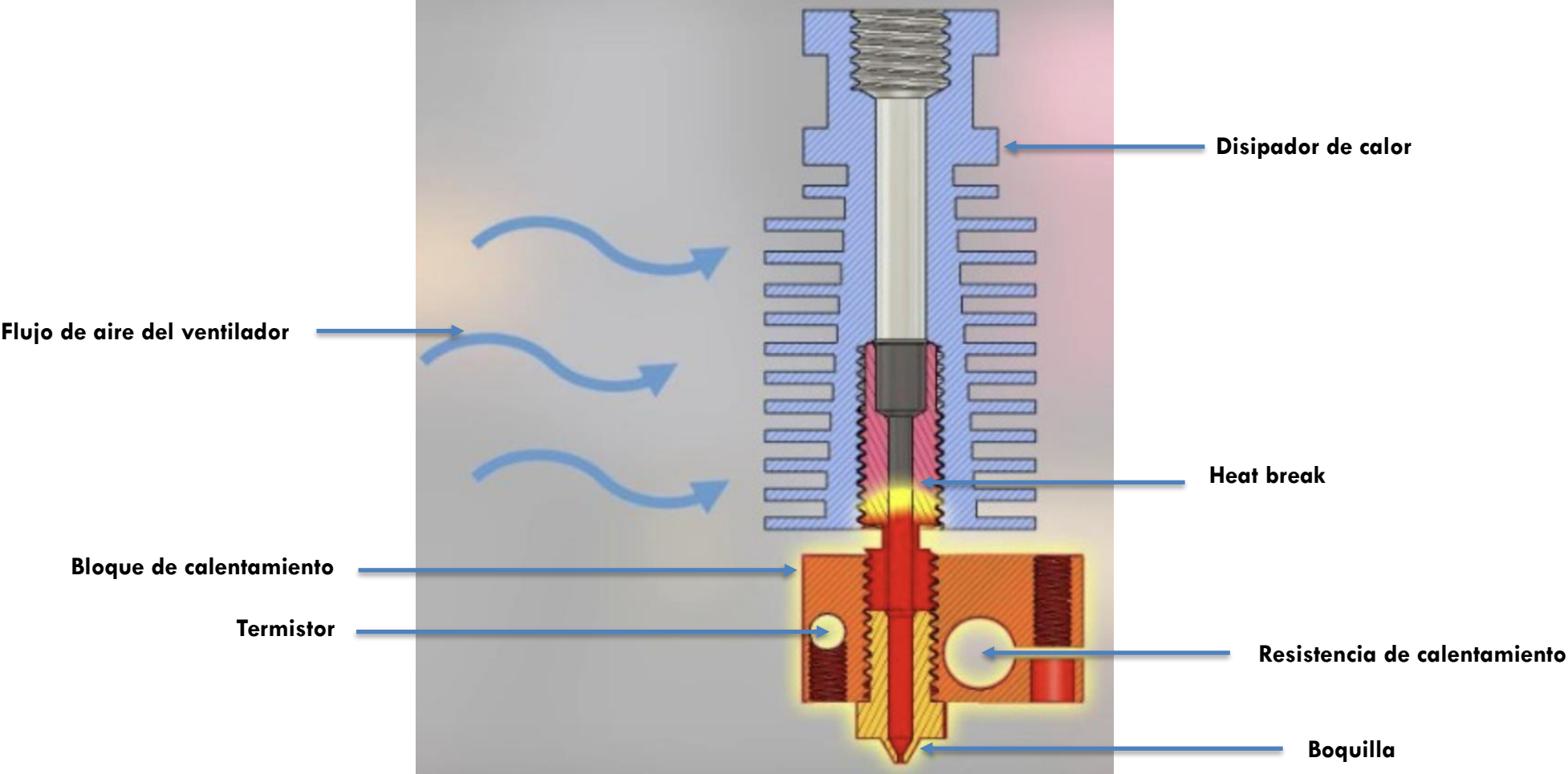


N°	Componente
1	Cama caliente hexagonal 600 mm x 600 mm
2	Torre Y
3	Carrete de filamento
4	Motor Extrusor
5	Diamond hotend
6	Brazos Delta
7	Carro de desplazamiento
8	Torre Z
9	Torre X

Mecanismos de funcionamiento – Impresora 3D FDM



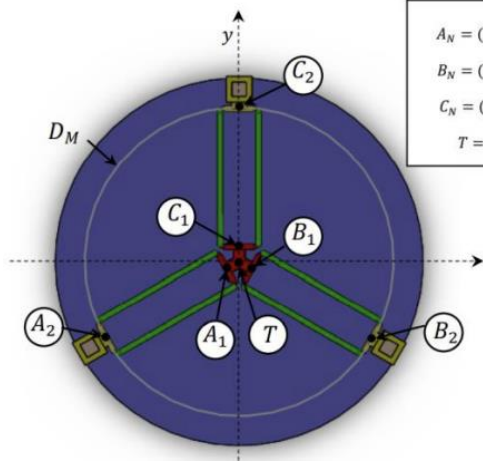
Mecanismos de funcionamiento – Impresora 3D FDM



MÓDULO DE LA ESTRUCTURA

Cinemática inversa

Cálculo de la posición del pivote de unión del brazo con la base del hotend



$$A_N = (A_{Nx}, A_{Ny}, A_{Nz})$$

$$B_N = (B_{Nx}, B_{Ny}, B_{Nz})$$

$$C_N = (C_{Nx}, C_{Ny}, C_{Nz})$$

$$T = (T_x, T_y, T_z)$$

$$A_{1x} = T_x + O_E \times \cos(210^\circ)$$

$$A_{1y} = T_y + O_E \times \sin(210^\circ)$$

$$A_{1z} = T_z + T_o$$

$$B_{1x} = T_x + O_E \times \cos(330^\circ)$$

$$B_{1y} = T_y + O_E \times \sin(330^\circ)$$

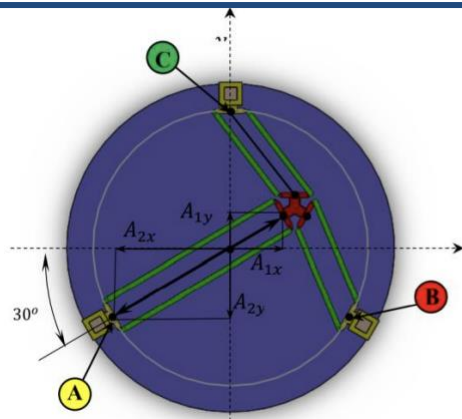
$$B_{1z} = T_z + T_o$$

$$C_{1x} = T_x$$

$$C_{1y} = T_y + O_e$$

$$C_{1z} = T_z + T_o$$

Cálculo de la posición del pivote de unión del brazo con el carro de movimiento



$$A_{2x} = D_M \times \cos(210^\circ)$$

$$A_{2y} = D_M \times \sin(210^\circ)$$

$$A_{2z} = ? *$$

$$B_{2x} = D_M \times \cos(330^\circ)$$

$$B_{2y} = D_M \times \sin(330^\circ)$$

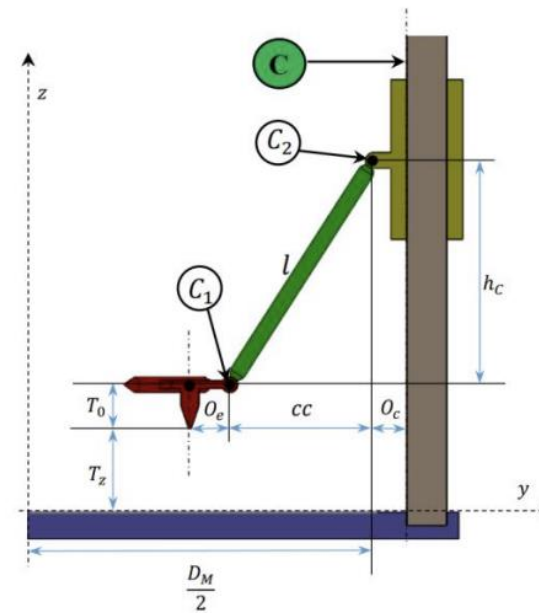
$$B_{2z} = ? *$$

$$C_{2x} = 0$$

$$C_{2y} = D_M$$

$$C_{2z} = ? * *$$

Cálculo de las alturas de los carros



$$aa = \sqrt{(A_{2x} - A_{1x})^2 + (A_{2y} - A_{1y})^2}$$

$$bb = \sqrt{(B_{2x} - B_{1x})^2 + (B_{2y} - B_{1y})^2}$$

$$cc = \sqrt{(C_{2x} - C_{1x})^2 + (C_{2y} - C_{1y})^2}$$

$$h_A = \sqrt{l^2 - aa^2}$$

$$h_B = \sqrt{l^2 - bb^2}$$

$$h_C = \sqrt{l^2 - cc^2}$$

$$* A_{2z} = T_z + O_E + h_A$$

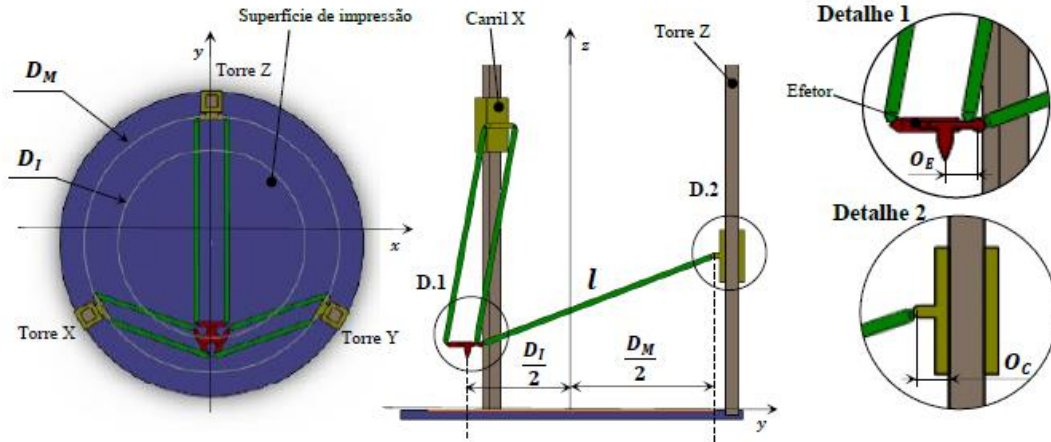
$$* B_{2z} = T_z + O_E + h_B$$

$$* C_{2z} = T_z + O_E + h_C$$

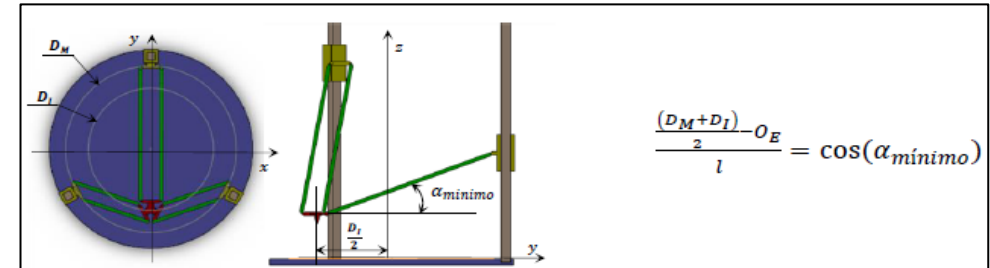
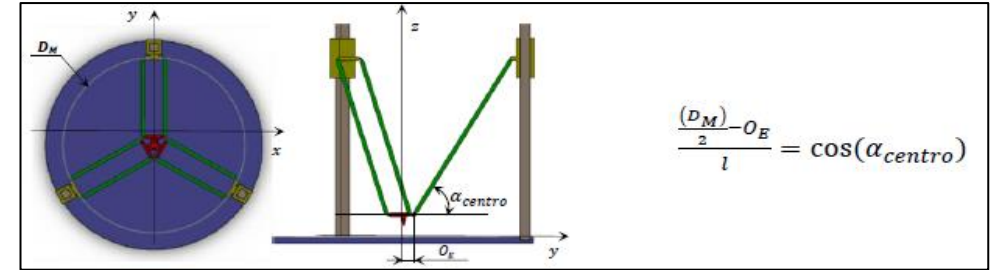


MÓDULO DE LA ESTRUCTURA

Geometría Delta



Longitud de brazos delta y Diámetro de la máquina



Símbolo	Significado	Valor [mm]
D_M	Diámetro de la máquina	660
D_I	Diámetro de impresión	500
l	Longitud de brazos delta	600
O_C	Offset del carro	20
O_E	Offset del efector final	30

$$l = \frac{D_i}{2 * (\cos(\alpha_{minimo}) - \cos(\alpha_{origen}))}$$

$$\frac{D_M - O_e}{2} = \cos(\alpha_{centro})$$

$$l = \frac{530}{2 * (\cos(20) - \cos(60))}$$

$$D_M = 2 * (\cos(60) + 30)$$

$$l \approx 602.69mm$$

$$D_M = 660mm$$

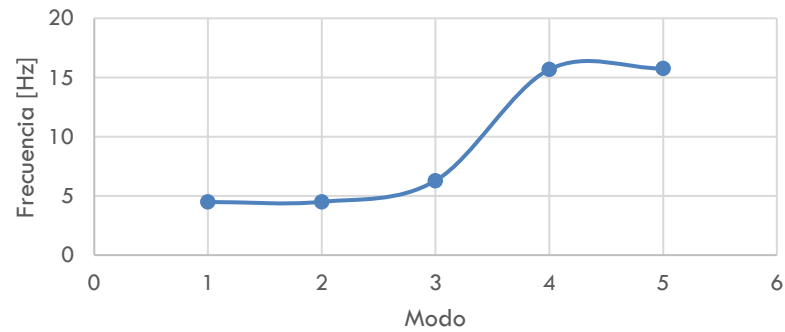


MÓDULO DE LA ESTRUCTURA

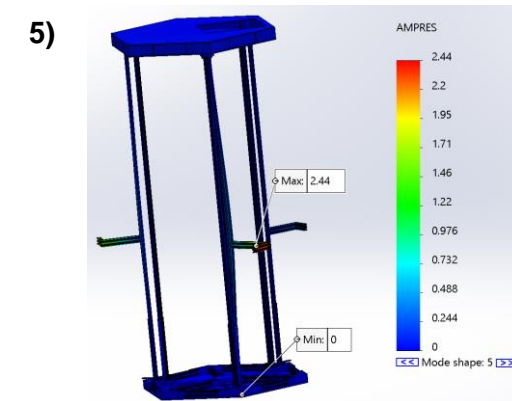
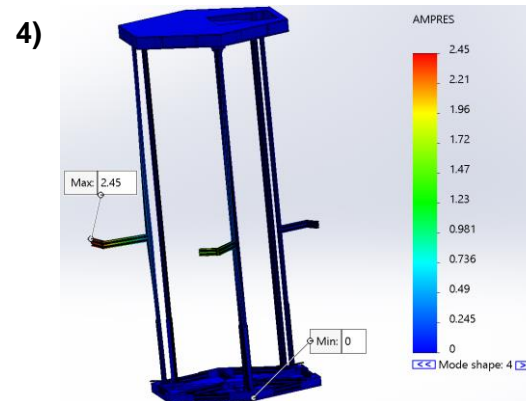
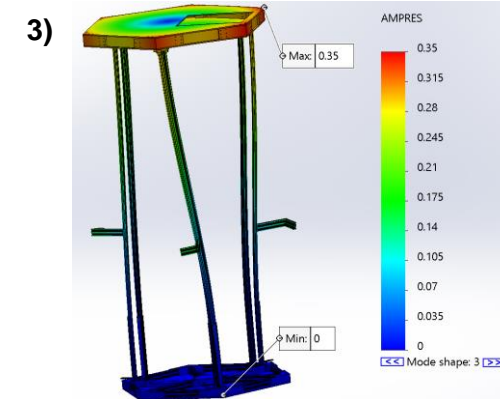
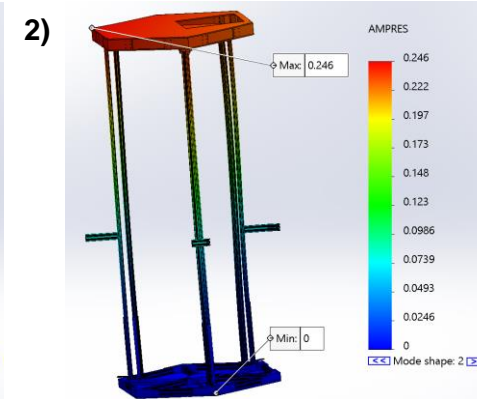
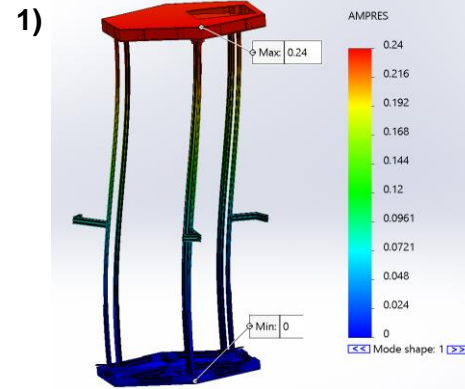
Análisis de vibraciones

Estructura sin paredes

Frecuencia natural de la estructura



Modo N°	Frecuencia(Rad/s)	Frecuencia(Hertz)	Periodo (s)
1	28.168	4.4829	0.22307
2	28.272	4.4996	0.22224
3	39.514	6.2888	0.15901
4	98.572	15.688	0.063742
5	99.062	15.766	0.063427

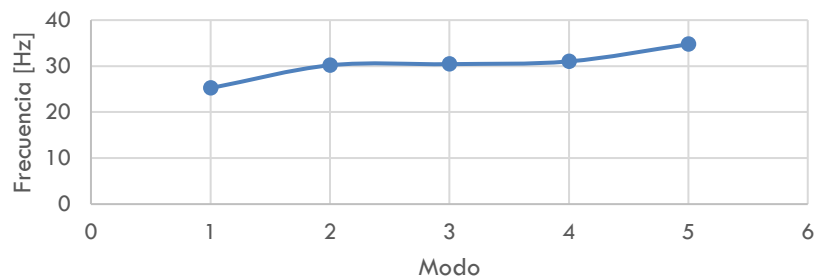


MÓDULO DE LA ESTRUCTURA

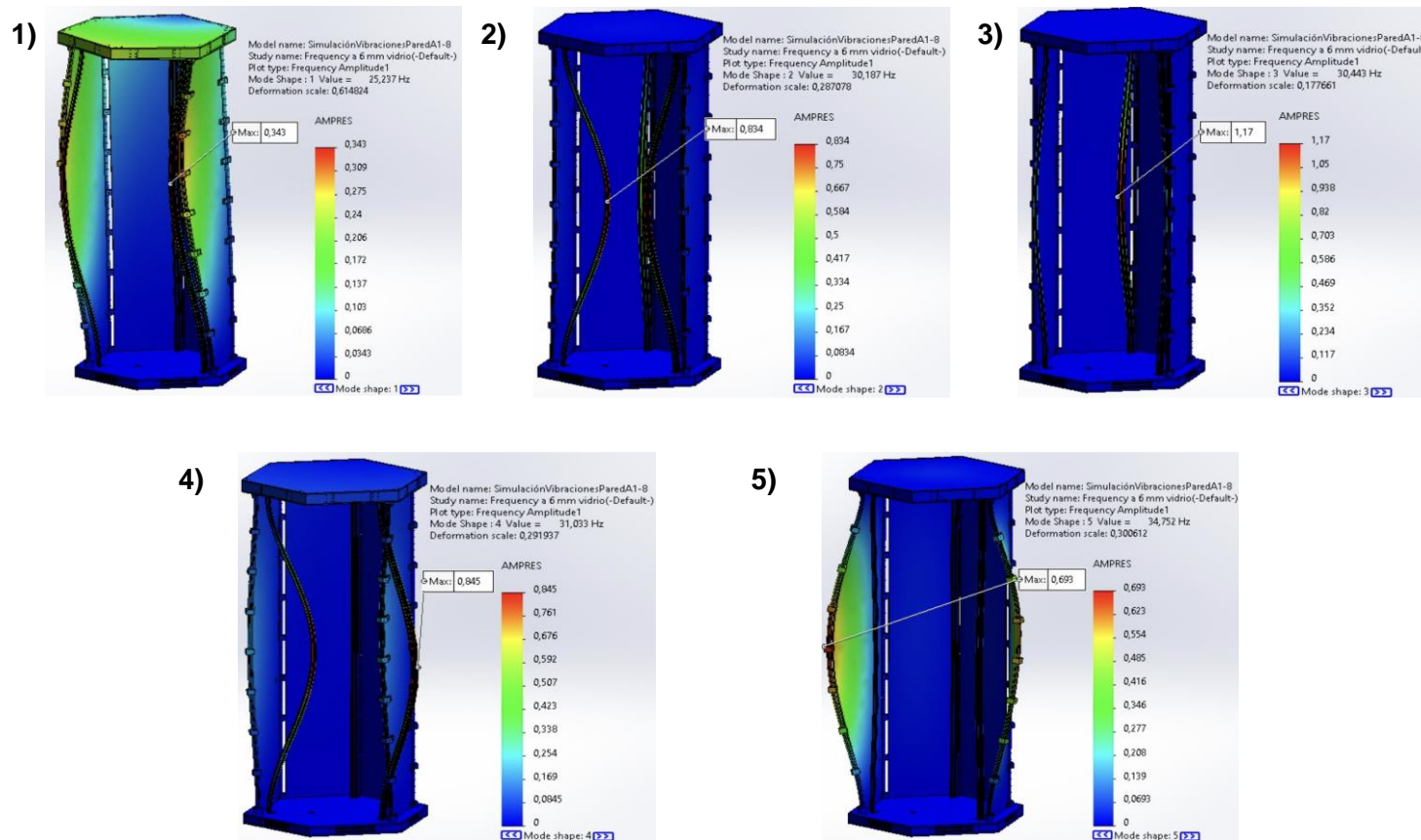
Análisis de vibraciones

Estructura con paredes

Frecuencia natural de la estructura



Modo N°	Frecuencia(Rad/s)	Frecuencia(Hertz)	Periodo (s)
1	158.57	25.237	0.039624
2	189.67	30.187	0.033126
3	191.28	30.443	0.032849
4	194.99	31.033	0.032224
5	218.35	34.752	0.028775



MÓDULO DE LA ESTRUCTURA

Análisis Estático

Esfuerzo sistema cama - resortes

$$peso_{pieza\ impresa} = masa_{pieza\ impresa} * g$$

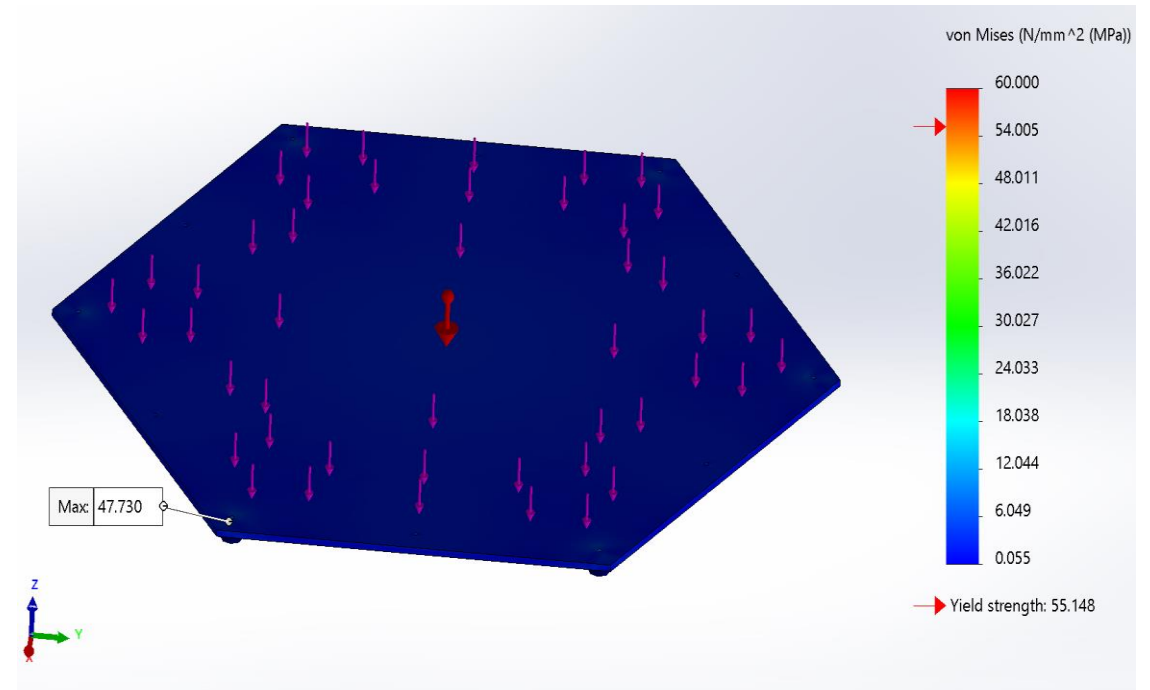
$$peso_{pieza\ impresa} = 20 [kg] * 9,8 \left[\frac{m}{s^2}\right]$$

$$peso_{pieza\ impresa} = 196 [N]$$

$$FS = \frac{\sigma_{\acute{u}ltimo}}{\sigma_{cama-resortes}}$$

$$FS = \frac{55,148 [MPa]}{47,730 [MPa]}$$

$$FS = 1,15 \approx 1,2$$

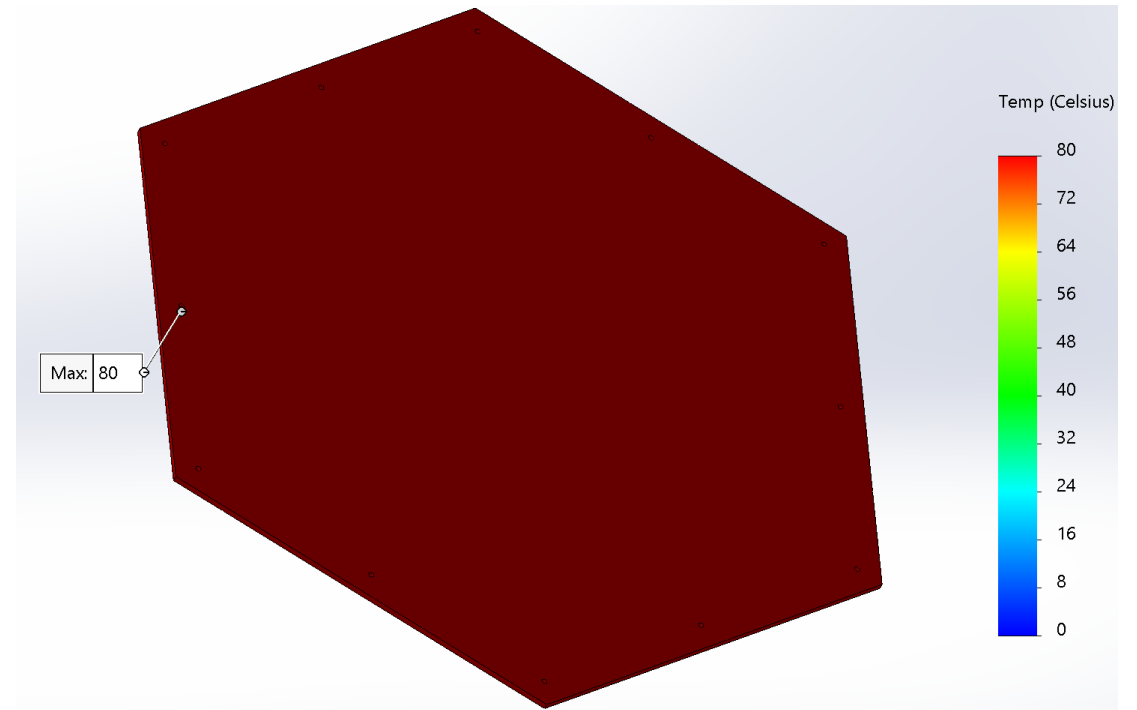


Esfuerzo máximo de 47.730 MPa y factor de seguridad de 1.2

MÓDULO DE CALENTAMIENTO
DE LA CAMA

Análisis Térmico

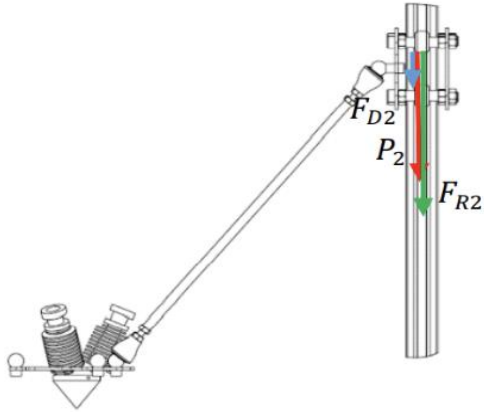
- Flujo de calor: 1400W
- Coeficiente de transferencia aluminio: $k=204\text{W/m}\cdot^{\circ}\text{C}$
- Espesor: $L=3\text{mm}$
- Área: $S=1.34\text{ m}^2$



MÓDULO DE MOVIMIENTO

Análisis Estático

Carga en los carros



$$masa_{total-carros} = masa_{efector} + masa_{brazos} + masa_{carros}$$

$$masa_{total-carros} = 318 + 210 + 345 [g]$$

$$masa_{total-carros} = 873 [g]$$

$$Peso P_2 = masa_{total-carros} * g$$

$$Peso P_2 = 0.873 [kg] * 9.8 \left[\frac{m}{s^2}\right]$$

$$Peso P_2 = 8.56 [N]$$

$$Fuerza\ dinámica\ F_{D2} = masa_{total-carros} * a_{carro}$$

$$Fuerza\ dinámica\ F_{D2} = 0.873 [kg] * 2 \left[\frac{m}{s^2}\right]$$

$$Fuerza\ dinámica\ F_{D2} = 1,75 [N]$$

$$Fuerza\ resultante\ F_{R2} = P_2 + F_{D2}$$

$$Fuerza\ resultante\ F_{R2} = 8,56 [N] + 1,75 [N]$$

$$Fuerza\ resultante\ F_{R2} = 10,31 [N]$$

Elemento	Masa por unidad [g]	Unidades	Masa total [g]
Diamond hotend	140	1	140
Base efector	78	1	78
Componentes del efector	100	1	100
		Total Efector	318
Brazos	35	3	210
Carro	115	3	345

$$Fuerza\ resultante\ individual\ F'_{R2} = \frac{F_{R2}}{3}$$

$$Fuerza\ resultante\ individual\ F'_{R2} = \frac{10,31 [N]}{3}$$

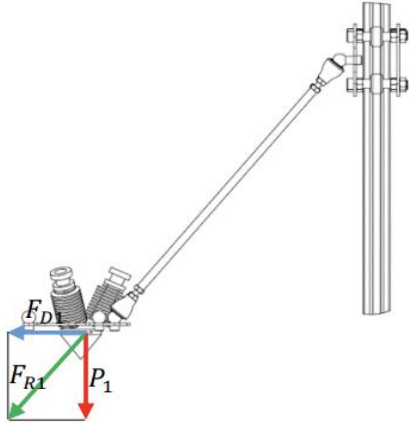
$$Fuerza\ resultante\ individual\ F'_{R2} = 3,44 [N]$$

Carga resultante individual de los carros es 3.44 [N]

MÓDULO DE MOVIMIENTO

Análisis Estático

Carga en el efector final



$$masa_{total-efector} = masa_{efector} + masa_{brazos}$$

$$masa_{total-efector} = 318 [g] + 210 [g]$$

$$masa_{total-efector} = 528 [g]$$

$$Peso P_1 = masa_{total-efector} * g$$

$$Peso P_1 = 0,528 [kg] * 9,8 \left[\frac{m}{s^2} \right]$$

$$Peso P_1 = 5,17 [N]$$

$$Fuerza dinámica F_{D1} = P_1 * a_{efector}$$

$$Fuerza dinámica F_{D1} = 0,528 [kg] * 5,5 \left[\frac{m}{s^2} \right]$$

$$Fuerza dinámica F_{D1} = 2,90 [N]$$

$$Fuerza resultante F_{R1} = \sqrt{P_1^2 + F_{D1}^2}$$

$$Fuerza resultante F_{R1} = \sqrt{(5,17)^2 + (2,90)^2}$$

$$Fuerza resultante F_{R1} = 5,93 [N]$$

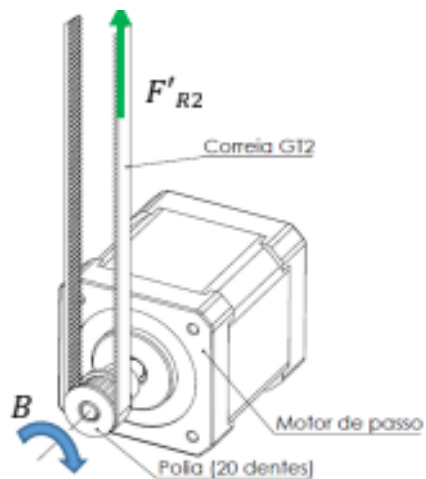
Carga resultante en el efector final es 5.93 [N]



MÓDULO DE MOVIMIENTO

Cinemática polea - motor

Par motor



Fuerza resultante individual F'_{R2}	Diámetro de la polea	Par Útil
3.44 N	12,73mm	2.19 N.cm

$$B = F'_{R2} * \frac{D}{2}$$

$$B = 3.44N * \frac{0.1273 \text{ cm}}{2}$$

$$B = 2.19 \text{ N.cm}$$

$$\text{Par máximo: } 2.19 * 0.61 = 1.34$$

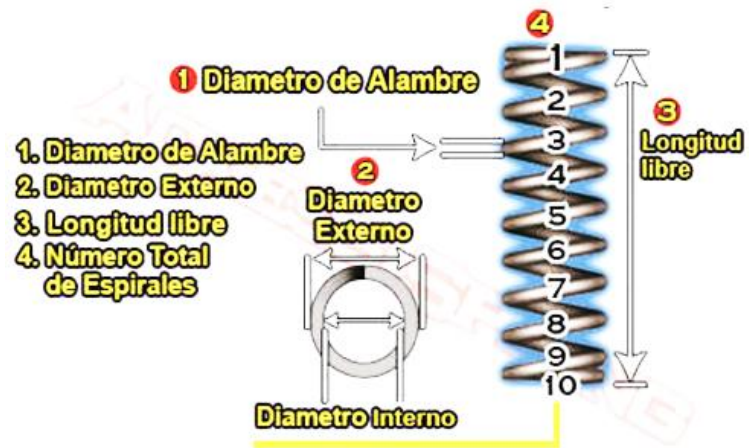
$$\text{Par} = 1.34 * 1.25 = 1.675 \text{ N.cm}$$

Par motor resultante es 1.675 [N.cm]

MÓDULO DE NIVELACIÓN

Análisis estático

Resortes



$$k = \frac{Gd^4}{8D^3N}$$

- $d = 0,07 \text{ in}$
- $DE = 0,315 \text{ in}$
- $D = 0,315 - 0,07 = 0,245 \text{ in}$
- $N = 6$
- $G = 11,2 * 10^6 \text{ psi}$

$$k = \frac{(11,2 * 10^6 \text{ psi})(0,07 \text{ in})^4}{8(0,245 \text{ in})^3(6)}$$

$$k = 380,9 \left[\frac{\text{lb}}{\text{in}} \right] \approx 66,73 \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}} \right]$$

$$F = k * x$$

$$x = \frac{F}{k}$$

$$x = \frac{235,2 \text{ [N]}}{66,73 \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}} \right]}$$

$$x = 3,53 \text{ mm}$$

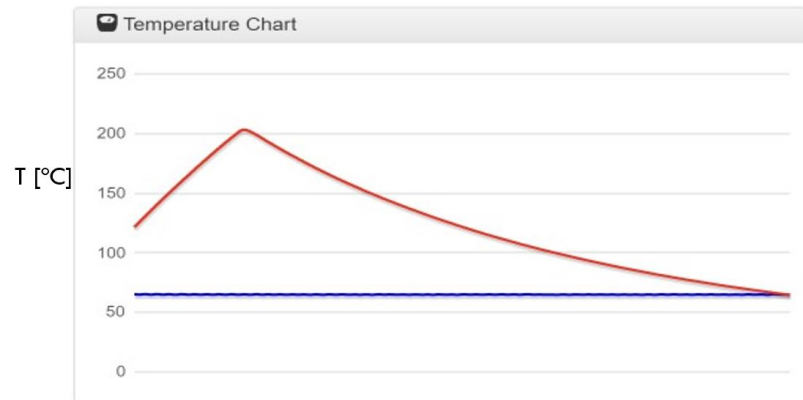
Desplazamiento máximo del resorte es 3.53 [mm]



MÓDULO DE CALENTAMIENTO DEL EXTRUSOR

Sintonización PID

Primera sintonización a 200 °C

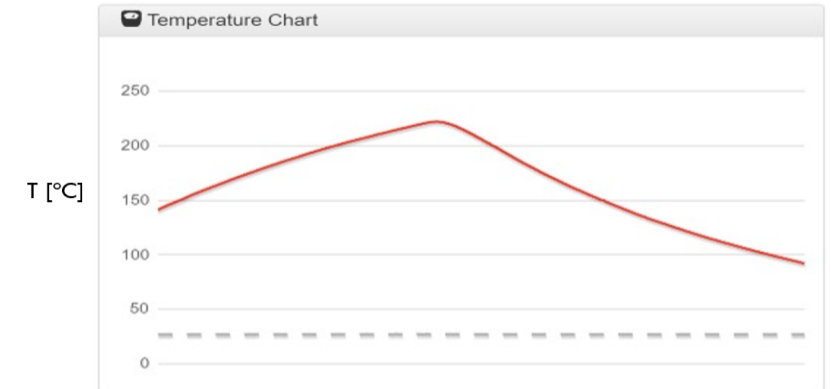


Las constantes del controlador son las siguientes:

$$\begin{aligned} k_p &= 29 \\ k_i &= 0.88 \\ k_d &= 81.6 \end{aligned}$$

$$C(s) = k_p \left(1 + \frac{1}{32.66 s} + 2.81 s \right)$$

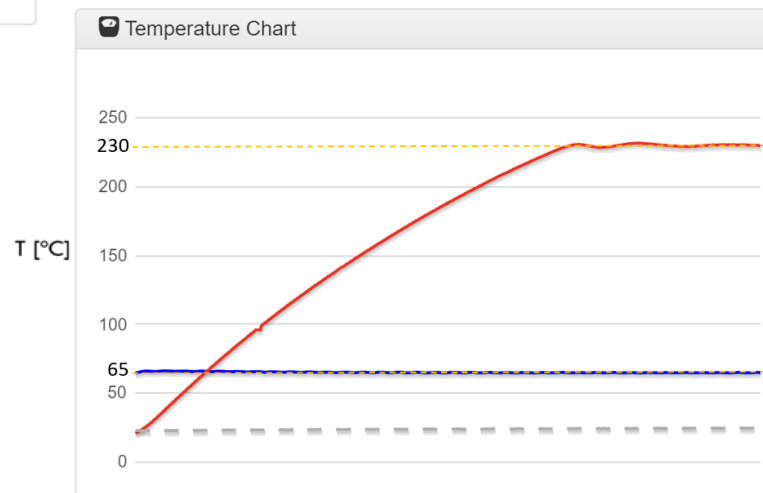
Segunda sintonización A 220 °C



Las constantes del controlador son las siguientes:

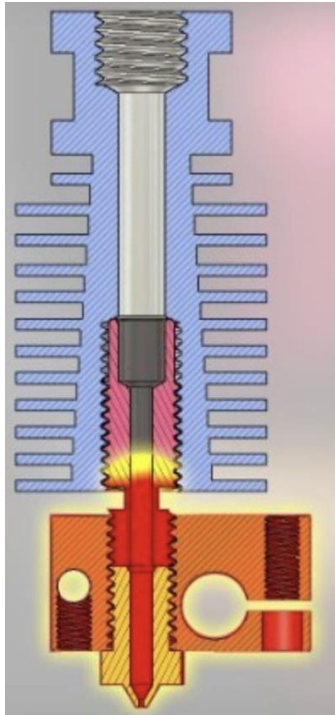
$$\begin{aligned} k_p &= 20 \\ k_i &= 0.64 \\ k_d &= 82.3 \end{aligned}$$

$$C(s) = k_p \left(1 + \frac{1}{31.25 s} + 4.11 s \right)$$



MÓDULO DE EXTRUSIÓN

Extrusor simple



Un filamento

Extrusión simple

Rollos por cada color

Varias boquillas

Diamond hotend

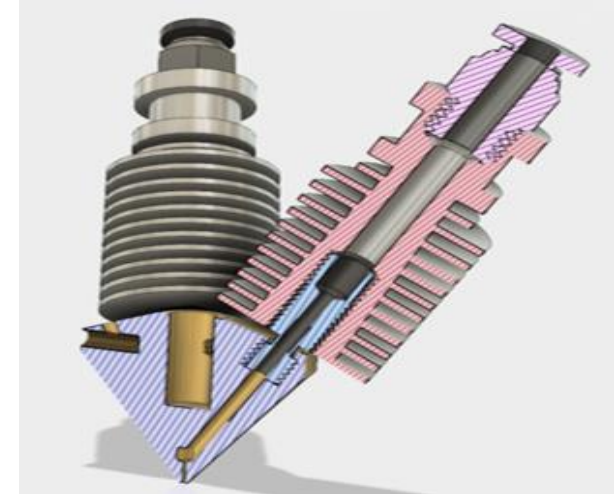
Tres filamento

Extrusión multicolor

Mezcla de colores

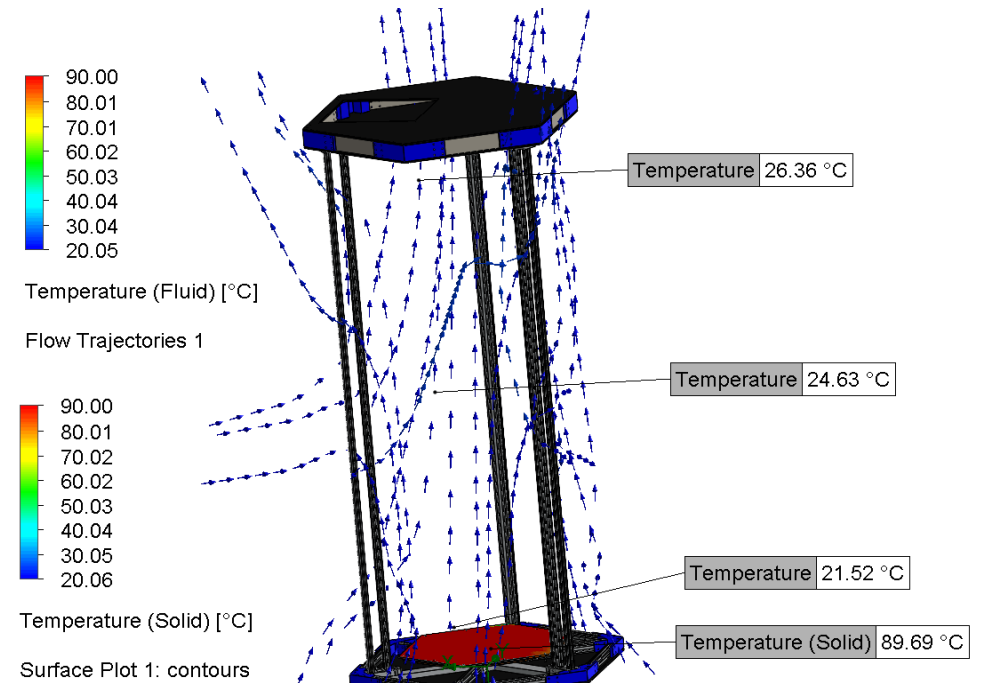
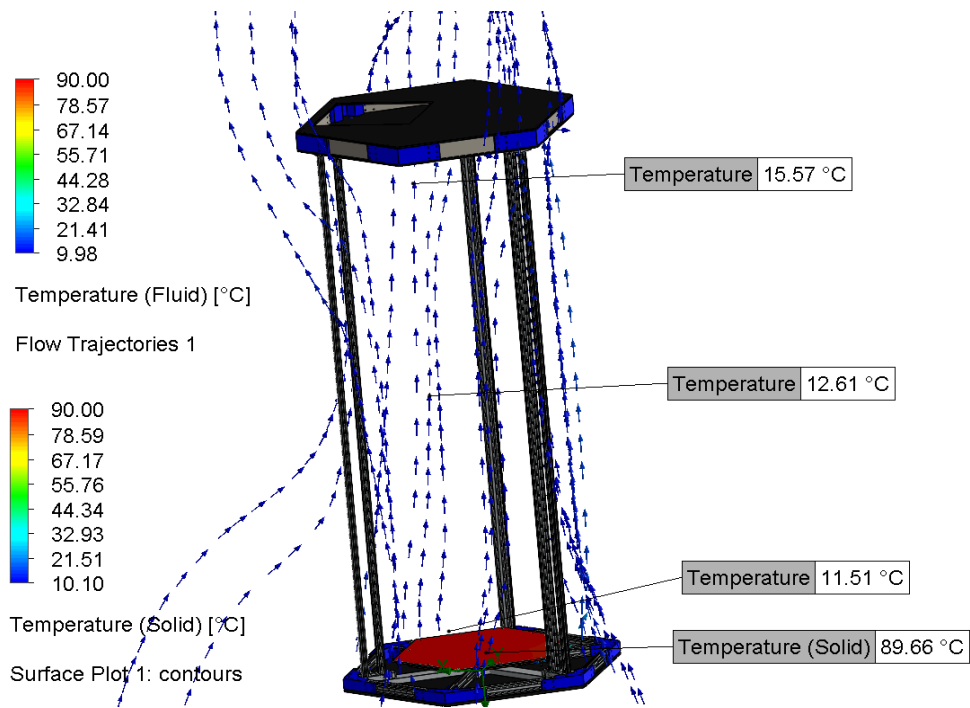
Boquilla única

Desperdicio mínimo – cambio de color rápido



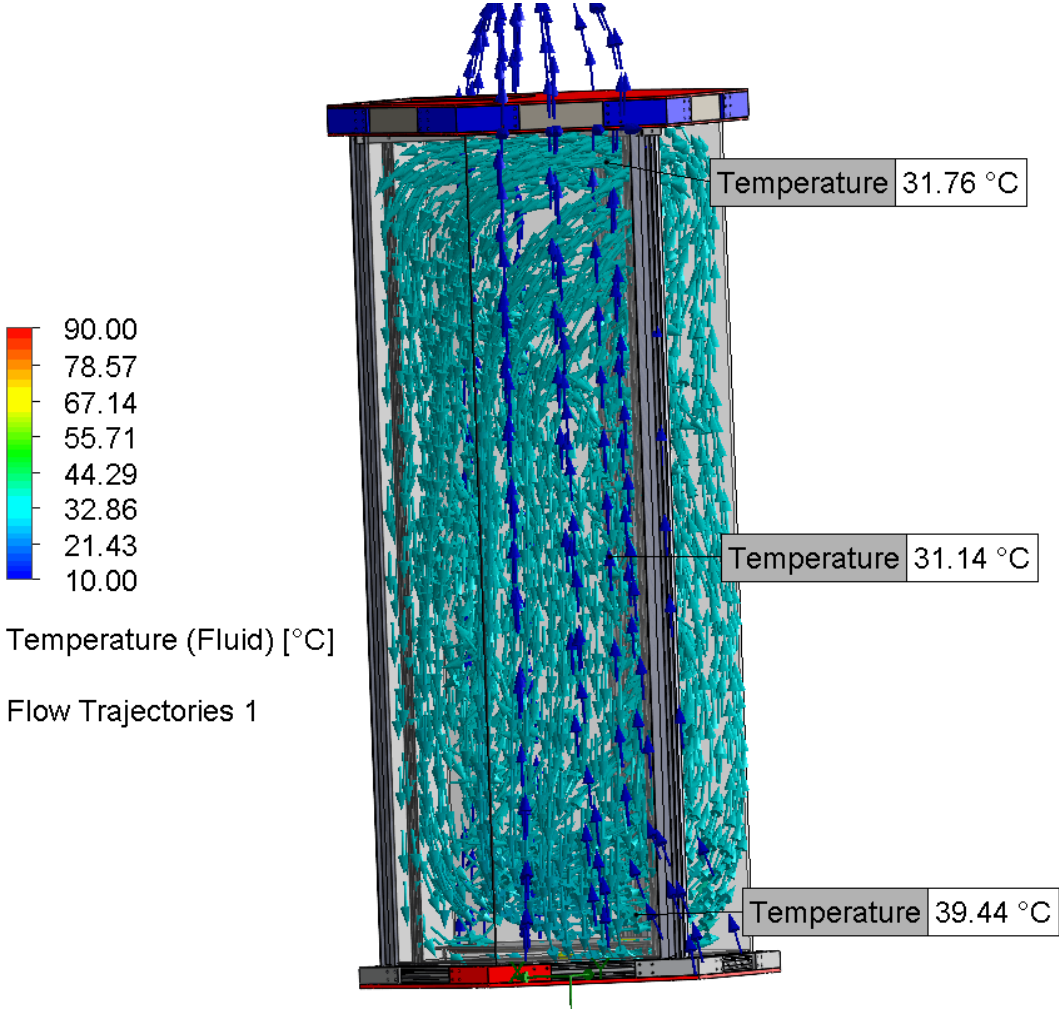
MÓDULO DE TEMPERATURA AMBIENTE

Estructura sin paredes



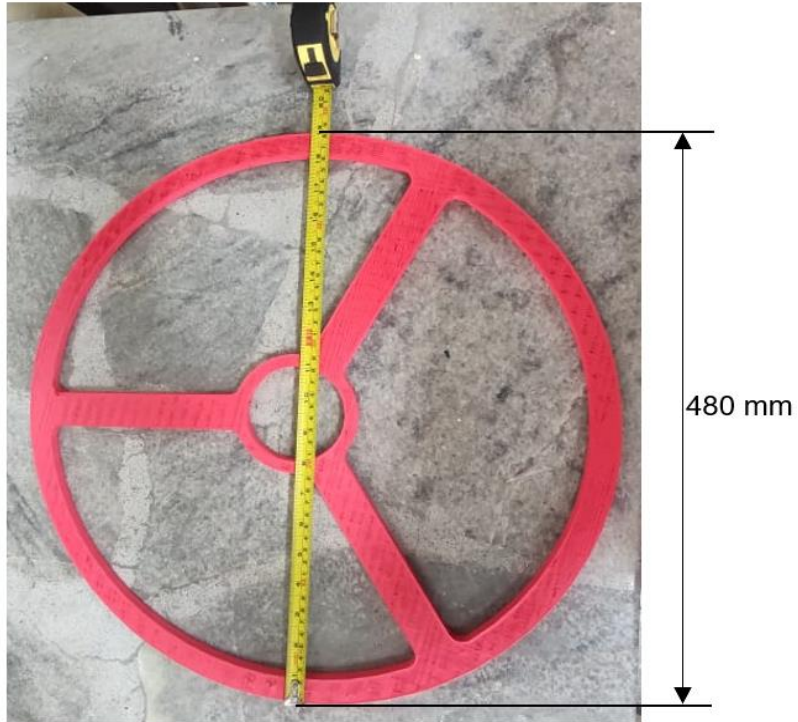
MÓDULO DE TEMPERATURA AMBIENTE

Estructura con paredes

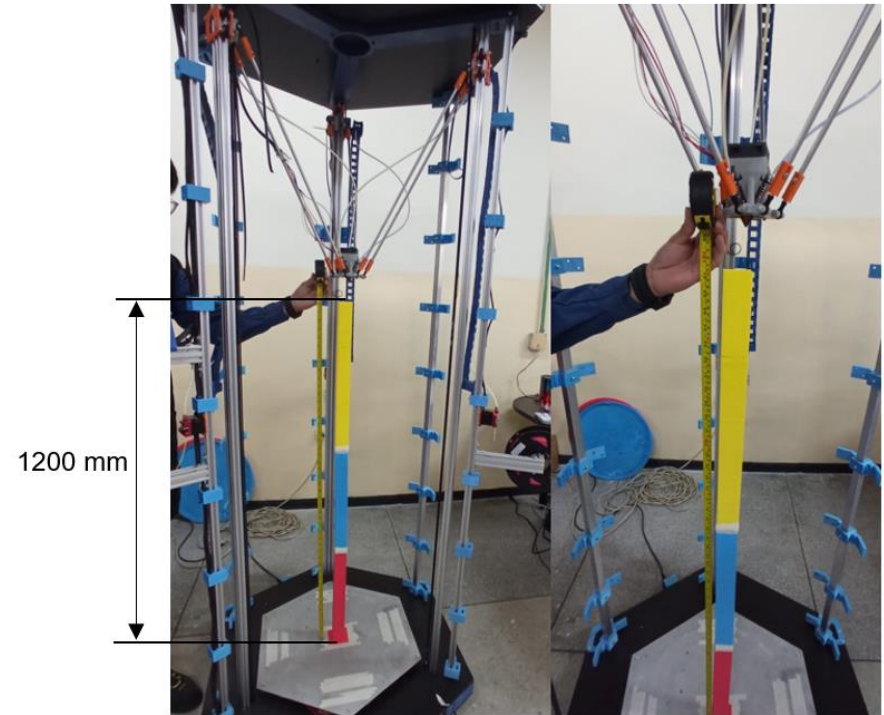


VALIDACIÓN VOLUMEN DE IMPRESIÓN

Diámetro



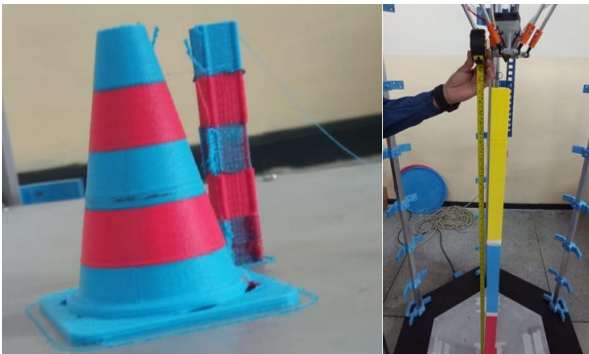
Altura



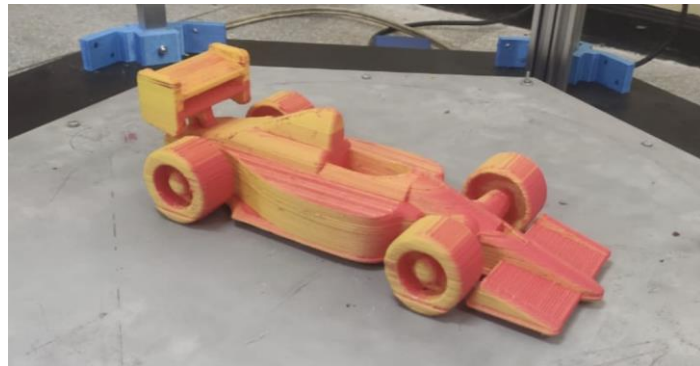
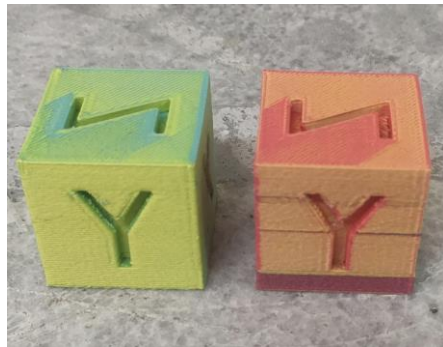
Diámetro de 480 [mm] y altura de 1200 [mm]

VALIDACIÓN DE IMPRESIÓN MULTICOLOR

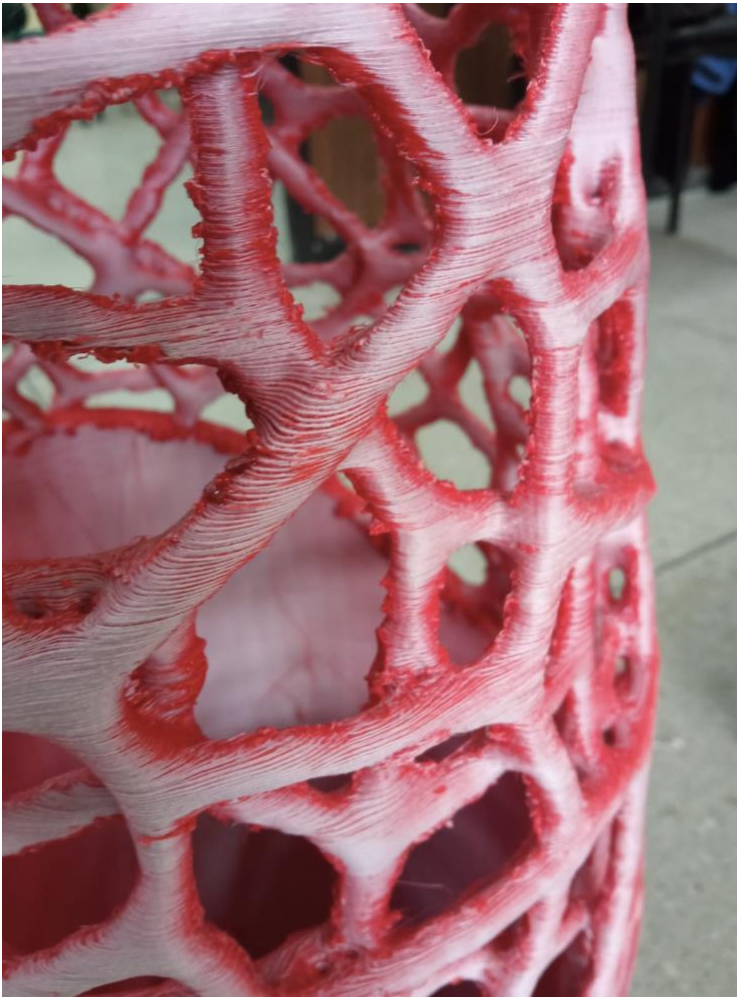
Multicolor por capas



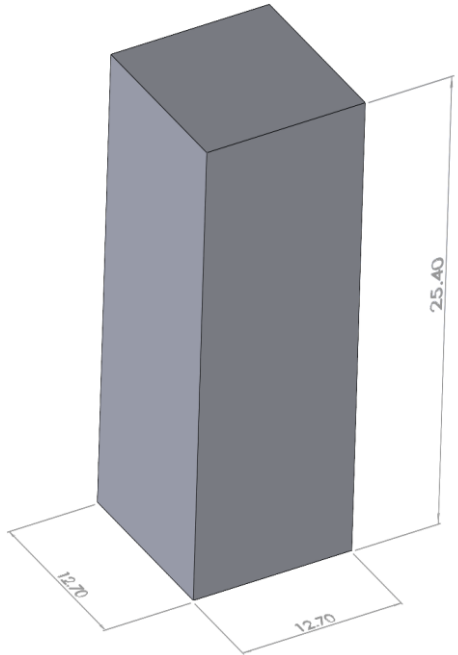
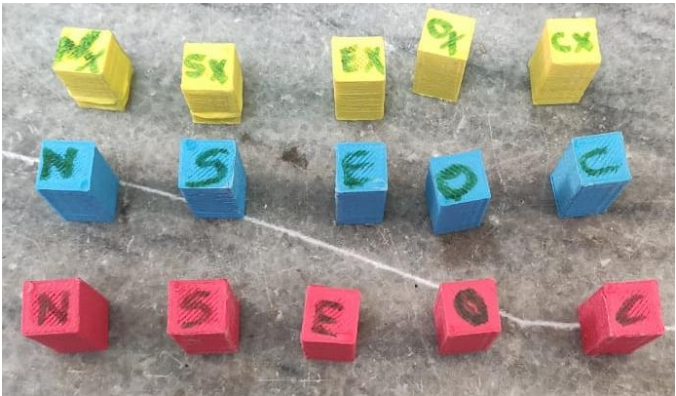
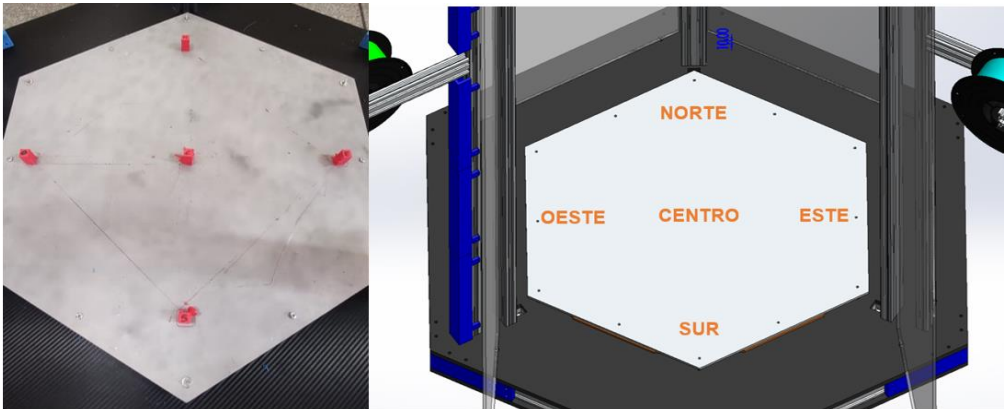
Mezcla de colores



ERRORES DE IMPRESIÓN

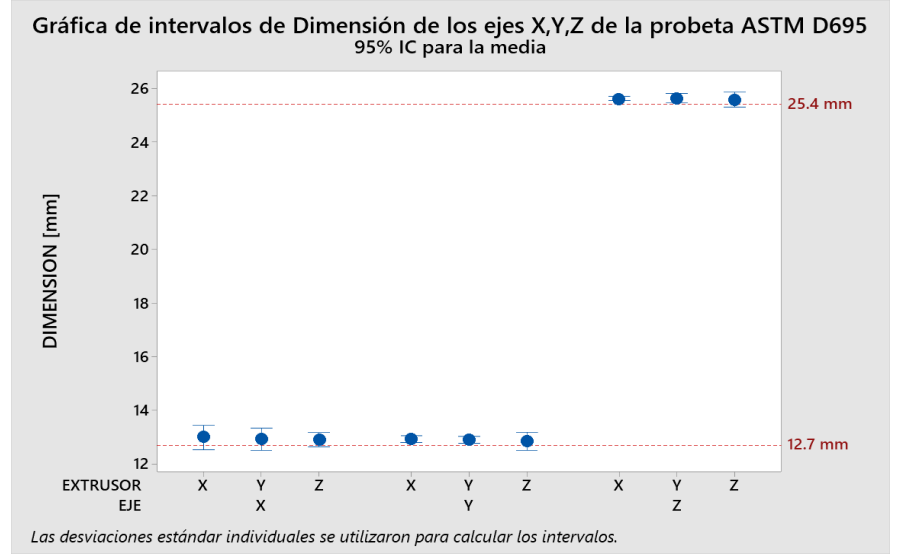
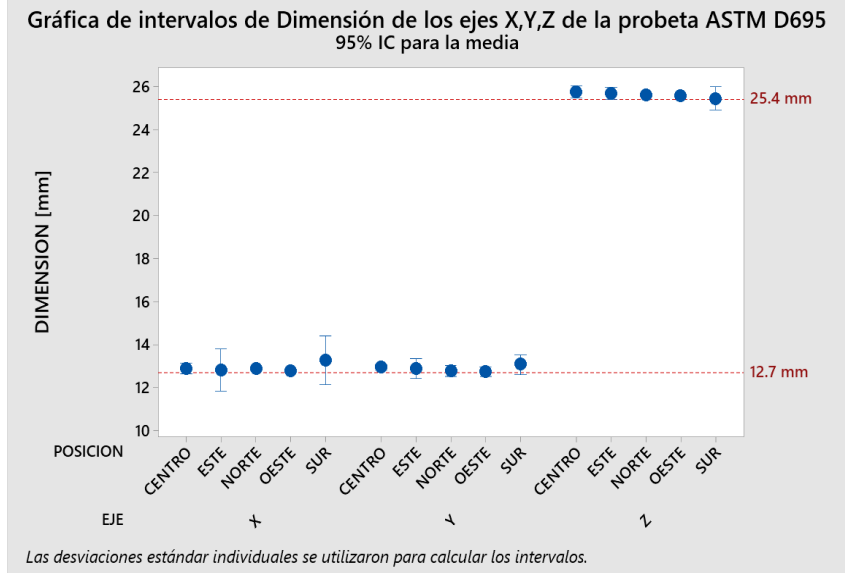


PROBETAS NORMA ASTM D695



ANÁLISIS DIMENSIONAL PROBETAS NORMA ASTM D695

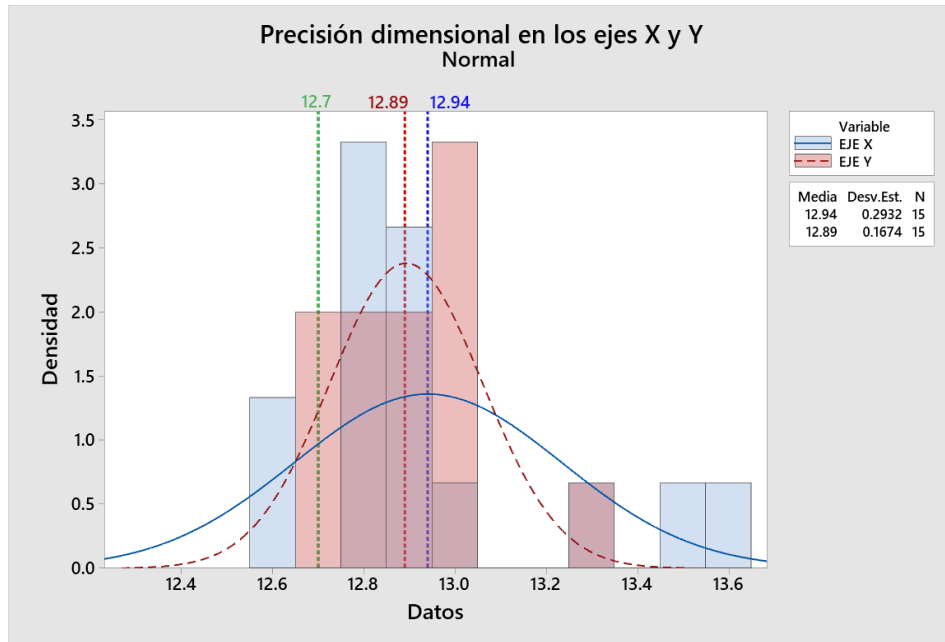
		Posición Cama Caliente														
		Norte			Sur			Este			Oeste			Centro		
Extrusor	Eje [mm]	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
Extrusor Z		12.88	12.7	25.6	12.8	13.3	25.2	13.28	12.68	25.8	12.8	12.7	25.6	12.8	12.9	25.66
Extrusor X		12.94	12.9	25.6	13.6	13	25.6	12.6	13	25.62	12.82	12.8	25.5	13	13	25.72
Extrusor Y		12.88	12.8	25.6	13.5	13	25.5	12.6	13	25.6	12.76	12.8	25.6	12.9	12.9	25.88
PROMEDIO		12.90	12.79	25.61	13.28	13.09	25.45	12.83	12.89	25.67	12.79	12.75	25.57	12.91	12.95	25.75



		Posición Cama Caliente														
		Norte			Sur			Este			Oeste			Centro		
Eje [mm]		X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
Error		1.57	0.68	0.84	4.57	3.04	0.18	1.00	1.52	1.08	0.73	0.42	0.66	1.63	1.94	1.39
Error X		1.90														
Error Y		1.52														
Error Z		0.83														
Error Prom		1.42														

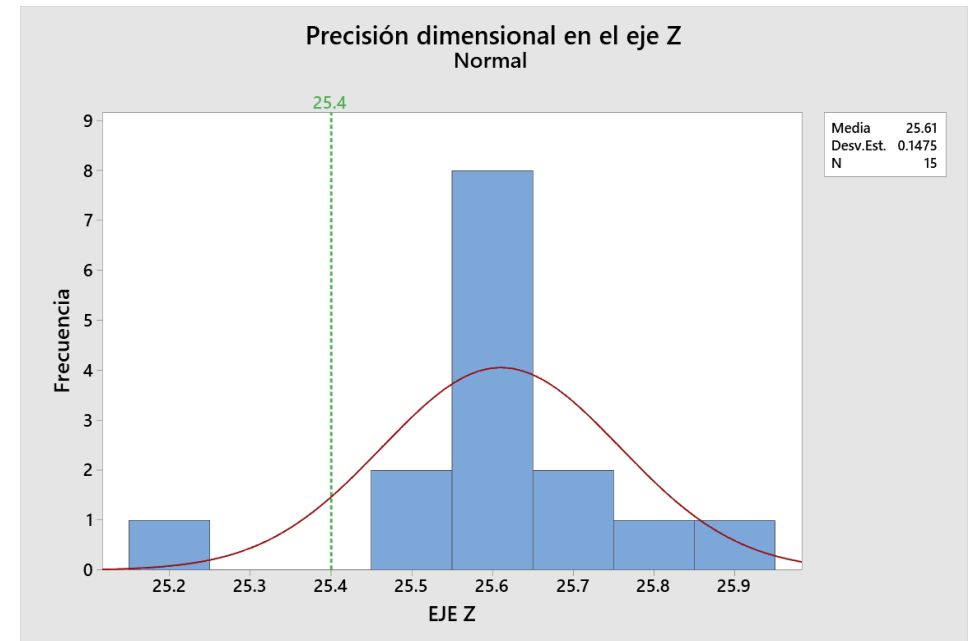
ANÁLISIS DIMENSIONAL PROBETAS NORMA ASTM D695

Histograma para cálculo de precisión en los ejes X y Y



Precisión en los ejes X y Y de 0.29 [mm]

Histograma para cálculo de precisión en el eje Z



Precisión en el eje Z de 0.15 [mm]

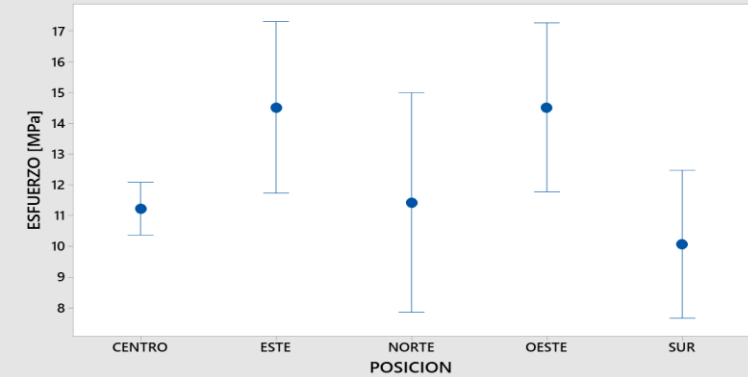


ANÁLISIS DE COMPRESIÓN PROBETAS NORMA ASTM D695



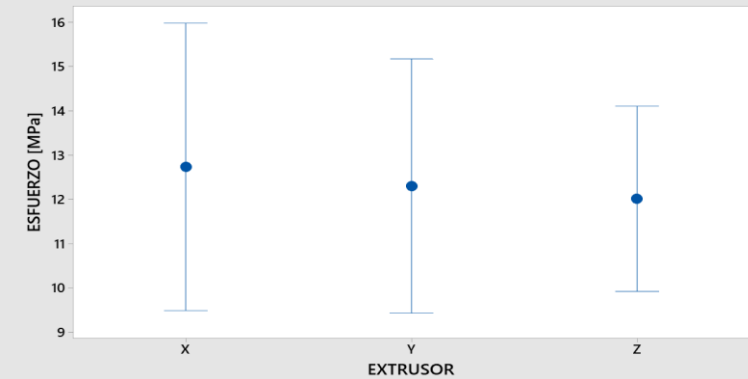
Extrusor	Posición Cama caliente	Esfuerzo [Mpa]				
		Norte	Sur	Este	Oeste	Centro
Extrusor Z		10.66	10.86	14.14	13.53	10.85
Extrusor X		13.08	8.99	15.77	14.29	11.53
Extrusor Y		10.52	10.36	13.63	15.71	11.28

Gráfica de intervalos de Resistencia a la Compresión de las probetas ASTM D695
95% IC para la media



Las desviaciones estándar individuales se utilizaron para calcular los intervalos.

Gráfica de intervalos de Resistencia a la Compresión de las probetas ASTM D695
95% IC para la media

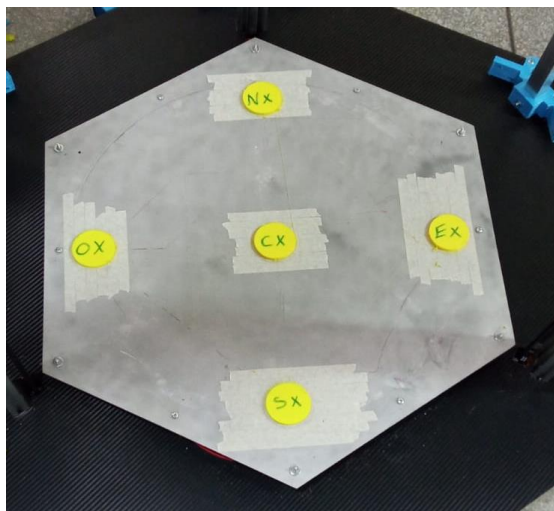


Las desviaciones estándar individuales se utilizaron para calcular los intervalos.



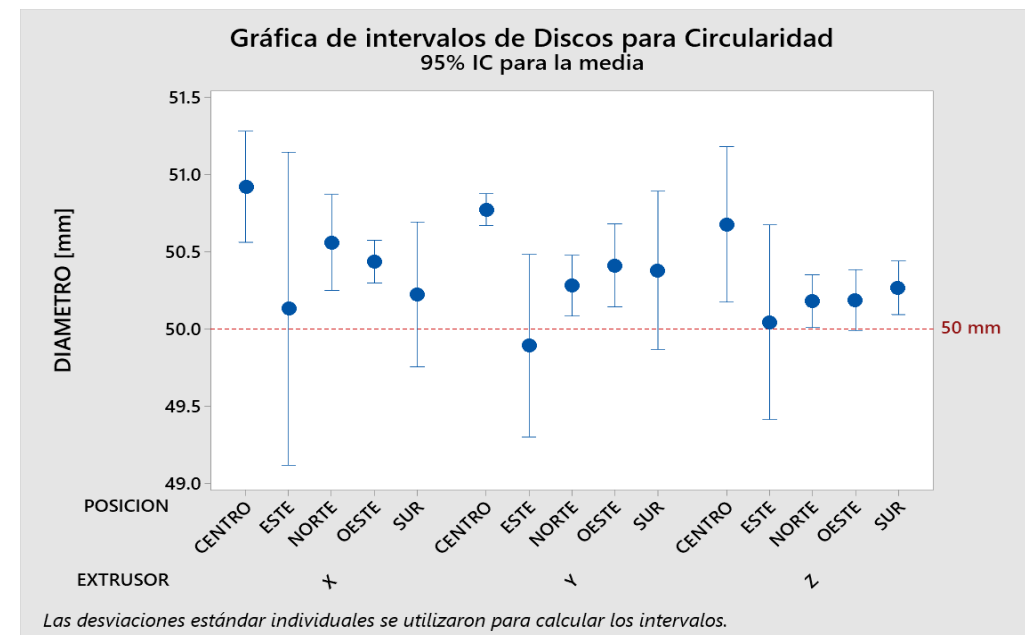
ANÁLISIS DE CIRCULARIDAD Y ALTURA

Circularidad



Posición Cama Caliente

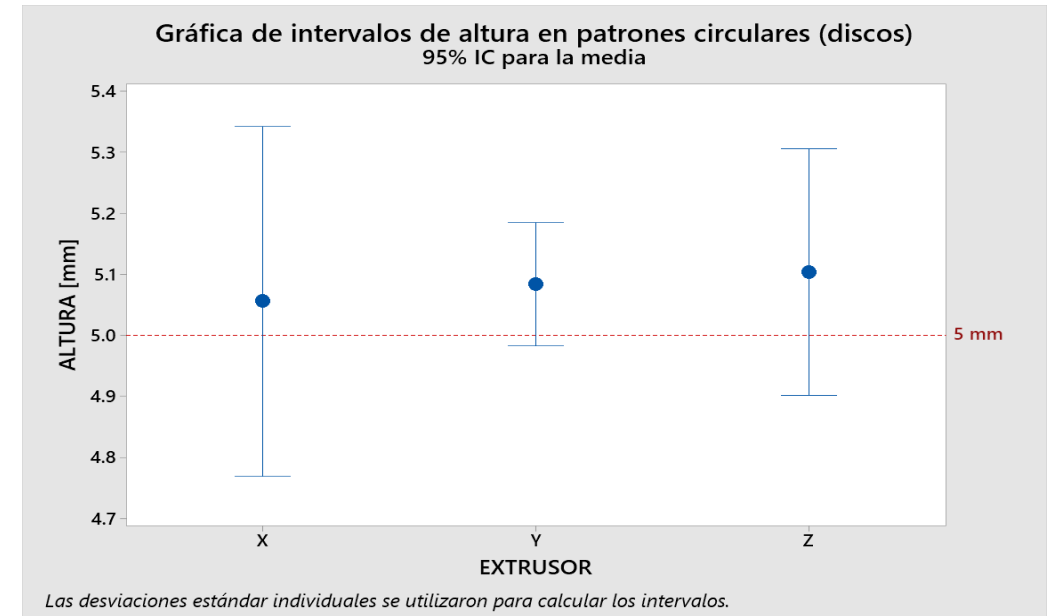
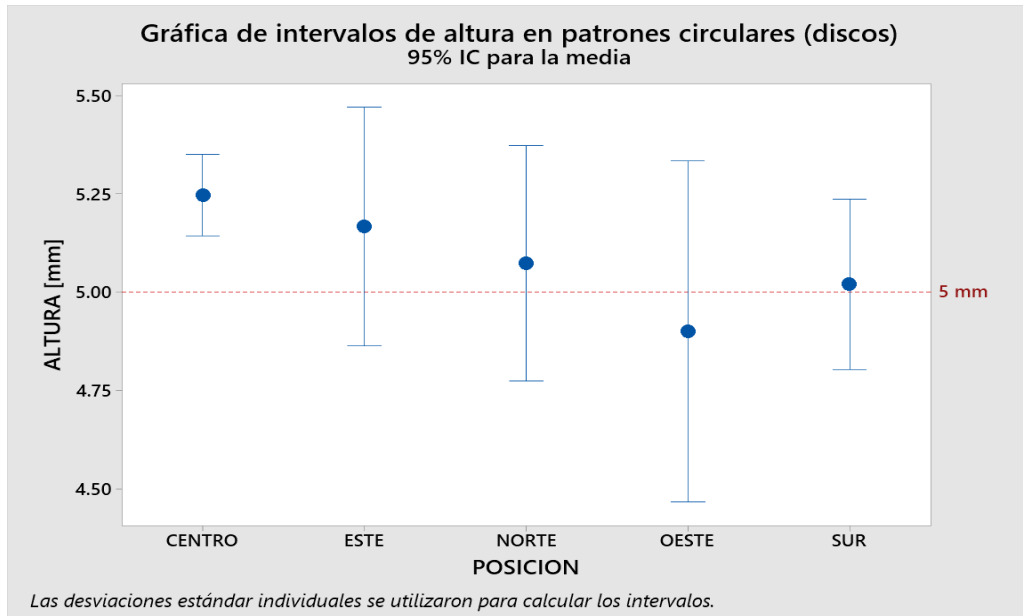
Extrusor	Medida [mm]	Posición Cama Caliente																								
		Norte					SUR					ESTE					OESTE					CENTRO				
		Dato1	Dato2	Dato3	Dato4	Dato5	Dato1	Dato2	Dato3	Dato4	Dato5	Dato1	Dato2	Dato3	Dato4	Dato5	Dato1	Dato2	Dato3	Dato4	Dato5	Dato1	Dato2	Dato3	Dato4	Dato5
Extrusor Z		50.24	50.38	50.02	50.16	50.1	50.4	50.38	50.06	50.2	50.3	49.62	50.06	50.74	50.3	49.5	50.44	50.16	50	50.16	50.18	51	50.98	50.9	50.1	50.4
Extrusor X		50.4	50.98	50.4	50.42	50.6	50.2	49.68	50.74	50.3	50.2	49.82	50.02	49.1	51.32	50.4	50.54	50.38	50.44	50.28	50.54	51.18	50.7	50.54	51	51.18
Extrusor Y		50.24	50.4	50.36	50.38	50.02	50.34	50.6	50.02	49.98	50.96	49.56	49.98	50.36	50.3	49.26	50.48	50.74	50.24	50.2	50.4	50.9	50.8	50.76	50.7	50.7



ANÁLISIS DE CIRCULARIDAD Y ALTURA

Altura en patrones circulares

Extrusor	Medida [mm]	Posición Cama Caliente				
		Norte	Sur	Este	Oeste	Centro
Extrusor Z		4.96	4.98	5.3	5.02	5.26
Extrusor X		5.2	4.96	5.14	4.7	5.28
Extrusor Y		5.06	5.12	5.06	4.98	5.2



Conclusiones

- El diseño y construcción de la impresora 3D se realizó en el Laboratorio de Procesos de Manufactura de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Sus dos características principales son: volumen de impresión y extrusión multicolor.
- La capacidad de impresión llega hasta los 0.22 m³ con unas dimensiones de 0.48 m de diámetro y 1.2 m de altura; en cuanto a la extrusión multicolor tiene la posibilidad de realizar piezas de un color a la vez (3 entradas), o realizar mezclas entre los 3 filamentos y obtener una gama de colores, lo que se traduce en ahorro de material, ya que no sería necesario tener un rollo de plástico por cada color.
- Por la complejidad y la cantidad de subsistemas presentes en la máquina, el diseño modular alcanzó un nivel 4, debido a que el comportamiento de una impresora de gran volumen no es igual al de una comercial, por lo que el módulo de la estructura y el de calentamiento necesitaban de un mayor detalle.
- Se implementó un sistema de columnas rigidizantes, al realizar el análisis de vibraciones obtuvimos un valor de frecuencia de 4.48 Hz, que es relativamente bajo considerando la altura de la estructura, ya que el comportamiento de una impresora de gran volumen no es el mismo con una impresora estándar, incluyendo el nuevo sistema rigidizante y paredes de vidrio se obtuvieron resultados de frecuencia de 25.24 Hz, con lo cual se entiende que la estructura es estable.



Conclusiones

- Para superficies grandes de impresión es necesario optar por el método de calentamiento con cama de silicona, ya que este provee alta potencia (1400 W), calentamiento uniforme y en menor tiempo comparado con los métodos convencionales (100 °C en aproximadamente 1 minuto).
- Para una impresora tipo delta la posición de sus torres de movimiento es primordial, por lo tanto, se diseñaron nervios que dan la precisión de montaje de las mismas; en un inicio estos iban a ser manufacturados en aluminio mediante una CNC, pero se los realizó de MDF ya que cumple la misma funcionalidad al ser elaborados en corte láser.
- Por el gran volumen de impresión y el método de empuje de material seleccionado, en el sistema de extrusión es necesario motores con alto torque y corriente nominal superior a 1 A, para obtener un flujo continuo de material y evitar sobrecalentamiento en los mismos.
- A partir de las pruebas realizadas y análisis de los datos se conoce que:
 - Dentro de las pruebas de funcionamiento se identificó que la impresora presenta una precisión de 0.29 mm, errores de exactitud dimensional en el eje X de 1.90 %, en el eje Y de 1.52 % y en el eje Z de 0.83 %, lo que no son valores significativos en la cinemática de la máquina.
 - Las impresiones con patrones circulares presentan una variación de ± 1.3 mm tanto en los ejes X como en Y, y ± 0.5 mm en el eje Z, que no afecta en la cinemática de la máquina teniendo en cuenta las dimensiones de impresión.



Conclusiones

- Para impresiones de gran altura se debe verificar que el diseño de la pieza no sea esbelta ya que las vibraciones producidas al depositar el material en alturas considerables afecta la adhesión de capas y por ende la calidad de la pieza.
- La calibración de la máquina es importante tanto en nivelación, exactitud de movimiento de motores y cantidad de material extruido, ya que de estos parámetros depende la calidad de las piezas obtenidas.



Recomendaciones

- La máquina es capaz de imprimir una altura de 1.28 m, pero por razones de seguridad se recomienda imprimir hasta 1.2 m de altura; además el Diamond hotend en todo momento debe tener alimentación en sus tres entradas para evitar atascos.
- Se recomienda verificar la nivelación de la máquina con el piso, para evitar la inestabilidad de la estructura y por ende vibraciones que afecten el correcto funcionamiento de la misma.
- En impresoras de gran volumen se recomienda conocer la frecuencia en la que trabaja la estructura, ya que esta se considera estable a partir de los 20 [Hz].
- Para maximizar la calidad de las impresiones, se recomienda verificar la nivelación de la cama y la tensión de las correas periódicamente; no elevar la velocidad de desplazamiento del cabezal ya que puede producir pérdida de pasos en los motores.
- Para máquinas de gran volumen se recomienda utilizar boquillas mayores a 0.4 mm para disminuir los tiempos de impresión.



Recomendaciones

- Se recomienda utilizar una computadora con buenas características (mínimo i5, 8 gb en ram), porque el laminado de piezas de gran volumen consume mucha memoria del equipo.
- Para maximizar la calidad de las piezas se recomienda seguir las indicaciones de la siguiente tabla.

Impresiones en general		Impresiones con patrones circulares	
Posiciones	Extrusores	Extrusor	Posiciones
-Centro	-Y	-X	-Oeste
-Norte	-Z		-Sur
-Oeste		-Y	-Norte
		-Z	-Oeste
			-Sur



Trabajos futuros

1. Implementación del sistema de monitoreo a distancia Octoprint, ya que este permite acceso a cámaras web, control del sistema y la parada automática de la máquina mediante la identificación de errores de impresión por visión artificial.
2. Adecuar un sistema para poder trabajar en la impresora 3D con el Palette, el cual es un sistema que permite realizar trabajos con muchos colores a la vez usando un solo extrusor.
3. Adaptar un sistema de auto leveling para el nivelado de la cama, ya que el controlador permite guardar un mapeo de la misma, con lo cual se obtendrá mejores resultados.
4. Implementar un sistema de recuperación de información con una UPS, para no tener ningún inconveniente en las impresiones por si se llega a tener una falla en el sistema de luz eléctrica.
5. Elaboración de las partes de los carros movibles de la impresora en placas de metal, ya sea aluminio o acero, para reemplazar las existentes y así alargar su vida útil.



Agradecimientos



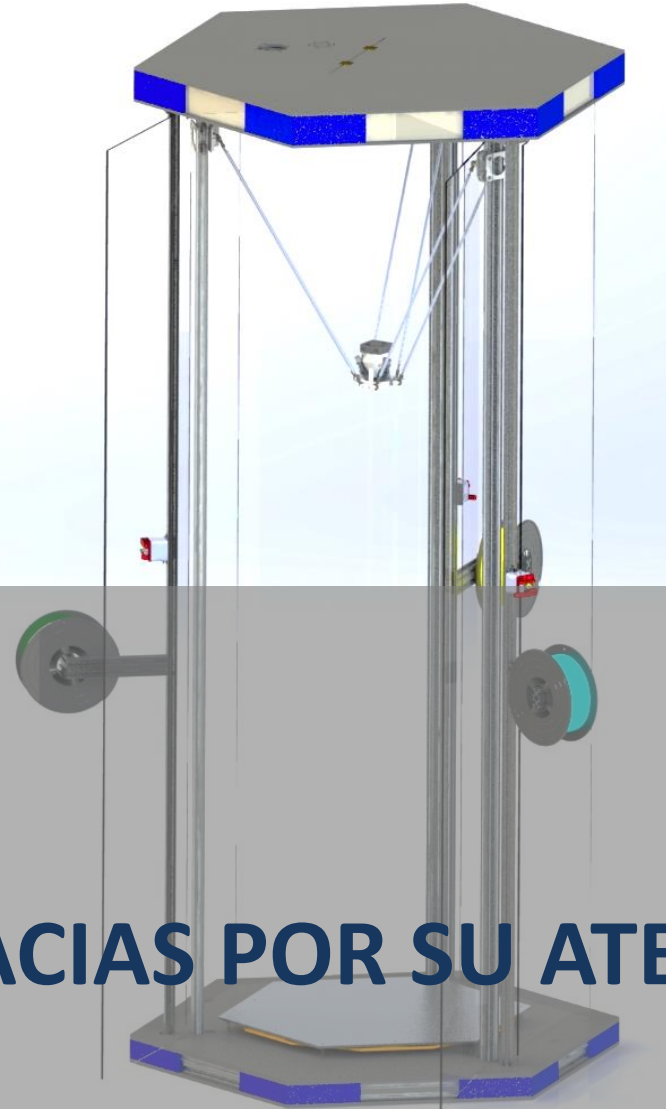
**Departamento de Ciencias de
la Energía y Mecánica**



ESPE
ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO
CAMINO A LA EXCELENCIA

FUNCIONAMIENTO





GRACIAS POR SU ATENCIÓN



ESPE
ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO
CAMINO A LA EXCELENCIA