



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica
Carrera de Mecatrónica
Trabajo de Integración Curricular, previo a la obtención del
título de ingeniero en Mecatrónica

Tema: Diseño e implementación de un sistema de manufactura aditiva, indexado al CIM como estación de impresión en 3D

Autores: Cortez Gavilanez, Stalin Olay
Uñog Ninasunta, Iván Andrés

Director: Ing. Acuña Coello, Fausto Vinicio

Latacunga, Agosto 2023





Diseñar e implementar un sistema de manufactura aditiva, indexado al CIM como estación de impresión en 3D.



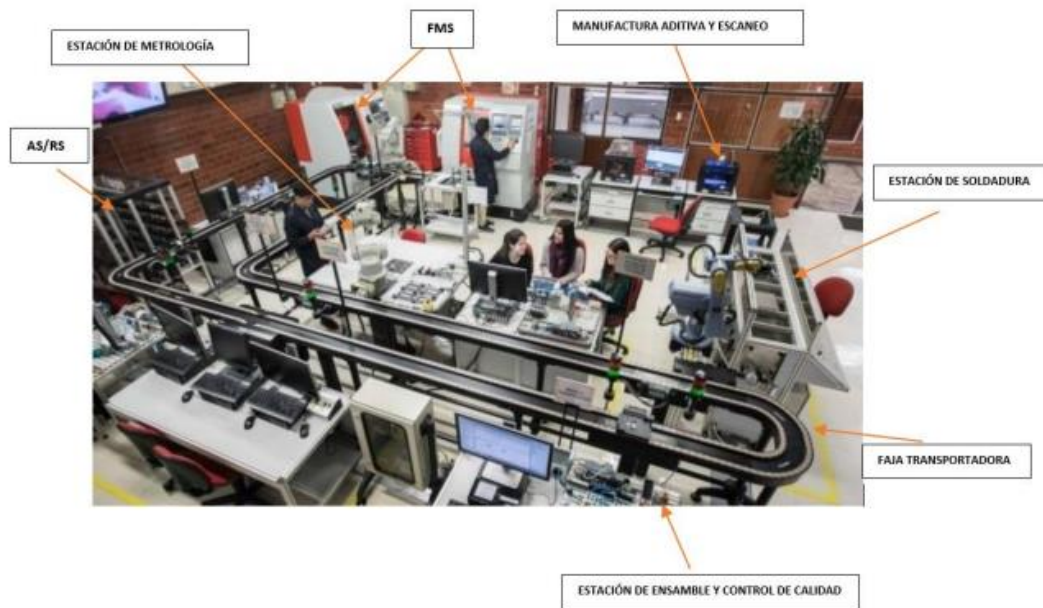
OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar información preliminar y la línea base del proyecto.
- Analizar las alternativas de solución y determinar los parámetros de diseño.
- Diseñar el sistema mecatrónico de la estación de impresión 3D y seleccionar los componentes.
- Construir e implementar la estación de impresión 3D.
- Operar la estación y elaborar guías de prácticas.



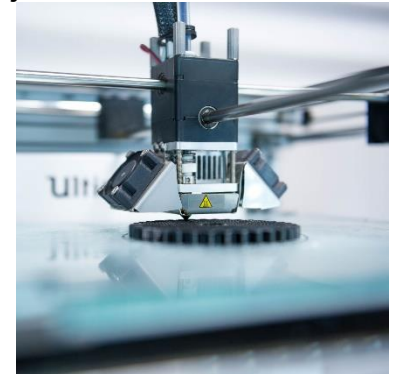
Manufactura integrada por computador CIM

Consiste en un sistema productivo automatizado en el cual las estaciones funcionan bajo el control de una computadora en un sistema integrado de manufactura.



Manufactura Aditiva

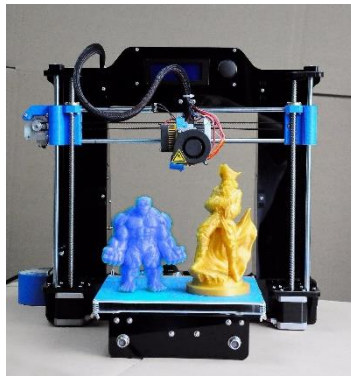
Consiste en la unión de materiales con la finalidad de crear objetos en tres dimensiones mediante la deposición de capas una encima de otra previo a un diseño realizado en software CAD (dibujo asistido por computador). Este proceso es ideal para producir eficientemente productos de bajo volumen, personalizados y complejos.



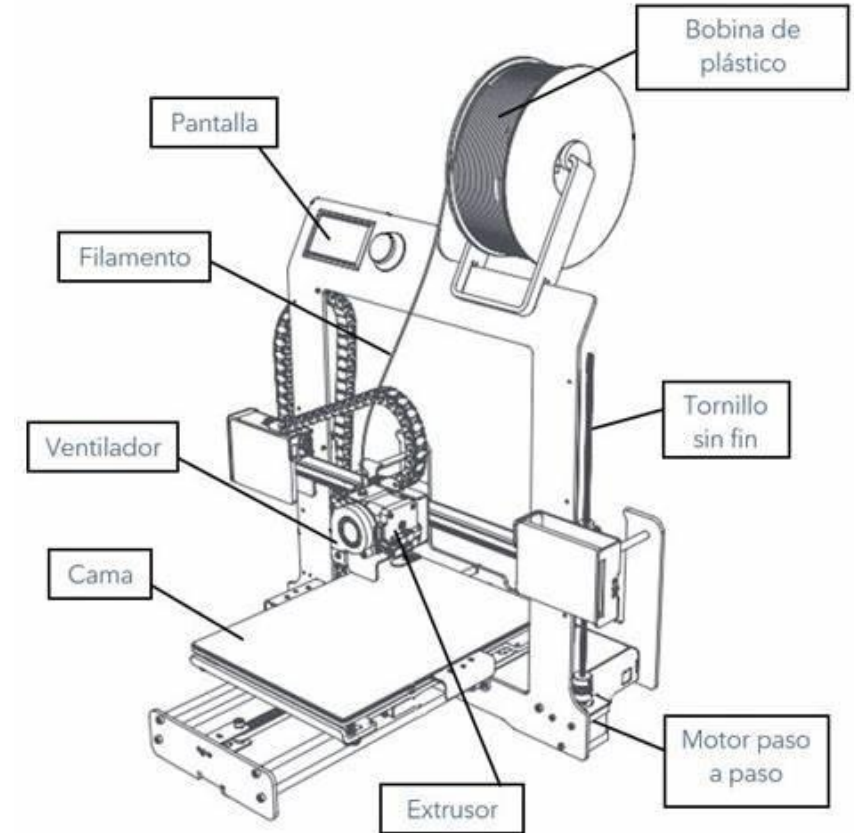
Impresora 3D

Es una máquina capaz de crear piezas, figuras y objetos con volumen (alto, ancho y largo) partiendo previamente de un diseño realizado por ordenador con un programa CAD.

Determinadas impresoras usan filamentos de PLA, ABS, TPU, etc , estas funden el plástico construyendo con él capas muy finas sobrepuestas para crear el objeto.



Partes Principales de una impresora 3D



Alternativa de solución para el desarrollo del CIM

- **Alternativa 1:** CIM de tipo I (Integración funcional en el subsistema de operaciones), puesto que integran las diferentes operaciones y/o estaciones de manufactura, además una de las propuestas de este sistema recae en el nivel de proceso para la sincronización de las estaciones de manera independiente, una distribución de las estaciones de manera lineal, esta distribución tiene la ventaja que ocupa un espacio reducido y facilita la movilidad del manipulador lo que le hace relativamente económica para su implementación.
- **Alternativa 2:** CIM de tipo I, en este caso con una distribución de las estaciones en tipo U, para la interconexión de cada estación se utiliza una banda transportadora y cada estación con su respectivo manipulador dan como resultado un costo más elevado en su implementación, debido a la contaminación cruzada de desperdicios de estaciones que trabajan a altas temperaturas afectarían a la estación de manufactura aditiva.



Selección de alternativas para el sistema CIM

Selección del CIM

Factores	Alternativas del CIM	
	Alternativa 1	Alternativa 2
Tipo de CIM (Integración de estaciones)	5	5
Distribución de estaciones	4	2
Costo de implementación	5	3
Espacio de Montaje	4	3
Total	18	13



Alternativa de solución para la estación de Manufactura Aditiva

- **Alternativa 1:** La primera alternativa de solución sería una impresora 3D de tipo cartesiano, puesto que esta configuración ya ha sido comprobada que funciona correctamente con un manipulador, aprovechando las características de estas impresoras que son su facilidad de utilización por su mecánica sencilla y su facilidad de calibrar y corregir errores.
- **Alternativa 2:** Una segunda alternativa sería una impresora de tipo polar, este tipo de impresora mecánicamente funciona cuando la cama de impresión gira mientras que el cabezal de impresión puede moverse hacia arriba, abajo, izquierda y derecha. Para aprovechar las capacidades del manipulador al retirar las piezas elaboradas, el principal problema de las máquinas polares es la precisión. Al girar de forma circular, hay más precisión en el centro que en la zona externa.



Selección de alternativas para la impresora 3D

Selección de la estación de impresión 3D

Factores	Alternativas de la estación de impresión 3D	
	Alternativa 1	Alternativa 2
Facilidad de utilización	5	5
Mecánica sencilla	5	4
Estabilidad y Calibración	4	3
Aplicaciones Automatizadas	4	1
Total	16	13



Parámetros de Diseño

- Debido a las características que posee el CIM, el cual contará con un manipulador se pretende implementar una estructura abierta, con soportes de perfiles de aluminio para una mayor rigidez.
- El volumen de trabajo de la estación de acuerdo con las necesidades para retirar los productos impresos será de aproximadamente 190 mm *170 mm *140 mm, con la finalidad de evitar colisiones con el gripper.
- Dentro de los parámetros primordiales en la implementación del sistema será utilizar componentes tanto software y firmware que sean Open Source, y componentes comerciales para aprovechar las características como su fácil adquisición, montaje y precios accesibles.



DISEÑO Y SELECCIÓN DE COMPONENTES

Selección de componentes.

Estructura de la impresora 3D



Impresora 3D tipo cartesiana
con elevación del extrusor

Mecanismo de transmisión del eje Z



Tornillo de avance – husillo



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Mecanismo de transmisión del eje X – Y



Piñón-Correa dentada

Actuadores



Motores a pasos

Sistema de extrusión



Extrusor directo

Base de impresión (Cama)



Cama caliente con superficie magnética

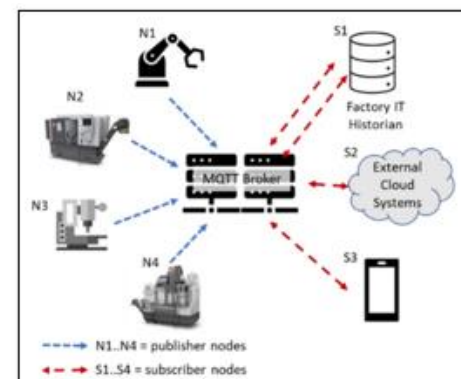


Tarjeta de control



Tarjeta Arduino Mega y Tarjeta Ramps 1.4

Tipo de comunicación



Protocolo MQTT

DISEÑO Y SELECCIÓN DE COMPONENTES

Diseño de ejes

Eje Y

- Masa de la base de la cama: 810 gramos (Dato obtenido del software SolidWorks).
- Masa de la Cama caliente: 700 gramos.
- Masa de Dos rodamientos lineales: 50 gramos.
- Masa del Fleje magnético= 620 gramos.
- Masa de los pernos, tuercas y arandelas= 50 gramos.
- Masa máxima de pieza impresa=1000 gramos.



El material a diseñar es acero inoxidable AISI 304 estos valores fueron tomados del catálogo de (SUMITEC, s.f.)

- Resistencia a la fluencia $S_y = 170 \text{ MPa}$
- Módulo de elasticidad $E = 190 \text{ GPa}$
- Longitud total del eje $L = 320 \text{ mm}$
- $\text{masa Total} = 810 \text{ g} + 700 \text{ g} + 50 \text{ gr} + 620 \text{ g} + 50 \text{ g} + 1000 \text{ g}$
- $\text{masa Total} = 3.23 \text{ Kg}$



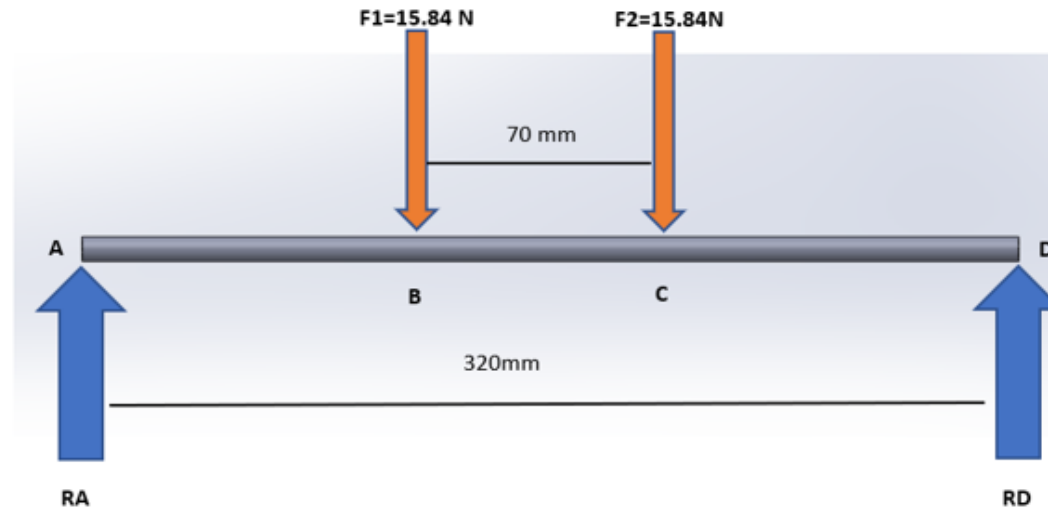
*Peso total = masa * gravedad*

$$Peso\ total = (3.23\ kg) * \left(9.81\ \frac{m}{s^2}\right) = 31.69\ N$$

Fuerza puntual en cada apoyo = fuerza total/2

$$Fuerza\ puntual\ en\ cada\ apoyo = \frac{31.69\ N}{2} = 15.84\ N$$

Diagrama de Fuerzas



Empezamos calculando el esfuerzo de diseño para poder determinar el diámetro más adelante, tenemos la siguiente formula sacada del libro de (Mott, 2009) utilizando un factor de seguridad de 2, ya que esta máquina no afectará la integridad de vidas humanas:

$$\sigma_d = \frac{S_y}{2}$$
$$\sigma_d = \frac{170 \text{ MPa}}{2} = 85 \text{ MPa}$$



Cálculo del momento máximo

$$\sum MA = 0$$

$$-F1 * (125mm) - F2 * (195mm) + RD * (320mm) = 0$$

$$RD = \frac{15.84N * (125mm) + 15.84N * (195mm)}{320mm}$$

$$RD = 15.84 N$$

$$\sum Fy = 0$$

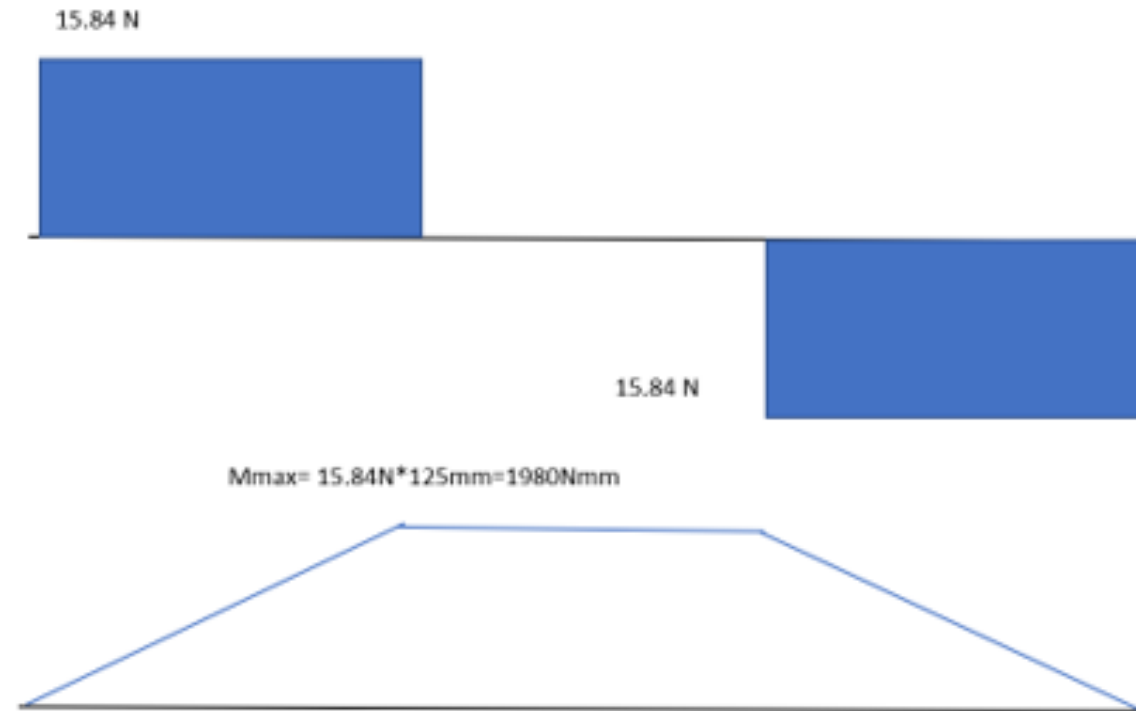
$$RA - F1 - F2 + RD = 0$$

$$RA = 15.84N + 15.84N - 15.84N$$

$$RA = 15.84N$$



Momento máximo.



El momento máximo tiene un valor de $M_{max} = 1980Nmm$



El esfuerzo máximo en un eje circular es:

$$\sigma = \frac{32M}{\pi * d^3}$$

$$d = \sqrt[3]{\frac{32M}{\pi * \sigma}}$$

$$d = \sqrt[3]{\frac{32(1980Nmm)}{\pi(85 N/mm^2)}}$$

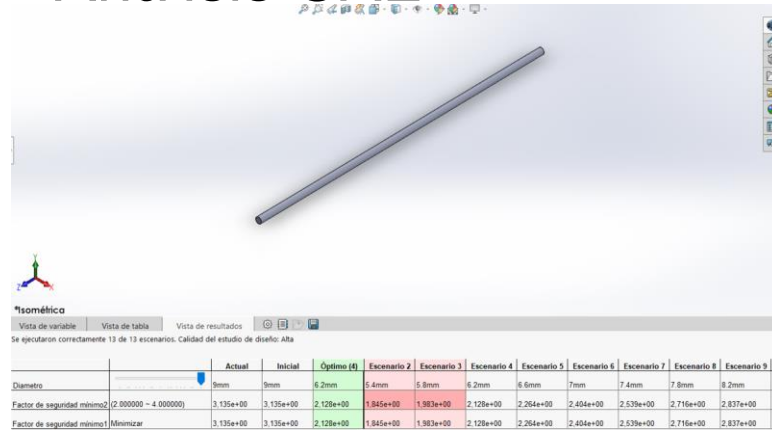
$$d = 6.2 \text{ mm}$$

Teniendo en cuenta un eje comercial y algún peso adicional se decide redondear el eje:

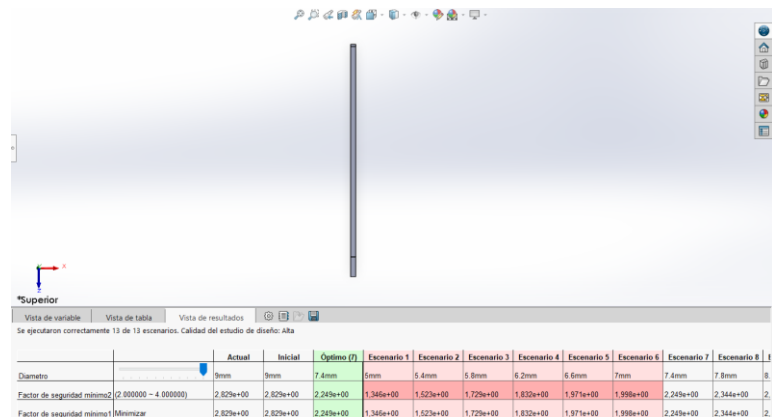
$$d = 8 \text{ mm } (5/16 \text{ pulgadas})$$



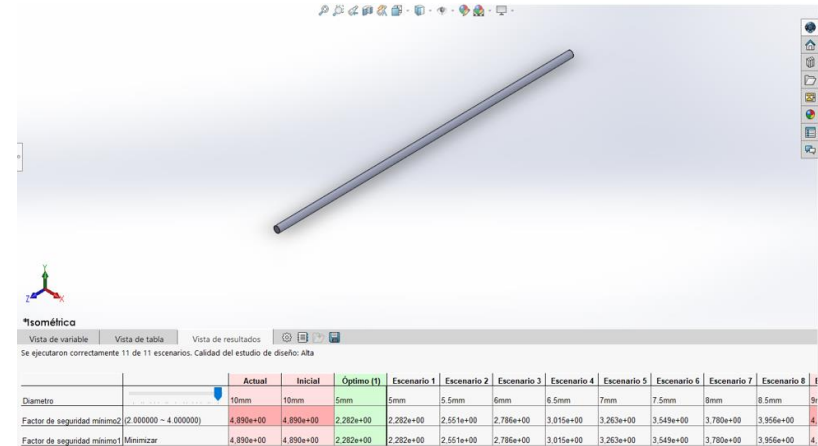
- Análisis CAE



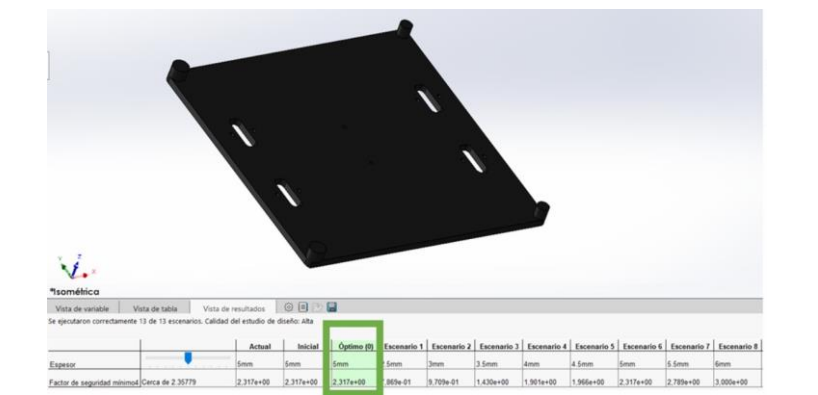
Optimización de diámetro de varilla lisa del eje Y



Optimización de diámetro de varilla lisa del eje Z



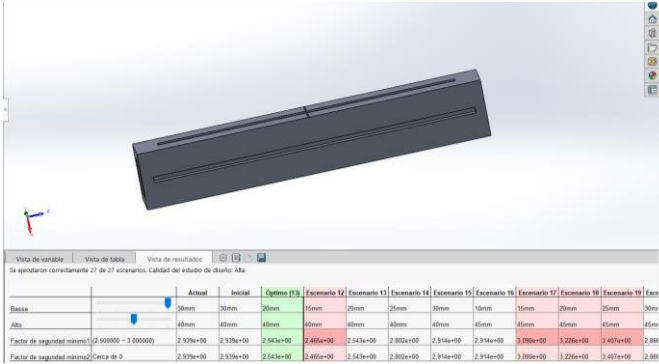
Optimización de diámetro de varilla lisa del eje X



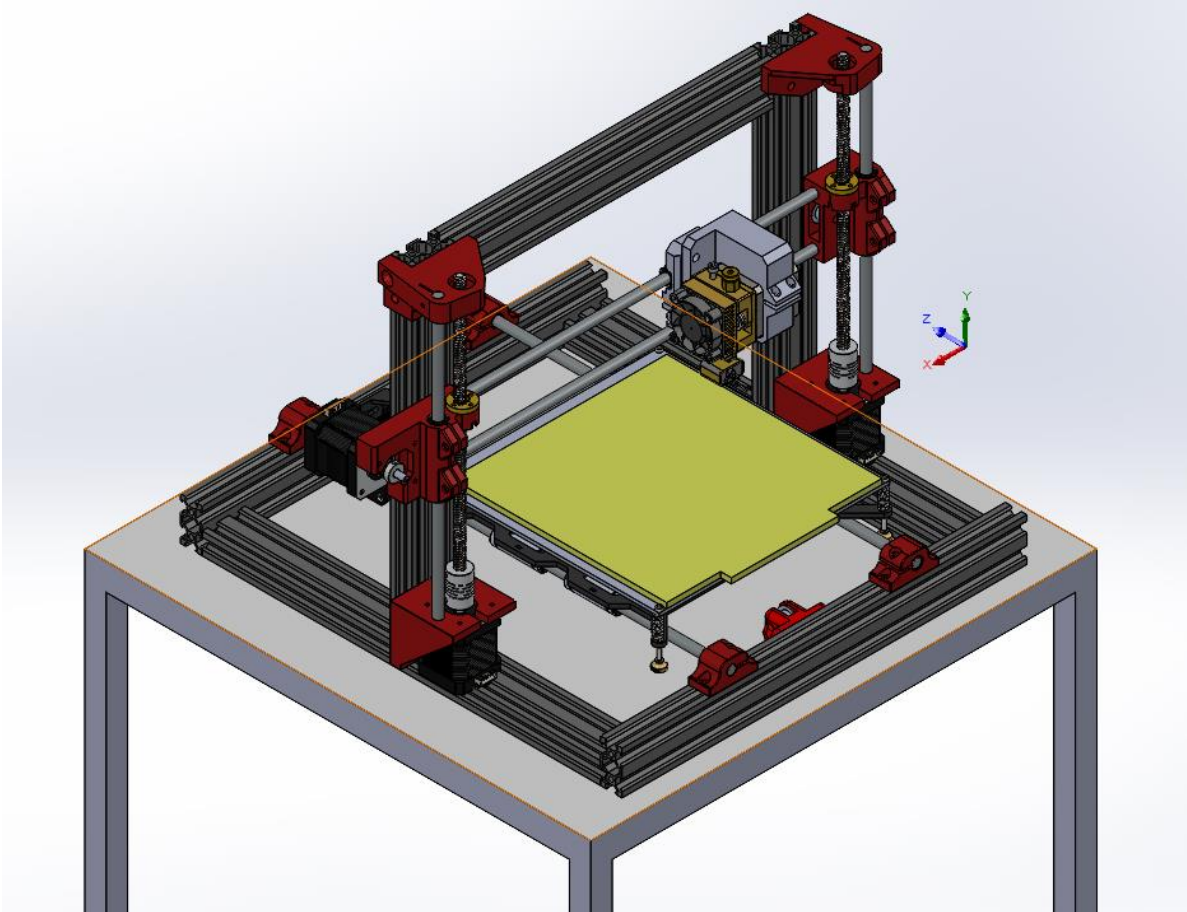
Optimización geométrica de la base de la cama caliente



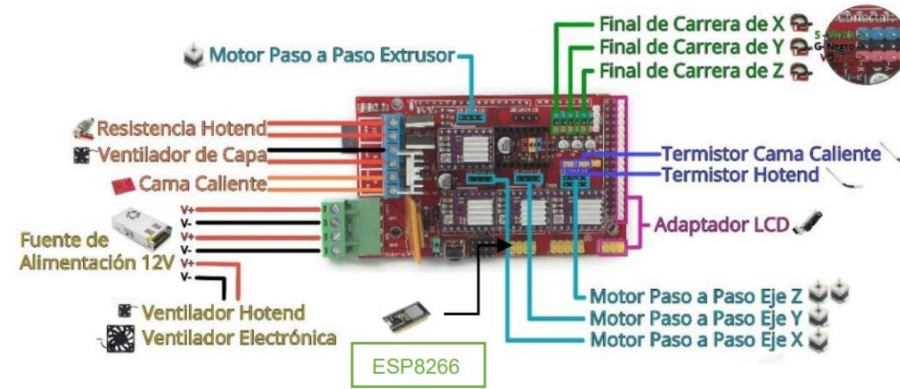
Diseño CAD



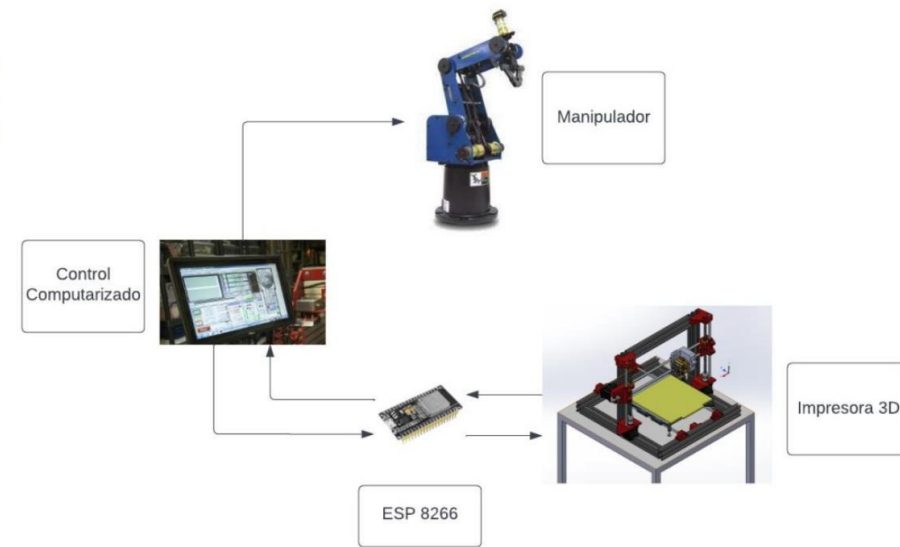
Optimización geométrica de la viga del Marco



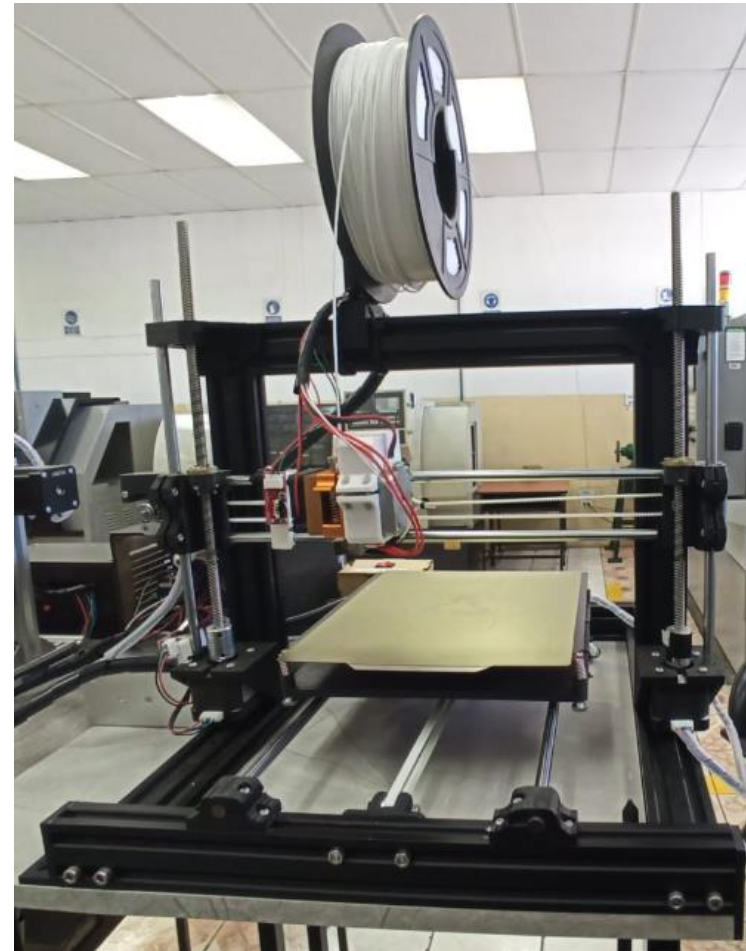
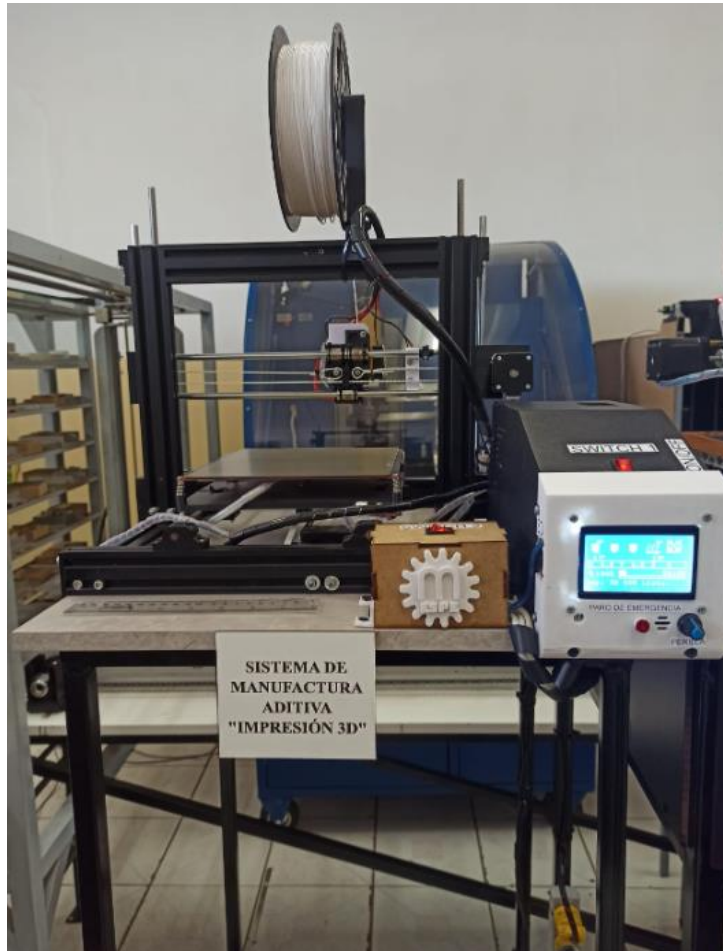
- Conexión de la electrónica



- Esquema de la comunicación



Ensamble de la estación

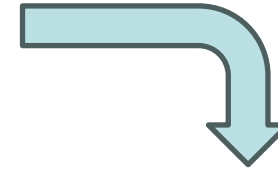


Implementación de la Comunicación

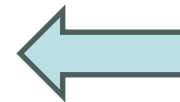
```
int namePrint=0;
int numPrint=0;
int numFinish;
static char *strchr_name;
```



```
if(namePrint == 1)
{
    strchr_name = "uno~1.gco";
}
if(namePrint == 2)
{
    strchr_name = "dos~1.gco";
}
if(namePrint == 3)
{
    strchr_name = "tres~1.gco";
}
```



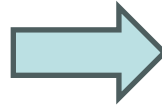
```
if(serial_char == ';') comment_mode = true;
if(!comment_mode) cmdbuffer[bufindw][serial_count++] = serial_char;//132
```



```
while( MYSERIAL.available() > 0 && buflen < BUFSIZE) {
    serial_char = MYSERIAL.read();
    if(serial_char == '\n' ||
       serial_char == '\r' ||
       (serial_char == ':' && comment_mode == false) ||
       serial_count >= (MAX_CMD_SIZE - 1) )
    {
```



```
namePrint = Decena;
numPrint  = Unidad;
print_object();
```



```
SERIAL_PROTOCOLPGM("Finish"); ////////////
SERIAL_PROTOCOLPGM("_____");
SERIAL_PROTOCOLLN("");
numFinish++;

if(numFinish<numPrint)
{
    print_object();
}
if(numFinish==numPrint)
{
    SERIAL_PROTOCOLPGM("Num "); ////////////
    SERIAL_PROTOCOL(numFinish);
    SERIAL_PROTOCOLPGM(" Finish");
    SERIAL_PROTOCOLPGM("!!!!!!!!!!!!___");
    SERIAL_PROTOCOLLN("");

    SERIAL_PROTOCOLPGM("222");
    SERIAL_PROTOCOLLN("");

    numFinish=0;
}
}
```



Comunicación MQTT

ESP8266_MQTT_Impresora

```
//https://dl.espressif.com/dl/package_esp32_index.json, http://arduino.esp8266.com/stable/package_esp8266com_index.i
//#include <WiFi.h>
#include <ESP8266WiFi.h>
#include <PubSubClient.h> //https://www.arduino-libraries.info/libraries/pub-sub-client
#include <Wire.h>

WiFiClient espClient;
PubSubClient client (espClient);
long lastMsg = 0;
char msg[50];
int value = 0;
long now;

float ecg = 0; //Señal para publicar al broker

//***** SSID-Password de servidor a Internet*****//
const char* ssid = "CIM_Manufactura";
const char* password = "CIM123456.";
//const char* ssid = "realme8";
//const char* password = "12345678";

//***** Direccion del MQTT Broker IP address*****//
const char* mqtt_server = "192.168.1.9";
```

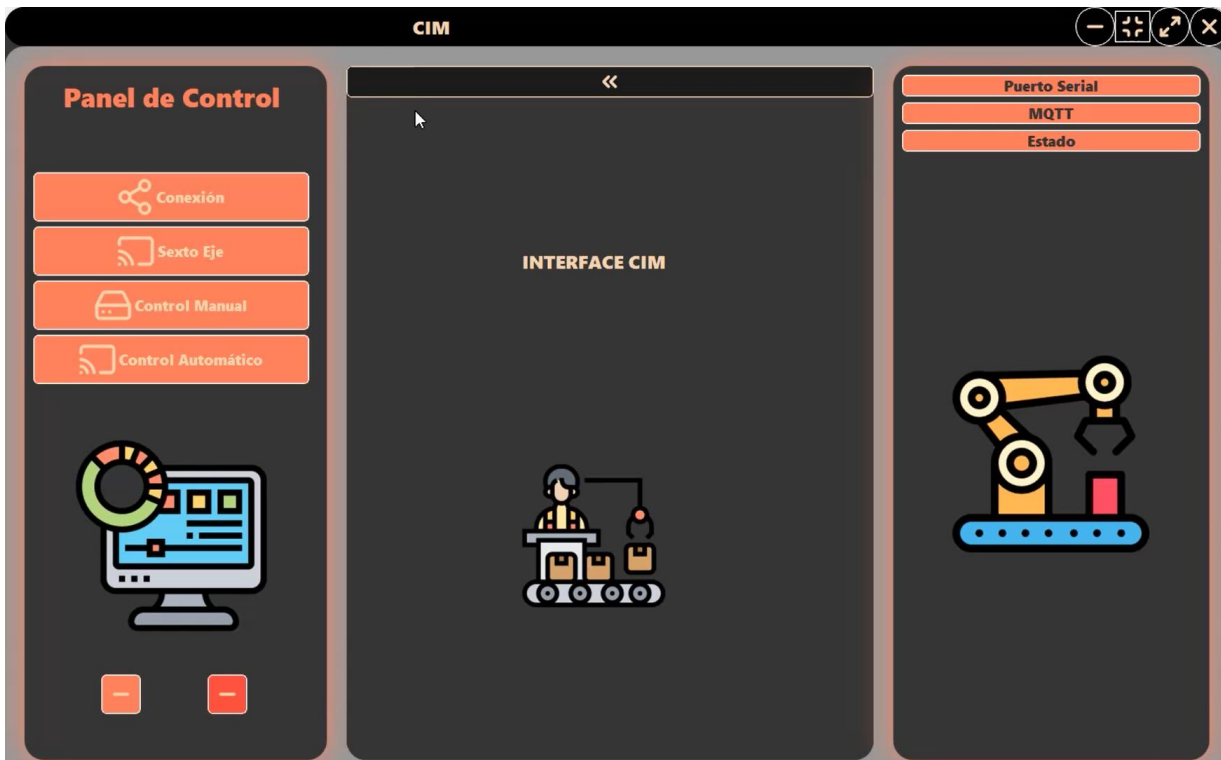
Tópicos

```
client.subscribe ("ImpresoraEnvio");
```

```
client.publish("ImpresoraRecibo", (char*)payload.c_str());
```



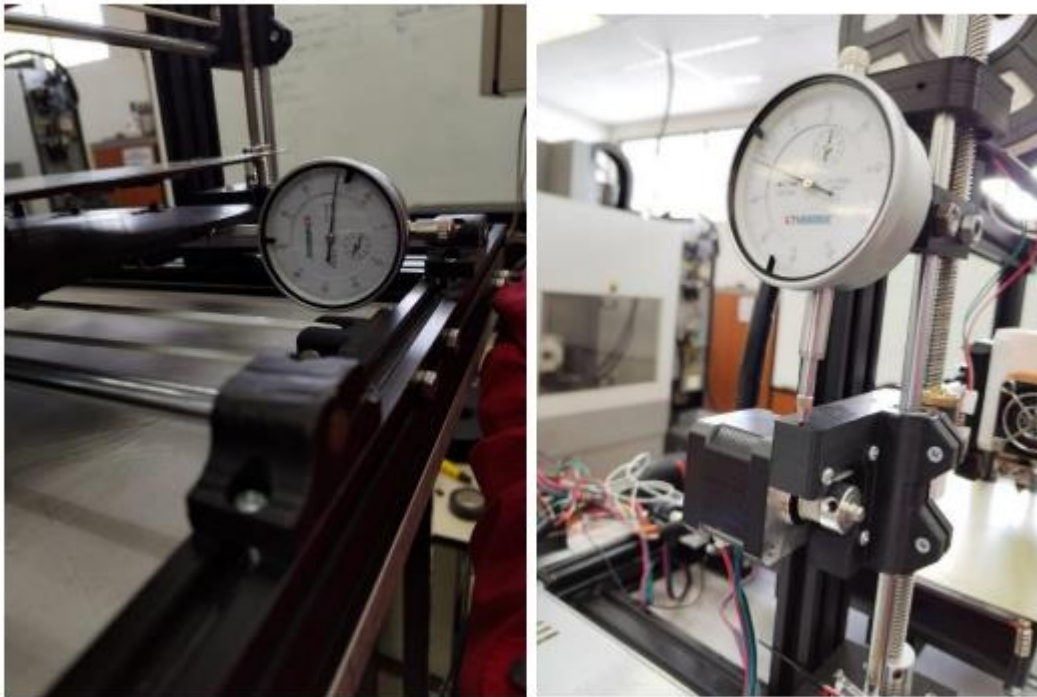
Interfaz de control



Pruebas y análisis de Resultados

- Prueba de repetibilidad

Medidas con palpador



Resultados

Ejes	Repetibilidad
Eje X	0.0089
Eje Y	0.0133
Eje Z	0.0048



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

- Pruebas de velocidad

Medidas con tacómetro.



Resultados

Ejes	Error Max.
Eje X	0.16
Eje Y	0.5
Eje Z	0.49



- Pruebas de impresión 3D

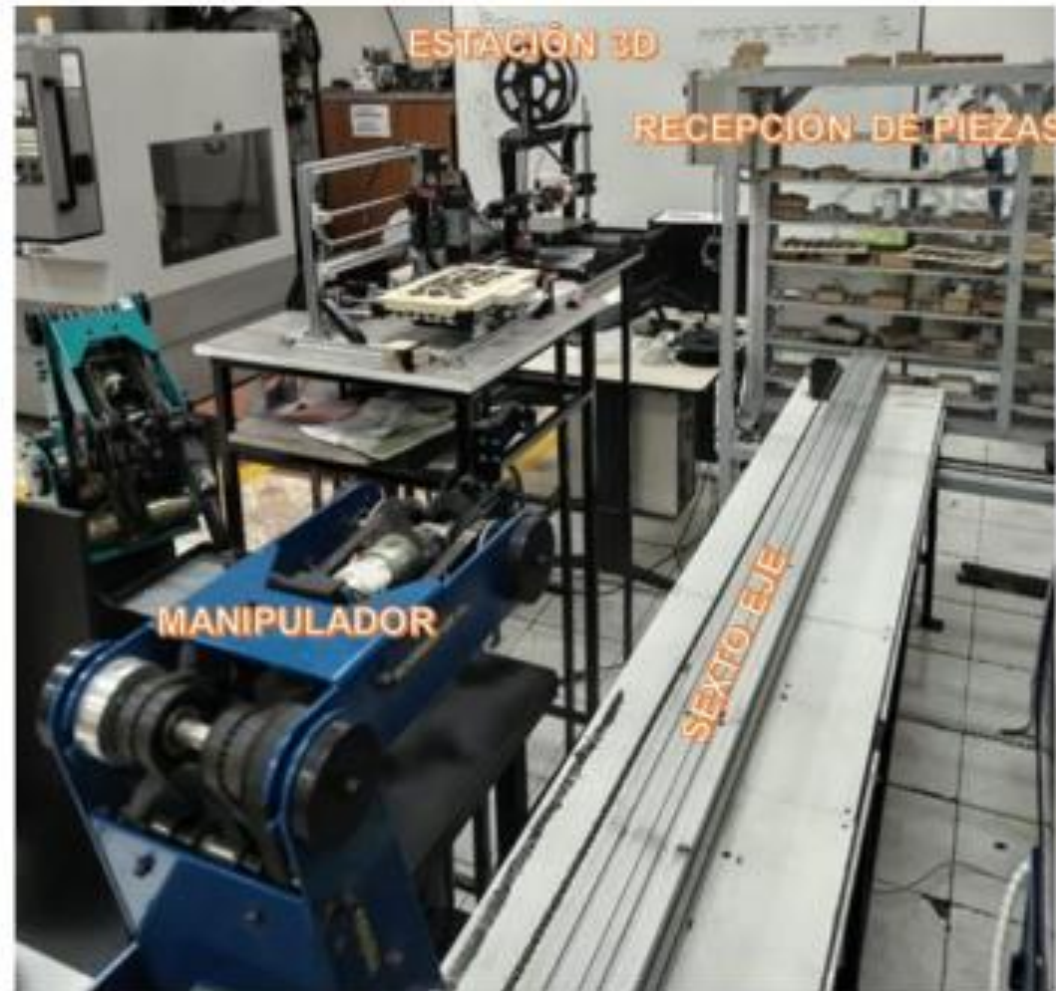


Resultados

EJES	Precisión
Eje X	0.065 mm
Eje Y	0.044 mm
Eje Z	0.008 mm



- Pruebas de la estación indexada al CIM



Pruebas de ciclo individual

Pruebas Individuales con el CIM			
No.	Funcional	No Funcional	Porcentaje
1	X		10 %
2	X		10 %
3	X		10 %
4	X		10 %
5	X		10 %
6	X		10 %
7		X	10 %
8	X		10 %
9	X		10 %
10	X		10 %
Total			100 %

Pruebas simultáneas con otra estación

Pruebas simultaneas con el CIM			
No.	Funcional	No Funcional	Porcentaje
1	X		10 %
2	X		10 %
3		X	10 %
4		X	10 %
5	X		10 %
6	X		10 %
7	X		10 %
8		X	10 %
9	X		10 %
10	X		10 %
Total			100 %

Pruebas de tiempo de ciclo

N° prueba	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Tiempo promedio de ciclo (min)
Tiempo de ciclo (min)	2:02	2:05	2:03	2:02	2:06	2:03	2:04	2:05	2:03	2:02	2:03



Validación de hipótesis

“ Mediante el diseño e implementación de un Sistema de Manufactura Aditiva se podrá indexar al CIM como estación de impresión 3D”

Variable Independiente Diseñar e implementar un Sistema de Manufactura Aditiva.

Variable Dependiente Indexar al CIM como estación de impresión en 3D.

Método de validación. La hipótesis planteada se validó por la metodología del chi cuadrado



Hipótesis Nula (H0): Mediante el diseño e implementación de un Sistema de Manufactura Aditiva no se podrá indexar al CIM como estación de impresión 3D.

Hipótesis Alternativa (H1): Mediante el diseño e implementación de un Sistema de Manufactura Aditiva se podrá indexar al CIM como estación de impresión 3D

Aplicación del método

Para validar la hipótesis se realizó una encuesta de 5 preguntas, a 30 estudiantes matriculados en la materia de Manufactura Asistida por Computador después de haber concluido una práctica en el CIM, las preguntas de la encuesta fueron relacionadas con el funcionamiento y operación de la estación de impresión 3D indexada al CIM.



Ítem	Parámetros	Aceptación	Rechazo	No. Valoración
1	Operación de la estación 3D indexada al CIM.	29	1	30
2	Funcionamiento de la estación de impresión 3D con el CIM	25	5	30
3	Indexación de la estación 3D al CIM.	22	8	30
4	Programación y postprocesado de la estación de impresión 3D.	23	7	30
5	Prácticas de estudiantes en el CIM.	20	10	30
Total		119	31	150



Como primer paso se calcula la frecuencia esperada con la siguiente formula.

$$f_t = \frac{T_i * T_j}{N}$$

$T_i =$ Numero de Valoraciones

$T_j =$ Total de aceptación o rechazo

$N =$ Total de valoraciones

El cálculo del chi-cuadrado que se simplifica en la siguiente formula.

$$X^2 = \sum \frac{(f_o - f_t)^2}{f_t}$$

$X^2 =$ Valor de chi – cuadrado

$f_o =$ frecuencia absoluta

$f_t =$ frecuencia esperada



Cálculo del método estadístico del chi cuadrado

Datos	f_o	f_t	$(f_o - f_t)$	$(f_o - f_t)^2$	$\frac{(f_o - f_t)^2}{f_t}$
Aceptación 1	29	23,8	5,2	27,04	1,13613445
Aceptación 2	25	23,8	1,2	1,44	0,0605042
Aceptación 3	22	23,8	-1,8	3,24	0,13613445
Aceptación 4	23	23,8	-0,8	0,64	0,02689076
Aceptación 5	20	23,8	-3,8	14,44	0,60672269
Rechazo 1	1	6,2	-5,2	27,04	4,36129032
Rechazo 2	5	6,2	-1,2	1,44	0,23225806
Rechazo 3	8	6,2	1,8	3,24	0,52258065
Rechazo 4	7	6,2	0,8	0,64	0,10322581
Rechazo 5	10	6,2	3,8	14,44	2,32903226
Total					9,51477365



- El valor calculado del chi cuadrado es de $X^2 = 9,515$, a continuación, se calcula los grados de libertad.

$$v = (f - 1) * (c - 1)$$

$$v = \textit{grados de libertad}$$

$$f = \textit{número de filas}$$

$$c = \textit{número de columnas}$$

$$v = (5 - 1) * (2 - 1)$$

$$v = 4$$

El valor de 4 grados de libertad y con un nivel de confianza del 95% que es igual a un nivel de significancia del 0.05 nos dirigimos a la tabla de chi- cuadrado.



v/p	0,001	0,0025	0,005	0,01	0,025	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5
1	10,8274	9,1404	7,8794	6,6349	5,0239	3,8415	2,7055	2,0722	1,6424	1,3233	1,0742	0,8735	0,7083	0,5707	0,4549
2	13,8150	11,9827	10,5965	9,2104	7,3778	5,9915	4,6052	3,7942	3,2189	2,7726	2,4079	2,0996	1,8326	1,5970	1,3863
3	16,2660	14,3202	12,8381	11,3449	9,3484	7,7847	6,2514	5,3170	4,6416	4,1083	3,6649	3,2831	2,9462	2,6430	2,3660
4	18,4682	16,3729	14,7592	13,1519	10,5211	9,4877	7,7794	6,7449	5,9886	5,3853	4,8784	4,4377	4,0446	3,6871	3,3567
5	20,5147	18,3854	16,7496	15,0863	12,8325	11,0705	9,2363	8,1152	7,2893	6,6257	6,0644	5,5731	5,1319	4,7278	4,3515
6	22,4575	20,2491	18,5475	16,8119	14,4494	12,5916	10,6446	9,4461	8,5581	7,8408	7,2311	6,6948	6,2108	5,7652	5,3481
7	24,3213	22,0402	20,2777	18,4753	16,0128	14,0671	12,0170	10,7479	9,8032	9,0371	8,3834	7,8061	7,2832	6,8000	6,3458
8	26,1239	23,7742	21,9549	20,0902	17,5345	15,5073	13,3616	12,0271	11,0301	10,2189	9,5245	8,9094	8,3505	7,8325	7,3441
9	27,8767	25,4625	23,5893	21,6660	19,0228	16,9190	14,6837	13,2880	12,2421	11,3887	10,6564	10,0060	9,4136	8,8632	8,3428
10	29,5879	27,1119	25,1881	23,2093	20,4832	18,3070	15,9872	14,5339	13,4420	12,5489	11,7807	11,0971	10,4732	9,8922	9,3418
11	31,2635	28,7291	26,7569	24,7250	21,9200	19,6752	17,2750	15,7671	14,6314	13,7007	12,8987	12,1836	11,5298	10,9199	10,3410

De la tabla de distribución de chi cuadrado obtenemos el valor de 9,4877 que al comparar con el valor calculado del chi-cuadrado $X^2 = 9,515$ es menor , por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula (H0) y se acepta la hipótesis alternativa (H1) concluyendo que mediante el diseño e implementación de un Sistema de Manufactura Aditiva se podrá indexar al CIM como estación de impresión 3D.



Conclusiones

- Una vez concluido el proyecto de integración curricular, se diseñó e implementó una estación de impresión 3D de tipo cartesiana, con una precisión en el eje X de 0.065 mm, en el eje Y de 0.044 mm y en el eje Z de 0,008 mm haciendo de esta máquina precisa y versátil, además con una efectividad de trabajo individual del 90% en el CIM y de un 70% trabajando en simultáneo con más estaciones del CIM del laboratorio CNC de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Sede Latacunga.
- Con el análisis de toda la información preliminar y partiendo de una línea base, se logró indexar al CIM del laboratorio de CNC de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Sede Latacunga, el sistema de manufactura aditiva como estación de impresión 3D, donde el proceso se controla desde una interfaz que se encuentra en la computadora central, las opciones que brinda dicha interfaz, es controlar un proceso continuo del modelo a imprimir y la cantidad de veces que el usuario requiera repetir el ciclo en esta y otras estaciones indexadas al CIM.



- Se analizó las alternativas de solución y los parámetros de diseño de la estación donde se diseñó una estación de impresión 3D con un área de trabajo de 190x170x140 mm, con la capacidad de imprimir filamentos como el PLA, además una de las partes principales fue la programación de la impresora 3D, se optó por el Firmware de código abierto Marlin, el cual fue adaptado para comunicarse bilateralmente mediante el protocolo MQTT con la computadora central mediante tópicos determinados, creando una comunicación segura, baja en consumo de energía y sencilla, con una opción bastante tecnológica capaz de realizar futuras aplicaciones en IoT.
- Se diseñó y se seleccionó los sistemas que componen la estación de impresión 3D para realizar diferentes tipos de pruebas de manera individual utilizando herramientas de medidas según la normativa, para comprobar el correcto funcionamiento del sistema mecánico, además dentro de las pruebas realizadas se operó la estación de impresión 3D desde el CIM y en conjunto con otra estación de manufactura sustractiva de forma simultánea logrando resultados altamente positivos.



- Se operó la estación de impresión 3D con 30 estudiantes matriculados en la materia de Manufactura Asistida por Computador, los cuales realizaron prácticas con la ayuda del manual de operación de forma independiente y también controlada desde la interfaz de CIM, culminada la práctica fueron encuestados donde los datos recolectados fueron segmentados para validar la hipótesis que se concluyó que mediante el diseño e implementación de un sistema de manufactura aditiva se podrá indexar al CIM como estación de impresión 3D.



Recomendaciones

- Para disminuir el error del 10% en la operación individual en el CIM y el 30% de manera simultánea con otras estaciones, se recomienda diseñar un sistema templador de cadena para el sexto eje del manipulador, para evitar pérdidas de paso y mejorar la precisión.
- Se recomienda mantener la estación libre de impurezas y lubricar los ejes ya que son uno de los principales elementos que transmiten el movimiento.
- Antes de usar la estación de impresión 3D se recomienda revisar el manual de usuario y operación para tener conocimiento de su manipulación.
- Retirar los residuos de material que pueden quedar en el fleje magnético de la cama caliente.



- Tener precaución al manipular la estación ya que algunos componentes están sometidos a grandes temperaturas.
- Se recomienda indexar al CIM el AS-RS para mejorar la etapa de recolección y entrega de fleje magnético de la estación de impresión 3D.



Gracias



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA