



Instituto Tecnológico de Costa Rica  
Escuela de Ingeniería en Producción Industrial  
Licenciatura en Ingeniería en Producción Industrial  
Tesis de Graduación

**Laboratorio de Sistemas Integrados de Manufactura**

“Propuesta para el Control Dimensional del Proceso de Fabricación Aditiva”

**Realizado por:** Fabián de Jesús Garita Chacón

**Profesora asesora:** Ing. Marcela Meneses Guzmán

**Asesor Industrial:** Ing. Kevin Gutiérrez Espinoza

Junio, 2025.

CONSTANCIA DE DEFENSA PÚBLICA DEL  
PROYECTO DE GRADUACIÓN

El presente Proyecto de Graduación titulado ""Propuesta para el Control Dimensional del Proceso de Fabricación Aditiva"" y realizado en la empresa ""Instituto Tecnológico de Costa Rica"", durante el I Semestre de 2025, ha sido defendido, ante el Tribunal Examinador integrado por los profesores Ing. Esteban LeMaitre Gonzalez e Ing. Luis Ignacio Garces Monge; como requisito para optar al grado de Licenciatura en Ingeniería en Ingeniería en Producción Industrial, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

La orientación y supervisión del proyecto desarrollado por el estudiante, estuvo a cargo del profesor(a) asesor (a) Ing. Marcela Meneses Guzmán.

Este documento y su defensa ante el Tribunal Examinador han sido declarados:

Públicos (x)

Confidenciales ( )

Firmado digitalmente

**TEC** | Tecnológico de Costa Rica  
por ITCR\elemaitre  
Fecha: 2025.06.25  
14:49:07 -06'00'

Ing. Esteban LeMaitre Gonzalez  
Profesor(a) Evaluador(a)

MARCELA MENESSES GUZMAN (FIRMA)  
Firmado digitalmente por MARCELA MENESSES GUZMAN (FIRMA)  
Fecha: 2025.06.24 16:05:04 -06'00'

Ing. Marcela Meneses Guzmán  
Profesor(a) Asesor(a)

LUIS IGNACIO GARCES MONGE (FIRMA)  
Digitally signed by LUIS IGNACIO GARCES MONGE (FIRMA)  
Date: 2025.06.25 10:54:50 -06'00'

Ing. Luis Ignacio Garces Monge  
Profesor(a) Evaluador(a)

Fabián de Jesús Garita Chacón  
Estudiante

Cartago, 24 de junio del 2025

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios, por ser la causa incausada de todas mis decisiones y el motor inmóvil de todas mis acciones, fuente de la verdad y del bien, y guía silenciosa en cada paso de este camino.

A mi equipo de trabajo: Marcela Meneses Guzmán, Ignacio Mora Watson y Cui Ting Zhong Xie, quienes demostraron un compromiso inquebrantable, una disposición constante para aportar ideas y una admirable capacidad para enfrentar y superar cada desafío que se presentó durante el desarrollo de esta investigación. Su profesionalismo, entrega y compañerismo fueron esenciales para alcanzar los objetivos planteados.

A los profesores evaluadores, por el valioso tiempo que dedicaron a la revisión detallada de este trabajo y por sus recomendaciones y observaciones, que enriquecieron significativamente el contenido y la calidad de la tesis.

A todos los profesores y asesores que me acompañaron a lo largo de este proceso, por su guía, por compartir generosamente su experiencia y conocimientos, y por la constante retroalimentación que contribuyó de manera decisiva a la mejora y consolidación de este proyecto.

A las personas encuestadas, por brindarme su tiempo, su conocimiento y sus opiniones con total disposición y amabilidad. Sus aportes fueron fundamentales para sustentar y fortalecer el análisis y las conclusiones de este trabajo.

A mi familia y a mis amigos, quienes fueron mi pilar a lo largo de este camino. Gracias por su apoyo incondicional, por alentarme en los momentos difíciles y por ser la fuerza que me impulsó a seguir adelante, recordándome siempre la importancia de la perseverancia y la pasión por lo que uno hace.

A todos ustedes, mi gratitud más profunda.

## DEDICATORIA

*A mis padres, cuyo apoyo, amor y ejemplo hacen  
que este título les pertenezca tanto como a mí.*

## EPÍGRAFES

*“¿Aspiras a grandes cosas? Comienza con las más pequeñas.”*

*-San Agustín de Hipona.*

## TABLA DE CONTENIDO

	Página
<u>RESUMEN</u>	<u>18</u>
<u>I. INTRODUCCIÓN</u>	<u>19</u>
<u>A. Descripción general</u>	<u>19</u>
<u>B. Justificación del estudio</u>	<u>20</u>
<u>C. Objetivos</u>	<u>21</u>
<u>D. Alcances y limitaciones</u>	<u>22</u>
<u>II. METODOLOGÍA</u>	<u>24</u>
<u>III. MARCO TEÓRICO</u>	<u>27</u>
<u>A. Teoría respecto al desempeño dimensional en la fabricación aditiva</u>	<u>27</u>
<u>1. Introducción</u>	<u>27</u>
<u>2. Normativa Vigente</u>	<u>28</u>
<u>3. Descripción de las tecnologías</u>	<u>38</u>
<u>3.1. Laminado de Hojas (SHL)</u>	<u>38</u>
<u>3.2. Extrusión de Material (MEX)</u>	<u>40</u>
<u>3.3. Fusión de Lecho de Polvo (PBF)</u>	<u>44</u>
<u>3.4. Proyección de Aglutinante (BJ)</u>	<u>47</u>
<u>3.5. Deposición Energética Dirigida (DED)</u>	<u>49</u>
<u>3.6. Fotopolimerización en Tanque (VPP)</u>	<u>51</u>
<u>3.7. Proyección de Material (MJT)</u>	<u>53</u>
<u>3.8. Conclusiones</u>	<u>55</u>
<u>4. Proceso de fabricación aditiva y variables críticas</u>	<u>55</u>
<u>4.1. Diseño de la Pieza</u>	<u>56</u>
<u>4.2. Software de Corte</u>	<u>60</u>
<u>4.3. Impresión</u>	<u>63</u>
<u>4.4. Parámetros de Postprocesado</u>	<u>68</u>
<u>4.5. Conclusión</u>	<u>70</u>
<u>5 Variables de Producto y su impacto</u>	<u>79</u>
<u>5.1. Geometría</u>	<u>79</u>
<u>5.2. Errores Volumétricos</u>	<u>80</u>
<u>5.3. Propiedades Mecánicas</u>	<u>81</u>
<u>B. Herramientas ingenieriles</u>	<u>81</u>
<u>1. Estadística descriptiva</u>	<u>81</u>
<u>1.1. Media</u>	<u>82</u>
<u>1.2. Varianza</u>	<u>82</u>
<u>2. Análisis de regresión</u>	<u>82</u>
<u>2.1. Mínimos cuadrados</u>	<u>82</u>
<u>2.2. Coeficiente de determinación</u>	<u>83</u>
<u>3. Estudio R&amp;R</u>	<u>83</u>
<u>3.1. Análisis de variaciones</u>	<u>84</u>

3.2. Componentes de variación	84
4. Diseño Factorial	84
4.1. Reconocimiento del problema	85
4.2 Elección de los factores y niveles	85
4.3 Selección de la variable respuesta	85
4.4 Elección del diseño experimental	85
4.5 Realización de los experimentos	85
4.6 Análisis de los datos	86
4.7 Conclusiones y recomendaciones	86
C. Definiciones	86
1. Revistas indexadas	86
2. Normas ISO/ASTM	86
3. Técnica multivoto	87
4. Software CAD	87
5. Software de programación del microcontrolador	87
6. Redacción científica	88
IV. DIAGNÓSTICO DE LA SITUACIÓN ACTUAL	89
A. Diseño de la cámara de fabricación	90
B. Experimentos con la MFA	95
1. Calibración Inicial	95
2. Estudio del Sistema de Medición	96
2.1. Primera iteración	96
2.2. Segunda iteración	99
2.3. Tercera iteración	102
2.4. Cuarta iteración	104
3. Experimentos con prismas	108
3.1 Primer experimento	108
3.2. Segundo experimento	120
3.3. Tercer experimento	129
4. Experimentos con piezas tipo lineal	137
4.1. Primer experimento	138
5.2. Segundo experimento	149
5. Experimentos con cubos	159
5.1. Primer experimento	159
5.2. Segundo experimento	171
C. Declaración del problema	186
V. SOLUCIONES AL PROBLEMA PLANTEADO	188
A. Propuesta de proceso para la planificación de la estrategia de elaboración de una pieza	188
1. Resumen de aspectos a considerar para el aseguramiento de la precisión dimensional en FA	188
1.1. Monitoreo de condiciones ambientales durante la impresión	188
1.2. Estandarización y validación de parámetros de corte	189

1.3. Optimización de la colocación en la plataforma de fabricación	189
1.4. Construcción de un modelo predictivo iterativo	189
1.5. Compensación geométrica en el diseño CAD	190
2. Procedimiento para fabricar una pieza mediante FA asegurando su precisión dimensional	190
B. Sistema de medición	191
1. Objetivos de la capacitación	192
2. Requisitos y materiales	192
3. Estructura de la capacitación	192
4. Contenidos y metodología por fase	193
C. Cámara de fabricación	195
1. Estructura general y materiales	195
2. Control y monitoreo de variables ambientales	196
3. Sistema de ventilación y evacuación	200
4. Mitigación de riesgos para el usuario	201
5. Protección de la calidad de impresión	201
6. Dimensiones y diseño interior	201
7. Complementos y monitoreo	201
D. Cálculo de la incertidumbre	203
E. Análisis económico del estudio	204
1. Costo por materia prima	204
2. Costo por mano de obra	204
3. Costo indirecto de fabricación	205
4. Costo total del experimento	206
F. Plan de Implementación	206
1. Estrategia de Planificación del Proceso de Fabricación	206
1.1 EDT/WBS	206
1.2. Lista de actividades	207
1.3. Hitos y entregables	207
1.4. Cronograma (18 días)	208
1.5. Roles y responsabilidades	208
1.6. Plan de gestión de riesgos	208
2 Sistema de Medición	209
2.1. EDT/WBS	209
2.2. Lista de actividades	209
2.3. Hitos y entregables	210
2.4. Cronograma (11 días)	210
2.5. Roles y responsabilidades	210
2.6. Plan de gestión de riesgos	211
3. Cámara de Fabricación	211
3.1. EDT/WBS	211
3.2. Lista de actividades	212
3.3. Hitos y entregables	212

3.4. Cronograma (13 días)	212
3.5. Roles y responsabilidades	213
3.6. Plan de gestión de riesgos	213
4. Conclusión	213
VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	215
A. Conclusiones	215
B. Recomendaciones	216
VII. APÉNDICES	218
VIII. ANEXOS	231
VIII. BIBLIOGRAFÍA	233

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro No.	Descripción	Página
1.	Metodología de la investigación	21
2.	Comparativa de las cámaras de fabricación estudiadas.	88
3.	Resultados de la encuesta aplicada a los expertos en FA	90
4.	ANOVA realizado para la primera iteración del sistema de medición.	95
5.	Porcentaje de contribución de cada uno de los componentes del R&R para la primera iteración del sistema de medición.	96
6.	ANOVA realizado para la segunda iteración del sistema de medición.	97
7.	Porcentaje de contribución de cada uno de los componentes del R&R para la segunda iteración del sistema de medición.	98
8.	ANOVA realizado para la tercera iteración del sistema de medición.	100
9.	Porcentaje de contribución de cada uno de los componentes del R&R para la tercera iteración del sistema de medición.	101
10.	ANOVA realizado para la cuarta iteración del sistema de medición.	104
11.	Porcentaje de contribución de cada uno de los componentes del R&R para la cuarta iteración del sistema de medición.	105
12.	Información detallada del experimento Prisma-E01-XYZ	106
13.	Resultados del ANOVA para el modelo inicial realizado para el experimento Prisma-E01-XYZ	114
14.	Resultados del ANOVA para el modelo depurado realizado para el experimento Prisma-E01-XYZ	114
15.	Comparaciones de Tukey para las diferentes piezas analizadas en el experimento Prisma-E01-XYZ.	114
16.	Comparaciones de Tukey para los diferentes ejes analizados en el experimento Prisma-E01-XYZ.	115
17.	Información detallada del experimento Prisma-E02-Z	118
18.	ANOVA realizado para el experimento Prisma-E02-Z.	124
19.	Comparaciones de Tukey para el experimento Prisma-E02-Z	124
20.	Información detallada del experimento Prisma-E03-Z	126

21.	Información detallada del experimento Tipo lineal-E01-X	136
22.	Resultados del ANOVA para el modelo realizado para el experimento Tipo lineal-E01-X.	144
23.	Comparaciones de Tukey para el modelo realizado para el experimento Tipo lineal-E01-X.	144
24.	Información detallada del experimento Tipo lineal-E02-XY	147
25.	Resultados del ANOVA realizado para las diferencias entre el valor medido y el valor nominal para las piezas del experimento Tipo lineal-E02-XY.	154
26.	Comparaciones de Tukey para el modelo realizado para el experimento Tipo lineal-E02-X.	154
27.	Información detallada del experimento Cubo-E01-XYZ	157
28.	Resultados del ANOVA del modelo inicial para el experimento Cubo-E01-XYZ.	165
29.	Resultados del ANOVA de modelo depurado para el experimento Cubo-E01-XYZ.	166
30.	Información detallada del experimento Cubo-E02-XYZ	168
31.	Resultados del ANOVA realizado para la diferencia entre valor medido y nominal para el experimento Cubo-E02-XYZ.	178
32.	Resultados del ANOVA realizado para la diferencia entre valor medido y objetivo para el experimento Cubo-E02-XYZ.	178
33.	Descripción de las fases de la capacitación a los operarios que realicen mediciones con el calibrador digital	189
34.	Resultados del cálculo de las incertidumbres para cada tamaño de cubo.	200
35.	Listado de las actividades a realizar para implementar la solución de la estrategia de planificación del proceso de fabricación.	204
36.	Cronograma de las actividades a realizar para implementar la solución de la estrategia de planificación del proceso de fabricación.	205
37.	Listado de los roles y responsabilidades de los participantes para implementar la solución de la estrategia de planificación del proceso de fabricación.	205
38.	Plan de gestión de riesgos para implementar la solución de la estrategia de planificación del proceso de fabricación.	205
39.	Listado de las actividades a realizar para implementar la solución del sistema de medición.	206

40.	Cronograma de las actividades a realizar para implementar la solución del sistema de medición.	207
41.	Listado de los roles y responsabilidades de los participantes para implementar la solución del sistema de medición.	207
42.	Plan de gestión de riesgos para implementar la solución del sistema de medición.	208
43.	Listado de las actividades a realizar para implementar la solución del sistema de medición.	209
44.	Cronograma de las actividades a realizar para implementar la solución del sistema de medición.	209
45.	Listado de los roles y responsabilidades de los participantes para implementar la solución del sistema de medición.	210
46.	Plan de gestión de riesgos para implementar la solución del sistema de medición.	210

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura No.	Descripción	Página
1	Diagrama de flujo de la metodología utilizada.	23
2.	Cuadro resumen de las variables que afectan el proceso de fabricación mediante la tecnología MEX.	75
3.	Cuadro resumen de las variables que afectan el proceso de fabricación mediante la tecnología VPP.	76
4.	Esquema de las partes principales de la MFA de MEX utilizada.	92
5.	Prueba de sesgo aplicada a los datos de la primera iteración del sistema de medición.	94
6.	Gráfica de corridas de la primera iteración del sistema de medición.	96
7.	Prueba de sesgo aplicada a los datos de la segunda iteración del sistema de medición.	97
8.	Gráfica $\bar{X}$ por operador de la segunda iteración del sistema de medición	98
9.	Prueba de sesgo aplicada a los datos de la tercera iteración del sistema de medición.	100
10.	Gráfica $\bar{X}$ por operador de la tercera iteración del sistema de medición	100
11.	Prueba de sesgo aplicada a los datos de la cuarta iteración del sistema de medición.	103
12.	Gráfica $\bar{X}$ por operador de la cuarta iteración del sistema de medición.	104
13.	Fotografía de la plataforma de impresión con los prismas utilizados en el experimento con los tres ejes.	106
14.	Gráfica de cajas de la diferencia entre valor medido y nominal según la posición en la plataforma para el experimento Prisma-E01-XYZ.	112
15.	Gráfica de cajas de la diferencia entre valor medido y nominal según la pieza medida para el experimento Prisma-E01-XYZ.	112
16.	Gráfica de cajas de la diferencia entre valor medido y nominal según el eje de medición para el experimento Prisma-E01-XYZ.	113
17.	Gráficas de residuos del modelo ANOVA depurado para el experimento Prisma-E01-XYZ.	116

18.	Gráfica de normalidad de los residuos habiendo eliminado 7 valores atípicos para el experimento Prisma-E01-XYZ.	117
19.	Gráfica de optimización de la diferencia entre el valor medido y nominal para los factores significativos del experimento Prisma-E01-XYZ.	117
20.	Gráfica de cajas de la diferencia entre valor medido y nominal según la pieza medida para el experimento Prisma-E02-Z.	122
21.	Gráfica de dispersión de la cantidad de capas registrada bajo el microscopio según la pieza medida para el experimento Prisma-E02-Z.	123
22.	Gráficas de residuos del modelo ANOVA depurado para el experimento Prisma-E02-Z.	125
23.	Gráfica de optimización de la diferencia entre el valor medido y nominal para los factores significativos del experimento Prisma-E02-Z.	126
24.	Gráfica de cajas de la diferencia entre valor medido y nominal según la pieza medida para el experimento Prisma-E03-Z.	131
25.	Gráfica de dispersión de la cantidad de capas registrada bajo el microscopio según la pieza medida para el experimento Prisma-E03-Z.	132
26.	Gráfica de optimización de respuesta de la diferencia entre el valor medido y el nominal para la primera iteración de los experimentos en el eje X.	133
27.	Gráfica de optimización de la diferencia entre el valor medido y nominal para los factores significativos del experimento Prisma-E03-Z.	134
28.	Demostración de las 9 mediciones realizadas a la pieza tipo lineal de la norma ISO/ASTM 52902.	135
29.	Arreglo de las 5 piezas tipo lineal fabricadas para la primera iteración de los experimentos con el eje X.	136
30.	Gráfica de cajas de la diferencia entre el valor medido y el nominal de cada característica analizada según su condición para el experimento Tipo lineal-E01-X.	142
31.	Gráfica de cajas de la diferencia entre el valor medido y el nominal según su posición en la plataforma de fabricación para el experimento Tipo lineal-E01-X	143
32.	Gráficas de residuos del modelo ANOVA depurado para el experimento Tipo lineal-E01-X.	145
33.	Gráfica de optimización de la diferencia entre el valor medido y	146

	nominal para los factores significativos del experimento Tipo lineal-E01-X	
34.	Arreglo de las 10 piezas tipo lineal fabricadas para la segunda iteración de los experimentos con el eje X.	147
35.	Gráfica de cajas de la diferencia entre el valor medido y el nominal de cada característica según su alineación en la plataforma de fabricación para el experimento Tipo lineal-E02-XY.	152
36.	Gráfica de cajas de la diferencia entre el valor medido y el nominal según su posición en la plataforma de fabricación para el experimento Tipo lineal-E02-XY.	152
37.	Gráficas de residuos del modelo ANOVA depurado para el experimento Tipo lineal-E02-XY.	155
38.	Gráfica de optimización de la diferencia entre el valor medido y nominal para los factores significativos del experimento Tipo lineal-E02-XY.	156
39.	Gráfica de cajas de la diferencia entre el valor medido y el nominal según la alineación del calibrador respecto a los ejes de la MFA para el experimento Cubo-E01-XYZ.	162
40.	Gráfica de cajas de la diferencia entre el valor medido y el nominal según su posición en la plataforma de fabricación y su condición de medición para el experimento Cubo-E01-XYZ.	163
41.	Gráfica de dispersión de la diferencia entre valor medido y nominal respecto a la temperatura ambiental para el experimento Cubo-E01-XYZ.	163
42.	Gráfica de dispersión de la diferencia entre valor medido y nominal respecto a la temperatura ambiental para el experimento Cubo-E01-XYZ.	163
43.	Gráficas de residuos del modelo ANOVA depurado para el experimento Cubo-E01-XYZ.	167
44.	Gráfica de optimización de la diferencia entre el valor medido y nominal para los factores fijos del modelo depurado del experimento Cubo-E01-XYZ.	167
45.	Gráfica de cajas de la diferencia entre valor medido y nominal según el ciclo de impresión para el experimento Cubo-E02-XYZ.	174
46.	Gráfica de cajas de la diferencia entre valor medido y objetivo según el ciclo de impresión para el experimento Cubo-E02-XYZ.	174
47.	Gráfica de cajas de la diferencia entre valor medido y nominal según el valor nominal para el experimento Cubo-E02-XYZ.	175

48.	Gráfica de cajas de la diferencia entre valor medido y objetivo según el valor nominal para el experimento Cubo-E02-XYZ.	175
49.	Gráfica de cajas de la diferencia entre valor medido y nominal según el eje de medición para el experimento Cubo-E02-XYZ.	176
50.	Gráfica de cajas de la diferencia entre valor medido y objetivo según el eje de medición para el experimento Cubo-E02-XYZ.	176
51.	Gráficas de residuos del modelo ANOVA para la diferencia entre el valor medido y el nominal para el experimento Cubo-E02-XYZ.	180
52.	Gráficas de residuos del modelo ANOVA para la diferencia entre el valor medido y el objetivo para el experimento Cubo-E01-XYZ.	181
53.	Gráfica de optimización de la diferencia entre valor medido y nominal para el experimento Cubo-E02-XYZ.	182
54.	Gráfica de optimización de la diferencia entre valor medido y objetivo para el experimento Cubo-E02-XYZ.	182
55.	Fotografías por dentro y por fuera de la cámara de fabricación utilizada para la MFA en los experimentos con cubos.	193
56.	Circuito armado para el sensor utilizado para tomar las mediciones de humedad y temperatura.	195
57.	Plano de construcción de la cámara de fabricación propuesta.	199
58.	Diagrama de la cámara de fabricación propuesta.	200

## RESUMEN

Este proyecto se desarrolló en el Laboratorio de Sistemas Integrados de Manufactura (SIMTEC) del Instituto Tecnológico de Costa Rica. El estudio se realiza con el fin de establecer empíricamente una estrategia de planificación para obtener la mejor dimensión lineal de una pieza impresa por medio de la tecnología de extrusión de material.

Durante el diagnóstico de la situación actual se pudo determinar que no existe una metodología estandarizada para asegurar la precisión dimensional en procesos de fabricación aditiva para la tecnología de extrusión de material (MEX). Se identificó que factores como la variabilidad de las condiciones ambientales, la falta de estandarización en los parámetros de impresión, así como la ausencia de un sistema de medición validado afectan significativamente la calidad dimensional de las piezas fabricadas.

Las propuestas de solución consisten en el desarrollo de una estrategia de planificación del proceso de fabricación, la mejora del sistema de medición mediante capacitación técnica y rediseño de procedimientos, y la construcción de una cámara de fabricación que permita controlar las variables ambientales durante la impresión. Se estima que estas soluciones generen una mejora en la repetibilidad del proceso de fabricación aditiva, así como un fortalecimiento de la capacidad técnica del laboratorio, ya que se observó una mejora del 66,7 % en la precisión del primer al último experimento realizado. Sin embargo, la exactitud se redujo en un 28,7 %, lo cual se relaciona con el incremento en las dimensiones de la pieza, ya que se evidenció que la incertidumbre del proceso tiende a aumentar conforme crece el tamaño del objeto fabricado.

Al analizar las ventajas que aportarían a la institución estas propuestas, se obtiene que, desde el punto de vista técnico, permiten establecer prácticas basadas en evidencia y alineadas con normativas internacionales; y desde el punto de vista financiero, representan soluciones de bajo costo y alta efectividad que optimizan el uso de recursos ya disponibles. En cuanto a la implementación, se tiene que cada solución fue estructurada con un plan detallado que incluye actividades, responsables, cronograma y riesgos, lo cual facilita su ejecución progresiva dentro del contexto académico y con los recursos existentes.

## **I. INTRODUCCIÓN**

### **A. Descripción general**

El Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC) es una universidad pública autónoma que se especializa en la enseñanza, la investigación y la difusión del conocimiento en tecnología y ciencias afines, contribuyendo al desarrollo del país.

#### **1. Misión**

"Contribuir al desarrollo integral del país, mediante formación del recurso humano, la investigación y la extensión; manteniendo el liderazgo científico, tecnológico y técnico, la excelencia académica y el estricto apego a las normas éticas, humanísticas y ambientales, desde una perspectiva universitaria estatal de calidad y competitividad a nivel nacional e internacional." (Tecnológico de Costa Rica, s.f.)

#### **2. Visión**

"El Instituto Tecnológico de Costa Rica seguirá contribuyendo mediante la sólida formación del talento humano, el desarrollo de la investigación, la extensión, la acción social y la innovación científico-tecnológica pertinente, la iniciativa emprendedora y la estrecha vinculación con los diferentes actores sociales a la edificación de una sociedad más solidaria e inclusiva; comprometida con la búsqueda de la justicia social, el respeto de los derechos humanos y del ambiente." (Tecnológico de Costa Rica, s.f.)

#### **3. Simtec**

El trabajo de laboratorio se realizará en el Laboratorio de Sistemas Integrados de Manufactura (SIMTEC) del TEC, el cual fue creado en 2002 para apoyar los cursos de la Licenciatura en Producción Industrial. Se encuentra en el Campus Central y en el Campus Tecnológico Local San Carlos, equipado con tecnología avanzada como máquinas de FA, torno y fresadoras CNC, cortadora láser y robots para fomentar el aprendizaje en manufactura automatizada y controladores lógicos programables. Además de la formación académica, ha desarrollado proyectos de impacto nacional, como un respirador artificial para casos de COVID (Hernández Cordero, 2021).

## **B. Justificación del estudio**

El uso de la fabricación aditiva (FA) y sus tecnologías plantean un nuevo paradigma de control de calidad relacionadas a la forma de control del proceso de manufactura, por lo que las industrias y laboratorios que hacen uso de ella deben tener resultados a la altura de lo que plantea el mercado. Por tanto, resulta imperativo para los centros de investigación establecer una metodología que les permita de manera estructurada controlar los parámetros de proceso clave que generan cambios significativos en las variables del producto que afectan directamente la aceptación de este.

De este modo, se habló con varios centros investigativos, como el Laboratorio SIMTEC, el Centro de Investigación y Extensión en Materiales (CIEMTEC) y el Laboratorio Delta, los tres laboratorios del TEC, así como con la empresa Cooper Standard, y todos concordaron en que no cuentan con una metodología estandarizada para el control de las variables que afectan el proceso de fabricación. Además, aseveran que los métodos que implementan son rudimentarios y han sido creados mediante prueba y error, pues hasta la fecha no ha habido un estudio que les indique si realmente funcionan, ni que proponga otras alternativas.

La falta de una metodología estandarizada para el control de calidad en la fabricación aditiva genera incertidumbre en la precisión y repetibilidad del proceso, afectando la aceptación del producto en el mercado. Además, la dependencia de métodos empíricos basados en prueba y error limita la eficiencia y confiabilidad de los resultados, lo que puede traducirse en mayores costos, tiempos de producción prolongados y una menor competitividad. Dado que centros de investigación y empresas, como el laboratorio SIMTEC y Cooper Standard, enfrentan este desafío, es crucial desarrollar estrategias estructuradas que optimicen el control de parámetros clave y garanticen la calidad de los productos fabricados.

## **C. Objetivos**

### **1. Objetivo general**

Establecer empíricamente una estrategia de planificación para obtener la mejor dimensión lineal de una pieza impresa por medio de la tecnología de extrusión de material.

### **2. Objetivos específicos**

- 2.1. Identificar las partes y variables teóricas del proceso de fabricación aditiva que afectan la variabilidad de dimensiones longitudinales de una pieza.
- 2.2. Analizar las partes y variables del proceso de fabricación aditiva por MEX con la máquina Prusa i3 MK3S que afectan la variabilidad de dimensiones longitudinales en una pieza.
- 2.3. Adaptar una cámara de fabricación protectora y estabilizadora de las variables ambientales del proceso de fabricación aditiva para que se analice el efecto del ambiente.
- 2.4. Determinar la mejor combinación de variables del proceso de fabricación aditiva que logran exactitud de dimensiones de una pieza según el procedimiento metodológico seguido
- 2.5. Diseñar una estrategia de planificación para la fabricación de una pieza por medio de la tecnología de extrusión de material.

## **D. Alcances y limitaciones**

### **1. Alcances**

El estudio se realiza para la máquina de fabricación aditiva (MFA) Prusa i3 MK3S, disponible en el laboratorio SIMTEC. Se busca establecer un procedimiento que tome en cuenta las variables significativas que pueden ser modificadas mediante el sistema de fabricación aditiva. Además, el procedimiento busca mejorar la exactitud dimensional longitudinal en los ejes X, Y y Z de la MFA respecto a los datos nominales del archivo digital de la pieza. Se hará uso de una cámara de fabricación que albergará el proceso de impresión, a la cual se le ha diseñado y adaptado un sistema para medición de las variables ambientales determinadas como importantes por el equipo de expertos; el control de estas variables no se incluye, a menos de que pueda ser manual. La metodología propuesta está diseñada para ser replicable en laboratorios universitarios que cuenten con equipos de nivel semiprofesional como la Prusa i3 MK3S, por lo que sus recomendaciones pueden ser implementadas sin necesidad de equipos industriales de alta gama. Se integran criterios y metodologías de normas ISO/ASTM (principalmente ISO/ASTM 52902 y 52910), lo que permite cierto grado de alineación con estándares internacionales, aunque no se alcanza una certificación completa de procesos ni productos. Las soluciones propuestas (como la cámara de impresión, el modelo predictivo y el procedimiento de planificación) se desarrollan de forma modular, de modo que pueden adaptarse o integrarse de forma independiente según las necesidades del usuario o el entorno operativo. El estudio se centra en piezas tipo prisma, tipo lineal y cubo, alineadas con las formas de ensayo recomendadas por ISO/ASTM 52902. Esto acota el rango de geometrías evaluadas, pero garantiza representatividad en pruebas dimensionales.

### **2. Limitaciones**

Las variables a modificar dependen de lo que es posible modificar en los software de rebanado y de control de la MFA, así como en el panel de control de la MFA. La medición de la dimensionalidad longitudinal se realiza sólo con el equipo disponible en el laboratorio, el cual se compone de un calibrador digital y un microscopio. Además, la MFA no puede usarse únicamente dentro del Laboratorio SIMTEC. Las fabricaciones sólo pueden monitorearse en el horario de operación del laboratorio, el cuál es lunes a viernes, de 7:30 am a 4:00 pm; lo mismo aplica para la toma de datos, lo que limitó la cantidad de réplicas posibles y aumentó la dispersión por cambios ambientales entre días. La precisión de la conversión del modelo diseñado asistido por computadora (CAD) a instrucciones que la MFA

pueda interpretar está definida por el tipo de archivo, ya que el software de rebanado sólo acepta archivos tipo estereolitografía (STL). El calibrador disponible en el laboratorio no cuenta con un certificado de calibración. El análisis se limita a un único tipo de filamento (ej. PLA u otro) sin explorar cómo otros materiales (ABS, PETG, compuestos) afectan la variabilidad dimensional, lo cual restringe la generalización de los resultados. Si bien se acondicionó una cámara de fabricación con sensores para monitorear variables ambientales (temperatura, humedad), no se implementó un control activo sobre estas variables, lo que puede introducir ruido en la comparación entre corridas de impresión. El análisis de datos se limita a modelos ANOVA y regresión lineal; no se exploraron enfoques más avanzados como modelado no lineal, redes neuronales o simulaciones multivariantes.

## II. METODOLOGÍA

Cuadro No. 1. Metodología utilizada en la investigación.

Objetivo Específico	Actividades	Herramientas	Resultados
Identificar las partes y variables teóricas del proceso de fabricación aditiva que afectan la variabilidad de dimensiones longitudinales de una pieza.	1. Revisión de la literatura sobre diseño de piezas, software rebanado, fabricación por extrusión, postprocesado.	1. Revistas indexadas 2. Normas ISO/ASTM	1. Marco Teórico 2. Identificación de variables teóricas que influyen en la dimensionalidad.
Analizar las partes y variables del proceso de fabricación aditiva por MEX con la máquina Prusa i3 MK3S que afectan la variabilidad de dimensiones longitudinales en una pieza.	1. Familiarización de uso de sistema de fabricación (Manipulación de boquillas, armado y desarmado de la MFA para incorporar el nuevo equipo) 2. Diseño y ejecución de experimentos preliminares para estudiar la resolución de la MFA (Elaboración de patrón, medición y conclusiones).	1. Estadística descriptiva 2. Análisis de regresión 3. Estudio R&R	1. Dominio práctico del sistema de FA 2. Identificación de variables prácticas que influyen en la dimensionalidad.
Adaptar una cámara de fabricación protectora y estabilizadora de las variables ambientales del proceso de fabricación aditiva para que se analice el efecto del ambiente.	1. Análisis de requisitos y condiciones del entorno de fabricación. 2. Bocetado y modelado del diseño. 3. Selección de materiales y componentes. 4. Corte y fabricación de las piezas.	1. Técnica multivoto 2. Software CAD 3. Software de programación del microcontrolador	1. Diseño verificado por expertos 2. Planos técnicos con dimensiones y especificaciones del diseño 3. Sistema de sensores funcional, calibrado y con datos mostrados en la interfaz gráfica

	<ol style="list-style-type: none"> <li>5. Ensamblaje de la estructura según el diseño.</li> <li>6. Ajuste y verificación de estabilidad y funcionalidad</li> <li>7. Ensamblaje y puesta en marcha de sensores y controladores (Instalación y pruebas de funcionamiento y calibración)</li> </ol>		4. Cámara de fabricación funcional
Determinar la mejor combinación de variables del proceso de fabricación aditiva que logran exactitud de dimensiones de una pieza según el procedimiento metodológico seguido	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Reconocimiento del problema</li> <li>2. Elección de los factores y niveles</li> <li>3. Selección de la variable respuesta</li> <li>4. Elección del diseño experimental</li> <li>5. Realización de los experimentos</li> <li>6. Análisis de los datos</li> <li>7. Conclusiones y recomendaciones</li> </ol>	1. Diseño factorial	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Lista de variables significativas en el proceso de FA</li> <li>2. Configuración óptima de variables para la MFA en uso</li> </ol>
Diseñar una estrategia de planificación para la fabricación de una pieza por medio de la tecnología de extrusión de material.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Diseñar una estrategia de planificación para la elaboración de una pieza</li> <li>2. Elaboración de artículo científico que exponga los resultados obtenidos</li> </ol>	1. Redacción científica	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Plan detallado que describa todos los procedimientos necesarios para asegurar la calidad dimensional de MFA</li> <li>2. Artículo científico que detalle los principales hallazgos obtenidos</li> </ol>

Descripción de la metodología:

1. Identificación teórica de variables del proceso de FA: A través de una revisión sistemática de la literatura y normas ISO/ASTM, se identifican las variables teóricas que inciden en la precisión dimensional lineal de piezas fabricadas por FA. Esta etapa fundamenta el marco conceptual del estudio.
2. Análisis práctico con la máquina Prusa i3 MK3S (MEX): Se realizan actividades experimentales y de familiarización con la MFA utilizada en el laboratorio. Luego, se identifican variables prácticas relevantes y se comprueba la capacidad del sistema de fabricación.
3. Diseño e implementación de la cámara de fabricación: Se desarrolla una estructura que protege el entorno de impresión y permite monitorear variables ambientales críticas, mejorando la estabilidad del proceso. Esto incluye diseño CAD, ensamblaje, calibración de sensores y validación funcional.
4. Determinación de la mejor combinación de variables: Se ejecuta un diseño factorial que permite identificar los factores más significativos que afectan la precisión dimensional. Para esto, se realiza el análisis estadístico de los datos para establecer configuraciones óptimas.
5. Diseño de una estrategia de planificación: Finalmente, se consolida todo el conocimiento generado en una estrategia estructurada para planificar la fabricación de piezas con exactitud dimensional. Esta estrategia se documenta en un artículo científico y en un plan operativo.

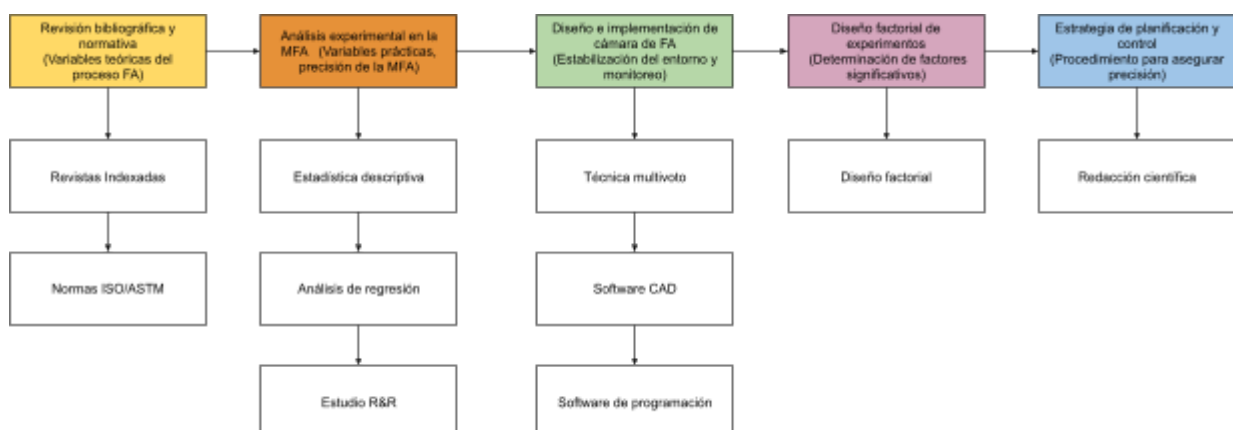


Figura No. 1. Diagrama de flujo de la metodología utilizada.

### III. MARCO TEÓRICO

#### A. Teoría respecto al desempeño dimensional en la fabricación aditiva

##### 1. Introducción

*Additive Manufacturing* (AM) o Fabricación Aditiva es una colección de tecnologías capaces de unir materiales para hacer objetos a partir de datos de modelos 3D (ASTM, 2012). los términos AM o impresión 3D (3DP) se usan indistintamente para hacer referencia a un proceso que involucra el diseño de la pieza, la preparación del material necesario a la tecnología de impresión, la impresión y el postprocesado del sólido impreso (Bourell, 2016). A diferencia de los procesos de manufactura tradicional, como el fresado, el torneado o la soldadura, con este método no se elimina material durante la creación, más bien se añade material, usualmente capa por capa; se pueden realizar piezas con materiales revolucionarios en menor tiempo, ya sea para la creación de prototipos o la fabricación de piezas personalizada o productos finales. La creación de prototipos permite a diseñadores, ingenieros y fabricantes perfeccionar los diseños obteniendo una primera imagen real o prototipo, verificar su forma, identificar los pequeños errores que pueden presentarse, verificar el cumplimiento de requisitos y su calidad en general, entre otras actividades. Se tiene la ventaja de que cualquier modificación en el diseño antes de producción en masa se puede controlar, no incurriendo en pérdida de esfuerzo, tiempo y dinero. La fabricación permite crear piezas intrincadas y complejas que de otra forma se tendrían que realizar en varios pasos, fomentando la sostenibilidad mediante la reducción de residuos y el consumo energético además de la reducción de tiempos de producción y costos debido al ahorro en material (Ergon et al., 2024).

A pesar de que hubo aportes importantes en lo que se entiende como fabricación aditiva desde 1860, como la idea de crear esculturas a partir de fotografiar a un objeto o una persona con varias cámaras por François Willème, no fue hasta la década de los 80's que se empezó a trabajar en la fabricación aditiva de manera industrial y, consecuentemente, comenzó una competencia entre diferentes marcas por generar tecnologías cada vez más eficientes en el uso de material y tiempo de impresión. Por ejemplo, Sony comercializó en 1988 una máquina que funcionaba a partir de polimerización de tina, mientras que Stratasys, fundada en 1988, produjo un aparato que se basaba en el principio de extrusión de material. Cabe destacar que el término "Impresión 3D" se popularizó en 1989 gracias a un aporte realizado en el Instituto Tecnológico de Massachusetts para describir un proceso proyección de aglutinante en una patente (Bourell et al., 2020). Hoy en día, AM es utilizada sobre todo

en ámbitos más técnicos o académicos, mientras que el término 3DP es utilizado en entornos más casuales (Bourell, 2016).

Estas tecnologías fueron evolucionando hasta identificar siete grupos, diferenciados entre sí por su mecanismo de acción, los cuales corresponden a (Bourell et al., 2020; Salmi, 2021; ISO/ASTM 52900, 2021):

1. Laminado de Hojas (SHL).
  - Considera Manufactura de Objetos Laminados (LOM) y Fabricación Aditiva Ultrasónica Aditiva (UAM).
2. Extrusión de Material (MEX).
  - Considera Modelado por Deposición Fundida (FDM) y Fabricación de Filamentos Fundidos (FFF).
3. Fusión de Lecho de Polvo (PBF).
  - Considera Sinterización Selectiva por Láser (SLS), Sinterización Directa por Láser de Metales (DMLS) y Fusión Selectiva por Láser (SLM).
4. Proyección de Aglutinante (BJT).
  - Considera Impresión ColorJet (CJP).
5. Deposición Energética Focalizada (DED).
  - Considera Conformación de Redes Diseñada con Láser (LENS) y Fabricación Aditiva por Haz de Electrones (EBAM).
6. Fotopolimerización en Tanque (VPP).
  - Considera Aparato de Estereolitografía (SLA), Litografía Axial Computarizada (CAL) y Proyección de Luz Digital (DLP).
7. Proyección de Material (MJT).
  - Considera PolyJet y Proyección de Nanopartículas (NJP).

Las secciones siguientes explicarán en general cada una de las siete tecnologías, para luego centrarse en las tecnologías de Fotopolimerización en Tanque y Extrusión de Material. El enfoque de explicación de estas tecnologías se centrará en la identificación de variables de producto y de proceso, que son fuente del aseguramiento de la calidad. La siguiente sección analizará esquemáticamente la tecnología como proceso, la identificación de variables, la forma de control y oportunidades de medición.

## **2. Normativa Vigente**

A fin de asegurar la calidad de los sólidos generados, la AM ha sido sometida a estudios que han dado como fruto estándares y normativas que buscan garantizar buenos resultados si

éstas son implementadas por los usuarios. Las normativas más relevantes para el presente estudio son:

#### ISO/ASTM 52900:2021

Titulada Fabricación aditiva - Principios generales - Terminología, esta norma establece la base terminológica y la clasificación de los procesos de AM. Su objetivo es proporcionar un lenguaje común y preciso para facilitar la comunicación y el desarrollo de estándares en la industria. Define la fabricación aditiva como el proceso de unión de materiales capa por capa para fabricar objetos a partir de datos de modelos tridimensionales, diferenciándose de los métodos sustractivos y conformativos tradicionales. Clasifica los procesos de AM en las siete categorías vistas. Además, la norma introduce términos técnicos clave relacionados con los materiales, el diseño, los parámetros de impresión y el postprocesado, como densidad de energía, tiempo de exposición, adhesión entre capas y soporte estructural. También especifica la importancia de la calidad, la seguridad y la validación de piezas fabricadas mediante AM, estableciendo una base para futuras regulaciones y estándares técnicos más detallados (International Organization for Standardization & ASTM International, 2021).

#### ISO/ASTM 52901:2017

La norma ISO/ASTM 52901 “Requisitos y Métodos de Evaluación en Fabricación Aditiva” establece los requisitos para la fabricación de piezas mediante fabricación aditiva, definiendo los criterios esenciales que deben cumplirse para garantizar la calidad y la confiabilidad del producto final. Entre estos criterios, se incluyen la especificación de la geometría de la pieza, las tolerancias dimensionales y geométricas, la textura superficial, el proceso de fabricación, la orientación de la impresión y las características de la materia prima. Además, la norma proporciona lineamientos sobre el almacenamiento, manejo y procesamiento de los materiales, así como el posible uso de materias primas recicladas conforme a ISO 52900 (International Organization for Standardization & ASTM International, 2017).

La norma establece que toda pieza fabricada mediante fabricación aditiva debe cumplir con una serie de requisitos específicos que garantizan su funcionalidad y calidad. Entre los elementos fundamentales a definir, se incluyen (International Organization for Standardization & ASTM International, 2017):

- Geometría de la pieza: Debe estar representada mediante un plano acotado y un archivo digital en un formato estándar compatible con los sistemas de fabricación

aditiva.

- Tolerancias: Se deben especificar tanto tolerancias generales, según ISO 2768-1 e ISO 2768-2, como tolerancias geométricas específicas conforme a ISO 1101, asegurando la precisión dimensional del producto final.
- Textura superficial: La rugosidad y otras características superficiales deben determinarse de acuerdo con ISO 1302 o ISO 25178-1, en función del uso previsto de la pieza.
- Proceso de fabricación: Se debe detallar el método de manufactura utilizado, incluyendo todos los pasos del proceso, desde la impresión hasta el postprocesado requerido para garantizar las propiedades mecánicas y estéticas de la pieza.
- Orientación de la fabricación: En los casos en los que la orientación de impresión pueda influir en las propiedades mecánicas o en la precisión dimensional, se debe especificar siguiendo los lineamientos de la norma ISO/ASTM 52921.
- Materia prima: Se deben indicar las características del material utilizado, sus requisitos de almacenamiento, manejo y procesado, y, si es aplicable, la posibilidad de uso de materiales reciclados, conforme a ISO 52900.

Los defectos identificados en una pieza pueden ser corregidos mediante métodos de reparación previamente acordados. La norma ISO 17296-3 establece diversas categorías de ensayo para evaluar la integridad de las piezas, y en función de los resultados, se pueden aplicar técnicas como la deposición de material, soldadura, encolado o pegado. La selección de un método de reparación debe ser aprobada por el cliente y cumplir con los requisitos específicos de la aplicación final (International Organization for Standardization & ASTM International, 2017).

Además, la norma enfatiza la necesidad de establecer criterios claros sobre las imperfecciones y desviaciones tolerables en las piezas fabricadas. Factores como grietas, discontinuidades, inclusiones, presencia de materiales extraños, decoloraciones o porosidad deben ser evaluados y acordados entre el proveedor y el cliente. Además, se deben definir procedimientos de inspección y métodos de ensayo adecuados para garantizar que las piezas cumplen con los estándares de calidad requeridos (International Organization for Standardization & ASTM International, 2017).

Ahora bien, para asegurar la estabilidad y consistencia del proceso de fabricación aditiva, es fundamental establecer requisitos de repetibilidad del proceso. La norma requiere la referencia a estándares internacionales o métodos de medición específicos que permitan evaluar la variabilidad en la producción, especialmente en pedidos de múltiples piezas o lotes sucesivos del mismo producto (International Organization for Standardization & ASTM International, 2017).

Cabe destacar que las características de las piezas deben cumplir con los lineamientos establecidos en la norma ISO 17296-3 o ASTM F 3122. Además, se debe especificar con precisión la función de la pieza, los métodos de inspección aplicables y los procesos de postprocesado requeridos para garantizar su desempeño óptimo en la aplicación prevista. Finalmente, la norma ISO/ASTM 52901 proporciona un marco integral para la fabricación aditiva, promoviendo la estandarización y fiabilidad en sectores críticos como la aeroespacial, automotriz y biomédica (International Organization for Standardization & ASTM International, 2017).

#### ISO/ASTM 52902:2019

La norma ISO/ASTM 52902, titulada "Fabricación aditiva – Métodos de ensayo no destructivos para piezas fabricadas mediante fabricación aditiva", establece los lineamientos para la evaluación de piezas producidas por procesos de impresión 3D sin causar daños ni alterar su estructura. Su propósito principal es garantizar la calidad, la integridad y la confiabilidad de las piezas impresas mediante la aplicación de técnicas de ensayo no destructivo (END), asegurando su idoneidad para aplicaciones en sectores críticos como la aeroespacial, la automotriz y la biomédica (International Organization for Standardization & ASTM International, 2019).

Entre los métodos de inspección aplicables a la fabricación aditiva, la norma define técnicas como la radiografía y la tomografía computarizada (CT) para la detección de porosidad, grietas o discontinuidades internas; el ultrasonido para evaluar la densidad y cohesión de las capas; los líquidos penetrantes y partículas magnéticas para revelar defectos superficiales en materiales metálicos; y la termografía infrarroja para identificar anomalías térmicas asociadas con imperfecciones internas o problemas de adhesión entre capas. La norma enfatiza la necesidad de seleccionar el método de inspección adecuado según el tipo de material (metales, polímeros o cerámicas), el proceso de fabricación utilizado (PBF, DED, FDM, SLA, entre otros) y los requisitos de desempeño de la pieza final. También proporciona directrices sobre la calibración y validación de los equipos de inspección, asegurando

mediciones precisas y repetibles, así como la interpretación de resultados y la documentación adecuada de los hallazgos (International Organization for Standardization & ASTM International, 2019).

Para garantizar la precisión de las mediciones, se recomienda utilizar el formato AMF debido a su capacidad para proporcionar un dimensionamiento más preciso del modelo 3D. Además, se establece que al menos cinco muestras deben ser impresas para que los ensayos sean estadísticamente significativos. Se debe cubrir al menos un 80 % del área de impresión para evaluar la variabilidad entre distintas ubicaciones y realizar múltiples impresiones en la misma localización para verificar la repetibilidad. En el caso de piezas largas, estas pueden ser necesarias para detectar defectos recurrentes entre capas (International Organization for Standardization & ASTM International, 2019).

Las piezas deben ser impresas sin escalado y aquellas partes con mayor probabilidad de fallar deben ubicarse en la parte superior de la estructura para minimizar su impacto en el resto del componente. La pieza tipo de ensayo debe dejarse enfriar a temperatura ambiente y ser medida inmediatamente después de ser retirada del sistema de fabricación, antes de cualquier postprocesado. Si las piezas se producen en una plataforma de fabricación, las mediciones deben realizarse sin separarlas de la plataforma, a menos que no sea posible, en cuyo caso debe especificarse. En caso de postprocesado, se deben realizar mediciones tanto antes como después del mismo (International Organization for Standardization & ASTM International, 2019).

#### Estrategias de medición por tipo de pieza

Pieza tipo lineal (International Organization for Standardization & ASTM International, 2019):

- Medición: Desde el plano A hasta la cara correspondiente.
- Estrategia: Imprimir una vez con el plano A paralelo al eje X para medir resolución en Y y otra paralelo al eje Y para medir resolución en X. También puede imprimirse perpendicular al plano XY para medir resolución en Z.
- Si se utilizan soportes, debe documentarse la información referente a ellos.

Pieza tipo circular (International Organization for Standardization & ASTM International, 2019):

- Medición: Diámetros en cada anillo (mínimo cinco mediciones) y circunferencia.

También se debe medir el espesor de la pared en al menos cinco ubicaciones.

- Estrategia: La superficie D debe ser perpendicular al plano de la resolución a medir. Por ejemplo, si se quiere evaluar la resolución en el eje Z, la superficie D debe ser perpendicular al plano XY.

Pieza tipo de eje Z (International Organization for Standardization & ASTM International, 2019):

- Medición: Desde el plano C hasta la altura del escalón correspondiente. También se pueden medir las alturas de los escalones individuales.
- Estrategia: Imprimir la pieza en orientación vertical.

Varillas de resolución (International Organization for Standardization & ASTM International, 2019):

- Medición: Principalmente los diámetros de las varillas, pero también alturas o cilindridad.
- Estrategia: Imprimir las varillas paralelas a cada eje de la máquina.
- Considerar posibles fallos de la varilla al diseñar la estrategia de impresión.

Orificios de resolución (International Organization for Standardization & ASTM International, 2019):

- Medición: Diámetro de los orificios, profundidades o cilindridad.
- Estrategia: Imprimir los orificios paralelos a cada eje de la máquina.
- Se debe tener en cuenta que algunos soportes pueden llenar agujeros.

Nervadura de resolución (International Organization for Standardization & ASTM International, 2019):

- Medición: Espesor de la nervadura (medición principal), longitud y altura de cada nervadura, rectitud de cada cara o perfil de los pilares.
- Estrategia: Imprimir en los ejes X y Y, pero no en Z debido a la falta de soporte estructural.

- Cualquier cambio en la nervadura debe ser documentado.

Ranura de resolución (International Organization for Standardization & ASTM International, 2019):

- Medición: Anchura de la ranura en varios puntos, longitud de cada ranura, rectitud y paralelismo de sus caras.
- Estrategia: Imprimir con las ranuras orientadas en los planos XZ y YZ.
- Documentar cualquier cambio que ocurra en la ranura.

Textura de la superficie (International Organization for Standardization & ASTM International, 2019):

- Medición: Perfil o área de cada superficie.
- Estrategia: Las mediciones deben ser perpendiculares a la disposición de la textura, con al menos tres repeticiones por medición.
- Minimizar la cantidad de soportes y aplicar la menor fuerza posible a la pieza durante la medición.
- Si se utiliza un equipo de medición por coordenadas, emplear un alto número de puntos.

Consideraciones generales para la disposición de piezas en una corrida (International Organization for Standardization & ASTM International, 2019):

- La base debe imprimirse paralela a la plataforma de fabricación.
- Minimizar el uso de soportes.
- Ordenar aleatoriamente la ubicación de las piezas en la plataforma.
- Aplicar estrategias de medición que minimicen la incertidumbre dentro de las restricciones del ensayo.

El cumplimiento de estos lineamientos garantiza la confiabilidad de los resultados obtenidos en los ensayos no destructivos para piezas fabricadas mediante fabricación aditiva, contribuyendo a la mejora de la calidad y el desempeño de los productos en diversos

sectores industriales (International Organization for Standardization & ASTM International, 2019).

#### ISO/ASTM 52903:2020

Dividida en dos partes (ISO/ASTM 52903-1:2020 e ISO/ASTM 52903-2:2020), establece los requisitos técnicos y las especificaciones para los materiales de fabricación aditiva mediante MEX, específicamente para procesos de 3DP basados en FFF, FDM. Su propósito es definir los parámetros clave que aseguran la calidad, consistencia y rendimiento de los materiales termoplásticos utilizados en estas tecnologías, incluyendo polímeros como PLA, ABS, PETG, PEEK y materiales compuestos con refuerzos de fibra de carbono o metales. La parte 1 de la norma proporciona las bases para la especificación de los materiales, detallando propiedades mecánicas, térmicas y reológicas necesarias para garantizar una extrusión uniforme y una adhesión óptima entre capas, así como requisitos de almacenamiento y manipulación para evitar degradación por humedad o temperatura. También establece pruebas de caracterización para evaluar el comportamiento del material, como resistencia a la tracción, módulo de elasticidad, temperatura de fusión y contracción térmica. Por su parte, la parte 2 se enfoca en la calidad de los productos fabricados, incluyendo criterios para la inspección de piezas impresas, su precisión dimensional, rugosidad superficial y resistencia mecánica en función de la orientación de impresión. Además, la norma define protocolos de ensayo para validar la reproducibilidad del proceso, asegurando que las propiedades finales del material sean consistentes y cumplan con los estándares de la industria. También incluye directrices para la optimización de parámetros de impresión, como temperatura del extrusor y de la cama, velocidad de impresión y patrones de relleno, con el fin de minimizar defectos como delaminación, warping y sub-extrusión (International Organization for Standardization & ASTM International, 2020).

#### ISO/ASTM 52905:2023

Titulada *Fabricación aditiva – Evaluación de la calidad de piezas fabricadas mediante fabricación aditiva utilizando ensayos no destructivos (END)*, establece directrices y metodologías para la inspección y validación de piezas impresas en 3D sin alterar su estructura ni afectar su funcionalidad. Su objetivo principal es garantizar que las piezas fabricadas mediante procesos de AM cumplan con los requisitos de calidad, seguridad y rendimiento en sectores críticos como la aeroespacial, automotriz, biomédica y fabricación industrial. La norma clasifica los distintos métodos de ensayos no destructivos (END) aplicables a AM según el tipo de material (metales, polímeros y cerámicas) y el proceso de

impresión utilizado, como PBF, DED, VPP y MEX. Entre los métodos END contemplados, se incluyen radiografía digital y CT-Scan para identificar defectos internos como porosidad, grietas o falta de fusión; ultrasonido por ondas de pulso o phased array para evaluar la densidad y continuidad estructural; líquidos penetrantes y partículas magnéticas para detectar fisuras superficiales en piezas metálicas; termografía infrarroja para analizar la distribución térmica y la presencia de defectos ocultos; y espectroscopia óptica o análisis de superficie para verificar la precisión geométrica y el acabado de las piezas. Además, la norma proporciona lineamientos para la selección del método de inspección más adecuado según los requerimientos de la aplicación, estableciendo criterios de aceptación y rechazo de piezas con base en su desempeño mecánico, dimensional y estructural. También aborda aspectos clave como la calibración de los equipos de ensayo, la validación de los resultados y la documentación estandarizada de los hallazgos, garantizando la trazabilidad del proceso de inspección (International Organization for Standardization & ASTM International, 2023).

#### ISO/ASTM 52906:2023

Titulada *Fabricación aditiva – Directrices para la evaluación de defectos en piezas metálicas fabricadas mediante fabricación aditiva*, establece un marco técnico para la identificación, clasificación y evaluación de defectos en componentes metálicos impresos en 3D, asegurando su calidad y fiabilidad en aplicaciones críticas. Su principal objetivo es definir los criterios de inspección y los tipos de discontinuidades que pueden surgir durante los procesos de fabricación aditiva basados en PBF y la deposición de energía dirigida (DED, Directed Energy Deposition), los cuales son ampliamente utilizados en sectores como la industria aeroespacial, automotriz, médica y energética. La norma describe y categoriza los defectos más comunes, incluyendo porosidad debida a falta de fusión o atrapamiento de gas, grietas térmicas causadas por tensiones residuales, falta de adherencia entre capas, contaminación por partículas no deseadas, desviaciones dimensionales y rugosidad superficial excesiva. Además, proporciona directrices para la aplicación de ensayos destructivos y no destructivos (END), tales como radiografía digital, CT-Scan, ultrasonido, inspección óptica y microscopía electrónica, con el fin de detectar y cuantificar estos defectos, estableciendo criterios de aceptación o rechazo según los requerimientos específicos de cada aplicación. También aborda la importancia del control de parámetros de proceso, como la potencia del láser o haz de electrones, la velocidad de escaneo, la distribución del polvo metálico y la estrategia de solidificación, ya que estos factores influyen directamente en la generación de defectos. Asimismo, la norma recomienda estrategias de mitigación, como la optimización de parámetros de impresión, el tratamiento térmico

posterior para reducir tensiones y mejorar la microestructura, y la calibración periódica de los equipos de impresión y de inspección (International Organization for Standardization & ASTM International, 2023).

#### ISO/ASTM 52910:2018

Titulada *Fabricación aditiva – Principios y requisitos para el diseño para fabricación aditiva (DfAM)*, proporciona una guía integral para el diseño de piezas y productos optimizados para impresión 3D, estableciendo principios clave para maximizar la eficiencia, calidad y viabilidad del proceso. Su objetivo principal es definir las consideraciones de diseño específicas de la AM, diferenciándose de los enfoques tradicionales de fabricación sustractiva o conformativa, permitiendo así la creación de geometrías complejas, estructuras ligeras y componentes personalizados sin las restricciones de los métodos de fabricación convencionales. La norma aborda aspectos fundamentales como la optimización topológica, que permite reducir peso y material sin comprometer la resistencia mecánica, el diseño de estructuras de soporte, esenciales en procesos como PBF y VPP, y la orientación de impresión, que influye en la resistencia mecánica, el acabado superficial y la adhesión entre capas. También destaca la importancia de la selección de materiales, considerando sus propiedades térmicas, mecánicas y de procesamiento, así como el impacto del diseño en la eficiencia del postprocesado, incluyendo la eliminación de soportes, el tratamiento térmico y el acabado superficial. La norma recomienda el uso de software de simulación y validación para prever deformaciones, tensiones residuales y errores dimensionales, asegurando que el diseño final sea adecuado para la fabricación aditiva. Además, enfatiza la necesidad de adoptar un enfoque iterativo en el diseño, integrando criterios de manufacturabilidad desde la fase conceptual hasta la producción final, y promoviendo la colaboración entre diseñadores, ingenieros y fabricantes (International Organization for Standardization & ASTM International, 2018).

La norma tiene una relación directa con las tolerancias y ajustes de precisión, ya que orienta a los diseñadores en la aplicación de criterios adecuados para garantizar la funcionalidad y ensamblaje de piezas impresas en 3D. A diferencia de los procesos tradicionales, donde las tolerancias de ajuste están bien definidas en normas como ISO 286 (sistemas de ajustes y tolerancias) o ASME Y14.5 (GD&T), la fabricación aditiva presenta desafíos adicionales debido a la variabilidad dimensional, la anisotropía del material y la rugosidad superficial derivada de la deposición capa por capa. Por tanto, ISO/ASTM 52910 recomienda estrategias de diseño que consideran estas limitaciones, como la compensación geométrica en modelos CAD, la orientación óptima de la pieza para minimizar desviaciones y la

inclusión de márgenes adicionales para postprocesado (mecanizado o lijado). Además, enfatiza la importancia de seleccionar tecnologías AM adecuadas según los requerimientos de tolerancia, dado que procesos como PBF pueden alcanzar tolerancias más estrictas tras un tratamiento térmico y acabado, mientras que tecnologías como MEX requieren ajustes mayores para cumplir con especificaciones de precisión. En síntesis, la ISO/ASTM 52910 establece un marco de diseño que integra criterios de tolerancias y ajustes de precisión en fabricación aditiva, permitiendo a los diseñadores optimizar sus piezas desde la etapa conceptual para cumplir con los estándares industriales y garantizar ensamblajes funcionales sin necesidad de ajustes excesivos en el postprocesado (International Organization for Standardization & ASTM International, 2018).

### **3. Descripción de las tecnologías**

#### **3.1. Laminado de Hojas (SHL)**

La SHL es una técnica de manufactura que utiliza hojas metálicas como material base. Emplea una fuente de energía localizada, como pueden ser ultrasonidos o láser, para unir capas cortadas con precisión y formar objetos tridimensionales. Uno de los métodos de SHL más utilizados es la UAM, que une las hojas mediante ondas ultrasónicas y presión mecánica a temperatura ambiente, logrando unir las láminas por difusión en lugar de fusión. La estructura y propiedades mecánicas de las partes fabricadas por SHL dependen del proceso de unión, así como de las microestructuras formadas en las interfaces. La unión se logra mediante deformación por cizalla y recristalización dinámica en áreas localizadas. Además, existen factores como la amplitud de vibración y la resistencia del metal afectan las temperaturas alcanzadas. Los productos de ésta tecnología suelen ser duros, resistentes al desgaste y tener alta resistencia a la compresión y tracción, pero muestran debilidades en la dirección de acumulación debido a bandas de cizalla y micro vacíos preexistentes (Kumar et al., 2024; Zhang et al., 2017).

Entre los materiales que se emplean en SHL se encuentran (Kumar et al., 2024):

- Metales: Láminas de metales tales como el acero, cobre, aluminio, latón, alpaca, plomo y estaño, entre otros. Estos materiales son utilizados en procesos de laminación en frío, donde se emplean cilindros de acero forjados con tratamiento térmico para conferirles una gran dureza superficial. Son utilizados en la fabricación de herramientas y soldadura de polímeros.

- Papel: Láminas de papel que se unen mediante adhesivos para formar estructuras tridimensionales. Es funcional para prototipado rápido, piezas aislantes, modelos y maquetas educativas.
- Plásticos: Láminas de plástico que se cortan y unen. Este método es utilizado en ciertas variantes de la tecnología de SHL. Son utilizados para fabricar diversas piezas de vehículos, así como implantes, prótesis y piezas que deben ser livianas pero resistentes.

Antes del proceso de laminación, las hojas son cortadas siguiendo una cierta geometría y, opcionalmente, se pulen al final para mejorar el acabado. Luego, durante el proceso UAM, las hojas metálicas se apilan sobre una base y un sonotrodo, controlado digitalmente, aplica vibración ultrasónica y presión para unir las capas por capa. Este proceso genera calor por fricción, lo que requiere periodos de enfriamiento entre capas para evitar tensiones térmicas. Una vez terminadas todas las capas, el objeto se corta de la base y se pule (Zhang et al., 2017).

La atención a algunas variables de proceso son importantes para la obtención de resultados, tales como:

- El material base determina el acabado final de la pieza, ya que las láminas deben ser fáciles de enrollar, prensar y cortar. Además, se puede ajustar el espesor de la lámina para influir en la resolución y las propiedades mecánicas. También, se puede modificar la composición de la lámina añadiendo partículas reforzantes o nanofillers (Kumar et al., 2024).
- Es posible utilizar métodos de unión como adhesivos térmicos, ultrasonidos, láseres y polímeros en polvo, los cuales afectan la durabilidad y resistencia al deslaminado. Además, se puede variar la temperatura de unión para evitar deformaciones o delaminación, así como la presión aplicada, que asegura una buena adhesión entre láminas (Zhang et al., 2017; Alammari et al., 2022).
- Se puede modificar el ángulo de apilamiento de las fibras para mejorar las propiedades anisotrópicas de la pieza, así como alterar el tamaño del área de corte para determinar la forma y tamaño final de la misma (Zhang et al., 2017).
- Es posible cambiar la velocidad de corte para optimizar la precisión y el tiempo, así como también la velocidad de deposición, pero esto puede afectar la calidad y la productividad. Además, el ciclo térmico de procesamiento puede ajustarse para

reducir tensiones térmicas, mientras que el grado de compactación puede controlarse para disminuir la porosidad entre capas (Zhang et al., 2017).

- Finalmente, cabe destacar que se podría modificar parámetros más complejos como la secuencia de apilamiento para una mejor resistencia estructural, la densidad de fibras para equilibrar peso contra resistencia y la trayectoria de deposición para confeccionar piezas con geometrías intrincadas (Zhang et al., 2017).

### **3.2. Extrusión de Material (MEX)**

En MEX, un material compuesto por un material plástico, polimérico o una mezcla de polvo metálico y aglutinantes poliméricos es calentado hasta que se ablanda y se extruye a través de una boquilla. El material extruido se deposita capa por capa sobre una cama de impresión según un diseño CAD para formar una pieza tridimensional (Braconnier et al., 2020; Suwanpreecha & Manonukul, 2022).

En general, se utilizan dos familias de materiales:

- Metales y aleaciones: Se pueden utilizar tipos de acero inoxidable como el 316L, que es ampliamente utilizado debido a su resistencia a la corrosión y buenas propiedades mecánicas o el 17-4PH con propiedades de alta resistencia y durabilidad, lo que lo hace adecuado para aplicaciones industriales y aeroespaciales. También se puede utilizar el titanio Ti-6Al-4V, que es utilizado en aplicaciones médicas y aeroespaciales debido a su excelente relación resistencia-peso y biocompatibilidad. Además, se utilizan aleaciones de níquel, pues son adecuadas para entornos de alta temperatura y resistencia a la corrosión. Por otra parte, se tiene el aluminio, que es usado principalmente para piezas ligeras con buenas propiedades mecánicas. También se tiene el cobre, ideal para aplicaciones que requieren alta conductividad térmica o eléctrica. Y, finalmente, el bronce y otros metales, pues algunas variantes comerciales de filamentos combinan bronce u otros metales para crear acabados decorativos y funcionales (Suwanpreecha & Manonukul, 2022).
- Plásticos: Los materiales típicos son el PLA (Ácido Poliláctico), que es biodegradable y fácil de usar; el ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno), que es resistente al impacto y al calor, el PETG (Polietileno Tereftalato Glicol), que es transparente y fuerte; el TPU (Poliuretano Termoplástico), que es flexible y elástico y el nylon, que es resistente al desgaste y con buena durabilidad (Braconnier et al., 2020).

Las etapas del proceso de impresión para esta tecnología varían si se utilizan materiales metálicos o plásticos, tal que:

- Metales y aleaciones: El proceso de impresión por extrusión de material metálico consta de cuatro etapas principales: preparación del material, impresión 3D, desaglutinado y sinterización. Primero, se prepara una mezcla de polvo metálico de alta pureza y aglutinantes poliméricos, que otorgan viscosidad para la extrusión y aseguran una alta densidad tras la sinterización, convirtiéndose en filamentos, pellets o pasta. Luego, la impresora deposita el material capa por capa para formar la "pieza verde", que tiene baja resistencia mecánica y una alta proporción de aglutinante. En el desaglutinado, se eliminan los aglutinantes mediante métodos químicos o térmicos, dejando una "pieza marrón" porosa y frágil. Finalmente, en la sinterización, la pieza marrón se calienta a temperaturas cercanas al punto de fusión del metal en una atmósfera controlada, logrando la unión de partículas metálicas por difusión sólida, con una densidad cercana al 100%, alta resistencia mecánica y propiedades similares a las piezas metálicas fabricadas por métodos tradicionales, aunque con una contracción dimensional del 15-20% (Suwanpreecha & Manonukul, 2022).
- Plásticos: Dentro de la impresora, el filamento es alimentado hacia un cabezal de impresión que contiene un *hotend* (zona caliente). En esta zona, el plástico se calienta hasta su punto de fusión, típicamente entre 180 °C y 260 °C, dependiendo del material. Luego, el material fundido se extruye a través de una boquilla, depositándolo de forma precisa sobre una cama de impresión. Así, una vez que una capa se deposita, el material se enfría y solidifica rápidamente, de manera que luego la boquilla o la cama se ajustan en altura para comenzar la siguiente capa, permitiendo la construcción del objeto. De esta forma, la unión de las capas ocurre mediante la fusión parcial del material recién depositado con la capa anterior. Cabe destacar que el movimiento del cabezal y la cama está controlado por sistemas de motores (generalmente cartesiano o tipo delta) para seguir las trayectorias definidas por un modelo CAD (Braconnier et al., 2020).

Las principales variables a tener en cuenta en el proceso de impresión son:

- Si el material está compuesto por una mezcla de polvo metálico y un aglutinante polimérico, es crucial mantener una proporción adecuada para garantizar una extrusión uniforme y evitar problemas durante el sinterizado. Además, debe haber una distribución uniforme de partículas metálicas, ya que esto mejora la densidad de

la pieza sinterizada y reduce los defectos como porosidad o agrietamiento. También se debe mencionar que la carga de polvo metálico en el filamento afecta directamente la densidad y las propiedades mecánicas de la pieza final (Braconnier et al., 2020).

- La viscosidad del material fundido debe controlarse para asegurar una extrusión continua y uniforme, especialmente durante el llenado de geometrías complejas. Además, la temperatura del cabezal debe ser lo suficientemente alta como para fundir el aglutinante sin degradarlo y garantizar una buena adhesión entre las capas. Un control deficiente puede causar problemas de extrusión, deformación o separación de capas (Braconnier et al., 2020).
- La velocidad de extrusión y el desplazamiento del cabezal influyen en la uniformidad de la deposición del material, ya que una velocidad demasiado alta puede comprometer la precisión, mientras que una velocidad demasiado baja puede generar un exceso de acumulación de material. Por otra parte, la altura de la capa determina la resolución vertical de la pieza y su tiempo de construcción, pues a alturas de capa más pequeñas resultan en mayor detalle, pero aumentan el tiempo de impresión (Braconnier et al., 2020).
- También se debe controlar la cantidad de material extruido, también conocido como densidad de relleno, ya que una mayor densidad mejora la resistencia mecánica, pero requiere más tiempo; sin embargo, es esencial evitar los excesos, pues como se pueden tener defectos como subextrusión (espacios vacíos entre capas) o sobreextrusión (exceso de material que afecta la precisión dimensional) (Solomon et al., 2021). El tiempo de enfriamiento también debe ser controlado para evitar tensiones residuales y deformaciones en la pieza impresa. Por otra parte, controlar la orientación de la impresión influye en su resistencia mecánica y acabado superficial. Por ejemplo, orientaciones longitudinales pueden reducir los esfuerzos residuales y mejorar la calidad de la superficie. Así, la planificación de la orientación adecuada es esencial para optimizar las propiedades finales de la pieza (Suwanpreecha & Manonukul, 2022).
- El desaglutinado elimina el aglutinante del filamento antes del sinterizado, por lo que variables como la temperatura y el tiempo de desaglutinado son críticas para evitar la formación de grietas o colapsos estructurales en la pieza verde. Por su parte, durante el sinterizado, las partículas metálicas se fusionan para densificar la pieza. Por tanto,

es esencial controlar la temperatura de sinterizado, ya que debe estar por debajo del punto de fusión del metal, pero lo suficientemente alta para permitir la unión de partículas; el tiempo de sinterizado, pues tiempos insuficientes resultan en piezas con baja densidad y propiedades mecánicas deficientes, mientras que tiempos excesivos pueden provocar deformaciones y la atmósfera de sinterizado, ya que el uso de atmósferas controladas (por ejemplo, vacío o gas inerte) evita la oxidación del material metálico (Braconnier et al., 2020).

- Otros parámetros a controlar son los soportes y estructuras auxiliares, puesto que las geometrías complejas requieren estructuras de soporte que deben optimizarse para evitar deformaciones y facilitar su remoción tras la impresión. Además, se debe verificar la contracción durante el sinterizado, pues, como se mencionó, las piezas experimentan una contracción significativa (entre 15% y 20%) debido a la eliminación del aglutinante y la densificación. Es necesario prever esta reducción dimensional en el diseño inicial. En adición, se debe asegurar la estabilidad de los parámetros de impresión y la correcta calibración de la impresora son cruciales para evitar desviaciones en las dimensiones de la pieza (Suwanpreecha & Manonukul, 2022).
- Otro aspecto a verificar es el porcentaje de relleno, ya que es un indicador de la densidad interna de la pieza. Un mayor porcentaje de relleno proporciona más resistencia mecánica, mientras que un menor porcentaje reduce el peso y el tiempo de impresión. La selección del porcentaje adecuado depende del uso previsto de la pieza y de las propiedades mecánicas deseadas. Adicionalmente, se debe controlar la temperatura de la cama de impresión, ya que una cama calentada ayuda a mejorar la adhesión de la primera capa y reduce la deformación (warping) durante la impresión. Importante recalcar que la temperatura óptima varía según el material utilizado y debe ajustarse para asegurar una base sólida para la construcción de la pieza (Suwanpreecha & Manonukul, 2022).
- El ángulo de raster, que es la dirección de deposición del material en el plano XY también afecta a la fabricación; afecta significativamente la resistencia mecánica, pues  $0^\circ$  da mayor resistencia, mientras  $45-90^\circ$  son más débiles. Por otra parte, se debe controlar el patrón de relleno, que consiste en el diseño interno de la pieza (ej. hexagonal), ya que diferentes patrones impactan las propiedades mecánicas como tracción o compresión. (Solomon et al., 2021).

- Otros factores a considerar son: El ancho de raster, es el ancho del camino de material depositado y se ve influenciado por el diámetro de la boquilla; mayor ancho reduce el tiempo de construcción; el diámetro de la boquilla, que consiste en el tamaño de la abertura por donde sale el material y afecta el ancho de la pasada, la presión y el tiempo de extrusión, pues un diámetro mayor reduce el tiempo, pero puede afectar la precisión geométrica; el ancho de contorno, que consiste en el ancho de la capa perimetral de la pieza, el número de contornos, el cual es la cantidad de capas perimetrales, por lo que mayor número de contornos mejora la resistencia a la flexión al soportar directamente la carga y el espacio de aire, que corresponde a la distancia entre las líneas de material depositado y puede ser cero (contacto), positivo (separación, para mayor rapidez de impresión), o negativo (superposición, para mayor densidad de la pieza), aunque se debe destacar que un espacio de aire negativo puede empeorar la rugosidad superficial (Solomon et al., 2021)..

### **3.3. Fusión de Lecho de Polvo (PBF)**

La PBF es una de las técnicas de FA más avanzadas y utilizadas para la fabricación de componentes metálicos, plásticos y cerámicos. Este método se basa en la fusión selectiva de partículas de polvo dentro de un lecho de material, utilizando fuentes de energía como láseres o haces de electrones. Su capacidad para producir geometrías complejas con alta precisión ha hecho de la PBF una tecnología clave en sectores como la aeroespacial, automotriz y médica (Singh et al., 2020).

Las principales familias de materiales a usar en dicha tecnología son:

- Polímeros: Los polímeros termoplásticos, como el poliamida (PA) y el poliamida con relleno de fibra de vidrio o carbono, así como el polipropileno y la polieteretercetona, son ampliamente utilizados debido a su buena procesabilidad y propiedades mecánicas. Estos materiales permiten la producción de piezas con alta precisión y son adecuados para aplicaciones en prototipos funcionales y componentes finales (Goodridge & Ziegelmeier, 2017).
- Metales: Las aleaciones metálicas son esenciales en aplicaciones que requieren alta resistencia y durabilidad. Algunos de los metales comúnmente utilizados en PBF son el acero inoxidable, el cual ofrece resistencia a la corrosión y buenas propiedades mecánicas, adecuado para aplicaciones en la industria médica y alimentaria; las aleaciones de titanio, que son conocidas por su alta relación resistencia-peso y

biocompatibilidad, son ideales para aplicaciones aeroespaciales y médicas; las aleaciones de aluminio, pues destacan por su ligereza y buena conductividad térmica, utilizadas en la industria automotriz y aeroespacial; también se utilizan aleaciones de níquel, pues son resistentes a altas temperaturas y corrosión, por lo que son empleadas en aplicaciones industriales y aeroespaciales (Chowdhury et al., 2022).

- Cerámicas: Las cerámicas, como la alúmina y la zirconia, se utilizan en PBF para aplicaciones que requieren alta dureza, resistencia al desgaste y estabilidad térmica. Sin embargo, procesar cerámicas mediante PBF es más desafiante debido a sus altas temperaturas de fusión y fragilidad inherente (Chowdhury et al., 2022).

El proceso de PBF sigue una serie de etapas clave, en las que primero el objeto a fabricar se diseña utilizando un software CAD (Diseño Asistido por Computadora), el cual se convierte en un archivo STL y se "corta" en capas horizontales finas, guiando el movimiento de la fuente de energía durante la impresión. Luego, una delgada capa uniforme de polvo (generalmente de 20 a 100 micrones de espesor) se extiende sobre una plataforma de construcción mediante un rodillo o una cuchilla niveladora. Es importante destacar que el polvo puede ser metálico, polimérico o cerámico, dependiendo de la aplicación y el tipo de PBF utilizado. Una vez ocurrido esto, un láser o haz de electrones enfocado funde selectivamente el polvo en áreas específicas según el diseño digital. Así, la energía térmica provoca que las partículas de polvo se fundan y solidifiquen, formando una capa del objeto. Una vez completada la fusión de la capa, la plataforma de construcción se baja ligeramente, y se añade una nueva capa de polvo sobre la anterior. Cuando se termina la impresión, la pieza se extrae del lecho de polvo no fusionado. Este polvo no utilizado puede reciclarse para futuros ciclos de impresión. Luego, se aplican procesos secundarios, como tratamientos térmicos, mecanizado, o acabados superficiales, para optimizar las propiedades y apariencia de la pieza final (Singh et al., 2020).

Existen variables de proceso para esta tecnología que influyen en el acabado final de la pieza, las cuales corresponden a (Singh et al., 2020):

- Primero hay que tener en cuenta las propiedades del material, ya que controlar el tamaño y distribución de partículas es importante, ya que partículas más pequeñas mejoran la resolución y compactación del lecho, pero pueden reducir la fluidez, además de que una distribución uniforme mejora la densidad de las piezas. La forma de las partículas también entra en juego, ya que las partículas esféricas ofrecen

mejor fluidez y compactación en comparación con partículas irregulares. Por otra parte, una mayor densidad aparente del polvo contribuye a una mejor calidad de la pieza impresa. También, cabe destacar que si hay presentes impurezas o contaminantes pueden afectar las propiedades mecánicas y causar defectos. Adicionalmente, cabe destacar que no se recomienda reutilizar el polvo, ya que el uso repetido del polvo puede afectar sus propiedades físicas y químicas (oxidación, contaminación).

- Por otra parte, se debe determinar la cantidad de energía entregada al polvo para la fusión, pues potencias insuficientes provocan falta de fusión, mientras que potencias excesivas generan defectos térmicos. Además, la velocidad de escaneo afecta la cantidad de energía aplicada en cada punto, pues velocidades altas pueden provocar falta de fusión, mientras que velocidades bajas pueden causar sobrecalentamiento. Otro aspecto es el tamaño del punto del láser (spot size), puesto que éste influye en la resolución y precisión de los detalles de la pieza. Por otra parte, la estrategia de escaneo (como líneas paralelas, zig-zag o patrones alternos) afecta la distribución del calor y las tensiones residuales, mientras que el espesor de la capa también entra en juego, ya que capas más delgadas ofrecen mayor resolución, pero incrementan el tiempo de fabricación. En fin, se debe buscar la combinación óptima de potencia, velocidad de escaneo, tamaño del láser y espesor de capa, pues esto influye en la densidad y calidad de la fusión.
- La orientación de la pieza también es importante, ya que afecta la distribución de las tensiones térmicas, la calidad superficial y el tiempo de construcción. Por otra parte, la temperatura del lecho de polvo resulta relevante, pues temperaturas controladas minimizan deformaciones y tensiones térmicas en la pieza. Adicionalmente, se debe buscar estabilidad térmica, pues las fluctuaciones de temperatura en el lecho o en el entorno pueden generar defectos como agrietamiento o distorsión. Finalmente, el uso de gases inertes (como argón o nitrógeno) evita la oxidación del material durante la fusión.
- Aunado a lo anterior, se debe buscar que el lecho sea uniforme, pues esto asegura una fusión homogénea y reduce defectos. Además, compactar el polvo influye en la densidad del material fundido y la estabilidad dimensional de las piezas. Seguidamente, se debe tener en cuenta la presencia de los soportes, ya que las geometrías complejas requieren soportes que influyen en la distribución térmica y el tiempo de construcción. Últimamente, es importante destacar que puede que se

necesiten ajustes por contracción y distorsión, lo cuales dependen de las propiedades térmicas del material y el diseño de la pieza.

### **3.4. Proyección de Aglutinante (BJ)**

El BJT utiliza un agente aglutinante líquido para unir selectivamente partículas de polvo en un lecho. Este proceso es adecuado para la fabricación de piezas de geometrías complejas con una amplia gama de materiales, incluyendo metales, cerámicas, polímeros y sus compuestos (Li et al., 2020).

La tecnología de BJT permite trabajar con una amplia variedad de materiales, incluidos metales, cerámicos, polímeros y sus compuestos. Entre los metales, los más investigados son el hierro puro y aleaciones ferrosas, níquel y sus aleaciones, titanio y sus aleaciones, cobre, y acero inoxidable (como 316L, 420, y 17-4PH). Además, algunos investigadores han trabajado con materiales compuestos de matriz metálica y cermets, que combinan la estabilidad térmica de los cerámicos con la ductilidad de los metales. Estos materiales son versátiles, pues son utilizados desde la fundición de metales en la forma de moldes y núcleos, hasta implantes y prótesis en la industria médica (Li et al., 2020).

El proceso de impresión comienza con la preparación del lecho de polvo, donde se distribuye una capa uniforme de material sobre una plataforma. Luego, un cabezal deposita selectivamente aglutinante líquido según el diseño CAD, formando una pieza "verde" capa por capa. Posteriormente, se realiza el postprocesado, que incluye la limpieza del polvo suelto, el secado y curado para fortalecer la pieza, el desaglutinado para eliminar el aglutinante residual y el sinterizado para densificar el material y mejorar sus propiedades mecánicas. Opcionalmente, se aplican técnicas adicionales como infiltración o prensado isostático en caliente para optimizar la densidad final (Li et al., 2020).

Las principales variables a controlar para asegurar un buen procesado de las piezas son (Li et al., 2020):

- Primero, se debe tener en cuenta el tamaño de las partículas, ya que afecta la fluidez del polvo, la densidad del lecho y la capacidad de sinterización, de tal manera que polvos más finos tienen mayor área superficial, lo que mejora la sinterización pero reduce la fluidez, pudiendo generar problemas de aglomeración. Por ejemplo, polvos con tamaños de partículas más pequeños ( $<20 \mu\text{m}$ ) tienden a presentar baja densidad en verde debido a dificultades de esparcimiento. Adicionalmente, una distribución amplia del tamaño de partícula mejora el empaquetamiento del polvo,

aumentando la densidad del lecho y la densidad en verde, por lo que mezclar partículas grandes y pequeñas puede optimizar la densidad de las piezas impresas.

- La morfología de las partículas también afecta, pues los polvos esféricos son preferidos debido a su mejor fluidez y empaquetamiento. Las partículas irregulares dejan más poros en la pieza verde, afectando negativamente la densidad final. Además, densidades de polvo más altas permiten una mayor densidad inicial en el lecho y en las piezas verdes, reduciendo la contracción durante el sinterizado.
- Por otra parte, el aglutinante debe ser compatible con el polvo para garantizar una buena adhesión, ya que la humectabilidad y la capacidad de permeación son esenciales para formar piezas verdes resistentes. Además, la descomposición térmica del aglutinante debe ocurrir a temperaturas inferiores al rango de sinterización para evitar residuos que alteren la microestructura. Otro aspecto a tener en cuenta es la saturación del aglutinante, que corresponde al volumen de aglutinante depositado en los espacios vacíos del lecho de polvo, ya que un valor insuficiente (sub-saturación) provoca una unión débil, mientras que el exceso (sobre-saturación) puede generar sangrado y pérdida de precisión geométrica.
- Otro factor son los recoaters, o esparcidores del polvo, ya que el tipo (rodillos o cuchillas) y su velocidad influyen en la uniformidad del lecho de polvo. Se sabe que recoaters de rodillos contrarrotativos generan lechos más densos y uniformes. Por otra parte, un grosor de capa adecuado, generalmente 2-3 veces el tamaño de partícula, asegura un buen empaquetamiento y reduce defectos en las capas.
- Adicionalmente, la velocidad de impresión también afecta, pues velocidades más altas pueden reducir la calidad dimensional debido a depósitos irregulares de aglutinante, mientras que velocidades más bajas aumentan el tiempo de construcción pero mejoran la precisión. También, la orientación de la pieza en el plano de construcción afecta la densidad en verde, así como la contracción durante el sinterizado.
- Respecto al post-procesado, el aglutinante debe eliminarse completamente antes del sinterizado, lo cual se logra calentando las piezas verdes a temperaturas bajas (175–450 °C) en atmósferas controladas para evitar oxidación. Por otra parte, se tiene la temperatura de sinterizado, que es el parámetro más crítico, pues temperaturas más altas promueven la densificación mediante difusión atómica, pero excesos pueden causar distorsión o colapso. Además, se debe considerar el tiempo

de sinterizado, puesto que tiempos más largos permiten un mayor crecimiento de los cuellos entre partículas, aumentando la densidad, pero pueden provocar un crecimiento de grano excesivo. En otro aspecto, se debe considerar la atmósfera de sinterizado, pues atmósferas de gas inerte (argón) o de vacío son utilizadas para evitar la oxidación. En algunos casos, se emplean atmósferas reductoras (hidrógeno) para eliminar contaminantes como óxidos.

- Finalmente, se tienen las técnicas de densificación como la infiltración, que consiste en introducir un metal líquido (como bronce) en la pieza durante o después del sinterizado, lo que aumenta significativamente la densidad final. También, se puede incorporar partículas de menor punto de fusión (como nitruros o boruros) para facilitar la formación de fases líquidas que mejoran la densificación.

### **3.5. Deposición Energética Dirigida (DED)**

La DED utiliza una fuente de energía focalizada, como un láser, un haz de electrones o un arco de plasma, para fundir el material mientras se deposita sobre un sustrato. Este proceso permite la construcción de estructuras tridimensionales complejas capa por capa, ofreciendo ventajas significativas en la reparación de componentes y la fabricación de piezas con geometrías intrincadas, ya que su capacidad para añadir material de manera controlada permite restaurar dimensiones originales de componentes críticos en industrias como la aeroespacial y la energética. Para poder hacer el fundido del metal, se pueden emplear distintas fuentes de energía, como láseres, haces de electrones y arcos de plasma, pues la elección de la fuente depende del material a procesar y de las especificaciones del componente a fabricar (Dass & Moridi, 2019).

En esta tecnología, los materiales utilizados incluyen principalmente metales y aleaciones, pero también pueden procesarse algunos materiales compuestos y cerámicos dependiendo de la configuración del sistema. Dentro de los metales y aleaciones metálicas se encuentra el acero inoxidable 316L, 17-4PH y otros; las aleaciones de titanio Ti-6Al-4V y otras, utilizadas en aplicaciones aeroespaciales y biomédicas; aleaciones de níquel como Inconel 625, Inconel 718, y otras resistentes a la corrosión y altas temperaturas; aleaciones de aluminio: Series 2000 y 7000, las cuales son empleadas en industrias como la automotriz y aeroespacial; aleaciones de cobalto-cromo, que son usadas en aplicaciones médicas como prótesis; cobre y sus aleaciones por su alta conductividad térmica y eléctrica y metales refractarios como el tungsteno, molibdeno, y tantalio, que son ideales para entornos de alta temperatura. También se utilizan materiales compuestos, que consisten en combinaciones

de metales y cerámicos para mejorar propiedades como resistencia al desgaste y estabilidad térmica, así como materiales cerámicos, los cuales son limitados en comparación con los metales e incluyen algunos óxidos cerámicos, los cuales llegan a ser utilizados en aplicaciones experimentales. Estos materiales son principalmente utilizados para la reparación y mantenimiento de componentes industriales en la industria manufacturera (Ahn, 2021).

Dentro de las etapas necesarias para conformar una pieza, primero se tiene que crear un diseño CAD que define la geometría de la pieza, el cual se traducirá en un archivo que guía los movimientos del cabezal de la DED. Luego, se da la deposición del material de aporte, el cual se alimenta de manera controlada al área de trabajo, donde la fuente de energía lo funde y lo deposita en capas finas. Esta deposición puede realizarse sobre una superficie plana (fabricación desde cero) o sobre una pieza existente (reparación o recubrimiento). Incontinenti, el material fundido se solidifica rápidamente al enfriarse, creando una unión metalúrgica con el sustrato o las capas anteriores. Y, por último, se puede hacer un post-procesamiento, ya que dependiendo de los requisitos, la pieza puede someterse a procesos adicionales como mecanizado, tratamientos térmicos o acabados superficiales para mejorar la precisión y las propiedades mecánicas (Dass & Moridi, 2019).

Las variables de proceso más relevantes para un buen acabado de la pieza son (Dass & Moridi, 2019):

- Primero, se debe controlar la potencia del láser, pues afecta directamente la cantidad de energía suministrada para fundir el material. Además, el diámetro del haz puede influir en la resolución y precisión de la deposición. Otro aspecto es la velocidad de escaneo, ya que determina la rapidez con la que el láser se mueve sobre el material, afectando la tasa de deposición y la microestructura resultante.
- La tasa de alimentación del polvo o alambre también entra en juego, pues ésta debe ser consistente para asegurar una deposición uniforme y evitar defectos en la pieza final. Por otra parte, debe existir una atmósfera de protección, pues se ha comprobado que el uso de gases inertes como argón o helio previene la oxidación y contaminación del material durante la deposición.
- Adicionalmente, la temperatura del sustrato afecta la adherencia del material depositado y puede influir en las tensiones residuales de la pieza. Por otra parte, la altura de capa llega a definir el grosor de cada capa depositada, impactando en la resolución y el tiempo de fabricación. Y, finalmente, es importante verificar que exista

un solapamiento entre pasadas, pues esto asegura una cobertura completa y uniforme, evitando discontinuidades en la estructura.

### **3.6. Fotopolimerización en Tanque (VPP)**

En la VPP, objetos tridimensionales son fabricados solidificando selectivamente capas de resina líquida fotosensible mediante exposición a luz. Esta tecnología se distingue por su alta resolución, precisión dimensional y versatilidad química, lo que permite adaptarla a diversas aplicaciones y materiales. Para generar los sólidos se utiliza una resina líquida que contiene monómeros o prepolímeros y un fotoiniciador. Este último absorbe luz (generalmente ultravioleta o visible) y desencadena la polimerización de los monómeros, convirtiendo el líquido en un sólido. Ahora bien, dependiendo del sistema, la luz puede provenir de un láser (SLA), un proyector digital (DLP) o dispositivos de proyección volumétrica como Litografía Axial Computarizada (CAL). Dichas fuentes de luz se utilizan para solidificar secciones específicas de la resina capa por capa, o incluso todo el objeto simultáneamente en tecnologías avanzadas (Sampson et al., 2021).

La tecnología de fotopolimerización en tanque permite el uso de diversos materiales, siendo los principales las resinas fotocurables basadas en monómeros de acrilatos, metacrilatos y epóxidos. Estos materiales pueden ser modificados para obtener propiedades específicas mediante la adición de fotoiniciadores, rellenos, y aditivos funcionales que mejoren la reactividad, la densidad de reticulación y la estabilidad mecánica. Además, esta tecnología también admite materiales avanzados como compuestos polímero-cerámicos, polímeros cargados con metales, y materiales funcionales para aplicaciones específicas. La incorporación de múltiples resinas en un solo proceso es posible mediante técnicas como el intercambio mecánico o manual de resinas, sistemas de microfluidos y el uso de fuentes de luz dual para activar diferentes mecanismos químicos en la misma estructura. La amplia gama de materiales utilizados resulta en una gran aplicación de esta tecnología, desde piezas funcionales en la industria manufacturera, hasta joyería con diseños complejos. (Sampson et al., 2021).

El proceso requiere de la polimerización selectiva de una capa de resina sobre una plataforma de construcción. Posteriormente, se mueve la plataforma y se repone resina fresca para la siguiente capa. Por tanto, parámetros como la intensidad de la luz, el tiempo de exposición y la formulación de la resina permiten ajustar características como la densidad de entrecruzamiento del polímero, la resolución y las propiedades mecánicas del objeto final.

Las principales variables que inciden en el proceso de creación de piezas son (Sampson et al., 2021):

- Respecto a las variables relacionadas con el material, se debe controlar el tipo y la concentración del fotoiniciador, pues afecta la velocidad y la eficiencia de polimerización. Además, influye la viscosidad de la resina en la capacidad de recubrimiento y nivelación entre capas, pues resinas de alta viscosidad pueden dificultar el flujo y la reposición; se puede controlar la viscosidad a partir de aditivos como pigmentos, rellenos funcionales o agentes de control de viscosidad. También, se debe controlar la tasa de inhibición por oxígeno, pues éste puede ralentizar o inhibir la polimerización, especialmente en sistemas abiertos o en procesos cercanos a la superficie.
- Por otra parte, la intensidad y energía de la luz también se debe controlar, pues afecta la velocidad de polimerización y la profundidad de curado por capa, ya que intensidades demasiado altas pueden causar sobrecurado, mientras que intensidades bajas pueden resultar en una polimerización incompleta. El tiempo de exposición debe ser considerado en adición, pues influye en el grosor de las capas y la uniformidad de polimerización. Seguidamente, se debe revisar la distribución del haz de luz, pues la uniformidad del haz afecta la precisión y la resolución del objeto final.
- Adicionalmente, se debe controlar el grosor de la capa, pues éste determina la resolución vertical y el acabado superficial, ya que capas más delgadas permiten mayor precisión pero aumentan el tiempo de impresión. Además, es importante recalcar que la orientación de la pieza impacta la estabilidad del objeto durante la impresión y la calidad superficial. Por otra parte, se debe ser cuidadoso con la densidad y el tamaño de los soportes, pues su diseño y la colocación son esenciales para evitar deformaciones o colapsos.
- En otros aspectos, se debe controlar la velocidad de recubrimiento, puesto que afecta la reposición uniforme de la resina entre capas, debido a que velocidades excesivas pueden generar burbujas o irregularidades. En adición, es sabido que la temperatura del entorno influye en la viscosidad de la resina y en la reactividad del sistema, de manera que temperaturas inadecuadas pueden reducir la eficiencia del proceso. Otro aspecto es la calibración del sistema óptico, ya que esto permite asegurar precisión en la posición y la distribución de la luz. Además, es importante

recalcar que la velocidad y suavidad del descenso de la plataforma afectan la estabilidad de la pieza y la adhesión entre capas.

- Finalmente, respecto a las variables relacionadas con el post-procesamiento, cabe destacar que se debe hacer una eliminación de resina no curada de la superficie del objeto mediante solventes o limpieza mecánica, y que la eficiencia del lavado afecta la calidad del acabado superficial. Luego, se puede hacer una exposición adicional a luz UV o visible para mejorar las propiedades mecánicas y térmicas, en donde las variables clave son la intensidad de la luz, el tiempo y la temperatura de post-curado.

### **3.7. Proyección de Material (MJT)**

La MJT funciona mediante la deposición selectiva de gotas de material fotopolimérico, que luego son curadas con luz ultravioleta (UV) para formar capas sucesivas y construir una pieza tridimensional. En este proceso, los materiales se almacenan en tanques aislados del aire y se calientan antes de ser expulsados a través de boquillas en forma de gotas extremadamente finas sobre la plataforma de construcción. Cada capa depositada es inmediatamente curada con UV, lo que permite obtener piezas con alta precisión dimensional y baja rugosidad superficial. (Gülcan et al., 2021).

Esta tecnología utiliza principalmente polímeros termoplásticos, termoestables y elastoméricos. Estos materiales incluyen opciones como polímeros comerciales (FullCure, VeroBlue, VeroBlack, MED610, entre otros) para aplicaciones mecánicas, así como TangoBlackPlus para componentes flexibles y RGD525, conocido por sus propiedades de desgaste; materiales compuestos como mezclas de materiales duros y blandos, como combinaciones de VeroCyan y TangoBlackPlus, que permiten crear gradientes funcionales con propiedades mecánicas específicas. Además, cabe destacar que materiales como FullCure 705 y SUP706, utilizados para construir estructuras de soporte removibles. Finalmente, se pueden utilizar polímeros avanzados, que consisten en materiales digitales o combinaciones multi-materiales para diseños complejos y funcionales, como componentes con propiedades variadas dentro de una misma estructura. Algunas de las aplicaciones de estos materiales se encuentran en la industria biomédica, en prótesis y modelos anatómicos; en la industria automotriz se realizan piezas complejas para pruebas aerodinámicas; en general, para moldes y carcasas de piezas (Gülcan et al., 2021).

El principio de funcionamiento consiste en que primero se hace un depósito del material líquido, para lo cual se utilizan tanques sellados que contienen materiales fotopoliméricos

líquidos (o termoplásticos), los cuales son calentados hasta alcanzar una viscosidad adecuada para su inyección, de manera que las gotas del material son depositadas con precisión mediante cabezales de impresión que operan de manera similar a las impresoras de chorro de tinta. Una vez depositado, el material líquido es curado o solidificado mediante exposición a una fuente de luz UV de longitud de onda específica (entre 190 y 400 nm). En este proceso de fotopolimerización, se convierte el líquido en un material sólido, formando una capa de la pieza. Luego, tras solidificar una capa, la plataforma de construcción desciende una distancia equivalente al espesor de la capa (típicamente entre 16 y 30 micrones). El proceso es repetido hasta que se completa el objeto. Cabe destacar que para geometrías complejas o con voladizos, es necesario generar estructuras de soporte con materiales gelatinosos, los cuales son fácilmente removibles mediante lavado con agua a presión o soluciones químicas suaves (Gülcan et al., 2021).

Las variables que controlan el proceso de formado de piezas mediante esta tecnología corresponden a (Gülcan et al., 2021):

- Primeramente, se tiene que es importante controlar el espesor de capa, ya que esta variable es crucial para lograr la precisión dimensional de las piezas, pues variaciones en el espesor de capa pueden afectar la exactitud en las dimensiones finales y el acabado superficial de las piezas. Así, el control del espesor de capa, generalmente expresado en micrómetros ( $\mu\text{m}$ ), permite ajustar la calidad de las impresiones.
- El acabado superficial también es importante, ya que influye en la apariencia y la funcionalidad de la pieza. Dependiendo de la aplicación, se pueden elegir acabados brillantes o mates para optimizar la textura de la superficie, lo que puede ser determinante tanto en aplicaciones estéticas como funcionales. Por otra parte, la ubicación de la pieza en la plataforma de impresión es otro factor importante, ya que afecta directamente a la precisión dimensional, lo que es debido a que diferentes ubicaciones pueden generar variaciones en la geometría de la pieza debido a cómo se construye capa por capa.
- En adición, la orientación de la pieza respecto al eje de impresión influye en la calidad dimensional, la resistencia y el acabado superficial, por lo que es esencial elegir una orientación adecuada para minimizar las deformaciones o distorsiones durante el proceso de impresión. Consiguientemente, el grosor de las paredes es crucial al fabricar estructuras ligeras o con diseño optimizado. Es importante controlar

esta variable para garantizar que las paredes sean lo suficientemente resistentes y precisas, especialmente cuando se fabrican estructuras con grosores muy finos.

- Además, es importante considerar que, en procesos de fabricación aditiva, es posible construir piezas ensambladas sin necesidad de ensamblaje adicional. Sin embargo, es necesario controlar las distancias mínimas entre componentes móviles para garantizar que las piezas encajen correctamente y funcionen de manera eficiente sin interferencias. Por otro lado, y aunque no siempre se profundiza, el tiempo de construcción es una variable importante, ya que afecta la eficiencia y los costos de producción. Así, el tiempo necesario para completar una impresión dependerá de varios factores, como la resolución y el tamaño de la pieza. En adición, el consumo de material es otro aspecto relevante, ya que impacta en la rentabilidad del proceso, puesto que un control adecuado del consumo asegura una producción más económica y eficiente, reduciendo el desperdicio de material.

### **3.8. Conclusiones**

Se ha evidenciado la cantidad de variables a considerar en cada tecnología y, aunque existen variables como la altura de capa o la temperatura del sustrato que son comunes entre algunas tecnologías, la mayoría de las mismas son propias de la naturaleza de cada máquina, por lo que no son extrapolables de una tecnología a otra. Sin embargo, es importante destacar que el proceso de impresión sí es el mismo para todas las tecnologías, pues, en líneas generales, las siete tecnologías de AM revisadas muestran un proceso equivalente, ya que inician con un diseño asistido por computadora (CAD), para luego exportarlo al software de corte (también conocido como software de *slicing*) correspondiente de la impresora, el cual rebana el sólido CAD en capas y, luego, genera el código G que da las instrucciones necesarias a la máquina para fabricar el sólido. Seguidamente, se forma el sólido en la impresora, para luego dar paso a las técnicas de postprocesado que mejoran el acabado de la pieza (Wong & Hernandez, 2012; Zhong Xie et al., 2025a; Zhong Xie et al., 2025b). Por consiguiente, por motivos de alcance del presente trabajo, sólo se considerarán en los siguientes capítulos las tecnologías de fotopolimerización en tanque y extrusión de material, pues constituyen dos de las más usadas comercialmente (Calignano et al., 2017).

## **4. Proceso de fabricación aditiva y variables críticas**

En este capítulo se abordará la estructura del proceso de AM, definiendo sus cuatro etapas (Diseño de la Pieza, Software de *Corte*, Impresión 3D y Postprocesado) y las principales variables, cuidados y consideraciones a tener al iniciar un proceso de 3DP. La primera etapa

será genérica para cualquier tecnología de AM, pero las siguientes etapas serán descritas para cada una de las dos tecnologías elegidas: VPP y MEX.

#### **4.1. Diseño de la Pieza**

El proceso de diseño asistido por computadora (CAD) se inicia con la conceptualización del diseño, donde el diseñador emplea herramientas gráficas interactivas para crear representaciones visuales preliminares del objeto o sistema. Estas herramientas permiten al diseñador definir y manipular elementos geométricos básicos, como puntos, líneas y curvas, estableciendo las bases de la estructura del diseño. Internamente, el software CAD organiza estos elementos mediante estructuras de datos jerárquicas y redes de relaciones, facilitando la gestión y modificación eficiente del modelo. A medida que el diseño avanza, se incorporan detalles adicionales y se realizan ajustes, utilizando algoritmos matemáticos para garantizar la precisión y coherencia geométrica. El sistema CAD también integra módulos de análisis que permiten evaluar el rendimiento y la viabilidad del diseño en función de criterios específicos, proporcionando retroalimentación al diseñador para optimizar el producto final. Este enfoque iterativo y estructurado, fundamentado en principios cibernéticos y de ciencias de la computación, permite una transición fluida desde la concepción inicial hasta la realización detallada del diseño, asegurando que cada componente se alinee con los objetivos y restricciones establecidos (Ross & Rodriguez, 1963).

Para asegurar un adecuado diseño de un proyecto de FA, es decir, de la fabricación de una pieza, se identifican diez pasos a seguir que pueden resumirse en: bosquejar la pieza(s) que se desea realizar, verificar las capacidades de la impresora, tales como los materiales que permite utilizar o el tamaño máximo a imprimir, y diseñar la pieza en un software CAD. Los diez pasos consisten en (Wiberg et al., 2019):

1. Generar múltiples conceptos iniciales utilizando técnicas de ideación y luego aplicar principios de Diseño para Manufactura (DFM) para cada concepto. Esto implica analizar valores, tolerancias, movimientos y complejidad para que el diseño se ajuste de manera óptima a un sistema de manufactura específico, garantizando productos de alta calidad y costo eficiente (Sánchez & Cortés, 2005). Además, se debe considerar la optimización del diseño según la norma ISO/ASTM 52910, aprovechando la libertad geométrica, reduciendo soportes y desperdicio, y considerando la anisotropía para mejorar propiedades mecánicas.
2. Definir los objetivos y requisitos del proyecto, tales como especificaciones del

producto y requisitos funcionales. También se deben evaluar las limitaciones de materiales y técnicas de fabricación aditiva a utilizar, considerando la selección de materiales según sus propiedades mecánicas, térmicas y químicas.

3. Analizar la viabilidad técnica y económica para determinar si la fabricación aditiva es adecuada para el proyecto. Además, es clave evaluar la complejidad geométrica del diseño y su impacto en la fabricación, seleccionando el concepto que mejor cumpla con los requisitos y capacidades de la tecnología de MA. Se debe incluir una evaluación de costos y viabilidad económica para garantizar factibilidad.
4. Optimizar la geometría de la pieza utilizando herramientas de optimización estructural, como la optimización topológica. Se deben evitar características difíciles de imprimir, como agujeros cerrados o salientes excesivos, asegurando compatibilidad con la fabricación aditiva. La orientación de la pieza también debe minimizar distorsiones y tensiones residuales.
5. Crear un modelo CAD paramétrico del diseño optimizado, incluyendo características necesarias para la fabricación, como soportes, ensamblajes y detalles de acabado. Se debe considerar la precisión y tolerancias dimensionales para garantizar ensamblajes adecuados y acabados superficiales óptimos.
6. Realizar simulaciones ingenieriles para validar el rendimiento del diseño bajo condiciones de carga esperadas e identificar problemas potenciales antes de la fabricación.
7. Imprimir un prototipo utilizando tecnología de fabricación aditiva y someterlo a pruebas físicas para evaluar su rendimiento en condiciones reales. Se debe analizar la eficiencia del material y la sostenibilidad del proceso, asegurando el uso óptimo de los recursos.
8. Realizar modificaciones en el diseño basándose en la retroalimentación de las pruebas y repetir los pasos de validación y prototipado si es necesario. También se deben considerar procesos de postprocesado y acabado, como mecanizado, pulido o tratamientos térmicos.
9. Documentar todos los aspectos del diseño, incluidos los cambios realizados, materiales utilizados y métodos de fabricación, asegurando la trazabilidad de la pieza y facilitando la transición a la producción en masa.

10. Diseñar un sistema de monitoreo para producción en serie, permitiendo ajustar el diseño según la retroalimentación del cliente y el desempeño en el campo. Se debe garantizar que el producto cumpla con los estándares de calidad y optimización de manufactura.

A fin de asegurar que estos diez pasos funcionen adecuadamente, el software CAD a elegir para el diseño de la pieza debe cumplir una serie de características para facilitar el cumplimiento de cada paso (Wiberg et al., 2019):

- Soportar múltiples formatos de archivo utilizados en AM, como STL, OBJ y AMF, para garantizar que los modelos puedan ser exportados y utilizados en diferentes impresoras 3D.
- Permitir la creación de modelos paramétricos pues esto permite realizar modificaciones rápidas y eficientes, lo que es crucial para la optimización del diseño basada en requisitos específicos de fabricación aditiva.
- Poseer funcionalidades que permitan simular el proceso de fabricación para identificar posibles fallas, tensiones o deformaciones en el modelo antes de la impresión, lo que puede ahorrar tiempo y recursos.
- Incluir bibliotecas de materiales actualizadas que proporcionen propiedades de los materiales adecuados para la impresión 3D, ayudando a los diseñadores a elegir el mejor material para su aplicación.
- Tener herramientas que faciliten la optimización topológica para reducir peso y material sin comprometer la integridad estructural del componente diseñado.
- Tener soporte para Análisis de Elementos Finitos (FEA), que permita estudiar el comportamiento mecánico del diseño bajo diferentes condiciones (cargas, temperaturas, etc.) para asegurar que cumple con los requisitos funcionales.
- Poseer una interfaz amigable con el usuario y herramientas que faciliten el trabajo colaborativo y la gestión de proyectos.
- Poseer herramientas que evalúen la viabilidad del diseño para la fabricación aditiva, evitando errores comunes en la geometría que podrían complicar el proceso de impresión.
- Buscar que haya posibilidad de integrarse con otros softwares aplicables en

fabricación aditiva, como los de preparación de impresión y control de calidad.

Finalmente, si bien los diez pasos establecidos dan una guía para la buena manufactura para un proyecto de AM, es importante resaltar que existen ciertas limitaciones ya identificadas para fabricación aditiva, las cuales pueden ser tomadas en cuenta para las etapas preliminares del procedimiento y corresponden a (Wiberg et al., 2019):

- Algunas geometrías pueden ser difíciles o imposibles de imprimir debido a limitaciones en la tecnología de AM, como ángulos de salientes, geometría cerrada (cavidades sin salida), o formas no soportadas.
- Por otra parte, la resolución de la impresora puede limitar la precisión de los detalles del diseño. Características muy pequeñas o finas pueden no ser reproducibles de manera efectiva.
- Es importante destacar que la selección de materiales para impresión puede imponer restricciones, pues no todos los materiales son compatibles con todos los métodos de fabricación aditiva, y cada material tiene propiedades específicas que pueden impactar el diseño. Además, cabe destacar que diferentes técnicas de fabricación aditiva ofrecen diferentes propiedades mecánicas. La anisotropía (variaciones de propiedades en diferentes direcciones) puede ser mayor en algunas impresiones que en otras.
- También es necesario recalcar que las dimensiones máximas de la plataforma de construcción de la impresora limitan el tamaño de las piezas que se pueden fabricar. Partes demasiado grandes pueden necesitar ser diseñadas en secciones. En adición, si la pieza es parte de un ensamblaje más grande, las limitaciones del diseño deben considerar cómo se integrará con otras piezas, incluyendo tolerancias, encajes y métodos de unión.
- Adicionalmente, se debe considerar que algunas piezas pueden requerir un acabado posterior (lijado, pulido, tratamiento térmico) que debe ser considerado durante el diseño, ya que puede afectar tanto la forma como la integridad estructural de la pieza.
- El costo de los materiales y el tiempo de impresión afectan la viabilidad del diseño, pues piezas grandes o complejas pueden resultar significativamente más costosas de producir.

## 4.2. Software de Corte

El software de corte, o slicing, es una herramienta esencial en la AM que convierte modelos CAD en 3D, generalmente en formato STL (Estereolitografía), en instrucciones detalladas que las impresoras 3D pueden interpretar y ejecutar, conocidas como G-code. El proceso comienza con la importación del modelo digital STL, el cual es representado por una lista no ordenada de facetas triangulares, donde cada triángulo está definido por las coordenadas X, Y y Z de sus tres vértices y un vector normal unitario que indica su orientación (Chua et al., 2003). Posteriormente, el software segmenta el modelo en capas sucesivas mediante planos paralelos, con una altura de capa que puede ser fija (corte básico) o variable (corte adaptativo) (Guan et al., 2021).

En el corte básico, el grosor de capa se mantiene constante y es determinado por la altura máxima de cúspide permitida, lo que puede generar un efecto de escalonamiento que afecta la calidad superficial. En cambio, el corte adaptativo ajusta dinámicamente el grosor de las capas según la complejidad geométrica del modelo, utilizando técnicas como la extrapolación de contornos o la interpolación bidireccional, lo que mejora la precisión y reduce el tiempo de fabricación. Métodos más avanzados incluyen el corte multidireccional, que descompone el modelo en subvolúmenes que pueden imprimirse en diferentes direcciones para minimizar la necesidad de soportes y mejorar la calidad de la superficie, y el corte no por capas, que emplea superficies de forma libre o coordenadas cilíndricas para adaptarse mejor a geometrías complejas, eliminando el escalonamiento y optimizando la eficiencia del proceso (Xu et al., 2018).

Además de determinar la estrategia de corte, el software de slicing también genera las trayectorias de impresión, optimizando parámetros clave como la velocidad de impresión, la densidad de relleno y la creación de soportes temporales para estructuras complejas. Finalmente, el modelo procesado es exportado en archivos G-code, los cuales contienen los comandos específicos para la maquinaria de impresión, incluyendo movimientos de los ejes, velocidades de extrusión y temperatura del extrusor (Guan et al., 2021; Xu et al., 2018).

Para el caso de MEX, se tiene que existe un extenso abanico de configuraciones que puede presentar el software de corte, existen varias que resaltan por encima de las demás debido al impacto que producen en la pieza confeccionada, las cuales corresponden a (Guo et al., 2019):

- **Altura de Capa:** Este parámetro controla la altura de cada capa o rebanada,

influyendo la precisión de la impresión, pues una altura de capa más delgada puede ofrecer mejor precisión, pero aumenta el tiempo de impresión. Esta configuración está relacionada con el diámetro de la boquilla del impresor.

- **Diámetro de la Boquilla:** El tamaño de la boquilla afecta el diámetro del filamento extruido y, por tanto, influye en la altura de capa y la calidad de la impresión.
- **Velocidad de Extrusión:** Es necesario que la velocidad a la que se extruye el material sea ajustada cuidadosamente para asegurar una buena adhesión de las capas y evitar problemas de impresión.
- **Velocidad de Movimiento de la boquilla:** Esta configuración determina cuán rápido se mueve la boquilla mientras imprime, afectando así la calidad y el tiempo de la impresión.
- **Patrón de Relleno:** Algunos softwares permiten elegir patrones de relleno que pueden mejorar la resistencia y estructura interna del objeto impreso. Esto es vital para asegurar la integridad del producto final.
- **Soportes:** La configuración del material de soporte afecta la estabilidad, el consumo de material y la facilidad de remoción. Parámetros como densidad, patrón, distancia con la pieza y tipo de material determinan la calidad del acabado y el postprocesado.

Por su parte, en el caso de VPP, se tienen los siguientes parámetros necesarios para un buen acabado de las piezas a imprimir (Piedra-Cascón et al., 2021):

- **Grosor de Capa:** Un grosor de capa menor resulta en una mayor resolución y detalles finos, pero también aumenta el tiempo de impresión. Un grosor mayor puede resultar en una impresión más rápida pero menos detallada. Es fundamental encontrar un equilibrio entre calidad y tiempo.
- **Tiempo de Exposición de Capa:** Un tiempo de exposición adecuado es crucial para asegurar que cada capa cure correctamente. Si es demasiado corto, la resina no se curará completamente; si es demasiado largo, puede provocar sobrecurado y deformación.
- **Tiempo de Retraso:** Este tiempo permite que la resina fluya y se estabilice antes de que el plato vuelva a elevarse. Un retraso adecuado ayuda a evitar problemas de adherencia entre capas y mejora la integridad estructural del objeto.

- **Altura de Elevación:** Es la distancia que la plataforma de construcción se levanta después de curar cada capa de resina. Este movimiento es crucial para separar la pieza de la base de la tina y permitir la entrada de nueva resina para la siguiente capa. Aumentar esta altura ayuda a minimizar la fuerza de succión que puede causar fallos. Sin embargo, un levantamiento excesivo puede alargar el tiempo de impresión.
- **Velocidad de Elevación y Bajada:** Una velocidad adecuada reduce el estrés en las capas impresas y ayuda a prevenir posibles daños. Velocidades demasiado rápidas pueden causar problemas de despegue. Por su parte, se debe garantizar una bajada controlada, pues esto puede evitar goteos de resina y mejorar la calidad de las impresiones.
- **Soportes:** Las estructuras de soporte son vitales para mantener la geometría de piezas complejas durante la impresión. Un diseño inadecuado de soportes puede resultar en deformaciones o colapsos.
- **Luz de Cura:** Ajustar la longitud de onda y la intensidad es esencial para asegurar que se utilice la radiación correcta para curar adecuadamente la resina sin dañar la máquina.
- **Configuración de Zonas de Impresión:** Permiten ajustar los tiempos de exposición para diferentes áreas de un modelo. Esto es útil para optimizar impresiones con diferentes geometrías y requisitos de resistencia.
- **Parámetros de Multicapa:** Cuando se utilizan diferentes materiales, es importante ajustar estos parámetros para asegurar que cada material cure de manera efectiva y se adhiera a las otras capas.
- **Configuraciones de Antibloqueo:** Estas configuraciones pueden prevenir que el modelo se adhiera de manera inapropiada al plato de impresión, lo que puede resultar en fallos.
- **Relleno de Borde:** Un borde fuerte es esencial para la estabilidad y la integridad del modelo. Proporciona el soporte inicial necesario para el resto de la pieza.
- **Verificación de Capas:** Permite revisar la impresión antes de comenzar, lo que ayuda a prevenir errores costosos y a hacer ajustes en el diseño o en los parámetros de impresión.

Así, se puede concluir que un buen software de corte debe ser preciso en la conversión del modelo 3D a G-Code, asegurando capas bien definidas, manejo eficiente de voladizos y corrección de errores en mallas. Debe, además, ofrecer configuraciones avanzadas como ajuste de altura de capa, velocidad, temperatura y patrones de relleno, entre otros, además de ser compatible con múltiples formatos y firmwares de impresoras. Cabe destacar que en AM la eficiencia es clave, por lo que se debe garantizar tiempos de procesamiento optimizados y trayectorias inteligentes para reducir el tiempo de impresión. Adicionalmente, su interfaz debe ser intuitiva, con vista previa del G-Code y perfiles preconfigurados para distintos materiales. Adicionalmente, debe contar con soporte técnico, documentación clara y una comunidad activa para garantizar mejoras constantes y soluciones a problemas (Baumann et al., 2015).

### **4.3. Impresión**

El proceso de impresión en una impresora MEX comienza con el movimiento de los motores paso a paso, que controlan la posición del cabezal de impresión en los ejes X e Y, mientras que el eje Z regula la elevación de la cama o del cabezal según el diseño de la impresora. Simultáneamente, el motor del extrusor empuja el filamento hacia el hotend, donde una resistencia calefactora lo calienta hasta su temperatura de fusión, regulada por un sensor de temperatura. Un disipador con ventilador mantiene fría la parte superior del extrusor para evitar atascos prematuros. Una vez fundido, el filamento es forzado a salir por la boquilla con un diámetro determinado, regulando su flujo mediante el motor del extrusor y los parámetros definidos en el G-code. El material fundido se deposita capa por capa sobre la cama de impresión, que puede estar calentada para mejorar la adhesión de la primera capa, mientras un ventilador de capa acelera la solidificación. Tras depositar cada capa, el eje Z se desplaza en pequeños incrementos para permitir la construcción progresiva del objeto, siguiendo patrones internos de relleno optimizados para resistencia y eficiencia en el uso del material. Finalmente, al completarse la impresión, la impresora enfría la boquilla y la cama antes de retirar la pieza, que puede requerir post-procesamiento como lijado o tratamiento químico para mejorar su acabado superficial (Mwema & Akinlabi, 2020).

Por otra parte, el proceso de impresión en VPP se basa en la fotopolimerización, una reacción química en la que la resina líquida fotosensible se solidifica al ser expuesta a la luz ultravioleta (UV). Este procedimiento comienza cuando una fuente de luz UV, ya sea un láser en las impresoras SLA (Stereolithography Apparatus) o un proyector de luz digital en las impresoras DLP (Digital Light Processing), emite radiación a una longitud de onda

específica, generalmente entre 365 y 405 nm, optimizada para activar los fotoiniciadores presentes en la resina. Estos fotoiniciadores absorben la energía de la luz UV y generan radicales libres altamente reactivos, que inician un proceso de polimerización en cadena, en el cual los monómeros y oligómeros de la resina se enlazan químicamente, transformando el material de estado líquido a sólido (Vidhu et al., 2023).

En una impresora SLA, un láser de estado sólido o diodo láser escanea la capa de resina siguiendo el patrón del modelo, guiado por espejos galvánicos de alta velocidad que reflejan y posicionan el haz con precisión micrométrica. En cambio, en una impresora DLP, un chip DMD (Digital Micromirror Device) compuesto por miles de microrreflectores controla la proyección de la luz sobre toda la capa simultáneamente, lo que acelera el proceso de curado en comparación con el método punto a punto del láser SLA. En ambas tecnologías, la luz UV atraviesa una ventana óptica o una pantalla LCD en el caso de las impresoras MSLA (Masked Stereolithography), donde los píxeles actúan como máscaras para bloquear o permitir el paso de la luz, determinando qué áreas de la resina serán curadas en cada capa. Una vez que la capa actual ha sido polimerizada, la plataforma de construcción se eleva ligeramente para despegar la resina solidificada del fondo del tanque, un proceso que puede implicar la flexión controlada de una película de PDMS (polidimetilsiloxano) o FEP (fluoropolímero de etileno y propileno) para facilitar el desprendimiento sin dañar la pieza (Vidhu et al., 2023).

A continuación, una nueva capa de resina líquida fluye para cubrir la superficie expuesta, permitiendo que el proceso se repita capa por capa hasta que el objeto esté completamente formado. La precisión del curado depende de parámetros clave como la intensidad de la luz UV, el tiempo de exposición, la absorción óptica de la resina y la disipación térmica, ya que un exceso de energía puede generar sobreexposición, causando que la resina cure más allá de los límites deseados, afectando la fidelidad geométrica. Una vez finalizada la impresión, el objeto se retira de la plataforma y se somete a un proceso de limpieza en solventes como alcohol isopropílico, para eliminar residuos de resina no curada, seguido de un curado final en una cámara de luz UV, donde la exposición prolongada a una longitud de onda controlada optimiza la conversión de monómeros y completa la reticulación de las cadenas poliméricas, mejorando la resistencia mecánica y la estabilidad química del material. Este proceso permite obtener piezas con una resolución extremadamente alta, con detalles submilimétricos y superficies lisas, lo que hace que la impresión en resina sea ideal para aplicaciones que requieren precisión extrema, como odontología, joyería y prototipado industrial (Vidhu et al., 2023).

Dentro de la etapa de Impresión, existen dos tipos de parámetros que pueden afectar: Los parámetros técnicos constituyen todos aquellos que son propios de la impresora y pueden ser ajustados en la misma; los parámetros ambientales engloban a todos los parámetros que son externos a la impresora y requieren de modificaciones al ambiente de la impresora para variarlos.

#### Parámetros Técnicos

Para asegurar que la máquina de MEX funcione adecuadamente, se debe seguir los siguientes pasos (Hsiang Loh et al., 2020; Wu & Chen, 2018):

1. Asegurarse de que la impresora esté configurada de acuerdo con las instrucciones del proveedor.
2. Realizar actualizaciones periódicas del hardware y software de la impresora.
3. Mantener y calibrar la impresora de manera regular.
4. Limpiar la superficie de impresión antes de cada trabajo.
5. Nivelar la cama de impresión antes de cada impresión para asegurar una correcta adhesión.
6. Asegurarse de que la distancia entre el cabezal de impresión y la cama de impresión esté correctamente ajustada.
7. Limitar la impresión a objetos que no sean demasiado grandes o complejos para evitar errores.
8. Seleccionar un filamento con suficiente adhesión para evitar problemas durante la impresión.
9. Ajustar la velocidad de los ventiladores de enfriamiento para asegurar un enfriamiento uniforme y adecuado de las capas. Se debe considerar el uso de ventiladores adicionales o sistemas de enfriamiento mejorados si es necesario.
10. Utilizar filamentos de alta calidad y almacenarlos adecuadamente para evitar la absorción de humedad, lo que puede contribuir a la obstrucción.
11. Terminar el proceso de impresión si las primeras capas presentan resultados deficientes, ajustar la distancia entre la boquilla y la cama de impresión para

asegurar una altura óptima de la primera capa y luego utilizar superficies de impresión que mejoren la adhesión, como cintas adhesivas o superficies texturizadas. Además, se puede aplicar adhesivos específicos para impresión 3D en la cama de impresión.

12. Pueden ocurrir además problemas de deformación (warping), lo cual se produce por la contracción del material durante el enfriamiento. Para esto, se puede incrementar la temperatura de la cama de impresión para reducir la diferencia de temperatura entre las capas y minimizar la contracción, así como utilizar faldones o bordes ("brims") alrededor de la base de la pieza para mejorar la adhesión y reducir la deformación.
13. También son comunes problemas de retracción, lo cual es debido a una configuración inadecuada de la retracción y puede provocar hilos no deseados ("stringing") o huecos en la impresión. Se puede resolver ajustando la distancia y velocidad de retracción en el software de corte ("slicer") para minimizar la formación de hilos, así como también optimizando la temperatura de extrusión para reducir la fluidez excesiva del material que puede causar hilos.
14. Además, las piezas impresas pueden presentar dimensiones incorrectas debido a una calibración inadecuada o configuraciones incorrectas, para lo cual se puede calibrar correctamente los ejes de la impresora para asegurar movimientos precisos, así como ajustar los factores de escala en el software de corte para compensar cualquier discrepancia dimensional observada.

Por otra parte, una impresora que funcione a partir de VPP requiere de la supervisión de los siguientes pasos (Piedra-Cascón et al., 2021):

1. Ajustar la potencia de la fuente de luz, pues la intensidad de la luz utilizada para polimerizar la resina. Ajustar esta potencia afecta la velocidad de curado y la profundidad de polimerización. Además, se debe verificar la compatibilidad entre la longitud de onda de la fuente de luz y la resina utilizada, pues resulta fundamental para una adecuada polimerización.
2. Revisar el tipo de resina utilizado, pues diferentes resinas tienen propiedades y requerimientos específicos para la polimerización, incluyendo la viscosidad y el contenido de fotoiniciadores.
3. Verificar la configuración de la plataforma de construcción, dado que los ajustes en la

nivelación y la adhesión de la plataforma donde se construyen las capas pueden afectar la calidad de la impresión.

4. Asegurar que haya un flujo de aire adecuado, pues esto puede ayudar a evitar la acumulación de vapores y mejorar la calidad de la impresión.
5. Mantener la resina limpia y libre de impurezas para asegurar la calidad de las impresiones.
6. Mantener la resina a una temperatura adecuada, pues esto puede influir en su viscosidad y, por ende, en la calidad de la impresión.

### Parámetros Ambientales

Se logró identificar dos parámetros que afectan la calidad de las piezas manufacturadas: la presión y temperatura ambiental. La presión ambiental influye significativamente en la calidad de las piezas manufacturadas, ya que a menor presión (1 Pa), la humectabilidad mejora, lo que genera estructuras más anchas, lisas y con mejor adherencia al sustrato. En términos de microestructura, una presión baja favorece una red más conectada y uniforme, reduciendo defectos como porosidad y fragmentación. Además, la resistencia a la corrosión mejora notablemente, con una densidad de corriente de corrosión hasta tres veces menor (para el caso de metales) en comparación con piezas fabricadas a 120 Pa, lo que indica una mayor durabilidad. Por lo tanto, fabricar en condiciones de vacío optimiza la forma, integridad estructural y comportamiento electroquímico de las piezas, haciéndolas más aptas para aplicaciones exigentes como la manufactura en el espacio. Ahora bien, es importante recalcar que sólo se estudió este efecto para la tecnología de DED, por lo que se desconoce si el efecto será el mismo en otras (Ding et al., 2022).

Por otra parte, la temperatura ambiente tiene un impacto significativo en la tensión residual de las piezas fabricadas mediante DED. Según el estudio, a medida que la temperatura ambiente aumenta de 0 °C a 600 °C, la tensión residual máxima en la capa de recubrimiento disminuye en un 36% (de 706 MPa a 452 MPa). Esto sugiere que operar a temperaturas más altas reduce el estrés acumulado en la pieza, minimizando el riesgo de deformaciones y grietas. En comparación con otros parámetros analizados, como el grosor del sustrato y la temperatura del alambre, la temperatura ambiente tuvo la mayor influencia en la reducción del estrés residual en las piezas manufacturadas (Liu et al., 2022).

#### 4.4. Parámetros de Postprocesado

Para la tecnología de MEX, se ha estudiado un método de postprocesado que consiste en aplicar un tratamiento rápido mediante microondas ( $\leq 20$  segundos) a piezas impresas en 3D con PEEK reforzado con carbono, aprovechando la capacidad del relleno de carbono para absorber la energía y generar un calentamiento localizado. Este proceso mejora la adhesión entre capas, aumentando el módulo elástico en la dirección Z de 2.3 GPa a valores entre 2.7 y 3.8 GPa y elevando la tensión de rotura en un orden de magnitud, igualándose con otras direcciones. A diferencia de otros tratamientos térmicos, no modifica la cristalinidad del PEEK, lo que sugiere que la mejora estructural proviene principalmente de la optimización de las interfaces entre capas. Este método permite fortalecer las piezas impresas sin cambiar su composición original, ofreciendo una solución eficiente para mejorar su resistencia mecánica. Sin embargo, es importante recalcar que los resultados pueden extrapolarse a otros materiales, pero con ciertas consideraciones, puesto que la clave del éxito del postprocesamiento por microondas es la capacidad del relleno de carbono en el PEEK para absorber eficientemente la energía de microondas, lo que facilita un calentamiento rápido y la mejora en la adhesión entre capas. Por tanto, plásticos sin refuerzos conductores, como el PLA o ABS estándar, no podrían absorber la energía de microondas eficientemente y no se verían un beneficio del proceso en su estado original (Ai et al., 2022).

Por otra parte, se puede mejorar la conductividad eléctrica de piezas nanocompuestas hechas con MEX a partir de tratamientos térmicos y de presión. Los tratamientos térmicos consisten en someter las piezas a temperaturas controladas para favorecer la reorientación y percolación de los nanorellenos conductores dentro de la matriz polimérica, mejorando la conectividad eléctrica. Por otro lado, los tratamientos de presión aplican fuerzas mecánicas para compactar la estructura y reducir defectos internos, optimizando el contacto entre las cargas conductoras. Estos métodos permiten mejorar significativamente las propiedades eléctricas de las piezas sin alterar su geometría original, haciéndolas más adecuadas para aplicaciones en electrónica flexible y sensores avanzados. Resulta esencial mencionar que es posible aplicar estos métodos a otros materiales, como metales o cerámicas, para mejorar propiedades específicas. Sin embargo, la eficacia de estas técnicas dependerá de las características intrínsecas de cada material y de las propiedades deseadas en la aplicación final, por lo que resulta esencial realizar estudios específicos para evaluar la viabilidad y efectividad de extrapolar estos métodos a otros materiales (Karakurt & Lin, 2020).

Adicional a lo anterior, existen otros métodos para postprocesado de MEX, como el lijado, que es un proceso manual o mecánico que utiliza distintos granos de lija, comenzando con los más gruesos para eliminar irregularidades y progresando a más finos para suavizar la superficie. Complementario a esto, el pulido emplea herramientas rotativas y compuestos abrasivos para obtener un acabado brillante y homogéneo. Además, para mejorar la apariencia y proteger la pieza, se pueden aplicar recubrimientos, como imprimaciones y pinturas, que también pueden ayudar a ocultar imperfecciones. Otra técnica eficaz es el tratamiento con vapor de solvente, donde la exposición controlada a vapores de sustancias como acetona en ABS o tetrahidrofurano en PLA disuelve superficialmente la capa externa del material, eliminando la textura estriada típica de la impresión 3D. Adicionalmente, el post-curado térmico implica calentar la pieza en un horno o en un entorno controlado para mejorar la adhesión entre capas, aumentar la resistencia mecánica y reducir tensiones internas. Así, la combinación de estos métodos dependerá del material empleado y de los requisitos específicos del producto final (Chohan & Singh, 2017).

Para el caso de VPP, existen cuatro pasos identificados para procesar las piezas una vez impresas: Remoción, limpieza, post-polimerización y eliminación de estructuras de soporte. La remoción consiste en desprender la pieza de la plataforma de construcción, un paso crítico para evitar daños en la estructura impresa. En la limpieza se elimina la resina no curada sumergiendo la pieza en solventes orgánicos, como alcohol isopropílico (IPA) o tripropilenglicol monometil éter (TPM). Estudios han demostrado que el TPM ofrece mayor precisión dimensional en comparación con el IPA. Seguidamente, en la post-polimerización, la pieza se somete a radiación UV en una cámara de curado para completar la polimerización, lo que mejora sus propiedades mecánicas, estabilidad dimensional y grado de conversión del material. Diferentes máquinas de curado pueden influir en la resistencia a la fractura y dureza del material. Finalmente, la eliminación de estructuras de soporte se realiza mediante herramientas como discos de diamante, cortadores o puntas ultrasónicas, dependiendo de la fragilidad y precisión requerida en la pieza final (Piedra-Cascón et al., 2021).

En adición, para VPP existen técnicas como la desvinculación (debinding), que elimina los ligantes orgánicos y previene defectos como grietas, y la sinterización, que fusiona las partículas de cerámica a altas temperaturas, donde se ha demostrado que temperaturas de hasta 1600 °C y un tiempo de sostenimiento de 4 horas optimizan la densidad y resistencia mecánica. Además, el control de la tasa de calentamiento es crucial para evitar deformaciones, mientras que la caracterización de materiales mediante microscopía

electrónica de barrido (SEM), difracción de rayos X (XRD) y espectroscopía La aplicación de estas técnicas asegura la integridad estructural y composicional de las piezas, garantizando así su rendimiento en aplicaciones industriales (Kong et al., 2023).

#### 4.5. Conclusión

Para ambas tecnologías de AM existen cuatro etapas diferenciadas en el proceso de AM, sólo resultan tener los mismos pasos en la etapa de diseño. Así, las tecnologías vistas poseen las siguientes variables por etapa que deben ser controladas para un correcto desarrollo de la pieza:

##### Diseño de la Pieza

1. Tolerancias y precisión dimensional: Se pueden evaluar con herramientas de metrología como calibres digitales, micrómetros, escáneres 3D o máquinas de medición por coordenadas (CMM). Para su control, el software CAD debe permitir la parametrización de tolerancias, y la impresora debe configurarse con los parámetros adecuados para minimizar desviaciones (Gapinski et al., 2014).
2. Geometría y complejidad del diseño: Es posible medir dichas variables mediante el análisis de factibilidad mediante software de simulación y optimización topológica. Para su control, se deben evitar elementos difíciles de imprimir, como voladizos pronunciados o cavidades cerradas, optimizando el diseño para la fabricación aditiva (Rezaie et al., 2013).
3. Selección de materiales: Se puede medir mediante la evaluación de propiedades mecánicas, térmicas y químicas mediante pruebas de laboratorio (ensayos de tracción, dureza, resistencia térmica). Para su control, se debe seleccionar un material compatible con la tecnología de impresión y validar su idoneidad a través de bibliotecas de materiales y pruebas preliminares (Kim et al., 2018).
4. Orientación de la pieza en la impresión: Se puede medir mediante simulación de esfuerzos y tensiones residuales en software FEA (Análisis de Elementos Finitos). Para su control, se debe orientar la pieza para minimizar soportes, reducir distorsiones y mejorar la resistencia mecánica en las direcciones críticas (Archer, 1996).
5. Resolución y calidad superficial: Es posible medirlas mediante la evaluación con perfilómetros, rugosímetros o análisis de imágenes. Se puede controlar mediante el

ajuste de la resolución de la impresora, la selección del tamaño de capa y el uso de postprocesos como lijado o tratamientos térmicos (Ali & Murugan, 2017).

6. Eficiencia del material y sostenibilidad: Se puede medir la relación entre material utilizado y material desperdiciado, así como también el análisis de impacto ambiental del proceso. Su control es posible mediante la optimización del diseño para reducir desperdicio, uso de materiales reciclables y estrategias de manufactura sostenible (Lušić et al., 2015).
7. Costo y tiempo de fabricación: Se puede medir los costos de material, tiempo de impresión y procesos de postprocesado. Su control es posible mediante el diseño optimizado para minimizar tiempo de impresión y reducir costos sin comprometer la calidad del producto (Thomas & Gilbert, 2014).

#### Software de Corte

Las principales variables de proceso en MEX que deben controlarse en el software de *corte* y cómo pueden medirse y controlarse son:

1. Altura de Capa: Se mide en micrómetros o milímetros y se puede verificar con un microscopio o un perfilómetro óptico. Se puede controlar ajustando la altura de capa según el nivel de detalle requerido. Capas más delgadas aumentan la resolución pero incrementan el tiempo de impresión; capas más gruesas aceleran la impresión pero pueden reducir la calidad (Liao et al., 2022).
2. Diámetro de la Boquilla: Se verifica con calibradores de precisión o por análisis del diámetro del filamento extruido. Se controla seleccionando un diámetro adecuado para equilibrar velocidad y resolución. Boquillas más grandes permiten impresiones rápidas, pero con menor detalle; boquillas pequeñas permiten detalles finos, pero requieren velocidades de impresión más bajas (Tezel & Kovan, 2021).
3. Velocidad de Extrusión: Se mide en  $\text{mm}^3/\text{s}$  y se puede verificar con pruebas de flujo de material, lo que incluye simulaciones numéricas y modelos analíticos basados en la cinemática del flujo del polímero. Se puede ajustar la velocidad en el software para evitar subextrusión (hilos finos o huecos en la pieza) o sobreextrusión (bordes defectuosos o material acumulado). Un flujo inconsistente afecta la adhesión entre capas (Agassant et al., 2019).
4. Velocidad de Movimiento de la Boquilla: Se mide en  $\text{mm}/\text{s}$  y se puede evaluar en las

configuraciones de la impresora. Su control permite regular la velocidad para evitar vibraciones y deformaciones. Velocidades altas reducen el tiempo de impresión, pero pueden generar defectos en las capas; velocidades bajas mejoran el detalle, pero aumentan el tiempo de fabricación (Agassant et al., 2019).

5. Patrón de Relleno: Se analiza mediante tomografía, escaneo 3D o inspección visual del interior de la pieza. Al seleccionar un patrón adecuado (líneas, cuadrícula, panel, etc.), se optimiza la resistencia y el consumo de material, pues rellenos densos aumentan la resistencia pero incrementan el uso de material y el tiempo de impresión (Thompson et al., 2016).
6. Soportes: Se evalúa la adhesión, facilidad de remoción y calidad del acabado en zonas de soporte. Se puede controlar ajustando la densidad y el patrón de los soportes según la geometría de la pieza. Soportes demasiado densos pueden ser difíciles de retirar, mientras que soportes insuficientes pueden generar defectos en voladizos y salientes (Jiang et al., 2018).

Las principales variables de proceso que deben controlarse en el software de corte para VPP y cómo pueden medirse y controlarse son:

1. Grosor de Capa: Se mide en micrómetros ( $\mu\text{m}$ ) y se verifica con microscopía óptica o perfilómetros láser. Se debe equilibrar entre calidad y tiempo de impresión. Capas más delgadas mejoran el detalle pero incrementan el tiempo de fabricación; capas más gruesas reducen el tiempo de impresión pero pueden perder definición en los detalles (Liao et al., 2022).
2. Tiempo de Exposición de Capa: Se mide en segundos y se valida mediante pruebas de dureza y análisis microscópico del curado de la resina. Para controlarlo, se debe ajustar según la sensibilidad de la resina y la intensidad de la fuente de luz, pues un tiempo inadecuado puede generar sobrecurado, lo que genera pérdida de detalles, o subcurado, que produce debilidad estructural (Chaudhary et al., 2022).
3. Tiempo de Retraso: Se establece en el software de corte y se mide mediante pruebas de rugosidad. Se debe ajustar para permitir que la resina fluya y se establezca correctamente antes de la siguiente exposición, evitando defectos de unión entre capas (Cao et al., 2023).
4. Soportes: Se analiza mediante pruebas de resistencia estructural y facilidad de

remoción. Para su control, se deben distribuir estratégicamente para evitar deformaciones sin dificultar el postprocesado (Xu et al., 2021).

5. Luz de Cura: La longitud de onda se mide en nanómetros (nm) y la potencia emitida en miliwatts por centímetro cuadrado ( $\text{mW}/\text{cm}^2$ ) con un radiómetro UV, así como también verificando la longitud de onda emitida y si está cercana a la requerida por la resina. Por tanto, la luz debe ajustarse a la resina específica para garantizar un curado adecuado sin sobreexposición (Pagac et al., 2021).
6. Configuración de Zonas de Impresión: Se evalúa mediante la comparación de curado en diferentes regiones del modelo. Su control permite optimizar tiempos de exposición en zonas con geometrías críticas o diferencias en grosor (Paral et al., 2023).
7. Parámetros de Multicapa: Se verifican mediante simulaciones, pruebas de adherencia y dureza entre diferentes capas de material. Para su control, se debe garantizar que cada material cure correctamente sin afectar la unión con otras capas (Manvatkar et al., 2014).
8. Verificación de Capas y Relleno de Borde: Se mide utilizando escáneres de cama plana comerciales. Se digitalizan las capas impresas y se comparan con los modelos CAD mediante algoritmos de procesamiento de imágenes. Después, se analizan desviaciones geométricas, como irregularidades en el contorno y errores en la superposición de capas. Así, la precisión de la verificación se evalúa cuantificando diferencias entre la capa impresa y su diseño teórico. Su control permite prevenir errores y realizar ajustes en el diseño o parámetros antes de imprimir, asegurando un proceso eficiente (Blanco et al., 2019).

## Impresión

Para MEX, las variables de proceso que deben controlarse en la impresión son:

Las principales variables de proceso que deben controlarse en la impresora 3D, según el texto, incluyen:

1. Configuración de la impresora: Es crucial que la impresora esté configurada adecuadamente según las instrucciones del proveedor. Esta variable abarca tanto la configuración inicial como las actualizaciones periódicas del hardware y software. Se verifica siguiendo las especificaciones del fabricante para asegurar que los

parámetros (como la temperatura, velocidad y tipo de filamento) sean los correctos. Las actualizaciones de firmware y software se deben hacer de acuerdo con las recomendaciones del proveedor, para mantener la impresora al día (Priedel, 2023).

2. Calibración de la impresora: Incluye la calibración de la cama de impresión y la correcta distancia entre el cabezal de impresión y la cama. Se mide utilizando herramientas de calibración como calibres digitales o sensores automáticos para ajustar la altura entre la boquilla y la cama. La nivelación se realiza antes de cada impresión y se verifica visualmente o con herramientas específicas (Mukherjee et al., 2023).
3. Superficie de impresión y adhesión: La limpieza de la superficie de impresión y el ajuste de la distancia entre la boquilla y la cama son clave para una correcta adhesión de las primeras capas. La limpieza se puede realizar con un paño o alcohol isopropílico para eliminar residuos de impresiones anteriores. El ajuste de la distancia entre la boquilla y la cama se mide a mano o con sensores de nivelación automática (Mukherjee et al., 2023).
4. Velocidad de los ventiladores de enfriamiento: El control de la velocidad de los ventiladores asegura un enfriamiento uniforme de las capas durante la impresión. La velocidad de los ventiladores se ajusta en el software de corte. Se pueden usar ventiladores adicionales o sistemas de refrigeración mejorados si es necesario, para asegurar que el enfriamiento no sea ni excesivo ni insuficiente (Farshidianfar et al., 2016).
5. Calidad del filamento: El tipo de filamento y su almacenamiento son variables críticas que afectan la calidad de impresión. Los filamentos se seleccionan de acuerdo con su adhesión y tipo (por ejemplo, PLA, ABS). Se almacenan en un lugar seco, a menudo con deshumidificadores o bolsas selladas para evitar la absorción de humedad (Lendvai et al., 2024).
6. Temperatura de la cama de impresión: Para evitar problemas de deformación (warping), se ajusta la temperatura de la cama. La temperatura de la cama se ajusta en el software de la impresora. Se mide con una termocupla o sensor de temperatura integrado en la impresora. Un aumento de temperatura puede reducir la contracción del material durante el enfriamiento (Tognana et al., 2024).
7. Retracción: Los problemas de retracción pueden causar hilos no deseados (stringing)

o huecos en la impresión. Se controla ajustando la distancia y velocidad de retracción en el software de corte, así como generando caminos de impresión para el extrusor que eviten la retracción. La temperatura de extrusión también se ajusta para evitar que el material se fluya demasiado, lo que podría generar hilos. Esto se puede medir visualmente o por la calidad de las impresiones mediante la presencia de hilos no deseados (Jin et al., 2017).

8. Calibración dimensional: Las piezas impresas pueden presentar dimensiones incorrectas si no se calibra correctamente la impresora. Se puede medir con calibradores o micrómetros después de la impresión. Si se detectan discrepancias, se pueden ajustar los ejes de la impresora o los factores de escala en el software de corte para corregir los errores dimensionales (Mukherjee et al., 2023).

Para el caso de VPP, las variables a considerar en el proceso de impresión son:

1. Compatibilidad entre la luz y la resina: Se verifica la longitud de onda en nanómetros y se compara con las especificaciones de la resina. Su control se da usando fuentes de luz adecuadas según el fotoiniciador de la resina (van der Linden et al., 2020).
2. Viscosidad de la resina: Se puede medir utilizando un reómetro, que evalúa la resistencia al flujo bajo diferentes condiciones de cizallamiento, o también con viscosímetros rotacionales. Se puede controlar ajustando la carga de relleno, el tamaño y distribución de partículas, así como también con el uso de diluyentes y dispersantes (Vyas et al., 2022).
3. Configuración de la plataforma de construcción: La nivelación se verifica con niveles o sensores, mientras que la temperatura se regula mediante sistemas de calefacción y controladores PID. La rugosidad superficial se mide con perfilómetros, y la adherencia se evalúa con pruebas prácticas. Para controlar la plataforma, se ajusta su nivelación, se prepara la superficie con adhesivos o recubrimientos, y se orienta la pieza adecuadamente en el software. Estos procesos aseguran una buena adherencia, minimizan deformaciones y mejoran las propiedades mecánicas de las piezas impresas (Shen et al., 2020).
4. Flujo de oxígeno: el flujo de oxígeno se mide y controla mediante un sistema que regula la concentración de oxígeno en la zona de impresión cercana a la ventana de proyección. Se utiliza un sensor de oxígeno para monitorear la concentración en tiempo real, mientras que un sistema de suministro de gas ajusta el flujo para

mantener una zona muerta óptima (una capa delgada no polimerizada) que reduce la adhesión entre la pieza y la ventana (Lian et al., 2017).

5. Temperatura de la resina: Se mide utilizando un termómetro o un sensor de temperatura integrado en el sistema de impresión 3D. Para controlar la temperatura, se emplea un sistema de calefacción que ajusta y mantiene la resina a una temperatura específica, optimizando su viscosidad para facilitar la extrusión durante la impresión. Este control térmico es crucial para garantizar la fluidez adecuada de la resina y la calidad de las piezas impresas (Luo et al., 2019).

Además de estas variables, existen dos variables ambientales que son comunes para ambas tecnologías:

1. Presión Ambiental: Se mide utilizando sensores de presión de alta precisión instalados en una cámara de vacío, que monitorean continuamente las condiciones durante el proceso. Para controlar la presión, se emplea un sistema de vacío con bombas y válvulas de regulación, que ajusta y mantiene la presión en niveles específicos, desde vacío hasta presión atmosférica (Ding et al., 2022).
2. Temperatura Ambiente: Se mide utilizando termopares o sensores infrarrojos ubicados cerca de la zona de impresión, que registran datos en tiempo real. Para controlarla, se emplean sistemas de climatización o cámaras cerradas con control térmico, que ajustan y mantienen la temperatura dentro de un rango específico (Liu et al., 2022).

## Postprocesado

Para el caso de MEX, se tienen las siguientes variables a medir y controlar:

1. Resistencia a la Tracción, Módulo de Elasticidad, Resistencia a la Flexión y Porosidad de las Piezas: Estas propiedades se evalúan mediante ensayos mecánicos (tracción y flexión) y análisis de densidad, mientras que la microestructura y la interfaz fibra-matriz se examinan con microscopía electrónica de barrido (SEM). El postprocesado con microondas se controla ajustando parámetros como el tiempo de exposición y la potencia, lo que permite optimizar la cristalinidad del material y reducir la porosidad, mejorando así las propiedades mecánicas (Ai et al., 2022; Karakurt & Lin, 2020).
2. Características Superficiales (Rugosidad, Acabado). Estas variables se miden

mediante técnicas de perfilometría o microscopía. El control se realiza aplicando diferentes métodos de postprocesado, como tratamientos térmicos, pulido químico o mecánico, y recubrimientos, ajustando parámetros como tiempo, temperatura o presión para optimizar los resultados (Chohan & Singh, 2017; Karakurt & Lin, 2020).

Para VPP, las variables a medir y controlar son:

1. Precisión Dimensional, Rugosidad Superficial y Propiedades Mecánicas: Estas variables se miden mediante técnicas como calibres, micrómetros o escáneres 3D (para precisión dimensional), la perfilometría (para rugosidad), microscopía óptica o microscopía electrónica de barrido (SEM, para análisis superficial) y ensayos mecánicos (para resistencia y rigidez). El control se realiza ajustando los procedimientos de postprocesado, como el lavado para eliminar resina no polimerizada, la curación térmica o UV, y el pulido, optimizando parámetros como tiempo, temperatura e intensidad de la luz para mejorar la calidad y funcionalidad de las piezas (Kong et al., 2023; Piedra-Cascón et al., 2021).
2. Densidad y Microestructura: Estas variables se miden mediante técnicas como la densitometría (para densidad), y microscopía electrónica de barrido (SEM, para microestructura). El control se realiza ajustando parámetros de postprocesado, como la temperatura y duración del sinterizado, así como métodos de limpieza y curado, para optimizar las propiedades finales y minimizar defectos como porosidad o deformaciones (Kong et al., 2023).

Así, un resumen de las variables que afectan las distintas etapas del proceso de fabricación de piezas mediante MEX es el siguiente:



Figura No. 2. Cuadro resumen de las variables que afectan el proceso de fabricación mediante la tecnología MEX.

Para el caso de VPP, las variables a considerar son las siguientes:

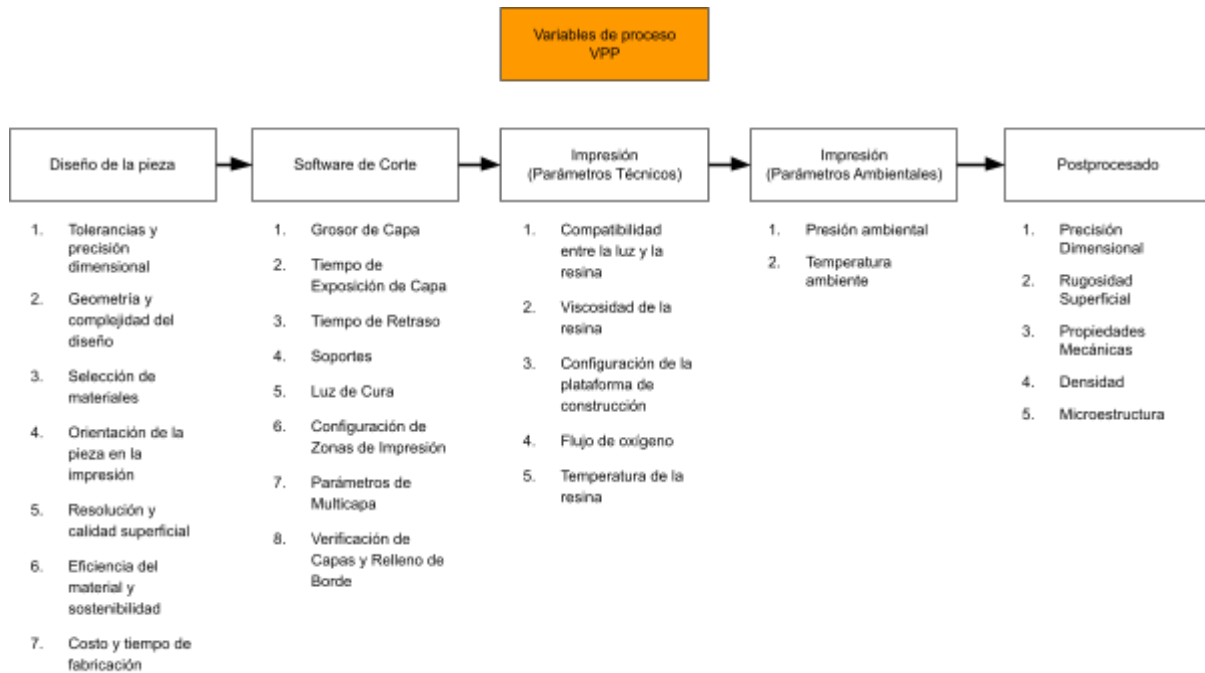


Figura No. 3. Cuadro resumen de las variables que afectan el proceso de fabricación mediante la tecnología VPP.

## 5 Variables de Producto y su impacto

Las variables de producto en una pieza fabricada mediante AM son aquellas características que determinan su calidad y desempeño final. Estas variables incluyen aspectos geométricos, dimensionales, estructurales y mecánicos que pueden ser afectados por el proceso de fabricación, por lo que su control es fundamental para garantizar la calidad, funcionalidad y fiabilidad de las piezas fabricadas. Una gestión adecuada de estas variables permite optimizar la eficiencia del proceso, reducir defectos y minimizar desperdicios, lo que se traduce en una producción más rentable y competitiva. Además, el control riguroso de estas características es esencial para cumplir con estándares de calidad y normativas en sectores que requieren alta precisión y repetibilidad en sus componentes. Las variables de producto que más influyen en la calidad de la pieza final son las siguientes (Colosimo et al., 2018; Kim et al., 2018):

### 5.1. Geometría

- Se refiere a la precisión con la que la pieza fabricada se ajusta a su diseño original en términos de forma y dimensiones e incluye las desviaciones de forma y tamaño,

así como la rugosidad superficial.

- Se puede variar con: La estrategia de escaneo, pues la forma en que el láser o haz de electrones recorre cada capa, o bien la forma en cómo se deposita el material, puede generar distorsiones geométricas si no está bien optimizada; el tamaño del punto del láser, pues un haz más grueso puede afectar la precisión en los detalles finos de la pieza; la altura de la capa, ya que capas más gruesas aceleran el proceso, pero reducen la fidelidad geométrica; el material utilizado, ya que diferentes materiales tienen distintas tasas de contracción o expansión térmica, lo que puede causar deformaciones; la velocidad de impresión; la temperatura de curado; la aplicación de postprocesado y la orientación de la pieza.
- Se puede medir a partir de: Escaneo 3D y comparación con CAD, donde se utilizan escáneres 3D de alta precisión para comparar la pieza impresa con el modelo digital; máquinas de Medición por Coordenadas (CMM), pues permiten medir dimensiones con precisión micrométrica mediante una sonda de contacto; perfilómetros y rugosímetros, para evaluar la rugosidad superficial en micrómetros ( $R_a$ ,  $R_z$ ); Microscopía Óptica o Electrónica (SEM), para inspeccionar detalles finos y acabados superficiales.

## 5.2. Errores Volumétricos

- Son defectos internos que afectan la integridad estructural de la pieza e incluyen porosidad, que son pequeñas cavidades internas que debilitan la pieza; grietas, que corresponden a fracturas internas causadas por tensiones térmicas y estrés residual, el cual se refiere a fuerzas internas que pueden generar deformaciones o fallas prematuras.
- Se puede variar con: Densidad de energía, pues ajustando la potencia del láser y la velocidad de escaneo se puede lograr una fusión más homogénea, evitando la formación de poros o grietas; distribución del tamaño del polvo, ya que un polvo más uniforme mejora la compactación y reduce la porosidad; control térmico, ya que la temperatura del proceso y el flujo de gas influyen en la disipación de calor, lo que puede minimizar grietas y estrés residual y, además, se puede ajustar con cambios en la presión de compactación del polvo y en los parámetros de sinterización.
- Se puede medir a partir de: Tomografía Computarizada Industrial (CT-Scan), pues permite inspeccionar la estructura interna sin destruir la pieza, identificando poros y

grietas; Ultrasonido y Radiografía de Rayos X, que se usan en materiales densos para detectar discontinuidades internas y Medición de Tensión Residual (Difracción de Rayos X o Barrido Láser), pues evalúa tensiones internas que pueden generar deformaciones.

### **5.3. Propiedades Mecánicas**

- Determinan la resistencia y durabilidad de la pieza en diferentes condiciones de uso y corresponden a resistencia, que es la capacidad de soportar cargas sin deformarse permanentemente; la dureza, que corresponde a la oposición al desgaste o rayado; la tenacidad, que es la capacidad de absorber energía antes de fracturarse y la fatiga, que es la resistencia a fallas bajo cargas cíclicas.
- Se puede variar con: la orientación de impresión, pues la dirección en la que se imprime la pieza afecta su resistencia, ya que las capas pueden actuar como puntos débiles si no están bien fusionadas; los parámetros de solidificación, ya que controlando la velocidad de enfriamiento se pueden modificar la microestructura y propiedades mecánicas y los tratamientos post proceso, puesto que procesos como el tratamiento térmico, el pulido o la infiltración con resinas pueden mejorar la resistencia y dureza de la pieza.
- Se puede medir a partir de: Pruebas de tracción y compresión, que se realizan en máquinas de ensayos mecánicos para medir la resistencia a cargas estáticas; medición de dureza (Rockwell, Vickers, Brinell), que se mide aplicando una carga con un indentador y observando la huella resultante; pruebas de fatiga, en donde se somete la pieza a cargas cíclicas para evaluar su durabilidad en condiciones de uso e impacto (Charpy o Izod), pues mide la tenacidad de la pieza, es decir, su capacidad de absorber energía antes de fracturarse

## **B. Herramientas ingenieriles**

### **1. Estadística descriptiva**

Es un conjunto de cálculos matemáticos que permiten resumir datos de manera concisa para su posterior análisis. Se utiliza para comprender de una manera cuantitativa las implicaciones de los comportamientos de la información recolectada (Marshall & Jonker, 2010). Para su implementación, se requiere de un conjunto de datos cuantitativos. El

resultado de su uso es la presentación de los datos como medidas que resumen la información de manera representativa, las cuales corresponden a (Walpole et al., 2012):

### 1.1. Media

La media es el promedio aritmético, el cual está dado por la suma de todos los datos tomados dividida entre el número total de observaciones. Esta medida es representativa de los datos sólo cuando estos están distribuidos de igual forma por encima y por debajo de su valor, es decir, tienen un comportamiento normal (Kaur et al., 2018).

### 1.2. Varianza

Es una medida que corresponde a la dispersión que presentan los datos respecto a la media y se define como la sumatoria del cuadrado de la diferencia entre el valor de cada dato y la media. La raíz cuadrada de la varianza se conoce como desviación estándar. En un set de datos normales, el 68% de los datos se ubican a una distancia de una desviación estándar por encima y por debajo de la media, el 95% a dos desviaciones estándar y el 99% a tres desviaciones estándar (Kaur et al., 2018).

## 2. Análisis de regresión

Es una técnica estadística que relaciona una variable dependiente y dos o más variables independientes mediante un método de regresión. Es útil para establecer cómo depende una variable de otra, si es que hay relación alguna, así como también predecir comportamientos de las variables (Walpole et al., 2012). Para implementar esta herramienta se requiere un set de datos que contenga las mediciones de la variable dependiente y las variables independientes correspondientes, así como del cálculo de los mínimos cuadrados y del coeficiente de determinación. El resultado es un modelo matemático que describe la relación entre la variable dependiente y la independiente (Tyagi et al., 2022).

### 2.1. Mínimos cuadrados

Consiste en una técnica matemática para encontrar la recta que mejor se ajuste a los datos obtenidos. El producto es la ecuación 3.1, la cual es conocida como ecuación de regresión (Gutiérrez Pulido & de la Vara Salazar, 2004):

$$y = a + b \cdot x \quad 3.1$$

Dónde,

$y$  = variable dependiente.

$x$  = variable independiente.

$n$  = cantidad de datos recolectados.

$i$  = número de réplica.

$$b = \frac{n \cdot \sum(x_i \cdot y_i) - \sum x_i \cdot \sum y_i}{n \cdot \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} = \text{pendiente de la recta.}$$

$$a = \frac{\sum y_i - b \cdot \sum x_i}{n} = \text{intersección con el eje de la variable dependiente.}$$

## 2.2. Coeficiente de determinación

Es una métrica de evaluación que determina la intensidad de la relación entre el modelo descrito mediante Mínimos Cuadrados y la variable dependiente. Se calcula a partir de la ecuación 3.2 (Tyagi et al., 2022):

$$R^2 = 1 - \frac{SC_{Error}}{SC_{Total}} \quad 3.2$$

Dónde,

$R^2$  = Coeficiente de determinación

$SC_{Error} = \sum(x_i - y_i)^2$  = Suma de cuadrados del error.

$SC_{Total} = \sum(x_i - \bar{x}_i)^2$  = Suma de cuadrados del total de datos.

## 3. Estudio R&R

Un estudio R&R (Repetibilidad y Reproducibilidad) es una herramienta del análisis de sistemas de medición que evalúa la precisión y consistencia de un instrumento o proceso de medición (Soares et al., 2022). Sirve para determinar si un sistema de medición es confiable al identificar cuánta variación proviene del propio instrumento (repetibilidad) y del operador (reproducibilidad) (Burdick et al., 2005). Para realizarlo, se requiere un grupo de operadores, piezas o muestras representativas y un instrumento de medición que será utilizado varias veces por distintos operarios. El resultado permite saber si el sistema de medición es

adecuado para el control de calidad o si necesita mejoras, garantizando decisiones basadas en datos precisos (Gutiérrez Pulido & de la Vara Salazar, 2009).

### 3.1. Análisis de variaciones

El método de Análisis de Varianza (ANOVA) para el estudio R&R es una forma efectiva de identificar y cuantificar las fuentes de variación en el proceso de medición, sin asumir que no existe interacción entre el operador y la parte medida [n/a - previous conversation]. Este método descompone la variabilidad total en componentes atribuibles a las partes ( $\sigma_{parte}^2$ ), los operadores ( $\sigma_{oper}^2$ ), la interacción entre operador y parte ( $\sigma_{oper/parte}^2$ ), y el instrumento de medición ( $\sigma_{instr}^2$ ), donde la repetibilidad se define como la varianza del instrumento y la reproducibilidad incluye la varianza del operador y la interacción. A través de la construcción de una tabla ANOVA, se realizan pruebas estadísticas para determinar si existen diferencias significativas entre las partes y los operadores, y si la interacción operador  $\times$  parte es relevante (Gutiérrez Pulido & de la Vara Salazar, 2009).

### 3.2. Componentes de variación

En un estudio R&R, la variación total observada en las mediciones se descompone en la variabilidad del producto, la variabilidad debida a los operadores (reproducibilidad) y la variabilidad del instrumento (repetibilidad). La repetibilidad representa el error inherente al instrumento al medir la misma pieza repetidamente por el mismo operador, mientras que la reproducibilidad refleja la variabilidad causada por diferentes operadores al medir la misma pieza con el mismo instrumento. Estos componentes de variación se cuantifican y se expresan como porcentajes de la variación total y, de manera importante, como porcentaje de la tolerancia de la característica de calidad que se mide. Generalmente, para el análisis en % de tolerancias (P/T), se considera que un proceso de medición es excelente si el error R&R es abajo de 10%, bueno o aceptable entre 10% y 20%, marginalmente aceptable entre 20% y 30%, e inaceptable si es arriba de 30% y debe ser corregido (Gutiérrez Pulido & de la Vara Salazar, 2009).

## 4. Diseño Factorial

El diseño factorial es una metodología estadística utilizada para planificar y realizar un conjunto de pruebas que generen datos que, al ser analizados, proporcionan evidencias objetivas que permitan responder preguntas específicas sobre un sistema o proceso. Este

método permite identificar y cuantificar los efectos de diferentes factores sobre una variable de respuesta, facilitando la toma de decisiones basada en datos (Gutiérrez Pulido & Vara Salazar, 2008). Para poner en práctica esta técnica se requiere de la puesta en práctica de siete pasos que permiten la estructuración de un experimento acorde a las preguntas que se desean responder (Montgomery, 2013). El resultado esperado es establecer si cada uno de los factores que se creía al inicio que afectan a la variable respuesta realmente lo hacen, a un cierto nivel de confianza (Izalbe Izquierdo et al., 2007).

#### **4.1. Reconocimiento del problema**

Se define el objetivo del experimento identificando la necesidad de la investigación, los factores que afectan el desempeño y su impacto en costo, calidad o eficiencia. Puede incluir revisión de literatura y recopilación de datos previos para contextualizar el problema.

#### **4.2 Elección de los factores y niveles**

Se identifican los factores que influyen en la variable de respuesta y se establecen sus niveles de estudio. Es importante diferenciar entre factores manipulables, constantes y molestos para un diseño adecuado.

#### **4.3 Selección de la variable respuesta**

Se elige la variable que reflejará los efectos del experimento, asegurando que sea medible, precisa y reproducible. En algunos casos, pueden seleccionarse múltiples variables para evaluar distintos aspectos del desempeño.

#### **4.4 Elección del diseño experimental**

Se determina el tipo de diseño más adecuado según el número de factores, niveles y réplicas, buscando maximizar la información obtenida con la menor cantidad de experimentos posibles.

#### **4.5 Realización de los experimentos**

Se ejecuta el experimento según el plan establecido, asegurando disponibilidad de recursos y aplicando aleatorización para minimizar sesgos. Es recomendable realizar pruebas piloto para validar la metodología.

#### **4.6 Análisis de los datos**

Se aplican métodos estadísticos para identificar factores significativos y extraer conclusiones a un determinado nivel de confianza.

#### **4.7 Conclusiones y recomendaciones**

Se interpretan los resultados y se formulan recomendaciones para la implementación en el proceso real, evaluando su viabilidad y estableciendo planes de seguimiento para garantizar mejoras sostenibles.

### **C. Definiciones**

#### **1. Revistas indexadas**

Las revistas indexadas son publicaciones científicas incluidas en bases de datos reconocidas por su rigor académico, como Nature o Science. Se utilizan para acceder a investigaciones validadas mediante revisión por pares, garantizando calidad y relevancia (Balhara, 2012). Para utilizarlas, se requiere acceso a través de instituciones académicas, suscripciones o bases de datos abiertas, así como conocimientos básicos en búsqueda bibliográfica para localizar y seleccionar artículos pertinentes (Martin, 2018). Su uso permite mayor visibilidad, impacto y citación del conocimiento, contribuyendo al avance científico y al respaldo académico de quienes las consultan (Packer, 2019).

#### **2. Normas ISO/ASTM**

Las normas ISO/ASTM son estándares internacionales desarrollados por las organizaciones ISO (International Organization for Standardization) y ASTM International, que establecen lineamientos técnicos y de calidad aplicables en diversos sectores industriales y científicos. Se utilizan para asegurar la uniformidad, seguridad, eficiencia y compatibilidad de productos, procesos y servicios (Hoeller, 2018). Para utilizarlas, se requiere acceso a través de licencias, instituciones, o compra directa, así como conocimientos técnicos para su correcta interpretación y aplicación (ASTM International, s. f.). Su uso garantiza resultados confiables, cumplimiento normativo y reconocimiento internacional, favoreciendo la competitividad y la mejora continua (International Organization for Standardization, 2016).

### **3. Técnica multivoto**

La técnica multivoto es un método de decisión en el que la fuerza del voto de una opción es directamente proporcional a la cantidad de asignaciones que recibe en comparación con otra opción. Es decir, cuanto mayor sea el aumento en el número de votantes que escogieron una opción respecto a las otras, más recomendable será su elección (Gopal et al., 2019). Se utiliza para escoger entre varias opciones o configuraciones para una misma característica. Requiere de la elaboración de una encuesta y de un grupo de expertos que plasmen su criterio en la misma. El resultado es una puntuación para cada uno de las opciones evaluadas en la encuesta, en la que a mayor cantidad de puntos, mayor es su recomendación.

### **4. Software CAD**

El software de Diseño Asistido por Computadora (CAD) consiste en un programa que permite crear, modificar, analizar y documentar modelos 3D (PTC, s.f.). Estos sistemas son clave para la impresión 3D, ya que se requiere un modelo del objeto a imprimir (Junk & Kuen, 2016). El CAD se utiliza ampliamente en ingeniería mecánica, eléctrica y arquitectura para desarrollar modelos que sirven de base para la planificación y fabricación. Para usar CAD, los requisitos son tener acceso a un dispositivo con algún software de CAD instalado; algunos son de escritorio, móviles o basados en navegador. El resultado principal es un modelo 3D virtual que puede usarse para fabricación, visualización y planificación (9altitudes, 2019).

### **5. Software de programación del microcontrolador**

El software de programación del microcontrolador, conocido como Arduino IDE, es un entorno de desarrollo de código abierto utilizado para programar placas Arduino mediante los lenguajes C y C++ (Arduino. s.f.). Se utiliza para escribir, compilar y cargar código en los microcontroladores, facilitando el desarrollo de proyectos de electrónica y automatización (Nayyar & Puri, 2016). Para usarlo, se requiere una placa Arduino, un cable USB, el software Arduino IDE instalado en una computadora y, en algunos casos, controladores adicionales. Su resultado es un programa funcional que permite ejecutar tareas como controlar LEDs, motores, sensores y dispositivos conectados a Internet (CEAC s.f.).

## **6. Redacción científica**

La redacción científica es un tipo de escritura utilizada para comunicar de manera clara, precisa y objetiva los resultados de investigaciones, experimentos o estudios en el ámbito académico y científico (Hyland & Salager-Meyer, 2009). Sirve para compartir conocimientos, avances y descubrimientos con la comunidad científica y otros interesados en el área. Para utilizarla, se requiere una estructura clara, el uso adecuado de terminología técnica y un enfoque en la objetividad y la evidencia, evitando opiniones personales o información no verificada (Gopen & Swan, 1990). El resultado esperado es la publicación de trabajos que contribuyan al conocimiento en un área específica, permitiendo que otros investigadores reproduzcan, verifiquen o amplíen los hallazgos presentados (Universidad Católica San Pablo, s.f.).

#### IV. DIAGNÓSTICO DE LA SITUACIÓN ACTUAL

Esta sección tiene como objetivo fundamental analizar el estado actual del proceso de fabricación aditiva por extrusión de material (MEX) empleando la máquina Prusa i3 MK3S disponible en el laboratorio SIMTEC, con el fin de establecer un procedimiento que permita mejorar la exactitud dimensional lineal en los ejes X, Y y Z respecto a los datos nominales del archivo digital de la pieza. Para lograr este diagnóstico, se emprendieron varias etapas clave, en donde, primero, se abordó el diseño de una cámara de fabricación con el objetivo de controlar variables ambientales críticas como el flujo de aire, la temperatura y la humedad, identificadas en la literatura y por expertos como factores que impactan el acabado de las piezas. Paralelamente, se llevaron a cabo experimentos preliminares que incluyeron una calibración inicial de la máquina. Luego, se realizó un estudio del sistema de medición para evaluar la exactitud dimensional. Este estudio del sistema de medición, realizado en múltiples iteraciones, reveló un hallazgo significativo: el aporte del sistema de medición a la variación total superaba el 30%, por lo que es considerado un valor inaceptable, atribuyéndose esta variabilidad principalmente a la influencia de los operarios y su falta de experiencia con el instrumento. A pesar de los intentos por refinar el procedimiento de medición y capacitar a los operarios, la alta variabilidad persistió.

Adicionalmente, se realizaron experimentos con piezas de diferentes geometrías (tipo prisma, tipo lineal y cubos) para evaluar el rendimiento dimensional de la máquina en los tres ejes (X, Y, Z). Estos experimentos analizaron la incidencia de diversos factores como la posición en la plataforma, la cantidad de capas, el eje de medición, la condición de remoción de la pieza, la alineación de la pieza, el valor nominal de la dimensión, y el ciclo de fabricación, incluyendo también la temperatura y humedad ambientales como covariables; estos estudios mostraron que, efectivamente, varios de estos factores influyen de manera significativa en la precisión dimensional. Sin embargo, en la declaración del problema, como resultado principal de este diagnóstico, se concluyó que el sistema de medición existente no posee la precisión y confiabilidad necesarias, ya que la variabilidad predominante en las mediciones, atribuida al instrumento y a los operarios, impide determinar con certeza la incidencia real de los factores de fabricación previamente estudiados. Por lo tanto, se determinó como imperativo implementar acciones correctivas adicionales en el instrumento y la capacitación de los operarios para reducir su variabilidad y asegurar mediciones confiables antes de poder evaluar de forma concluyente el efecto de otros factores teóricamente identificados.

## **A. Diseño de la cámara de fabricación**

Resulta necesario realizar una cámara de fabricación (CF) para la MFA por MEX, dado que se sabe por la literatura y por relato de los técnicos de laboratorio que el flujo de aire, la temperatura ambiente y la humedad relativa del aire afectan el acabado de las piezas. Por tanto, la CF debe estar aislado al ambiente, a fin de que se tenga dentro una atmósfera controlada. Además, debe poseer tener dentro un lugar designado para colocar los sensores y el controlador. También, debe tener un fácil acceso a la MFA, tanto para extraer las impresiones como para extraer a la impresora como tal. Debe poseer orificios que permitan un flujo moderado de aire, a fin de que se pueda regular la temperatura interna. Adicionalmente, el encierro debe poseer un diseño modular, que permita separarlo de la base y poner un encierro adicional debajo de éste para aumentar su tamaño, en caso de que una impresora supere en altura las dimensiones del encierro.

Por otra parte, se debe identificar y reducir riesgos, a fin de garantizar un uso seguro. Se deben analizar peligros como altas temperaturas, atrapamientos mecánicos y emisiones de compuestos orgánicos volátiles (COVs). Para mitigarlos, el diseño debe incluir materiales resistentes al calor, estructuras seguras y ventilación con filtros. Además, se pueden agregar protecciones como paneles aislantes, bloqueo de puertas y advertencias visibles. También es clave proporcionar un manual con instrucciones claras sobre instalación, mantenimiento y precauciones. Aplicar esta norma mejora la seguridad sin afectar el rendimiento de la impresora (International Organization for Standardization, 2010). Adicionalmente, dado que la temperatura dentro del enclosure puede elevarse considerablemente, se deben determinar los límites seguros de temperatura para las superficies accesibles, dependiendo del tiempo de contacto y el material. Por ejemplo, si el usuario puede tocar accidentalmente el panel frontal o la estructura del enclosure, estos deben mantenerse dentro de un rango de temperatura segura o incluir aislamiento térmico. También se pueden agregar advertencias visuales o barreras protectoras en áreas críticas, como la superficie del hotend o la cama caliente, minimizando el riesgo de lesiones por calor (International Organization for Standardization, 2006).

Respecto a los electrónicos, se debe asegurar que los componentes eléctricos estén correctamente aislados para evitar descargas, utilizar fusibles o disyuntores para proteger contra sobrecorrientes y cortocircuitos, así como asegurarse de que los materiales del enclosure sean resistentes al calor para soportar temperaturas altas. Además, hay que garantizar que las partes eléctricas sean de difícil acceso sin herramientas, realizar pruebas de seguridad para verificar el aislamiento y la resistencia, y colocar advertencias sobre

riesgos eléctricos (International Electrotechnical Commission, 2010). Otro aspecto a analizar es que la impresora Prusa i3 MK3 posee un termistor que analiza la temperatura ambiente y detiene la operación si ésta es menor que  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  o mayor que  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , por lo que la temperatura máxima permitida puede ser establecida también según el factor de seguridad para el personal (Prusa Research, n.d.). Algunos cuidados adicionales a tener en cuenta para mitigar los riesgos químicos son: Colocar la impresora en un recinto cerrado y en un espacio ventilado, utilizar la temperatura de impresión más baja posible para reducir la vaporización de sustancias y usar una máscara de protección para evitar la inhalación de vapores nocivos. Por otra parte, los riesgos mecánicos y térmicos se pueden mitigar utilizando equipo de seguridad como guantes de protección, gafas y batas, así como también evitando tocar las superficies calientes hasta que la temperatura de los componentes alcance un nivel seguro; esperar 20 minutos antes de retirar la pieza impresa de la plataforma (Antić et al., 2023)

Además, se procedió a realizar una revisión de la literatura para saber cuáles fueron las condiciones de diseño para la CF en otros estudios, a fin de tener una guía para el diseño de la propia. Los resultados se resumen en el Cuadro No. 2 y ,muestran los valores de diseño de dos CF construidas en investigaciones científicas y una comercial de la misma compañía fabricante de la MFA que se posee en el laboratorio.

Cuadro No. 2. Comparativa de las cámaras de fabricación estudiadas.

Criterio	Experimentales		Comercial
	Gonzalez Lugo (2022)	May et al. (2021)	Prusa Research (n.d.)
Material	Acrílico	Marco de aluminio Paredes y puertas de acrílico, unidas por bisagras	Marco de aluminio Paredes y puertas de acrílico, unidas por bisagras
Forma de Apertura	Acceso por puerta frontal Bisagras hechas en 3DP Paneles extraíbles Cinta y masilla en las uniones para evitar escape de aire	Acceso frontal por las puertas Paredes superior y laterales removibles	Acceso frontal por las puertas Paredes superior y laterales removibles

Sensores Presentes	3 sensores del Kit de evaluación EK-H4 Sensirion Miden Temperatura y Humedad Relativa	Kits de medición ambiental Sensirion EK4, que incluyen 64 sensores digitales SHT7x Registran temperatura y humedad	Sensores de temperatura y humedad relativa
Ubicación de Sensores	Lejos de la boquilla y de la cama de impresión, en la parte superior del enclosure	Se ubicaron en todo el volumen de impresión, en 4 cuadrantes.	Sensor de humedad en la parte inferior y sensor de temperatura en la parte superior
Actuadores presentes	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Un ventilador que enfría el filamento antes de entrar en la boquilla</li> <li>2. Un ventilador que enfría el filamento una vez es extruido</li> <li>3. Dos ventiladores, uno de entrada y otro de salida, que conducen el aire por un sistema de agentes desecantes</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Un ventilador que enfría el filamento antes de entrar en la boquilla</li> <li>2. Un ventilador que enfría el filamento una vez es extruido</li> <li>3. Dos ventiladores, uno de entrada y otro de salida.</li> </ol>	NA
Ubicación de Actuadores	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Los primeros dos ventiladores están ubicados en el extrusor (parte de la impresora)</li> <li>2. Los otros dos se colocaron en la parte superior (entrada) y a un costado, en la parte inferior (salida)</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Los primeros dos ventiladores están ubicados en el extrusor (parte de la impresora)</li> <li>2. Los otros dos se colocaron en un costado inferior (entrada) y al costado opuesto, en la parte inferior (salida)</li> <li>3. El aire entrante pasa por un sistema deshumidificador antes de entrar al sistema</li> </ol>	NA

A partir de toda la información recolectada, se decidió realizar una encuesta, mostrada en el Apéndice No. 17, para elegir, mediante una técnica multivoto, cuál es la configuración más recomendada por los expertos para el diseño de la CF. En total, se recogieron seis respuestas de los expertos, y los resultados se muestran en el Cuadro No. 3.

Cuadro No. 3. Resultados de la encuesta aplicada a los expertos en FA.

<b>Requerimientos de estructura</b>	
<i>Requerimiento</i>	<i>Diseño más recomendado</i>
El material debe resistir temperaturas elevadas (no mayores a 60 °C) sin deformarse, pero al mismo tiempo presentar facilidad para ver el interior del enclosure.	Toda la estructura en acrílico ó Toda la estructura en policarbonato
Debe ser modular, es decir, se debe poder armar y desarmar para aumentar el tamaño de la cámara de fabricación con nuevos módulos, a fin de que pueda funcionar con impresoras de mayor tamaño, en caso de necesidad.	El techo puede ser extraído del resto para adaptar otro no plano, sino con forma de caja, para ganar altura
Se debe poder acceder al interior de la cámara de fabricación para manipular piezas, equipo, insumos, extraer plataforma con pieza elaborada, entre otros.	Una puerta al frente y una puerta en cada pared lateral
<b>Regulación de condiciones ambientales en el interior de la cámara de fabricación</b>	
<i>Variable a controlar</i>	<i>Importancia de su regulación</i>
Temperatura	mucho
Humedad	mucho
Presión	nada
Flujo de aire (sin crear corrientes)	mucho
<b>Medición y control de condiciones ambientales en el interior de la cámara de fabricación</b>	
<i>Pregunta</i>	<i>Diseño más recomendado</i>
¿Cuántos sensores colocaría y dónde?	Un sensor para medir cada variable, a la mitad de la cámara de fabricación
¿Cuál debe ser la distribución de los	Dos orificios de 20 mm y uno de 40 mm de

orificios para facilitar la evacuación del aire?	diámetro, aproximadamente, ubicados en las paredes laterales del marco y en el centro del techo, respectivamente (mostrados en el dibujo). Para regular el flujo de aire se utilizará un regulador de aire constante (Damper).
<b>Protección contra riesgos a usuarios del sistema de fabricación aditiva</b>	
<i>Riesgo</i>	<i>Importancia de su regulación</i>
Emisión de compuestos orgánicos volátiles (COVs)	mucho
Emisión de partículas ultrafinas (UFPs)	poco
Acumulación de calor y riesgos de incendio	poco
Riesgos mecánicos: Atrapamientos y quemaduras	mucho
Riesgos eléctricos: Riesgos de cortocircuitos o descargas eléctricas	poco
Desprendimiento de piezas	poco
<b>Protección contra riesgos de la calidad de la pieza en elaboración</b>	
<i>Riesgo</i>	<i>Importancia de su regulación</i>
Ingreso de polvo	poco
Ingreso de corrientes de aire	mucho
Ingreso de objetos que produzcan un disfuncionamiento de la impresora	mucho
Acumulación de electricidad estática	nada
Vibraciones o movimientos no controlados	mucho

Además de las respuestas obtenidas, también se comentaron las siguientes recomendaciones:

- Tener en cuenta que el tamaño debe ser adecuado para que no se atasque el filamento.
- Para TPU, ABS y Nylon los parámetros ambientales son críticos.

- Estudiar otras MFA para asegurarse que las dimensiones propuestas y los accesos realmente pueden funcionar con otras.
- Tener en cuenta la adhesión a la plataforma de fabricación.

## B. Experimentos con la MFA

A fin de establecer un procedimiento ordenado de inmersión práctica en el tema, se decidió que primero se realizaría los experimentos para la MFA de MEX (coloquialmente llamada impresora de filamento) Prusa i3 MK3S, ya que es la MFA que más se utiliza en el laboratorio, además de que es la que permite un mayor grado de personalización (Zhong Xie et al., 2025a; Zhong Xie et al., 2025b).

En la Figura No. 4, se puede observar las principales partes de la impresora, la cual cuenta con el extrusor, que deposita el material sobre la plataforma de fabricación capa por capa hasta formar las piezas. Además, se tiene los tres ejes de coordenadas; cada motor a paso trabaja en uno de esos ejes, por lo que todo movimiento del extrusor es producto de la combinación de los tres motores.

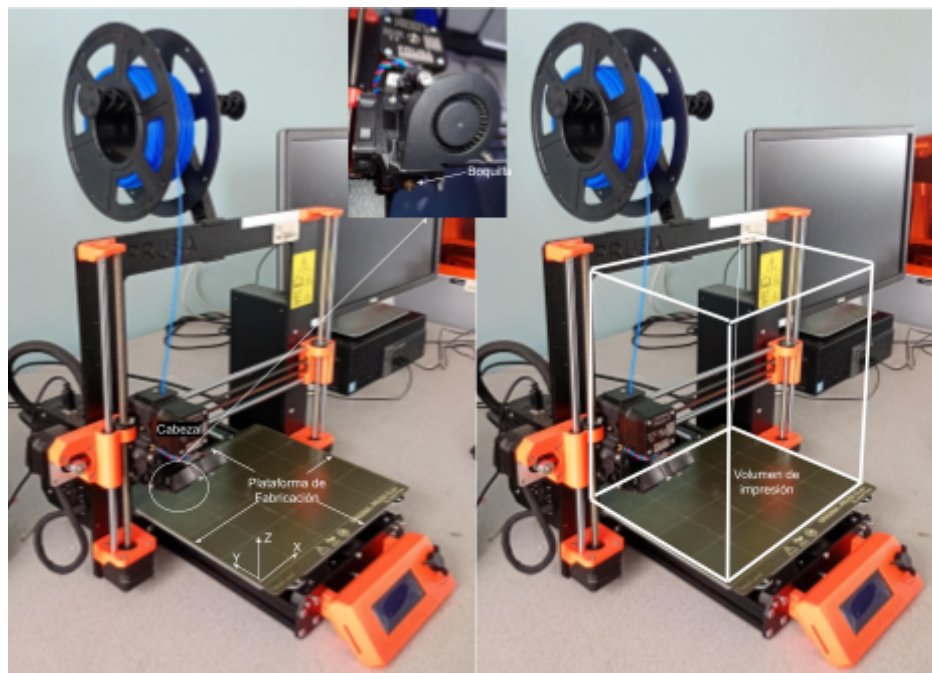


Figura No. 4. Esquema de las partes principales de la MFA de MEX utilizada.

### 1. Calibración Inicial

Lo primero a realizar fue la calibración de la impresora, realizada a partir de las opciones ya

instaladas en la impresora. Así, se utilizó el asistente de calibración, el cual primero hizo un establecimiento de las coordenadas XYZ de la impresora para realizar un mapeo del volumen de impresión estableciendo coordenadas de puntos en el espacio ya definidos por el software. Luego, se hizo una verificación de la temperatura de la impresora, la cual ya estaba predeterminada para cada tipo de material; para el PLA, material que se utilizó para los experimentos posteriores, la temperatura de la plataforma de FA es de 60 °C y la temperatura del extrusor es de 210 °C.

Acto seguido, se hizo la calibración de la primera capa, la cual consiste en establecer en qué punto del volumen de fabricación se inicia el ciclo de fabricación, mediante el ajuste manual de la coordenada en el eje Z. Originalmente, la MFA no lograba fabricar nada con éxito, ya que la primera capa siempre se despegaba de la plataforma, lo cual es debido a un mal ajuste de la posición del cabezal al momento de imprimir la primera etapa, el cual se encontraba más arriba de lo recomendado, lo cual es que haya sólo la separación necesaria para que salga el filamento (Günaydın & Türkmen, 2018). Por tanto, se procedió bajando la posición del cabezal hasta que no se extruyera nada, es decir, cuando la boquilla toca la plataforma de impresión, para luego ir aumentando gradualmente la altura hasta que la línea de impresión tuviera un color uniforme, tal y como lo indica el manual de impresión. El valor de Z ajustado fue de -2,625.

Ajustada la primera capa, se observó que seguía habiendo problemas de adhesión de las capas, por lo que se recurrió a forrar la plataforma con cinta adhesiva azul, ya que la teoría muestra que mejora la adhesión, pues la textura supone una superficie de mayor contacto para que el filamento fundido se adhiriera (Günaydın & Türkmen, 2018; Płaczek, 2019). Luego de esta modificación, se encontró una mejoría en la adhesión importante, ya que las piezas no se despegaban más, por lo que se podía completar la fabricación.

## **2. Estudio del Sistema de Medición**

### **2.1. Primera iteración**

Una vez calibrada la MFA, se procedió a establecer si el sistema propuesto para evaluar la dimensionalidad lineal de las piezas fabricadas es estable. Para esto, se determinó inicialmente que la pieza a medir sería una probeta (prisma rectangular) de 2 x 2 x 20 mm, con su lado más largo alineado en el Y, para tomar mediciones lineales en el eje X, sin despegar las piezas de la plataforma de fabricación, ya que así lo establece la norma ISO/ASTM 52902, pues puede existir deformación al retirarlas. Luego, se estableció que el instrumento de medición sería un calibrador analógico, ya que es recomendado como objeto

de precisión básica (International Organization for Standardization & ASTM International, 2019), por lo que, al no tener el laboratorio SIMTEC una tolerancia mínima establecida para las piezas fabricadas, ya que no manufacturan piezas de precisión, se puede definir como instrumento base para tomar mediciones, a fin de garantizar la simplicidad y agilidad de la toma de datos, en favor de hacer el procedimiento más accesible. Para la medición, se estableció únicamente que se tomaría la medición de forma paralela al eje X, dejando cómo y cuándo realizar cada medición relegados a la experiencia previa de cada operario.

Para realizar el estudio R&R se definió una cantidad de piezas de diez, dos operarios y tres réplicas por cada configuración de parte y operador, en concordancia con lo establecido por la teoría (Gutiérrez Pulido & de la Vara Salazar, 2009). Los resultados, indicados en la Figura No. 5, muestran que el valor p de la prueba de hipótesis de sesgo es menor a 0,001, indicando que no se tiene suficiente evidencia estadística para aceptar que no hay sesgo, lo cual se corrobora con el promedio de sesgo reportado, que corresponde a 0,33 mm.

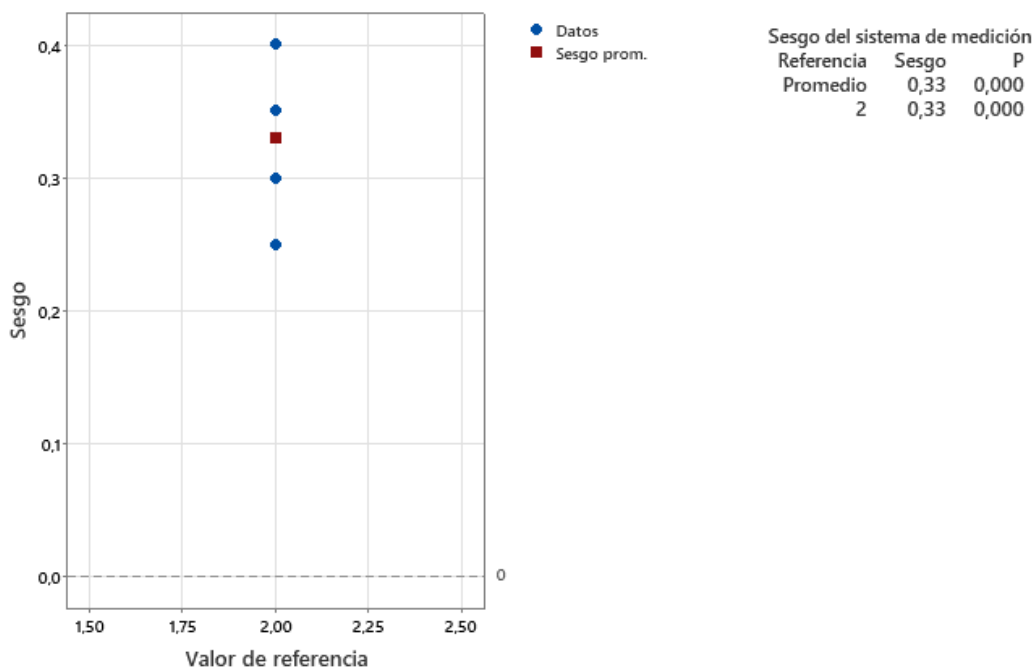


Figura No. 5. Prueba de sesgo aplicada a los datos de la primera iteración del sistema de medición.

Para el cuadro ANOVA, mostrado en el Cuadro No. 4, los valores p de las partes fueron de 0,111 y para los operarios 0,021, por lo que, para un 95% de confianza, se puede argumentar que el aporte a la variación de la diferencia entre las piezas no es significativo, mientras que el debido a los operarios sí lo es. Además, cabe destacar que la interacción

entre las piezas y los operadores no es significativa, pues su valor p es de 0,364, indicando así que la variación de los operarios aplica a todas las partes por igual.

Cuadro No. 4. ANOVA realizado para la primera iteración del sistema de medición.

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Parts	9	0.0218333	0.0024259	2.33929	0.111
Operators	1	0.0081667	0.0081667	7.87500	0.021
Parts * Operators	9	0.0093333	0.0010370	1.13131	0.364
Repetibilidad	40	0.0366667	0.0009167		
Total	59	0.0760000			

$\alpha$  para eliminar el término de interacción = 0.05

Lo anterior se puede observar en la gráfica de la Figura No. 6., la cual muestra cómo se comporta cada medición según el operario que la mida y la pieza medida, pues si bien todas las piezas presentan variación según quién mide (exceptuando la pieza 5), para las piezas 1, 2, 3, 7 y 8 se muestra que el operario 2 mide ligeramente por encima del 1, lo cual puede deberse a que aplica menos fuerza para ajustar la mordaza a la pieza.

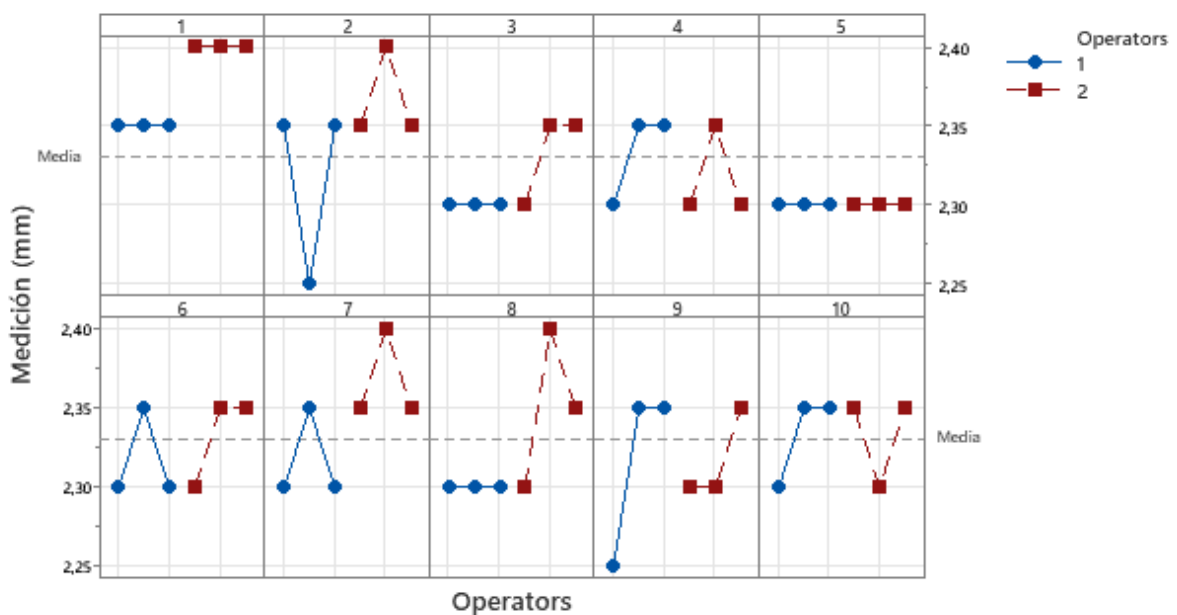


Figura No. 6. Gráfica de corridas de la primera iteración del sistema de medición.

La contribución a la variación total, mostrada en el Cuadro No. 5, debida al instrumento de medición resultó de un 65,76%, mientras que la debida a los operadores fue de un 16,88%, sumando un total debida al sistema de medición del 82,64%, por lo que el aporte debido a las partes es tan sólo del 17,36%. Teniendo en cuenta que un aporte del sistema de medición superior al 30% es inaceptable y debe ser corregido (Gutiérrez Pulido & de la Vara Salazar, 2009), se concluye que el sistema de medición no es apto para registrar los valores dimensionales de las piezas fabricadas, pues no es posible discriminar entre piezas, por lo que se deben realizar ajustes al mismo.

Cuadro No. 5. Porcentaje de contribución de cada uno de los componentes del R&R para la primera iteración del sistema de medición.

Fuente	CompVar	IC de 95%	%Contribución	
			(de CompVar)	IC de 95%
Gage R&R total	0.0011797	(0.001, 0.278)	82.64	(48.25, 99.93)
Repetibilidad	0.0009388	(0.001, 0.001)	65.76	(0.34, 91.27)
Reproducibilidad	0.0002409	(0.000, 0.277)	16.88	(1.64, 99.55)
Operators	0.0002409	(0.000, 0.277)	16.88	(1.64, 99.55)
Parte a parte	0.0002479	(0.000, 0.001)	17.36	(0.07, 51.75)
Variación total	0.0014276	(0.001, 0.278)	100.00	

## 2.2. Segunda iteración

A partir de los resultados obtenidos, se decidió abordar la variación del instrumento dándole una limpieza, así como también revisando que no hubiera orificios entre las mordazas del calibrador que pudieran estar afectando la medición. Para tratar la variabilidad de los operarios, estos fueron capacitados por la asistente del Laboratorio de Metrología de la Escuela de Producción Industrial, Judith Vindas Zamora, la cual explicó aspectos a tener en cuenta al momento de medir y leer la medición, tales como la medición perpendicular a la escala del calibrador, leer siempre la línea inferior en caso de que dos líneas de la escala secundaria estén igualmente alineadas con la escala principal, entre otros. Además, se incluyó una operaria más al equipo, a fin de determinar cuál es el operario más apto para realizar las mediciones, así como también se le hizo una ranura a las piezas a la mitad, a fin de tener una indicación visual de dónde se debía realizar la medición.

Al evaluar el sesgo, mostrado en la Figura No. 7, el cual posee un valor promedio de 0,315 mm, se observa que se rechaza la hipótesis de que el mismo no es significativo, pues el

valor p de la prueba estadística es menor al nivel de significancia para un 95% de confianza.

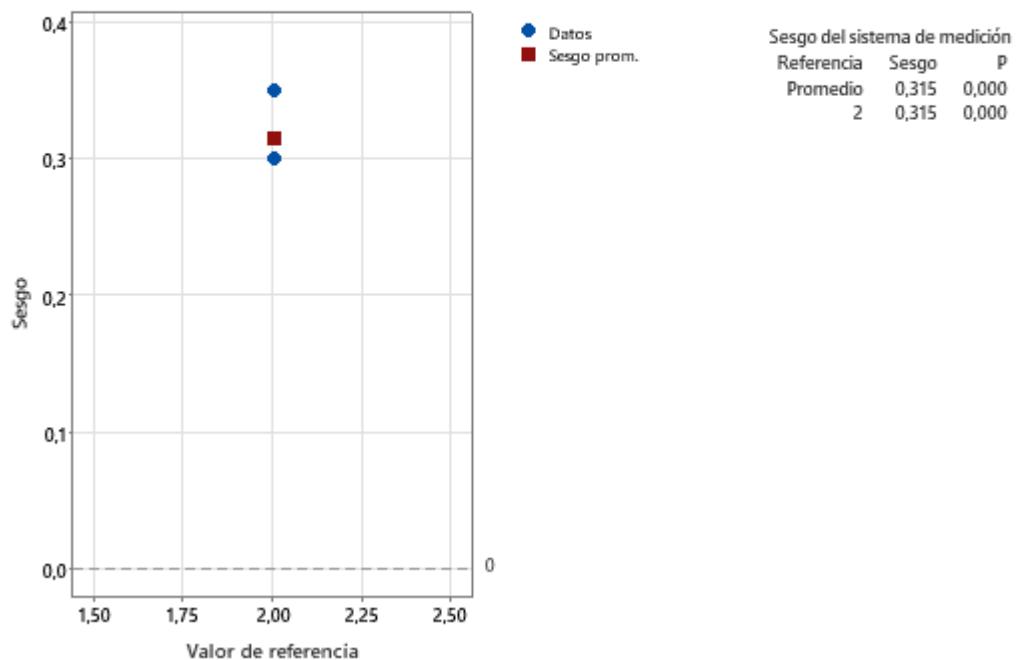


Figura No. 7. Prueba de sesgo aplicada a los datos de la segunda iteración del sistema de medición.

Adicionalmente, al analizar el cuadro ANOVA del Cuadro No. 6, se obtiene que los valores p de las piezas y de los operarios son de 0,125 y menor a 0,001, respectivamente, indicando así que no se ha corregido la variabilidad debida a los operarios, a pesar de los cambios realizados. Cabe destacar que el valor p de la interacción es de 0,692, por lo que no se puede aceptar que sea significativo, indicando que la variación de los operadores es uniforme en todas las piezas analizadas.

Cuadro No. 6. ANOVA realizado para la segunda iteración del sistema de medición.

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Parts	9	0.0055833	0.0006204	1.8611	0.125
Operators	2	0.0106667	0.0053333	16.0000	0.000
Parts * Operators	18	0.0060000	0.0003333	0.8000	0.692
Repetibilidad	60	0.0250000	0.0004167		
Total	89	0.0472500			

$\alpha$  para eliminar el término de interacción = 0.05

Lo anterior se puede observar en la Figura No. 8, la cual muestra cómo se distribuyen las

medias de las mediciones según el operario y el número de pieza, ya que los operarios Fabián y Lucía son más variables que Cui, además de que Lucía tiende a realizar mediciones superiores a la media, mientras que Cui lo hace por debajo y Fabián es el más variables, indicando que no todos ejercen la misma presión al ajustar las mordazas.

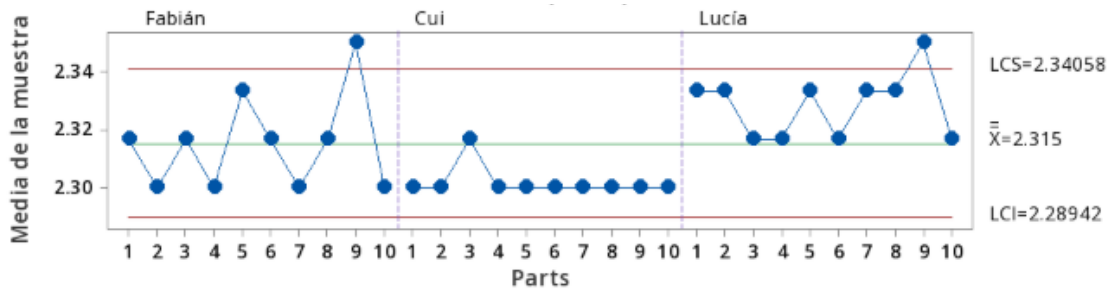


Figura No. 8. Gráfica  $\bar{X}$  por operador de la segunda iteración del sistema de medición.

En adición, se observa, en el Cuadro No. 7, que el porcentaje de contribución a la varianza total del estudio es 95,78%, componiéndose de un 67,74% debida al instrumento de medición y un 28,04% a los operarios, dejando sólo un 4,22% restante a las diferentes piezas. Así, el instrumento tuvo un aumento en su contribución de un 1,98%, lo cual puede indicar que la limpieza realizada pudo haber tenido el efecto contrario, indicando la falta de pericia de los operarios para realizar la limpieza. Para los operarios, hubo un aumento de un 11,16% en la contribución a la variación, indicando así que la capacitación no tuvo el resultado esperado y que aumentar el número de operarios también aumenta la variabilidad debida a los mismos. Esto deja un restante de 17,36% atribuido a la variación debida a las partes, lo cual es inaceptable teniendo en cuenta que el mínimo es un 70% (Gutiérrez Pulido & de la Vara Salazar, 2009).

Cuadro No. 7. Porcentaje de contribución de cada uno de los componentes del R&R para la segunda iteración del sistema de medición.

Fuente	CompVar	IC de 95%	%Contribución	
			(de CompVar)	IC de 95%
Gage R&R total	0.0005620	(0.000, 0.007)	95.78	(74.23, 100.00)
Repetibilidad	0.0003974	(0.000, 0.001)	67.74	(5.35, 91.89)
Reproducibilidad	0.0001645	(0.000, 0.007)	28.04	(7.22, 94.20)
Operators	0.0001645	(0.000, 0.007)	28.04	(7.22, 94.20)
Parte a parte	0.0000248	(0.000, 0.000)	4.22	(0.00, 25.77)
Variación total	0.0005867	(0.000, 0.007)	100.00	

### 2.3. Tercera iteración

Esta vez, a fin de mitigar el error debido al instrumento, se cambió el mismo a un calibrador digital, el cual tiene una precisión máxima de 0,01 mm, en comparación con el analógico utilizado en las dos iteraciones anteriores, que posee una precisión de 0,05 mm. Sin embargo cabe destacar que al momento de realizar esta iteración, el calibrador no poseía un certificado de calibración, por lo que sus mediciones no podían considerarse como confiables. Además, se volvió a reducir el número de operadores a dos, a fin de reducir el aumento generado en la segunda iteración. Finalmente, cabe destacar que se cambió el tamaño de la probeta medida, pues su altura y ancho cambiaron de 2 a 4 mm, a fin de que el calibrador tuviera un mejor agarre en las mordazas.

Evaluando el sesgo, se obtiene que el mismo es de 0,1905 mm, que si bien es significativo para un 95% de confianza debido a que su valor p es menor a 0,001, el mismo es menor que para la pieza de 2 x 2 x 20 cm, lo que indica que la impresora tiene mejor resolución cuando se fabrican piezas de mayor tamaño. Lo anterior se puede observar en la Figura No. 9.

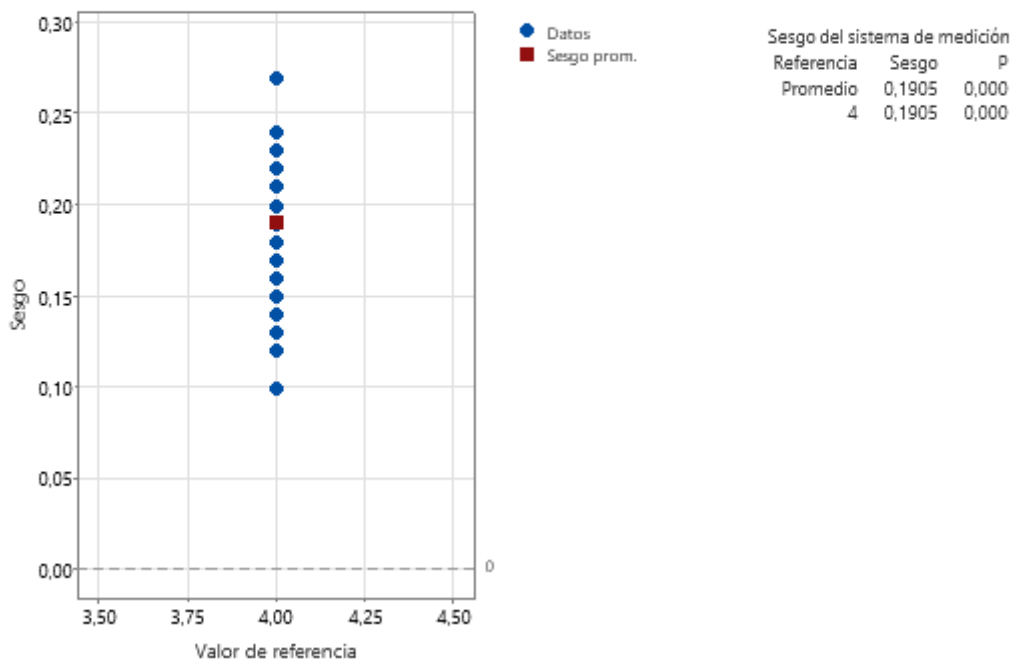


Figura No. 9. Prueba de sesgo aplicada a los datos de la tercera iteración del sistema de medición.

Respecto al ANOVA, la variación debida a las partes obtuvo un valor p de 0,241, lo que indica que las partes son indistinguibles entre sí, mientras que los operadores obtuvieron un valor p de 0,038, indicando que sí hay distinciones significativas entre los dos operarios. Además, la variación de los operadores también depende de la pieza que miden, pues el valor p de la interacción es menor a 0,001.

Cuadro No. 8. ANOVA realizado para la tercera iteración del sistema de medición.

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Parts	9	0.0341350	0.0037928	1.62432	0.241
Operators	1	0.0138017	0.0138017	5.91078	0.038
Parts * Operators	9	0.0210150	0.0023350	9.21711	0.000
Repetibilidad	40	0.0101333	0.0002533		
Total	59	0.0790850			

$\alpha$  para eliminar el término de interacción = 0.05

En la Figura No. 10, se puede observar las medias de medición para cada pieza por operario y, como se puede ver, el operario Fabián es más preciso que Cui, además de que tienden a leer una medición más alta conforme aumenta el número de pieza, lo cual indica que al moverse en el eje Y positivamente en la plataforma de fabricación, las mediciones tienden a ser mayores.

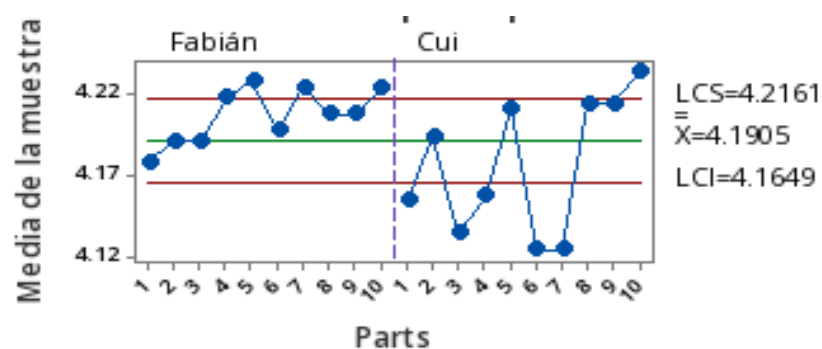


Figura No. 10. Gráfica  $\bar{X}$  por operador de la tercera iteración del sistema de medición.

Respecto a la contribución a la variación total de cada factor, mostrada en el Cuadro No. 9, la variabilidad debida al instrumento supone un 16,11% del total, lo cual es una disminución de un 51,63%, demostrando así que el cambio de instrumento sí generó un impacto positivo

en la toma de los datos, a pesar de no estar calibrado. Por otra parte, los operarios aumentaron en un 40,40% su contribución a la variación, pues el valor ahora es de 68,44%, de lo cual un 24,31% corresponde a variación general entre ellos, que según la Figura No. 9., puede deberse a que Cui aplica más fuerza que Fabián, lo que genera deformaciones en el material mayores y, por ende, mediciones dimensionales menores, mientras que un 44,13% se debe a variación entre ellos pero dependiendo de la pieza medida, lo cual podría deberse a aspectos ergonómicos, pues la fuerza aplicada al calibrador es distinta dependiendo de si está más o menos cerca del cuerpo.

Cuadro No. 9. Porcentaje de contribución de cada uno de los componentes del R&R para la tercera iteración del sistema de medición.

Fuente	CompVar	IC de 95%	%Contribución	
			(de CompVar)	IC de 95%
Gage R&R total	0.0013294	(0.001, 0.469)	84.55	(40.11, 100.00)
Repetibilidad	0.0002533	(0.000, 0.000)	16.11	(0.05, 30.82)
Reproducibilidad	0.0010761	(0.000, 0.469)	68.44	(28.08, 100.00)
Operators	0.0003822	(0.000, 0.468)	24.31	(0.00, 99.72)
Operators*Parts	0.0006939	(0.000, 0.003)	44.13	(0.15, 100.00)
Parte a parte	0.0002430	(0.000, 0.002)	15.45	(0.00, 59.89)
Variación total	0.0015724	(0.001, 0.470)	100.00	

#### 2.4. Cuarta iteración

A partir de los resultados obtenidos, se decidió corregir la variación debida al instrumento calibrándolo, a fin de conocer cuál es la incertidumbre de la medición reportada por un ente certificado: El Laboratorio de Metrología de la Escuela de Física del TEC. En el Anexo No. . se muestran los resultados de la calibración del instrumento. Luego, para reducir la variación debida a los operarios, se estableció un procedimiento en base a la literatura (Gutiérrez Pulido & de la Vara Salazar, 2009; Rendón Suárez, 2018; Trujillo Flores et al., 2021) para el correcto uso del calibrador:

1. Definición del objeto e instrumento de medición
  - a. Objeto: Dimensión en el eje x de una pieza, usando calibrador conforme a la norma ISO/ASTM 52902.
  - b. Instrumento: Calibrador digital.
2. Manipulación del instrumento

- a. Antes de la medición:
    - i. Limpiar las partes deslizantes y graduadas del calibrador.
    - ii. Asegurar que el instrumento marque cero con las mordazas cerradas.
  - b. Durante la medición:
    - i. Sujetar la pieza con la mano izquierda y colocarla cerca de la escala del calibrador.
    - ii. Mover el cursor con la mano derecha, usando suavemente la rueda de desplazamiento.
    - iii. Asegurarse de que el calibrador esté perpendicular al eje a medir y la pieza esté en contacto con el tope.
    - iv. Fijar el tornillo de sujeción para asegurar la estabilidad de la medición.
  - c. Lectura:
    - i. Realizarla cuando la medición esté estable y fijada, observando el valor en la pantalla digital.
3. Factores no controlables en el proceso de medición
    - a. Posición de impresión, viento, temperatura, humedad, vibraciones e ingreso de polvo.
  4. Condiciones de fabricación constantes
    - a. Orientación, ciclo de impresión, material, temperatura de cama (60 °C) y extrusor (210 °C).
  5. Procedimiento para estudio R&R
    - a. Seleccionar al menos dos operadores y un conjunto aleatorio de 10 o más piezas que representen variaciones típicas.
    - b. Cada operador debe medir cada pieza al menos dos veces (ideal: tres).
    - c. Aleatorizar el orden de entrega de las piezas y etiquetarlas, indicando punto de medición y método.

- d. Evitar que los operadores conozcan los resultados previos.
- e. Repetir las mediciones aleatorias hasta completar el número de ensayos.
- f. Realizar el análisis estadístico de los resultados obtenidos.

Habiendo realizado las correcciones anteriores, se procedió a tomar las mediciones correspondientes. Evaluando el sesgo, se obtiene que el mismo es de 0,0405 mm, que es significativo para un 95% de confianza debido a que su valor p es menor a 0,001, lo que indica que la impresora tiene mejor resolución cuando se fabrican piezas de mayor tamaño, pues es menor que en las piezas anteriores, que eran de un tamaño menor. Lo anterior se muestra en la Figura No. 11.

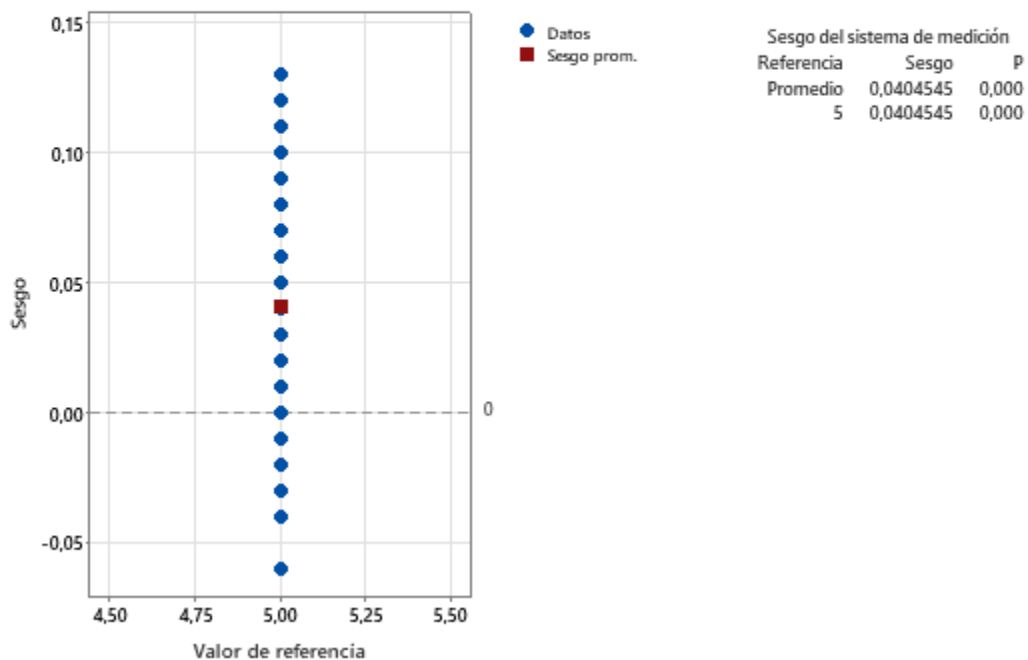


Figura No. 11. Prueba de sesgo aplicada a los datos de la cuarta iteración del sistema de medición.

Los resultados del ANOVA, indicados en el Cuadro No. 10, muestran que la variación de las partes sí es significativa, pues tiene un valor p de 0,03, aunque también lo son los operarios, pues poseen un valor p menor a 0,001. La interacción entre las partes no es significativa, pues posee un valor p de 0,42, indicando que no importa cuál pieza mide cada operario.

Cuadro No. 10. ANOVA realizado para la cuarta iteración del sistema de medición.

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Partes	10	0,034870	0,0034870	3,4712	0,031186
Operarios	1	0,070038	0,0700379	69,7210	0,000008
Partes * Operarios	10	0,010045	0,0010045	1,0541	0,416713
Repetibilidad	44	0,041933	0,0009530		
Total	65	0,156886			

$\alpha$  para eliminar el término de interacción = 0,05

Lo anterior se puede observar en la Figura No. 12., en la cual se muestran graficadas las mediciones para las distintas según el operario que las midió, ya que la tendencia es que Fabián tome mediciones menores a Cui, indicando que ahora aplica más fuerza al tomar la medida.

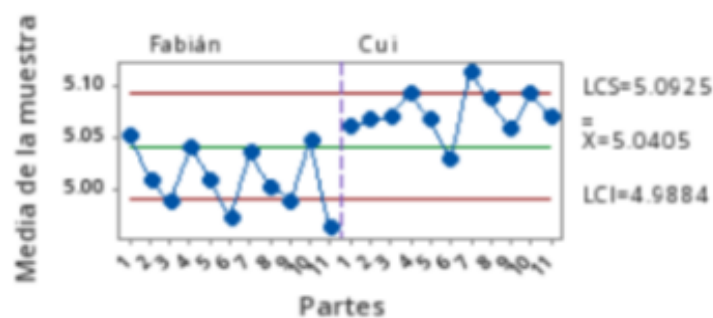


Figura No. 12. Gráfica  $\bar{X}$  por operador de la cuarta iteración del sistema de medición.

Respecto al porcentaje de contribución a la variación total por parte del sistema de medición, mostrado en el Cuadro No. 11, cabe destacar que el instrumento aporta un 27,69% al total, mientras que los operarios un 60,21%. Ambos porcentajes sumados están por encima de la especificación del 30% para un buen sistema de medición (Gutiérrez Pulido & de la Vara Salazar, 2009), indicando que las mejoras no fueron suficientes para solventar las diferencias entre operarios y respecto al instrumento.

Cuadro No. 11, Porcentaje de contribución de cada uno de los componentes del R&R para la cuarta iteración del sistema de medición.

Fuente	CompVar	IC de 95%	%Contribución	
			(de CompVar)	IC de 95%
Gage R&R total	0,0030558	(0,001; 2,162)	87,90	(58,52; 99,98)
Repetibilidad	0,0009626	(0,001; 0,001)	27,69	(0,04; 61,20)
Reproducibilidad	0,0020932	(0,000; 2,161)	60,21	(20,39; 99,93)
Operarios	0,0020932	(0,000; 2,161)	60,21	(20,39; 99,93)
Parte a parte	0,0004207	(0,000; 0,002)	12,10	(0,02; 41,48)
Variación total	0,0034765	(0,002; 2,162)	100,00	

Así, se toma la decisión de fijar el operador, para que las mediciones que tome sean uniformes en todos los experimentos y no haya variación debida a los operadores. Además, se decide fijar el instrumento, para que no haya variación debida al mismo, aunque es importante destacar que la calibración del instrumento arrojó que el mismo no presenta diferencias mayores respecto a los valores teóricos de los patrones, por lo que el error de repetibilidad puede estar asociado a que los operarios hacen cambios en la medición de una réplica a otra, lo cual se debe también a la falta de experiencia con el instrumento.

### 3. Experimentos con prismas

Para estudiar el efecto de la deposición de capas una por una de la MFA, se decidió realizar probetas con forma de prima, ya que resultaban sencillas de despegar de la plataforma de fabricación. A continuación, se exponen los resultados de los tres experimentos realizados con este tipo de pieza; cada uno será identificado con el siguiente código: Nombre de la pieza-Número de experimento realizado con esa pieza-Ejes de la MFA evaluados en el experimento. Cabe destacar que se realizó dos diseños experimentales simples, con un solo factor, debido a que esto permitía mayor simplicidad del análisis, lo cual era deseable teniendo en cuenta la curva de aprendizaje del equipo de trabajo con la tecnología, razón por la que no se optó por diseños anidados.

#### 3.1 Primer experimento

A fin de establecer el comportamiento de la impresora según se depositan capas de material, se estableció un experimento en el que se fabricaba una serie de prismas de 2 mm de ancho por 20 de largo, de los cuales el primero medía de alto 0,2 mm, lo cual corresponde a la altura de capa especificada en el software de corte, y la siguiente 0,4 mm y así sucesivamente hasta alcanzar 1 mm (cinco prismas en total). Esto se replicó cuatro veces más en la plataforma de fabricación, de manera que hubo un conjunto de cinco

prismas ubicados en cada una de las esquinas de la plataforma y uno en el centro, tal y como lo establece la norma ISO/ASTM 52902, lo cual se puede observar en la Figura No. 13.

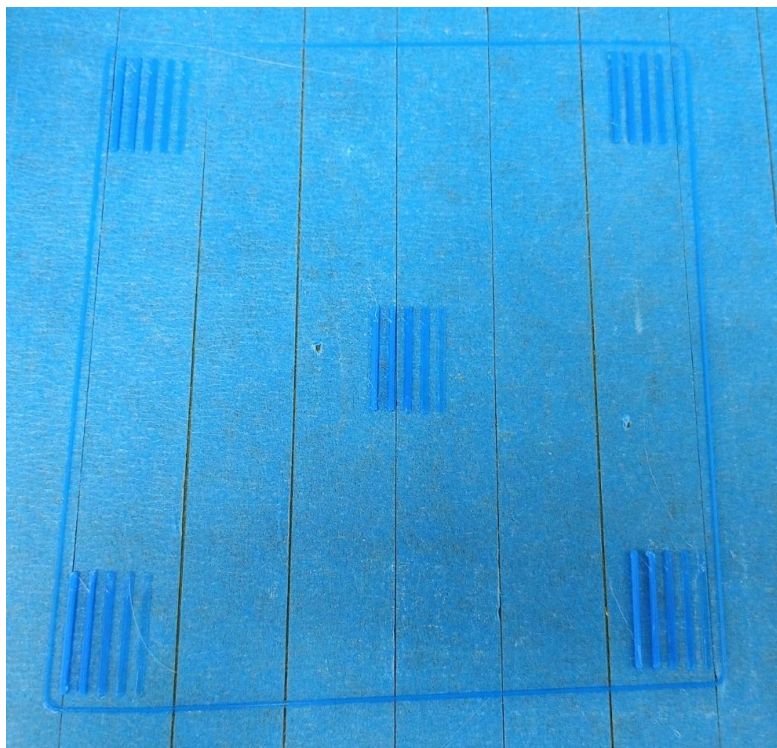


Figura No. 13. Fotografía de la plataforma de impresión con los prismas utilizados en el experimento con los tres ejes.

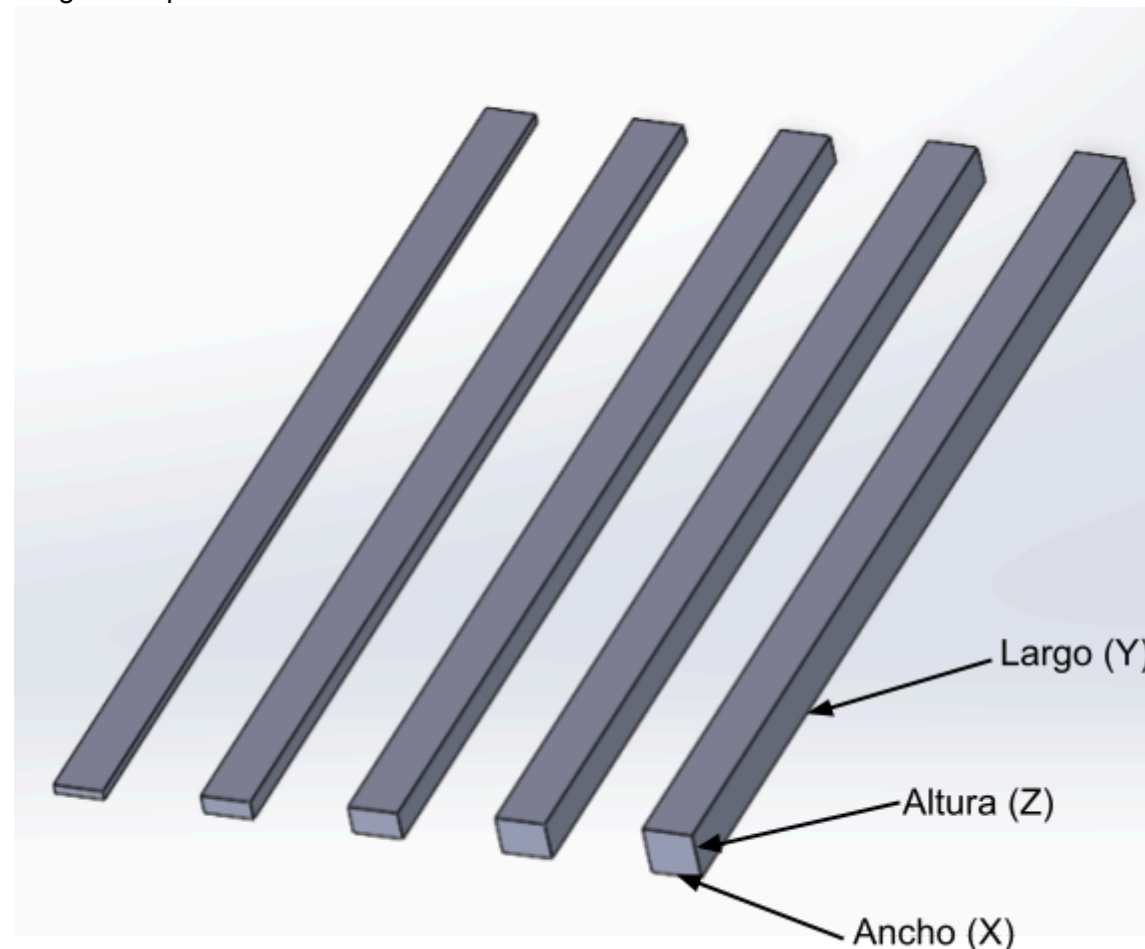
En el Cuadro No. 12, se reportan los datos del experimento, a partir de la plantilla creada para tal fin.

Cuadro No.12. Información detallada del experimento Prisma-E01-XYZ

<b>I. Información General del Experimento</b>	
Nombre del experimento	Prisma-E01-XYZ
Objetivo técnico (alineado a norma ISO/ASTM 52902)	Evaluar el rendimiento geométrico de la MFA en sus tres ejes investigando la incidencia de los factores de posición en la plataforma de fabricación y cantidad de capas depositadas.
Normas ISO/ASTM aplicables (52900, 52901, etc.)	52902

Duración estimada del experimento, considerando diseño, generación de código G, impresión, postprocesado, toma y análisis de datos (d:hh:mm)	Diseño: 0:00:10 Generación de código G: 0:00:05 Impresión: 0:00:05 Postprocesado: N/A Toma de datos: 0:00:30
Máquina de fabricación aditiva utilizada (marca, modelo, tecnología)	Máquina: Prusa i3 MK3S Marca: Prusa Modelo: i3 MK3S Tecnología: Extrusión de Material (MEX)
Responsable del proceso de fabricación aditiva	Fabián Garita Chacón
Responsable de metrología	Fabián Garita Chacón
Fecha de realización	Viernes, 11 de abril
<b>II. Diseño de la Pieza</b>	
Nombre del archivo CAD (.STL, .3MF, etc.)	Prisma-E01-XYZ.stl
Tecnología de impresión (según ISO/ASTM 52900)	Extrusión de Material (MEX)
Dimensiones geométricas a medir (Valores nominales)	Altura: [0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1] mm Ancho: 1 mm Largo: 20 mm
Tolerancias geométricas especificadas (ISO/ASTM 52920)	N/A
Características críticas de la geometría (Aquellas dimensiones, geometrías o zonas funcionales cuya precisión, tolerancia o integridad estructural son esenciales para que la pieza cumpla con su propósito técnico.)	Altura, largo y ancho

Imagen o representación CAD con anotaciones



Notas sobre diseño para fabricación aditiva  
(según ISO/ASTM 52910)

-

### III. Diseño Experimental

Tipo de diseño experimental (factorial, un solo factor, etc.)

Factorial

Justificación técnica del diseño elegido

Permite analizar la incidencia de varios factores, tanto por separado como en conjunto.

Factores estudiados y niveles	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Posición: Posición en la que se colocará el set de cinco piezas en la plataforma de impresión <ol style="list-style-type: none"> <li>a. Superior Izquierda</li> <li>b. Superior Derecha</li> <li>c. Centro</li> <li>d. Inferior Izquierda</li> <li>e. Inferior Derecha</li> </ol> </li> <li>2. Pieza: Cada una de las cinco piezas con diferentes alturas <ol style="list-style-type: none"> <li>a. 1</li> <li>b. 2</li> <li>c. 3</li> <li>d. 4</li> <li>e. 5</li> </ol> </li> <li>3. Eje de medición: Si se mide respecto a X (ancho), Y (largo) o Z (altura) <ol style="list-style-type: none"> <li>a. X</li> <li>b. Y</li> <li>c. Z</li> </ol> </li> </ol>
Variables de respuesta analizadas	Diferencia entre la medida obtenida con el calibrador digital y el valor nominal de diseño
Cantidad de réplicas por configuración	1
<b>IV. Parámetros del Proceso de fabricación aditiva</b>	
Software de corte (slicing) utilizado y versión	PrusaSlicer Versión: 2.9.0
Nombre del archivo de configuración (.ini, .gcode)	Prisma-E01-XYZ.gcode
Altura de capa (mm)	0,2
Diámetro de boquilla (mm)	0,4
Temperatura de extrusión (°C)	215
Temperatura de cama (°C)	60
Velocidad de impresión (mm/s)	45
Retracción (longitud, velocidad)	Longitud: 0,8 mm Velocidad: 35 mm
Número de perímetros (shells)	2
Patrón de relleno y densidad (%)	15 (Giroide)

Uso de soportes (tipo, configuración)	N/A
Ventilación (velocidad de ventiladores, activación)	Velocidad: 100% Activación: si el tiempo de impresión de la capa es menor a 100 s
Notas adicionales relevantes al control del proceso	-
<b>V. Proceso de Impresión</b>	
Condiciones ambientales (temperatura y humedad ambiente)	No se midió
Tipo de superficie de impresión (PEI rugosa o lisa, utilización de cinta, etc.)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• PEI lisa</li> <li>• Utilización de cinta en la cama de impresión</li> </ul>
Calibración previa	Sí (XYZ y Primera Capa)
Observaciones durante el proceso (ruidos, fallos, deformaciones)	N/A
Control de parámetros críticos durante la impresión	N/A
Identificación del lote de filamento y material (marca, material, diámetro)	Marca: Material: PLA Diámetro: 1,75 mm
Tiempo real de impresión (registro)	4 minutos
<b>VI. Medición y Control Dimensional</b>	
Instrumentos utilizados (marca, modelo, resolución)	Calibrador digital Marca: Mitutoyo Modelo: Resolución: 0,01 mm
Fecha de calibración del equipo	Jueves, 10 de abril de 2025
Nombre del archivo de registro de datos (.xlsx, .csv)	Prisma-E01-XYZ.xlsx
Cantidad de operadores (para análisis R&R)	Dos: Fabián Garita y Cui Zhong
Metodología utilizada	Medición de dimensiones lineales de la pieza escogida mediante el uso de un calibrador digital (ISO/ASTM 52902).

Procedimiento de medición paso a paso	<ol style="list-style-type: none"><li>1. Se despega la pieza de la plataforma de fabricación.</li><li>2. Se coloca la pieza a la mitad de las mandíbulas del calibrador digital, según el eje que se desee medir (X, Y o Z)</li><li>3. Se cierran las mandíbulas hasta sentir el contacto con la pieza y observar que no cambia el valor reportado.</li><li>4. Se registra el valor reportado por el instrumento.</li></ol>
<b>VII. Presentación y Análisis de Resultados</b>	

Descripción de datos: Estadísticas descriptivas (media, desviación estándar, etc.) y gráficos generados (boxplot, histogramas, interacción)

Los datos medidos muestran que, a nivel general, la diferencia media entre valor medido y nominal es de 0,15 mm, con una desviación de 0,27 mm. Por otra parte, en la Figura No. 14, se presenta una gráfica de cajas de las diferencias de las cinco posiciones escogidas y es posible apreciar que no hay mayor discrepancia entre las medianas de las cinco posiciones, aunque si lo hay entre sus rangos.

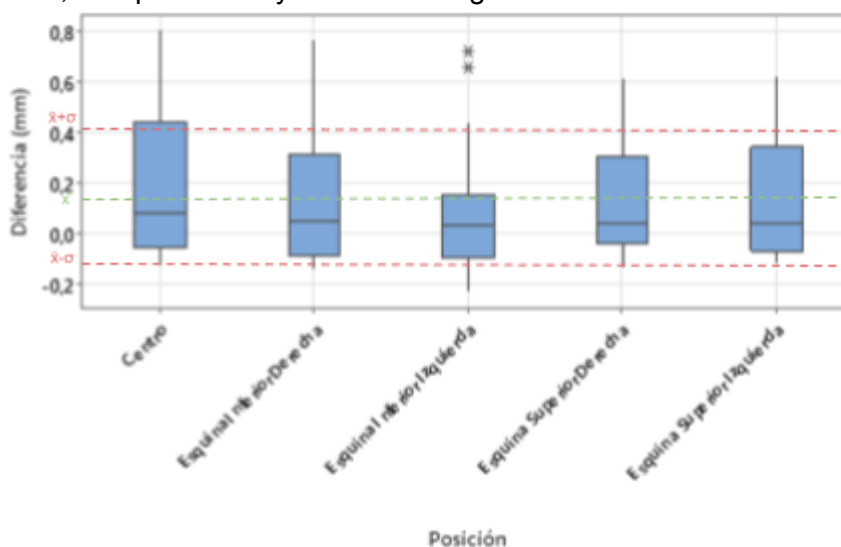


Figura No. 14. Gráfica de cajas de la diferencia entre valor medido y nominal según la posición en la plataforma para el experimento Prisma-E01-XYZ.

Adicionalmente, en la Figura No. 15, se muestra una gráfica de cajas para las cinco piezas fabricadas, cada una con una capa más que la anterior, y se puede observar que el rango es desigual para cada pieza, ya que las diferencias de las piezas 4 y 5, diseñadas para tener 4 y 5 capas de material, respectivamente, son menos dispersas que para las otras piezas, además de que su mediana es significativamente menor y más cercana al objetivo que las piezas diseñadas para tener menor cantidad de capas.

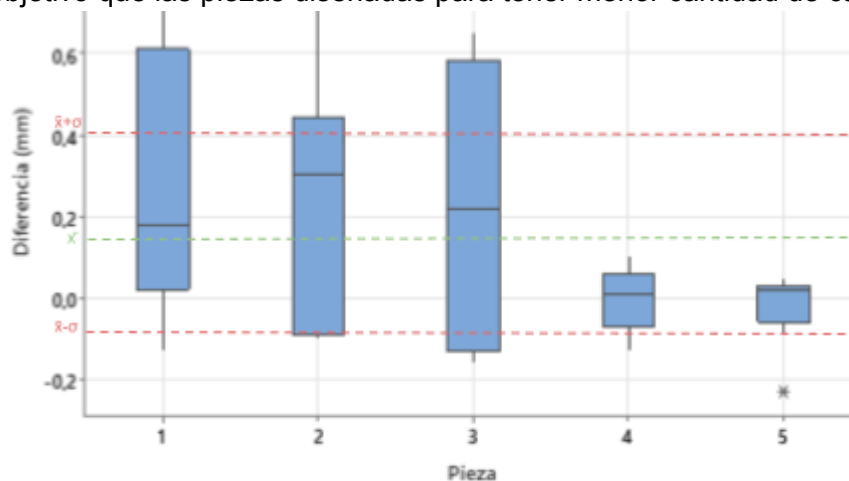


Figura No. 15. Gráfica de cajas de la diferencia entre valor medido y nominal según la pieza medida para el experimento Prisma-E01-XYZ.

Finalmente, se analizó la diferencia entre la medición respecto a los tres ejes de medición mediante una gráfica de cajas, la cual se muestra en la Figura No. 16, y se puede apreciar que los tres ejes poseen distinta mediana, además de que la medición en X (ancho) resulta más disperso que en Y (largo), y estos dos más dispersos que en Z (altura). Además, la mediana de diferencia entre valor teórico y experimental es mayor en X y menor en Z, por lo que se puede concluir que las medidas dimensionales longitudinales en el eje vertical son más precisas y exactas que en los otros dos ejes.

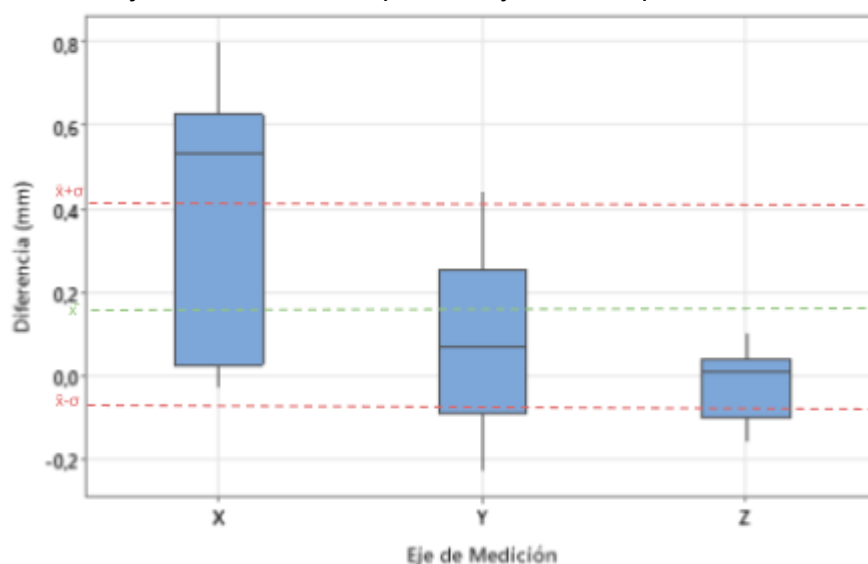


Figura No. 16. Gráfica de cajas de la diferencia entre valor medido y nominal según el eje de medición para el experimento Prisma-E01-XYZ.

#### Resultados del estudio R&R (Repetibilidad y Reproducibilidad)

El análisis estadístico (ANOVA) mostró que hay diferencias importantes tanto entre las piezas medidas como entre los operarios. Específicamente:

- La variación entre piezas fue significativa (valor  $p = 0,03$ ), lo que indica que sí existen diferencias reales entre las dimensiones de las piezas.
- La variación entre operarios también fue significativa (valor  $p < 0,001$ ), lo que significa que cada persona mide de forma distinta.
- Sin embargo, la interacción entre pieza y operario no fue significativa (valor  $p = 0,42$ ), lo que sugiere que todos los operarios miden las piezas de manera consistente: una pieza no se ve afectada de forma diferente dependiendo de quién la mida.

Además, se notó una tendencia clara: Fabián tiende a medir valores más bajos que Cui de forma constante. En cuanto a las causas de variación total:

- El instrumento de medición contribuye con un 27,69%.
- La diferencia entre operarios representa un 60,21%.

Esto da un total mayor al 30% recomendado, lo que indica que el sistema de medición no es confiable en su estado actual.

Aunque se calibró el instrumento correctamente, se sospecha que parte del error proviene de la falta de experiencia de los operarios al usar el equipo. Por esta razón, se decidió fijar tanto el instrumento como el operario para las próximas mediciones, con el fin de reducir la variabilidad y obtener resultados más precisos. Para un análisis más detallado, referirse a la sección 2. Estudio del Sistema de medición, subsección 2.4. Cuarta iteración.

### Análisis de varianza (ANOVA)

El ANOVA se realizó definiendo los factores de pieza y eje de medición como fijos, mientras que la posición se estableció como aleatorio, a fin de inferir sobre toda la superficie de la plataforma de impresión. Los resultados mostrados en el Cuadro No. 13, indican que las interacciones dobles relacionadas con la posición (posición-pieza, valor  $p = 0,509$  y posición-eje de medición, valor  $p = 0,326$ ) no son significativas, así como tampoco lo es el efecto individual, valor  $p = 0,177$ , para un 95% de confianza, dejando así significativos sólo los efectos de pieza y eje de medición, así como su interacción.

Cuadro No. 13. Resultados del ANOVA para el modelo inicial realizado para el experimento Prisma-E01-XYZ

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Posición	4	0,06534	0,01634	2,43	0,177 x
Pieza	4	1,24690	0,31173	56,19	0,000
Eje de Medición	2	2,16927	1,08464	157,09	0,000
Posición*Pieza	16	0,08877	0,00555	0,97	0,509
Posición*Eje de Medición	8	0,05523	0,00690	1,21	0,326
Pieza*Eje de Medición	8	1,64539	0,20567	35,95	0,000
Error	32	0,18310	0,00572		
Total	74	5,45401			

x No es una prueba F exacta.

Una vez depurado el modelo de estos factores, se obtuvo el Cuadro No. 14, que muestra los resultados del análisis de variaciones. Así, se puede observar que la posición no influye significativamente en la diferencia entre el valor teórico y experimental, por lo que se puede escoger cualquier posición en la plataforma, pero sí influyen la cantidad de capas depositadas (pieza) y la posición respecto a la que se oriente la pieza (eje de medición), lo cual no sólo afecta por separado, sino también en conjunto, de manera que las piezas no presentan los mismos resultados para los tres ejes, sino que cada eje posee una pieza para la que la diferencia es menor.

Cuadro No. 14. Resultados del ANOVA para el modelo depurado realizado para el experimento Prisma-E01-XYZ

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Pieza	4	1,2469	0,31173	47,66	0,000
Eje de Medición	2	2,1693	1,08464	165,83	0,000
Pieza*Eje de Medición	8	1,6454	0,20567	31,45	0,000
Error	60	0,3924	0,00654		
Total	74	5,4540			

Cabe destacar que la desviación total del modelo fue de 0,0809 mm y el índice de correlación indica que un 92,8% de los datos son explicados por el modelo, mientras que el índice de predicción indica que el modelo puede predecir correctamente 88,76% de los datos.

Además, se realizó una tabla de comparaciones de Tukey, a fin de establecer cómo difieren los niveles entre sí. En el Cuadro No. 15, se muestra la comparación para los distintos niveles de la pieza, y se puede apreciar que con una cantidad teórica de 1, 2 y 3 capas depositadas, la media de diferencia entre valor nominal y medido es estadísticamente la misma, mientras que para con 4 y 5 capas la media es otra.

Cuadro No. 15. Comparaciones de Tukey para las diferentes piezas analizadas en el experimento Prisma-E01-XYZ.

<u>Pieza</u>	<u>N</u>	<u>Media</u>	<u>Agrupación</u>
1	15	0,283333	A
2	15	0,243333	A
3	15	0,231333	A
4	15	-0,000667	B
5	15	-0,015333	B

Por otra parte, se realizaron las comparaciones para el eje de medición en el cual se tomó la medida y los resultados, mostrados en el Cuadro No. 16, exhiben que cada eje de medición es distinto, por lo que se puede concluir que no es la misma diferencia entre valor nominal y medido según si se mide la altura, el largo o el ancho del prisma, pues la precisión aumenta en el orden  $X < Y < Z$ . Además, cabe destacar que la media del eje Z es negativa, indicando que, en promedio, tiende a faltar material en vez de sobrar, lo que puede deberse al empuje de la boquilla contra la plataforma durante la deposición establecida en la calibración de la primera capa.

Cuadro No. 16 Comparaciones de Tukey para los diferentes ejes analizados en el experimento Prisma-E01-XYZ.

<u>Eje de</u>	<u>Medición</u>	<u>N</u>	<u>Media</u>	<u>Agrupación</u>
X	25	0,3792	A	
Y	25	0,0916	B	
Z	25	-0,0256	C	

Análisis de residuos (comprobación de hipótesis): Normalidad de residuos, homogeneidad de varianzas de los residuos e independencia de los residuos

En la Figura No. 17, se exponen los resultados del análisis de las tres hipótesis de la variable aleatoria. En la gráfica de normalidad (superior izquierda), se muestra que los residuos no son normales, pues, a partir de la prueba de Anderson-Darling, se falla en aceptar la hipótesis nula de que los residuos se comportan con normalidad, por lo que existe un sesgo en los resultados del modelo debido a este incumplimiento. Seguidamente, se tiene la gráfica de variación de los residuos (superior derecha), en la que no se muestran patrones de los residuos, sino que se distribuyen homogéneamente, por lo que se concluye que el supuesto de varianzas homogéneas se cumple. Finalmente, en la gráfica de orden de corridas (inferior derecha), se exhibe un comportamiento uniformemente distribuido por encima y por debajo del cero, sin patrones ni comportamiento atípicos, por lo que se concluye que existe independencia de los residuos.

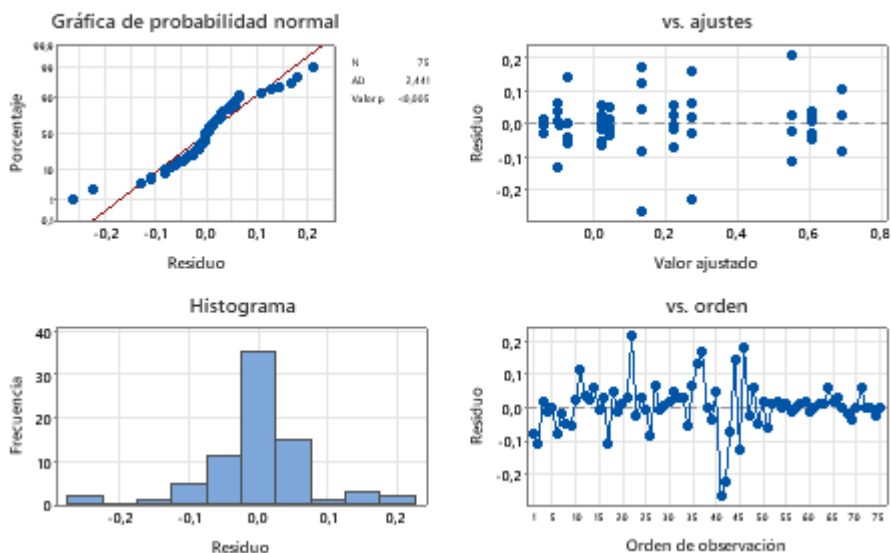


Figura No. 17. Gráficas de residuos del modelo ANOVA depurado para el experimento Prisma-E01-XYZ.

A fin de explorar si la no normalidad de los datos es debida a los datos en sí mismos, o si es debida a observaciones poco comunes, se decidió sustraer datos del análisis ANOVA, uno por uno, a fin de evaluar si quitando el valor con el residuo más grande, se lograba la normalidad. En total, se eliminaron 7 datos para lograr la normalidad de los residuos del modelo depurado, tal y como se muestra en la Figura No. 18. Así, queda demostrado que es debido a los datos atípicos el incumplimiento del supuesto de normalidad de los residuos y no por los datos en sí. Sin embargo, no se realiza el análisis sin estos datos debido a que, de ser así, se perdería representatividad de la muestra, así como la propiedad de ortogonalidad de los factores.

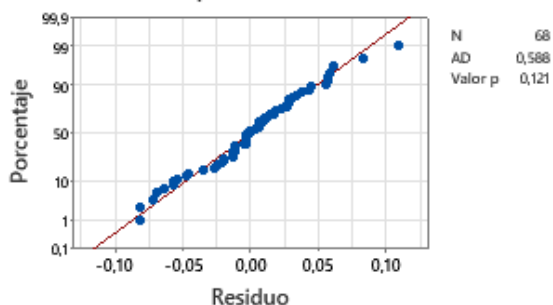


Figura No. 18. Gráfica de normalidad de los residuos habiendo eliminado 7 valores atípicos para el experimento Prisma-E01-XYZ.

#### Discusión técnica de resultados frente a tolerancias y objetivos

A partir de la gráfica de optimización de respuesta mostrada en la Figura No. 19, se determinó que la configuración de factores que hace mínima la diferencia entre el valor medido y el nominal es con cinco capas depositadas y tomando la medición de ancho (X), lo que genera un valor medio de diferencia de 0,022 mm, con un índice de deseabilidad de 0,973, aunque también podría ser cuatro capas, ya que la diferencia es de sólo 0,002 mm de más. Si el eje de medición cambiara a Z (altura), la diferencia aumentaría a 0,034 mm, por lo que este eje también resulta recomendable.

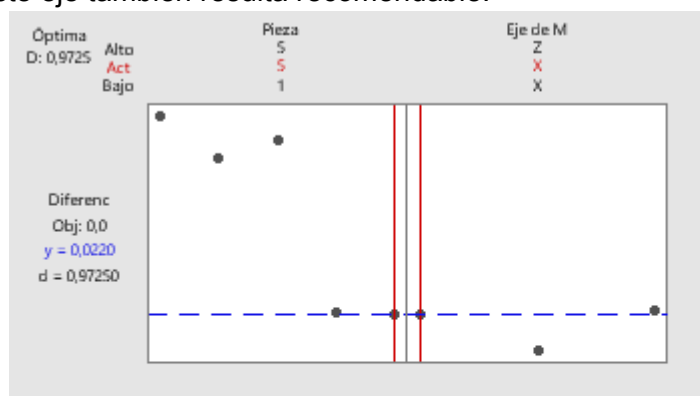


Figura No. 19. Gráfica de optimización de la diferencia entre el valor medido y nominal para los factores significativos del experimento Prisma-E01-XYZ.

#### Conclusión

El experimento reveló que la posición en la cama de impresión no afecta significativamente la exactitud dimensional, pero sí lo hacen la altura de la pieza (cantidad de capas) y el eje de medición. La precisión fue mayor en el eje Z, seguido por Y y X, aunque el eje Z mostró una tendencia a medir por debajo del valor nominal. También se observó una interacción significativa entre altura y eje de medición. La mejor configuración para minimizar la diferencia dimensional fue medir piezas de cinco capas en el eje X, aunque el eje Z también mostró buenos resultados.

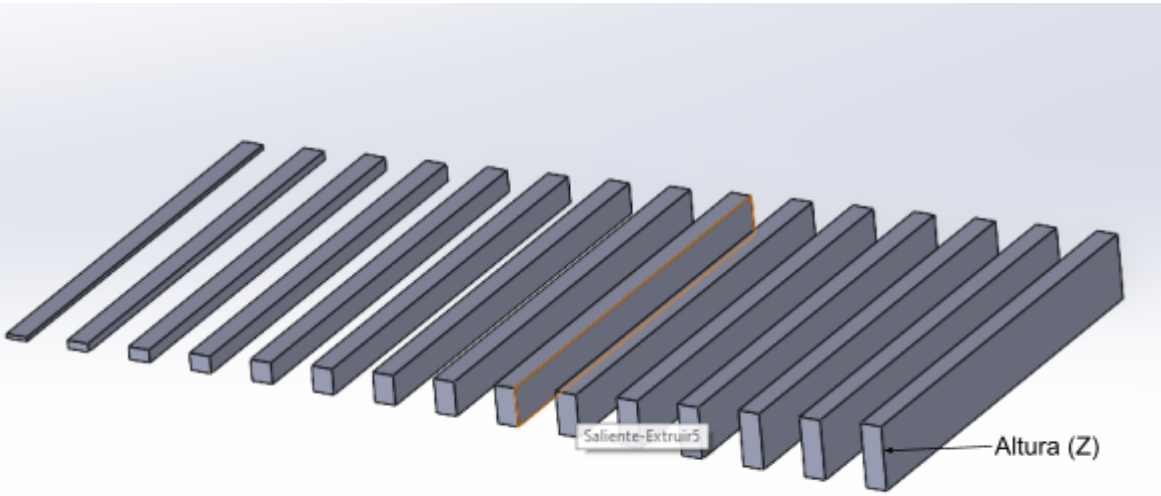
Normas referidas ISO/ASTM 52902, ISO 22514 (estadística industrial complementaria)

### 3.2. Segundo experimento

De los resultados del experimento Prisma-E01-XYZ, se decidió primero analizar sólo la altura (Eje Z), ya que es el que es afectado directamente por la altura de capa. Además, dado que la posición resultó ser no significativa, se decidió repetir el experimento en una sola posición para 15 probetas, en las que el primer prisma poseía una capa, el segundo dos y así sucesivamente, una única vez en el centro de la plataforma. En el Cuadro No. 17, se muestra la información detallada del experimento.

Cuadro No. 17. Información detallada del experimento Prisma-E02-Z

<b>I. Información General del Experimento</b>	
Nombre del experimento	Prisma-E02-Z
Objetivo técnico (alineado a norma ISO/ASTM 52902)	Evaluar el rendimiento geométrico de la MFA en el eje Z investigando la incidencia del factor de posición en la plataforma de fabricación y cantidad de capas depositadas.
Normas ISO/ASTM aplicables (52900, 52901, etc.)	52902
Duración estimada del experimento: Diseño, generación de código G, impresión, postprocesado, toma y análisis de datos (d:hh:mm)	Diseño: 0:00:10 Generación código G: 0:00:05 Impresión 0:00:08 Postprocesado: N/A Toma y análisis de datos: 0:00:20
Máquina de fabricación aditiva utilizada (marca, modelo, tecnología)	Máquina: Prusa i3 MK3S Marca: Prusa Modelo: i3 MK3S Tecnología: Extrusión de Material (MEX)
Responsable del proceso de fabricación aditiva	Fabián Garita Chacón
Responsable de metrología	Fabián Garita Chacón
Fecha de realización	Martes, 15 de abril
<b>II. Diseño de la Pieza</b>	
Nombre del archivo CAD (.STL, .3MF, etc.)	Prisma-E02-Z.stl
Tecnología de impresión (según ISO/ASTM 52900)	Extrusión de Material (MEX)
Dimensiones geométricas a medir (Valores nominales)	[0,2 - 4,0; con salto de 0,2] mm (Altura, Z)
Tolerancias geométricas especificadas (ISO/ASTM 52920)	N/A
Características críticas de la geometría (Aquellas dimensiones, geometrías o zonas funcionales cuya precisión, tolerancia o integridad estructural son esenciales para que la pieza cumpla con su propósito técnico.)	Altura (Z)

Imagen o representación CAD con anotaciones	
	
Notas sobre diseño para fabricación aditiva (según ISO/ASTM 52910)	-
<b>III. Diseño Experimental</b>	
Tipo de diseño experimental (factorial, un solo factor, etc.)	Un solo factor
Justificación técnica del diseño elegido	Sólo se decidió utilizar un factor ya que se deseaba estudiar en profundidad el efecto de añadir cada capa, ya que la diferencia respecto a los otros dos ejes en el Prisma-E01-XYZ fue significativa. Además, tener un sólo factor agiliza la toma de datos.
Factores estudiados y niveles	1. Pieza: Cantidad de capas teórica depositadas a. 15 niveles, desde una capa hasta 15
Variables de respuesta analizadas	Diferencia entre el valor real y el valor nominal de la altura de las piezas
Cantidad de réplicas por configuración	5
<b>IV. Parámetros del Proceso de fabricación aditiva</b>	
Software de corte (slicing) utilizado y versión	PrusaSlicer Versión: 2.9.0
Nombre del archivo de configuración (.ini, .gcode)	Prisma-E02-Z.gcode
Altura de capa (mm)	0,2

Diámetro de boquilla (mm)	0,4
Temperatura de extrusión (°C)	215
Temperatura de cama (°C)	60
Velocidad de impresión (mm/s)	45
Retracción (longitud, velocidad)	Longitud: 0,8 mm Velocidad: 35 mm
Número de perímetros (shells)	2
Patrón de relleno y densidad (%)	15 (Giroide)
Uso de soportes (tipo, configuración)	N/A
Ventilación (velocidad de ventiladores, activación)	Velocidad: 100% Activación: si el tiempo de impresión de la capa es menor a 100 s
Notas adicionales relevantes al control del proceso	-
<b>V. Proceso de Impresión</b>	
Condiciones ambientales (temperatura y humedad ambiente)	No se midió
Tipo de superficie de impresión (PEI rugosa o lisa, utilización de cinta, etc.)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• PEI lisa</li> <li>• Utilización de cinta en la cama de impresión</li> </ul>
Calibración previa	Sí (XYZ y Primera Capa)
Observaciones durante el proceso (ruidos, fallos, deformaciones)	N/A
Control de parámetros críticos durante la impresión	N/A
Identificación del lote de filamento y material (marca, material, diámetro)	Marca: Material: PLA Diámetro: 1,75 mm
Tiempo real de impresión (registro)	5 minutos
<b>VI. Medición y Control Dimensional</b>	

Instrumentos utilizados (marca, modelo, resolución)	<p>Calibrador digital          Marca: Mitutoyo          Modelo:          Resolución: 0,01 mm</p> <p>Microscopio          Marca: -          Modelo: -          Resolución: -</p>
Fecha de calibración del equipo	Jueves, 10 de abril de 2025
Nombre del archivo de registro de datos (.xlsx, .csv)	Prisma-E02-Z.xlsx
Cantidad de operadores (para análisis R&R)	2: Fabián Garita y Cui Zhong
Metodología utilizada	Medición de dimensiones lineales de la pieza escogida mediante el uso de un calibrador digital (ISO/ASTM 52902).
Procedimiento de medición paso a paso	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Se despega la pieza de la plataforma de fabricación.</li> <li>2. Se coloca la pieza a la mitad de las mandíbulas del calibrador digital, según el eje que se desee medir (X, Y o Z)</li> <li>3. Se cierran las mandíbulas hasta sentir el contacto con la pieza y observar que no cambia el valor reportado.</li> <li>4. Se registra el valor reportado por el instrumento.</li> <li>5. Se coloca la pieza bajo el microscopio y se cuenta la cantidad de capas depositadas en la pieza.</li> </ol>
<b>VII. Presentación y Análisis de Resultados</b>	

Descripción de datos: Estadísticas descriptivas (media, desviación estándar, etc.) y gráficos generados (boxplot, histogramas, interacción)

La media de diferencia entre valor teórico y experimental para la altura de las piezas es de  $-0,0523$  mm, con una desviación de  $0,1716$  mm, indicando que, en promedio, las piezas poseen menos material del que deberían, lo cual concuerda con lo obtenido en el Prisma-E01-XYZ. Además, se realizó una gráfica de cajas, mostrada en la Figura No. 20, la cual exhibe cómo se comporta la diferencia en la medición respecto al valor esperado según las distintas cantidades de capas teóricas (piezas), y se puede observar que las piezas poseen un comportamiento mayormente uniforme cercano al cero, con diferencia de la pieza 8, que cae hasta  $0,6$  mm por debajo de su valor nominal, así como también las piezas 14 y 15, que también están por debajo de los demás.

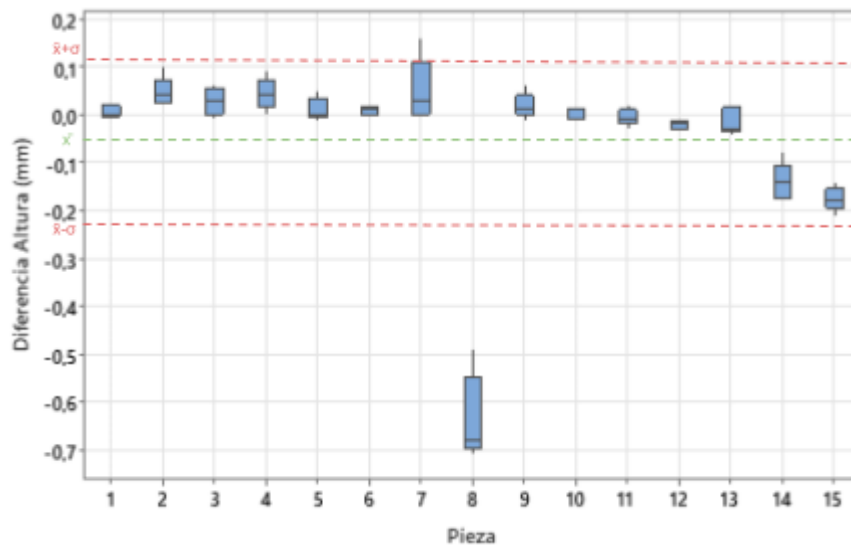


Figura No. 20. Gráfica de cajas de la diferencia entre valor medido y nominal según la pieza medida para el experimento Prisma-E02-Z.

A fin de analizar qué fue lo que ocurrió con las tres piezas mencionadas, se decidió contar la cantidad de capas experimentales de las piezas fabricadas, para ver si concordaban con las teóricas. Como se puede observar en la Figura No. 21, la pieza 8 reportó 4 capas menos que lo debido, la pieza 14 reportó una menos y la pieza 15 dos menos. Lo anterior es debido a que hubo un error en la pieza 8, la cual se deformó a la hora de que el extrusor le depositara el material encima y por eso sólo se reportan 4 capas. Por otra parte, en las piezas 14 y 15 hubo un error que hizo que se arrancaran las capas, de manera que sólo se pudieron percibir 13 capas.

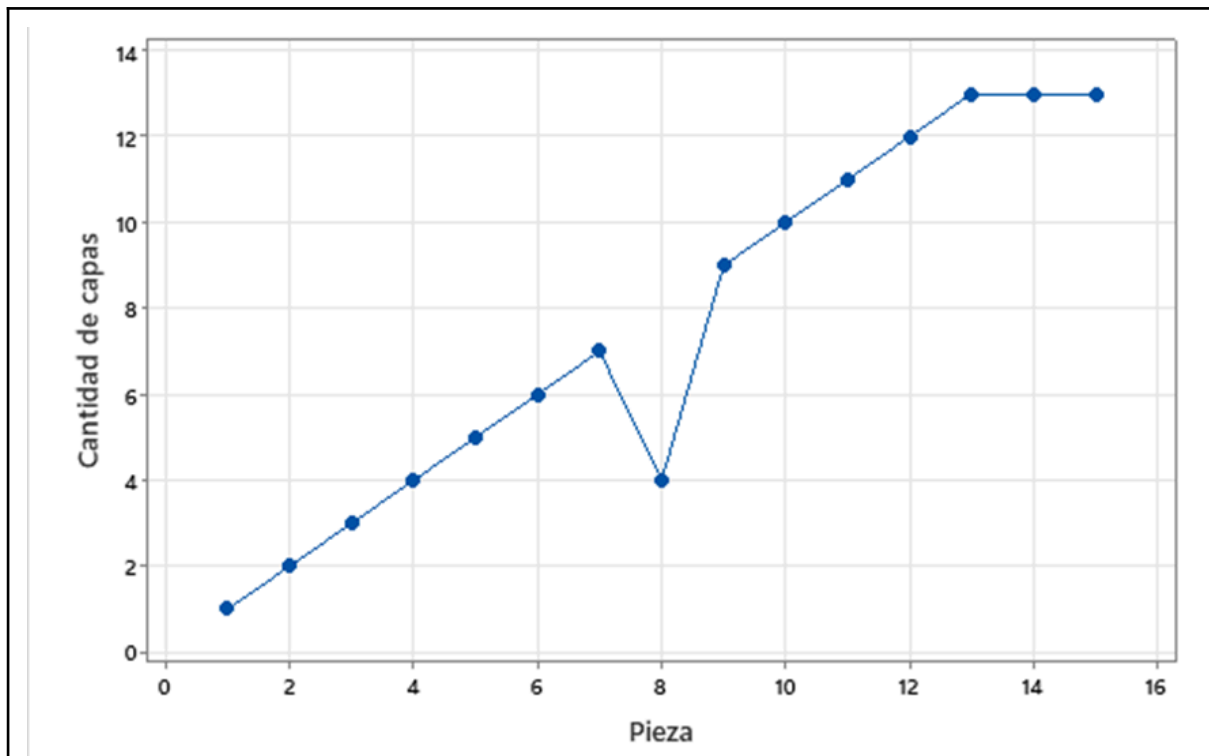


Figura No. 21. Gráfica de dispersión de la cantidad de capas registrada bajo el microscopio según la pieza medida para el experimento Prisma-E02-Z.

#### Resultados del estudio R&R (Repetibilidad y Reproducibilidad)

El análisis estadístico (ANOVA) mostró que hay diferencias importantes tanto entre las piezas medidas como entre los operarios. Específicamente:

- La variación entre piezas fue significativa (valor  $p = 0,03$ ), lo que indica que sí existen diferencias reales entre las dimensiones de las piezas.
- La variación entre operarios también fue significativa (valor  $p < 0,001$ ), lo que significa que cada persona mide de forma distinta.
- Sin embargo, la interacción entre pieza y operario no fue significativa (valor  $p = 0,42$ ), lo que sugiere que todos los operarios miden las piezas de manera consistente: una pieza no se ve afectada de forma diferente dependiendo de quién la mida.

Además, se notó una tendencia clara: Fabián tiende a medir valores más bajos que Cui de forma constante. En cuanto a las causas de variación total:

- El instrumento de medición contribuye con un 27,69%.
- La diferencia entre operarios representa un 60,21%.

Esto da un total mayor al 30% recomendado, lo que indica que el sistema de medición no es confiable en su estado actual.

Aunque se calibró el instrumento correctamente, se sospecha que parte del error proviene de la falta de experiencia de los operarios al usar el equipo. Por esta razón, se decidió fijar tanto el instrumento como el operario para las próximas mediciones, con el fin de reducir la variabilidad y obtener resultados más precisos. Para un análisis más detallado, referirse a la sección 2. Estudio del Sistema de medición, subsección 2.4. Cuarta iteración.

### Análisis de varianza (ANOVA)

El análisis ANOVA confirmó que la diferencia entre el valor real y nominal de la altura varía significativamente según la pieza analizada ( $p < 0,001$ ). Lo anterior se muestra en el Cuadro No. 18.

Cuadro No. 18. ANOVA realizado para el experimento Prisma-E02-Z.

<u>Fuente</u>	<u>GL</u>	<u>SC Ajust.</u>	<u>MC Ajust.</u>	<u>Valor F</u>	<u>Valor p</u>
Pieza	14	2,10003	0,150002	112,39	0,000
Error	60	0,08008	0,001335		
Total	74	2,18011			

En promedio, las piezas presentan una desviación de  $-0,0523$  mm, indicando una falta de material. La prueba de comparaciones de Tukey identificó tres grupos: uno con la pieza 8, otro con las piezas 14 y 15, y un tercero con el resto. Esta clasificación se debe a la cantidad de capas: las piezas del grupo mayoritario tienen la cantidad esperada de capas, mientras que las piezas 14 y 15 tienen una y dos capas menos, respectivamente, y la pieza 8 tiene cuatro menos, lo que explica su mayor desviación. Lo anterior se muestra en el Cuadro 19.

Cuadro 19. Comparaciones de Tukey para el experimento Prisma-E02-Z.

<u>Pieza</u>	<u>N</u>	<u>Media</u>	<u>Agrupación</u>
7	5	0,050	A
2	5	0,046	A
4	5	0,042	A
3	5	0,028	A
9	5	0,018	A
5	5	0,012	A
6	5	0,008	A
1	5	0,006	A
10	5	-0,002	A
11	5	-0,006	A
13	5	-0,014	A
12	5	-0,022	A
14	5	-0,140	B
15	5	-0,176	B
8	5	-0,634	C

Análisis de residuos (comprobación de hipótesis): Normalidad de residuos, homogeneidad de varianzas de los residuos e independencia de los residuos

En la Figura No. 22, se exhiben los resultados del análisis de las tres hipótesis de la variable aleatoria. En la gráfica de normalidad (superior izquierda), se muestra que los residuos no son normales, pues, a partir de la prueba de Anderson-Darling, se falla en aceptar la hipótesis nula de que los residuos se comportan con normalidad, por lo que existe un sesgo en los resultados del modelo debido a este incumplimiento. Seguidamente, se tiene la gráfica de variación de los residuos (superior derecha), en la que se muestran patrones de los residuos, ya que la mayoría se acumula a un lado de la gráfica, por lo que se concluye que el supuesto de varianzas homogéneas no se cumple. Finalmente, en la gráfica de orden de corridas (inferior derecha), se exhibe un comportamiento uniformemente distribuido por encima y por debajo del cero, sin patrones y sólo con las observaciones 33 y 40 siendo atípicamente altas, por lo que se concluye que existe independencia de los residuos.

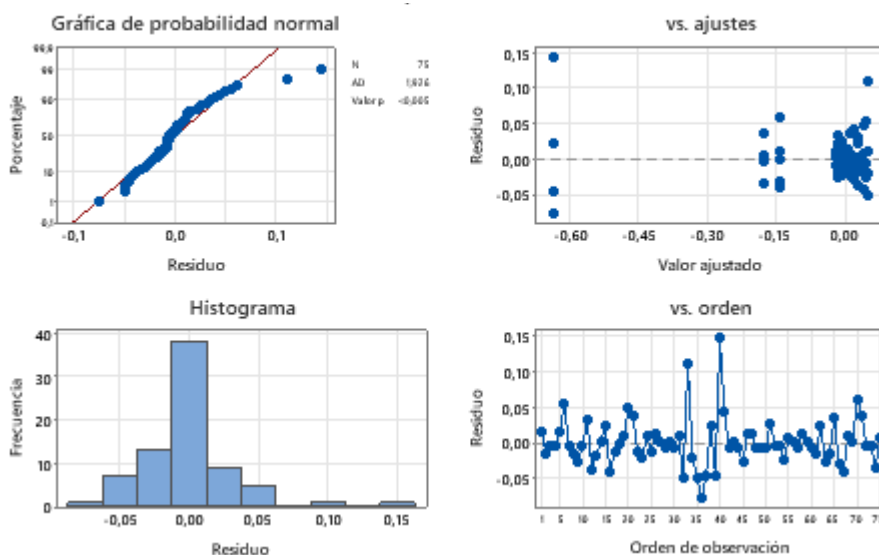


Figura No. 22. Gráficas de residuos del modelo ANOVA depurado para el experimento Prisma-E02-Z.

### Discusión técnica de resultados frente a tolerancias y objetivos

A partir de la gráfica de optimización de respuesta mostrada en la Figura No. 23, se determinó que el nivel que hace mínima la diferencia entre el valor medido y el nominal es con diez capas depositadas, con un valor de  $-0,002$  mm y con un índice de deseabilidad de  $0,997$ .

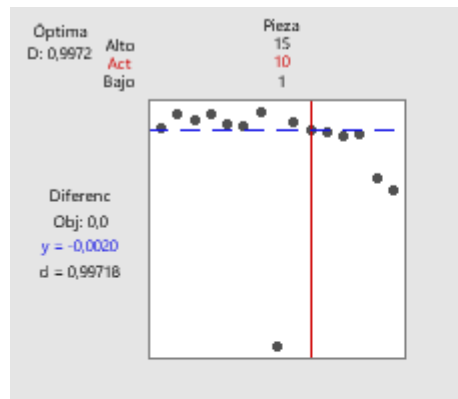


Figura No. 23. Gráfica de optimización de la diferencia entre el valor medido y nominal para los factores significativos del experimento Prisma-E02-Z.

### Conclusión

El experimento Prisma-E02-Z evaluó el rendimiento geométrico de la MFA, según la norma ISO/ASTM 52902, analizando el efecto de la cantidad de capas depositadas. Se encontró que este factor influye significativamente en la precisión dimensional, con una tendencia a obtener piezas ligeramente más pequeñas que el valor nominal. La configuración óptima fue con diez capas, aunque algunas anomalías por errores de impresión afectaron ciertos resultados. A pesar de cumplir su objetivo, el modelo presentó limitaciones estadísticas y evidenció la presencia de otras posibles fuentes de variabilidad.

Normas referidas ISO/ASTM 52902, ISO 22514 (estadística industrial complementaria)

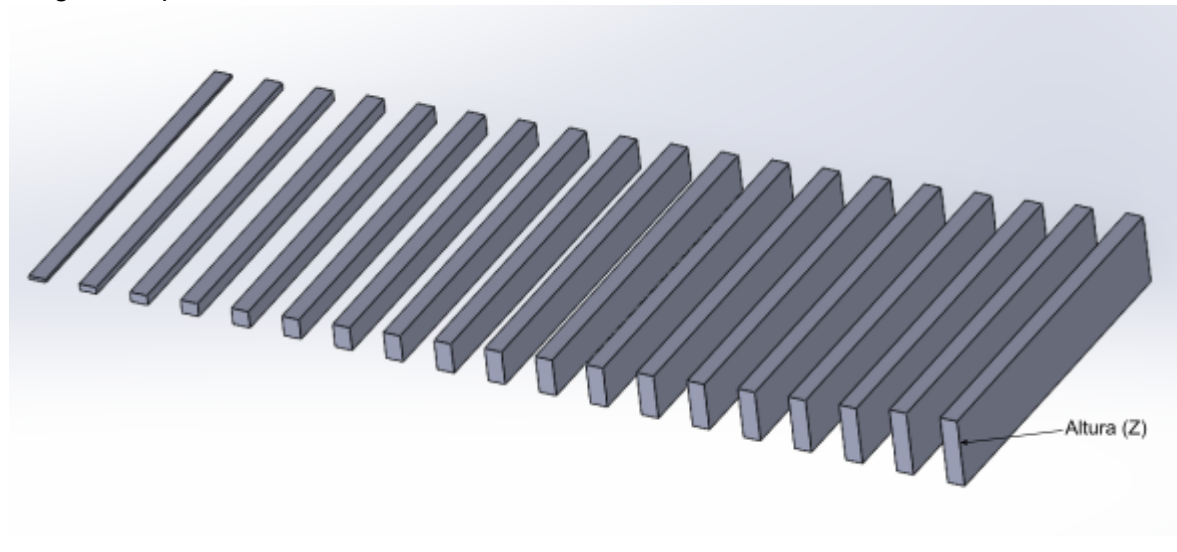
### 3.3. Tercer experimento

A fin de establecer si los errores generados en las piezas con 8, 14 y 15 piezas fueron debido al azar o eran imperfecciones que persisten en el tiempo, se decidió repetir el experimento con 19 piezas, con alturas que iban de 1 a 20 capas (la piezas con 18 capas no se imprimió debido a un error del operario al diseñar las piezas en el software de diseño). Al igual que en la primera iteración, sólo se fabricó un set de piezas en el centro de la plataforma de FA. Los resultados del experimento se muestran en el Cuadro No. 20.

Cuadro No. 20. Información detallada del experimento Prisma-E03-Z

I. Información General del Experimento	
Nombre del experimento	Prisma-E03-Z

Objetivo técnico (alineado a norma ISO/ASTM 52902)	Evaluar el rendimiento geométrico de la MFA en el eje Z investigando la incidencia del factor de cantidad de capas depositadas, así como el estudio de si las anomalías vistas en el Prisma-E02-Z persisten.
Normas ISO/ASTM aplicables (52900, 52901, etc.)	52902
Duración estimada del experimento: Diseño, generación de código G, impresión, postprocesado, toma y análisis de datos (d:hh:mm)	Diseño: 0:00:10 Generación código G: 0:00:05 Impresión 0:00:08 Postprocesado: N/A Toma y análisis de datos: 0:00:30
Máquina de fabricación aditiva utilizada (marca, modelo, tecnología)	Máquina: Prusa i3 MK3S Marca: Prusa Modelo: i3 MK3S Tecnología: Extrusión de Material (MEX)
Responsable del proceso de fabricación aditiva	Fabián Garita Chacón
Responsable de metrología	Fabián Garita Chacón
Fecha de realización	Miércoles, 16 de abril
<b>II. Diseño de la Pieza</b>	
Nombre del archivo CAD (.STL, .3MF, etc.)	Prisma-E03-Z.stl
Tecnología de impresión (según ISO/ASTM 52900)	Extrusión de Material (MEX)
Dimensiones geométricas a medir (Valores nominales)	[0,2 - 4,0; con salto de 0,2] mm - {3,6} mm (Altura, Z)
Tolerancias geométricas especificadas (ISO/ASTM 52920)	N/A
Características críticas de la geometría (Aquellas dimensiones, geometrías o zonas funcionales cuya precisión, tolerancia o integridad estructural son esenciales para que la pieza cumpla con su propósito técnico.)	Altura (Z)

Imagen o representación CAD con anotaciones	
	
Notas sobre diseño para fabricación aditiva (según ISO/ASTM 52910)	-
<b>III. Diseño Experimental</b>	
Tipo de diseño experimental (factorial, un solo factor, etc.)	Un solo factor
Justificación técnica del diseño elegido	Sólo se decidió utilizar un factor ya que se deseaba estudiar en profundidad el efecto de añadir cada capa, ya que la diferencia respecto a los otros dos ejes en el Prisma-E01-XYZ fue significativa. Además, tener un sólo factor agiliza la toma de datos.
Factores estudiados y niveles	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Pieza: Cantidad de capas teórica depositadas <ol style="list-style-type: none"> <li>a. 19 niveles, desde una capa hasta 29, saltándose el nivel de 18 capas</li> </ol> </li> </ol>
Variables de respuesta analizadas	Diferencia entre el valor real y el valor nominal de la altura de las piezas
Cantidad de réplicas por configuración	5
<b>IV. Parámetros del Proceso de fabricación aditiva</b>	
Software de corte (slicing) utilizado y versión	PrusaSlicer Versión: 2.9.0
Nombre del archivo de configuración (.ini, .gcode)	Prisma-E03-Z.gcode

Altura de capa (mm)	0,2
Diámetro de boquilla (mm)	0,4
Temperatura de extrusión (°C)	215
Temperatura de cama (°C)	60
Velocidad de impresión (mm/s)	45
Retracción (longitud, velocidad)	Longitud: 0,8 mm Velocidad: 35 mm
Número de perímetros (shells)	2
Patrón de relleno y densidad (%)	15 (Giroide)
Uso de soportes (tipo, configuración)	N/A
Ventilación (velocidad de ventiladores, activación)	Velocidad: 100% Activación: si el tiempo de impresión de la capa es menor a 100 s
Notas adicionales relevantes al control del proceso	-
<b>V. Proceso de Impresión</b>	
Condiciones ambientales (temperatura y humedad ambiente)	No se midió
Tipo de superficie de impresión (PEI rugosa o lisa, utilización de cinta, etc.)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● PEI lisa</li> <li>● Utilización de cinta en la cama de impresión</li> </ul>
Calibración previa	Sí (XYZ y Primera Capa)
Observaciones durante el proceso (ruidos, fallos, deformaciones)	N/A
Control de parámetros críticos durante la impresión	N/A
Identificación del lote de filamento y material (marca, material, diámetro)	Marca: Material: PLA Diámetro: 1,75 mm
Tiempo real de impresión (registro)	5 minutos
<b>VI. Medición y Control Dimensional</b>	

Instrumentos utilizados (marca, modelo, resolución)	<p>Calibrador digital          Marca: Mitutoyo          Modelo:          Resolución: 0,01 mm</p> <p>Microscopio          Marca: -          Modelo: -          Resolución: -</p>
Fecha de calibración del equipo	Jueves, 10 de abril de 2025
Nombre del archivo de registro de datos (.xlsx, .csv)	Prisma-E03-Z.xlsx
Cantidad de operadores (para análisis R&R)	2: Fabián Garita y Cui Zhong
Metodología utilizada	Medición de dimensiones lineales de la pieza escogida mediante el uso de un calibrador digital (ISO/ASTM 52902).
Procedimiento de medición paso a paso	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Se despega la pieza de la plataforma de fabricación.</li> <li>2. Se coloca la pieza a la mitad de las mandíbulas del calibrador digital, según el eje que se desee medir (X, Y o Z)</li> <li>3. Se cierran las mandíbulas hasta sentir el contacto con la pieza y observar que no cambia el valor reportado.</li> <li>4. Se registra el valor reportado por el instrumento.</li> <li>5. Se coloca la pieza bajo el microscopio y se cuenta la cantidad de capas depositadas en la pieza.</li> </ol>
<b>VII. Presentación y Análisis de Resultados</b>	

Descripción de datos: Estadísticas descriptivas (media, desviación estándar, etc.) y gráficos generados (boxplot, histogramas, interacción)

La media de diferencia entre valor teórico y experimental para la altura de las piezas es de  $-0,179$  mm, con una desviación de  $0,041$  mm, indicando que, en promedio, las piezas poseen menos material del que deberían, lo cual concuerda con lo obtenido en el Prisma-E02-Z, pero es importante recalcar que son menos exactas, aunque más precisas, que en el experimento Prisma-E02-Z, por lo que no se mantienen las condiciones de un ciclo de fabricación a otro. Además, se realizó una gráfica de cajas, mostrada en la Figura No. 24, la cual exhibe cómo se comporta la diferencia en la medición respecto al valor esperado según las distintas cantidades de capas teóricas (piezas), y se puede observar que las piezas poseen un comportamiento mayormente uniforme cercano a  $-0,2$  mm, con la diferencia de la primera pieza, que posee una mediana más cercana al objetivo ( $0$  mm),

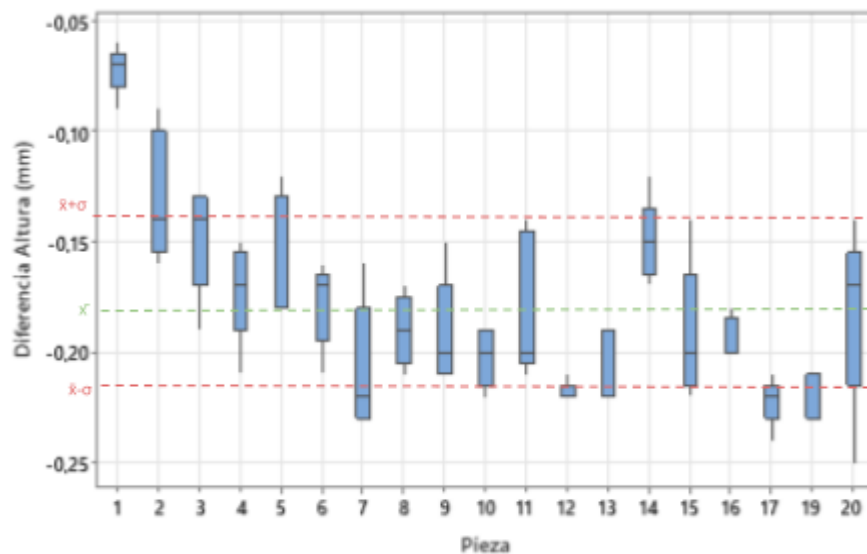


Figura No. 24. Gráfica de cajas de la diferencia entre valor medido y nominal según la pieza medida para el experimento Prisma-E03-Z.

Se realizó una gráfica de dispersión entre la cantidad de capas observada y la teórica (número de pieza) y los resultados muestran que todas las capas se corresponden con la cantidad diseñada, tal y como se muestra en la Figura No. 25. Ahora bien, es importante destacar que el operario que medía la cantidad de capas reportó que la primera capa se veía aplastada respecto a las otras, lo cual no se notaba en el experimento pasado.

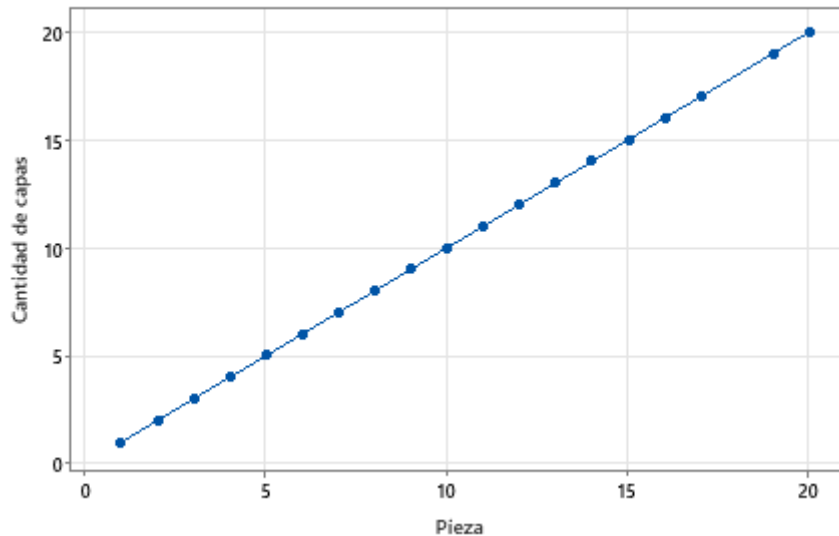


Figura No. 25. Gráfica de dispersión de la cantidad de capas registrada bajo el microscopio según la pieza medida para el experimento Prisma-E03-Z.

#### Resultados del estudio R&R (Repetibilidad y Reproducibilidad)

El análisis estadístico (ANOVA) mostró que hay diferencias importantes tanto entre las piezas medidas como entre los operarios. Específicamente:

- La variación entre piezas fue significativa (valor  $p = 0,03$ ), lo que indica que sí existen diferencias reales entre las dimensiones de las piezas.
- La variación entre operarios también fue significativa (valor  $p < 0,001$ ), lo que significa que cada persona mide de forma distinta.
- Sin embargo, la interacción entre pieza y operario no fue significativa (valor  $p = 0,42$ ), lo que sugiere que todos los operarios miden las piezas de manera consistente: una pieza no se ve afectada de forma diferente dependiendo de quién la mida.

Además, se notó una tendencia clara: Fabián tiende a medir valores más bajos que Cui de forma constante. En cuanto a las causas de variación total:

- El instrumento de medición contribuye con un 27,69%.
- La diferencia entre operarios representa un 60,21%.

Esto da un total mayor al 30% recomendado, lo que indica que el sistema de medición no es confiable en su estado actual.

Aunque se calibró el instrumento correctamente, se sospecha que parte del error proviene de la falta de experiencia de los operarios al usar el equipo. Por esta razón, se decidió fijar tanto el instrumento como el operario para las próximas mediciones, con el fin de reducir la variabilidad y obtener resultados más precisos. Para un análisis más detallado, referirse a la sección 2. Estudio del Sistema de medición, subsección 2.4. Cuarta iteración.

### Análisis de varianza (ANOVA)

El ANOVA mostró diferencias significativas en la discrepancia entre el valor real y nominal de la altura según la pieza analizada ( $p < 0,001$ ), con un buen ajuste del modelo ( $R^2 < 70\%$ ) y cumplimiento de los supuestos estadísticos. En promedio, las piezas presentan una desviación de  $-0,180$  mm respecto al valor nominal, con una desviación estándar de  $0,023$  mm, mayor que en experimentos anteriores, posiblemente por el aplastamiento de la primera capa. La prueba de Tukey no evidenció una agrupación clara entre piezas, lo que se atribuye a la mayor precisión del análisis: al cumplir todas las piezas con la cantidad teórica de capas, fue posible detectar diferencias más sutiles, a diferencia de iteraciones anteriores donde las mayores discrepancias se debían a piezas con capas faltantes.

Análisis de residuos (comprobación de hipótesis): Normalidad de residuos, homogeneidad de varianzas de los residuos e independencia de los residuos

En la Figura No. 26, se exponen los resultados del análisis de las tres hipótesis de la variable aleatoria. En la gráfica de normalidad (superior izquierda), se muestra que los residuos no son normales, pues, a partir de la prueba de Anderson-Darling, se falla en aceptar la hipótesis nula de que los residuos se comportan con normalidad, por lo que existe un sesgo en los resultados del modelo debido a este incumplimiento. Seguidamente, se tiene la gráfica de variación de los residuos (superior derecha), en la que no se muestran patrones de los residuos, sino que se distribuyen homogéneamente, por lo que se concluye que el supuesto de varianzas homogéneas se cumple. Finalmente, en la gráfica de orden de corridas (inferior derecha), se exhibe un comportamiento uniformemente distribuido por encima y por debajo del cero, sin patrones ni comportamiento atípicos, por lo que se concluye que existe independencia de los residuos.

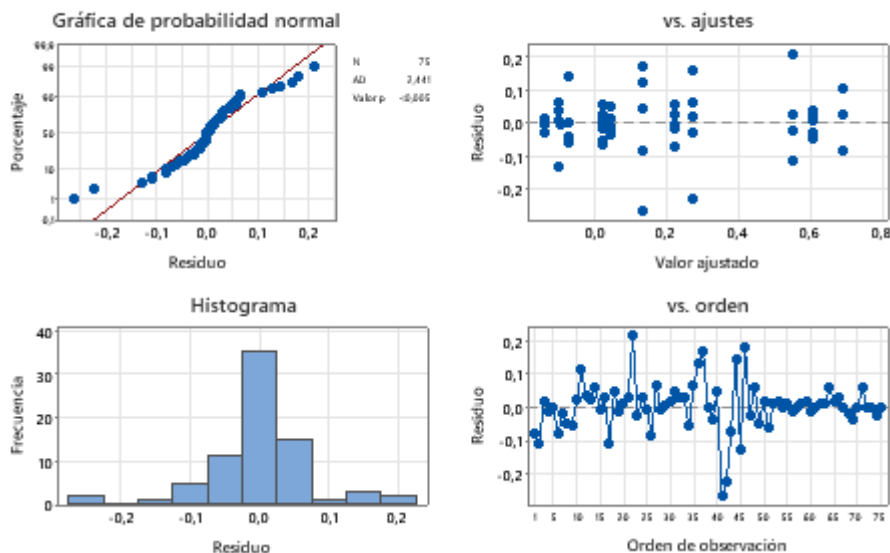


Figura No. 26. Gráficas de residuos del modelo ANOVA depurado para el experimento Prisma-E03-Z.

#### Discusión técnica de resultados frente a tolerancias y objetivos

A partir de la gráfica de optimización de respuesta mostrada en la Figura No. 27, se determinó que el nivel que hace mínima la diferencia entre el valor medido y el nominal es con una capa depositada, con un valor de  $-0,072$  mm y con un índice de deseabilidad de  $0,937$ , lo cual no concuerda con el resultado del Prisma-E02-Z y puede deberse al aplastamiento observado por el operario en el microscopio.

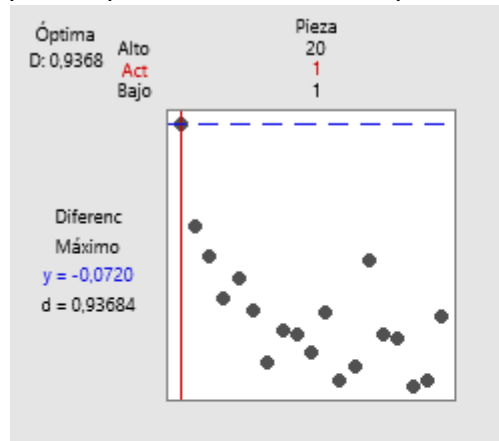


Figura No. 27. Gráfica de optimización de la diferencia entre el valor medido y nominal para los factores significativos del experimento Prisma-E03-Z.

#### Conclusión

El experimento Prisma-E03-Z verificó si persistían fallos en el número de capas. Se confirmó la influencia significativa de este factor, sin repetirse las anomalías del experimento anterior. Las piezas mostraron una menor exactitud pero mayor precisión que en Prisma-E02-Z, con una media de diferencia más negativa ( $-0,179$  mm). La mejor exactitud se logró con una sola capa, lo que, junto con la observación de una primera capa "aplastada", sugiere su fuerte impacto en piezas bajas. Aunque hubo limitaciones estadísticas, los hallazgos cualitativos son relevantes para entender el comportamiento geométrico en Z.

Normas referidas ISO/ASTM 52902, ISO 22514 (estadística industrial complementaria)

#### 4. Experimentos con piezas tipo lineal

Para experimentar con el eje X, se decidió utilizar una pieza estandarizada de la norma ISO/ASTM 52902, la cual es recomendada para mediciones de dimensiones lineales (International Organization for Standardization & ASTM International, 2019) y se tomaron 9 mediciones de las distancias de las crestas y valles de la pieza, tal y como se muestra en Figura No. 28.

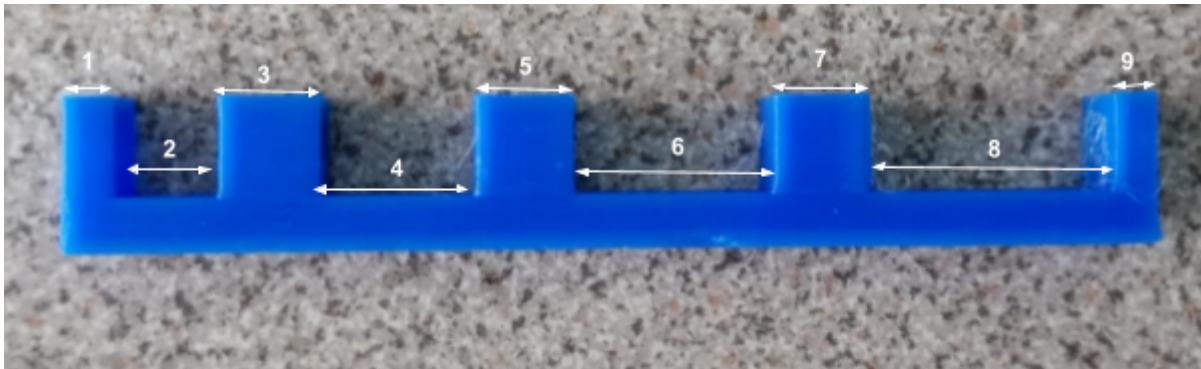


Figura No. 28. Demostración de las 9 mediciones realizadas a la pieza tipo lineal de la norma ISO/ASTM 52902.

#### 4.1. Primer experimento

A fin de analizar si existe diferencia al medir dimensiones de distintos valores, se decidió medir los 4 valles y 5 crestas mostradas en la Figura No. 12. Se procedió entonces a fabricar 5 piezas tipo lineal, las cuáles fueron colocadas aleatoriamente en la plataforma de impresión, de manera que cubrieran el 80% de la misma, tal y como estipula la norma ISO/ASTM 52902, lo cual es mostrado en la Figura No. 29. Los experimentos consistieron en realizar mediciones lineales de las distancias mostradas en la Figura No. 12, para las 5 piezas fabricadas, antes y después de arrancarlas de la plataforma, pues la norma ISO/ASTM 52902 establece que este factor afecta. Los resultados se muestran en el Cuadro No. 21.

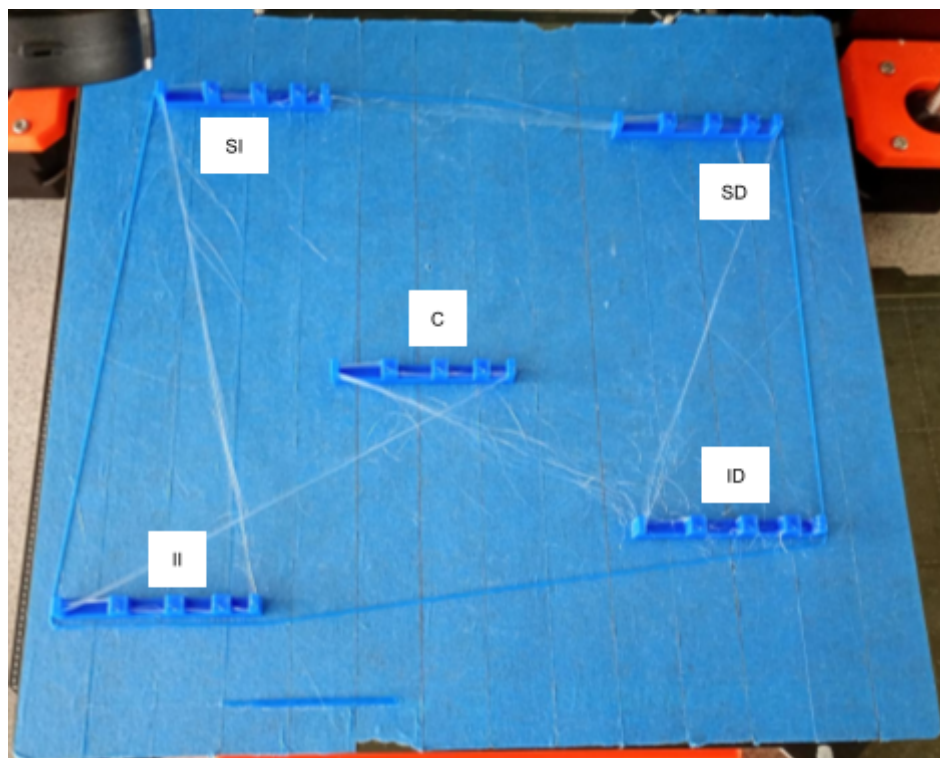


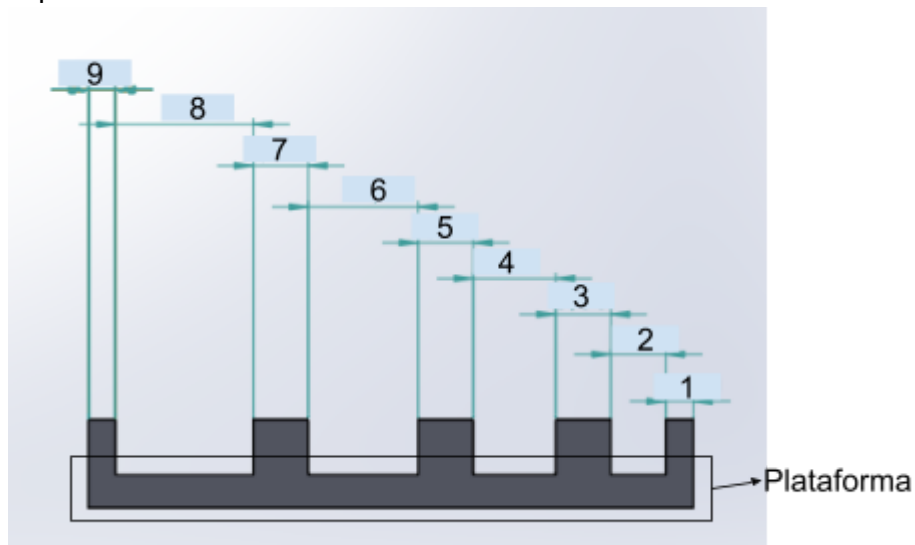
Figura No. 29. Arreglo de las 5 piezas tipo lineal fabricadas para el experimento Tipo lineal-E01-X

Cuadro No. 21. Información detallada del experimento Tipo lineal-E01-X

<b>I. Información General del Experimento</b>	
Nombre del experimento	Tipo lineal-E01-X
Objetivo técnico (alineado a norma ISO/ASTM 52902)	Evaluar el rendimiento geométrico de la MFA en el eje Z investigando la incidencia de los factores de posición en la plataforma de fabricación, la característica de la pieza tipo lineal medida y la condición de arranque.
Normas ISO/ASTM aplicables (52900, 52901, etc.)	52902
Duración estimada del experimento: Diseño, generación de código G, impresión, postprocesado, toma y análisis de datos (d:hh:mm)	Diseño: N/A (Ya estaba diseñada la pieza) Generación código G: 0:00:05 Impresión: 0:01:00 Postprocesado: N/A Toma y análisis de datos: 0:01:00

Máquina de fabricación aditiva utilizada (marca, modelo, tecnología)	Máquina: Prusa i3 MK3S Marca: Prusa Modelo: i3 MK3S Tecnología: Extrusión de Material (MEX)
Responsable del proceso de fabricación aditiva	Fabián Garita Chacón
Responsable de metrología	Fabián Garita Chacón
Fecha de realización	Martes 22 de abril
<b>II. Diseño de la Pieza</b>	
Nombre del archivo CAD (.STL, .3MF, etc.)	Tipo lineal-E01-X.stl
Tecnología de impresión (según ISO/ASTM 52900)	Extrusión de Material (MEX)
Dimensiones geométricas a medir (Valores nominales)	Crestas y valles enumerados del 1 al 9 en la imagen o representación CAD con anotaciones <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 2,5 mm</li> <li>2. 5 mm</li> <li>3. 3 mm</li> <li>4. 7,5 mm</li> <li>5. 5 mm</li> <li>6. 10 mm</li> <li>7. 5 mm</li> <li>8. 12,5 mm</li> <li>9. 2,5 mm</li> </ol>
Tolerancias geométricas especificadas (ISO/ASTM 52920)	N/A
Características críticas de la geometría (Aquellas dimensiones, geometrías o zonas funcionales cuya precisión, tolerancia o integridad estructural son esenciales para que la pieza cumpla con su propósito técnico.)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Crestas y valles enumerados del 1 al 9 en la imagen o representación CAD con anotaciones</li> <li>• Plataforma (para que se cumpla la integridad de los valles)</li> </ul>

Imagen o representación CAD con anotaciones



Notas sobre diseño para fabricación aditiva (según ISO/ASTM 52910)

-

### III. Diseño Experimental

Tipo de diseño experimental (factorial, un solo factor, etc.)

Factorial

Justificación técnica del diseño elegido

Permite analizar la incidencia de varios factores, tanto por separado como en conjunto.

Factores estudiados y niveles	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Posición: Posición en la que se colocará el set de cinco piezas en la plataforma de impresión <ol style="list-style-type: none"> <li>a. Superior Izquierda</li> <li>b. Superior Derecha</li> <li>c. Centro</li> <li>d. Inferior Izquierda</li> <li>e. Inferior Derecha</li> </ol> </li> <li>2. Característica: Cada una de las nueve piezas con diferentes alturas <ol style="list-style-type: none"> <li>a. 1</li> <li>b. 2</li> <li>c. 3</li> <li>d. 4</li> <li>e. 5</li> <li>f. 6</li> <li>g. 7</li> <li>h. 8</li> <li>i. 9</li> </ol> </li> <li>3. Condición: Si se arranca o no la pieza de la plataforma para tomar la medición <ol style="list-style-type: none"> <li>a. Antes de arrancar</li> <li>b. Después de arrancar</li> </ol> </li> </ol>
Variables de respuesta analizadas	Diferencia entre el valor real y el valor nominal del eje X de las piezas (crestas y valles)
Cantidad de réplicas por configuración	3
<b>IV. Parámetros del Proceso de fabricación aditiva</b>	
Software de corte (slicing) utilizado y versión	PrusaSlicer Versión: 2.9.0
Nombre del archivo de configuración (.ini, .gcode)	Tipo lineal-E01-X.gcode
Altura de capa (mm)	0,2
Diámetro de boquilla (mm)	0,4
Temperatura de extrusión (°C)	215
Temperatura de cama (°C)	60
Velocidad de impresión (mm/s)	45
Retracción (longitud, velocidad)	N/A
Número de perímetros (shells)	2

Patrón de relleno y densidad (%)	15 (Giroide)
Uso de soportes (tipo, configuración)	N/A
Ventilación (velocidad de ventiladores, activación)	N/A
Notas adicionales relevantes al control del proceso	-
<b>V. Proceso de Impresión</b>	
Condiciones ambientales (temperatura y humedad ambiente)	No se midieron
Tipo de superficie de impresión (PEI rugosa o lisa, utilización de cinta, etc.)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• PEI lisa</li> <li>• Utilización de cinta en la cama de impresión</li> </ul>
Calibración previa	Sí (XYZ y Primera Capa)
Observaciones durante el proceso (ruidos, fallos, deformaciones)	N/A
Control de parámetros críticos durante la impresión	N/A
Identificación del lote de filamento y material (marca, material, diámetro)	Marca: - Material: PLA Diámetro: 1,75 mm
Tiempo real de impresión (registro)	
<b>VI. Medición y Control Dimensional</b>	
Instrumentos utilizados (marca, modelo, resolución)	Calibrador digital Marca: Mitutoyo Modelo: - Resolución: 0,01 mm
Fecha de calibración del equipo	Jueves, 10 de abril de 2025
Nombre del archivo de registro de datos (.xlsx, .csv)	Tipo lineal-E01-X.xlsx
Cantidad de operadores (para análisis R&R)	2: Fabián Garita y Cui Zhong
Metodología utilizada	Medición de dimensiones lineales de la pieza escogida mediante el uso de un calibrador digital (ISO/ASTM 52902).

Procedimiento de medición paso a paso	<ul style="list-style-type: none"><li>• Se coloca la característica de la pieza que se desea medir entre las puntas de las mandíbulas del calibrador digital</li><li>• Se ajustan las mandíbulas hasta que toquen la pieza y el valor reportado no cambie.</li><li>• Se registra el valor reportado.</li></ul>
<b>VII. Presentación y Análisis de Resultados</b>	

Descripción de datos: Estadísticas descriptivas (media, desviación estándar, etc.) y gráficos generados (boxplot, histogramas, interacción)

La media de la diferencia entre valores teóricos y experimentales es de  $-0,0003$  mm, con una desviación de  $0,1232$  mm. Además, se realizó una gráfica de cajas, mostrada en la Figura No. 30, para estudiar el efecto de cada característica y de la condición en la diferencia entre valor medido y nominal. Los resultados muestran una diferencia notable entre crestas (posiciones impares) y valles (pares), ya que las crestas tienden a tener exceso de material y, por tanto, una medición mayor, mientras que en los valles ese exceso se traduce en una medición menor. Además, la dispersión de los datos es mayor antes de retirar las piezas de la plataforma (desviación estándar de  $0,16$  mm y media de  $-0,02$  mm) que después de separarlas (desviación de  $0,07$  mm y media de  $0,02$  mm), lo cual puede explicarse por la dificultad de medir directamente sobre la plataforma debido a limitaciones en la colocación del calibrador.

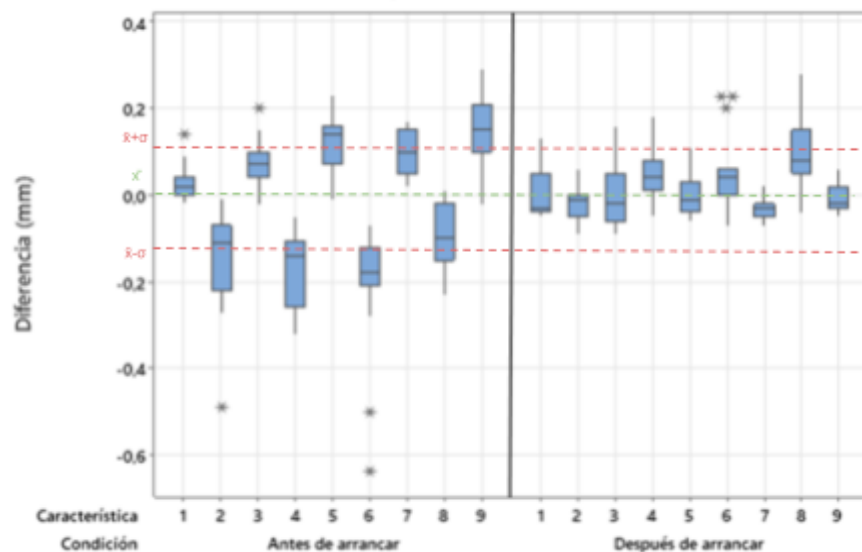


Figura No. 30. Gráfica de cajas de la diferencia entre el valor medido y el nominal de cada característica analizada según su condición para el experimento Tipo lineal-E01-X.

Adicionalmente, se realizó una gráfica de cajas para estudiar el efecto de variar la posición, la cual se muestra en la Figura No. 31. Es posible observar, las medias se mantienen similares en su ubicación, así como sus desviaciones, por lo que se puede deducir que la posición de la plataforma no es determinante.

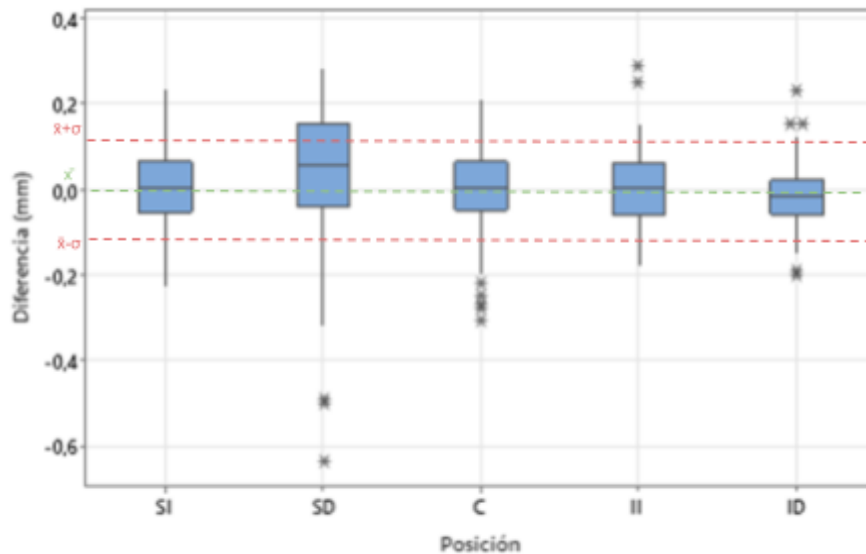


Figura No. 31. Gráfica de cajas de la diferencia entre el valor medido y el nominal según su posición en la plataforma de fabricación para el experimento Tipo lineal-E01-X

#### Resultados del estudio R&R (Repetibilidad y Reproducibilidad)

El análisis estadístico (ANOVA) mostró que hay diferencias importantes tanto entre las piezas medidas como entre los operarios. Específicamente:

- La variación entre piezas fue significativa (valor  $p = 0,03$ ), lo que indica que sí existen diferencias reales entre las dimensiones de las piezas.
- La variación entre operarios también fue significativa (valor  $p < 0,001$ ), lo que significa que cada persona mide de forma distinta.
- Sin embargo, la interacción entre pieza y operario no fue significativa (valor  $p = 0,42$ ), lo que sugiere que todos los operarios miden las piezas de manera consistente: una pieza no se ve afectada de forma diferente dependiendo de quién la mida.

Además, se notó una tendencia clara: Fabián tiende a medir valores más bajos que Cui de forma constante. En cuanto a las causas de variación total:

- El instrumento de medición contribuye con un 27,69%.
- La diferencia entre operarios representa un 60,21%.

Esto da un total mayor al 30% recomendado, lo que indica que el sistema de medición no es confiable en su estado actual.

Aunque se calibró el instrumento correctamente, se sospecha que parte del error proviene de la falta de experiencia de los operarios al usar el equipo. Por esta razón, se decidió fijar tanto el instrumento como el operario para las próximas mediciones, con el fin de reducir la variabilidad y obtener resultados más precisos. Para un análisis más detallado, referirse a la sección 2. Estudio del Sistema de medición, subsección 2.4. Cuarta iteración.

### Análisis de varianza (ANOVA)

Se realizó un diseño factorial para estudiar conjuntamente el efecto de la condición (antes y después de arrancar), la posición en la plataforma y la característica medida (5 crestas y 4 valles), con un total de 270 mediciones válidas. El ANOVA, mostrado en el Cuadro No. 22, exhibe que la interacción entre los tres factores es significativa, de manera que se debe considerar a los tres en el análisis. Esto indica que la medición depende tanto del lugar en que se coloca el calibrador como de la característica medida y de si la pieza se arranca o no de la plataforma. Además, se considera que el desgaste del equipo (con 8 años de uso) podría estar afectando la precisión, especialmente por la posible pérdida de integridad en las barras dentadas de los motores.

Cuadro No. 22. Resultados del ANOVA para el modelo realizado para el experimento Tipo lineal-E01-X.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Característica	8	0,79321	0,099151	15,81	0,000 x
Posición	4	0,03907	0,009767	0,22	0,910 x
Condición	1	0,08188	0,081883	1,63	0,271 x
Característica*Posición	32	0,20069	0,006271	0,50	0,975
Característica*Condición	8	1,69691	0,212114	16,76	0,000 x
Posición*Condición	4	0,20101	0,050252	3,97	0,010 x
Característica*Posición*Condición	32	0,40515	0,012661	3,50	0,000
Error	179	0,64685	0,003614		
Total	268	4,07058			

*x No es una prueba F exacta.*

Las comparaciones de Tukey revelaron que las crestas no presentan diferencias significativas entre sí, mientras que entre los valles sí hubo una excepción: el valle más ancho (número 8), cuya diferencia podría explicarse por la mayor facilidad de medición y menor variabilidad asociada a su tamaño. Los resultados se muestran en el Cuadro No. 23.

Cuadro No. 23. Comparaciones de Tukey para el modelo realizado para el experimento Tipo lineal-E01-X.

Medida	N	Media Agrupación
7	30	0.096333 A
9	30	0.073000 A
1	30	0.057667 A
3	30	0.052333 A
5	30	0.046000 A
6	30	-0.057000 B
8	30	-0.061667 B
4	30	-0.062667 B
2	30	-0.147667 C

Análisis de residuos (comprobación de hipótesis): Normalidad de residuos, homogeneidad de varianzas de los residuos e independencia de los residuos.

En la Figura No. 32, se exhiben los resultados del análisis de las tres hipótesis de la variable aleatoria. En la gráfica de normalidad (superior izquierda), se muestra que los residuos no son normales, pues, a partir de la prueba de Anderson-Darling, se falla en aceptar la hipótesis nula de que los residuos se comportan con normalidad, por lo que existe un sesgo en los resultados del modelo debido a este incumplimiento. Seguidamente, se tiene la gráfica de variación de los residuos (superior derecha), en la que se muestran patrones de los residuos, ya que la mayoría se acumula a un lado de la gráfica, por lo que se concluye que el supuesto de varianzas homogéneas no se cumple. Finalmente, en la gráfica de orden de corridas (inferior derecha), se exhibe un comportamiento uniformemente distribuido por encima y por debajo del cero, sin patrones, por lo que se concluye que existe independencia de los residuos.

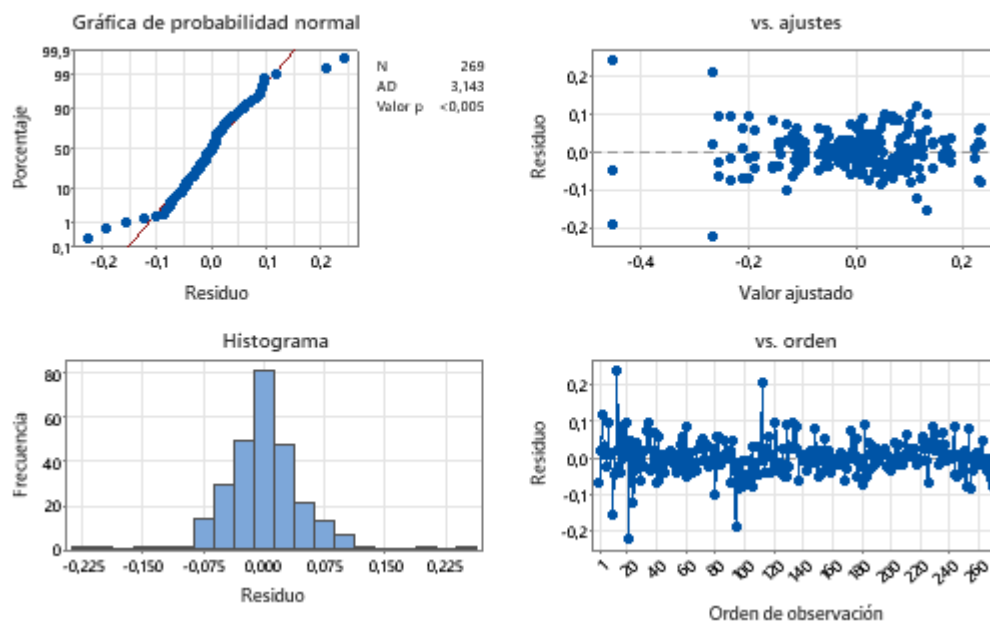


Figura No. 32. Gráficas de residuos del modelo ANOVA depurado para el experimento Tipo lineal-E01-X.

### Discusión técnica de resultados frente a tolerancias y objetivos

A partir de la gráfica de optimización de respuesta mostrada en la Figura No. 33, se determinó que la configuración de factores que hace mínima la diferencia entre valor medido y nominal es medir la característica 1 (tamaño de 2,5 mm) luego de arrancar la pieza, con una diferencia media 0 mm, aunque cabe destacar que en las crestas 3 y 5 también la diferencia es baja. Lo anterior indica que es mejor medir distancias rellenas de material que huecas.

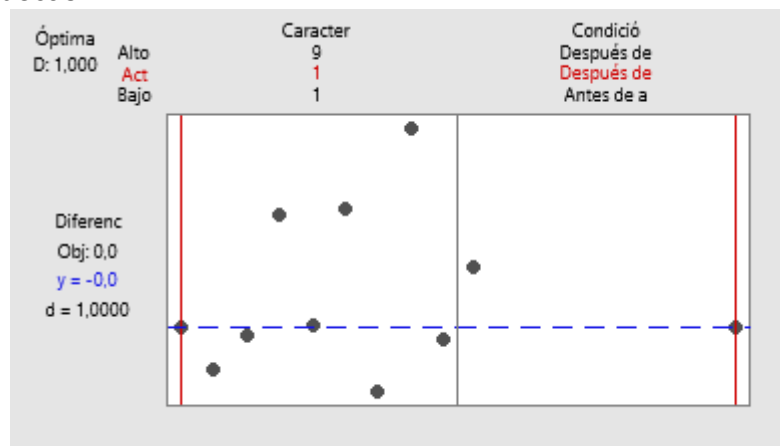


Figura No. 33. Gráfica de optimización de la diferencia entre el valor medido y nominal para los factores significativos del experimento Tipo lineal-E01-X

### Conclusión

El experimento Tipo lineal-E01-X evaluó el rendimiento geométrico en el eje Z de la MFA, analizando la influencia de la posición en la plataforma, la característica medida (cada cresta o valle) y la condición de arranque (antes o después de retirar la pieza). Se encontró que la interacción entre estos factores afecta significativamente la exactitud dimensional. Medir después del retiro de la pieza resultó más preciso, pese a lo recomendado por la norma. Además, se determinó que medir crestas es más favorable que valles. Aunque hubo limitaciones estadísticas, el modelo explicó adecuadamente la variabilidad observada ( $R^2 = 78,44\%$ ).

Normas referidas ISO/ASTM 52902, ISO 22514 (estadística industrial complementaria)

## 5.2. Segundo experimento

A partir de los datos de la primera iteración, se decidió conservar las cinco posiciones originales, ya que era significativa, así como fijar el factor de condición en el nivel de antes de arrancar, ya que si bien después de arrancar hay más precisión, la literatura recomienda hacer las mediciones antes de arrancar la pieza, a fin de que no se pierda la integridad de la misma (International Organization for Standardization & ASTM International, 2019). Además, se decidió incorporar un nuevo factor, la alineación, que corresponde a si la pieza se alinea respecto al eje X o al eje Y, a fin de establecer si existen diferencias importantes entre ambos ejes. El acomodo se realizó en un sólo ciclo de fabricación, ya que fabricar en dos separados podía incluir variación adicional, tal y como se muestra en la Figura No. 34.

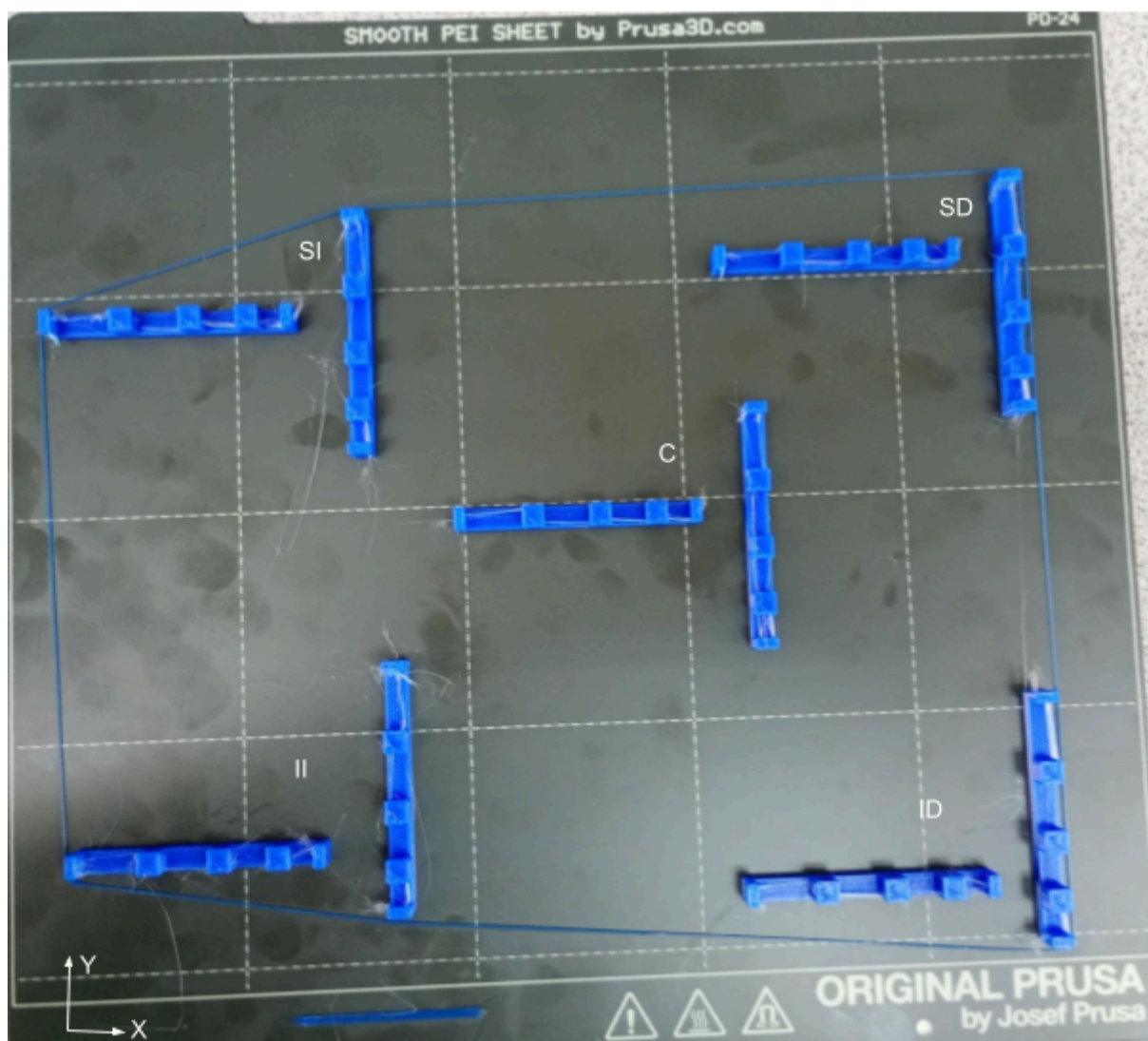


Figura No. 34. Arreglo de las 10 piezas tipo lineal fabricadas para la segunda iteración de los experimentos con el eje X.

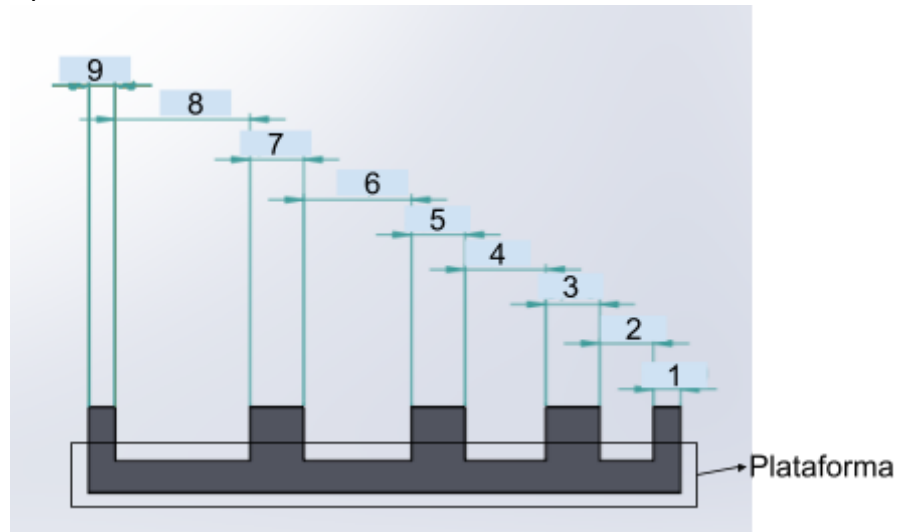
Los resultados del experimento, así como su información detallada de realización, se muestran en el Cuadro No. 24.

Cuadro No. 24. Información detallada del experimento Tipo lineal-E02-XY

<b>I. Información General del Experimento</b>	
Nombre del experimento	Tipo lineal-E02-XY

Objetivo técnico (alineado a norma ISO/ASTM 52902)	Evaluar el rendimiento geométrico de la MFA en el eje Z investigando la incidencia de los factores de posición en la plataforma de fabricación, la característica de la pieza tipo lineal medida y la alineación de la pieza respecto a los dos ejes horizontales.
Normas ISO/ASTM aplicables (52900, 52901, etc.)	52902
Duración estimada del experimento: Diseño, generación de código G, impresión, postprocesado, toma y análisis de datos (d:hh:mm)	Diseño: N/A (Ya estaba diseñada la pieza) Generación código G: 0:00:10 Impresión: 0:01:30 Postprocesado: N/A Toma y análisis de datos: 0:02:00
Máquina de fabricación aditiva utilizada (marca, modelo, tecnología)	Máquina: Prusa i3 MK3S Marca: Prusa Modelo: i3 MK3S Tecnología: Extrusión de Material (MEX)
Responsable del proceso de fabricación aditiva	Fabián Garita Chacón
Responsable de metrología	Fabián Garita Chacón
Fecha de realización	Jueves 24 de abril
<b>II. Diseño de la Pieza</b>	
Nombre del archivo CAD (.STL, .3MF, etc.)	Tipo lineal-E02-XY.stl
Tecnología de impresión (según ISO/ASTM 52900)	Extrusión de Material (MEX)
Dimensiones geométricas a medir (Valores nominales)	Crestas y valles enumerados en la imagen o representación CAD con anotaciones 1. Cresta, C (3) 2. Valle pequeño, VP (2) 3. Valle grande, VG (8)
Tolerancias geométricas especificadas (ISO/ASTM 52920)	N/A
Características críticas de la geometría (Aquellas dimensiones, geometrías o zonas funcionales cuya precisión, tolerancia o integridad estructural son esenciales para que la pieza cumpla con su propósito técnico.)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Crestas y valles enumerados en la imagen o representación CAD con anotaciones</li> <li>● Plataforma (para que se cumpla la integridad de los valles)</li> </ul>

Imagen o representación CAD con anotaciones



Notas sobre diseño para fabricación aditiva (según ISO/ASTM 52910)

-

### III. Diseño Experimental

Tipo de diseño experimental (factorial, un solo factor, etc.)

Factorial

Justificación técnica del diseño elegido

Permite analizar la incidencia de varios factores, tanto por separado como en conjunto.

Factores estudiados y niveles

1. Posición: Posición en la que se colocará el set de cinco piezas en la plataforma de impresión
  - a. Superior Izquierda
  - b. Superior Derecha
  - c. Centro
  - d. Inferior Izquierda
  - e. Inferior Derecha
2. Característica: Cada una de las nueve piezas con diferentes alturas
  - a. C
  - b. VP
  - c. VG
3. Alineación: Si la pieza tipo lineal es alineada al eje X o al eje Y para su fabricación.
  - a. X
  - b. Y

Variables de respuesta analizadas

Diferencia entre el valor real y el valor nominal del eje X de las piezas (crestas y valles)

Cantidad de réplicas por configuración	3
<b>IV. Parámetros del Proceso de fabricación aditiva</b>	
Software de corte (slicing) utilizado y versión	PrusaSlicer Versión: 2.9.0
Nombre del archivo de configuración (.ini, .gcode)	Tipo lineal-E02-XY.gcode
Altura de capa (mm)	0,2
Diámetro de boquilla (mm)	0,4
Temperatura de extrusión (°C)	215
Temperatura de cama (°C)	60
Velocidad de impresión (mm/s)	45
Retracción (longitud, velocidad)	N/A
Número de perímetros (shells)	2
Patrón de relleno y densidad (%)	15 (Giroide)
Uso de soportes (tipo, configuración)	N/A
Ventilación (velocidad de ventiladores, activación)	N/A
Notas adicionales relevantes al control del proceso	-
<b>V. Proceso de Impresión</b>	
Condiciones ambientales (temperatura y humedad ambiente)	No se midieron
Tipo de superficie de impresión (PEI rugosa o lisa, utilización de cinta, etc.)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● PEI lisa</li> </ul>
Calibración previa	Sí (XYZ y Primera Capa)
Observaciones durante el proceso (ruidos, fallos, deformaciones)	N/A
Control de parámetros críticos durante la impresión	N/A
Identificación del lote de filamento y material (marca, material, diámetro)	Marca: - Material: PLA Diámetro: 1,75 mm

Tiempo real de impresión (registro)	1 hora y 20 minutos
<b>VI. Medición y Control Dimensional</b>	
Instrumentos utilizados (marca, modelo, resolución)	Calibrador digital Marca: Mitutoyo Modelo: - Resolución: 0,01 mm
Fecha de calibración del equipo	Jueves, 10 de abril de 2025
Nombre del archivo de registro de datos (.xlsx, .csv)	Tipo lineal-E02-XY.xlsx
Cantidad de operadores (para análisis R&R)	2: Fabián Garita y Cui Zhong
Metodología utilizada	Medición de dimensiones lineales de la pieza escogida mediante el uso de un calibrador digital (ISO/ASTM 52902).
Procedimiento de medición paso a paso	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Se coloca la característica de la pieza que se desea medir entre las puntas de las mandíbulas del calibrador digital</li> <li>2. Se ajustan las mandíbulas hasta que toquen la pieza y el valor reportado no cambie.</li> <li>3. Se registra el valor reportado.</li> </ol>
<b>VII. Presentación y Análisis de Resultados</b>	

Descripción de datos: Estadísticas descriptivas (media, desviación estándar, etc.) y gráficos generados (boxplot, histogramas, interacción)

La media de los datos es de -0,127 mm, mientras que su desviación es de 0,153 mm. Además, se realizó una gráfica de caja para investigar si existe una diferencia entre los ejes X y Y, la cual es mostrada en la Figura No. 35, y los resultados muestran que no se percibe una diferencia importante entre ambos ejes, aunque sí se presenta diferencia entre cada característica (VP = 2, C = 3 y VG = 8). Esto indica que se puede imprimir en cualquiera de las dos orientaciones dentro del plano XY, pero no se puede medir indiscriminadamente una cresta de un valle.

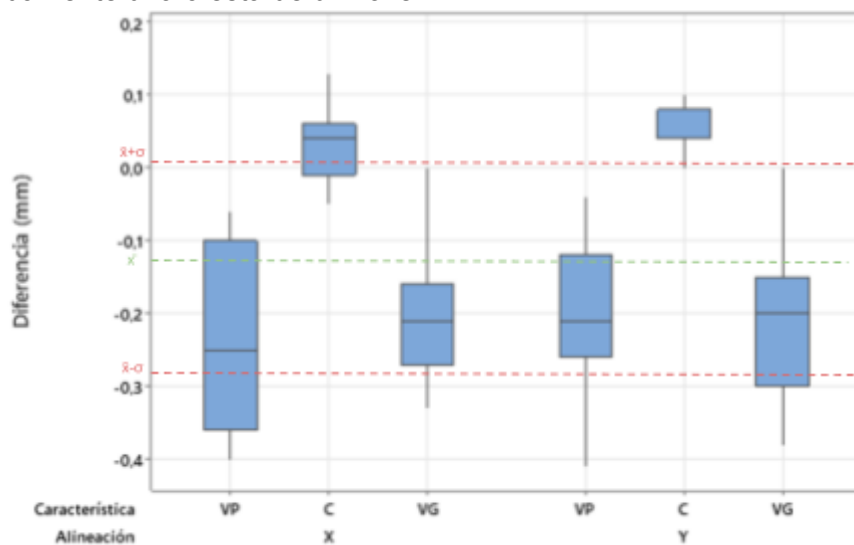


Figura No. 35. Gráfica de cajas de la diferencia entre el valor medido y el nominal de cada característica según su alineación en la plataforma de fabricación para el experimento Tipo lineal-E02-XY.

Adicionalmente, en la Figura No. 36, se realizó una gráfica de cajas para establecer si existía diferencia entre las distintas posiciones escogidas y los resultados muestran que no la hay, ya que los rangos de los datos medidos se distribuyen de la misma forma para las cinco posiciones.

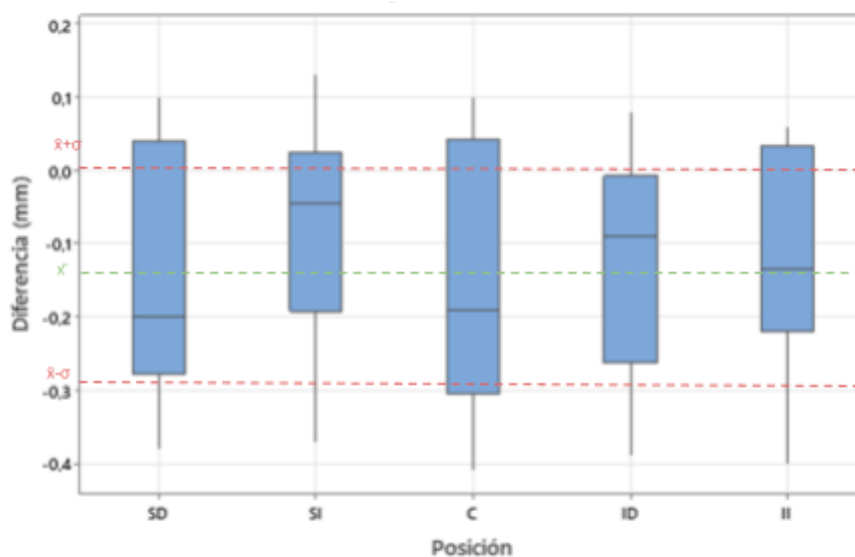


Figura No. 36. Gráfica de cajas de la diferencia entre el valor medido y el nominal según su posición en la plataforma de fabricación para el experimento Tipo lineal-E02-XY.

#### Resultados del estudio R&R (Repetibilidad y Reproducibilidad)

El análisis estadístico (ANOVA) mostró que hay diferencias importantes tanto entre las piezas medidas como entre los operarios. Específicamente:

- La variación entre piezas fue significativa (valor  $p = 0,03$ ), lo que indica que sí existen diferencias reales entre las dimensiones de las piezas.
- La variación entre operarios también fue significativa (valor  $p < 0,001$ ), lo que significa que cada persona mide de forma distinta.
- Sin embargo, la interacción entre pieza y operario no fue significativa (valor  $p = 0,42$ ), lo que sugiere que todos los operarios miden las piezas de manera consistente: una pieza no se ve afectada de forma diferente dependiendo de quién la mida.

Además, se notó una tendencia clara: Fabián tiende a medir valores más bajos que Cui de forma constante. En cuanto a las causas de variación total:

- El instrumento de medición contribuye con un 27,69%.
- La diferencia entre operarios representa un 60,21%.

Esto da un total mayor al 30% recomendado, lo que indica que el sistema de medición no es confiable en su estado actual.

Aunque se calibró el instrumento correctamente, se sospecha que parte del error proviene de la falta de experiencia de los operarios al usar el equipo. Por esta razón, se decidió fijar tanto el instrumento como el operario para las próximas mediciones, con el fin de reducir la variabilidad y obtener resultados más precisos. Para un análisis más detallado, referirse a la sección 2. Estudio del Sistema de medición, subsección 2.4. Cuarta iteración.

### Análisis de varianza (ANOVA)

Los resultados están plasmados en el Cuadro No. 25, y muestran que la interacción de los tres factores está muy cercana a ser significativa, por lo que teniendo en cuenta los resultados de los experimentos anteriores, se decidió utilizar un nivel de significancia de 0,01, aceptando una mayor posibilidad de aceptar la hipótesis que los datos no son significativos cuando, en realidad, no lo son, a fin de no depurar el modelo, tomando así en consideración el efecto de los tres factores. Cabe destacar que la desviación estándar del modelo es de 0,863 mm y que el mismo presenta un índice de correlación que indica que un 78,44% de los datos son explicados por el modelo, siendo superior al 70% establecido por la teoría para una buena explicación.

Cuadro No. 25. Resultados del ANOVA realizado para las diferencias entre el valor medido y el valor nominal para las piezas del experimento Tipo lineal-E02-XY.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Alineación	1	0,00187	0,001868	0,21	0,668
Posición	4	0,05572	0,013929	2,11	0,549 x
Característica	2	1,31633	0,658163	52,64	0,000
Alineación*Posición	4	0,03506	0,008765	0,60	0,675
Alineación*Característica	2	0,00198	0,000988	0,07	0,935
Posición*Característica	8	0,10003	0,012504	0,85	0,587
Alineación*Posición*Característica	8	0,11738	0,014672	1,97	0,066
Error	60	0,44753	0,007459		
Total	89	2,07589			

*x No es una prueba F exacta.*

Las comparaciones de Tukey revelaron que la cresta se encuentra en una categoría distinta a los valles, lo cual es debido a la cantidad depositada de más en los lados de la cresta. Los resultados se muestran en el Cuadro No. 26.

Cuadro No. 26. Comparaciones de Tukey para el modelo realizado para el experimento Tipo lineal-E02-X.

Característica	N	Media	Agrupación
C	30	0,043667	A
VG	30	-0,202667	B
VP	30	-0,222000	B

Análisis de residuos (comprobación de hipótesis): Normalidad de residuos, homogeneidad de varianzas de los residuos e independencia de los residuos

En la Figura No. 37, se exhiben los resultados del análisis de las tres hipótesis de la variable aleatoria. En la gráfica de normalidad (superior izquierda), se muestra que los residuos son normales, pues, a partir de la prueba de Anderson-Darling, se falla en rechazar la hipótesis nula de que los residuos se comportan con normalidad. Seguidamente, se tiene la gráfica de variación de los residuos (superior derecha), en la que se muestran patrones de los residuos, ya que se muestra una forma de cono en los residuos, por lo que se concluye que el supuesto de varianzas homogéneas no se cumple. Finalmente, en la gráfica de orden de corridas (inferior derecha), se exhibe un comportamiento uniformemente distribuido por encima y por debajo del cero, sin patrones, por lo que se concluye que existe independencia de los residuos.

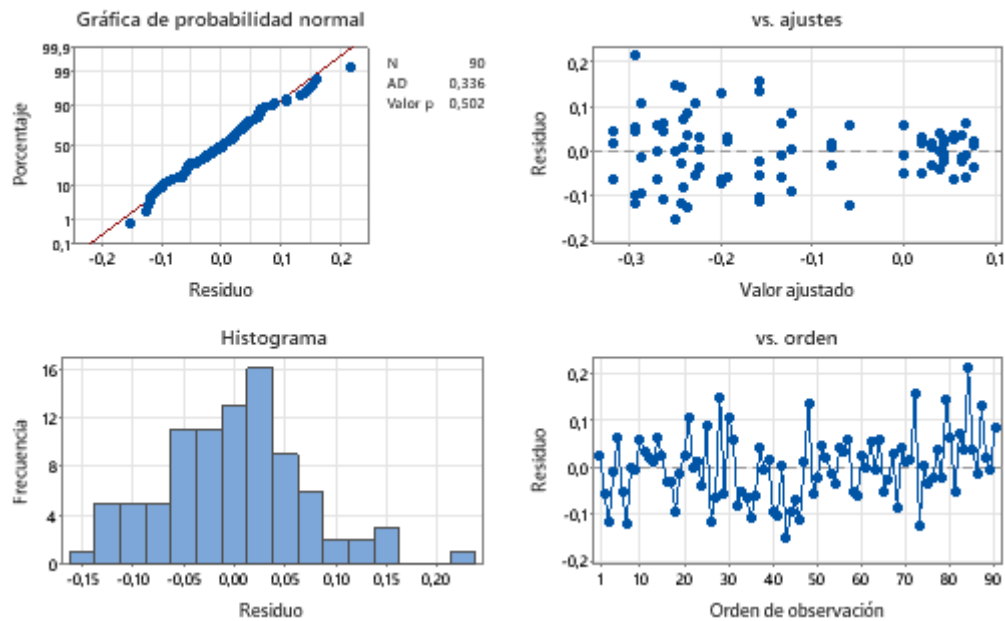


Figura No. 37. Gráficas de residuos del modelo ANOVA depurado para el experimento Tipo lineal-E02-XY.

### Discusión técnica de resultados frente a tolerancias y objetivos

En la Figura No. 38, se muestra la gráfica de optimización de respuesta, en la cual se obtuvo que el resultado que apunta a cero diferencia entre la medición teórica y nominal es midiendo la cresta con la pieza habiendo sido alineada al eje X, lo que da un valor de diferencia de 0,037 mm. Los otros resultados están altamente distanciados de esta configuración

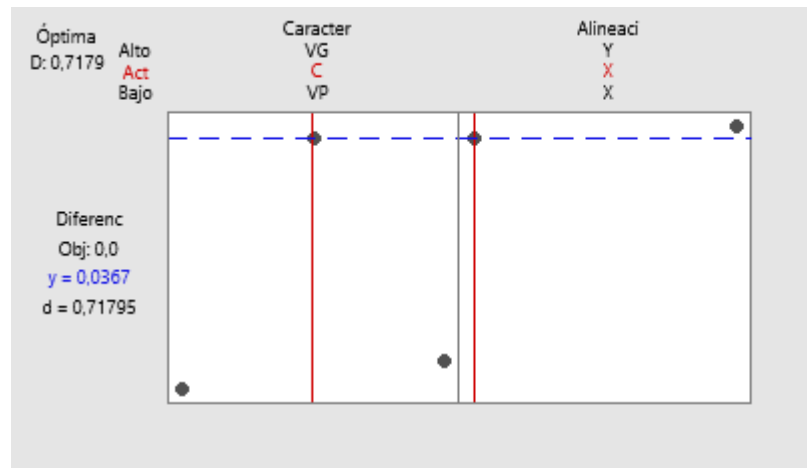


Figura No. 38. Gráfica de optimización de la diferencia entre el valor medido y nominal para los factores significativos del experimento Tipo lineal-E02-XY.

### Conclusión

El experimento Tipo lineal-E02-XY evaluó el rendimiento geométrico en los ejes X y Y de la MFA, analizando los efectos de la posición en la plataforma, la característica medida (crestas o valles) y la alineación de la pieza. Aunque la posición no fue significativa por sí sola, sus interacciones con los otros factores sí lo fueron. Se encontró que las crestas ofrecen mayor exactitud que los valles, y que la orientación de la pieza también influye. La mejor precisión se logró midiendo una cresta alineada al eje X. A pesar de ciertas limitaciones estadísticas, el modelo explicó una buena parte de la variabilidad ( $R^2 = 78,44\%$ ), destacando la importancia de considerar múltiples factores combinados en el control dimensional.

Normas referidas ISO/ASTM 52902, ISO 22514 (estadística industrial complementaria)

## 5. Experimentos con cubos

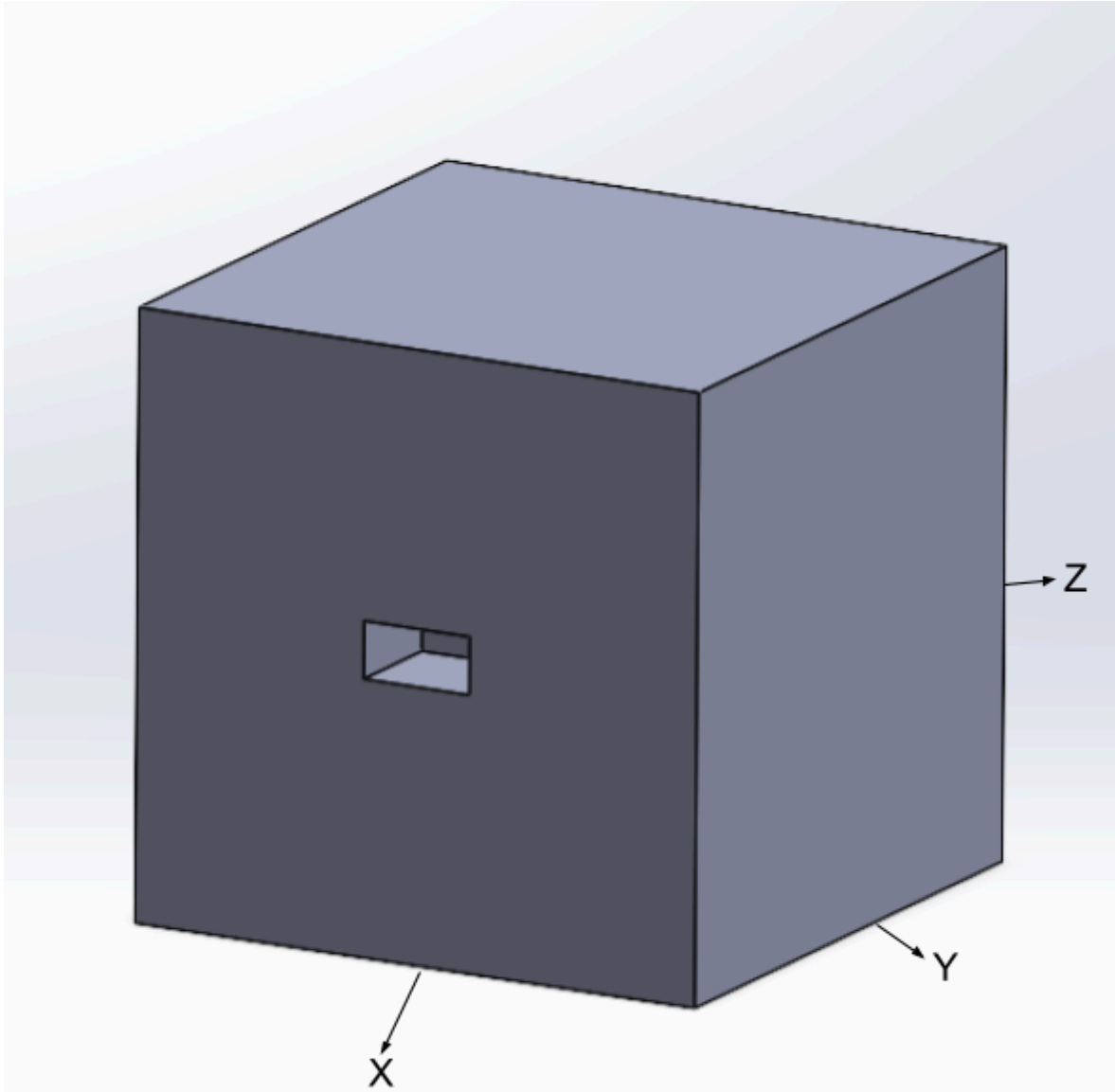
### 5.1. Primer experimento

El presente experimento, denominado Cubo-E01-XYZ, se enmarca dentro de los lineamientos de la norma ISO/ASTM 52902, que establece los métodos de prueba para la evaluación del rendimiento geométrico de sistemas de manufactura aditiva. Su objetivo técnico es estudiar la influencia de diversas condiciones operativas y ambientales sobre la exactitud dimensional en el eje Z, mediante la fabricación y medición de un cubo patrón de 10 mm de lado. Específicamente, se investiga cómo factores como la posición en la plataforma de fabricación, la alineación del instrumento de medición respecto a los ejes de la

impresora, y la orientación de la pieza afectan la diferencia entre el valor nominal y el valor medido. Además, se consideran como covariables la temperatura y la humedad ambiental, con el fin de determinar su posible efecto sobre la variabilidad dimensional. Cabe destacar que, a fin de tener las condiciones ambientales controladas, la MFA fue puesta dentro de una cámara de fabricación cerrada, la cual fue extraída de otra MFA en desuso. En el Cuadro No. 27, se muestra la información detallada del experimento y sus resultados.

Cuadro No. 27. Información detallada del experimento Cubo-E01-XYZ

<b>I. Información General del Experimento</b>	
Nombre del experimento	Cubo-E01-XYZ
Objetivo técnico (alineado a norma ISO/ASTM 52902)	Evaluar el rendimiento geométrico de la MFA en el eje Z investigando la incidencia de los factores de posición en la plataforma de fabricación, la alineación del calibrador digital al momento de realizar la medición respecto a los tres ejes de la impresora, la alineación de la pieza respecto a los dos ejes horizontales, así como también que se establezca la relación entre la variable respuesta con la temperatura y humedad ambientales.
Normas ISO/ASTM aplicables (52900, 52901, etc.)	52902
Duración estimada del experimento: Diseño, generación de código G, impresión, postprocesado, toma y análisis de datos (d:hh:mm)	Diseño del objeto: 10 minutos Generación de código G: 1.5 horas Impresión: 5 horas Postprocesado: N/A Toma de datos: 3 horas Análisis de datos: 5 horas
Máquina de fabricación aditiva utilizada (marca, modelo, tecnología)	Máquina: Prusa i3 MK3S Marca: Prusa Modelo: i3 MK3S Tecnología: Extrusión de Material (MEX)
Responsable del proceso de fabricación aditiva	Cui Ting Zhong Xie
Responsable de metrología	Cui Ting Zhong Xie
Fecha de realización	30 de abril de 2025 a 5 de mayo de 2025
<b>II. Diseño de la Pieza</b>	
Nombre del archivo CAD (.STL, .3MF, etc.)	Cubo-E01-XYZ.stl

Tecnología de impresión (según ISO/ASTM 52900)	Extrusión de Material (MEX)
Dimensiones geométricas a medir (Valores nominales)	10 mm (X) x 10 mm (Y) x 10 mm (Z)
Tolerancias geométricas especificadas (ISO/ASTM 52920)	N/A
Características críticas de la geometría (Aquellas dimensiones, geometrías o zonas funcionales cuya precisión, tolerancia o integridad estructural son esenciales para que la pieza cumpla con su propósito técnico.)	Cubo cuyo tres lados iguales de 10 mm
Imagen o representación CAD con anotaciones	
	

Notas sobre diseño para fabricación aditiva (según ISO/ASTM 52910)	-
<b>III. Diseño Experimental</b>	
Tipo de diseño experimental (factorial, un solo factor, etc.)	Mixto y parcela dividida
Justificación técnica del diseño elegido	El diseño posee una variable aleatoria, tres variables fijas y una variable difícil de cambiar, por lo que cumple con la definición de ambos tipos de diseño de experimento.
Factores estudiados y niveles	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Factores controlables: <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Alineación (de la pieza respecto a los ejes de la impresora): X, Y</li> <li>○ Posición (en la cama de impresión): 1, 2, 3, 4, 5</li> <li>○ Medida (posición del instrumento de medición con respecto a los ejes de la impresora): medición X, medición Y, medición Z</li> </ul> </li> <li>● Factores covariados: <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Temperatura ambiente</li> <li>○ Humedad ambiental</li> </ul> </li> <li>● Factores difíciles de cambiar: <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Condición de medición: antes y después de arrancar</li> </ul> </li> </ul>
Variables de respuesta analizadas	Diferencia de la dimensión de los lados del cubo con respecto al valor nominal.
Cantidad de réplicas por configuración	3
<b>IV. Parámetros del Proceso de fabricación aditiva</b>	
Software de corte (slicing) utilizado y versión	PrusaSlicer Versión: 2.9.0
Nombre del archivo de configuración (.ini, .gcode)	Cubo-E01-XYZ.gcode (Hay 30 archivos)
Altura de capa (mm)	0,2
Diámetro de boquilla (mm)	0,4
Temperatura de extrusión (°C)	215
Temperatura de cama (°C)	60

Velocidad de impresión (mm/s)	45
Retracción (longitud, velocidad)	N/A
Número de perímetros (shells)	2
Patrón de relleno y densidad (%)	15 (Giroide)
Uso de soportes (tipo, configuración)	N/A
Ventilación (velocidad de ventiladores, activación)	N/A
Notas adicionales relevantes al control del proceso	-
<b>V. Proceso de Impresión</b>	
Condiciones ambientales (temperatura y humedad ambiente)	Temperatura: 28,66 °C Humedad: 51,05%
Tipo de superficie de impresión (PEI rugosa o lisa, utilización de cinta, etc.)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● PEI lisa</li> </ul>
Calibración previa	Sí (XYZ y Primera Capa)
Observaciones durante el proceso (ruidos, fallos, deformaciones)	N/A
Control de parámetros críticos durante la impresión	N/A
Identificación del lote de filamento y material (marca, material, diámetro)	Marca: Material: PLA Diámetro: 1,75 mm
Tiempo real de impresión (registro)	5 horas
<b>VI. Medición y Control Dimensional</b>	
Instrumentos utilizados (marca, modelo, resolución)	Calibrador digital Marca: Mitutoyo Modelo: Resolución: 0,01 mm
Fecha de calibración del equipo	Jueves, 10 de abril de 2025
Nombre del archivo de registro de datos (.xlsx, .csv)	Cubo-E01-XYZ.xlsx
Cantidad de operadores (para análisis R&R)	4: Jose Somohano, Cui Zhong, Julián Vegas, Bryan Torres

Metodología utilizada	Medición de dimensiones lineales de la pieza escogida mediante el uso de un calibrador digital (ISO/ASTM 52902).
Procedimiento de medición paso a paso	<p>Las mediciones se realizaron inmediatamente después de la finalización de la impresión, dentro de un periodo de 30 segundos a 1 minuto, con el objetivo de reducir la exposición del operador a temperaturas elevadas. El procedimiento seguido fue el siguiente:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Extracción de la Pieza: Una vez finalizado el proceso de impresión, la pieza fue cuidadosamente retirada de la cama de impresión utilizando una espátula, minimizando deformaciones o esfuerzos mecánicos adicionales.</li> <li>2. Acondicionamiento Inicial: La pieza fue colocada sobre una superficie estable, evitando contacto directo con corrientes de aire o fuentes de calor que pudieran alterar sus dimensiones.</li> <li>3. Posicionamiento del Vernier: Se identificaron los puntos de medición establecidos en el diseño experimental (aristas y caras específicas del cubo de referencia). El vernier digital se posicionó en la pieza considerando su alineación con los ejes X e Y de la impresora.</li> <li>4. Registro de Datos: Se realizaron múltiples mediciones en cada punto designado, registrando los valores obtenidos en una hoja de datos digital para posterior análisis. Se tomó especial cuidado en aplicar una presión constante sobre la pieza, evitando errores por variaciones en la fuerza aplicada durante la medición.</li> </ol>
<b>VII. Presentación y Análisis de Resultados</b>	

Descripción de datos: Estadísticas descriptivas (media, desviación estándar, etc.) y gráficos generados (boxplot, histogramas, interacción)

La media de la diferencia entre valor teórico y experimental es de 0,0567 mm, con una desviación de 0,0994 mm. Además, se realizó una gráfica de caja para investigar si existe una diferencia entre los ejes X, Y y Z para el calibrador digital, la cual es mostrada en la Figura No. 39, y los resultados muestran que no se percibe una diferencia importante entre colocar el calibrador digital alineado a cualquiera de los ejes.

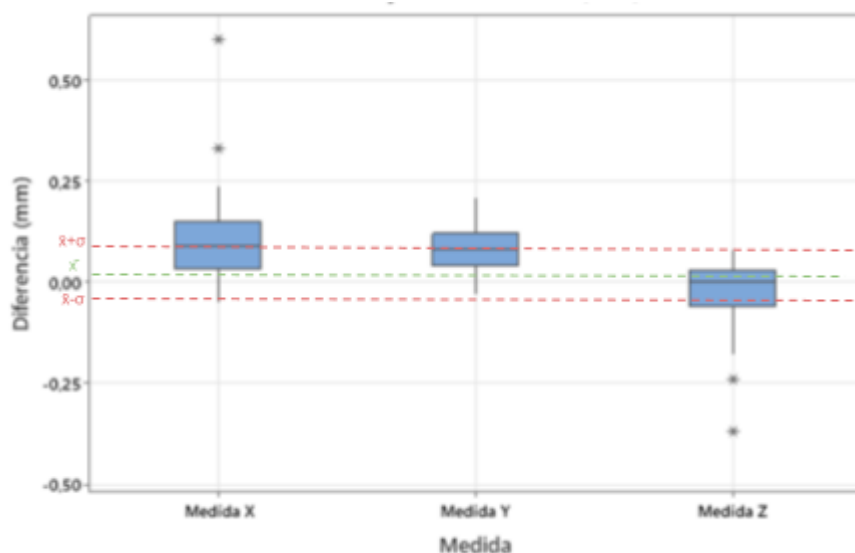


Figura No. 39. Gráfica de cajas de la diferencia entre el valor medido y el nominal según la alineación del calibrador respecto a los ejes de la MFA para el experimento Cubo-E01-XYZ.

Adicionalmente, en la Figura No. 40, se realizó una gráfica de cajas para establecer si existía diferencia entre las distintas posiciones escogidas, así como la condición de medición y los resultados muestran que no hay diferencia entre las medias de las posiciones, aunque sí de su dispersión. Por su parte, no se detecta diferencia entre las condiciones de medición, ya que se observa que el comportamiento entre antes y después de arrancar la pieza es similar.

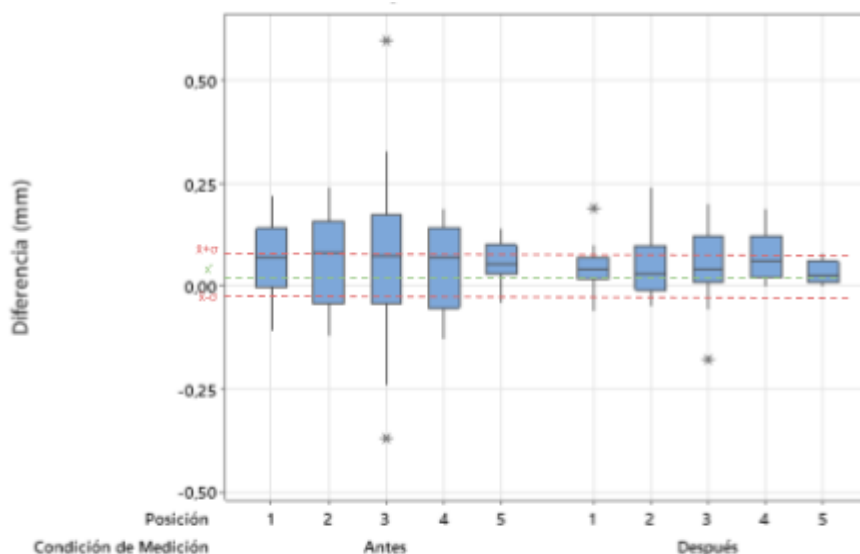


Figura No. 40. Gráfica de cajas de la diferencia entre el valor medido y el nominal según su posición en la plataforma de fabricación y su condición de medición para el experimento Cubo-E01-XYZ.

Además, se realizó una gráfica de dispersión, mostrada en la Figura No. 41, y se muestra que no hay una correlación clara entre la temperatura ambiente y la diferencia entre valor medido y nominal.

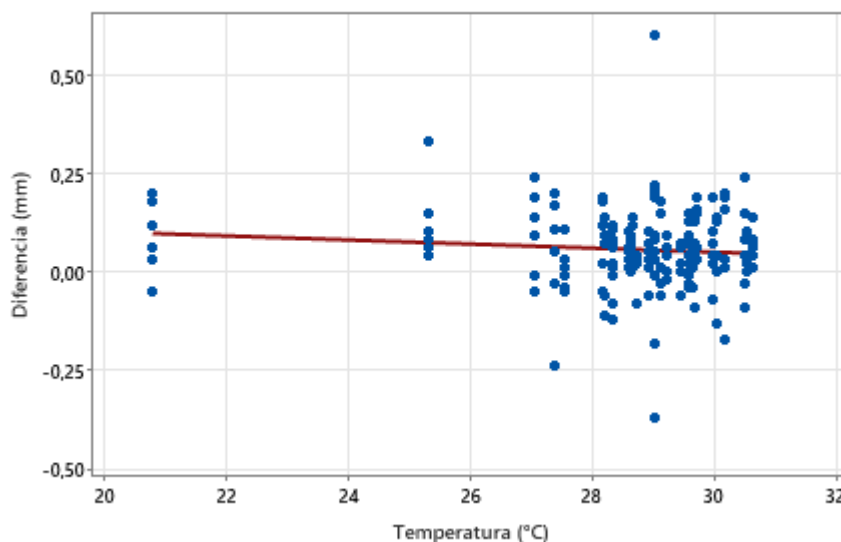


Figura No. 41. Gráfica de dispersión de la diferencia entre valor medido y nominal respecto a la temperatura ambiente para el experimento Cubo-E01-XYZ.

Adicionalmente, se realizó una gráfica de dispersión, mostrada en la Figura No. 42, y se muestra que no hay una correlación clara entre la temperatura ambiente y la diferencia entre valor medido y nominal.

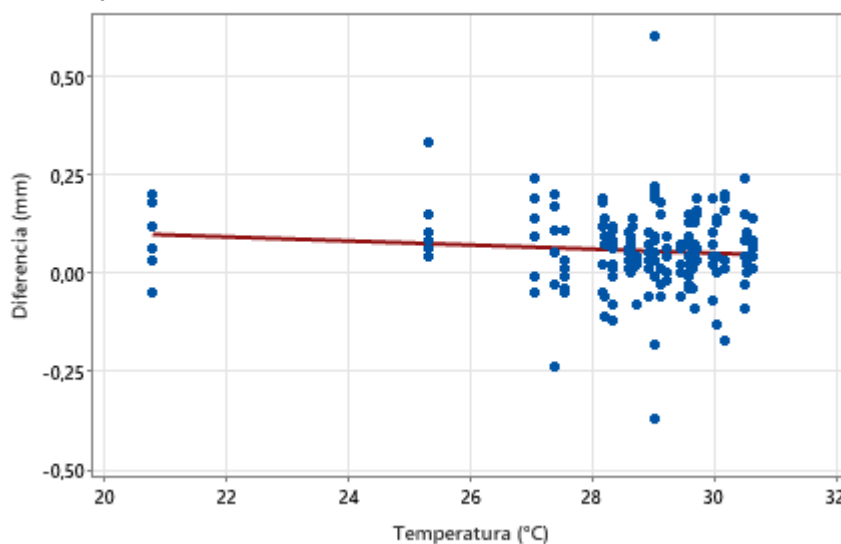


Figura No. 42. Gráfica de dispersión de la diferencia entre valor medido y nominal respecto a la temperatura ambiente para el experimento Cubo-E01-XYZ.

#### Resultados de pruebas R&R (Repetibilidad y Reproducibilidad)

Se realizó un estudio R&R cruzado con 4 operarios (Jose, Cui, Julián y Bryan), 10 piezas y 2 réplicas por pieza, para un total de 80 mediciones con un calibrador digital calibrado. El ANOVA mostró que tanto las piezas como los operarios aportan significativamente a la variación del sistema, aunque no hubo interacción significativa entre ellos. El porcentaje total de contribución del sistema de medición fue de 32,12%, superando el 30% recomendado, siendo la variación entre piezas el mayor contribuyente. Aunque todos los operarios midieron de forma similar, se seleccionó a Julián para continuar con las mediciones del experimento debido a que presentó la menor desviación estándar. Aunque Bryan tuvo menos puntos fuera de control en la gráfica de  $\bar{X}$ , su variación fue mayor según la gráfica R. Además, la prueba de Tukey confirmó que no hay diferencias significativas entre Bryan y Julián.

### Análisis de varianza (ANOVA)

El modelo inicial, mostrado en el Cuadro No. 28, incluyó todos los factores y sus interacciones, incluyendo una interacción cuádruple, que resultó no significativa (valor  $p > 0,05$ ). A partir de ahí, se depuró el modelo eliminando progresivamente las interacciones no significativas. El modelo final mostró que las interacciones dobles condición-medida y medida-posición son significativas, lo que implica que la diferencia entre el valor medido y el nominal no depende solo de un factor individualmente, sino de cómo interactúan entre sí.

Cuadro No. 28. Resultados del ANOVA del modelo inicial para el experimento Cubo-E01-XYZ.

Fuente	GL	SC	Ajust. MC	Ajust. Valor F	Valor p
Temperatura (°C)	1	0,01887	0,018870	3,73	0,056
Humedad (%)	1	0,00439	0,004390	0,87	0,353
Alineación	1	0,00217	0,002173	0,76	0,426 x
Posición	4	0,01068	0,002670	0,14	0,957 x
Condición de Medición	1	0,00953	0,009534	5,24	0,084
Medida	2	0,60255	0,301274	11,83	0,004
Alineación*Posición	4	0,01105	0,002762	0,42	0,790 x
Alineación*Condición de Medición	1	0,00235	0,002347	1,45	0,294
Alineación*Medida	2	0,01484	0,007422	0,92	0,439
Posición*Condición de Medición	4	0,00727	0,001819	0,93	0,622 x
Posición*Medida	8	0,20380	0,025475	3,02	0,087 x
Condición de Medición*Medida	2	0,16655	0,083274	25,04	0,000
Alineación*Posición*Condición de Medición	4	0,00646	0,001615	0,54	0,711
Alineación*Posición*Medida	8	0,06487	0,008109	2,72	0,090
Alineación*Condición de Medición*Medida	2	0,00477	0,002384	0,80	0,483
Posición*Condición de Medición*Medida	8	0,02660	0,003325	1,11	0,441
Alineación*Posición*Condición de Medición*Medida	8	0,02388	0,002985	0,59	0,784
Error	118	0,59640	0,005054		
Total	179	1,76877			

Además, se encontró que los efectos individuales de los factores también son significativos:

- **La condición de medición** afecta el resultado, ya que medir antes o después de arrancar la pieza influye en la diferencia.

**La medida según el eje de impresión** (X, Y o Z) tiene un impacto importante, siendo el eje Z el más preciso.

**La posición en la plataforma** no fue significativa, lo cual se confirmó con un componente de varianza negativo, que se asumió como cero, y un 0,00% de contribución.

En cuanto a la covariada de temperatura, aunque su valor p fue mayor a 0,05 (por lo tanto, estadísticamente no significativa), se decidió utilizar un nivel de significancia de 0,01, aceptando una mayor posibilidad de aceptar la hipótesis que los datos no son significativos cuando, en realidad, no lo son y se mantuvo en el modelo debido a evidencia observacional: durante la impresión, se notaron cambios en el acabado de las piezas con el aumento de temperatura, además de que durante el proceso de depurado, se observó que el factor de temperatura sí era significativo, pues su valor p era menor a 0,05. Esto sugiere una posible correlación práctica entre temperatura y precisión dimensional, por lo que se recomienda monitorear este factor durante el proceso de fabricación. Además, cabe destacar que la humedad no resultó significativa en el análisis de variaciones.

El modelo final, mostrado en el Cuadro No. 29, tiene una desviación estándar de 0,0688 mm, aceptable considerando la resolución del vernier (0,01 mm). Sin embargo, el índice de correlación ( $R^2$ ) fue de 56,91%, por debajo del 70% recomendado para una buena capacidad predictiva. Además, solo se puede predecir un 46,40% de los datos con este modelo. Esto indica que, aunque el modelo captura algunas relaciones importantes, hay otros factores no contemplados que podrían estar afectando las mediciones.

Cuadro No. 29. Resultados del ANOVA del modelo depurado para el experimento Cubo-E01-XYZ.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Temperatura (°C)	1	0,01625	0,016245	3,43	0,066
Condición de Medición	1	0,00953	0,009534	2,01	0,158
Medida	2	0,60255	0,301274	11,83	0,004
Posición	4	0,00798	0,001994	0,08	0,986 x
Condición de Medición*Medida	2	0,16655	0,083274	17,59	0,000
Medida*Posición	8	0,20380	0,025475	5,38	0,000
Error	161	0,76211	0,004734		
Total	179	1,76877			

*x No es una prueba F exacta.*

Por otro lado, la media de la diferencia entre el valor medido y el nominal fue de 0,057 mm, lo que implica que, en promedio, la impresora deposita 57  $\mu\text{m}$  de más por cada 10 mm diseñados. Este valor puede usarse como base para ajustes futuros en la impresora o en los diseños, para mejorar la precisión dimensional de las piezas.

Finalmente, se observó que las mediciones del eje Y son más consistentes, y las del eje X presentan mayor dispersión. El eje Z resultó el más preciso. La optimización del modelo indicó que la menor diferencia entre el valor medido y el nominal se obtiene midiendo después de arrancar la pieza, a una temperatura alta (30,2 °C), y alineando el vernier al eje Z.

Análisis de residuos (comprobación de hipótesis): Normalidad de residuos, homogeneidad de varianzas de los residuos e independencia de los residuos

En la Figura No. 43, se muestra la gráfica de los residuos del modelo depurado. La prueba de normalidad de la gráfica de probabilidad normal (superior izquierda) evidenció que los residuos no siguen una distribución normal, lo que puede introducir sesgo en el modelo. Sin embargo, la homogeneidad de varianzas (superior derecha) se cumple según el gráfico de dispersión, y la independencia de los residuos (inferior derecha) fue confirmada tanto visualmente como por la prueba de corridas, que mostró aleatoriedad en el orden de los datos.

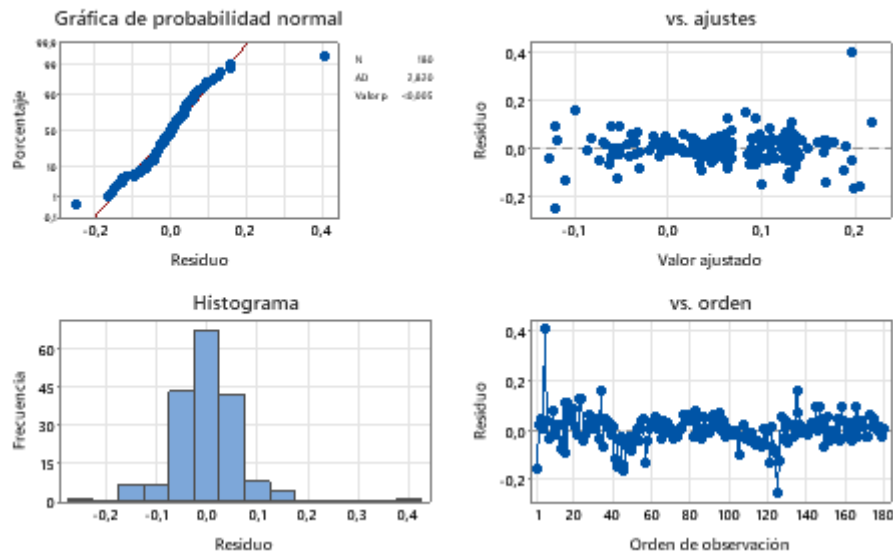


Figura No. 43. Gráficas de residuos del modelo ANOVA depurado para el experimento Cubo-E01-XYZ.

Discusión técnica de resultados frente a tolerancias y objetivos

En la Figura No. 44, se muestra los resultados de la optimización de la diferencia entre teoría y el experimento, y se evidencia que la mejor configuración es a una temperatura ambiental de 30,23 °C, después de haber arrancado la pieza y alineando el calibrador digital al eje Z, es decir, midiendo la altura del cubo, lo cual da una diferencia media de 0,00 mm (no hay diferencia).

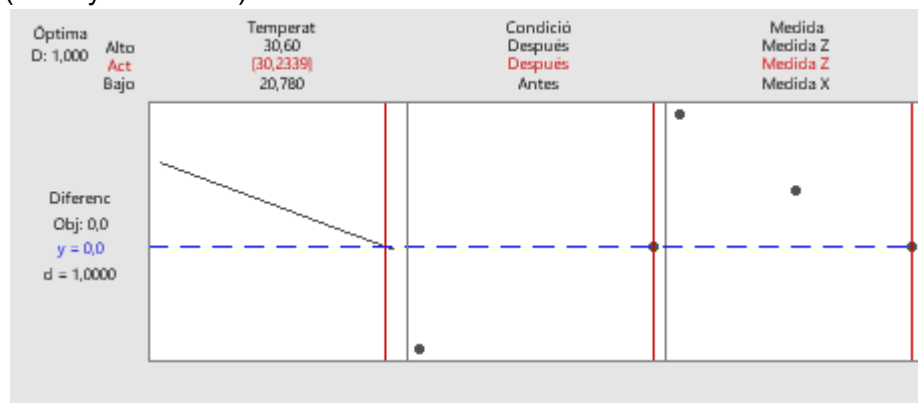


Figura No. 44. Gráfica de optimización de la diferencia entre el valor medido y nominal para los factores fijos del modelo depurado del experimento Cubo-E01-XYZ.

**Conclusión**

El experimento Cubo-E01-XYZ evaluó el rendimiento geométrico de la MFA en los tres ejes, utilizando cubos de 10 mm. Se analizaron factores como la alineación del calibrador, orientación de la pieza, temperatura y humedad. Excepto la posición en la plataforma, todos influyeron significativamente en la diferencia dimensional medida. Las piezas tendieron a ser ligeramente sobredimensionadas (media de +0,0567 mm), y el eje Z fue el más preciso. La mejor exactitud se logró midiendo en Z tras retirar la pieza, contradiciendo la recomendación normativa. Aunque hubo limitaciones estadísticas, el modelo explicó bien la variabilidad ( $R^2 = 84,87\%$ ) y destacó la influencia de múltiples factores sobre la precisión dimensional.

Normas referidas ISO/ASTM 52902, ISO 22514 (estadística industrial complementaria)

Nota: El experimento fue realizado por el grupo compuesto por los estudiantes Jose Somohano, Cui Zhong, Julián Vegas y Bryan Torres. Para más información, refiérase al documento elaborado por los estudiantes para su proyecto final del curso Diseño de Experimentos (Somohano Berrocal et al., 2025).

**5.2. Segundo experimento**

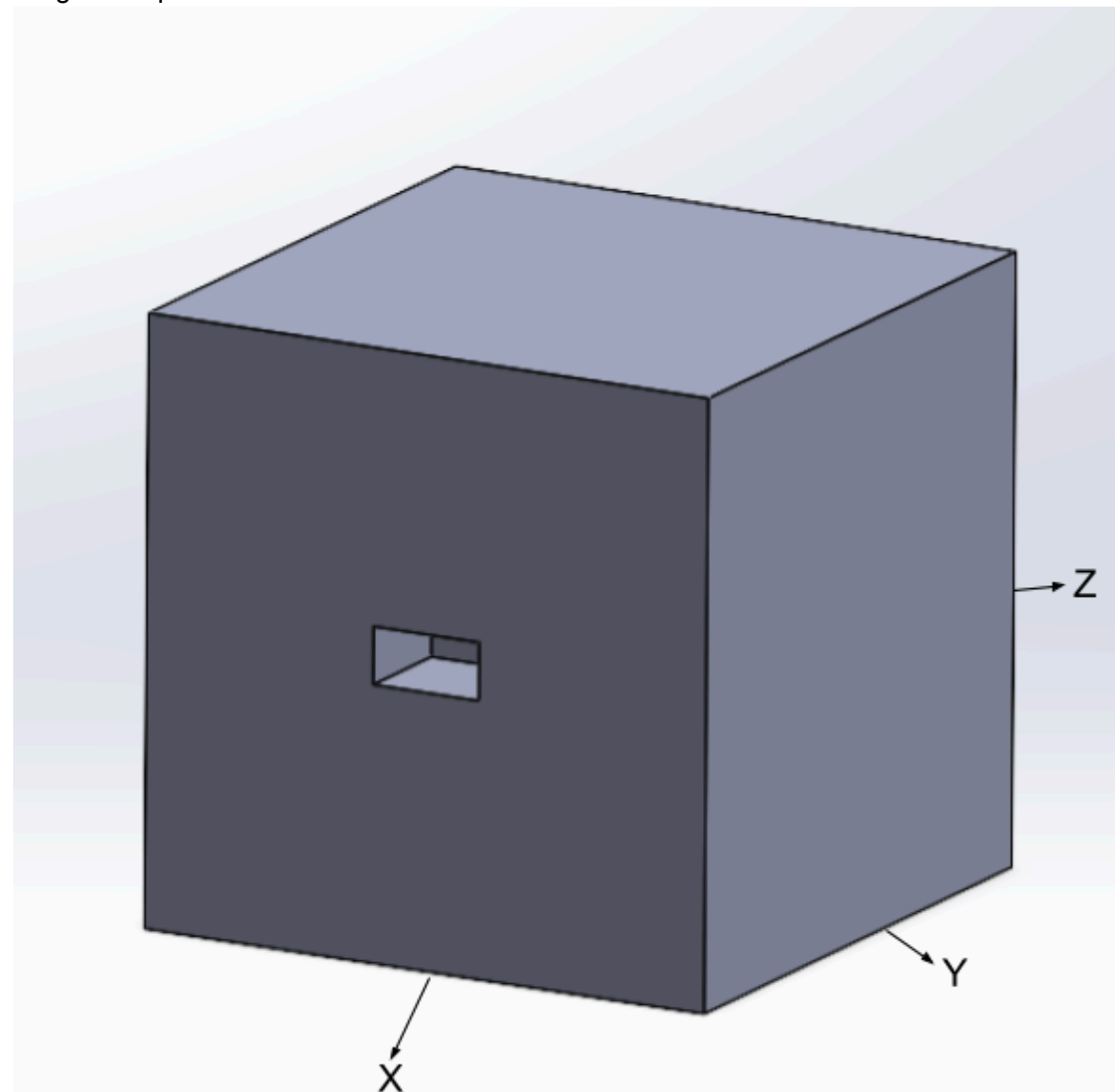
El experimento Cubo-E02-XYZ se desarrolló con el propósito de evaluar el rendimiento geométrico de la tecnología de fabricación aditiva mediante extrusión de material (MEX) en los tres ejes de la MFA. En concordancia con lo establecido por la norma ISO/ASTM 52902, el estudio se enfocó en analizar cómo influyen tres factores principales en la precisión dimensional de cubos fabricados mediante MFA: la alineación del calibrador digital respecto a los ejes X, Y y Z de la impresora al momento de la medición; el valor nominal de las piezas diseñadas (con dimensiones laterales entre 4,7 mm y 5,3 mm); y el ciclo de impresión correspondiente al lote de fabricación bajo condiciones repetidas. En el Cuadro No. 30, se muestra la información del experimento y sus resultados.

Cuadro No. 30. Información detallada del experimento Cubo-E02-XYZ

<b>I. Información General del Experimento</b>	
Nombre del experimento	Cubo-E02-XYZ

Objetivo técnico (alineado a norma ISO/ASTM 52902)	Evaluar el rendimiento geométrico de la MFA en el eje Z investigando la incidencia de los factores de la alineación del calibrador digital al momento de realizar la medición respecto a los tres ejes de la impresora, el valor nominal de la pieza fabricada y el ciclo de fabricación, tanto en la diferencia entre el valor medido y el valor nominal como la desviación del valor medido
Normas ISO/ASTM aplicables (52900, 52901, etc.)	52902
Duración estimada del experimento: Diseño, generación de código G, impresión, postprocesado, toma y análisis de datos (d:hh:mm)	Diseño del objeto: 10 minutos Generación de código G: 20 minutos Impresión: 3 horas Postprocesado: N/A Toma de datos: 5 horas Análisis de datos: 5 horas
Máquina de fabricación aditiva utilizada (marca, modelo, tecnología)	Máquina: Prusa i3 MK3S Marca: Prusa Modelo: i3 MK3S Tecnología: Extrusión de Material (MEX)
Responsable del proceso de fabricación aditiva	Fabián Garita Chacón
Responsable de metrología	Fabián Garita Chacón
Fecha de realización	Del jueves 1 al viernes 2 de mayo de 2025
<b>II. Diseño de la Pieza</b>	
Nombre del archivo CAD (.STL, .3MF, etc.)	Cubo-E02-XYZ.stl
Tecnología de impresión (según ISO/ASTM 52900)	Extrusión de Material (MEX)
Dimensiones geométricas a medir (Valores nominales)	Lados X, Y y Z, con valores entre [4,7 - 5,3; con salto de 0,1] mm
Tolerancias geométricas especificadas (ISO/ASTM 52920)	N/A
Características críticas de la geometría (Aquellas dimensiones, geometrías o zonas funcionales cuya precisión, tolerancia o integridad estructural son esenciales para que la pieza cumpla con su propósito técnico.)	Lados X, Y y Z, con valores entre [4,7 - 5,3; con salto de 0,1] mm

Imagen o representación CAD con anotaciones



Notas sobre diseño para fabricación aditiva  
(según ISO/ASTM 52910)

-

### III. Diseño Experimental

Tipo de diseño experimental (factorial, un solo factor, etc.)

Factorial de parcelas divididas con estudio de estabilidad de proceso

Justificación técnica del diseño elegido

Permite estudiar el efecto de los factores de eje de medición, ciclo de impresión y valor nominal asignado a cada pieza, tanto por separado como en conjunto

Factores estudiados y niveles	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Eje de medición: Eje de la MFA en el cual se alinea el calibrador digital para tomar la medición. <ol style="list-style-type: none"> <li>a. X</li> <li>b. Y</li> <li>c. Z</li> </ol> </li> <li>2. Ciclo de impresión (difícil de variar): Lote de piezas fabricado bajo unas mismas condiciones de fabricación. <ol style="list-style-type: none"> <li>a. 1</li> <li>b. 2</li> <li>c. 3</li> <li>d. 4</li> <li>e. 5</li> </ol> </li> <li>3. Valor nominal: Valor de diseño de los lados del cubo fabricado. <ol style="list-style-type: none"> <li>a. 4,7 mm</li> <li>b. 4,8 mm</li> <li>c. 4,9 mm</li> <li>d. 5,0 mm</li> <li>e. 5,1 mm</li> <li>f. 5,2 mm</li> <li>g. 5,3 mm</li> </ol> </li> </ol>
Variables de respuesta analizadas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diferencia entre valor medido y nominal del lado del cubo</li> <li>• Diferencia entre valor valor medido y objetivo (5 mm) del lado del cubo</li> </ul>
Cantidad de réplicas por configuración	5
<b>IV. Parámetros del Proceso de fabricación aditiva</b>	
Software de corte (slicing) utilizado y versión	PrusaSlicer Versión: 2.9.0
Nombre del archivo de configuración (.ini, .gcode)	Cubo-E02-XYZ.gcode
Altura de capa (mm)	0,2
Diámetro de boquilla (mm)	0,4
Temperatura de extrusión (°C)	215
Temperatura de cama (°C)	60
Velocidad de impresión (mm/s)	45
Retracción (longitud, velocidad)	N/A
Número de perímetros (shells)	2

Patrón de relleno y densidad (%)	15 (Giroide)
Uso de soportes (tipo, configuración)	N/A
Ventilación (velocidad de ventiladores, activación)	N/A
Notas adicionales relevantes al control del proceso	-
<b>V. Proceso de Impresión</b>	
Condiciones ambientales (temperatura y humedad ambiente)	No se midió
Tipo de superficie de impresión (PEI rugosa o lisa, utilización de cinta, etc.)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● PEI lisa</li> </ul>
Calibración previa	Sí (XYZ y Primera Capa)
Observaciones durante el proceso (ruidos, fallos, deformaciones)	N/A
Control de parámetros críticos durante la impresión	N/A
Identificación del lote de filamento y material (marca, material, diámetro)	Marca: Material: PLA Diámetro: 1,75 mm
Tiempo real de impresión (registro)	11 minutos
<b>VI. Medición y Control Dimensional</b>	
Instrumentos utilizados (marca, modelo, resolución)	Calibrador digital Marca: Mitutoyo Modelo: Resolución: 0,01 mm
Fecha de calibración del equipo	Jueves, 10 de abril de 2025
Nombre del archivo de registro de datos (.xlsx, .csv)	Cubo-E02-XYZ
Cantidad de operadores (para análisis R&R)	2: Fabián Garita y Cui Zhong
Metodología utilizada	Medición de dimensiones lineales de la pieza escogida mediante el uso de un calibrador digital (ISO/ASTM 52902).

<p>Procedimiento de medición paso a paso</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Extracción de la Pieza: Una vez finalizado el proceso de impresión, la pieza fue cuidadosamente retirada de la cama de impresión utilizando una espátula, minimizando deformaciones o esfuerzos mecánicos adicionales.</li> <li>2. Acondicionamiento Inicial: La pieza fue colocada sobre una superficie estable, evitando contacto directo con corrientes de aire o fuentes de calor que pudieran alterar sus dimensiones.</li> <li>3. Posicionamiento del Vernier: Se identificaron los puntos de medición establecidos en el diseño experimental (aristas y caras específicas del cubo de referencia). El vernier digital se posicionó en la pieza considerando su alineación con los ejes X e Y de la impresora.</li> <li>4. Registro de Datos: Se realizaron múltiples mediciones en cada punto designado, registrando los valores obtenidos en una hoja de datos digital para posterior análisis. Se tomó especial cuidado en aplicar una presión constante sobre la pieza, evitando errores por variaciones en la fuerza aplicada durante la medición.</li> </ol>
<p><b>VII. Presentación y Análisis de Resultados</b></p>	

Descripción de datos: Estadísticas descriptivas (media, desviación estándar, etc.) y gráficos generados (boxplot, histogramas, interacción)

Para el caso de la diferencia entre el valor medido y el valor nominal, la media es de 0,193 mm, con una desviación de 0,0898 mm, mientras que para la desviación del objetivo la media es de 0,193 mm, con una desviación 0,0102 mm. Se realizó una gráfica de cajas para analizar la diferencia entre valor medido y nominal según el ciclo de impresión, mostrada en la Figura No. 45, y los resultados muestran que la diferencia no es mayor entre ciclos, tanto para su mediana como para su rango.

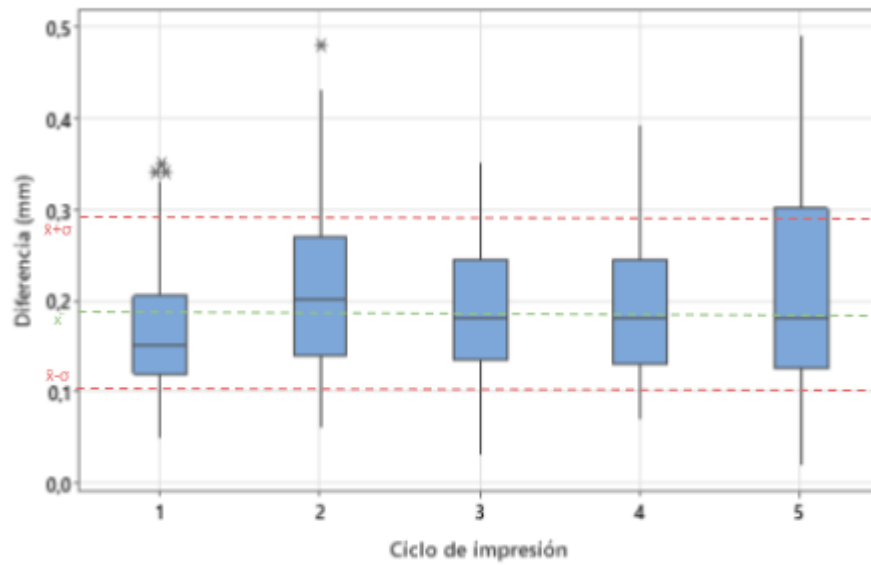


Figura No. 45. Gráfica de cajas de la diferencia entre valor medido y nominal según el ciclo de impresión para el experimento Cubo-E02-XYZ.

Se realizó una gráfica de cajas para analizar la diferencia entre valor medido y objetivo según el ciclo de impresión, mostrada en la Figura No. 46, y los resultados muestran que la diferencia no es mayor entre ciclos, tanto para su mediana como para su rango.

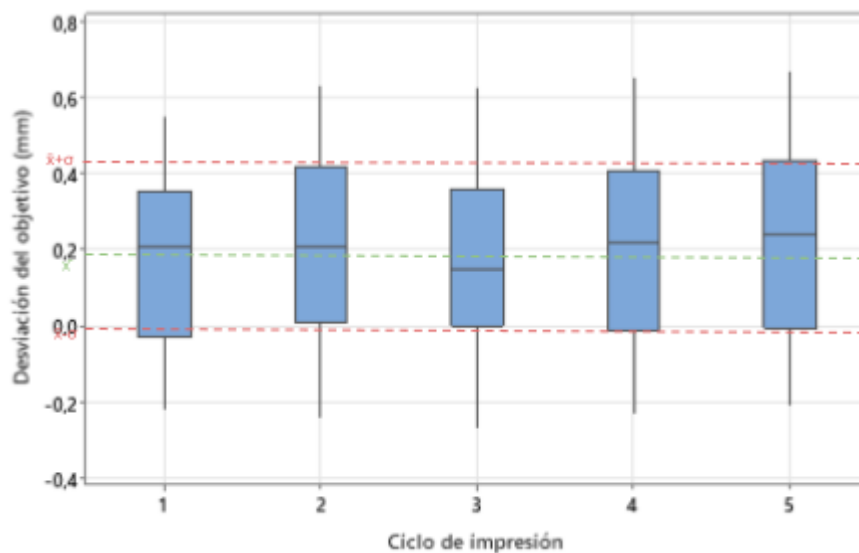


Figura No. 46. Gráfica de cajas de la diferencia entre valor medido y objetivo según el ciclo de impresión para el experimento Cubo-E02-XYZ.

Se realizó una gráfica de cajas para analizar la diferencia entre valor medido y nominal según el valor nominal del cubo, mostrada en la Figura No. 47, y los resultados muestran que la diferencia es distinta en mediana y rango para los valores nominales de 4,7 mm, 4,8 mm y 5,0 mm en comparación a los demás valores nominales.

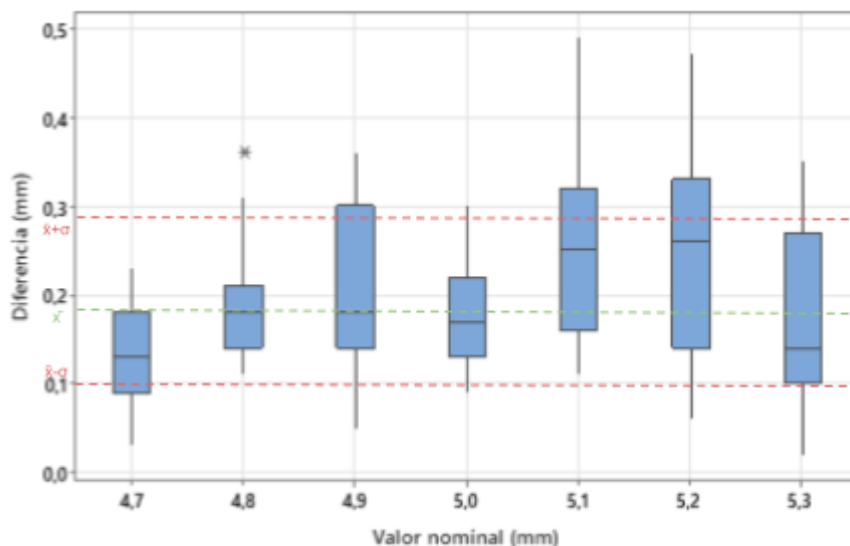


Figura No. 47. Gráfica de cajas de la diferencia entre valor medido y nominal según el valor nominal para el experimento Cubo-E02-XYZ.

Se realizó una gráfica de cajas para analizar la diferencia entre valor medido y objetivo según el valor nominal del cubo, mostrada en la Figura No. 48, y los resultados muestran que la diferencia es creciente en mediana, siendo el valor nominal de 4,8 mm el más cercano al objetivo (0,0 mm).

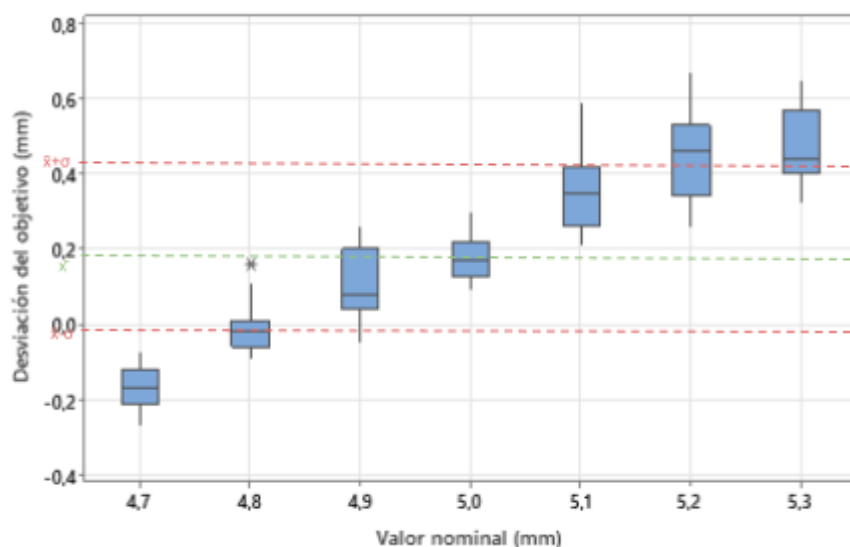


Figura No. 48. Gráfica de cajas de la diferencia entre valor medido y objetivo según el valor nominal para el experimento Cubo-E02-XYZ.

Se realizó una gráfica de cajas para analizar la diferencia entre valor medido y nominal según el eje de medición, mostrada en la Figura No. 49, y los resultados muestran que la diferencia no es mayor entre los ejes en mediana, pero para el rango el eje Y es menos variable.

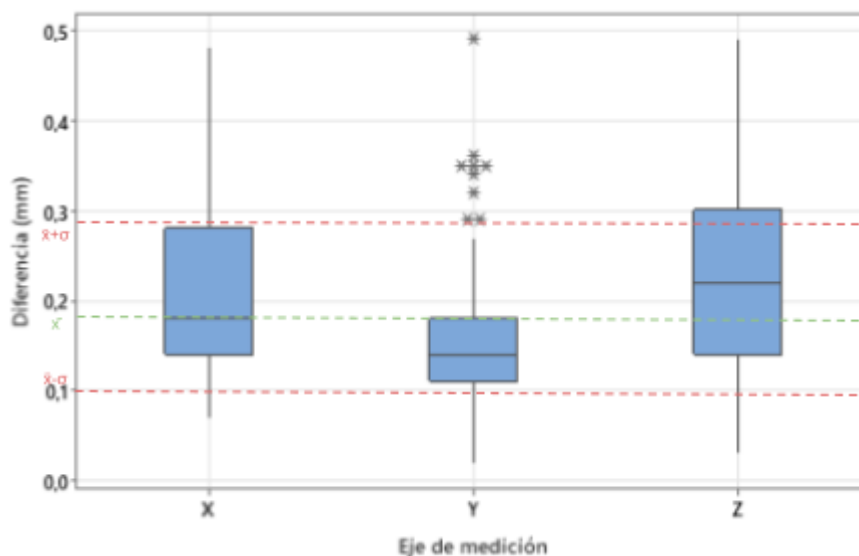


Figura No. 49. Gráfica de cajas de la diferencia entre valor medido y nominal según el eje de medición para el experimento Cubo-E02-XYZ.

Se realizó una gráfica de cajas para analizar la diferencia entre valor medido y objetivo según el ciclo de impresión, mostrada en la Figura No. 50, y los resultados muestran que la diferencia no es mayor entre ejes, tanto para su media como para su desviación.

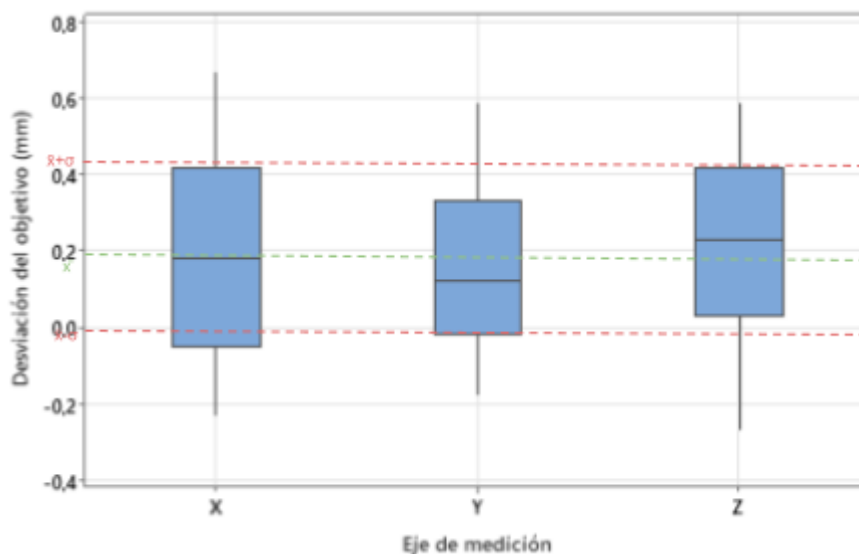


Figura No. 50. Gráfica de cajas de la diferencia entre valor medido y objetivo según el eje de medición para el experimento Cubo-E02-XYZ.

#### Resultados del estudio R&R (Repetibilidad y Reproducibilidad)

El análisis estadístico (ANOVA) mostró que hay diferencias importantes tanto entre las piezas medidas como entre los operarios. Específicamente:

- La variación entre piezas fue significativa (valor  $p = 0,03$ ), lo que indica que sí existen diferencias reales entre las dimensiones de las piezas.
- La variación entre operarios también fue significativa (valor  $p < 0,001$ ), lo que significa que cada persona mide de forma distinta.
- Sin embargo, la interacción entre pieza y operario no fue significativa (valor  $p = 0,42$ ), lo que sugiere que todos los operarios miden las piezas de manera consistente: una pieza no se ve afectada de forma diferente dependiendo de quién la mida.

Además, se notó una tendencia clara: Fabián tiende a medir valores más bajos que Cui de forma constante. En cuanto a las causas de variación total:

- El instrumento de medición contribuye con un 27,69%.
- La diferencia entre operarios representa un 60,21%.

Esto da un total mayor al 30% recomendado, lo que indica que el sistema de medición no es confiable en su estado actual.

Aunque se calibró el instrumento correctamente, se sospecha que parte del error proviene de la falta de experiencia de los operarios al usar el equipo. Por esta razón, se decidió fijar tanto el instrumento como el operario para las próximas mediciones, con el fin de reducir la variabilidad y obtener resultados más precisos. Para un análisis más detallado, referirse a la sección 2. Estudio del Sistema de medición, subsección 2.4. Cuarta iteración.

### Análisis de varianza (ANOVA)

El ANOVA realizado, el cual se muestra en el Cuadro No. 31, expone que para la diferencia entre valor medido y nominal todos los factores y sus posibles interacciones son significativas, por lo que se debe considerar a todos en el análisis.

Cuadro No. 31. Resultados del ANOVA realizado para la diferencia entre valor medido y nominal para el experimento Cubo-E02-XYZ.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Eje de medición	2	0,3656	0,182822	196,60	0,000
Ciclo de impresión	4	0,1419	0,035466	38,14	0,000
Valor nominal (mm)	6	0,8143	0,135718	145,95	0,000
Eje de medición*Ciclo de impresión	8	0,3885	0,048567	52,23	0,000
Eje de medición*Valor nominal (mm)	12	1,2061	0,100505	108,08	0,000
Ciclo de impresión*Valor nominal (mm)	24	0,2157	0,008989	9,67	0,000
Eje de medición*Ciclo de impresión*Valor nominal (mm)	48	0,7020	0,014625	15,73	0,000
Error	420	0,3906	0,000930		
Total	524	4,2247			

Además, se realizó una prueba de comparaciones de Tukey para la diferencia entre valor medido y objetivo en cada uno de los tres factores y se mostró que para el eje de medición los tres niveles (X, Y y Z) presentan medias significativamente distintas entre sí, siendo el eje Y el más cercano al objetivo (0,0 mm). Por su parte, en el ciclo de impresión hay tres grupos: el de los ciclos 2 y 5, el de 3 y 4 y el del primer ciclo. Finalmente, para el valor nominal, se mostró que existen 6 grupos: Uno para cada valor nominal, exceptuando 4,8 mm y 5,0 mm, que comparten un mismo grupo. Lo anterior se verificó realizando gráficas de control, las cuales son mostradas en los apéndices 13-16, para cada eje de medición y para cada tamaño nominal del cubo, utilizando cada ciclo de impresión como un subgrupo diferente, y los resultados determinan que, en las gráficas de promedio de los datos, existen 19 configuraciones de las 21 posibles (7 valores nominales × 3 ejes de medición) que poseen uno o más valores por fuera de los límites de control, mientras que para el rango de los datos, la cantidad de configuraciones fuera de control es de 11 de 21, lo cual aunque menor, sigue siendo significativa, evidenciando que no hay un control por parte del sistema de FA de todos los parámetros que controlan el proceso de fabricación. Sin embargo, cabe destacar que cada gráfico cuenta sólo con cinco subgrupos, por lo que el análisis de los resultados de estos gráficos puede estar sesgado por la poca representatividad de los mismos.

Por otra parte, el ANOVA realizado, el cual se muestra en el Cuadro No. 32, expone que para la diferencia entre valor medido y objetivo todos los factores y sus posibles interacciones son significativas, por lo que se debe considerar a todos en el análisis.

Cuadro No. 32. Resultados del ANOVA realizado para la diferencia entre valor medido y objetivo para el experimento Cubo-E02-XYZ.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Eje de medición	2	0,3656	0,18282	196,60	0,000
Ciclo de impresión	4	0,1419	0,03547	38,14	0,000
Valor nominal (mm)	6	25,5563	4,25938	4580,45	0,000
Eje de medición*Ciclo de impresión	8	0,3885	0,04857	52,23	0,000
Eje de medición*Valor nominal (mm)	12	1,2061	0,10050	108,08	0,000
Ciclo de impresión*Valor nominal (mm)	24	0,2157	0,00899	9,67	0,000
Eje de medición*Ciclo de impresión*Valor nominal (mm)	48	0,7020	0,01463	15,73	0,000
Error	420	0,3906	0,00093		
Total	524	28,9667			

Adicionalmente, se realizó una prueba de comparaciones de Tukey para la diferencia entre valor medido y objetivo en cada uno de los tres factores y se mostró que para el eje de medición los tres niveles (X, Y y Z) presentan medias significativamente distintas entre sí, siendo el eje Y el más cercano al objetivo (0,0 mm). Por su parte, en el ciclo de impresión hay tres grupos: el de los ciclos 2 y 5, el de 3 y 4 y el del primer ciclo. Finalmente, para el valor nominal, se mostró que existen 7 grupos, uno para cada valor nominal.

Análisis de residuos (comprobación de hipótesis): Normalidad de residuos, homogeneidad de varianzas de los residuos e independencia de los residuos

En la Figura No. 51, se muestra la gráfica de los residuos del modelo para la diferencia entre el valor medido y nominal. La prueba de normalidad de la gráfica de probabilidad normal (superior izquierda) evidenció que los residuos no siguen una distribución normal, lo que puede introducir sesgo en el modelo. Sin embargo, la gráfica de variaciones (superior derecha) mostró que la homogeneidad de varianzas se cumple según el gráfico de dispersión, y la gráfica de orden de corridas mostró (inferior derecha) mostró aleatoriedad en el orden de los datos.

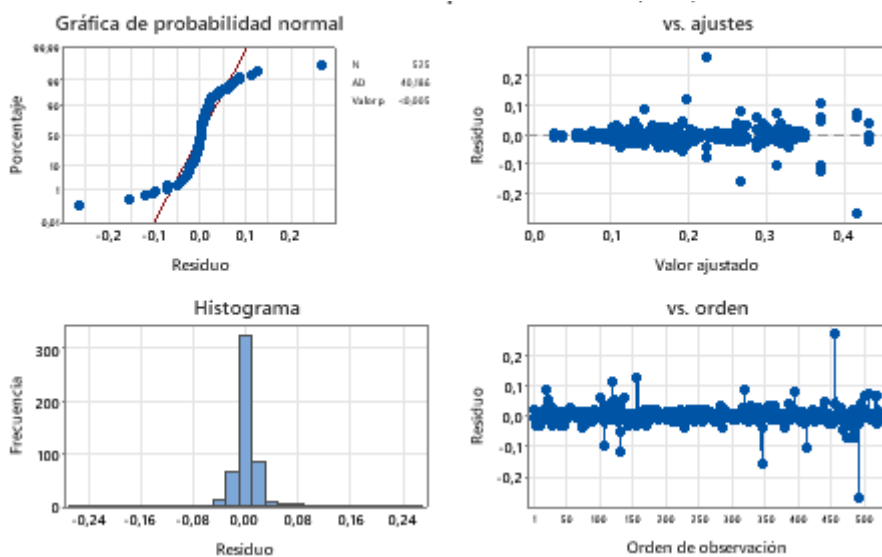


Figura No. 51. Gráficas de residuos del modelo ANOVA para la diferencia entre el valor medido y el nominal para el experimento Cubo-E02-XYZ.

En la Figura No. 52, se muestra la gráfica de los residuos del modelo para la diferencia entre el valor medido y el objetivo. La prueba de normalidad de la gráfica de probabilidad normal (superior izquierda) evidenció que los residuos no siguen una distribución normal, lo que puede introducir sesgo en el modelo. Sin embargo, la gráfica de variaciones (superior derecha) mostró que la homogeneidad de varianzas se cumple según el gráfico de dispersión, y la gráfica de orden de corridas mostró (inferior derecha) mostró aleatoriedad en el orden de los datos.

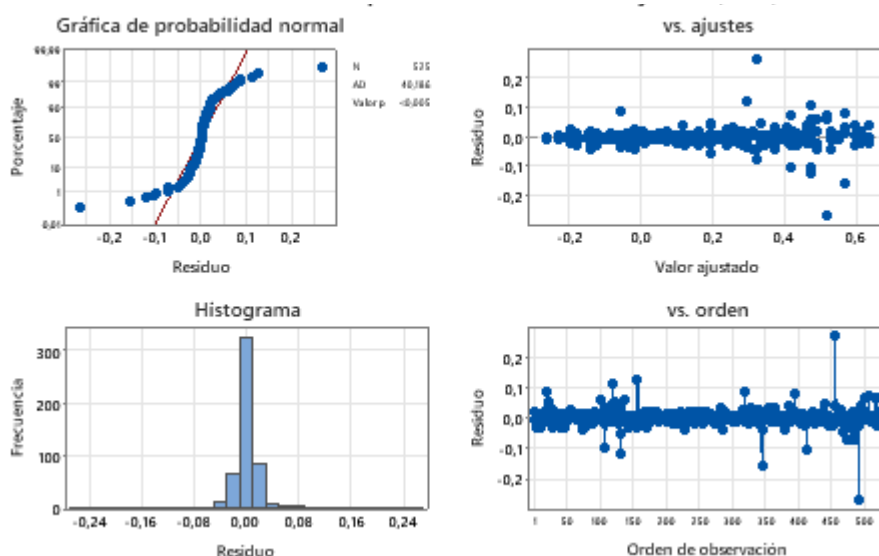


Figura No. 52. Gráficas de residuos del modelo ANOVA para la diferencia entre el valor medido y el objetivo para el experimento Cubo-E01-XYZ.

A fin de explorar si la no normalidad de los datos es debida a los datos en sí mismos, o si es debida a observaciones poco comunes, se decidió sustraer datos del análisis ANOVA, uno por uno, a fin de evaluar si quitando el valor con el residuo más grande, se lograba la normalidad. En total, se eliminaron 16 datos para intentar lograr la normalidad de los residuos del modelo depurado. Sin embargo, no se logró la normalidad de los datos, para ninguna de las tres pruebas de normalidad (Anderson-Darling, Ryan-Joiner y Kolmogorov-Smirnov), por lo que se concluye que existe un sesgo importante debido al incumplimiento de este supuesto. Sin embargo, dado que se trabaja con 525 datos, la prueba ANOVA se considera robusta ante las desviaciones del supuesto de normalidad, ya que los tamaños muestrales son suficientemente grandes (mayores a 30 datos), en virtud del Teorema del Límite Central (Gutiérrez Pulido & De la Vara, 2012).

### Discusión técnica de resultados frente a tolerancias y objetivos

En la Figura No. 53, se muestra la gráfica de optimización, que exhibe que la mejor configuración de factores para la diferencia del valor medido respecto al nominal es cuando se alinea el calibrador digital al eje Y, con las condiciones de fabricación del ciclo 5 y con un cubo de 5,3 mm de lado nominal, lo cual da como resultado una diferencia media de 0,026 mm con un índice de deseabilidad de 0,987.

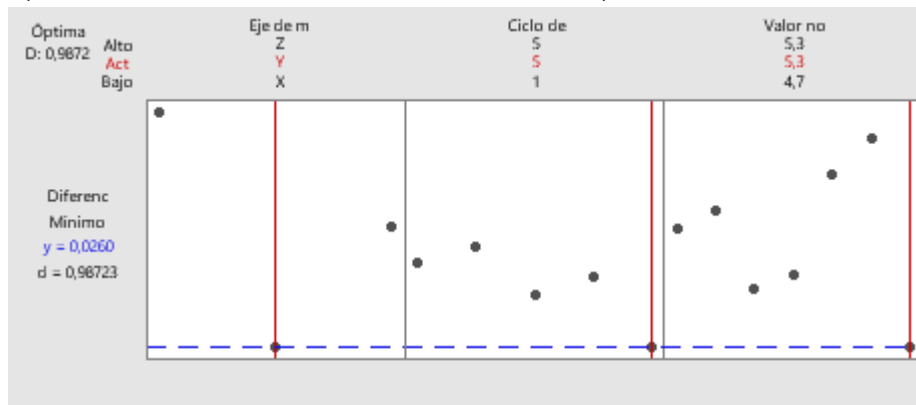


Figura No. 53. Gráfica de optimización de la diferencia entre valor medido y nominal para el experimento Cubo-E02-XYZ.

En la Figura No. 54, se muestra la gráfica de optimización, que exhibe que la mejor configuración de factores para la diferencia del valor medido respecto al objetivo (5 mm) es cuando se alinea el calibrador digital al eje Z, con las condiciones de fabricación del ciclo 4 y con un cubo de 4,8 mm de lado nominal, lo cual da como resultado una desviación media de 0,002 mm con un índice de deseabilidad de 0,997.

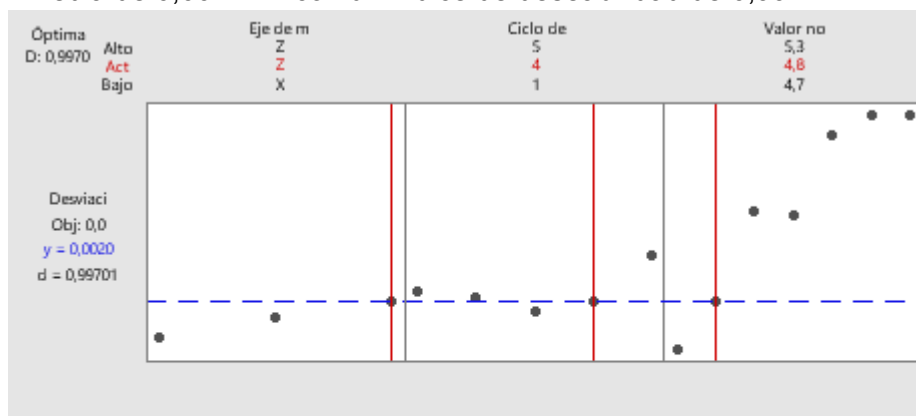


Figura No. 54. Gráfica de optimización de la diferencia entre valor medido y objetivo para el experimento Cubo-E02-XYZ.

### Conclusión

El experimento Cubo-E02-XYZ evaluó el rendimiento geométrico de la MFA en los tres ejes (X, Y, Z), conforme a la norma ISO/ASTM 52902, utilizando cubos de aproximadamente 5 mm. Se analizó el impacto de la alineación del calibrador, el valor nominal de la pieza y el ciclo de fabricación. Todos los factores y sus interacciones fueron estadísticamente significativos, mostrando que la precisión dimensional depende de una compleja combinación de variables. El eje Y fue el más preciso, y se detectaron mayores errores en piezas menores a 5 mm. La mejor exactitud (diferencia de solo 0,002 mm) se logró midiendo en Z, con piezas de 4,8 mm del ciclo 4. Aunque hubo limitaciones estadísticas, el experimento confirmó que una combinación óptima de parámetros mejora la precisión en manufactura aditiva.

Normas referidas ISO/ASTM 52902, ISO 22514 (estadística industrial complementaria)
--

Al comparar el primer y último experimento, se observó una mejora significativa en la precisión de las piezas, atribuible al avance en la curva de aprendizaje y la optimización de parámetros operativos. Esta mejora se evidencia en la reducción de la desviación estándar de 0,27 mm en el primer experimento a 0,0898 mm en el último. No obstante, se identificó una disminución en la exactitud, con un incremento en el sesgo de la media desde 0,15 mm a 0,193 mm, lo cual se asocia principalmente al aumento en el tamaño de las piezas evaluadas. En efecto, se comprobó que la incertidumbre total (tipo A + tipo B) crece proporcionalmente con la dimensión del objeto, pasando de 0,1 mm para una dimensión de 5 mm a 0,2 mm para una de 10 mm, lo que sugiere que las desviaciones sistemáticas se intensifican con el volumen impreso.

### **C. Declaración del problema**

Se detectó que si bien la mayoría de variables de proceso no son comunes entre los distintos tipos de tecnologías, sí lo son las cuatro etapas de fabricación, por lo que se puede determinar un proceso genérico de identificación de variables significativas para cada una de estas etapas. Así, se ha enfocado el estudio en MEX y se han identificado 29 variables que pueden ser modificadas, según la literatura, en una MFA de esta tecnología, las cuales deben ser evaluadas a fin de establecer cuáles realmente afectan la precisión dimensional de la máquina. Sin embargo, se notó que la evaluación de estos factores aún no podía comenzar, pues el sistema de medición establecido no es lo suficientemente preciso y confiable para que la variabilidad de las mediciones tomadas sea mayoritariamente debida a las piezas fabricadas, efectuando así una incertidumbre que no permitirá distinguir entre los cambios que pueda generar las variaciones de un factor, lo cual es debido a que el calibrador utilizado no es confiable y que los operarios no cuentan con un procedimiento estandarizado para la medición. Lo anterior afecta negativamente la reputación del laboratorio y sus costos de operación, pues habrán reprocesos debidos a la fabricación una y otra vez de nuevas piezas que busquen cumplir con las especificaciones de los clientes, de los cuáles no se podrá tener control, ya que las mediciones no serán confiables, por lo que no será hasta que el cliente devuelva la pieza que se sabrá que la misma tuvo una inconformidad respecto a lo solicitado. Por tanto, resulta imperativo establecer más acciones de corrección en el instrumento y en los operarios para que disminuyan su variabilidad y se

logren mediciones confiables que permitan determinar con precisión la incidencia que pueden llegar a tener los factores estudiados en la literatura.

Por otra parte, a pesar de que los sistemas modernos permiten un alto grado de repetibilidad en condiciones ideales, los experimentos realizados evidencian que factores aparentemente menores —como la orientación del instrumento de medición, el valor nominal de la pieza, el ciclo de fabricación y el eje de alineación— pueden incidir significativamente en la diferencia entre los valores nominales y medidos, tanto en media como en dispersión. En los experimentos con cubos patrón (Cubo-E01-XYZ y Cubo-E02-XYZ), se detectaron variaciones sistemáticas en la medición dependiendo del eje de alineación del calibrador digital. Por ejemplo, en el experimento Cubo-E01-XYZ se observó que el eje Z tiende a ser más preciso que los ejes X e Y, mientras que en Cubo-E02-XYZ el eje Y mostró menor dispersión, sugiriendo que la elección del eje de medición no es neutra y afecta directamente la precisión del sistema de metrología.

Asimismo, se evidenció que el valor nominal del diseño influye en el resultado medido, especialmente para piezas pequeñas (por debajo de 5 mm), donde la diferencia entre el valor real y el teórico se agrava, posiblemente por efectos como el sobre extrusionado o el aplastamiento de la primera capa. A esto se suman factores operacionales como el ciclo de impresión, que introducen variabilidad incluso cuando se replican los mismos parámetros de corte, sugiriendo una falta de control estadístico del proceso de fabricación.

En conclusión, no existe un sistema de medición confiable ni un procedimiento estandarizado para evaluar con precisión la influencia de variables de proceso en la fabricación aditiva por MEX, lo que genera incertidumbre en la medición, limita el análisis estadístico de los factores críticos y afecta la capacidad del laboratorio para garantizar piezas conformes a especificaciones.

## **V. SOLUCIONES AL PROBLEMA PLANTEADO**

Con base en los hallazgos obtenidos durante el diagnóstico de la situación actual, se identificaron múltiples factores que inciden de forma significativa en la precisión dimensional de las piezas fabricadas mediante la tecnología de extrusión de material. La ausencia de metodologías estandarizadas, la variabilidad ambiental no controlada, la limitada capacidad del sistema de medición y la dispersión en los resultados experimentales evidenciaron la necesidad de implementar soluciones técnicas y metodológicas integrales. En esta sección se presentan las propuestas desarrolladas para abordar estos desafíos: desde la definición de un procedimiento sistemático de planificación para asegurar la calidad dimensional, hasta el diseño e implementación de una cámara de fabricación con monitoreo ambiental y un plan de capacitación para mejorar la precisión de las mediciones. Estas soluciones buscan no solo atender las limitaciones detectadas, sino también establecer un marco replicable que permita elevar la confiabilidad y el desempeño del proceso de fabricación aditiva en contextos académicos e industriales.

### **A. Propuesta de proceso para la planificación de la estrategia de elaboración de una pieza**

Los resultados obtenidos en los experimentos realizados revelan que la tecnología de fabricación aditiva por extrusión de material (MEX) presenta una sensibilidad considerable a factores relacionados con el diseño de la pieza, la configuración del proceso y las condiciones de operación, lo que limita la precisión geométrica de los productos fabricados. A partir de este diagnóstico, se propondrá un procedimiento generalizado para la reducción de la variabilidad dimensional al momento de elaborar una pieza mediante FA, fundamentada en principios de control estadístico del proceso, diseño para manufactura aditiva y lineamientos normativos establecidos en ISO/ASTM 52902 y ISO/ASTM 52910. Para este fin, se resumirá primero las principales consideraciones a tener en cuenta para la confección de una pieza:

#### **1. Resumen de aspectos a considerar para el aseguramiento de la precisión dimensional en FA**

##### **1.1. Monitoreo de condiciones ambientales durante la impresión**

Aunque no fue objeto de análisis principal en el experimento Cubo-E01-XYZ, estudios anteriores y observaciones empíricas durante la impresión sugieren que las condiciones ambientales pueden impactar la calidad final de la pieza. Por tanto, se propone la

implementación de un sistema básico de monitoreo ambiental, mediante sensores de temperatura y humedad que permitan registrar condiciones durante cada ciclo de fabricación. Esta información permitirá establecer correlaciones futuras entre variables ambientales y desviaciones geométricas, contribuyendo así al control estadístico del proceso.

### **1.2. Estandarización y validación de parámetros de corte**

La variación en parámetros como la altura de capa, velocidad de impresión y número de perímetros puede introducir desviaciones difíciles de modelar si no se controlan adecuadamente. En este sentido, se sugiere la definición de perfiles de corte estandarizados y validados para cada familia geométrica de piezas, manteniendo constantes los valores de parámetros críticos como el patrón de relleno, la densidad, la temperatura de extrusión y el número de perímetros. Esta estandarización contribuirá a reducir la variabilidad interlote y a mejorar la repetibilidad del proceso.

### **1.3. Optimización de la colocación en la plataforma de fabricación**

La posición de la pieza dentro de la cama de impresión también representa un factor de influencia significativa sobre el desempeño dimensional. Se recomienda establecer una distribución sistemática y validada empíricamente de las piezas en la plataforma, priorizando ubicaciones con menor dispersión detectada en experimentos previos y evitando zonas que presenten condiciones térmicas inestables o menos homogéneas. Esta acción puede complementarse con la definición de zonas críticas en la plataforma y su exclusión parcial durante la producción de piezas que requieran alta precisión.

### **1.4. Construcción de un modelo predictivo iterativo**

Finalmente, se plantea el desarrollo progresivo de un modelo estadístico predictivo, capaz de anticipar la diferencia entre el valor nominal y el medido en función de los factores operacionales del sistema. Este modelo, construido a partir de los resultados experimentales y alimentado por datos de fabricación reales, permitirá optimizar parámetros de impresión y diseño en etapas tempranas, minimizando la necesidad de iteraciones físicas. La actualización continua del modelo, validado mediante nuevos experimentos, permitirá aumentar su capacidad explicativa ( $R^2$ ), y convertirlo en una herramienta efectiva para la toma de decisiones en entornos productivos.

### **1.5. Compensación geométrica en el diseño CAD**

Los resultados del experimento Cubo-E02-XYZ muestran que las piezas con dimensiones nominales inferiores a 5 mm presentan menores desviaciones respecto al valor objetivo. Este comportamiento puede atribuirse a efectos físicos como la sobreextensión o la compresión de capas iniciales, lo cual deriva en que se tenga que diseñar con dimensiones menores para acercarse más al valor objetivo. En consecuencia, se propone incorporar estrategias de compensación geométrica directa en el diseño CAD a partir del modelo predictivo descrito en el punto anterior, ajustando los valores nominales en función de los errores sistemáticos observados. Esta práctica se alinea con los principios de diseño orientado a procesos aditivos establecidos en la norma ISO/ASTM 52910.

## **2. Procedimiento para fabricar una pieza mediante FA asegurando su precisión dimensional**

- 2.1. Diseño CAD de la pieza: Modelar la geometría nominal de la pieza considerando los requerimientos funcionales, restricciones de fabricación y principios de diseño orientado a FA (según ISO/ASTM 52910).
- 2.2. Generación del archivo de impresión: Exportar el modelo CAD en formatos compatibles con el software de corte, preferiblemente en .STL, .3MF u otro formato que preserve la integridad geométrica.
- 2.3. Preparación en el software de corte:
  - 2.a. Importar el archivo en el slicer correspondiente.
  - 2.b. Colocar cinco copias de la pieza de forma distribuida sobre la plataforma de impresión, de manera que cubran al menos un 80% de la superficie utilizable.
  - 2.c. Orientar las piezas de modo que las dimensiones críticas queden alineadas con los ejes X o Z, seleccionando la orientación más favorable en función del soporte requerido y la facilidad de posprocesamiento.
- 2.4. Generación del código de máquina: Configurar los parámetros de corte estandarizados y generar el archivo G-code correspondiente.
- 2.5. Carga del archivo y ejecución de la impresión: Transferir el archivo G-code al software de control de la impresora 3D (MFA) e iniciar el proceso de fabricación.

- 2.6. Extracción y medición dimensional: Retirar cuidadosamente las piezas de la cama y realizar las mediciones necesarias en las dimensiones críticas, utilizando instrumentos calibrados y procedimientos metroológicos apropiados.
- 2.7. Análisis de resultados: Procesar los datos obtenidos para identificar la posición en la plataforma que produjo los valores dimensionales más cercanos al objetivo nominal.
- 2.8. Aplicación de compensación geométrica: Incorporar al modelo CAD una compensación dimensional basada en la diferencia entre el valor nominal y el valor medido en la posición óptima identificada.
- 2.9. Iteración con pieza única: Repetir las etapas 2 a 6, fabricando únicamente una pieza colocada en la posición óptima seleccionada.
- 2.10. Verificación de cumplimiento dimensional:
  - 2.a. Si la pieza fabricada cumple con las tolerancias especificadas, se da por finalizado el proceso.
  - 2.b. En caso contrario, se ajusta nuevamente el modelo CAD promediando los errores dimensionales de las iteraciones previas. Este valor compensado se retroalimenta al diseño para una nueva iteración.
- 2.11. Criterio de abandono: Si tras múltiples iteraciones no se logra alcanzar la tolerancia requerida, se concluye que la variabilidad inherente del sistema excede los límites permisibles. En tal caso, se recomienda evaluar el uso de una MFA con mayor estabilidad o precisión.

## **B. Sistema de medición**

A fin de reducir la variabilidad del sistema de medición, la cual es mayoritariamente debida a los operarios y su falta de experiencia con el instrumento de medida, se estableció, con la ayuda de expertos en metrología, un procedimiento estándar de capacitación para los trabajadores, que busca llevar a los mismos a un nivel igual de destreza a la hora de medir con el calibrador digital disponible en el laboratorio. A continuación, se detalla el mismo, el cual está organizado en objetivos, fases:

### 1. Objetivos de la capacitación

- Conocer el calibrador digital, incluyendo sus partes, funcionamiento y cuidados.
- Entender tolerancias y desviaciones propias de la impresión 3D.
- Dominar las técnicas de medición externa, interna, de profundidad y de escalón.
- Registrar y reportar datos de forma precisa y trazable.
- Identificar fuentes de error y aplicar acciones correctivas.

### 2. Requisitos y materiales

1. Operario, preferiblemente con conocimientos básicos de mecánica o metrología.
2. Materiales y herramientas
  - a. Calibrador digital (resolución 0,01 mm).
  - b. Piezas de entrenamiento impresas (con geometrías variadas: cilindros, ranuras, escalonadas, pequeños orificios).
  - c. Patrones de referencia (anillos, bloques patrón).
  - d. Ficha de control de medición (formato impreso o digital).
  - e. Guía de tolerancias según norma (por ejemplo, ISO 286 para ajustes).
  - f. Limpiador (pañó y alcohol isopropílico).
  - g. Manual del calibrador digital.

### 3. Estructura de la capacitación

Cuadro No. 33. Descripción de las fases de la capacitación a los operarios que realicen mediciones con el calibrador digital

Fase	Duración estimada	Actividades clave
Introducción teórica	15 min	Presentación de conceptos y equipo
Demostración práctica	15 min	Instructor mide y explica en vivo

Práctica guiada	30 min	El operario mide con supervisión
Práctica independiente	30 min	Medición de piezas nuevas sin ayuda
Evaluación y retroalimentación	15 min	Quiz teórico + prueba de medición
Certificación y cierre	15 min	Revisión de resultados y otorgamiento

#### 4. Contenidos y metodología por fase

##### 4.1. Introducción teórica

- 4.a. Partes del calibrador: mordazas fijas y móviles, cursor, pantalla LCD, unión guía, tornillo de bloqueo.
- 4.b. Principios de funcionamiento: conversión de desplazamiento a señal digital, cero, unidades mm/in.
- 4.c. Mantenimiento y cuidados: limpieza después de uso, no exponer a golpes ni líquidos, almacenamiento en funda.
- 4.d. Normas de tolerancia: concepto de tolerancia, ajuste según ISO 286, raíces de errores en FA (warping, capa, retracción).

##### 4.2. Demostración práctica

- 4.a. Encendido y puesta a cero: limpiar mordazas, cerrar suavemente, pulsar "ZERO".
- 4.b. Medición externa: pieza cilíndrica de muestra.
- 4.c. Medición interna: en orificio de anillo patrón.
- 4.d. Medición de profundidad: con la varilla extensible.
- 4.e. Medición de escalón: mostrar técnica de rotación.
- 4.f. Lectura y registro: anotar en ficha (Mantener las manos quietas y evitar aplicar fuerza excesiva: basta con contacto firme y constante).

##### 4.3. Práctica guiada

- 4.a. El operario repite cada tipo de medición con distintas piezas de entrenamiento.
- 4.b. El instructor corrige postura, ángulo de visión (evitar error de paralaje) y presión.
- 4.c. Registrar cada medición en la ficha y comparar contra valor nominal.

#### 4.4. Práctica independiente

- 4.a. El operario mide piezas nuevas sin supervisión directa.
- 4.b. Completa ficha de control con:
  - 4.i. Identificación de la pieza
  - 4.ii. Descripción de la dimensión (diámetro, largo, ancho, profundidad)
  - 4.iii. Valor nominal y tolerancia
  - 4.iv. Valor medido
  - 4.v. Observaciones (si supera tolerancia o no)

#### 4.5. Evaluación y retroalimentación

- 4.a. Examen teórico breve (5–10 preguntas): partes del calibrador, normas de tolerancia, causas de error.
- 4.b. Prueba práctica: medir 3 piezas con geometrías mixtas; calificar exactitud ( $\pm 1$  unidad de resolución) y método.
- 4.c. Feedback personalizado: puntos fuertes y áreas de mejora.

#### 4.6. Certificación

- 4.a. Entrega de Constancia de Competencia si aprueba (> 80 % en evaluaciones).
- 4.b. Definir plan de reevaluación cada 6 meses o ante cambio de impresora/material.

#### 4.7. Checklist de validación diaria

4.a. Antes de iniciar la jornada de medición:

- 4.i. ¿Calibrador limpio y sin daños?
- 4.ii. ¿Pantalla y baterías en buen estado?
- 4.iii. ¿Se ha verificado el cero en mordazas cerradas?
- 4.iv. ¿Patrones de referencia disponibles y verificados?
- 4.v. ¿Ficha de control lista y correctamente encabezada?

4.8. Consideraciones finales

- 4.a. Reentrenamiento periódico cada vez que se introduzca un nuevo material o impresora.
- 4.b. Registro de desviaciones: analizar tendencias de error (ej. sistemáticos vs. aleatorios).
- 4.c. Comunicación con el supervisor del laboratorio: si repetidamente hay piezas fuera de tolerancia, revisar parámetros de impresión (temperatura, velocidad, retracción).

### **C. Cámara de fabricación**

Con el fin de mejorar el control de variables ambientales en los procesos de fabricación aditiva y mitigar riesgos tanto para los usuarios como para la calidad de las piezas impresas, se propone la construcción de una cámara de fabricación especializada para la impresora Prusa i3 MK3S. Este diseño se basa exclusivamente en los elementos que expertos evaluaron como de alta importancia en una encuesta técnica, priorizando así funcionalidades críticas y descartando características menos relevantes.

#### **1. Estructura general y materiales**

La cámara estará construida completamente en policarbonato, debido a su alta resistencia térmica, durabilidad mecánica y transparencia, lo que permite una supervisión visual continua del proceso de impresión sin comprometer la integridad del enclosure. Como alternativa menos costosa, se puede emplear acrílico, aunque se debe tener precaución por su menor resistencia térmica. La estructura será modular, lo que permitirá armar y desarmar la cámara según las necesidades del usuario. Este enfoque facilitará la expansión futura

para alojar impresoras de mayor tamaño, integrando nuevos módulos según sea necesario. Además, el techo será removible, con la posibilidad de sustituirlo por una estructura elevada en forma de caja, lo cual permitirá aumentar la altura interna y mejorar la circulación del aire. Para garantizar un acceso cómodo al interior, el diseño incluye una puerta frontal y una puerta en cada una de las paredes laterales. Todas las puertas contarán con manijas térmicamente aisladas y cierres magnéticos o mecánicos, selladas mediante burletes de silicona para mantener la estanqueidad del ambiente interno.

Para efectos de controlar las variables ambientales para los experimentos con cubos, se decidió desmantelar una MFA CubePro que estaba en desuso y usar su carcasa para encerrar la MFA utilizada para los experimentos. En la Figura No. 55, se muestra una fotografía de la cámara con la MFA dentro.

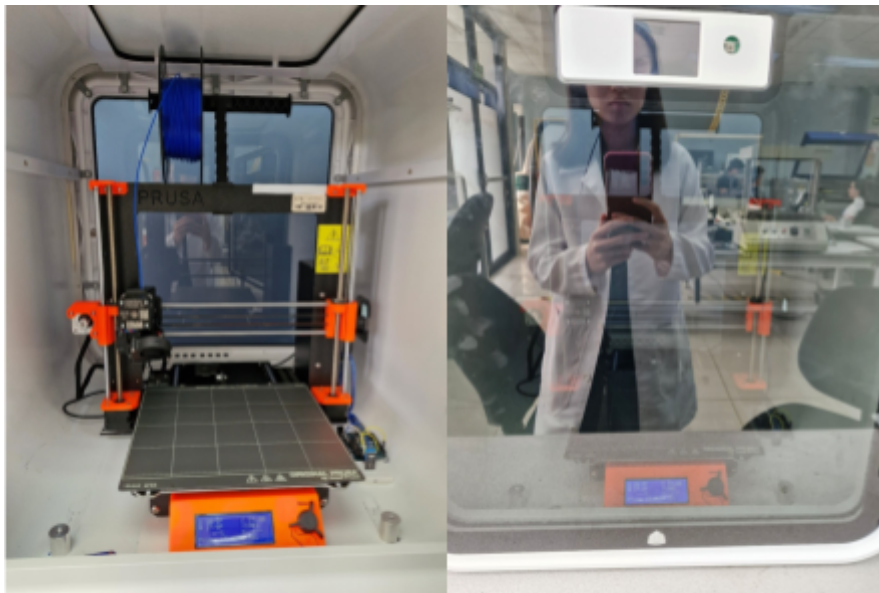


Figura 55. Fotografías por dentro y por fuera de la cámara de fabricación utilizada para la MFA en los experimentos con cubos.

## 2. Control y monitoreo de variables ambientales

La cámara permitirá el monitoreo y control de tres variables ambientales consideradas críticas: temperatura, humedad y flujo de aire sin corrientes. Para cada variable se colocará un sensor ubicado a media altura en el centro de la cámara, asegurando así una medición representativa del entorno donde ocurre la impresión. Para la temperatura se empleará un sensor digital tipo DHT22 o un sensor industrial PT100; para la humedad, un sensor capacitivo como el SHT31; y para el flujo de aire, sensores de presión diferencial o un

anemómetro de baja sensibilidad, según lo recomendado por un experto en electrónica. El flujo de aire se mantendrá estable mediante un sistema de ventilación con dampers (reguladores de aire constante), evitando la formación de corrientes internas que puedan afectar la impresión.

Es relevante señalar que, como versión preliminar del sistema de monitoreo, y con el objetivo de evaluar la influencia de las variables ambientales de temperatura y humedad en el experimento Cubo-E01-XYZ, se implementó un circuito electrónico, representado en la Figura No. 56. Dicho circuito incorpora un sensor DHT11, el cual permite la medición periódica de temperatura y humedad relativa del ambiente. El sistema se complementó con un microcontrolador Arduino, una protoboard, y una resistencia de 5 k $\Omega$ , componentes necesarios para el funcionamiento adecuado del sensor conforme a las especificaciones técnicas establecidas en su hoja de datos (véase Anexo No. 1).

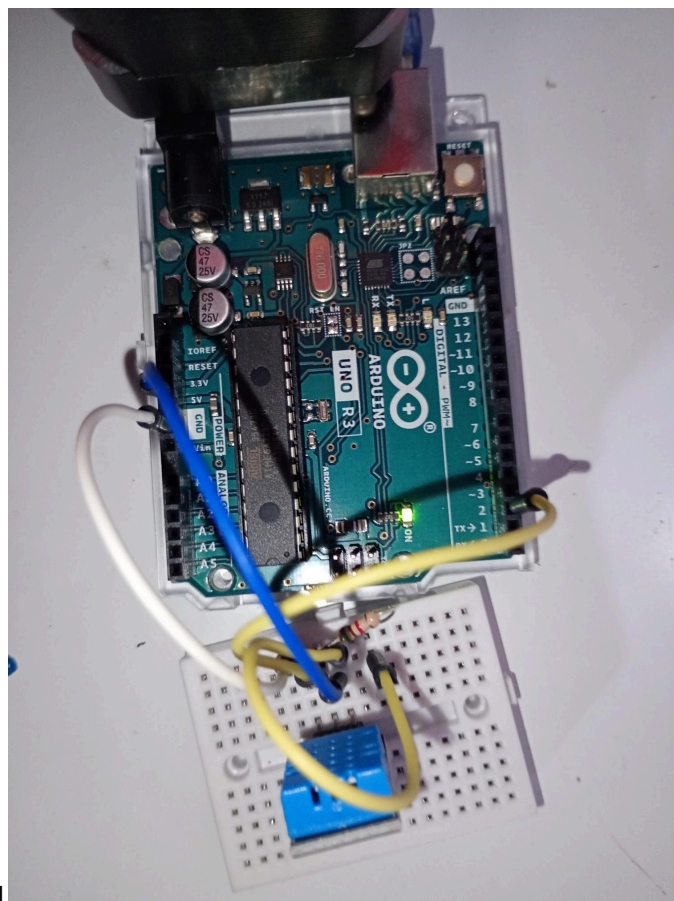


Figura No. 56. Circuito armado para el sensor utilizado para tomar las mediciones de humedad y temperatura.

Para habilitar la operatividad del sensor DHT11 mediante un entorno de desarrollo apropiado, se ejecutó la siguiente secuencia de procedimientos técnicos:

1. Instalación del entorno de desarrollo: Se procedió con la instalación del software *Arduino Integrated Development Environment* (Arduino IDE), el cual permite la escritura, compilación y carga de programas al microcontrolador.
2. Incorporación de la biblioteca específica: Se añadió la librería "DHT sensor library" al sensor DHT11 mediante el gestor de bibliotecas del Arduino IDE, lo que permite el acceso a funciones predefinidas para la adquisición y procesamiento de datos de temperatura y humedad relativa.
3. Carga del ejemplo base: Desde el menú "Ejemplos" de la librería instalada, se seleccionó el archivo denominado "DHTtester", ubicado en la sección de la librería añadida, el cual contiene una estructura básica de código funcional para realizar pruebas iniciales de lectura.
4. Ajuste del retardo de muestreo: Se modificó el valor del parámetro `delay()` dentro del código, con el fin de establecer el intervalo de tiempo entre cada adquisición de datos, en función de la resolución temporal requerida por el experimento. El valor se estableció en 6 000, dado que esto corresponde a un minuto por cada medición (6 000 ms).
5. Calibración del sensor: Se realizó un proceso de verificación y calibración utilizando un sensor de laboratorio previamente certificado, con el objetivo de comparar y ajustar las lecturas proporcionadas por el sensor DHT11. A la medición de temperatura se le restó 4,1 °C y a la humedad relativa se le sumó 8%.
6. Ejecución del programa: Finalmente, se compiló y cargó el programa al microcontrolador, iniciando así la adquisición continua de datos ambientales desde el sensor.

El código generado se muestra a continuación, el cual, como ya se mencionó, es una modificación del código original del ejemplo de la biblioteca DHT sensor library:

```
// Example testing sketch for various DHT humidity/temperature sensors
```

```

// Written by ladyada, public domain
// REQUIRES the following Arduino libraries:
// - DHT Sensor Library: https://github.com/adafruit/DHT-sensor-library
// - Adafruit Unified Sensor Lib: https://github.com/adafruit/Adafruit\_Sensor
#include "DHT.h"

#define DHTPIN 2 // Digital pin connected to the DHT sensor
// Feather HUZZAH ESP8266 note: use pins 3, 4, 5, 12, 13 or 14 --
// Pin 15 can work but DHT must be disconnected during program upload.
// Uncomment whatever type you're using!
//#define DHTTYPE DHT11 // DHT 11
#define DHTTYPE DHT22 // DHT 22 (AM2302), AM2321
//#define DHTTYPE DHT21 // DHT 21 (AM2301)
// Connect pin 1 (on the left) of the sensor to +5V
// NOTE: If using a board with 3.3V logic like an Arduino Due connect pin 1
// to 3.3V instead of 5V!
// Connect pin 2 of the sensor to whatever your DHTPIN is
// Connect pin 3 (on the right) of the sensor to GROUND (if your sensor has 3 pins)
// Connect pin 4 (on the right) of the sensor to GROUND and leave the pin 3 EMPTY (if your
// sensor has 4 pins)
// Connect a 10K resistor from pin 2 (data) to pin 1 (power) of the sensor
// Initialize DHT sensor.
// Note that older versions of this library took an optional third parameter to
// tweak the timings for faster processors. This parameter is no longer needed
// as the current DHT reading algorithm adjusts itself to work on faster procs.
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  Serial.println(F("DHTxx test!"));
  dht.begin();
}

```

```

void loop() {
  // Wait a few seconds between measurements.
  delay(1000);

  // Reading temperature or humidity takes about 250 milliseconds!
  // Sensor readings may also be up to 2 seconds 'old' (its a very slow sensor)
  float h = dht.readHumidity();

  // Read temperature as Celsius (the default)
  float t = dht.readTemperature();

  // Read temperature as Fahrenheit (isFahrenheit = true)
  float f = dht.readTemperature(true);

  // Check if any reads failed and exit early (to try again).
  if (isnan(h) || isnan(t) || isnan(f)) {
    Serial.println(F("Failed to read from DHT sensor!"));
    return;
  }

  // Compute heat index in Fahrenheit (the default)
  float hif = dht.computeHeatIndex(f, h);

  // Compute heat index in Celsius (isFahreheit = false)
  float hic = dht.computeHeatIndex(t, h, false);

  Serial.print(F("Humidity: "));
  Serial.print(h+8);

  Serial.print(F("% Temperature: "));
  Serial.print(t-4.1);

  Serial.println(F("°C "));
}

```

### 3. Sistema de ventilación y evacuación

El diseño contempla dos orificios de ventilación de 19,05 mm ( $\frac{1}{4}$  pulgada) de diámetro ubicados en las paredes laterales, y un orificio de 38,10 mm ( $\frac{1}{2}$  pulgada) en el centro del techo. Estos permitirán la evacuación controlada del aire, y cada uno estará equipado con mallas antipolvo y válvulas unidireccionales.

#### **4. Mitigación de riesgos para el usuario**

El diseño atiende los riesgos que fueron considerados como altamente importantes por los expertos. Para mitigar la exposición a COVs, se emplea un sistema de filtración que consiste en un filtro de carbón activado, que absorberá compuestos orgánicos volátiles (COVs) generados durante la impresión. Los riesgos mecánicos, como atrapamientos y quemaduras, se reducen mediante bordes redondeados en los paneles, el uso de materiales no conductores en las superficies expuestas y manijas diseñadas ergonómicamente. Además, el sistema incorpora cierres suaves y etiquetas de advertencia de no introducir las manos u objetos durante el proceso de impresión visibles para el usuario.

#### **5. Protección de la calidad de impresión**

El ingreso de corrientes de aire se evita gracias al sellado hermético con burletes. Para evitar el ingreso de objetos extraños, las puertas incluyen cierres magnéticos que previenen aperturas accidentales. Además, la base de la CF está equipada con elementos antivibración, ya sea mediante patas de goma o amortiguadores mecánicos, que reducen el efecto de movimientos indeseados sobre la impresora durante su operación. Además, para evitar el desgaste de la fuente de poder, se desmontará la misma de la MFA y se colocará por fuera, atornillada a la parte trasera de la CF.

#### **6. Dimensiones y diseño interior**

Las dimensiones internas mínimas de la cámara serán de 640 mm × 640 mm en base y 750 mm de altura, con la posibilidad de expandir esta última utilizando un módulo adicional de techo. Se recomienda mantener un espacio libre de al menos 50 mm alrededor de la impresora para permitir una adecuada circulación del aire y facilidad de manipulación.

#### **7. Complementos y monitoreo**

Para mejorar la experiencia del usuario, se sugiere integrar un sistema de monitoreo digital, compuesto por una pantalla LCD. Este sistema mostrará en tiempo real los valores de temperatura, humedad y flujo de aire, y puede complementarse con un datalogger para registrar estos datos durante cada impresión, ya que se observó que la toma de datos directamente desde Arduino es lenta. Finalmente, se incorporará una iluminación LED interior, que permitirá al usuario observar el proceso sin abrir la cámara ni alterar las condiciones internas.

A partir de todo lo anteriormente descrito, se procedió a realizar un modelo 3D de la cámara de fabricación propuesta, el cual es mostrado en la Figura No. 57 y en la Figura No. 58, a fin de ilustrar las ideas propuestas, así como también servir de referencia para la fabricación de las partes de la misma mediante corte láser.

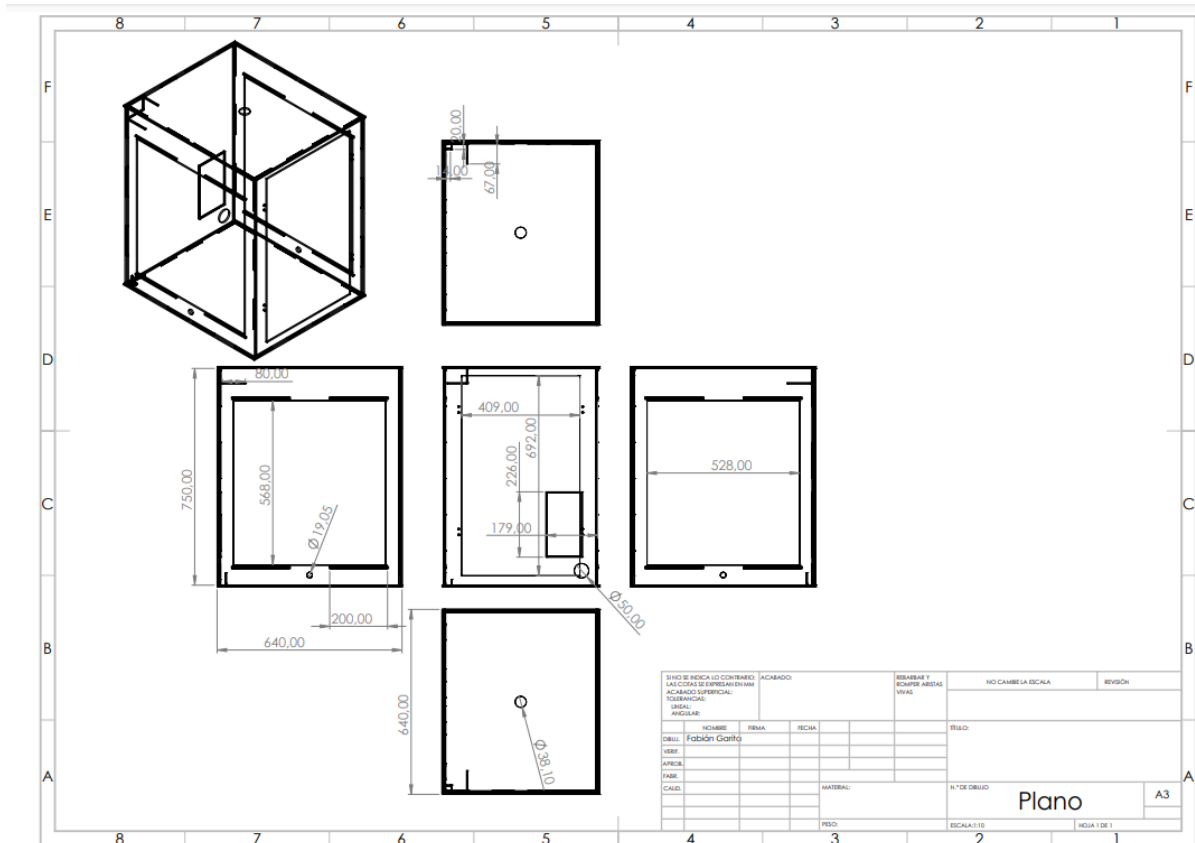


Figura No. 57. Plano de construcción de la cámara de fabricación propuesta.

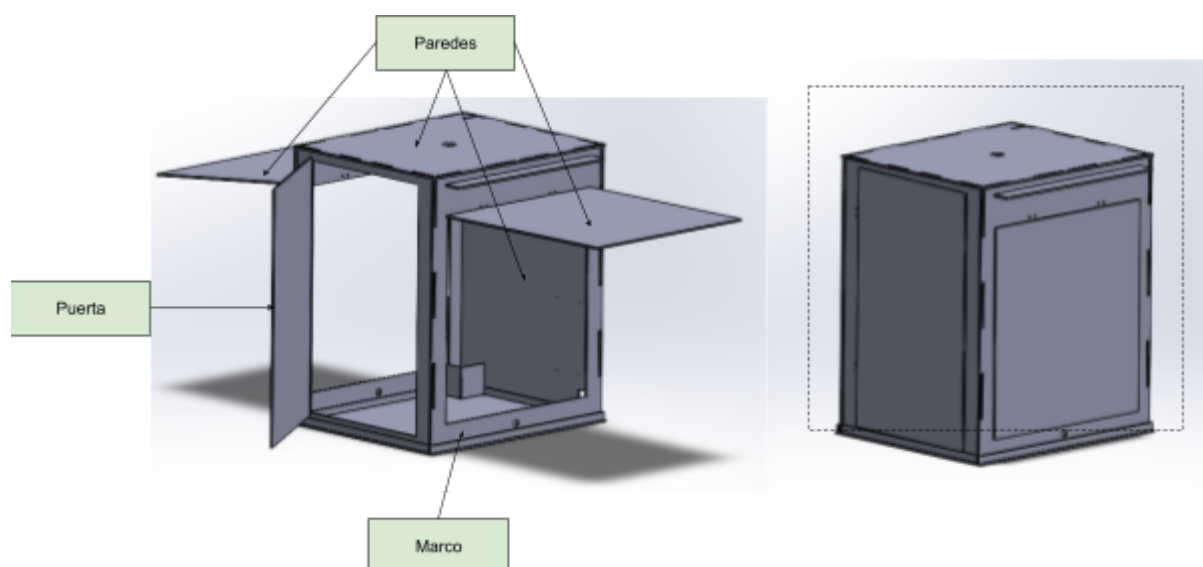


Figura No. 58. Diagrama de la cámara de fabricación propuesta.

#### D. Cálculo de la incertidumbre

A fin de establecer cuál es la incertidumbre total del sistema, se tomaron los datos de los experimentos con cubos, en el que se fijó el eje de medición y la posición como datos para el cálculo de la incertidumbre tipo A. Así, se calculó la desviación estándar de los datos para la configuración de cada experimento, que poseen un valor nominal de 5 mm y 10 mm, que poseen 25 datos y 30 datos, respectivamente, y este cálculo se determinó como la incertidumbre tipo A. Para la incertidumbre tipo B, se utilizó las incertidumbres reportadas en el certificado de calibración del Anexo No. 3. Ambos tipos de incertidumbres fueron expandidas a un  $K = 2$ , para una cobertura del 95,45%, como se muestra en el Cuadro No. 34.

Cuadro No. 34. Resultados del cálculo de las incertidumbres para cada tamaño de cubo.

Longitud de referencia / Valor nominal del cubo (mm)	Incertidumbre Expandida	
	Tipo A (mm)	Tipo B (mm)
5	0,108	0,021
10	0,150	0,021

Así, la incertidumbre total para cada uno de los tamaños medidos se calcula como:

$$u_{5\text{ mm}} = \sqrt{(0,108\text{ mm})^2 + (0,021\text{ mm})^2} = 0,110\text{ mm}$$

$$u_{10\text{ mm}} = \sqrt{(0,150\text{ mm})^2 + (0,021\text{ mm})^2} = 0,151\text{ mm}$$

De tal modo, se tiene que la capacidad máxima de fabricación, es decir, la dimensión más pequeña que se puede fabricar, es de 0,1 mm para una pieza de 5 mm y de 0,2 mm para una pieza de 10 mm.

## E. Análisis económico del estudio

Dado que el estudio realizado es completamente investigativo, no se calcularán sus beneficios, ya que no es posible determinar con certeza cuál será el impacto del mismo, pues se desconoce cuántas personas se verán beneficiadas por sus resultados. Así, se calculará sólo el costo asociado a la realización de la actividad. Para esto, se calculará el costo por el material, la mano de obra y los costos indirectos de fabricación

### 1. Costo por materia prima

Para el costo por materia prima (MP), se tomará el costo de una bobina de filamento PLA y se realizará una regla de tres para calcular cuánto equivale para la cantidad total estimada de material utilizado en los experimentos, tal que:

$$\text{Cantidad de material utilizado} = 150\text{ g}$$

$$\text{Cantidad de material en una bobina} = 1000\text{ g/bobina (CRCibernética, s.f.)}$$

$$\text{Costo de una bobina} = 13\ 624\ \text{¢/bobina (CRCibernética, s.f.)}$$

$$\text{Costo MP} = 13\ 624 \frac{\text{¢}}{\text{bobina}} \cdot \frac{150\text{ g}}{1000 \frac{\text{g}}{\text{bobina}}} = 2\ 044\ \text{¢}$$

Así, el costo por materia prima corresponde a 2 044 ¢.

### 2. Costo por mano de obra

El costo por mano de obra (MO) se calculará a partir de lo que gana un asistente en el TEC, la cantidad de asistentes que trabajaron en cada experimento y las horas requeridas por experimento, tal que:

$$\text{Costo por asistente} = \frac{192\ 000\ \text{¢}}{\text{asistente/mes}} \cdot \frac{\text{mes}}{4,33\ \text{semanas}} \cdot \frac{\text{semana}}{20\ \text{horas}} \cdot \frac{1\ \text{h}}{60\ \text{min}} = 37,0\ \text{¢/asistente/min}$$

$$\text{Costo}_{\text{Prisma-E01-XYZ}} = 37,0 \frac{\text{€}}{\text{asistente}\cdot\text{min}} \cdot 50 \frac{\text{min}}{\text{experimento}} \cdot 1 \text{ asistente} = 1\,850 \text{ €/experimento}$$

$$\text{Costo}_{\text{Prisma-E02-Z}} = 37,0 \frac{\text{€}}{\text{asistente}\cdot\text{min}} \cdot 43 \frac{\text{min}}{\text{experimento}} \cdot 2 \text{ asistentes} = 3\,182 \text{ €/experimento}$$

$$\text{Costo}_{\text{Prisma-E03-Z}} = 37,0 \frac{\text{€}}{\text{asistente}\cdot\text{min}} \cdot 43 \frac{\text{min}}{\text{experimento}} \cdot 2 \text{ asistentes} = 3\,182 \text{ €/experimento}$$

$$\text{Costo}_{\text{Tipo lineal-E01-X}} = 37,0 \frac{\text{€}}{\text{asistente}\cdot\text{min}} \cdot 125 \frac{\text{min}}{\text{experimento}} \cdot 1 \text{ asistente} = 4\,625 \text{ €/experimento}$$

$$\text{Costo}_{\text{Tipo lineal-E02-XY}} = 37,0 \frac{\text{€}}{\text{asistente}\cdot\text{min}} \cdot 125 \frac{\text{min}}{\text{experimento}} \cdot 1 \text{ asistente} = 4\,625 \text{ €/experimento}$$

$$\text{Costo}_{\text{Cubo-E01-XYZ}} = 37,0 \frac{\text{€}}{\text{asistente}\cdot\text{min}} \cdot 880 \frac{\text{min}}{\text{experimento}} \cdot 4 \text{ asistentes} = 130\,240 \text{ €/experimento}$$

$$\text{Costo}_{\text{Cubo-E01-XYZ}} = 37,0 \frac{\text{€}}{\text{asistente}\cdot\text{min}} \cdot 810 \frac{\text{min}}{\text{experimento}} \cdot 1 \text{ asistente} = 29\,970 \text{ €/experimento}$$

$$\text{Costo MO} = (1\,850 + 3\,182 + 3\,182 + 4\,625 + 4\,625 + 130\,240 + 29\,970) \text{ €}$$

$$\text{Costo MO} = 177\,674 \text{ €}$$

Así, el costo por mano de obra corresponde a 177 674 €.

### 3. Costo indirecto de fabricación

Para calcular los costos indirectos de fabricación, se utilizará el total de tiempo invertido en los experimentos y el consumo de electricidad de la computadora y de la MFA, tal que:

$$\text{Tiempo total de impresión} = (5 + 8 + 8 + 60 + 90 + 300 + 180) \text{ min} = 651 \text{ min}$$

$$\text{Tiempo total de impresión} = 10,85 \text{ h}$$

$$\text{Tiempo total del estudio} = (50 + 43 + 43 + 125 + 125 + 880 + 810) \text{ min} = 2\,076 \text{ min}$$

$$\text{Tiempo total del estudio (computadora)} = 34,6 \text{ h}$$

$$\text{Consumo medio de electricidad de la computadora} = \frac{(120+600) \text{ W}}{2} = 360 \text{ W (Repsol, s.f.)}$$

$$\text{Consumo medio de la MFA} = \frac{(200+500) \text{ W}}{2} = 350 \text{ W (TotalEnergies, 2022)}$$

$$\text{Costo por electricidad} = 44,43 \text{ €/kW} \cdot \text{h (Compañía Nacional de Fuerza y Luz, 2024)}$$

$$\text{Consumo total} = (360 \text{ W} \cdot 34,6 \text{ h} + 350 \text{ W} \cdot 10,85 \text{ h}) \cdot \frac{1 \text{ kW}}{1000 \text{ W}} = 16,3 \text{ kW} \cdot \text{h}$$

$$\text{Costo CIF} = 44,43 \frac{\text{€}}{\text{kW}\cdot\text{h}} \cdot 16,3 \text{ kW} \cdot \text{h} = 724 \text{ €}$$

#### 4. Costo total del experimento

Habiendo calculado los tres componentes del costo, se procede a calcular el costo total del experimento de la siguiente manera:

$$\text{Costo total} = \text{Costo MP} + \text{Costo MO} + \text{Costo CIF}$$

$$\text{Costo total} = (2\,044 + 177\,674 + 724) \text{ €} = 180\,442 \text{ €}$$

Así, se concluye que el estudio costó un total de €180 442, de los cuales el 98,47% es de MO, un 1,13% de MP y un 0,40% de CIF.

#### F. Plan de Implementación

La correcta implementación de las soluciones propuestas en este estudio requiere una planificación estructurada que permita su ejecución eficiente y controlada. Por ello, se ha elaborado un plan de implementación detallado para cada una de las tres principales soluciones identificadas en el capítulo V: la estrategia de planificación del proceso de fabricación, el fortalecimiento del sistema de medición y la construcción de una cámara de fabricación. Cada plan incluye una estructura detallada de trabajo (EDT/WBS), una lista de actividades con sus atributos, secuencia y recursos, los hitos y entregables esperados, un cronograma tentativo, asignación de roles y un análisis de riesgos. Esta planificación busca garantizar que cada solución pueda llevarse a la práctica de forma efectiva, reduciendo incertidumbres y maximizando su impacto sobre la calidad dimensional del proceso de fabricación aditiva.

##### 1. Estrategia de Planificación del Proceso de Fabricación

La estrategia de planificación constituye una guía integral que permite estandarizar el proceso de fabricación aditiva mediante la tecnología de extrusión, asegurando la obtención de dimensiones lineales precisas. Su implementación implica analizar los resultados experimentales, identificar variables críticas y desarrollar procedimientos reproducibles que puedan ser aplicados en entornos académicos e industriales. Este plan establece una hoja de ruta clara para el diseño y validación de un modelo predictivo iterativo y un procedimiento paso a paso que facilite la toma de decisiones técnicas antes, durante y después de la impresión.

## 1.1 EDT/WBS

1. Revisión de resultados experimentales
2. Identificación de variables significativas
3. Estandarización de parámetros de impresión
4. Definición de modelo predictivo iterativo
5. Redacción del procedimiento paso a paso
6. Validación del procedimiento mediante impresión piloto
7. Documentación final y entrega

## 1.2. Lista de actividades

Cuadro No. 35. Listado de las actividades a realizar para implementar la solución de la estrategia de planificación del proceso de fabricación.

ID	Actividad	Predecesoras	Duración	Recursos
A1	Revisión de datos experimentales	-	2 días	Investigador principal
A2	Selección de variables clave	A1	2 días	Investigador, software estadístico
A3	Estandarización de parámetros	A2	3 días	MFA, software de corte
A4	Modelo predictivo	A2	4 días	Excel o similar
A5	Redacción del procedimiento	A3, A4	2 días	Investigador
A6	Validación piloto	A5	3 días	MFA, laboratorio
A7	Documento final	A6	2 días	Investigador

## 1.3. Hitos y entregables

- H1: Variables significativas identificadas

- H2: Parámetros estandarizados
- H3: Modelo predictivo construido
- H4: Procedimiento escrito
- H5: Validación con pieza piloto
- H6: Documento final de estrategia listo para implementación

#### 1.4. Cronograma (18 días)

Cuadro No. 36. Cronograma de las actividades a realizar para implementar la solución de la estrategia de planificación del proceso de fabricación.

Semana	Actividades
1	A1, A2
2	A3, A4
3	A5, A6
4	A7

#### 1.5. Roles y responsabilidades

Cuadro No. 37. Listado de los roles y responsabilidades de los participantes para implementar la solución de la estrategia de planificación del proceso de fabricación.

Rol	Actividades
Investigador principal	A1, A2, A4, A5, A7
Técnico SIMTEC	A3, A6
Asesor académico	Revisión A5, A7
Asesor industrial	Retroalimentación A3, A6

#### 1.6. Plan de gestión de riesgos

Cuadro No. 38. Plan de gestión de riesgos para implementar la solución de la estrategia de planificación del proceso de fabricación.

Riesgo	Probabilidad	Impacto	Mitigación
--------	--------------	---------	------------

Laboratorio no disponible	Media	Alta	Reservar espacio anticipadamente
Datos inconsistentes	Media	Media	Revisar con asesores
Fallo en impresión piloto	Alta	Media	Validar modelo en pequeña escala antes

## 2 Sistema de Medición

El fortalecimiento del sistema de medición busca asegurar que las evaluaciones de precisión dimensional sean confiables, repetibles y trazables. La implementación de esta solución abarca desde el diagnóstico del sistema actual hasta la capacitación del personal, pasando por el diseño e implementación de herramientas didácticas y la actualización de procedimientos internos. El plan tiene como objetivo minimizar errores humanos e instrumentales, mejorar la calidad de los datos recolectados y fortalecer la capacidad operativa del laboratorio.

### 2.1. EDT/WBS

1. Análisis del sistema actual de medición
2. Desarrollo de programa de capacitación
3. Ejecución de sesiones de capacitación
4. Evaluación post-capacitación
5. Actualización de procedimientos internos

### 2.2. Lista de actividades

Cuadro No. 39. Listado de las actividades a realizar para implementar la solución del sistema de medición.

ID	Actividad	Predecesoras	Duración	Recursos
B1	Diagnóstico del sistema actual	-	2 días	Calibrador, datos históricos
B2	Diseño del programa de capacitación	B1	3 días	Material educativo

B3	Implementación de capacitación	B2	3 días	Personal técnico
B4	Evaluación post-capacitación	B3	1 día	Formularios, entrevistas
B5	Redacción de procedimientos	B4	2 días	Investigador principal

### 2.3. Hitos y entregables

- H1: Diagnóstico del sistema actual
- H2: Programa de capacitación listo
- H3: Capacitación impartida
- H4: Evaluación de competencias
- H5: Procedimientos actualizados

### 2.4. Cronograma (11 días)

Cuadro No. 40. Cronograma de las actividades a realizar para implementar la solución del sistema de medición.

Semana	Actividades
1	B1, B2
2	B3, B4, B5

### 2.5. Roles y responsabilidades

Cuadro No. 41. Listado de los roles y responsabilidades de los participantes para implementar la solución del sistema de medición.

Rol	Actividades
Investigador	B1, B2, B5
Instructores	B3
Evaluadores	B4

## 2.6. Plan de gestión de riesgos

Cuadro No. 42. Plan de gestión de riesgos para implementar la solución del sistema de medición.

Riesgo	Probabilidad	Impacto	Mitigación
Baja participación en capacitación	Media	Alta	Convocar anticipadamente, ajustar horarios
Fallas en equipos de medición	Alta	Media	Verificación y calibración previa

## 3. Cámara de Fabricación

La construcción de una cámara de fabricación con monitoreo ambiental es fundamental para controlar las variables externas que afectan el desempeño del proceso de impresión. Este plan contempla desde la validación técnica del diseño hasta la integración de sensores y pruebas funcionales. Su propósito es asegurar un entorno de impresión estable que mitigue las variaciones en temperatura y humedad, factores clave en la variabilidad dimensional. La cámara será una herramienta complementaria esencial para garantizar la calidad del proceso de fabricación aditiva en contextos experimentales y prácticos.

### 3.1. EDT/WBS

1. Validación del diseño técnico
2. Adquisición de materiales
3. Fabricación de estructura
4. Instalación de sensores y controladores
5. Pruebas de funcionamiento
6. Ajustes y mejoras finales

### 3.2. Lista de actividades

Cuadro No. 43. Listado de las actividades a realizar para implementar la solución del sistema de medición.

ID	Actividad	Predecesoras	Duración	Recursos
C1	Validación del diseño CAD	-	2 días	Software CAD, expertos
C2	Compra de materiales	C1	2 días	Lista de materiales, presupuesto
C3	Fabricación de estructura	C2	3 días	Herramientas, espacio de trabajo
C4	Instalación de sensores	C3	2 días	Microcontroladores, sensores, cables
C5	Pruebas funcionales	C4	2 días	Termómetro, higrómetro, ventilador
C6	Ajustes y mejoras	C5	2 días	Investigador

### 3.3. Hitos y entregables

- H1: Diseño CAD aprobado
- H2: Materiales adquiridos
- H3: Estructura física montada
- H4: Sistema de sensores funcional
- H5: Cámara lista para uso experimental

### 3.4. Cronograma (13 días)

Cuadro No. 44. Cronograma de las actividades a realizar para implementar la solución del sistema de medición.

Semana	Actividades
1	C1, C2, C3
2	C4, C5, C6

### 3.5. Roles y responsabilidades

Cuadro No. 45. Listado de los roles y responsabilidades de los participantes para implementar la solución del sistema de medición.

Rol	Actividades
Diseñador CAD	C1
Compras	C2
Técnico en armado	C3, C4
Verificador	C5, C6

### 3.6. Plan de gestión de riesgos

Cuadro No. 46. Plan de gestión de riesgos para implementar la solución del sistema de medición.

Riesgo	Probabilidad	Impacto	Mitigación
Retraso en compras	Alta	Alta	Comprar materiales alternos locales
Fallo en sensores	Media	Alta	Verificar funcionamiento antes de instalar
Falta de herramientas	Media	Media	Pedir préstamo al laboratorio SIMTEC

## 4. Conclusión

La implementación articulada de estas tres soluciones permite establecer una base robusta para mejorar la calidad dimensional en procesos de fabricación aditiva por extrusión de material. La combinación de una planificación estructurada, un sistema de medición confiable y un entorno de impresión controlado no solo responde a las limitaciones identificadas en el diagnóstico inicial, sino que también crea condiciones propicias para la mejora continua. Se recomienda realizar revisiones periódicas de cada componente implementado, capacitar continuamente al personal involucrado y documentar sistemáticamente los resultados para retroalimentar y refinar los procedimientos. Además, se sugiere extender el enfoque de este plan a otras tecnologías de fabricación aditiva, de modo que se puedan replicar los beneficios en distintos contextos y aplicaciones industriales.



## VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### A. Conclusiones

A lo largo de este estudio se evidenció la necesidad de contar con una estrategia estructurada que permita mejorar la precisión dimensional en procesos de fabricación aditiva por extrusión de material, particularmente en entornos como el laboratorio SIMTEC del Instituto Tecnológico de Costa Rica. El diagnóstico detallado permitió identificar las principales fuentes de variabilidad en el sistema, tales como las condiciones ambientales, la disposición de las piezas sobre la plataforma, y la falta de estandarización en los parámetros de corte. En respuesta, se diseñaron y validaron soluciones prácticas, como una cámara de fabricación con monitoreo ambiental, un sistema de medición optimizado y una estrategia de planificación basada en análisis estadísticos. Estas propuestas fueron concebidas con el objetivo de proporcionar herramientas reproducibles y adaptables, que eleven la confiabilidad de los resultados obtenidos mediante la tecnología de extrusión, y sienten las bases para la mejora continua en procesos de manufactura aditiva dentro del contexto académico e industrial.

1. Se identificó que existen siete tipos distintos de tecnologías de manufactura aditiva, las cuales comparten el mismo proceso de fabricación. Además, se identificaron un total de 29 variables asociadas a las diferentes etapas del proceso de fabricación aditiva por MEX, clasificadas según su influencia teórica en la precisión dimensional de las piezas fabricadas, lo cual permitió establecer una base conceptual robusta que facilitó la selección de los factores experimentales más relevantes
2. Se determinó que los factores de posición en la plataforma, el tamaño de la pieza fabricada, el eje respecto al cual se mide, el ciclo de fabricación y si se arranca o no la pieza antes de medirla influyen significativamente en la precisión dimensional de las piezas fabricadas, por lo que todas deben ser tomadas en cuenta al momento de confeccionar una pieza mediante MEX.
3. Se diseñó una cámara de fabricación en base a las recomendaciones de expertos en FA, la cual permite un ambiente controlado de variables medioambientales, las cuales fueron establecidas como importantes en la afectación de la precisión dimensional tanto por la literatura revisada como por los expertos.
4. Se logró determinar la configuración óptima de factores significativos para cada experimento realizado. Sin embargo, una configuración optimizada en común no fue

posible ya que los resultados difieren entre todos los experimentos. Al final de la experimentación, se logró una incertidumbre combinada del proceso de FA para mediciones entre 5 y 10 mm de 0,2 mm. Además, se observó una mejora del 66,7 % en la precisión, evidenciada por la reducción de la desviación estándar de 0,27 mm a 0,0898 mm. Sin embargo, la exactitud disminuyó en un 28,7 %, con un aumento en el sesgo de la media de 0,15 mm a 0,193 mm, efecto atribuido al incremento en el tamaño de las piezas, ya que la incertidumbre total aumentó al aumentar el tamaño.

5. Se estableció una estrategia de mejoramiento de la precisión dimensional de las piezas fabricadas a partir de la compensación geométrica, la optimización de la posición, el monitoreo ambiental y la estandarización del corte. Se confeccionaron formatos de presentación de resultados que exponen la información técnica para la toma de decisiones.

## **B. Recomendaciones**

1. Se recomienda el desarrollo y la implementación de un modelo predictivo que, a partir de las mediciones realizadas, permita estimar las desviaciones dimensionales y establecer las compensaciones necesarias directamente en el modelo CAD. Esto facilita la corrección sistemática de errores antes de la fabricación, mejorando la precisión y exactitud de las piezas fabricadas mediante MEX y optimizando el proceso de ajuste dimensional.
2. Se recomienda explorar el efecto de los demás factores identificados teóricamente, pero no sin antes definir las causas de la variación de los factores ya estudiados, a fin de entender en profundidad el por qué de las diferencias observadas sin añadir capas de complejidad extra que entorpezcan el análisis.
3. Se aconseja primero realizar el mismo análisis con otras máquinas de la misma tecnología antes de intentar estudiar otras tecnologías de FA, a fin de establecer si el comportamiento de lo visto en la Prusa i3 MK3S es común para todas las MFA por MEX o si cada máquina se comporta de manera diferente.
4. Dado que se observó que las variables medioambientales sí afectan el proceso de FA, se recomienda considerar opciones para su control, como puede ser un ventilador silencioso, utilizado en modo de extracción, y un calefactor cerámico activado por relé para controlar la temperatura, mientras que la humedad se podría gestionar con un deshumidificador termoeléctrico tipo Peltier, aunque para un menor

presupuesto, es posible emplear medios pasivos como sílica gel en compartimentos ventilados.

5. Se recomienda la ejecución de ensayos adicionales orientados a determinar, mediante análisis estadístico, si la incorporación de la cámara de fabricación controlada generó un impacto estadísticamente significativo en la precisión dimensional de las piezas obtenidas.
6. Se sugiere realizar un análisis comparativo de factibilidad técnica y económica entre dos alternativas: (i) diseñar y construir una nueva cámara de fabricación que integre las recomendaciones de diseño emitidas por los especialistas, o (ii) modificar la cámara previamente utilizada en los experimentos con cubos para adaptarla a dichos lineamientos.

## VII. APÉNDICES

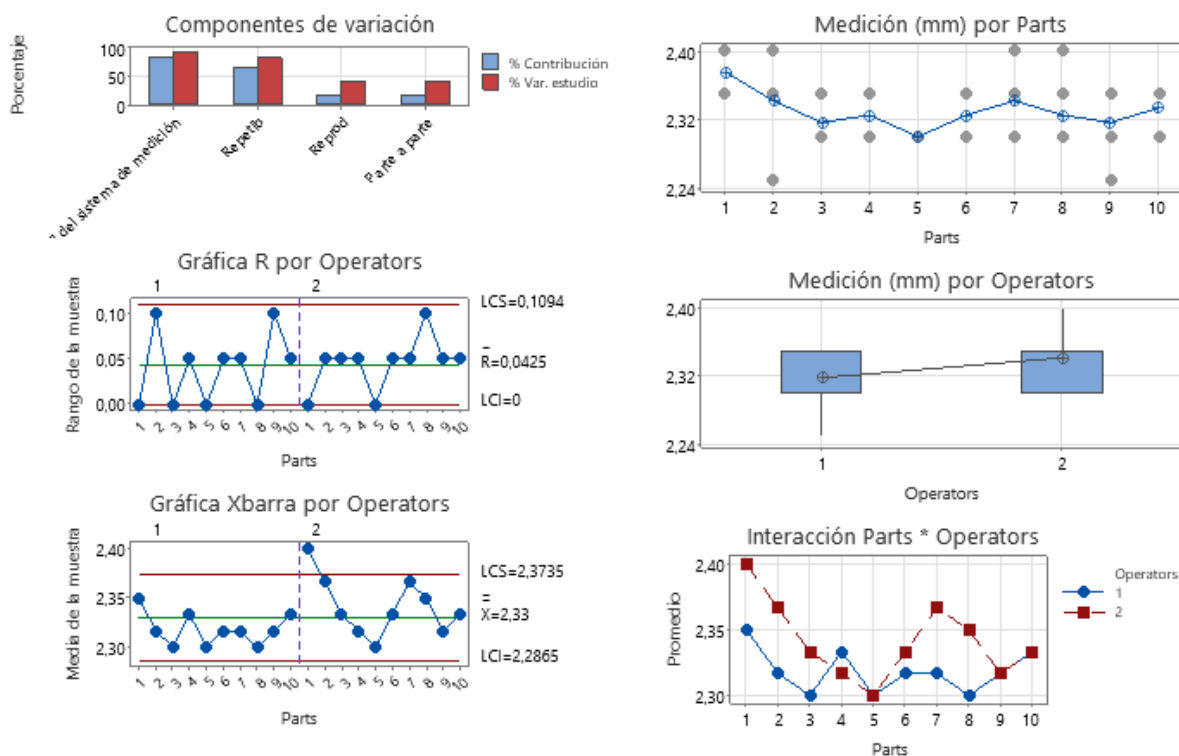
Fuente	GL	SC	MC	F	P
Parts	9	0.0218333	0.0024259	2.33929	0.111
Operators	1	0.0081667	0.0081667	7.87500	0.021
Parts * Operators	9	0.0093333	0.0010370	1.13131	0.364
Repetibilidad	40	0.0366667	0.0009167		
Total	59	0.0760000			

$\alpha$  para eliminar el término de interacción = 0.05

Apéndice No. 1. Resultados del ANOVA realizado para la Primera iteración del Estudio del Sistema de Medición.

Fuente	CompVar	IC de 95%	%Contribución	
			(de CompVar)	IC de 95%
Gage R&R total	0.0011797	(0.001, 0.278)	82.64	(48.25, 99.93)
Repetibilidad	0.0009388	(0.001, 0.001)	65.76	(0.34, 91.27)
Reproducibilidad	0.0002409	(0.000, 0.277)	16.88	(1.64, 99.55)
Operators	0.0002409	(0.000, 0.277)	16.88	(1.64, 99.55)
Parte a parte	0.0002479	(0.000, 0.001)	17.36	(0.07, 51.75)
Variación total	0.0014276	(0.001, 0.278)	100.00	

Apéndice No. 2. Resultados del cálculo del porcentaje de contribución en la variación total de cada componente del sistema de medición de la Primera iteración del estudio del sistema de medición.



Apéndice No. 3. Gráficas de control del comportamiento de las diferentes piezas según el operario que las midió para la Primera iteración del estudio del sistema de medición. .

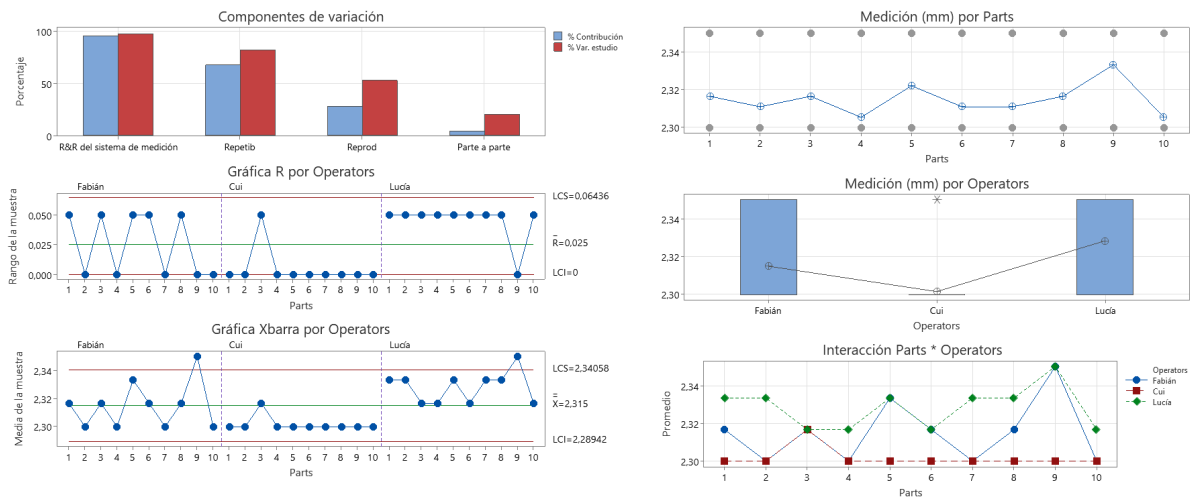
Fuente	GL	SC	MC	F	P
Parts	9	0.0055833	0.0006204	1.8611	0.125
Operators	2	0.0106667	0.0053333	16.0000	0.000
Parts * Operators	18	0.0060000	0.0003333	0.8000	0.692
Repetibilidad	60	0.0250000	0.0004167		
Total	89	0.0472500			

$\alpha$  para eliminar el término de interacción = 0.05

Apéndice No. 4. Resultados del ANOVA realizado para la Segunda iteración del Estudio del Sistema de Medición. .

Fuente	CompVar	IC de 95%	%Contribución (de CompVar)	IC de 95%
Gage R&R total	0.0005620	(0.000, 0.007)	95.78	(74.23, 100.00)
Repetibilidad	0.0003974	(0.000, 0.001)	67.74	(5.35, 91.89)
Reproducibilidad	0.0001645	(0.000, 0.007)	28.04	(7.22, 94.20)
Operators	0.0001645	(0.000, 0.007)	28.04	(7.22, 94.20)
Parte a parte	0.0000248	(0.000, 0.000)	4.22	(0.00, 25.77)
Variación total	0.0005867	(0.000, 0.007)	100.00	

Apéndice No. 5. Resultados del cálculo del porcentaje de contribución en la variación total de cada componente del sistema de medición de la Segunda iteración del estudio del sistema de medición. .



Apéndice No. 6. Gráficas de control del comportamiento de las diferentes piezas según el operario que las midió para la Segunda iteración del estudio del sistema de medición.

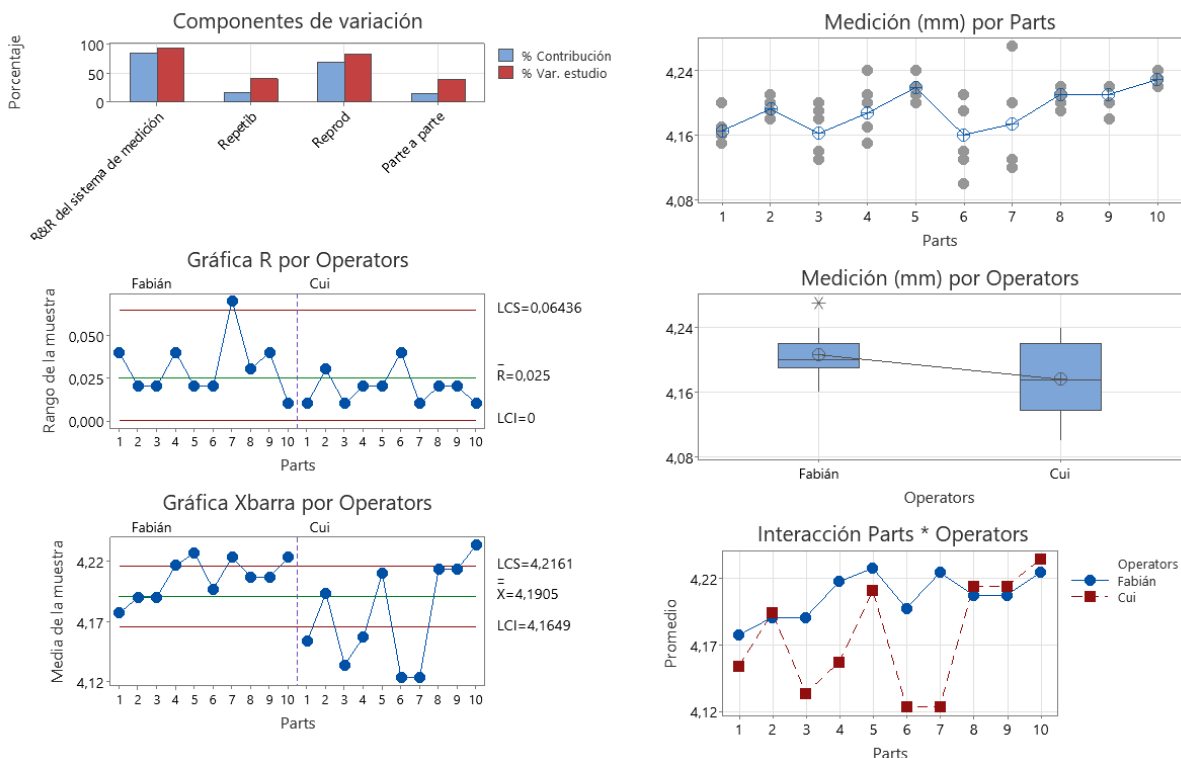
Fuente	GL	SC	MC	F	P
Parts	9	0.0341350	0.0037928	1.62432	0.241
Operators	1	0.0138017	0.0138017	5.91078	0.038
Parts * Operators	9	0.0210150	0.0023350	9.21711	0.000
Repetibilidad	40	0.0101333	0.0002533		
Total	59	0.0790850			

$\alpha$  para eliminar el término de interacción = 0.05

Apéndice No. 7. Resultados del ANOVA realizado para la Tercera iteración del Estudio del Sistema de Medición.

Fuente	CompVar	IC de 95%	%Contribución (de CompVar)	IC de 95%
Gage R&R total	0.0013294	(0.001, 0.469)	84.55	(40.11, 100.00)
Repetibilidad	0.0002533	(0.000, 0.000)	16.11	(0.05, 30.82)
Reproducibilidad	0.0010761	(0.000, 0.469)	68.44	(28.08, 100.00)
Operators	0.0003822	(0.000, 0.468)	24.31	(0.00, 99.72)
Operators*Parts	0.0006939	(0.000, 0.003)	44.13	(0.15, 100.00)
Parte a parte	0.0002430	(0.000, 0.002)	15.45	(0.00, 59.89)
Variación total	0.0015724	(0.001, 0.470)	100.00	

Apéndice No. 8. Resultados del cálculo del porcentaje de contribución en la variación total de cada componente del sistema de medición de la Tercera iteración.



Apéndice No. 9. Gráficas de control del comportamiento de las diferentes piezas según el operario que las midió para la Tercera iteración del estudio del sistema de medición.

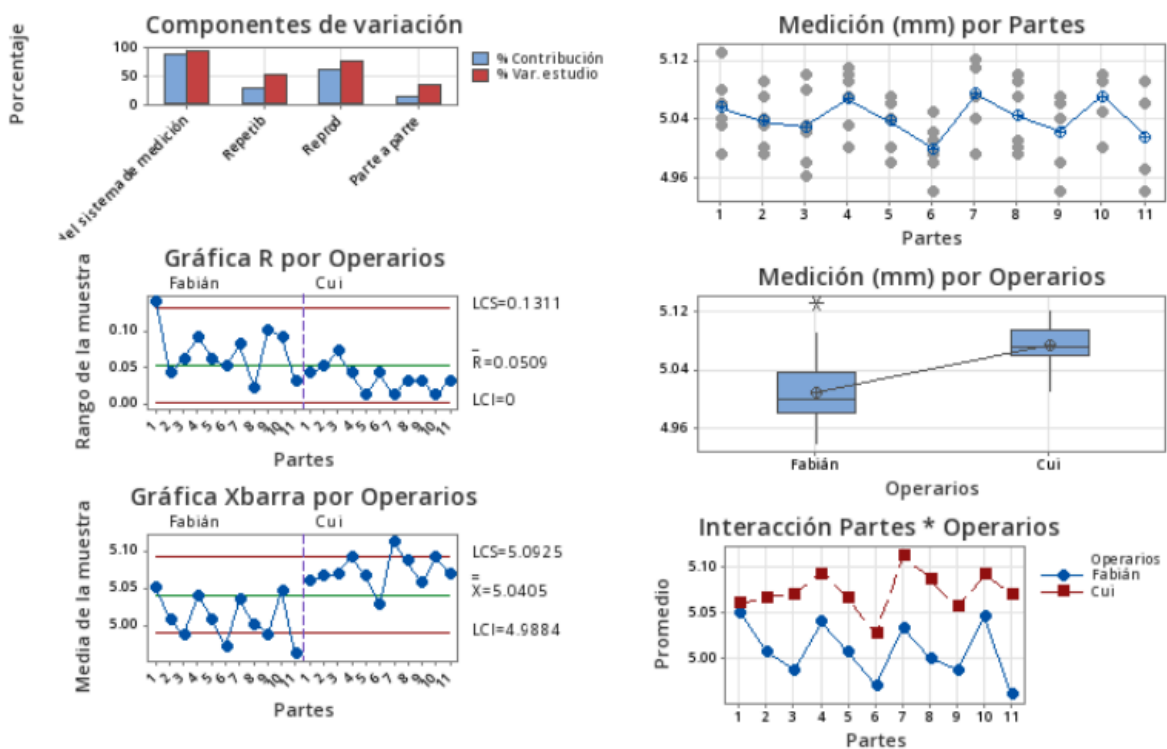
Fuente	GL	SC	MC	F	P
Partes	10	0.034870	0.0034870	3.4712	0.031186
Operarios	1	0.070038	0.0700379	69.7210	0.000008
Partes * Operarios	10	0.010045	0.0010045	1.0541	0.416713
Repetibilidad	44	0.041933	0.0009530		
Total	65	0.156886			

$\alpha$  para eliminar el término de interacción = 0.05

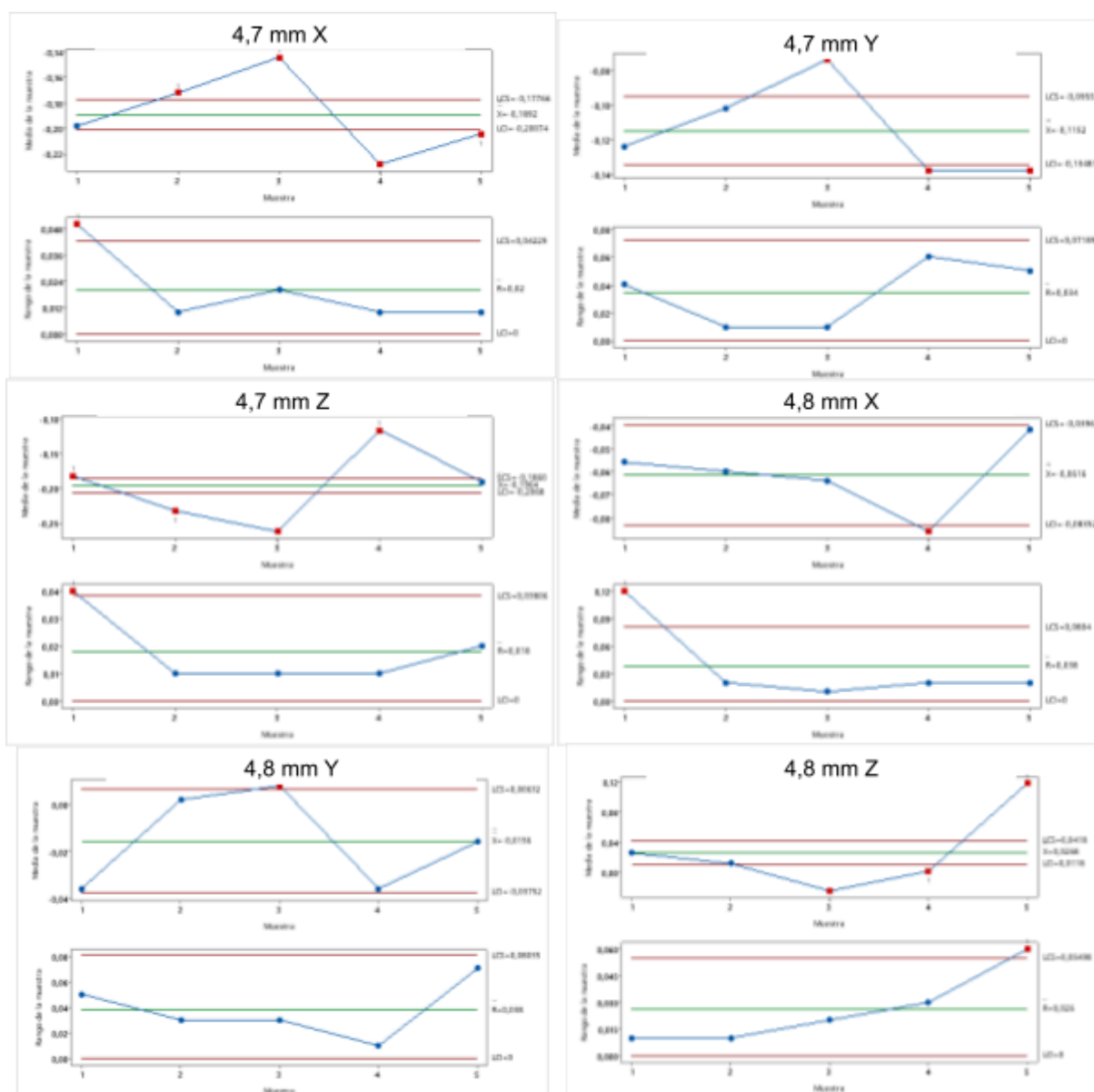
Apéndice No. 10. Resultados del ANOVA realizado para la Cuarta iteración del Estudio del Sistema de Medición.

Fuente	CompVar	IC de 95%	%Contribución (de CompVar)	IC de 95%
<input type="checkbox"/> Gage R&R total	0.0030558	(0.001; 2.162)	87.90	(58.52; 99.98)
Repetibilidad	0.0009626	(0.001; 0.001)	27.69	(0.04; 61.20)
<input type="checkbox"/> Reproducibilidad	0.0020932	(0.000; 2.161)	60.21	(20.39; 99.93)
Operarios	0.0020932	(0.000; 2.161)	60.21	(20.39; 99.93)
Parte a parte	0.0004207	(0.000; 0.002)	12.10	(0.02; 41.48)
Variación total	0.0034765	(0.002; 2.162)	100.00	

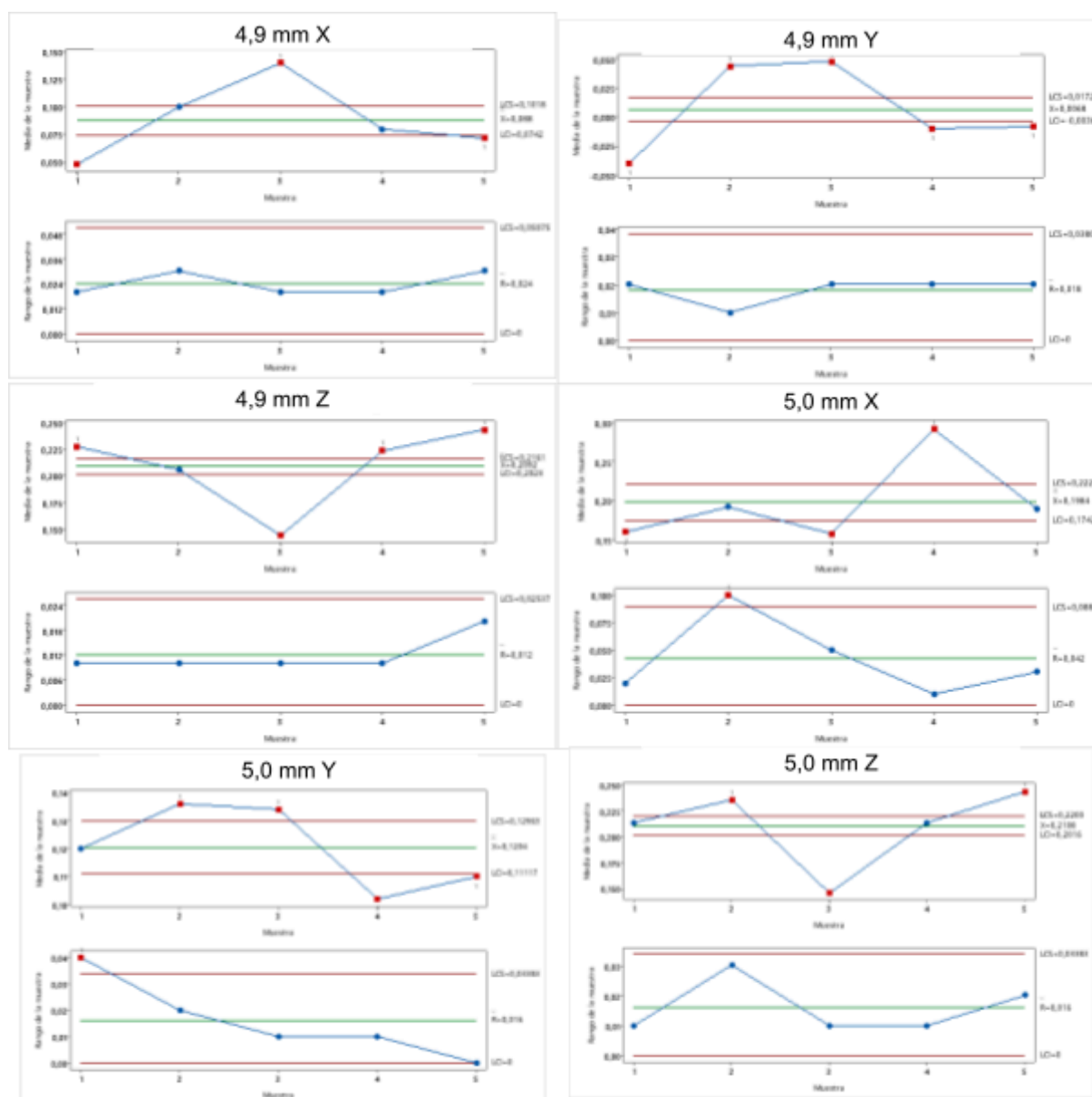
Apéndice No. 11. Resultados del cálculo del porcentaje de contribución en la variación total de cada componente del sistema de medición de la cuarta iteración del estudio del sistema de medición.



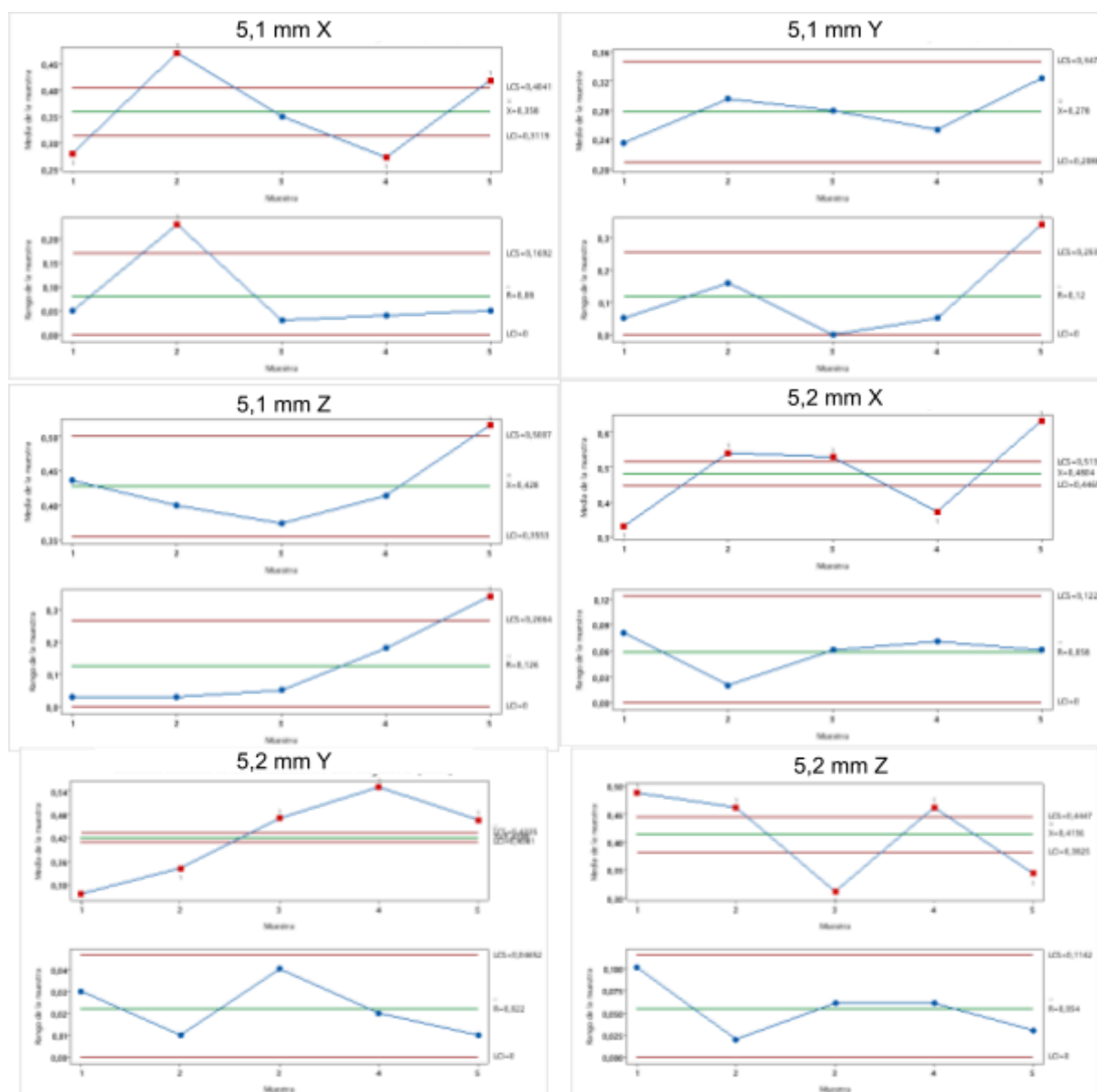
Apéndice No. 12. Gráficas de control del comportamiento de las diferentes piezas según el operario que las midió para la cuarta iteración del estudio del sistema de medición.



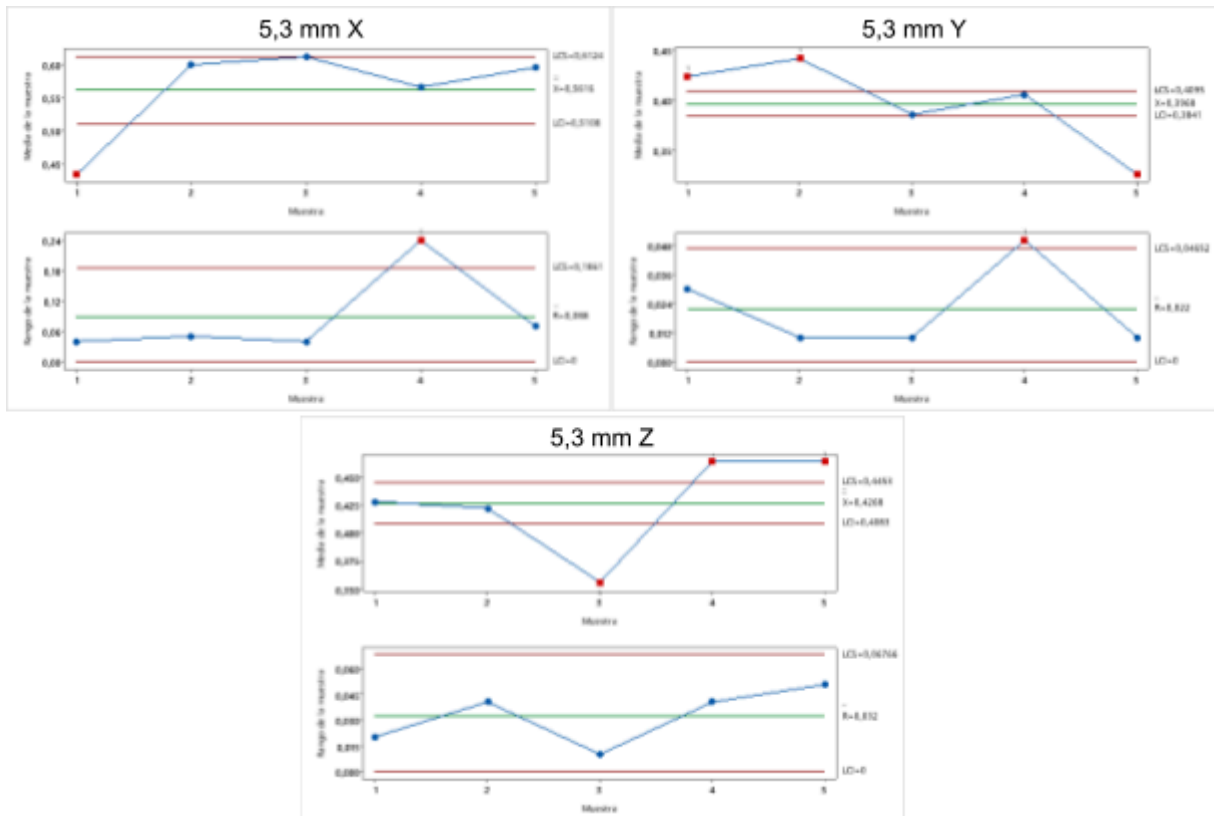
Apéndice No. 13. Gráficas de control del comportamiento de los cubos de 4,7 mm y 4,8 mm según el eje en el cual se midió para el experimento Cubo-E02-XYZ



Apéndice No. 14. Gráficas de control del comportamiento de los cubos de 4,9 mm y 5,0 mm según el eje en el cual se midió para el experimento Cubo-E02-XYZ.



Apéndice No. 15. Gráficas de control del comportamiento de los cubos de 5,1 mm y 5,2 mm según el eje en el cual se midió para el experimento Cubo-E02-XYZ.



Apéndice No. 16. Gráficas de control del comportamiento del cubo de 5,3 según el eje en el cual se midió para el experimento Cubo-E02-XYZ.

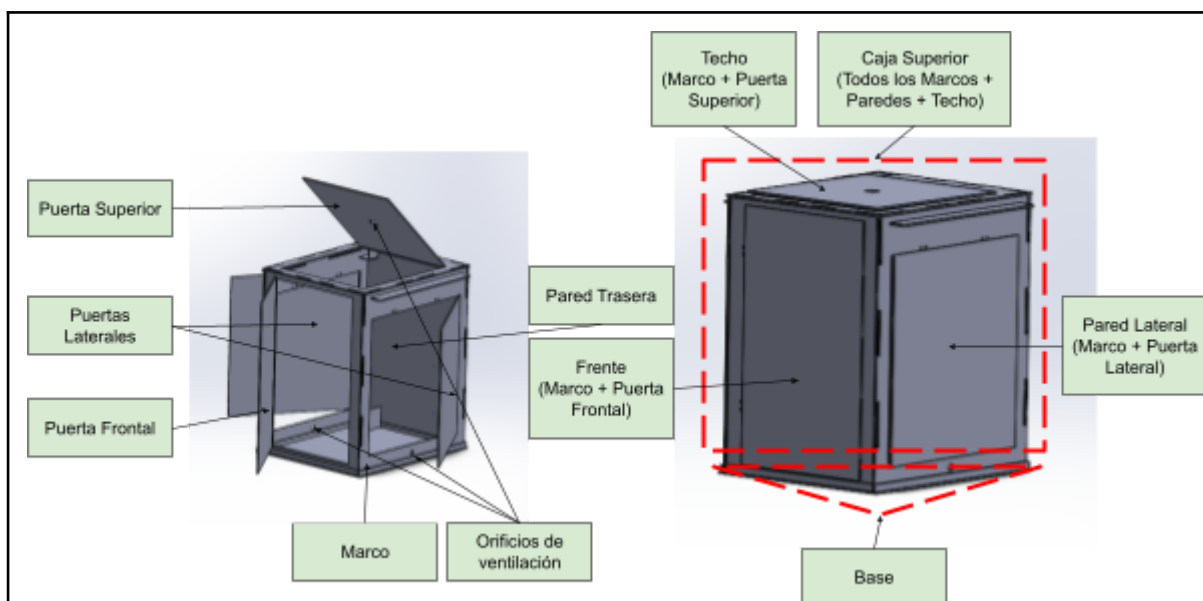
### Encuesta para decisión de propuesta de cámara de fabricación

Se ha diseñado una propuesta de cámara de fabricación que albergue la máquina de fabricación aditiva i3 MK3 de Prusa, la cual funciona a partir de la tecnología de extrusión de material. Hemos analizado algunas posibilidades y reducido las alternativas de elección a las siguientes. Le solicitamos una evaluación de las propuestas señaladas, pero si tiene alguna sugerencia u observación, agradecemos cualquier anotación. ¡Agradecemos de antemano su participación!

**Persona encuestada:** \_\_\_\_\_.

**Fecha:** \_\_\_\_\_.

Hemos realizado el siguiente dibujo señalando las partes necesarias para facilitar el entendimiento de los que se pregunta:



### Requerimientos de Estructura

1. El material debe resistir temperaturas elevadas (no mayores a 60 °C) sin deformarse, pero al mismo tiempo presentar facilidad para ver el interior del enclosure.

Alternativa	En desacuerdo	Neutral	En acuerdo	No sé
Toda la estructura en acrílico				
Toda la estructura en policarbonato				
Marco en policarbonato, pared trasera y puertas en acrílico				
Marco y pared trasera en policarbonato, puertas en acrílico				
Marco en MDF, pared trasera y puertas en acrílico				
Otro (especificar en el espacio de abajo)				

2. Debe ser modular, es decir, se debe poder armar y desarmar para aumentar el tamaño de la cámara de fabricación con nuevos módulos, a fin de que pueda funcionar con impresoras de mayor tamaño, en caso de necesidad.

Alternativa	En desacuerdo	Neutral	En acuerdo	No sé
La base puede ser extraída del resto para adaptar otra no plana, sino con forma de caja, para ganar altura				

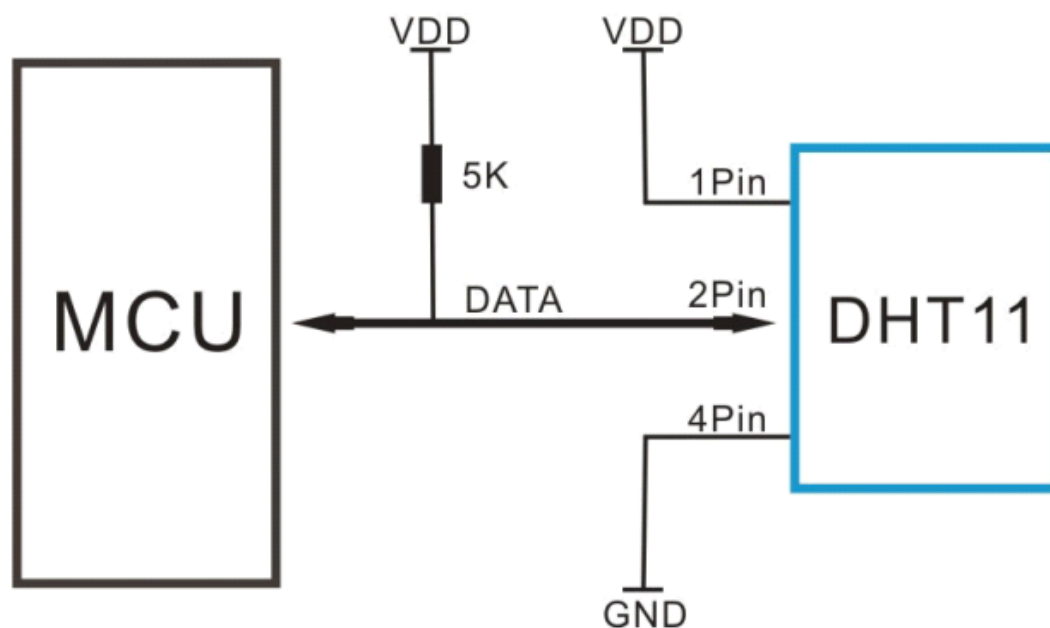
El techo puede ser extraído del resto para adaptar otro no plano, sino con forma de caja, para ganar altura				
Otro (especificar en el espacio de abajo)				
<hr/> <hr/>				
3. Se debe poder acceder al interior de la cámara de fabricación para manipular piezas, equipo, insumos, extraer plataforma con pieza elaborada, entre otros.				
Alternativa	En desacuerdo	Neutral	En acuerdo	No sé
Una puerta al frente y una puerta en cada pared lateral				
Dos puertas al frente y una puerta en cada pared lateral				
Una puerta al frente y una puerta en el techo				
Dos puertas al frente y una puerta en el techo				
Otro (especificar en el espacio de abajo)				
<hr/> <hr/>				
Regulación de condiciones ambientales en el interior de la cámara de fabricación				
1. ¿Qué tan importante es regular los siguientes parámetros dentro del ambiente de trabajo?				
Parámetros	Nada	Poco	Mucho	No sé
Temperatura				
Humedad				
Presión				
Flujo de aire (sin crear corrientes)				
Otro (especificar en el espacio de abajo)				
<hr/> <hr/>				
2. ¿Cuántos sensores colocaría y dónde?				
Alternativa	En desacuerdo	Neutral	En acuerdo	No sé

Dos sensores para medir cada variable, uno contiguo al techo y otro contiguo a la base				
Un sensor para medir cada variable, a la mitad de la cámara de fabricación.				
Un sensor para medir cada variable, contiguo al techo				
Un sensor para medir cada variable, contiguo a la base				
Otro (especificar en el espacio de abajo)				
<hr/> <hr/>				
<p>3. ¿Cuál debe ser la distribución de los orificios para facilitar la evacuación del aire? Por ahora, solo se va a controlar de manera manual, con tapones que cubren o abren los orificios. Estos permitirían la evacuación de aire sin crear corrientes que afecten el proceso.</p>				
<b>Alternativa</b>	<b>Nada</b>	<b>Poco</b>	<b>Mucho</b>	<b>No sé</b>
Varios orificios de 3 mm de diámetro, aproximadamente, ubicados en toda la superficie de las paredes y el techo. El flujo se controla con tapones.				
Dos orificios de 20 mm y uno de 40 mm de diámetro, aproximadamente, ubicados en las paredes laterales del marco y en el centro del techo, respectivamente (mostrados en el dibujo). Para regular el flujo de aire se utilizará un regulador de aire constante (Damper).				
Otro (especificar en el espacio de abajo)				
<hr/> <hr/> <hr/>				
<p>Protección contra riesgos a usuarios del sistema de fabricación aditiva:</p>				
<p>1. ¿Qué tan importante es considerar las protecciones contra los siguientes riesgos a usuarios durante la ejecución del proceso de fabricación aditiva?</p>				
<b>Riesgos</b>	<b>Nada</b>	<b>Poco</b>	<b>Mucho</b>	<b>No sé</b>
Emisión de compuestos orgánicos volátiles (COVs)				

Emisión de partículas ultrafinas (UFPs)				
Acumulación de calor y riesgos de incendio				
Riesgos mecánicos: Atrapamientos y quemaduras				
Riesgos eléctricos: Riesgos de cortocircuitos o descargas eléctricas				
Desprendimiento de piezas				
Otro (especificar en el espacio de abajo)				
<hr/> <hr/>				
<p>Protección contra riesgos de la calidad de la pieza en elaboración</p> <p>2. ¿Qué tan importante es considerar las siguientes protecciones contra los siguientes riesgos a la pieza en elaboración durante la ejecución del proceso de impresión?</p>				
<b>Riesgos</b>	<b>Nada</b>	<b>Poco</b>	<b>Mucho</b>	<b>No sé</b>
Ingreso de polvo				
Ingreso de corrientes de aire				
Ingreso de objetos que produzcan un disfuncionamiento de la impresora				
Acumulación de electricidad estática				
Vibraciones o movimientos no controlados				
Otro (especificar en el espacio de abajo)				
<hr/> <hr/>				

Apéndice No. 17. Encuesta sobre el diseño de la cámara de fabricación propuesta para la máquina de fabricación aditiva utilizada en el laboratorio.

## VIII. ANEXOS



Anexo No. 1. Arreglo del circuito requerido por el sensor de temperatura y humedad utilizado en el experimento Cubo-E01-XYZ (OSEPP Electronics, 2018).

### 1. Patrones y equipo auxiliar empleados para la calibración

Pag. 2 de 3

Patrón o equipo auxiliar empleado	Características	Identificación	Trazabilidad	Otras características metrológicas
Juego de bloques patrón en milímetros de 47 piezas de cerámica	Marca: Insize Serie: 47090015 Código: 4105-47 Número de activo TEC: 62101	EFD-M-027	N/A	Clase A5-1
Barotermohigrómetro	Marca: Traceable Modelo: 6530 Serie: 210028751	EFD-T-001	Certificado No. 6530-11875532 del 14 de enero de 2021	Número de activo TEC: 90927 Resolución: 1 hPa; 0,1 °C y 1 % Errores máximos: ±4 hPa, ±0,4 °C y ±3 %

Anexo No. 2. Resultados de la calibración realizada por el Laboratorio de Metrología del TEC (Parte 1).

## 2. Resultados de la calibración

### 2.1 Prueba de excentricidad

Longitud nominal del bloque empleado: 100 mm

Posición en la mandíbula	Indicaciones del vernier			Promedio
	(mm)	(mm)	(mm)	
Exterior	99,94	99,94	99,96	99,947
Central	99,97	99,97	100,00	99,980
Interior	100,00	100,00	100,02	100,007

### 2.1 Prueba de error de indicación

Longitud de referencia (mm)	Indicación del instrumento sujeto a calibración (mm)	Error de indicación (mm)	Incertidumbre expandida (k=2; distribución normal, 95,45 %) (mm)
5,000	5,000	0,000	0,021
10,000	10,000	0,000	0,021
20,000	19,997	-0,003	0,022
30,000	30,000	0,000	0,021
50,000	50,004	0,004	0,022
70,000	69,998	-0,002	0,022
90,000	89,993	-0,007	0,022
100,000	99,999	-0,001	0,022
150,000	149,996	-0,004	0,023
190,000	190,006	0,006	0,023

Pág. 3 de 3

## 3. Observaciones

a) La incertidumbre reportada corresponde a una incertidumbre expandida con un factor de cobertura  $k = 2$  correspondiente a una distribución normal para una probabilidad de cobertura del 95,45 %.

b) La incertidumbre de medida se ha estimado conforma a la *Guía para la expresión de la incertidumbre de medida* JCGM 100:2008, e incluye la incertidumbre por la resolución, la resolución del cero, la repetibilidad, el error por excentricidad, la falta de paralelismo entre mandíbulas, el error por adherencia entre bloques, el error máximo permitido de los patrones, la deriva de los patrones y por los efectos de expansión térmica.

c) Las condiciones ambientales del sitio donde se realizó la calibración correspondieron a:

Temperatura:	21,20 °C ± 0,49 °C
Humedad relativa:	75,0 % ± 3,7 %
Presión atmosférica:	861,0 hPa ± 4,9 hPa

d) Este Certificado de Calibración sólo ampara las mediciones reportadas en el momento y en las condiciones ambientales de uso en que se realizó la calibración.

e) Los resultados emitidos en este certificado se refieren únicamente al objeto calibrado y a las magnitudes especificadas en el momento en que se realizó la calibración.

Anexo No. 3. Resultados de la calibración realizada por el Laboratorio de Metrología del  
TEC (Parte 2).

## VIII. BIBLIOGRAFÍA

- 9altitudes. (2019, 20 de agosto). *Qué es CAD, para qué sirve y qué ventajas tiene*. 9altitudes.  
<https://9altitudes.es/aprende-y-conecta/articulos/que-es-cad-para-que-sirve-y-que-ventajas-tiene>
- Agassant, J.-F., Pigeonneau, F., Sardo, L., & Vincent, M. (2019). Flow analysis of the polymer spreading during extrusion additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 29, 100794. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100794>
- Ahn, D.-G. (2021). Directed energy deposition (DED) process: State of the art. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 8(2), 703–742. <https://doi.org/10.1007/s40684-020-00302-7>
- Ai, J.-R., Li, S., & Vogt, B. D. (2022). Increased strength in carbon-poly(ether ether ketone) composites from material extrusion with rapid microwave post processing. *Additive Manufacturing*, 60, 103209. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.103209>
- Ali, J. M., & Murugan, M. (2017). Surface roughness characterisation of turned surfaces using image processing. *International Journal of Machining and Machinability of Materials*, 19(4), 394. <https://doi.org/10.1504/ijmmm.2017.086166>
- Alammar, A., Kois, J. C., Revilla-León, M., & Att, W. (2022). Additive Manufacturing Technologies: Current status and future perspectives. *Journal of Prosthodontics*, 31(S1), 4–12. <https://doi.org/10.1111/jopr.13477>
- Antić, J., Mišković, Mitrović, R., Stamenić, Z., & Antelj, J. (2023). The risk assessment of 3D printing FDM Technology. *Procedia Structural Integrity*, 48, 274–279. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2023.07.132>
- Archer, G. C. (1996). *Object-Oriented Finite Element Analysis* (Tesis). ProQuest One Academy. Accesado el 22 de febrero de 2025, de <https://www.proquest.com/docview/304322984?fromopenview=true&pq-origsite=scholar&sourcetype=Dissertations%20%20Theses>.
- Arduino. (s.f.). *Software*. Arduino. Recuperado el 4 de abril de 2025, de <https://www.arduino.cc/en/software>

- ASTM International. (s. f.). *Normas internacionales en español*.  
<https://la.astm.org/es/standards/>
- Balhara, Y. S. (2012). Indexed journal: What does it mean? *Lung India*, 29(2), 193.  
<https://doi.org/10.4103/0970-2113.95345>
- Baumann, F., Bugdayci, H., Grunert, J., Keller, F., & Roller, D. (2015). Influence of slicing tools on quality of 3D printed parts. *Computer-Aided Design and Applications*, 13(1), 14–31. <https://doi.org/10.1080/16864360.2015.1059184>
- Blanco, D., Fernandez, P., Noriega, A., Alvarez, B. J., & Valiño, G. (2019). Layer contour verification in additive manufacturing by means of commercial flatbed scanners. *Sensors*, 20(1), 1. <https://doi.org/10.3390/s20010001>
- Bourell, D. L. (2016). Perspectives on Additive Manufacturing. *Annual Review of Materials Research*, 46(1), 1–18. <https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-070115-031606>
- Bourell, D. L., Beaman, J. J., & Wohlers, T. (2020). History and evolution of Additive Manufacturing. *Additive Manufacturing Processes*, 11–18. <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v24.a0006548>
- Braconnier, D. J., Jensen, R. E., & Peterson, A. M. (2020). Processing parameter correlations in material extrusion additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 31, 100924. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100924>
- Burdick, R. K., Borrer, C. M., & Montgomery, D. C. (2005). *Design and analysis of gauge R&R studies: Making decisions with confidence intervals in random and mixed ANOVA models*. Society for Industrial and Applied Mathematics. <https://doi.org/10.1137/1.9780898718379>
- Calignano, F., Manfredi, D., Ambrosio, E. P., Biamino, S., Lombardi, M., Atzeni, E., Salmi, A., Minetola, P., Iuliano, L., & Fino, P. (2017). Overview on Additive Manufacturing Technologies. *Proceedings of the IEEE*, 105(4), 593–612. <https://doi.org/10.1109/jproc.2016.2625098>
- Cao, L., Lu, L., Liu, X., Zhang, J., Jiang, T., Tu, C., & Chen, B. (2023). Waiting time prediction for bottom-up VAT photopolymerization. *Additive Manufacturing*, 74, 103693. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2023.103693>

- CEAC. (s.f.). *¿Qué es el IDE de Arduino en robótica?*. CEAC. Recuperado el 4 de abril de 2025, de <https://www.ceac.es/blog/que-es-el-ide-de-arduino-en-robotica>
- Chohan, J. S., & Singh, R. (2017). Pre and post processing techniques to improve surface characteristics of FDM parts: A State of Art Review and Future Applications. *Rapid Prototyping Journal*, 23(3), 495–513. <https://doi.org/10.1108/rpj-05-2015-0059>
- Colosimo, B. M., Huang, Q., Dasgupta, T., & Tsung, F. (2018). Opportunities and challenges of quality engineering for Additive Manufacturing. *Journal of Quality Technology*, 50(3), 233–252. <https://doi.org/10.1080/00224065.2018.1487726>
- Chua, C. K., Leong, K. F., & Lim, C. S. (2003). *Rapid prototyping: Principles and applications in manufacturing*. World Scientific.
- Chowdhury, S., Yadaiah, N., Prakash, C., Ramakrishna, S., Dixit, S., Gupta, L. R., & Buddhi, D. (2022). Laser Powder Bed Fusion: A state-of-the-art review of the technology, materials, Properties & defects, and numerical modelling. *Journal of Materials Research and Technology*, 20, 2109–2172. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.07.121>
- Compañía Nacional de Fuerza y Luz. (2024, diciembre 17). *Tarifas vigentes*. <https://www.cnfl.go.cr/servicios/electricos/inmuebles/tramites/tarifas>
- CRCibernética. (s.f.). *PLA Filament, 1kg, 1.75mm*. <https://www.crcibernetica.com/pla-filament-1kg-1-75mm/>
- Dass, A., & Moridi, A. (2019). State of the art in directed energy deposition: From additive manufacturing to materials design. *Coatings*, 9(7), 418. <https://doi.org/10.3390/coatings9070418>
- Ding, X., Li, D., Zhang, Q., Ma, H., Yang, J., & Fan, S. (2022). Effect of ambient pressure on bead shape, microstructure and corrosion behavior of 4043 al alloy fabricated by laser coaxial wire feeding additive manufacturing in vacuum environment. *Optics & Laser Technology*, 153, 108242. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2022.108242>
- Egon, A., Bell, C., & Shad, R. (2024). Additive Manufacturing for complex geometries. *Preprints*, 2024072602, 1–12. <https://doi.org/10.20944/preprints202407.2602.v1>

- Farshidianfar, M. H., Khajepour, A., & Gerlich, A. P. (2016). Effect of real-time cooling rate on microstructure in laser additive manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*, 231, 468–478. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.01.017>
- Gapinski, B., Wieczorowski, M., Marciniak-Podsadna, L., Dybala, B., & Ziolkowski, G. (2014). Comparison of different method of measurement geometry using CMM, optical scanner and computed tomography 3D. *Procedia Engineering*, 69, 255–262. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.02.230>
- Goh, G. D., Yap, Y. L., Tan, H. K., Sing, S. L., Goh, G. L., & Yeong, W. Y. (2019). Process–structure–properties in polymer additive manufacturing via material extrusion: A Review. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 45(2), 113–133. <https://doi.org/10.1080/10408436.2018.1549977>
- Gonzalez Lugo, C. A. (2022). *The design and development of an environmentally controlled enclosure for 3D printers* (Tesis de maestría, Widener University).
- Goodridge, R., & Ziegelmeier, S. (2017). Powder bed fusion of polymers. *Laser Additive Manufacturing*, 181–204. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-100433-3.00007-5>
- Gopal, K., Nasre, M., Nimbhorkar, P., & Reddy, T. P. (2019). Many-to-one popular matchings with two-sided preferences and one-sided ties. *Lecture Notes in Computer Science*, 193–205. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-26176-4\\_16](https://doi.org/10.1007/978-3-030-26176-4_16)
- Gopen, G. D., & Swan, J. A. (1990). The science of scientific writing. *American Scientist*, 78(6), 550–558. Recuperado de [https://www.usenix.org/sites/default/files/gopen\\_and\\_swan\\_science\\_of\\_scientific\\_writing.pdf](https://www.usenix.org/sites/default/files/gopen_and_swan_science_of_scientific_writing.pdf)
- Guan, Y., Sun, X., Jin, L., Guo, X., Zhang, Z., Shui, G., & Ma, L. (2021). Development of 3D printing entity slicing software. *China Foundry*, 18(6), 587–592. <https://doi.org/10.1007/s41230-021-1090-y>
- Gülcan, O., Günaydın, K., & Tamer, A. (2021). The state of the art of material jetting—A critical review. *Polymers*, 13(16), 2829. <https://doi.org/10.3390/polym13162829>
- Günaydın, K., & Türkmen, H. S. (2018). Common FDM 3D Printing Defects. Recuperado de <https://www.researchgate.net/publication/326146283>.

- Guo, C., Zhang, M., & Bhandari, B. (2019). Model building and slicing in food 3D printing processes: A Review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 18(4), 1052–1069. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12443>
- Gutiérrez Pulido, H., & de la Vara Salazar, R. (2004). *Análisis y diseño de experimentos* (2da ed.). McGraw-Hill.
- Gutiérrez Pulido, H., & de la Vara Salazar, R. de la. (2009). *Control Estadístico de Calidad y seis sigma* (9na ed.). McGraw-Hill.
- Hernández Cordero, K. (2021). *Un recorrido por el Laboratorio de Sistemas Integrados de Manufactura (SIMTEC) del Campus Tecnológico Local San Carlos*. *Revista Ventana*, 45-46.  
<https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwihrpj67CMAxUZSDABHW4FJpcQFnoECB4QAQ&url=https%3A%2F%2Frevistas.tec.ac.cr%2Findex.php%2Fventana%2Farticle%2Fdownload%2F5937%2F5665%2F18659&usg=AOvVaw1iPQbcfApZwaCJdxJFmqKK&opi=89978449>
- Hoeller, C. (2018). Review and comparison of ASTM and ISO standards on sound transmission in buildings. *Noise Control Engineering Journal*, 258(5), 2338–2347. <https://www.ingentaconnect.com/contentone/ince/incecp/2018/00000258/00000005/art00038>
- Hsiang Loh, G., Pei, E., Gonzalez-Gutierrez, J., & Monzón, M. (2020). An overview of material extrusion troubleshooting. *Applied Sciences*, 10(14), 4776. <https://doi.org/10.3390/app10144776>
- Hyland, K., & Salager-Meyer, F. (2009). Scientific writing. *Annual Review of Information Science and Technology*, 42(1), 297–338. <https://doi.org/10.1002/aris.2008.1440420114>
- International Electrotechnical Commission. (2010). *IEC 61010-1:2010 – Safety requirements for electrical equipment for measurement, control, and laboratory use – Part 1: General requirements*. [https://www.iec.ch/standardssearch/result\\_detail?ref=60015](https://www.iec.ch/standardssearch/result_detail?ref=60015)
- International Organization for Standardization. (2006). *ISO 13732-1:2006 – Ergonomics of the thermal environment – Methods for the assessment of human responses to contact with surfaces – Part 1: Hot surfaces*. <https://www.iso.org/standard/37010.html>

International Organization for Standardization. (2010). *ISO 12100:2010 – Safety of machinery – General principles for design – Risk assessment and risk reduction*. <https://www.iso.org/standard/51528.html>

International Organization for Standardization. (2016, octubre 7). *ISO and ASTM International unveil framework for creating global additive manufacturing standards*. <https://www.iso.org/news/2016/10/Ref2124.htm>

International Organization for Standardization & ASTM International. (2019). *ISO/ASTM 52902:2019 – Manufactura aditiva – Métodos de ensayo no destructivos para piezas fabricadas mediante manufactura aditiva*. <https://www.iso.org/standard/74515.html>

International Organization for Standardization & ASTM International. (2020). *ISO/ASTM 52903-1:2020 & ISO/ASTM 52903-2:2020 – Manufactura aditiva – Especificaciones para materiales termoplásticos utilizados en extrusión de material (MEX)*. <https://www.iso.org/standard/74516.html>

International Organization for Standardization & ASTM International. (2021). *ISO/ASTM 52900:2021 – Manufactura aditiva – Principios generales – Terminología*. <https://www.iso.org/standard/74514.html>

International Organization for Standardization & ASTM International. (2023). *ISO/ASTM 52905:2023 – Manufactura aditiva – Métodos para la evaluación de calidad de piezas fabricadas mediante manufactura aditiva mediante ensayos no destructivos*. <https://www.iso.org/standard/74517.html>

International Organization for Standardization & ASTM International. (2023). *ISO/ASTM 52906:2023 – Manufactura aditiva – Directrices para la evaluación de defectos en piezas metálicas fabricadas mediante manufactura aditiva*. <https://www.iso.org/standard/74518.html>

International Organization for Standardization & ASTM International. (2018). *ISO/ASTM 52910:2018 – Manufactura aditiva – Principios y requisitos para el diseño para manufactura aditiva (DfAM)*. <https://www.iso.org/standard/74519.html>

Izalbe Izquierdo, L., Tanco, M., Viles, E., & Álvarez Sánchez-Arjona, M. J. (2007). El diseño de experimentos como herramienta para la mejora de los procesos. Aplicación de la

- metodología al caso de una catapulta. *Tecnura*, 10(20), 127–138. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=257021012011>
- Jiang, J., Xu, X., & Stringer, J. (2018). Support structures for Additive Manufacturing: A Review. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2(4), 64. <https://doi.org/10.3390/jmmp2040064>
- Jin, Y., He, Y., Fu, G., Zhang, A., & Du, J. (2017). A non-retraction path planning approach for extrusion-based additive manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 48, 132–144. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2017.03.008>
- Junk, S., & Kuen, C. (2016). Review of Open Source and Freeware CAD Systems for Use with 3D-Printing. *Procedia CIRP*, 50, 430–435. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.04.174>
- Karakurt, I., & Lin, L. (2020). 3D printing technologies: Techniques, materials, and post-processing. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 28, 134–143. <https://doi.org/10.1016/j.coche.2020.04.001>
- Kaur, P., Stoltzfus, J., & Yellapu, V. (2018). Descriptive statistics. *International Journal of Academic Medicine*, 4(1), 60. [https://doi.org/10.4103/ijam.ijam\\_7\\_18](https://doi.org/10.4103/ijam.ijam_7_18)
- Kim, H., Lin, Y., & Tseng, T.-L. B. (2018). A review on quality control in additive manufacturing. *Rapid Prototyping Journal*, 24(3), 645–669. <https://doi.org/10.1108/rpj-03-2017-0048>
- Kong, D., Guo, A., Wu, H., Zhou, X., Li, X., Qu, P., Wang, S., Han, W., & Xiang, G. (2023). Vat-photopolymerization-based complex ceramic: Optimization of slurry, printing process, and postprocessing parameters. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 21(2), 686–701. <https://doi.org/10.1111/ijac.14582>
- Kumar, A., Dixit, A. R., & Sreenivasa, S. (2024). Mechanical properties of additively manufactured polymeric composites using sheet lamination technique and fused deposition modeling: A Review. *Polymers for Advanced Technologies*, 35(4). <https://doi.org/10.1002/pat.6396>
- Lendvai, L., Fekete, I., Jakab, S. K., Szarka, G., Verebélyi, K., & Iván, B. (2024). Influence of environmental humidity during filament storage on the structural and mechanical

- properties of material extrusion 3D-printed poly(lactic acid) parts. *Results in Engineering*, 24, 103013. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103013>
- Li, M., Du, W., Elwany, A., Pei, Z., & Ma, C. (2020). Metal binder jetting additive manufacturing: A literature review. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 142(9). <https://doi.org/10.1115/1.4047430>
- Lian, Q., Yang, F., Xin, H., & Li, D. (2017). Oxygen-controlled bottom-up mask-projection stereolithography for ceramic 3D printing. *Ceramics International*, 43(17), 14956–14961. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.08.014>
- Liao, H.-S., Cheng, S.-H., & Hwu, E.-T. (2022). Method for film thickness mapping with an Astigmatic Optical Profilometer. *Sensors*, 22(8), 2865. <https://doi.org/10.3390/s22082865>
- Liu, Y., Li, Q., Ren, Z., Jiang, Z., Luo, H., & Zhang, X. (2022). Effect of process parameters on stress field of laser additive manufacturing. *Machines*, 10(12), 1197. <https://doi.org/10.3390/machines10121197>
- Luo, Y., Le Fer, G., Dean, D., & Becker, M. L. (2019). 3D printing of poly(propylene fumarate) oligomers: Evaluation of resin viscosity, printing characteristics and mechanical properties. *Biomacromolecules*, 20(4), 1699–1708. <https://doi.org/10.1021/acs.biomac.9b00076>
- Lušić, M., Barabanov, A., Morina, D., Feuerstein, F., & Hornfeck, R. (2015). Towards zero waste in additive manufacturing: A case study investigating one pressurised rapid tooling mould to ensure resource efficiency. *Procedia CIRP*, 37, 54–58. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.08.022>
- Manvatkar, V., De, A., & DebRoy, T. (2014). Heat transfer and material flow during laser assisted multi-layer additive manufacturing. *Journal of Applied Physics*, 116(12). <https://doi.org/10.1063/1.4896751>
- Martin, A. (2018, marzo 13). *¿Qué es una revista indexada? Definición y requisitos*. Biblioteca San Juan de Dios. <https://bibliosjd.org/2018/03/13/revista-indexada/>
- Marshall, G., & Jonker, L. (2010). An introduction to descriptive statistics: A review and practical guide. *Radiography*, 16(4). <https://doi.org/10.1016/j.radi.2010.01.001>

- May, T., Eslami, B., & Fouladi, K. (2021). Optimization of 3D printer enclosure environment. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 118(7–8), 2233–2246. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08034-x>
- Montgomery, D. C. (2013). *Design and analysis of Experiments* (8va ed.). John Wiley & Sons, Inc.
- Mukherjee, E., Malone, L., Tackett, E., Gunaratnam, B., & Grant, G. (2023). Monitoring the calibration of in-office 3D printers. *Dentistry Journal*, 11(1), 20. <https://doi.org/10.3390/dj11010020>
- Mwema, F. M., & Akinlabi, E. T. (2020). Basics of Fused Deposition Modelling (FDM). *SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology*, 1–15. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-48259-6\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-48259-6_1)
- Nayyar, A., & Puri, V. (2016). A review of Arduino board's, Lilypad's & Arduino shields. *Proceedings of the 3rd International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom)*, 1485–1492. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7724514>
- OSEPP Electronics. (2018). *DHT11 Technical Data Sheet (Translated Version)*. Mouser Electronics. <https://www.mouser.com/datasheet/2/758/DHT11-Technical-Data-Sheet-Translated-Version-1143054.pdf>
- Pagac, M., Hajnys, J., Ma, Q.-P., Jancar, L., Jansa, J., Stefek, P., & Mesicek, J. (2021). A review of VAT photopolymerization technology: Materials, applications, challenges, and future trends of 3D printing. *Polymers*, 13(4), 598. <https://doi.org/10.3390/polym13040598>
- Packer, A. (2019, agosto 28). *Indexación de revistas: estándares básicos y por qué son importantes*. SciELO en Perspectiva. <https://blog.scielo.org/es/2019/08/28/indexacion-de-revistas-estandares-basicos-y-por-que-son-importantes-publicado-originalmente-en-el-blog-lse-impact-of-social-science-s-en-agosto-2019/>

- Paral, S. K., Lin, D.-Z., Cheng, Y.-L., Lin, S.-C., & Jeng, J.-Y. (2023). A review of critical issues in high-speed VAT photopolymerization. *Polymers*, 15(12), 2716. <https://doi.org/10.3390/polym15122716>
- Płaczek, D. (2019). Adhesion between the bed and component manufactured in FDM technology using selected types of intermediary materials. *MATEC Web of Conferences*, 290, 01012. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201929001012>
- Piedra-Cascón, W., Krishnamurthy, V. R., Att, W., & Revilla-León, M. (2021). 3D printing parameters, supporting structures, slicing, and post-processing procedures of VAT-polymerization additive manufacturing technologies: A narrative review. *Journal of Dentistry*, 109, 103630. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2021.103630>
- Priedel, F. (25 de setiembre de 2023). *Importance of Firmware Updates for 3D Printer Maintenance*. Geek Insider. <https://geekinsider.com/importance-of-firmware-updates-for-3d-printer-maintenance/>
- Prusa Research. (s.f.). *Ambient temperature check for MK3/MK3S*. Prusa3D. [https://help.prusa3d.com/article/ambient-temperature-check-mk3-mk3s\\_161230](https://help.prusa3d.com/article/ambient-temperature-check-mk3-mk3s_161230)
- Prusa Research. (s.f.). *Manual de usuario Prusa i3 MK3S*. Prusa Research. <https://help.prusa3d.com/es/product/mk3s>
- Prusa Research. (s.f.). *Original Prusa Enclosure*. Prusa3D. <https://www.prusa3d.com/product/original-prusa-enclosure-34/>
- PTC. (s.f.). *¿Qué es CAD? | Diseño asistido por computadora (CAD)*. PTC. Recuperado el 4 de abril de 2025, de <https://www.ptc.com/en/technologies/cad>
- Rendón Suárez, P. (2018). *Estimación de la incertidumbre de medida en un calibrador tipo Vernier de acuerdo a la "Guía para la expresión de incertidumbre de la medición" (GUM)* [Tesis de licenciatura, Instituto Politécnico Nacional]. Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas.
- Repsol. (s.f.). *¿Cuánto consume un ordenador?* Repsol. <https://www.repsol.es/particulares/asesoramiento-consumo/cuanto-consume-ordenador/>

- Rezaie, R., Badrossamay, M., Ghaie, A., & Moosavi, H. (2013). Topology optimization for fused deposition modeling process. *Procedia CIRP*, 6, 521–526. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.03.098>
- Ross, D. T., & Rodriguez, J. E. (1963). Theoretical Foundations for the computer-aided design system. *Proceedings of the May 21-23, 1963, Spring Joint Computer Conference on - AFIPS '63 (Spring)*, 305. <https://doi.org/10.1145/1461551.1461589>
- Salmi, M. (2021). Additive manufacturing processes in medical applications. *Materials*, 14(1), 191. <https://doi.org/10.3390/ma14010191>
- Sampson, K. L., Deore, B., Go, A., Nayak, M. A., Orth, A., Gallerneault, M., Malenfant, P. R., & Paquet, C. (2021). Multimaterial VAT polymerization additive manufacturing. *ACS Applied Polymer Materials*, 3(9), 4304–4324. <https://doi.org/10.1021/acsapm.1c00262>
- Sánchez, C. M., & Cortés, C. J. (2005). Conceptos de diseño para manufactura (DFM) de piezas microfundidas. *Ingeniería e Investigación*, 25(3), 49–60. [http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0120-56092005000300007&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0120-56092005000300007&script=sci_arttext)
- Shen, H., Ye, X., Xu, G., Zhang, L., Qian, J., & Fu, J. (2020). 3D printing build orientation optimization for flexible support platform. *Rapid Prototyping Journal*, 26(1), 59–72. <https://doi.org/10.1108/rpj-09-2018-0252>
- Singh, R., Gupta, A., Tripathi, O., Srivastava, S., Singh, B., Awasthi, A., Rajput, S. K., Sonia, P., Singhal, P., & Saxena, K. K. (2020). Powder bed fusion process in Additive Manufacturing: An overview. *Materials Today: Proceedings*, 26, 3058–3070. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.635>
- “Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies”, ASTM F2792-12, ASTM International, 2012.
- Soares, W. D. O. S., Peruchi, R. S., Silva, R. A. V., & Rotella Junior, P. (2022). Gage R&R studies in measurement system analysis: A systematic literature review. *Quality Engineering*, 34(3), 382–403. <https://doi.org/10.1080/08982112.2022.2069505>
- Solomon, I. J., Sevel, P., & Gunasekaran, J. (2021). A review on the various processing parameters in FDM. *Materials Today: Proceedings*, 37, 509–514. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.484>

- Somohano Berrocal, Torres Jiménez, Vega Martínez y Zhong Xie (2025) realizaron un estudio experimental en impresión 3D mediante extrusión de material, enfocándose en la influencia de múltiples factores sobre la precisión dimensional.
- Suwanpreecha, C., & Manonukul, A. (2022). A review on material extrusion additive manufacturing of metal and how it compares with Metal Injection Moulding. *Metals*, 12(3), 429. <https://doi.org/10.3390/met12030429>
- Tecnológico de Costa Rica. (s.f.). ¿Qué es el TEC? <https://www.tec.ac.cr/que-es-tec>
- Tezel, T., & Kovan, V. (2021). Determination of optimum production parameters for 3D printers based on nozzle diameter. *Rapid Prototyping Journal*, 28(1), 185–194. <https://doi.org/10.1108/rpj-08-2020-0185>
- Thomas, D. S., & Gilbert, S. W. (2014). Costs and cost effectiveness of additive manufacturing. *National Institute of Standards and Technology*. <https://doi.org/10.6028/nist.sp.1176>
- Thompson, A., Maskery, I., & Leach, R. K. (2016). X-ray computed tomography for Additive Manufacturing: A Review. *Measurement Science and Technology*, 27(7), 072001. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/27/7/072001>
- Tognana, S., Frosinini, C., & Montecinos, S. (2024). Influence of bed temperature on the final properties of PLA parts manufactured by material extrusion. *Rapid Prototyping Journal*, 31(2), 359–370. <https://doi.org/10.1108/rpj-08-2024-0323>
- TotalEnergies. (2022, octubre 25). ¿Adivinas cuánta energía consume una impresora 3D? TotalEnergies. <https://www.totalenergies.es/es/pymes/blog/consumo-electrico-impresora-3d>
- Trujillo Flores, E., Guerrero Vacas, G., Rodríguez Alabanda, Ó., & Molero Romero, E. (2021). *Metrología dimensional* (Versión 4.0). Universidad de Córdoba. <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>
- Tyagi, K., Rane, C., Harshvardhan, & Manry, M. (2022). Regression analysis. *Artificial Intelligence and Machine Learning for EDGE Computing*, 53–63. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-824054-0.00007-1>

- Universidad Católica San Pablo. (s.f.). *¿Qué es la redacción académica y científica?*. Recuperado el 4 de abril de 2025, de <https://postgrado.ucsp.edu.pe/articulos/que-es-redaccion-academica-cientifica/>
- van der Linden, P. J., Popov, A. M., & Pontoni, D. (2020). Accurate and rapid 3D printing of microfluidic devices using wavelength selection on a DLP printer. *Lab on a Chip*, 20(22), 4128–4140. <https://doi.org/10.1039/d0lc00767f>
- Vidhu, N., Gupta, A., Salajeghe, R., Spangenberg, J., & Marla, D. (2023). A computational model for stereolithography apparatus (SLA) 3D printing. *Progress in Additive Manufacturing*, 9(6), 1605–1619. <https://doi.org/10.1007/s40964-023-00525-5>
- Vyas, A., Garg, V., Ghosh, S. B., & Bandyopadhyay-Ghosh, S. (2022). Photopolymerizable resin-based 3D printed biomedical composites: Factors affecting resin viscosity. *Materials Today: Proceedings*, 62, 1435–1439. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.01.172>
- Walpole, R. E., Myers, R. H., & Myers, S. L. (2012). *Probabilidad y estadística para Ingeniería y Ciencias* (9na ed.). Pearson Educación.
- Wiberg, A., Persson, J., & Ölvander, J. (2019). Design for Additive Manufacturing – A review of available design methods and software. *Rapid Prototyping Journal*, 25(6), 1080–1094. <https://doi.org/10.1108/rpj-10-2018-0262>
- Wong, K. V., & Hernandez, A. (2012). A review of Additive Manufacturing. *ISRN Mechanical Engineering*, 2012, 1–10. <https://doi.org/10.5402/2012/208760>
- Wu, H.-C., & Chen, T.-C. T. (2018). Quality Control Issues in 3D-Printing Manufacturing: A Review. *Rapid Prototyping Journal*, 24(3), 607–614. <https://doi.org/10.1108/rpj-02-2017-0031>
- Xu, J., Gu, X., Ding, D., Pan, Z., & Chen, K. (2018). A review of slicing methods for directed energy deposition based additive manufacturing. *Rapid Prototyping Journal*, 24(6), 1012–1025. <https://doi.org/10.1108/rpj-10-2017-0196>
- Xu, Z., Hensleigh, R., Gerard, N. J., Cui, H., Oudich, M., Chen, W., Jing, Y., & Zheng, X. (Rayne). (2021). VAT photopolymerization of fly-like, complex micro-architectures with dissolvable supports. *Additive Manufacturing*, 47, 102321. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102321>

- Yap, Y. L., Wang, C., Sing, S. L., Dikshit, V., Yeong, W. Y., & Wei, J. (2017). Material Jetting Additive Manufacturing: An experimental study using designed metrological benchmarks. *Precision Engineering*, *50*, 275–285. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2017.05.015>
- Zhang, Y., Wu, L., Guo, X., Kane, S., Deng, Y., Jung, Y.-G., Lee, J.-H., & Zhang, J. (2017). Additive Manufacturing of metallic materials: A Review. *Journal of Materials Engineering and Performance*, *27*(1), 1–13. <https://doi.org/10.1007/s11665-017-2747-y>
- Zhong Xie, C. T., Garita Chacón, F., Meneses Guzmán, M., & Mora Watson, I. (2025a, January 28). Caracterización de impresora Formlabs Form 3B. Cartago; Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Zhong Xie, C. T., Garita Chacón, F., Meneses Guzmán, M., & Mora Watson, I. (2025b, January 28). Caracterización de impresora Original Prusa I3 MK3. Cartago; Instituto Tecnológico de Costa Rica.