



## Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: [www.riit.com.mx](http://www.riit.com.mx)

### Verificación de características dimensionales de piezas elaboradas con la tecnología de modelado por deposición fundida (FDM)

### Verification of dimensional characteristics of parts built with fused deposition modeling (FDM) technology

López-Arriquivez, M.<sup>1,2</sup>, Brau-Ávila, A.<sup>2</sup>, Icasio-Hernández, O.<sup>3</sup>, Anaya-Eredias, C.<sup>2</sup>, Valenzuela-Galván, M.<sup>2</sup>, Herrera-Jiménez, V.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Adscripción a posgrado, Doctorado en Manufactura Avanzada CIATEQ, Aguascalientes, Aguascalientes.

<sup>2</sup> Departamento de Ingeniería Industrial y de Sistemas; Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora.

<sup>3</sup> Centro Nacional de Metrología (CENAM), Km. 4.5 carretera a los Cués, el Marqués, 76246, Querétaro, México.  
[miguelangel.lopez@unison.mx](mailto:miguelangel.lopez@unison.mx); [agustin.brau@unison.mx](mailto:agustin.brau@unison.mx); [oicasio@cenam.mx](mailto:oicasio@cenam.mx); [carlos.anaya@unison.mx](mailto:carlos.anaya@unison.mx);  
[margarita.valenzuela@unison.mx](mailto:margarita.valenzuela@unison.mx); [victor.herrera@unison.mx](mailto:victor.herrera@unison.mx)

**Innovación tecnológica:** Verificación metrológica de impresoras 3D.

**Área de aplicación industrial:** Metrología aplicada en la Manufactura aditiva.

Recibido: 15 abril 2020

Aceptado: 08 noviembre 2021

#### Abstract

This article is focused on evaluating the dimensional and geometric characteristics of a part made by a 3D printer that uses material extrusion technology. To evaluate these characteristics, a reference part designed with specific characteristics and nominal values was manufactured that allows the dimensional and geometric errors of the part to be calculated from the evaluation of the differences between the measured values and the nominal values of the characteristics. The purpose of the evaluation is to quantitatively identify the behavior and limitations of the printer, through the design and manufacture of a reference part. This work was developed in four stages, first a reference part was modeled in computer-aided software (CAD). Subsequently, the reference part was printed in five different positions on the work platform of a 3D printer. Next, the dimensional characteristics established in the design of the part were measured using a coordinate measuring machine (MMC) and finally the data were analyzed through a multivariate analysis. In this investigation, the multivariate analysis showed that the mean ( $\bar{X}$ ) of the measured values of the

characteristics of the reference part is adjusted to the means ( $\mu$ ) of their nominal values established in the design, which confirms that the measured values and the nominal values fit a normal distribution. In addition, a flatness test showed that the reference pieces presented differences that may be attributable to the fact that the printing platform of the printer under evaluation is not completely flat, presenting a decline in the lower areas. Finally, through a linearity analysis, it was shown that the characteristics of circular and rectangular holes, identified as, (CIR\_Y) and (DR\_ZM) respectively, present high correlation coefficient values and this allows the generation of simple linear regression models to estimate the possible geometry errors behaviour in the printer, allowing for reliable adjustments or compensations at the reference part design stage.

**Keywords:** Multivariate Analysis, Flatness, Linearity, Additive Manufacturing, Computer-aided design.

## Resumen

Este artículo está centrado en evaluar las características dimensionales y geométricas de una pieza elaborada por una impresora 3D que utiliza la tecnología de extrusión de material. Para evaluar tales características, se fabricó una pieza de referencia diseñada con características y valores nominales específicos que permita calcular los errores dimensionales y geométricos de la pieza a partir de la evaluación de las diferencias entre los valores medidos y los valores nominales de las características. El propósito de la evaluación es identificar cuantitativamente el comportamiento y limitaciones de la impresora, mediante el diseño y fabricación de una pieza de referencia. Este trabajo se desarrolló en cuatro etapas, primero se modela una pieza de referencia en un software asistido por computadora (CAD). Posteriormente se imprimió la pieza de referencia en cinco diferentes posiciones sobre la plataforma de trabajo de una impresora 3D. A continuación, se midieron las características dimensionales establecidas en el diseño de la pieza por medio de una máquina de medición por coordenadas (MMC) y finalmente se analizaron los datos a través de un análisis multivariado. En este artículo, el análisis multivariado demostró que la media ( $\bar{X}$ ) de los valores medidos de las características de la pieza de referencia se ajustan a las medias ( $\mu$ ) de sus valores nominales establecidos en el diseño, lo que confirma que los valores medidos y los valores nominales se ajustan a una distribución normal. Además, se realizó una prueba de planitud que demostró que las piezas de referencia presentaron diferencias que pueden ser atribuibles a que la plataforma de impresión de la impresora bajo evaluación no es completamente plana, presentándose un declive en las zonas inferiores. Finalmente, mediante un análisis de linealidad, se demostró que las características de orificios circulares y rectangulares, identificados como, (CIR\_Y) y (DR\_ZM) respectivamente, presentan valores de coeficientes de correlación altos y esto generaron modelos de regresión lineal simple para estimar el comportamiento de los posibles errores de geometría de la impresora, lo que permitiría realizar ajustes o compensaciones confiables en la etapa de diseño de la pieza de referencia.

**Palabras claves:** Análisis Multivariado, Planitud, Linealidad, Manufactura aditiva, Diseño asistido por computadora.

## 1.0 Introducción

En la actualidad, existe una gran diversidad de procesos de manufactura (PM) que son utilizados por la industria para la elaboración de productos. Los PM requieren de una gran diversidad de tecnologías que han sido desarrolladas y están en contante innovación, con la finalidad de permitir la modificación o elaboración de productos con costos de producción accesibles a los requerimientos del mercado. Dentro de estos PM, uno que ha tenido mucho crecimiento en los años recientes, es la manufactura aditiva (MA) [1] y en la actualidad es considerada como una industria madura [2]. La MA, también conocida como impresión 3D o prototipado rápido, se define como el proceso de unir materiales para elaborar productos a partir de datos de modelos 3D, generalmente de capa en capa [3], sin la necesidad de utilizar equipos costosos o servicios de soporte complementarios [4]. La MA es considerada como un proceso opuesto a la fabricación sustractiva y formativa utilizada actualmente en la elaboración de una gran cantidad de productos [5]. La MA en sus inicios, era principalmente utilizada para la creación de prototipos de productos que se utilizaban como base para innovar tales productos y que eventualmente se pudieran fabricar en serie [6]. Sin embargo, en la actualidad se pretende, que la MA sea utilizada para la elaboración continua de productos funcionales o suplementarios de otros PM. Por lo tanto, es razonable esperar que la MA en la actualidad y en el futuro desempeñe un papel cada vez más importante en la fabricación como tecnología complementaria [7]. Además, uno de los propósitos de la MA es facilitar la satisfacción de las necesidades de la población sin depender de las grandes industrias. Los equipos utilizados por la MA son las impresoras 3D (I3D), las cuales cuentan con una gran diversidad de parámetros de impresión que pueden afectar su desempeño. Estos parámetros pueden ser:

tipo de impresión, material utilizado, altura de las capas, temperatura de material extruido, velocidad de impresión, velocidad de enfriamiento, grosor de las paredes, densidad del relleno, patrón de impresión de relleno, estilo de la capa base, entre otros. La modificación de algunos de estos parámetros, pueden tener un impacto significativo en la calidad de los productos manufacturados. Además, la MA, permite la fabricación de productos con geometrías complejas, formas libres, considerando características dimensionales establecidas en el diseño asistido por computadora (CAD). Por consiguiente, los productos elaborados mediante la MA son fabricados con un alto nivel de personalización y son adecuados para su producción en lotes pequeños y medianos. Por esta razón, resulta de gran importancia elaborar procedimientos de evaluación del comportamiento dimensional de piezas fabricadas con las I3D. La evaluación del comportamiento dimensional de las I3D, permite ayudar en la toma de decisiones para asegurar que los productos manufacturados cumplan con las tolerancias dimensionales y geométricas establecidas en su diseño [8].

Identificar los errores dimensionales y geométricos de las piezas elaboradas por las I3D, permite realizar ajustes en la etapa de diseño del producto a elaborar, previo a la aprobación de su producción final. Estos errores pueden determinarse, a partir de la evaluación del desempeño de la I3D utilizando una pieza de referencia con características específicas [9] diseñadas mediante el CAD y elaborada por cualquier equipo utilizado por la MA. Existen varios instrumentos para medir las características dimensionales de la pieza de referencia, sin embargo, un instrumento que es comúnmente utilizado para medir es la máquina de medición por coordenadas (MMC) [10] [11] [12]. Con el alcance y exactitud adecuados, la MMC es un instrumentos ampliamente

utilizados en la industria manufacturera [13]. Otros instrumentos que pueden ser utilizados para realizar las mediciones son: calibradores, escáner ópticos, brazos de medición articulados, microscopios ópticos [14] [15][16], así como interferómetros [17] y láser tracker [18]. Actualmente, la evaluación del desempeño de las I3D se realiza principalmente partir de la determinación de los errores dimensionales y geométricos presentados en las piezas finales impresas. Estos errores pueden ser determinados, mediante la realización de una serie de mediciones directas a una pieza impresa con la I3D [19]. Sin embargo, existen otros métodos que utilizan interferómetros, láser tracker, o incluso algún arreglo de cámaras, que podrían evaluar el desempeño de las I3D sin la necesidad de imprimir una pieza [20] [21]. La evaluación de las I3D nos permitiría identificar si las piezas cumplirán o no con las tolerancias dimensionales establecidas en el diseño, cuando se estén elaborando de forma continua. La presencia de estos errores geométricos en las I3D puede repercutir en la generación de altos costos por productos desechados o retrabajos requeridos. Por este motivo, resulta de gran relevancia diseñar una pieza de referencia, que ayude en la realización de ajustes en el diseño de los productos antes de su fabricación final. Esta pieza de referencia deben tener una serie de características que faciliten en la evaluación de las I3D utilizadas por la MA [22]. Las cuales son:

- Ser lo suficientemente grande como para evaluar la capacidad de impresión cerca de los bordes de la plataforma de impresión, así como cerca del centro, es decir, que cubra en la medida de lo posible todo el volumen de la I3D,
- Tener un número considerable de características dimensionales

pequeñas, medianas y grandes, de acuerdo con el alcance de la plataforma de impresión,

- Tener agujeros y flechas (características sobresalientes) para ayudar a verificar la compensación del volumen de impresión,
- Disminuir el tiempo de elaboración,
- Disminuir la utilización de materiales,
- Sea medible fácilmente, y
- Tener varias características de una parte "real" y funcional.

Desde la creación de las primeras tecnologías utilizadas por la MA, y su constante evolución, varios investigadores han desarrollado estudios para evaluar el comportamiento geométrico de las I3D utilizadas en la MA. Es decir, que las I3D tengan la capacidad de elaborar productos con la exactitud dimensional y geométrica requerida en su diseño. Entre estos estudios se encuentran los que han evaluado el comportamiento dimensional de varias impresoras 3D que utilizan una misma tecnología pero de diferentes fabricantes [23] [24] [25], así como la comparación de I3D que utilizan diferentes tecnologías [26] [27] [28]. Igualmente evaluaciones donde se utiliza únicamente la tecnología de Modelado por Deposición Fundida (FDM) [29] [30] [16] [31], que es la tecnología que utilizamos en esta trabajo. Las evaluaciones realizadas en las investigaciones mencionadas fueron realizadas a partir de la utilización de una pieza de referencia, con el propósito de verificar su comportamiento dimensional. En la tabla 1, podemos observar algunas investigaciones realizadas a diferentes tecnologías utilizadas en la MA, en las cuales fueron utilizadas diversas técnicas de evaluación, a partir de la utilización de una pieza de referencia.

**Tabla 1.** Métodos de evaluación de tecnologías utilizadas en MA.

INVESTIGADOR (AÑO)	TECNOLOGIA	MÉTODOS DE EVALUACION
Zhou et al, [21]	Estereolitografía (SL)	Diseño de experimentos y ANOVA
Gregorian [33]	Modelado por deposición fundida (FDM)	Regresión lineal simple
Mahesh et al., [35]	Sinterización directa laser (DLS)	6- Sigma
Hanumaiah et al., [36]	Sinterización directa laser de metal (DMLS)	Método de mínimos cuadrados
Brajlih [37]	Modelado por deposición fundida (FDM) Estereolitografía (SLA) Sinterización directa laser (DLS) Polyjet	Excentricidad, ANOVA, Diseño de experimentos, Regresión lineal simple
Alhubail [38]	Modelado por deposición fundida (FDM)	Análisis de correlación Regresión lineal simple, ANOVA, Diseño de experimentos
Bayley et al. [40]	Modelado por deposición fundida (FDM)	Método de mínimos cuadrados Polinomios de Lagrange Transformación de matrices Desviación cuadrada de medias
Teeter [16]	Sinterización directa laser de metal (DMLS)	Prueba de Kolmogorov-Smirnoff, ANOVA, Comparación múltiple Bonferri, Prueba de Friedman, Comparación múltiple de Dunn's
Kacmarcik et al. [41]	Modelado por deposición fundida (FDM)	Método de mínimos cuadrados

Elaboración propia.

Es importante mencionar que las I3D pueden ser consideradas como equipos de cuerpo rígido, similar a las MMC. Los movimientos de cada eje (X, Y, Z) proporcionan las posiciones de las coordenadas dentro del volumen de trabajo de cada equipo. Para los equipos utilizados en la MA el estándar para su evaluación es la ISO/ASTM 52902:2019 Fabricación aditiva - Artefactos de prueba - Evaluación de la capacidad geométrica de los sistemas de fabricación aditiva [42]. En este estándar se establece que se puede utilizar una pieza de referencia para evaluar cuantitativamente el rendimiento geométrico de un equipo utilizado en la MA, donde se definen características dimensionales. Además, la pieza de referencia puede ser utilizadas para evaluar diferentes características dimensionales establecidas, sin embargo, no establece la cantidad y calidad de las dimensional establecidas, ni los

métodos de medición y análisis que deben ser utilizados. Este estándar fue desarrollado de forma conjunta por el comité TC 261 de la organización internacional de normalización (ISO) y el comité F42 de la sociedad estadounidense de ensayos y materiales (ASTM). Estos comités tienen como propósito la promoción del conocimiento, estimular la investigación, así como la implementación de tecnología a través del desarrollo de estándares aplicables a la MA. Los comités establecen regulaciones técnicas para la identificación de diferentes procesos de la MA, terminologías, definiciones, cadenas de procesos (hardware y software), procedimientos de prueba, parámetros de calidad, acuerdos cliente-proveedor y elementos fundamentales [43]. En la tabla 2 se pueden observar los estándares desarrollados.

**Tabla 2.** Estándares ISO /ASTM aplicados a la manufactura aditiva.

IDENTIFICACION	NOMBRE
ISO/ASTM 52900:2017	Fabricación aditiva. Principios generales. Terminología. (ISO/ASTM 52900:2015).
ISO/ASTM 52915:2017	Especificación para el formato de archivo para la fabricación aditiva (AMF) Versión 1.2
ISO/ASTM 52921:2017	Terminología normalizada para la fabricación aditiva. Sistemas de coordenadas y métodos de ensayo.
ISO/ASTM 52901:2019	Fabricación aditiva. Principios generales. Requisitos para la compra de piezas AM.
ISO/ASTM 52902:2019	Fabricación aditiva. Artefactos de prueba - Evaluación de la capacidad geométrica de los sistemas de fabricación aditiva.
ISO/ASTM 52910:2020	Fabricación aditiva. Diseño. Requisitos, directrices y recomendaciones

Nota: (<https://www.une.org> revisado el 20 de mayo de 2020). Elaboración propia.

El objetivo de este trabajo es evaluar las características geométricas de las impresoras 3D que utilizan la tecnología FDM. Para lograrlo, se evaluó la planitud de la plataforma de impresión y el comportamiento de sus errores (linealidad). Estas evaluaciones se realizaron a partir de la determinación de los errores dimensionales de una pieza de referencia, los cuales son obtenidos mediante el cálculo de la diferencia entre el valor medido y el valor nominal establecido en el CAD. Las impresoras 3D, pueden generar deficiencias en la exactitud dimensional de las piezas elaboradas, ocasionados principalmente por los parámetros de impresión establecidos en cada equipo, y por la posición y orientación de impresión. Esto puede generar errores dimensionales de las piezas fabricadas en diferentes lugares dentro de la plataforma de impresión. De igual manera, otros parámetros de impresión como: el grosor de las capas, diámetro de boquilla de extrusión, velocidad y temperatura de impresión pueden influir en el comportamiento de los errores dimensionales de las piezas por imprimir. La evaluación de la I3D bajo estudio es realizada, mediante un análisis multivariado para verificar si los

valores de medición de las características de referencia establecidas se ajustan a los valores nominales del CAD [44].

## 2.0 Materiales y Equipos

La pieza de referencia fue diseñada con características de orificios y salientes (circulares y rectangulares) por ser las formas más comunes que se tiene establecidas en otros tipos de evaluaciones de equipos que son utilizados en la MA, ver tabla 1.

### 2.1 Materiales

El material utilizado para elaborar la pieza de referencia fue Ácido Poliláctico (PLA), por ser el material más utilizado por las impresoras 3D con tecnología FDM y por ser relativamente barato. Además, se funde fácilmente y es considerado como un material sustentable, debido a que es elaborado a partir de materias primas naturales y renovables, como el maíz. Este material también es biodegradable, a temperaturas relativamente bajas de 60 °C. En la tabla 3 se pueden observar las propiedades físicas y mecánicas del PLA.

**Tabla 3.** Propiedades físicas y mecánicas de PLA.

PROPIEDAD	PLA	UNIDAD
Módulo elástico	3 500	N/mm <sup>2</sup>
Coefficiente de Poisson	0.38 – 0.4	
Modulo cortante	2 400	N/mm <sup>2</sup>
Densidad de masa	1. 24	g/cm <sup>3</sup>
Límite de tracción	45	N/mm <sup>2</sup>
Límite de compresión	66-86	N/mm <sup>2</sup>
Limite elástico	55-72	N/mm <sup>2</sup>
Coefficiente de expansión térmica	68	µm/m-K
Conductividad térmica	0.13	W/mK
Calor específico	1 800	J/kgK

Elaboración propia.

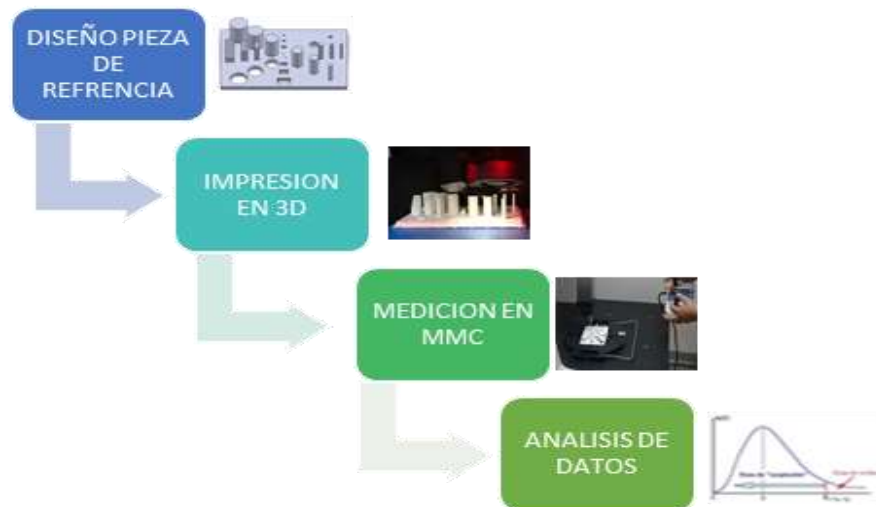
## 2.2 Equipo

La pieza de referencia fue elaborada por una impresora que utiliza la tecnología de modelación de deposición fundida (FDM). El equipo es una impresora 3D, marca MAKERBOT, modelo REPLICATOR+, alcance de impresión de 259 x 195 x 165 mm (X, Y, Z), resolución de capa de 0.1 mm, diámetro de filamento de alimentación de 1.75 mm, diámetro de boquilla de 0.4 mm y precisión de posición de 10 µm en los ejes XY y de 2.5 µm en el eje Z. El proceso de impresión se realiza por medio de la colocación de material de forma selectiva en la plataforma de impresión. El material es depositado mediante la utilización de una boquilla de extrusión, donde el PLA es calentado a temperaturas de 100 - 250 °C y además se aplica presión para su extrusión, permitiendo su colocación, inicialmente en la primera capa con movimientos de los ejes lineales en un plano X-Y, al final de la colocación de la capa, la plataforma de impresión realiza un movimiento descendente moviendo la posición Z, donde es colocada otra capa de material extruido, y

así sucesivamente hasta la colocación de la capa final.

## 3.0 Metodología

La metodología utilizada consiste en cuatro etapas, ver figura 1. Esta metodología inicia con el diseño de la pieza de referencia y se continuó con su elaboración utilizando una impresora 3D en cinco puntos especificados dentro de la plataforma de impresión. Posteriormente se realizó la medición utilizando una MMC, haciendo cinco mediciones en cada pieza de referencia impresa calculando el promedio de estas cinco mediciones, las cuales fueron utilizadas para la evaluación. Finalmente, se realizó un análisis de los datos (errores) obtenidos, realizando un estudio multivariado, con el objetivo de demostrar si las medias de las mediciones de cada característica se ajustan al valor nominal establecido en el diseño. También se realizó una prueba de planitud de la plataforma de impresión y se utilizó la técnica de regresión lineal para encontrar el comportamiento de los errores.

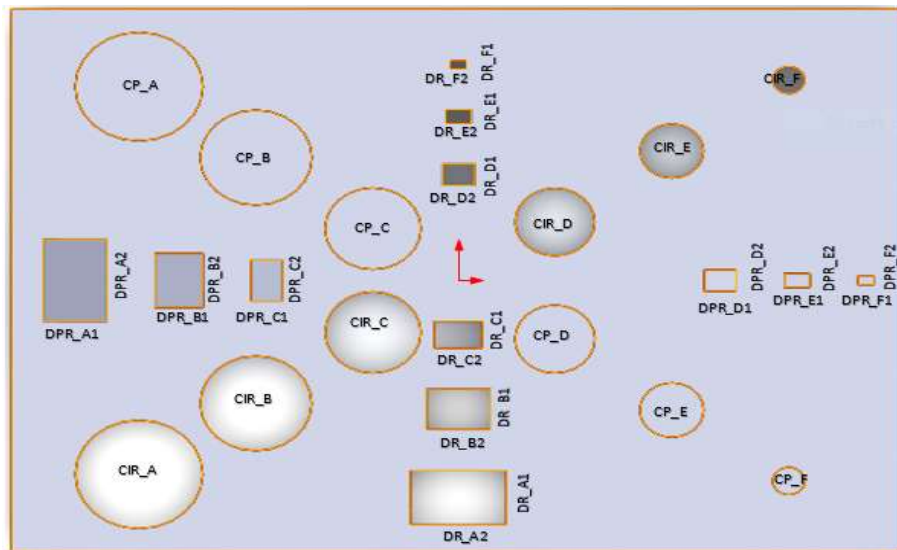


**Figura 1.** Metodología. Elaboración propia.

### 3.1 Diseño de Pieza de Referencia

El modelo de la pieza de referencia fue desarrollado mediante un software de diseño asistido por computadora (CAD). Las características dimensionales establecidas,

incluye diámetros de orificios y flechas (pin), así como distancias entre paredes salientes rectangulares y entre paredes de orificios rectangulares como se pueden observar en la figura 2.



**Figura 2.** Identificación de puntos de medición. Elaboración propia.

Se decidió por estas características, por ser las más comunes observadas en otros diseños de piezas de referencias utilizadas para evaluar el comportamiento dimensional de I3D. Los valores nominales son establecidos considerando que la resolución de impresión se encuentra entre 0.1 - 0.3 mm. El alcance de

la plataforma de impresión de la impresora 3D bajo evaluación tiene un alcance de 259 mm x 195 mm x 165 mm (X, Y, Z) y la MMC utilizada para medir y obtener los valores dimensionales tiene una resolución de 0.000 1 mm. Los valores nominales se muestran en la tabla 4.



**Tabla 4.** Identificación de puntos de medición y valores nominales.

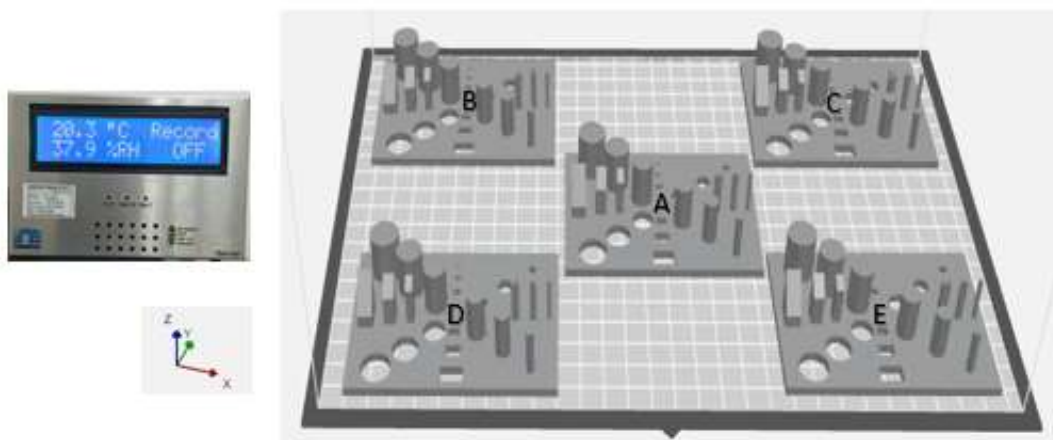
NOMENCLATURA	CARACTERISTICA	VALOR NOMINAL (mm)
CIR_Y	DIAMETRO DE ORIFICIO Y = A, B, C, D, E, F	20, 17.5, 15, 12.5, 10, 5
CP_X	DIAMETRO DE PIN CIRCULAR X = A, B, C, D, E, F	20, 17.5, 15, 12.5, 10, 5
DPR_ZN	DISTANCIA ENTRE PAREDES DE PIN RECTANGULAR A1, A2, B1, B2, C1, C2, D1, D2, E1, E2, F1, F2	10, 15, 7.5, 10, 5, 7.5, 5, 4, 4, 2.5, 2.5, 1.5
DR_ZM	DISTANCIA ENTRE PAREDES DE ORIFICIO RECTANGULARES A1, A2, B1, B2, C1, C2, D1, D2, E1, E2, F1, F2	10, 15, 7.5, 10, 5, 7.5, 5, 4, 4, 2.5, 2.5, 1.5

Elaboración propia.

Las características dimensionales establecidas para evaluar el comportamiento dimensional de la impresora 3D bajo estudio fueron: la medición de la distancia entre las paredes de las formas rectangulares y diámetros de las formas circulares. Estos valores fueron calculados por el software de medición de la MMC que utiliza solo los puntos (X, Y, Z) medidos y ajusta geometrías utilizando dichos puntos.

### 3.2 Impresión en 3D

Se imprimieron 5 piezas de referencia en diferentes posiciones, de forma individual y no simultáneamente dentro de la plataforma de impresión, bajo condiciones de laboratorio donde se encuentra instalada la I3D, con temperatura controlada a  $20 \pm 1$  °C y que para efectos de control se identificaron como A, B, C, D y E. En la figura 3 se puede observar las posiciones de impresión de cada pieza de referencia, elaboradas de forma individual, en diferentes tiempos de impresión.

**Figura 3.** Posiciones de impresión de piezas de referencia y control de temperatura ambiental. Elaboración propia.

Se imprimió únicamente una pieza por cada posición, considerando que se busca evaluar el comportamiento dimensional de la

impresora bajo condiciones normales de trabajo. Para efecto de justificar la utilización de una sola pieza de referencia, de acuerdo a

las posiciones mostrados en figura 3, se realizó una comparación de las mediciones de características similares entre cada pieza individual. Esta comparación tiene como propósito demostrar que existe una asociación lineal entre las características utilizadas como referencias, lo cual permite la utilización de una sola replica por posición.

La estimación de material y tiempo de impresión para cada pieza fueron de 47.36 g

y 6 horas 44 minutos respectivamente. Para la impresión de las cinco piezas fueron utilizados 236.8 g de material y un tiempo total de impresión de 33 horas 40 minutos. Las I3D tienen diferentes parámetros de impresión personalizados, que pueden ser modificados con la finalidad de mejorar la calidad de las piezas. Para la impresora que utilizamos en esta investigación, establecimos los parámetros que se presentan en la tabla 5.

**Tabla 5.** Parámetros de impresión.

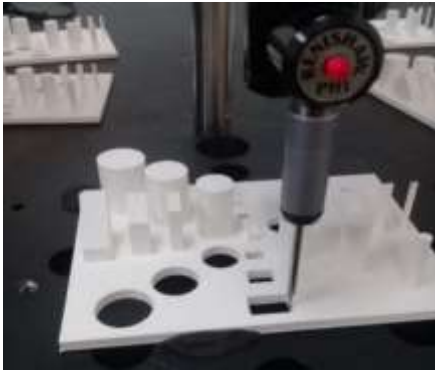
Parámetro	Especificación
Tipo de impresión	Balaceada
Material utilizado	PLA
Diámetro de filamento	1.75 mm
Altura de capa	0.1 mm
Temperatura de material extruido	215 °C
Velocidad de enfriamiento de contorno	100%
Velocidad de impresión de contorno	90 mm/s
Velocidad de extrusión de material	90 mm/s
Patrón de impresión	Hexagonal
Densidad de relleno	20%
Capa base	Base acolchada + alas

Elaboración propia.

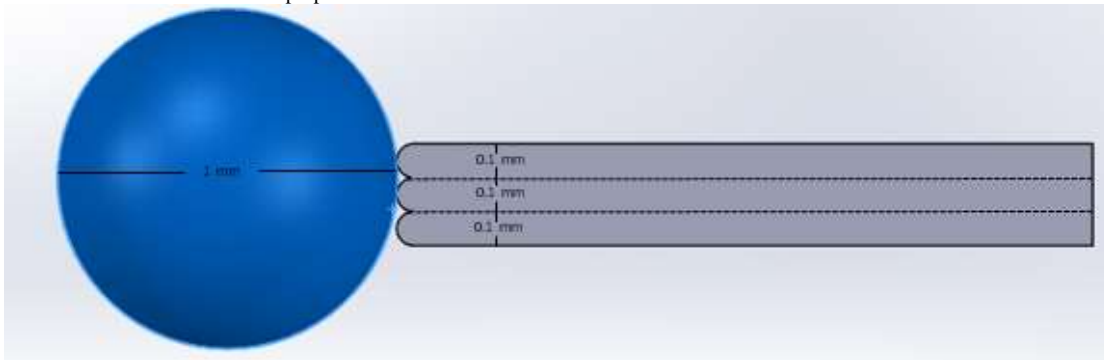
### 3.3 Medición en Máquina de Medición por Coordenadas (MMC)

La medición de las características establecidas en la pieza de referencia, fue realizada por una máquina de medición por coordenadas (MMC), Marca MITUTOYO, modelo CRT.P504 PLUS No. SERIE 0109204 con alcance de medición de 505 mm x 405 mm x 405 mm (X, Y, Z), resolución de 0.0001 mm, error máximo permitido (MPE) de  $1.7\mu\text{m}+3\mu\text{mL}$ , dimensión de mesa de granito de 638 mm x 860 mm y certificado de calibración # 147020 de Mitutoyo Mexicana. Como complemento se utilizó un palpador de medición marca Renishaw con un diámetro de la punta de palpación de 1 mm, modelo A-5000-7806 LL/LS, así como el software de medición Geomesure versión 2.0. Se elaboró un programa de medición en posición específica dentro del alcance de medición en

mesa de granito, previa calibración de palpador con esfera de calibración de 25.4 mm de diámetro, ver figura 4. Las mediciones fueron realizadas en condiciones ambientales de laboratorio donde se localiza la MMC con temperaturas entre 19.5 - 20.3 °C y humedad relativa de 41.5 - 51.0% HR medida con un hidrómetro marca OMEGA, modelo iSD-TH, Numero de serie: 2350128, alcance de medición de temperatura de 0.5 °C a 60 °C y humedad de 2% a 100% de HR, resolución de 0.1 °C y 0.1% HR.



**Figura 4.** Medición de piezas de referencia con MMC. Elaboración propia.



**Figura 5.** Punto de contacto entre palpador y altura de capa de pieza de referencia. Elaboración propia.

Se registraron los valores obtenidos en hoja de datos para los cálculos de las medias correspondientes. Se aclara que el diseño original incluye 36 cotas, considerando que disponíamos de palpado de medición de 1 mm, se tomó la decisión de no considerar las cotas más pequeñas, establecidas en el diseño, identificadas como DR-F1, DRF2, DPR-F1 Y DPR-F2 y con esto evitar obtener valores de medición no confiables por haber establecido cotas muy pequeñas (1.5 mm) en estas características.

### 3.4 Análisis de Datos

#### 3.4.1 Análisis Multivariado

Los métodos de análisis multivariados requieren de una muestra de tamaño  $n$  de una población, donde a cada elemento de la muestra se le miden o cuantifican  $p$  variables de interés. De esta forma se obtiene una matriz de datos con dimensión  $n \times p$ , que son utilizados en función del objetivo y de la naturaleza de los datos [45]. Se realizó un

Se midieron 32 características, cinco mediciones en cada pieza de referencia impresa en las posiciones establecidas dentro de la plataforma de impresión. La altura de capa establecido en los parámetros de impresión fue de 0.1 mm, por lo cual que se utilizó un palpador de 1 mm para evitar el defecto de escalera entre cada capa, como se observa en figura 5.

análisis multivariado de los datos obtenidos en la medición de la pieza de referencia, comparándola con los valores nominales establecidos en el diseño. Para verificar si las medias ( $\bar{X}$ ) de las variables o características, se ajustan a sus valores nominales, establecidos en el diseño de la pieza de referencia en la que se establecieron 32 variables, generamos las siguientes hipótesis:

$$H_0 = \mu = \mu_0; V = \text{Cualquiera}$$

$$H_1 = \mu \neq \mu_0; V = \text{Cualquiera}$$

Donde:

$\mu$  = Vector de media poblacional.

$\mu_0$  = Vector de los valores nominales establecidos en el diseño de la pieza de referencia.

$V$  = Varianza.

Para demostrar las hipótesis se utilizó el método de la razón de verosimilitud, para el caso de poblaciones normales, se busca

contrastar si el proceso se encuentra en estado de control, lo que supone que las muestras provienen de una población normal con ciertos valores de los parámetros conocidos. De acuerdo a lo establecido por Kacmarcik et al. [12] para la demostración de las hipótesis se utiliza la distribución de probabilidad multivariada  $T^2$  Hotelling con  $p$  variables de interés y  $n - 1$  grados de libertad; mediante la siguiente ecuación (Ec.1).

$$T^2 = n(\bar{X} - \mu)' \hat{S}^{-1} (\bar{X} - \mu) \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

$$T^2 =$$

*Probabilidad multivariada de Hotelling*  
 $S =$  Matriz definida positiva  
 $n =$  Tamaño de la población  
 $\bar{X} =$  Vector de la media muestral  $[(\approx$   
 $N_p(\mu, \frac{1}{n} V)]$   
 $\mu =$  Vector de media poblacional  
 $N_p =$  Distribución normal  $p$ -variada

La  $T^2$  no se tabula, pero existe una relación con la distribución  $F$ , que permite calcular tal valor mediante la siguiente ecuación (Ec. 2):

$$F_{p,n-p} = \frac{n-p}{p(n-1)} T^2(p, n - 1) \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde:

$$T^2 =$$

*probabilidad multivariada de Hotelling*  
 $n =$  Tamaño de la población  
 $p =$  Variables de interés

Considerando el valor crítico establecido en los percentiles de la distribución  $F$ , en el que toma como criterio de decisión el 1% de rechazo para  $p = 4$  y  $n = 5$ , este valor es de 5 624.58, valor obtenido de distribución  $F$  [46]. Para este trabajo se decidió tomar solo 4 características para evaluar la distribución multivariada de Hotelling y la distribución  $F$ , la sección 4.1 de los resultados explica porque se tomó esta decisión.

### 3.4.2 Prueba de Planitud

Se realizó una prueba de planitud de la plataforma de impresión, primero a partir de la elaboración de una pieza de referencia en diferentes áreas, como se puede observar en figura 3. Posteriormente se midieron, cinco veces, las características dimensionales establecidas en las 5 piezas de referencia impresas en las posiciones indicadas (A, B, C, D, E). Estas posiciones fueron definidas con la intención de cubrir la totalidad de la plataforma de impresión, considerando las dimensiones fronteras de la pieza de referencia. Finalmente, estos valores se compararon, tomando como referencia el valor del centro de la plataforma de impresión (posición A). Consideramos la posición A como referencia para esta prueba por ser la posición donde la plataforma de impresión es soportada por la guía del eje Z. La planitud de la plataforma de impresión de la I3D es evaluada mediante la ecuación (Ec. 3):

$$\Delta V = V_N - V_A \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde:

$\Delta V =$  Diferencia entre los valores obtenidos de posiciones (planitud).

$V_N =$  Valor medido en posición.  $N = B, C, D$  o  $E$

$V_A =$  Valor medido en posición A

Esta prueba tiene el propósito de identificar las áreas con mayor diferencia con respecto al centro (posición A) de la plataforma de impresión, lo cual representa una forma de evaluar la planitud de la plataforma de impresión de la I3D. La identificación de estas diferencias permitiría la realización de ajustes en la plataforma de impresión, que asegure que la impresión continua de productos en la impresora 3D bajo evaluación, cumpla las tolerancias establecidas en el diseño.

### 3.4.3 Linealidad

Se realizó un análisis de correlación lineal y regresión lineal para demostrar si los errores con respecto a los valores nominales establecidos tienen una relación lineal. Para nuestra evaluación, la variable independiente (X) son los valores nominales establecidos en el diseño CAD y la variable dependiente (Y) es la diferencia del promedio de los datos obtenidos de las mediciones realizadas en la MMC con respecto a los valores nominales establecidos en el diseño CAD, es decir el error presentado por cada característica.

El coeficiente de correlación lineal (R), se calcula mediante la ecuación (Ec. 4):

$$R = \frac{SC_{XY}}{\sqrt{(SC_X)(SC_Y)}} \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde:

$$SC_{XY} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i Y_i - \frac{(\sum_{i=1}^n X_i)(\sum_{i=1}^n Y_i)}{n}}{n}$$

$$SC_X = \sum_{i=1}^n X_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n X_i)^2}{n}$$

$$SC_Y = \sum_{i=1}^n Y_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n Y_i)^2}{n}$$

$X$  = Valor nominal

$Y$  = Diferencia entre el valor medido y el valor nominal

$n$  = número de valores nominales de referencia

Este coeficiente de correlación lineal es utilizado para cuantificar la relación entre dos variables y demostrar si tienen un comportamiento lineal, es decir si representamos estas variables en un diagrama de dispersión, los puntos de relación entre las dos variables pueden aproximarse a una línea recta. Los coeficientes de correlación pueden encontrarse entre +1 y -1, estableciendo como valor de correlación alta de un valor de 0.7 o -0.7. Se establecieron 4 tipos de

características diferentes para calcular los coeficientes de correlación entre la variable independiente (X), valores nominales de las características establecidas, y la variable dependiente (Y), el error encontrado en las características correspondientes evaluado con las diferencias entre el valor medido y el valor nominal. Esto permite realizar un análisis de regresión lineal simple con el propósito de generar una ecuación (modelo de regresión) que permita predecir el valor del error (Y) con respecto a la característica dimensional requerida. Los estudios de correlación lineal deben realizarse antes de la generación de modelos de regresión lineal.

Los modelos de regresión lineal se calcularon partir de la siguiente ecuación:

$$Y = a + bX \quad (\text{Ec. 5})$$

Donde los valores de  $a$  y  $b$  se obtienen resolviendo el siguiente sistema de ecuaciones polinómicas:

$$\sum_{i=1}^n Y_i = an + b \sum_{i=1}^n X_i \quad (\text{Ec. 6})$$

$$\sum_{i=1}^n X_i Y_i = a \sum_{i=1}^n X_i + b \sum_{i=1}^n X_i^2 \quad (\text{Ec. 7})$$

Donde:

$X$  = Variable independiente

$Y$  = Variable dependiente

$a$  = Punto de intercepción en la ordenada

$b$  = Pendiente

$n$  = número de valores nominales de referencia

## 4.0 Resultados

Los resultados de las mediciones de las características dimensionales establecidas en piezas de referencia en sus distintas posiciones, su media, así como los valores nominales y las diferencias correspondientes, se pueden observar en la tabla 6.

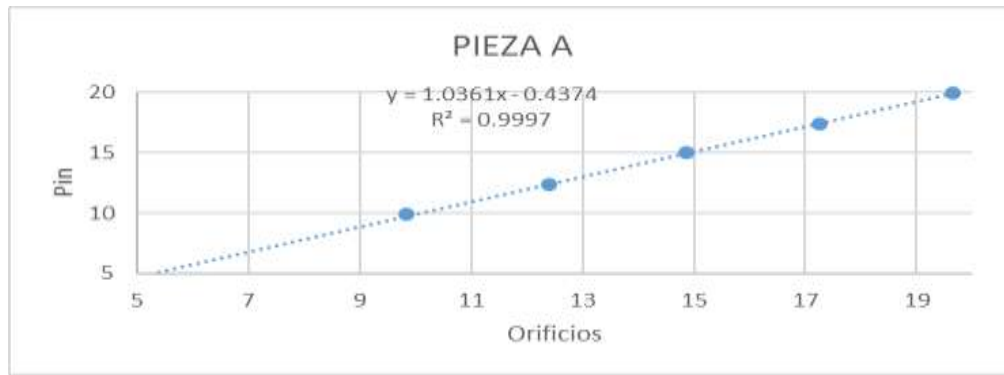
**Tabla 6.** Mediciones de características dimensionales.

POSICIÓN DE PIEZA		PROMEDIO DE MEDICIONES (mm)					MEDIA ( $\bar{X}$ )	DESVIACION ESTANDAR	VALOR NOMINAL (mm)	ERROR RELATIVO (%)	
		A	B	C	D	E					
DIAMETRO DE ORIFICIO	CIR_A	1	19.6498	19.7222	19.8048	19.775	19.8099	19.7524	0.07	20	1.24
	CIR_B	2	17.2602	17.2471	17.2438	17.1998	17.2986	17.2499	0.04	17.5	1.43
	CIR_C	3	14.8697	14.8623	14.9032	14.806	14.9668	14.8816	0.06	15	0.79
	CIR_D	4	12.5085	12.581	12.4263	12.4756	12.4581	12.2419	0.06	12.5	0.37
	CIR_E	5	9.8362	9.7516	9.7824	9.7655	9.7876	9.7847	0.03	10	2.15
	CIR_F	6	4.9626	5.0123	5.0109	5.0282	5.0074	5.0043	0.02	5	0.38
DIAMETRO DE PIN CIRCULAR	CP_A	7	19.9466	19.8858	19.8858	19.8422	19.9857	19.9092	0.06	20	0.45
	CP_B	8	17.3806	17.3846	17.4211	17.3814	17.4903	17.4116	0.05	17.5	0.51
	CP_C	9	14.9833	14.8976	14.921	14.8958	14.8785	14.9152	0.04	15	0.57
	CP_D	10	12.3597	12.3257	12.286	12.428	12.349	12.3497	0.05	12.5	1.20
	CP_E	11	9.9104	9.9899	9.8506	9.9447	9.9033	9.9198	0.05	10	0.80
	CP_F	12	4.6357	4.6467	4.6373	4.6903	4.6723	4.6565	0.02	5	6.87
DISTANCIA ENTRE PAREDES DE PIN RECTANGULAR	DRP_A1	13	10.0732	10.1265	10.1215	10.1296	10.2091	10.1320	0.05	10	1.32
	DRP_A2	14	15.133	15.2167	15.1195	15.1157	15.0279	15.1226	0.07	15	0.82
	DRP_B1	14	7.599	7.5601	7.6138	7.5429	7.5619	7.5755	0.03	7.5	1.01
	DRP_B2	15	10.1846	10.2102	10.116	10.0905	10.0762	10.1355	0.06	10	1.36
	DRP_C1	17	5.0744	5.038	5.1472	5.1105	5.1642	5.1069	0.05	5	2.14
	DRP_C2	18	7.7099	7.745	7.6855	7.6674	7.658	7.6932	0.04	7.5	2.58
	DRP_D1	19	5.0333	4.9519	4.9956	5.0233	5.0544	5.0117	0.04	5	0.65
	DRP_D2	20	4.2143	4.1599	4.1354	4.254	4.1664	4.1141	0.05	4	4.65
	DRP_E1	21	4.064	4.1399	3.9609	4.1114	4.132	4.1816	0.07	4	2.43
DRP_E2	22	2.7434	2.6081	2.643	2.6047	2.6189	2.6436	0.06	2.5	5.74	
DISTANCIA ENTRE PAREDES DE ORIFICIO RECTANGULOS	DR_A1	23	9.8228	9.8277	9.8331	9.8697	9.8699	9.8446	0.02	10	1.55
	DR_A2	24	14.8925	14.7899	14.8431	14.7505	14.7333	14.8019	0.07	15	1.32
	DR_B1	25	7.3873	7.4202	7.3999	7.3722	7.3987	7.3957	0.02	7.5	1.39
	DR_B2	26	9.8034	9.8726	9.833	9.8697	9.865	9.8161	0.03	10	1.51
	DR_C1	27	4.963	4.931	4.9767	5.0001	5.0261	4.9794	0.04	5	0.62
	DR_C2	28	7.4426	7.3098	7.3189	7.3053	7.3218	7.3397	0.06	7.5	2.14
	DR_D1	29	3.9970	4.0219	4.0812	3.9731	4.0713	4.0289	0.04	4	1.02
	DR_D2	30	4.8958	4.8879	4.9005	4.8461	4.9351	4.8931	0.03	5	2.14
	DR_E1	31	2.5116	2.5028	2.5488	2.4653	2.5414	2.5140	0.03	2.5	1.11
	DR_E2	32	3.8838	3.7262	3.9098	3.8013	3.8061	3.8254	0.07	4	4.36

Elaboración propia.

Las mediciones de los orificios son el diámetro interno y la distancia entre paredes paralelas correspondientes. Así como el diámetro exterior para los pines y la distancia entre paredes paralelas correspondientes. La justificación de la utilización de una sola replica, mostró que existe una buena relación entre características dimensionales similares, es decir existe una asociación lineal. Esta

evaluación genero coeficientes de determinación ( $R^2$ ) para las mismas características utilizadas en las piezas de referencia para cada posición, en valores  $R^2 \geq 0.99$ , lo cual se concluye que la utilización de una sola replica se justifica. En la figura 6, se puede observar un ejemplo de esta evaluación para una pieza de referencia específica.



**Figura 6.** Gráficas de coeficiente de determinación de pieza A. Elaboración propia.

#### 4.1 Análisis Multivariado

Este análisis demostró que la media ( $\bar{X}$ ) de los valores medidos se ajustan a la media ( $\mu$ ) de sus valores nominales. Calculando la  $T^2$  de Hotelling y su posterior valor de F, para todas las mediciones realizadas en cada pieza de referencia impresa. Debido a la gran cantidad de variables ( $p$ ) de cada pieza de referencia, se decidió tomar únicamente 4 variables, ya que el tamaño de muestra es pequeño ( $n = 5$ ) y por consiguiente el número de grados de libertad no permite una prueba completa de  $T^2$  de Hotelling. Las variables utilizadas en esta prueba son las características dimensionales establecidas en la pieza de referencia. Además, como el número de combinaciones posibles es demasiado grande solo se

consideran 20 combinaciones de 4 variables, mediante una secuencia establecida, tomando el orden indicado de columna 3 del de la tabla 6, obteniéndose los resultados mostrados en la tabla 7. Como se calculó para cada combinación y los valores obtenidos se observaron muy por debajo del límite de 5 624.58 considerado como valor crítico de acuerdo al criterio de decisión del 1% de rechazo para  $p = 4$  y  $n = 5$  (Valor obtenido de tabla de F), excepto para la combinación No. 11 que presenta un valor levemente por encima del valor crítico. Se puede observar en la tabla 7 que la media ( $\bar{X}$ ) de los valores medidos si se ajustan a la media ( $\mu$ ) de sus valores nominales.

**Tabla 7.** Resultados de la prueba  $T^2$  de Hotelling y F.

COMBINACIONES	$T^2$	F	P	
1	1,3,4,6	477.87	29.86	0.136
2	7,9,10,12	24 199.00	1512.40	0.019
3	14,18,20,22	1 161.6	72.60	0.087
4	23,27,29,31	9 003.00	562.68	0.031
5	2,5,8,11	520.58	32.53	0.130
6	13,17,19,21	203.07	12.69	0.207
7	24,28,30,32	99.79	6.23	0.290
8	15,16,25,26	416.46	26.02	0.145
9	1,7,6,12	2 681.20	167.57	0.057
10	3,4,9,10	14 982.00	936.39	0.024
11	14,20,23,31	91 183.00	5 698.90	0.009
12	18,22,27,29	2 356.90	147.30	0.061
13	1,7,14,24	388.16	24.26	0.151
14	1,7,18,24	437.94	27.37	0.142
15	1,7,20,24	379.68	23.73	0.152
16	1,7,22,24	1 234.70	77.16	0.085
17	16,18,20,22	38 818.00	2 426.10	0.015
18	14,16,18,20	9 099.90	568.74	0.031
19	14,22,23,32	969.19	60.57	0.096
20	16,21,26,31	40 445.00	2527.8	0.014

Elaboración propia.

## 4.2 Prueba de Planitud

En la tabla 8, se muestran los resultados obtenidos de las comparaciones indicadas, las características con más error se presentan en las posiciones D y E donde se obtuvieron 25 diferencias significativas de 32 en total, así como menores diferencias en la posición C, hacia la esquina superior derecha de la plataforma de impresión. Esto indica que la

plataforma de impresión no se encuentra completamente plana, teniendo un declive en las zonas de impresión de las posiciones D y E. Por lo cual, la impresión de pieza en la parte superior de la plataforma de impresión generaría más confianza de que los productos cumplan con las especificaciones de exactitud dimensional requeridas en la fabricación de productos de forma continua.

**Tabla 8.** Diferencias de posiciones con referencia en A.

POSICIÓN DE PIEZA			Valor Nominal (mm)	DIFERENCIA (mm)			
				B	C	D	E
DIAMETRO DE ORIFICIO	CIR_A	1	20	0.0724	0.1550	0.1252	0.1601
	CIR_B	2	17.5	-0.0130	-0.0164	-0.0603	0.0385
	CIR_C	3	15	-0.0074	0.0334	-0.0638	0.0970
	CIR_D	4	12.5	-0.0275	-0.0822	-0.1330	-0.5904
	CIR_E	5	10	-0.0846	-0.0538	-0.0707	-0.0486
	CIR_F	6	5	0.0497	0.0483	0.0656	0.0448
DIAMETRO DE PIN CIRCULAR	CP_A	7	20	-0.0608	-0.0608	-0.1044	0.0391
	CP_B	8	17.5	0.0040	0.0405	0.0008	0.1097
	CP_C	9	15	-0.0857	-0.0622	-0.0875	-0.1048
	CP_D	10	12.5	-0.0340	-0.0736	0.0683	-0.0106
	CP_E	11	10	0.0795	-0.0599	0.0343	-0.0072
	CP_F	12	5	0.0110	0.0016	0.0546	0.0366
DISTANCIA ENTRE PAREDES DE PIN RECTANGULAR	DRP_A1	13	10	0.0533	0.0484	0.0564	0.1359
	DRP_A2	14	15	0.0837	-0.0135	-0.0173	-0.1051
	DRP_B1	14	7.5	-0.0389	0.0148	-0.0562	-0.0371
	DRP_B2	15	10	0.0256	-0.0686	-0.0941	-0.1085
	DRP_C1	17	5	-0.0364	0.0728	0.0361	0.0898
	DRP_C2	18	7.5	0.0350	-0.0245	-0.0425	-0.0519
	DRP_D1	19	5	-0.0815	-0.0378	-0.0101	0.0211
	DRP_D2	20	4	-0.0544	-0.0790	0.0397	-0.0479
	DRP_E1	21	4	0.0760	-0.1031	0.0475	0.5680
	DRP_E2	22	2.5	-0.1352	-0.1003	-0.1387	-0.1244
DISTANCIA ENTRE PAREDES DE ORIFICIO RECTANGULOS	DR_A1	23	10	0.0049	0.0103	0.0469	0.0471
	DR_A2	24	15	-0.1025	-0.0493	-0.1420	-0.1592
	DR_B1	25	7.5	0.0329	0.0127	-0.0151	0.0114
	DR_B2	26	10	0.0061	0.0219	-0.0260	0.0616
	DR_C1	27	5	-0.0320	0.0136	0.0371	0.0631
	DR_C2	28	7.5	-0.1328	-0.1237	-0.1373	-0.1208
	DR_D1	29	4	0.0249	0.0842	-0.0239	0.0743
	DR_D2	30	5	-0.0079	0.0048	-0.0497	0.0393
	DR_E1	31	2.5	-0.0088	0.0372	-0.0463	0.0298
	DR_E2	32	4	-0.1576	0.0260	-0.0825	-0.0776

Elaboración propia.

## 4.3 Linealidad

Los resultados de linealidad obtenidos se muestran en la tabla 9, donde las características orificios (circular o rectangular) tiene coeficiente de correlación menores a -0.7 en la mayoría de las variables, las características de salientes tienen

coeficientes de correlación por encima de -0.7 y debajo de 0.7. Considerando estos resultados se elaboraron modelos de regresión lineal de las características que cumplieron como mínimo el criterio de alta correlación en todas las piezas de referencia que fueron las 5 piezas de las DISTANCIA ENTRE PAREDES DE ORIFICIO RECTANGULAR (DR).



**Tabla 9.** Resultados de cálculo de coeficiente de correlación.

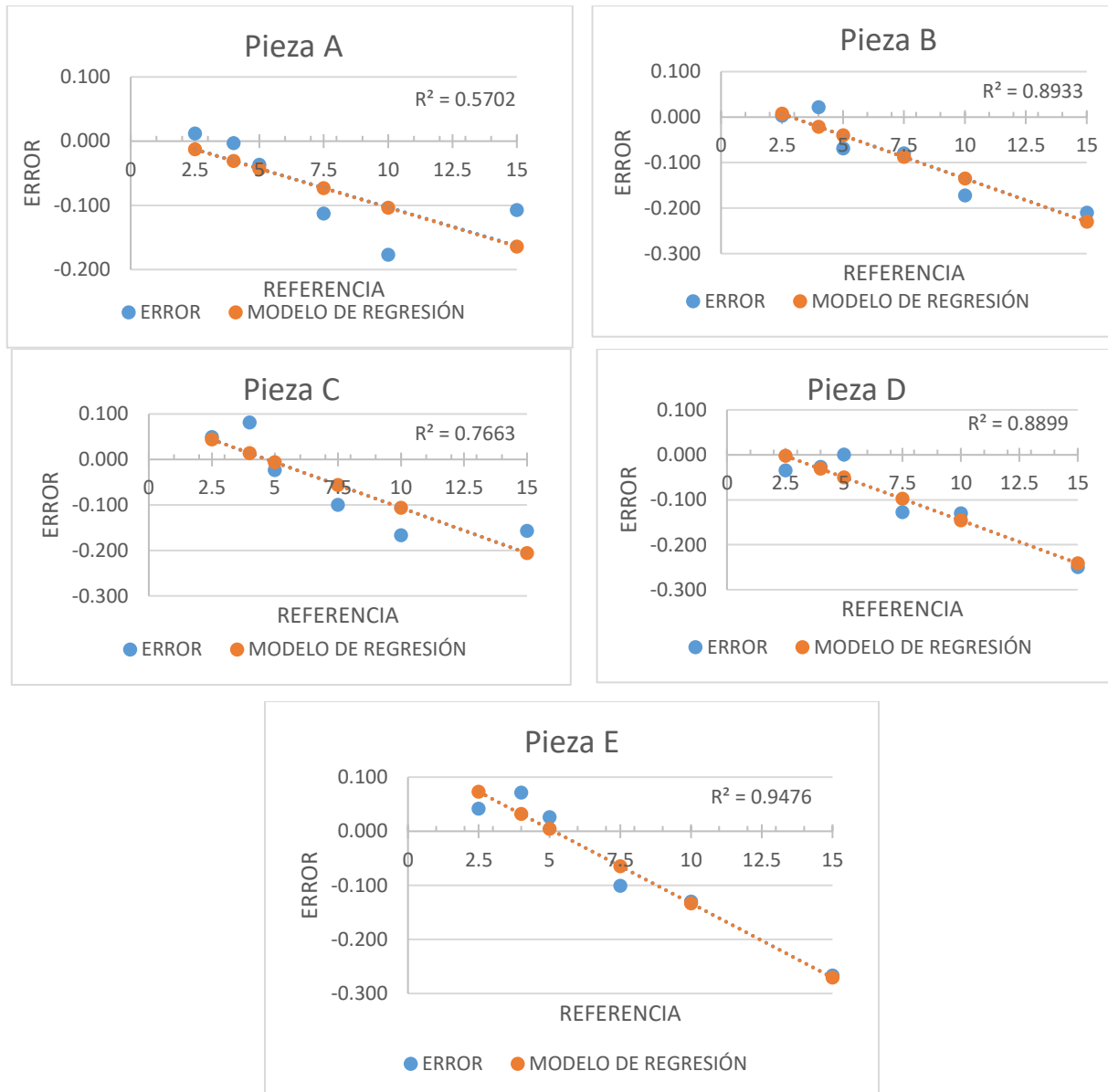
NOMENCLATURA	CARACTERISTICA	COEFICIENTE DE CORRELACION PIEZAS				
		A	B	C	D	E
CIR	DIAMETRO DE ORIFICIO	-0.86	-0.77	-0.67	-0.76	-0.53
CP	DIAMETRO DE PIN CIRCULAR	0.77	0.55	0.62	0.44	0.60
DPR	DISTANCIA ENTRE PAREDES DE PIN RECTANGULAR	-0.13	0.67	0.35	-0.26	-0.49
DR	DISTANCIA ENTRE PAREDES DE ORIFICIO RECTANGULAR	-0.75	-0.94	-0.87	-0.94	-0.97

Elaboración propia.

En las gráficas mostradas en la figura 7, se pueden observar las tendencias correspondientes a la pieza de referencia impresas en posiciones A, B, C, D Y E de la característica de distancia entre paredes de orificio rectangular por ser la característica de mejor correlación. En las gráficas, se pueden observar que la variable independiente (X), valores nominales de la característica establecida, y la variable dependiente (Y), la diferencia entre el valor medido de cada característica y el valor nominal establecido en su diseño. En las gráficas de las piezas A y C se encuentran las diferencias más grandes y en las piezas B, D y E las diferencias más pequeñas, con respecto a sus coeficientes de correlación (R).

## 5.0 Conclusiones

De acuerdo a los resultados obtenidos podemos concluir que mediante el procedimiento de análisis de datos multivariado de cálculo de la  $T^2$  de Hotelling con  $p$  y  $n-1$  grados de libertad y posterior cálculo de la distribución  $F$ , debido a su relación directa, encontramos que la media ( $\bar{X}$ ) de los valores medidos de las variables de la pieza patrón se ajustan a las medias ( $\mu$ ) de sus valores nominales establecidos en el diseño CAD, en 19 de las 20 combinaciones analizadas. La combinación 11 se encuentra por encima del valor crítico, lo que indica que los valores medidos no se ajustan a los valores nominales y por consecuencia es necesario realizar otras combinaciones de las variables utilizadas en esta combinación con otras que ayuden a identificar las variables que influyen más para rechazar nuestra hipótesis y eliminarla del diseño de una pieza de referencia para realizar las evaluaciones dimensionales.



**Figura 7.** Graficas de modelos de regresión lineal simple para las distancias entre paredes de orificios rectangulares. Elaboración propia.

Con respecto a la prueba de planitud se demostró que existen diferencias dimensionales en las distintas posiciones definidas. Estas comparaciones fueron realizadas, tomando como referencia la posición A, como se indica en figura 3. Por consiguiente, se puede concluir que la plataforma de impresión, no se encuentra plana, presentando un declive en las zonas inferiores (posiciones D y E) y más hacia la esquina inferior derecha. Debido a este resultado, la impresión de productos en estas

posiciones de la plataforma de impresión puede presentar diferencias en sus características dimensionales, si la impresora 3D es utilizada en la elaboración de varios productos simultáneamente en toda la plataforma de impresión. Dependiendo del uso de cada impresora, se puede presentar desgaste (deriva) en la guía (eje Z) que genera el movimiento y soporte de la plataforma de impresión de la impresora utilizada, por lo tanto, sería de gran ayuda establecer un procedimiento de verificación periódica de la

planitud de la plataforma de impresión con piezas de referencia. Es importante considerar que la eficiencia de impresión depende en gran medida del espacio disponible, con errores dentro de la tolerancia establecida de la pieza por elaborar en cualquier posición en el área de la plataforma de impresión [28].

La prueba de linealidad demostró que las características de orificios, identificados como diámetro de orificio (CIR) y distancia entre paredes de orificio rectangular (DR) si presentan valores de coeficientes de correlación altos (por encima de 0.7) y esto permite poder generar modelos de regresión lineal simple. Estos modelos de regresión permiten realizar estimaciones del comportamiento de los posibles errores, que ayuden en la implementación de ajustes confiables en el diseño CAD. Sin embargo, en las características salientes es decir los identificados como diámetro de pin rectangular (CP) y distancias entre paredes de pin rectangular (DPR) no presentan una correlación entre las variables, los valores nominales establecidos en el diseño (variable X) y el error encontrado en la medición (variable Y), por lo cual los comportamientos de los errores no presenta una linealidad en sus resultados y estos datos no pueden ser considerados para generar un modelo de regresión lineal simple. Una posible causa de esto puede ser debido al efecto de contracción de los materiales al momento del proceso de solidificación de la pieza impresa. Otra hipótesis es que la impresora utilizada en este trabajo genera menos errores cuando trata de agregar material contrario a cuando no lo agrega, lo cual es lógico si partimos de que la tecnología utilizada es deposición fundida. Esta prueba de linealidad permite observar que el método de impresión de pieza de referencia utilizado en este trabajo sea muy dependiente del tipo de características a imprimir. Por lo que, al parecer, el método de impresión de piezas de referencia para

compensar los errores geométricos y dimensionales de una I3D no es el más adecuado, y, por lo tanto, métodos alternativos como interferómetros láser, láser tracker o cámaras de seguimiento de los movimientos de las impresoras sean más convenientes.

Aunque el método de la pieza de referencia pueda no ser el más adecuado para compensar el comportamiento dimensional y geométrico de una impresora 3D, si es útil para evaluar e identificar que la I3D presente deficiencias en la exactitud dimensional y geométrica de las piezas fabricadas, además este método presenta las siguientes ventajas:

1. Existe el estándar ISO/ASTM 52902:2019 donde está definido las mediciones cuantitativas que deben realizarse a una pieza de referencia y los procedimientos de evaluación para demostrar el rendimiento dimensional de los equipos utilizado por la MA, con el propósito de evaluar la capacidad y ajuste del sistema [42].
2. Cuando se modifiquen los parámetros de impresión. Grosor de capa, velocidad y temperatura de impresión, entre otros.
3. Se utilice un equipo de otro fabricante.
4. Se modifique la densidad de la pieza.
5. Se requiera la utilización de material de soporte.
6. Se modifique el diámetro de boquilla.

De igual forma, la determinación de estos errores, a partir de la utilización de una pieza de referencia, pueda ayudar en el desarrollo de procedimientos de compensación de los errores geométricos que pueden presentarse en diferentes impresoras 3D, independientemente de la tecnología que se utilice.

## 6.0 Referencias

- [1] A. Boschetto and L. Bottini, “Accuracy prediction in fused deposition modeling,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 73, no. 5–8, pp. 913–928, 2014, doi: 10.1007/s00170-014-5886-4.
- [2] S. Goehrke, “Diversity for Additive Manufacturing: First Quarter 2018 Report”, 2018.
- [3] A. ISO/ASTM 52900:2015, “Standard Terminology for Additive Manufacturing – General Principles – Terminology”, *ASTM International*, vol. i. pp. 1–9, 2015, [Online]. Available: [http://compass.astm.org/EDIT/html\\_a\\_nnot.cgi?ISOASTM52900+15](http://compass.astm.org/EDIT/html_a_nnot.cgi?ISOASTM52900+15).
- [4] M. a. M. Alhubail, “Statistical-based optimization of process parameters of fused deposition modelling for improved quality”, University of Portsmouth, 2012.
- [5] D. Herzog, V. Seyda, E. Wycisk, and C. Emmelmann, “Acta Materialia Additive manufacturing of metals”, *Acta Mater.*, vol. 117, pp. 371–392, 2016, doi: 10.1016/j.actamat.2016.07.019.
- [6] B. S. Ian Gibson, David Rosen, *Additive Manufacturing Technologies*, Second. Springer, 2015.
- [7] S. H. Huang, P. Liu, A. Mokasdar, and L. Hou, “Additive manufacturing and its societal impact: A literature review”, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 67, no. 5–8, pp. 1191–1203, 2013, doi: 10.1007/s00170-012-4558-5.
- [8] C. Cajal, J. Santolaria, D. Samper, and J. Velazquez, “Efficient volumetric error compensation technique for additive manufacturing machines”, *Rapid Prototyp. J.*, vol. 22, no. 1, pp. 2–19, 2016, doi: 10.1108/RPJ-05-2014-0061.
- [9] S. Moylan, J. Slotwinski, A. Cooke, K. Jurens, and M. A. Donmez, “An Additive Manufacturing Test Artifact”, *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.*, vol. 119, p. 429, 2014, doi: 10.6028/jres.119.017.
- [10] S. Moylan, A. Cooke, K. Jurens, J. Slotwinski, and M. A. Donmez, “NISTIR 7858 A Review of Test Artifacts for Additive Manufacturing”, 2012.
- [11] M. Jadayel and F. Khameneifar, “Improving geometric accuracy of 3d printed parts using 3d metrology feedback and mesh morphing”, *J. Manuf. Mater. Process.*, vol. 4, no. 4, 2020, doi: 10.3390/jmmp4040112.
- [12] J. Kacmarcik, D. Spahic, K. Varda, E. Porca, and N. Zaimovic-Uzunovic, “An investigation of geometrical accuracy of desktop 3D printers using CMM”, *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 393, no. 1, 2018, doi: 10.1088/1757-899X/393/1/012085.
- [13] N. Decker and A. Yee, “A simplified benchmarking model for the assessment of dimensional accuracy in FDM processes”, *Int. J. Rapid Manuf.*, vol. 5, no. 2, p. 145, 2015, doi: 10.1504/ijrapidm.2015.073573.
- [14] S. O. Akande, “Dimensional Accuracy and Surface Finish Optimization of Fused Deposition Modelling Parts using Desirability Function Analysis”, *Int. J. Eng. Res. Technol.*, vol. 4, no. 04, pp. 196–202, 2015, doi: 10.17577/IJERTV4IS040393.
- [15] A. C. Majarena, J. J. Aguilar, and J.

- Santolaria, “Development of an error 3D printers Society compensation Costing models for capacity optimization in Industry 4 . 0 : Trade-off between used capacity and operational efficiency Development of an erro”, *Procedia Manuf.*, vol. 13, pp. 864–871, 2017, [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.09.145>.
- [16] M. G. Teeter, A. J. Kopacz, H. N. Nikolov, and D. W. Holdsworth, “Metrology test object for dimensional verification in additive manufacturing of metals for biomedical applications”, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part H J. Eng. Med.*, vol. 229, no. 1, pp. 20–27, 2015, doi: 10.1177/0954411914565222.
- [17] B. Hao, E. Korkmaz, B. Bediz, and O. B. Ozdoganlar, “A novel test artifact for performance evaluation of additive manufacturing processes”, *Proc. - ASPE 2014 Spring Top. Meet. Dimens. Accuracy Surf. Finish Addit. Manuf.*, pp. 167–172, 2014.
- [18] S. Ibaraki and Y. Ota, “A machining test to evaluate geometric errors of five-axis machine tools with its application to thermal deformation test”, *Procedia CIRP*, vol. 14, pp. 323–328, 2014, doi: 10.1016/j.procir.2014.03.109.
- [19] S. Moylan, J. Slotwinski, A. Cooke, K. Jurens, and M. A. Donmez, “An Additive Manufacturing Test Artifact”, *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.*, vol. 119, pp. 429–459, 2014, doi: 10.6028/jres.119.017.
- [20] R. Hocken, *Coordinate measuring machines and systems*, Second., vol. 20, no. 4. 2012.
- [21] H. Schwenke, W. Knapp, H. Haitjema, A. Weckenmann, R. Schmitt, and F. Delbressine, “CIRP Annals - Manufacturing Technology Geometric error measurement and compensation of machines — An update”, vol. 57, pp. 660–675, 2008, doi: 10.1016/j.cirp.2008.09.008.
- [22] C. Cajal, J. Santolaria, D. Samper, and J. Velazquez, “Efficient volumetric error compensation technique for additive manufacturing machines”, *Rapid Prototyp. J.*, vol. 22, no. 1, pp. 2–19, 2016, doi: 10.1108/RPJ-05-2014-0061.
- [23] D. Dimitrov, W. van Wijck, K. Schreve, and N. de Beer, “Investigating the achievable accuracy of three dimensional printing”, *Rapid Prototyp. J.*, vol. 12, no. 1, pp. 42–52, 2006, doi: 10.1108/13552540610637264.
- [24] S. Campanelli, N. Contuzzi, A. Angelastro, and A. Domenico, “Capabilities and Performances of the Selective Laser Melting Process”, *New Trends Technol. Devices, Comput. Commun. Ind. Syst.*, 2010, doi: 10.5772/10432.
- [25] F. Calignano *et al.*, “Investigation of accuracy and dimensional limits of part produced in aluminum alloy by selective laser melting”, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 88, no. 1–4, pp. 451–458, 2017, doi: 10.1007/s00170-016-8788-9.
- [26] J. Kruth, B. Vandenbroucke, J. Vaerenbergh, and P. Mercelis, “Benchmarking of different SLS/SLM processes as rapid manufacturing techniques”, *Int. Conf. Polym. Mould. Innov. (PMI), Gent, Belgium, April 20-23, 2005*, pp. 1–7, 2005, [Online]. Available:

- <http://doc.utwente.nl/52902/1/Wa1021.pdf>.
- [27] N. S. A. Bakar, M. R. Alkahari, and H. Boejang, "Analysis on fused deposition modelling performance", *J. Zhejiang Univ. Sci. A*, vol. 11, no. 12, pp. 972–977, 2010, doi: 10.1631/jzus.A1001365.
- [28] T. Brajliah, B. Valentan, J. Balic, and I. Drstvensek, "Speed and accuracy evaluation of additive manufacturing machines", *Rapid Prototyp. J.*, vol. 17, no. 1, pp. 64–75, 2011, doi: 10.1108/13552541111098644.
- [29] W. M. Johnson, M. Rowell, B. Deason, and M. Eubanks, "Benchmarking Evaluation of an Open Source Fused Deposition", *Proc. Solid Free. Fabr. Symp.*, pp. 197–211, 1997.
- [30] S. Saqib and R. J. Urbanic, *Enabling Manufacturing Competitiveness and Economic Sustainability*, no. September. 2012.
- [31] P. Minetola, M. Galati, L. Iuliano, E. Atzeni, and A. Salmi, "The Use of Self-replicated Parts for Improving the Design and the Accuracy of a Low-cost 3D Printer", *Procedia CIRP*, vol. 67, no. February 2020, pp. 203–208, 2018, doi: 10.1016/j.procir.2017.12.200.
- [32] J. G. Zhou, D. Herscovici, and C. C. Chen, "Parametric process optimization to improve the accuracy of rapid prototyped stereolithography parts", *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 40, no. 3, pp. 363–379, 2000, doi: 10.1016/S0890-6955(99)00068-1.
- [33] Gregorian A, *ACCURACY IMPROVEMENT IN RAPID PROTOTYPING MACHINE (FDM-1650)*. 2001, pp. 77–84.
- [34] M. Mahesh, Y. S. Wong, J. Y. H. Fuh, and H. T. Loh, "A Six-sigma approach for benchmarking of RP&M processes", *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 31, no. 3–4, pp. 374–387, 2006, doi: 10.1007/s00170-005-0201-z.
- [35] M. Mahesh, Y. S. Wong, J. Y. H. Fuh, and H. T. Loh, "A Six-sigma approach for benchmarking of RP&M processes", *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 31, no. 3–4, pp. 374–387, 2006, doi: 10.1007/s00170-005-0201-z.
- [36] N. Hanumaiah and B. Ravi, "Rapid tooling form accuracy estimation using region elimination adaptive search based sampling technique", *Rapid Prototyp. J.*, vol. 13, no. 3, pp. 182–190, 2007, doi: 10.1108/13552540710750933.
- [37] T. Brajliah, B. Valentan, J. Balic, and I. Drstvensek, "Speed and accuracy evaluation of additive manufacturing machines", *Rapid Prototyp. J.*, vol. 17, no. 1, pp. 64–75, 2011, doi: 10.1108/13552541111098644.
- [38] M. a. M. Alhubail, "Statistical-based optimization of process parameters of fused deposition modelling for improved quality", University of Portsmouth, 2012.
- [39] C. Bayley, L. Bochmann, C. Hurlbut, M. Helu, R. Transchel, and D. Dornfeld, "Understanding error generation in fused deposition modeling", *Proc. - ASPE 2014 Spring Top. Meet. Dimens. Accuracy Surf. Finish Addit. Manuf.*, vol. 57, pp. 98–103, 2014.
- [40] C. Bayley, L. Bochmann, C. Hurlbut, M. Helu, R. Transchel, and D.

- Dornfeld, "Understanding Error Generation in Fused Deposition Modeling Manufacturing and University of California", University of California , Institute of Machine Tools and Manufacturing Swiss Federal Institute of Technology Zurich," vol. 57, pp. 98–103, 2014.
- [41] J. Kacmarcik, D. Spahic, K. Varda, E. Porca, and N. Zaimovic-Uzunovic, "An investigation of geometrical accuracy of desktop 3D printers using CMM", 2 *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 393, no. 1, p. 9, 2018, doi: 10.1088/1757-899X/393/1/012085.
- [42] ISO, "BS EN ISO / ASTM 52902 : 2019 BSI Standards Publication Additive manufacturing - Test artifacts - Geometric capability assessment of additive manufacturing systems", 2 vol. 2019, 2019.
- [43] M. K. Thompson *et al.*, "Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints", *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 65, no. 2, pp. 737–760, 2016, doi: 10.1016/j.cirp.2016.05.004.
- [44] M. Balzarini, C. Bruno, M. Córdoba, and I. Teich, "Herramientas en el Análisis Estadístico Multivariado", no. December, p. 200, 2015.
- [45] H. Gutiérrez Pulido, P. Gutiérrez González, C. Garibay López, and L. Díaz Caldera, "Análisis multivariado y QFD como herramientas para escuchar la voz del cliente y mejorar la calidad del servicio", *Ingeniare. Rev. Chil. Ing.*, vol. 22, no. 1, pp. 62–73, 2014, doi: 10.4067/s0718-33052014000100007.
- [46] R. J. S. Evans, Michael J, *Probabilidad y estadística. La ciencia de la incertidumbre*, Primera. Reverte, 2005.