



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Verificación volumétrica y compensación de errores
en sistemas de fabricación aditiva de plástico de
bajo coste

Volumetric verification and error compensation for
plastic additive manufacturing low-cost machines

Autor

Carlos Alberto Villacampa Guardia

Directores

Ana Cristina Majarena Bello

Jorge Santolaria Mazo

Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

Escuela Ingeniería y Arquitectura

2017



DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

D./D^a: Carlos Alberto Villasampa Guardia

con nº de DNI 17766334-F en aplicación de lo dispuesto en el art.

14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster)

Grado (Título del Trabajo)

Verificación voluntaria y compensación de energía en sistemas de fabricación aditiva de plástico de bajo costo

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, 23 de Junio de 2017

Fdo: Carlos Alberto Villasampa Guardia

Verificación volumétrica y compensación de errores en sistemas de fabricación aditiva de plástico de bajo coste

RESUMEN

El objetivo principal de este Trabajo Fin de Grado es minimizar los errores de fabricación de varias impresoras 3D, de tecnología Modelado de Fusión por Deposición (FDM), muy utilizada en prototipado rápido en el sector industrial, empleando para ello un proceso de verificación volumétrica.

Se han desarrollado los modelos cinemáticos correspondientes a tres modelos de impresoras 3D, para los cuales en la bibliografía especializada consultada no se han encontrado referencias.

Para poder realizar la compensación de los errores de fabricación utilizando el modelo cinemático, se ha diseñado una pieza patrón con la que se puede obtener información acerca del funcionamiento de la impresora. Esta pieza patrón ha sido impresa con las tres impresoras utilizadas en este trabajo.

A partir de la medición en la pieza patrón de un elevado número de puntos, mediante una máquina de medir por coordenadas, se pueden obtener los errores en la fabricación de la pieza.

Conocidos los errores de fabricación, y empleando un proceso de optimización en el que se comparan los puntos medidos con las coordenadas nominales del CAD de esos mismos puntos, y utilizando polinomios de Legendre como funciones de error, se han obtenido los valores de los coeficientes de dichas funciones.

Posteriormente, se ha realizado una compensación de los errores sobre el código CNC que define las trayectorias del extrusor. Se han calculado también los errores teóricos que se esperan obtener después de haber realizado el proceso de optimización.

Una vez compensados los errores calculados inicialmente, se han impreso de nuevo las piezas patrón. Se ha realizado un segundo proceso de medición sobre las piezas corregidas y se han calculado los errores de fabricación.

Por último, se han analizado los resultados obtenidos de esta verificación volumétrica. Se han comparado con los resultados obtenidos tanto en la medición de la pieza inicial como con los resultados teóricos esperados. También se ha realizado una comparación entre los errores obtenidos en las diferentes impresoras.

Índice

1. Introducción	5
1.1 Antecedentes	5
1.2 Objetivo y alcance	5
1.3 Estructura de la memoria	5
2. Introducción a la fabricación aditiva y modelos cinemáticos	7
2.1 Fabricación aditiva. Las máquinas	7
2.2 El material	9
2.3 Modelos cinemáticos	10
2.4 Software. Cura	15
3. Estudio, diseño e impresión de la pieza patrón	17
3.1 Introducción	17
3.2 Impresión de la pieza	19
3.2.1. Parámetros de impresión	19
3.2.2. Estimación del coste de fabricación de una pieza	20
4. Medición y cálculo de errores	21
4.1 Proceso de medición	21
4.2 Validación mediciones	23
4.3 Análisis de los resultados	23
5. Verificación volumétrica	29
5.1 Introducción	29
5.2 Cálculo de errores	30
5.3 Proceso de compensación de errores e impresión pieza compensada	35
6. Resultados	39
6.1 Análisis de los resultados obtenidos	39
6.2 Comparativa entre las diferentes máquinas	44
7. Conclusiones y líneas futuras	45
7.1 Conclusiones	45
7.2 Líneas futuras	45
8. Bibliografía	47

Lista de figuras

Figura 2.1	Impresora Witbox 1	7
Figura 2.2	Impresora Witbox 2	8
Figura 2.3	Impresora Hephestos 2.....	9
Figura 2.4	Bobinas filamento PLA.....	9
Figura 2.5	Características del material empleado, PLA	10
Figura 2.6	Esquema ejes Witbox y Witbox 2	10
Figura 2.7	Diagrama vectorial de las impresoras Witbox y Witbox 2.....	11
Figura 2.8	Matrices infinitesimales de rotación	12
Figura 2.9	Esquema ejes Hephestos 2	13
Figura 2.10	Diagrama vectorial Hephestos 2.....	13
Figura 2.11	A la izquierda, altura de capa alta y a la derecha, altura de capa baja	15
Figura 2.12	Densidad 15%, 30% y 50% respectivamente	15
Figura 3.1	Pieza patrón utilizada. Pirámide lineal	17
Figura 3.2	Alojamientos cónicos empleados, en mm.....	18
Figura 3.3	Impresión pieza en Witbox.....	19
Figura 3.4	Pieza impresa finalizada en Witbox.....	20
Figura 4.1	Pieza sujeta para medir	21
Figura 4.2	Elementos medidos y sistema de referencia.....	21
Figura 4.3	Distribución de los puntos en la pieza patrón	22
Figura 4.4	Error medio plano X-Y Witbox 1 pieza inicial	24
Figura 4.5	Vectores de errores Witbox 1 pieza inicial	25
Figura 4.6	Error medio plano X-Y Hephestos 2 pieza inicial	25
Figura 4.7	Vectores de errores Hephestos 2 pieza inicial.....	26
Figura 4.8	Error medio plano X-Y Witbox 2 pieza inicial	27
Figura 4.9	Vectores de errores Witbox 2 pieza inicial	28
Figura 5.1	Diagrama de bloques del proceso de identificación [5]	30
Figura 5.2	Nomenclatura errores eje X	31
Figura 5.3	Vector de errores esperado Witbox 1	32
Figura 5.4	Vector de errores esperado Hephestos 2.....	33
Figura 5.5	Vector de errores esperado Witbox 2	35
Figura 5.6	Gcode original Witbox 1	36
Figura 5.7	Gcode corregido Witbox 1.....	36
Figura 5.8	Gcode original Witbox 2	36
Figura 5.9	Gcode corregido Witbox 2.....	36

Figura 5.10	Gcode original Hephestos 2.....	37
Figura 5.11	Gcode corregido Hephestos 2	37
Figura 5.12	Pieza corregida Witbox 2.....	37
Figura 5.13	Pieza corregida Hephestos 2	38
Figura 5.14	Piezas patrón originales y corregidas	38
Figura 6.1	Comparación error medio Witbox 1.....	39
Figura 6.2	Comparación vector de errores W1. Izquierda, original. Derecha, compensada. .	40
Figura 6.3	Comparación error medio Hephestos 2	41
Figura 6.4	Comparación vector de errores H2. Izquierda, original. Derecha, compensada. ..	41
Figura 6.5	Comparación error medio Witbox 2.....	42
Figura 6.6	Comparación vector de errores W2. Izquierda, original. Derecha, compensada. .	43

Lista de tablas

Tabla 2.1	Características impresoras.....	7
Tabla 3.1	Cotas bases eje Z.....	18
Tabla 3.2	Parámetros relevantes impresión	19
Tabla 4.1	Errores y desviación típica estándar en la validación, en mm.....	23
Tabla 4.2	Error medio y máximo Witbox 1 pieza inicial	24
Tabla 4.3	Comparación eje Z Witbox 1 pieza inicial.....	24
Tabla 4.4	Error medio y máximo Hephestos 2 pieza inicial.....	26
Tabla 4.5	Comparación eje Z Hephestos 2 pieza inicial	26
Tabla 4.6	Error medio y máximo Witbox 2.....	27
Tabla 4.7	Comparación eje Z Witbox 2 pieza inicial.....	28
Tabla 5.1	Coefficientes error Witbox 1.....	31
Tabla 5.2	Errores esperados Witbox 1, en mm.	32
Tabla 5.3	Coefficientes error Hephestos 2	33
Tabla 5.4	Errores esperados Hephestos 2, en mm.....	33
Tabla 5.5	Coefficientes error Witbox 2.....	34
Tabla 5.6	Errores esperados Witbox 2, en mm.	34
Tabla 6.1	Comparación error medio Witbox 1.....	39
Tabla 6.2	Comparación eje Z Witbox 1.....	40
Tabla 6.3	Comparación error medio Hephestos 2	41
Tabla 6.4	Comparación eje Z Hephestos 2	42
Tabla 6.5	Comparación error medio Witbox 2.....	43
Tabla 6.6	Comparación eje Z Witbox 2.....	43
Tabla 6.7	Comparativa errores impresoras.....	44

1. Introducción

1.1 Antecedentes

Hoy en día la Fabricación Aditiva es ya una revolución, debido a la facilidad que existe para producir cualquier elemento con una geometría, por compleja que pueda ser, con unos costes de fabricación muy reducidos.

Se han realizado estudios sobre diferentes métodos para mejorar la precisión de las impresoras, centrándose en máquinas de depósito por fotopolimerización, dado que son las más utilizadas por sus excelentes características en el prototipado rápido. Sin embargo, no se han encontrado trabajos en la bibliografía especializada consultada sobre el Modelado de fusión por deposición (FDM), tecnología que utilizan hoy en día una gran cantidad de impresoras 3D capaces de fabricar piezas en numerosos materiales para ser utilizadas, entre otros, en el sector industrial. Tampoco se han encontrado trabajos en la bibliografía correspondientes a los modelos cinemáticos de estas máquinas. Es por este motivo que se ha desarrollado este trabajo cuyo objetivo se explicará en el siguiente apartado.

1.2 Objetivo y alcance

El objetivo de este proyecto es desarrollar el modelo cinemático de tres impresoras 3D de coste reducido, inferior a 1.700 €, para realizar una verificación volumétrica que permita compensar los errores que poseen las máquinas a través del software, mejorando su precisión y evitando así realizar cualquier tipo de modificación estructural sobre las impresoras. Para ello, el trabajo se ha llevado a cabo en diferentes fases:

- Análisis de la geometría necesaria para las piezas patrón de medición
- Obtención del CAD de la pieza a partir de Solid Edge e impresión de la pieza con las tres impresoras 3D, a partir del software libre Cura
- Medición de la pieza utilizando una máquina de medir por coordenadas (MMC) y el software correspondiente, Calypso
- Modelado cinemático de las impresoras 3D e identificación de los errores de las máquinas de fabricación aditiva empleadas
- Compensación de los errores en los modelos cinemáticos y generación del código corregido de piezas a imprimir utilizando Matlab
- Impresión de pieza patrón corregida para analizar la verificación empleada
- Análisis de los resultados obtenidos y comparación de los mismos

1.3 Estructura de la memoria

En el presente capítulo se ha redactado una pequeña introducción del trabajo a realizar explicando los objetivos, así como las fases en las que se dividirá el mismo.

En el segundo capítulo se realiza una pequeña introducción de la fabricación aditiva, centrándose en las máquinas a utilizar y en el material empleado. También se explica el desarrollo de los modelos cinemáticos calculados y del proceso a seguir para realizar una optimización volumétrica en impresoras de tecnología FDM.

Posteriormente, en el capítulo tercero, se realiza un breve estudio sobre las características que deben tener las piezas patrón (aplicado a la tecnología empleada), el proceso de diseño de la pieza patrón empleada y por último la impresión de la misma.

En el capítulo cuarto se explica el proceso llevado a cabo para medir las piezas, el posterior tratamiento de los datos obtenidos y en último lugar el cálculo de los errores de las máquinas.

El quinto capítulo está dedicado a la verificación volumétrica. Primero, se realiza una pequeña introducción, para después calcular los coeficientes de los errores de las máquinas empleadas. Posteriormente, se explica el proceso que se ha llevado a cabo para compensar los errores calculados. Y para finalizar este capítulo se comenta de nuevo el proceso de impresión y medición de la nueva pieza, en este caso, habiendo sido compensada.

El capítulo seis está dedicado a los resultados obtenidos después de haber impreso las piezas compensadas. En primer lugar se analizan los resultados obtenidos para cada una de las máquinas de forma individual. Después, se comparan los resultados más relevantes entre las diferentes máquinas.

En el último capítulo, el séptimo, se detallan las conclusiones a las que se ha llegado después de haber realizado este trabajo, justificando en la medida de lo posible todos los resultados obtenidos, así como las posibles causas de los mismos. Por último, se proponen líneas futuras para continuar desarrollando este trabajo, dado que queda un largo recorrido con una amplia variedad de parámetros que influyen en el comportamiento de la máquina y cuyo análisis es necesario para poder aproximarse en mayor medida a los errores mínimos teóricos obtenidos, y con el objetivo último de continuar mejorando la precisión de estas máquinas.

2. Introducción a la fabricación aditiva y modelos cinemáticos

2.1 Fabricación aditiva. Las máquinas

La tecnología empleada por las tres impresoras fue patentada por Stratasys [1] hace más de 20 años y es conocida como Modelado de fusión por deposición (FDM). Su funcionamiento sigue siendo el mismo que entonces, puesto que las piezas se construyen capa por capa, calentando el material termoplástico hasta un estado casi líquido, para posteriormente extruirlo según las rutas generadas por el ordenador.

En la Tabla 2.1 se presentan las tres impresoras que se van a utilizar en este trabajo, junto con alguna de sus características principales.

Impresora	Witbox 1	Witbox 2	Hephestos 2
Resolución máxima de capas	50 micras	20 micras	50 micras
Área de impresión	297x210x200 mm	297x210x200 mm	210x297x200 mm
Nivelación base	Manual	Automática	Automática

Tabla 2.1 Características impresoras

Todas las máquinas utilizadas pertenecen a la misma marca, BQ [2]. BQ es una empresa española fundada en el año 2009 que se dedica al diseño, venta y distribución, entre otros, de teléfonos e impresoras 3D. La primera impresora fabricada íntegramente en España a finales de 2013 es la Witbox, primera máquina utilizada en este trabajo, que según el estudio de 3D Hubs “3D Printing Trends October 2014”, es considerada una de las 10 mejores impresoras del mundo [3]. Se trata de una impresora con carcasa exterior y que permite su cierre completo mediante llave de seguridad, lo que evita que personas que desconocen el funcionamiento de la máquina manipulen el interior de la impresora durante una impresión. También se evitan cambios bruscos de temperatura en el interior debido a corrientes de aire, que pueden llegar a despegar la pieza de la base de impresión. La nivelación de la bandeja de impresión es un proceso manual que requiere de experiencia para obtener impresiones de calidad. En la Figura 2.1 se puede observar la impresora Witbox 1.

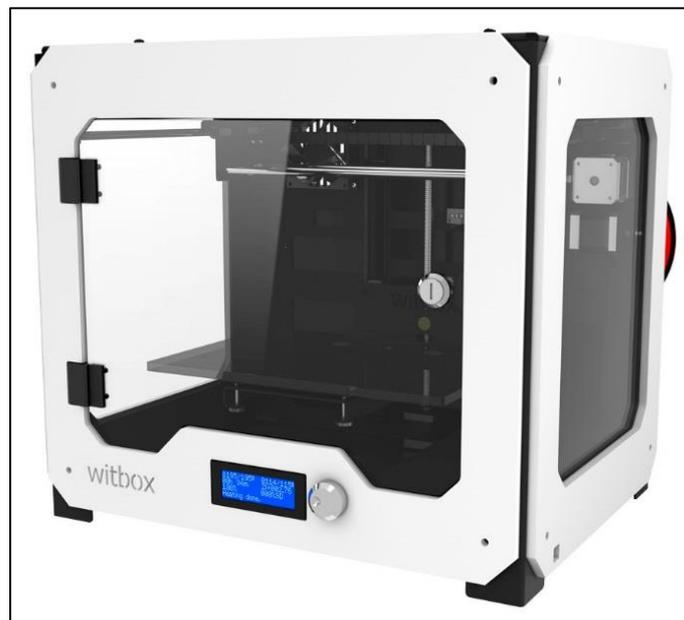


Figura 2.1 Impresora Witbox 1

La impresora Witbox 1 empleada cuenta con una modificación respecto a la original. Se ha sustituido el bloque de extrusión por otro más moderno, el de la Witbox 2, que cuenta con una serie de mejoras respecto al original de 2013.

La segunda impresora empleada es la Witbox 2, que se puede ver en la Figura 2.2 es la evolución de la mencionada Witbox y salió al mercado a finales del año 2015. Conserva la carcasa exterior y comparte dimensiones exteriores con su predecesora, pero presenta una serie de mejoras, por ejemplo, el nuevo sistema de tracción del filamento denominado “*double drive gear*”, que conduce el filamento hacia el extrusor, reduciendo el riesgo de obstrucción y aumentando el número de materiales con los que se puede imprimir. Otra novedad presentada en esta impresora es la auto nivelación mediante un sensor inductivo [4], que está formado por una bobina eléctrica que genera un campo magnético, que permite imprimir aunque la bandeja de impresión no esté bien posicionada. Otros elementos que se han actualizado han sido la electrónica, el cableado o la bandeja de impresión.



Figura 2.2 Impresora Witbox 2

Por último, la Hephestos 2 es la tercera impresora utilizada, que a diferencia de las dos anteriores, presenta una estructura mucho más sencilla y totalmente abierta. Comparte con la Witbox 2 tanto el extrusor como la auto nivelación.

A diferencia de las dos anteriores, en las que el extrusor se desplazaba en los ejes X e Y y la bandeja en el eje Z, el extrusor de la Hephestos 2 se mueve en los ejes X y Z, mientras que la bandeja de impresión se traslada en el eje Y. Esto se traduce en varias diferencias en el modelo cinemático y en las ecuaciones que lo definen, que se comentarán posteriormente. La impresora Hephestos 2 se puede ver en la Figura 2.3.



Figura 2.3 Impresora Hephestos 2

2.2 El material

En la tecnología de Modelado de fusión por deposición (FDM), se pueden utilizar una gran variedad de materiales, como ABS, PLA, FLEX, PETG, EP, PLA3D850, POM... Cada uno de ellos presenta una serie de características diferentes, de forma que el material a utilizar dependerá de la aplicación final. El material empleado es el ácido poliláctico, más conocido en el mundo de la impresión 3D como PLA, un termoplástico que se obtiene a partir del almidón de maíz. Es el más utilizado, debido por una parte a sus características y por otra parte al coste, pues es relativamente bajo, dado que se pueden adquirir bobinas de 1 Kg por tan solo 20 €. Esta cantidad de material permite imprimir durante un elevado número de horas. En la Figura 2.4 se pueden contemplar diferentes bobinas de PLA.



Figura 2.4 Bobinas filamento PLA

En la Figura 2.45 se pueden consultar las características proporcionadas por el fabricante del material empleado.

Physical Properties	Typical Value	Test Method
Material Density	1,24 g/cm ³	ISO 1183
Chemical Name	Polylactic Acid	
Mechanical Properties	Typical Value	Test Method
Tensile Strength	MD 110 MPa	ASTM D882
	TD 114 MPa	ASTM D882
Tensile Modulus	MD 3309 MPa	ASTM D882
	TD 3861 MPa	ASTM D882
Elongation at Break	MD 160%	ASTM D882
	TD 100%	ASTM D882
Elmendorf Tear	MD 15 g/ml	ASTM D1922
	TD 13 g/ml	ASTM D1922
Thermal Properties	Typical Value	Test Method
Heat Deflection Temperature B	65 °C	ASTM D1505
Vicat Softening Temperature	85° C	ASTM D1525
Printing Properties	Typical Value	
Print Temperature	220±20 °C	
Hot Pad	0-60 °C	
Fan Layer	On (100%)	

Figura 2.5 Características del material empleado, PLA

2.3 Modelos cinemáticos

A continuación se exponen los diferentes modelos cinemáticos utilizados en cada una de las máquinas.

- Impresoras Witbox y Witbox 2. Modelo cinemático: ZFYX

El esquema del modelo cinemático ZFYX se observa en la Figura 2.6:

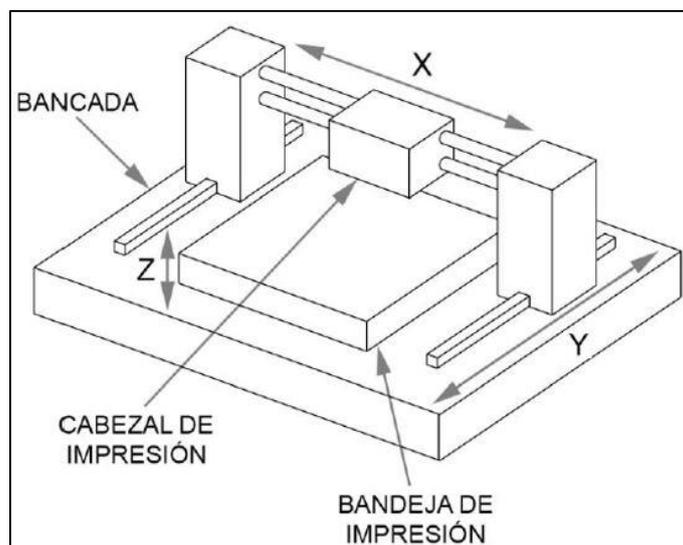


Figura 2.6 Esquema ejes Witbox y Witbox 2

Las impresoras Witbox, tanto de la primera como de la segunda generación comparten el mismo modelo cinemático, dado que la posición de sus ejes es idéntica. Tienen dos cadenas cinemáticas:

- La primera de ellas está formada por los ejes X e Y; el cabezal de impresión está situado en una guía lineal que permite su desplazamiento sobre el eje X; éste conjunto está unido a su vez a otra guía lineal, perpendicular a la anterior, que corresponde al eje Y, que está también en contacto con la bancada de la máquina. Esta primera cadena cinemática permite el movimiento en toda la superficie de impresión, correspondiente al plano XY.
- La segunda cadena cinemática está formado por una guía lineal y la bandeja de impresión; la guía es perpendicular al plano XY, por lo que permite el desplazamiento de la bandeja de impresión a lo largo del eje Z.

El diagrama vectorial correspondiente a este modelo cinemático se representa en la Figura 2.7:

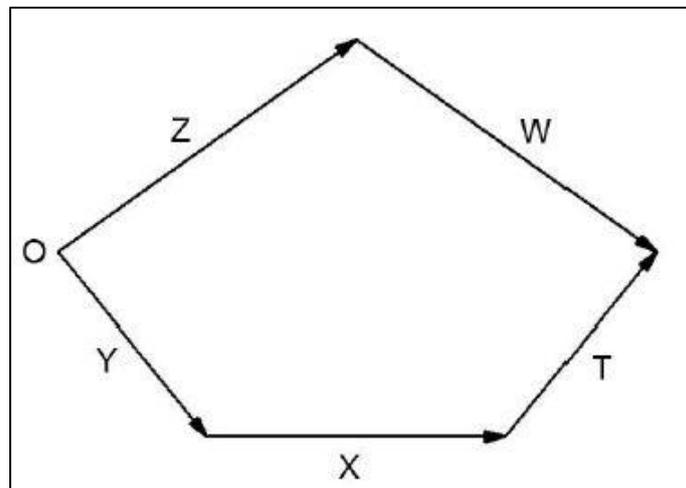


Figura 2.7 Diagrama vectorial de las impresoras Witbox y Witbox 2

En el diagrama vectorial, O es la bancada de la máquina; X, Y y Z son los vectores que representan los desplazamientos de las guías lineales; T es el vector que une el sistema de referencia de la guía lineal correspondiente al eje X con el punto de contacto entre el cabezal de impresión y la pieza que se está fabricando; y finalmente W es el vector que une el sistema de referencia de la guía que permite el movimiento en Z con el punto de contacto entre la pieza y el cabezal de impresión [5]. Estos son los vectores:

$$X = \begin{bmatrix} x + \delta_x(x) \\ \delta_y(x) \\ \delta_z(x) \end{bmatrix} \quad Y = \begin{bmatrix} \delta_x(y) \\ y + \delta_y(y) \\ \delta_z(y) \end{bmatrix} \quad Z = \begin{bmatrix} \delta_x(z) - \alpha_{zx} * z \\ \delta_y(z) - \alpha_{zy} * z \\ z + \delta_z(z) \end{bmatrix}$$

$$T = \begin{bmatrix} x_t \\ y_t \\ z_t \end{bmatrix} \quad W = \begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{bmatrix}$$

La rotación de los ejes se representan con matrices infinitesimales de rotación $R(X)$, $R(Y)$ y $R(Z)$ [6] en la Figura 2.8:

$$R(u) = \begin{bmatrix} 1 & \varepsilon_z(u) & -\varepsilon_y(u) \\ -\varepsilon_z(u) & 1 & \varepsilon_x(u) \\ \varepsilon_y(u) & -\varepsilon_x(u) & 1 \end{bmatrix},$$

$$R^{-1}(u) = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_z(u) & \varepsilon_y(u) \\ \varepsilon_z(u) & 1 & -\varepsilon_x(u) \\ -\varepsilon_y(u) & \varepsilon_x(u) & 1 \end{bmatrix}$$

Figura 2.8 Matrices infinitesimales de rotación

La ecuación que expresa el diagrama vectorial de las cadenas cinemáticas es la siguiente:

$$\vec{Z} + R^{-1}(Z)\vec{W} = \vec{Y} + R^{-1}(Y)\vec{X} + R^{-1}(Y)R^{-1}(X) * \vec{T} \quad \text{Ec. 1}$$

$$\vec{W} = R(Z)\vec{Y} + R(Z)R^{-1}(Y) * \vec{X} - R(Z) * \vec{Z} + R(Z) * R^{-1}(Y) * R^{-1}(X) * \vec{T} \quad \text{Ec. 2}$$

Despejando la ecuación 2 y simplificando los términos de segundo orden, se obtienen los puntos del modelo que se expresan a continuación:

$$X_p = x + [\delta_x(x) + \delta_x(y) + \delta_x(z)] + y\varepsilon_z(z) + z[\alpha_{zx} + \varepsilon_y(z)] + x_t - y_t[\varepsilon_z(y) + \varepsilon_z(x) - \varepsilon_z(z)] + z_t[\varepsilon_y(y) + \varepsilon_y(x) - \varepsilon_y(z)] + \tau_x \quad \text{Ec. 3}$$

$$Y_p = y + [\delta_y(x) + \delta_y(y) - \delta_z(z)] - x[\varepsilon_z(z) + \alpha_{yx} - \varepsilon_z(y)] + z[\alpha_{zy} - \varepsilon_x(z)] + x_t[\varepsilon_z(y) + \varepsilon_z(x) - \varepsilon_z(z)] + y_t - z_t[\varepsilon_x(y) + \varepsilon_x(x) - \varepsilon_x(z)] + \tau_y \quad \text{Ec. 4}$$

$$Z_p = -z + [\delta_z(x) + \delta_z(y) - \delta_z(z)] - x[\varepsilon_y(y) - \varepsilon_y(z)] - y\varepsilon_x(z) - x_t[\varepsilon_y(y) + \varepsilon_y(x) - \varepsilon_y(z)] + y_t[\varepsilon_x(y) + \varepsilon_x(x) - \varepsilon_x(z)] + z_t + \tau_z \quad \text{Ec. 5}$$

donde τ_x, τ_y, τ_z corresponden a los términos debidos a errores no repetibles.

Realizando también simplificaciones relativas al error de perpendicularidad [6] las ecuaciones quedan de la siguiente forma:

$$X_p = x + [\delta_x(x) + \delta_x(y) + \delta_x(z)] + y\varepsilon_z(z) + z\varepsilon_y(z) + x_t - y_t[\varepsilon_z(y) + \varepsilon_z(x) - \varepsilon_z(z)] + z_t[\varepsilon_y(y) + \varepsilon_y(x) - \varepsilon_y(z)] + \tau_x \quad \text{Ec. 6}$$

$$Y_p = y + [\delta_y(x) + \delta_y(y) - \delta_z(z)] - x[\varepsilon_z(z) - \varepsilon_z(y)] - z\varepsilon_x(z) + x_t[\varepsilon_z(y) + \varepsilon_z(x) - \varepsilon_z(z)] + y_t - z_t[\varepsilon_x(y) + \varepsilon_x(x) - \varepsilon_x(z)] + \tau_y \quad \text{Ec. 7}$$

$$Z_p = -z + [\delta_z(x) + \delta_z(y) - \delta_z(z)] - x[\varepsilon_y(y) - \varepsilon_y(z)] - y\varepsilon_x(z) - x_t[\varepsilon_y(y) + \varepsilon_y(x) - \varepsilon_y(z)] + y_t[\varepsilon_x(y) + \varepsilon_x(x) - \varepsilon_x(z)] + z_t + \tau_z \quad \text{Ec. 8}$$

- Impresora Hephestos 2. Modelo cinemático YFZX.



Figura 2.9 Esquema ejes Hephestos 2

En la Figura 2.9 se pueden comprobar los ejes del modelo cinemático YFZX.

La principal diferencia cinemática entre esta impresora y las impresoras Witbox se encuentra en el movimiento de sus ejes. Al igual que en el modelo cinemático anterior, este modelo también está formado por dos cadenas cinemáticas:

- La primera, formada por los ejes Z y X. El bloque del extrusor está colocado sobre una guía lineal que permite el movimiento a lo largo del eje X; éste conjunto está situado sobre otra guía lineal, perpendicular a la anterior y correspondiente al eje Z. que está en contacto con la bancada de la máquina.
- La segunda cadena cinemática está formada por la guía lineal correspondiente al eje Y y por la bandeja de impresión; ésta guía es perpendicular al plano XZ que forman las guías lineales de la primera cadena cinemática. Por tanto, el modelo cinemático de la impresora Hephestos 2 es YFZX, como se puede ver en la Figura 2.10.

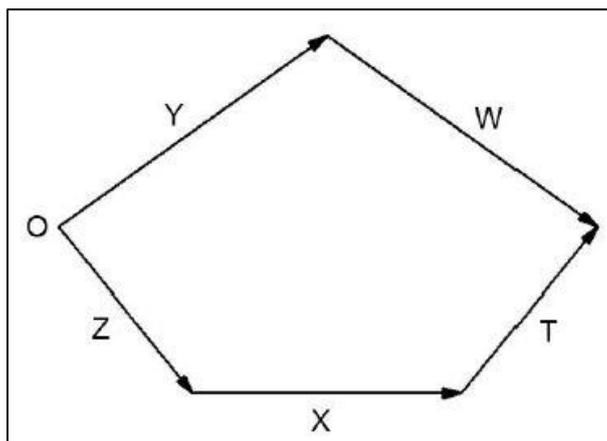


Figura 2.10 Diagrama vectorial Hephestos 2

De forma análoga al modelo cinemático anterior, siendo las matrices de rotación las descritas anteriormente, los vectores X, Y, Z, T y W:

$$X = \begin{bmatrix} x + \delta_x(x) \\ \delta_y(x) \\ \delta_z(x) - \alpha_{zx} * x \end{bmatrix} \quad Y = \begin{bmatrix} \delta_x(y) - \alpha_{yx} * x \\ y + \delta_y(y) \\ \delta_z(y) - \alpha_{yz} * y \end{bmatrix} \quad Z = \begin{bmatrix} \delta_x(z) \\ \delta_y(z) \\ z + \delta_z(z) \end{bmatrix}$$

$$T = \begin{bmatrix} x_t \\ y_t \\ z_t \end{bmatrix} \quad W = \begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{bmatrix}$$

$$\vec{Y} + R^{-1}(Y)\vec{W} = \vec{Z} + R^{-1}(Z)\vec{X} + R^{-1}(Z)R^{-1}(X) * \vec{T} \quad \text{Ec. 9}$$

$$\vec{W} = R(Y)\vec{Z} + R(Y)R^{-1}(Z) * \vec{X} - R(Y) * \vec{Y} + R(Y) * R^{-1}(Z) * R^{-1}(X) * \vec{T} \quad \text{Ec. 10}$$

Sustituyendo los vectores X, Y, Z, W y T y las matrices de rotación en la ecuación del modelo, se obtienen las coordenadas corregidas de la pieza de trabajo:

$$X_p = x + [\delta_x(x) - \delta_x(y) + \delta_x(z)] + y[\alpha_{yx} - \varepsilon_z(y)] - z\varepsilon_y(y) + x_t - y_t[\varepsilon_z(z) + \varepsilon_z(x) - \varepsilon_z(y)] + z_t[\varepsilon_y(z) + \varepsilon_y(x) - \varepsilon_y(y)] + \tau_x \quad \text{Ec. 11}$$

$$Y_p = -y + [\delta_y(x) - \delta_y(y) + \delta_y(z)] - x[\varepsilon_z(y) - \varepsilon_z(z)] + z\varepsilon_x(y) + x_t[\varepsilon_z(z) + \varepsilon_z(x) - \varepsilon_z(y)] + y_t - z_t[\varepsilon_x(z) + \varepsilon_x(x) - \varepsilon_x(y)] + \tau_y \quad \text{Ec. 12}$$

$$Z_p = z + [\delta_z(x) - \delta_z(y) + \delta_z(z)] - x[\varepsilon_y(z) + \alpha_{zx} - \varepsilon_y(z)] + y[\varepsilon_x(y) + \alpha_{yz}] - x_t[\varepsilon_y(z) + \varepsilon_y(x) - \varepsilon_y(y)] + y_t[\varepsilon_x(z) + \varepsilon_x(x) - \varepsilon_x(y)] + z_t + \tau_z \quad \text{Ec. 13}$$

Al igual que en el modelo cinemático anterior, realizando las simplificaciones debidas al error de perpendicularidad [6]:

$$X_p = x + [\delta_x(x) + \delta_x(y) + \delta_x(z)] - y\varepsilon_z(y) - z\varepsilon_y(y) + x_t - y_t[\varepsilon_z(z) + \varepsilon_z(x) - \varepsilon_z(y)] + z_t[\varepsilon_y(z) + \varepsilon_y(x) - \varepsilon_y(y)] + \tau_x \quad \text{Ec. 14}$$

$$Y_p = -y + [\delta_y(x) - \delta_y(y) + \delta_y(z)] - x[\varepsilon_z(y) - \varepsilon_z(z)] + z\varepsilon_x(y) + x_t[\varepsilon_z(z) + \varepsilon_z(x) - \varepsilon_z(y)] + y_t - z_t[\varepsilon_x(z) + \varepsilon_x(x) - \varepsilon_x(y)] + \tau_y \quad \text{Ec. 15}$$

$$Z_p = z + [\delta_z(x) - \delta_z(y) + \delta_z(z)] - x[\varepsilon_y(z) - \varepsilon_y(z)] + y\varepsilon_x(y) - x_t[\varepsilon_y(z) + \varepsilon_y(x) - \varepsilon_y(y)] + y_t[\varepsilon_x(z) + \varepsilon_x(x) - \varepsilon_x(y)] + z_t + \tau_z \quad \text{Ec. 16}$$

2.4 Software. Cura

El software empleado para generar los archivos fabricados por la impresora ha sido el Cura, en su versión 2.3.1, software libre gratuito y desarrollado por Ultimaker [7].

Este programa, recomendado por la marca BQ, permite abrir extensiones STL, OBJ o AMF. En este caso, la pieza diseñada con Solid Edge se guardó en formato STL, por lo que se pudo abrir sin problemas con éste Software. Una vez abierto el archivo, se seleccionaron los parámetros de impresión elegidos para realizar estas pruebas y se generó el archivo con extensión GCode, que es el único formato de archivo con el que trabajan estas impresoras. El GCode es el lenguaje de programación más usado en control numérico. Los parámetros más importantes para llevar a cabo la impresión se exponen a continuación:

- **Altura de capa:** Nos indica la cantidad de material que se deposita sobre la bandeja cada vez que pasa el extrusor. Unos valores altos de altura de capa proporcionan piezas con menor resolución, pero con tiempos de impresión más rápidos. La mínima altura de capa depende de cada impresora. Se puede comprobar en la Figura 2.11:

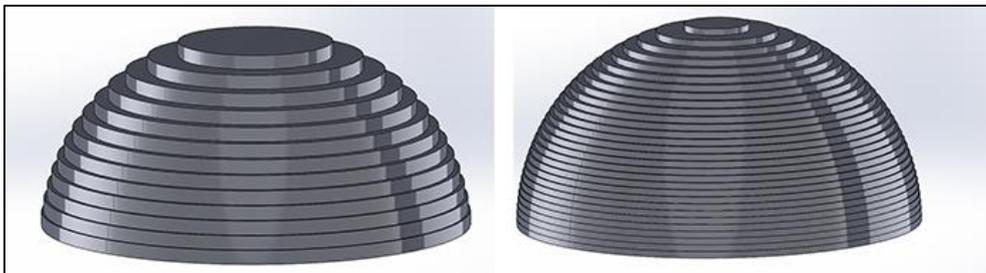


Figura 2.11 A la izquierda, altura de capa alta y a la derecha, altura de capa baja

- **Densidad:** Hay piezas que no van a ser sometidas a grandes esfuerzos y por ello no hay necesidad de que sean macizas. Con este parámetro, el relleno interior de la pieza será una estructura como la que se muestra en la Figura 2.12 del valor que se le indique:

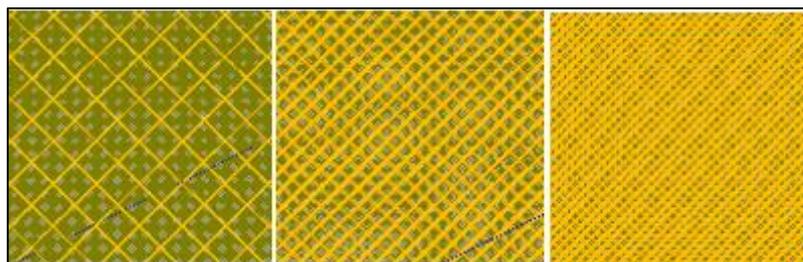


Figura 2.12 Densidad 15%, 30% y 50% respectivamente

- **Temperatura:** Es la temperatura a la que se calienta el material para ser extruido a través de la boquilla del extrusor. Es conveniente imprimir a una temperatura dentro del rango establecido por el fabricante del material, que en el caso del fabricante escogido es 200-220 °C.
- **Velocidad:** Es la velocidad a la que se desplaza el extrusor a través de las guías lineales. Con velocidades elevadas se obtienen piezas con peor calidad, mientras que con velocidades más bajas se obtienen piezas con mejor acabado. Las velocidades recomendadas por el fabricante alcanzan los 60 mm/s.

- Brim: Al comenzar la impresión, y para evitar el efecto del warping (deformación de la pieza durante el proceso de enfriamiento por falta de adherencia del plástico sobre la bandeja de impresión), se imprime un pequeño contorno cuya función es evitar que la pieza se despegue y tener que repetir la impresión.

3. Estudio, diseño e impresión de la pieza patrón

3.1 Introducción

Para poder realizar cualquier tipo de compensación en el modelo cinemático de la impresora, es imprescindible obtener información acerca del funcionamiento real de las máquinas de impresión. Es por esto, que existen las denominadas piezas patrón, que se fabrican con las impresoras y de las que se puede obtener una información geométrica relevante sobre su funcionamiento.

Existen una serie de características que se tienen que tener en cuenta para poder diseñar una pieza patrón válida. Algunos de estos factores son los siguientes [8]:

- La información que proporcionen han de ser lo más representativa posible en términos de volumen y distribución.
- La pieza se ha de diseñar para ser medida. Características como su amarre, estabilidad y obtención de su sistema referencia deben ser prioritarias.
- La necesidad de eliminar el factor humano como fuente de incertidumbre [9], requiere que el proceso de medición pueda llevarse a cabo de manera automatizada y desatendida

Otros factores que se han considerado importantes para este tipo de impresoras de tecnología FDM son los siguientes:

- Evitar el uso de material de soporte para la fabricación de la pieza, dado que puede conllevar errores de fabricación que proporcionen información errónea de la geometría de la pieza
- Intentar que para la fabricación de la pieza, el extrusor no tenga que desplazarse entre puntos sin depositar material, dado que pueden quedar restos de material que alteren la geometría de la pieza y haya que retirarlos posteriormente, además del incremento del tiempo de fabricación por desplazamientos sin deposición de material.

Teniendo en cuenta estos criterios, la pieza final que se ha utilizado para el trabajo ha sido la que se puede visualizar en la Figura 3.1:

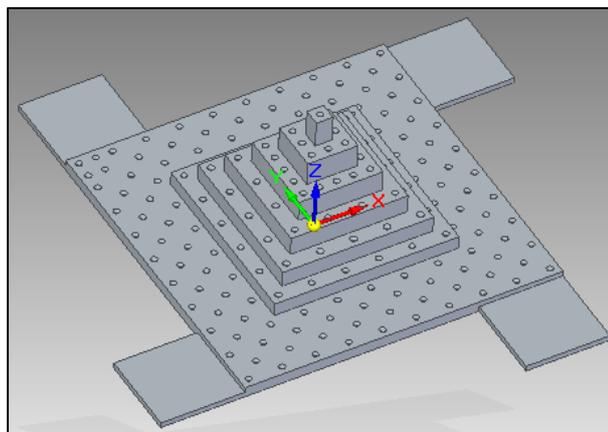


Figura 3.1 Pieza patrón utilizada. Pirámide lineal

Para llegar al diseño final empleado, se han realizado diferentes versiones y pruebas que se encuentran explicadas en el Anexo.

El origen del sistema de referencia se ha establecido en la esquina inferior de la Figura 3.1, con la disposición de los ejes que se puede observar en esta misma figura.

La pieza patrón está formada por 7 bases, que se han numerado de forma creciente empezando por la base de menor cota. Las cotas de cada una de las bases aparecen en la Tabla 3.1.

	Base 1	Base 2	Base 3	Base 4	Base 5	Base 6	Base 7
Cota eje Z (mm)	4	9	15	22	20	39	49

Tabla 3.1 Cotas bases eje Z

Para controlar la posición en la que se han impreso las piezas, se han añadido unos agujeros extra en una de las esquinas. De esta forma se sabe en qué posición se ha de colocar la pieza durante el proceso de medición.

La característica más destacable de la pieza patrón es que consta de un total de 193 agujeros cónicos [5] que se pueden medir en la dirección de palpado del eje Z, pero con una geometría más favorable a la tecnología FDM para evitar el efecto escalón por la impresión de las capas que se produce en estas impresoras. Además, para intentar minimizar los errores de fabricación de los mismos, y puesto que los agujeros se empiezan a imprimir por la parte inferior, se ha dejado 1 mm de distancia entre el inicio de la impresión del mismo y el punto teórico que alcanzaría la esfera de la MMC al realizar el palpado. Por último, tiene cuatro zonas de amarre para aportar estabilidad al proceso de medición.

La geometría de los agujeros cónicos es la que se puede apreciar en la Figura 3.2.

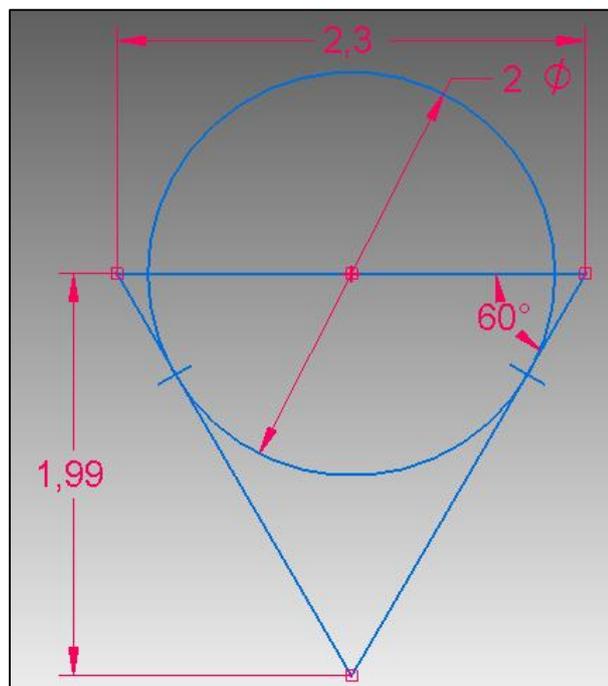


Figura 3.2 Alojamiento cónicos empleados, en mm.

Con estos agujeros, tal y como explica [5], “las características de los alojamientos cónicos permiten su utilización junto con un palpado de MMC autocentrante mediante punta esférica”.

3.2 Impresión de la pieza

3.2.1. Parámetros de impresión

Los valores de los parámetros de impresión anteriormente mencionados se presentan en la Tabla 3.2, que se puede observar a continuación.

Parámetro	Valor
Altura de capa	0.1 mm
Densidad	15 %
Temperatura	220 °C
Velocidad	40 mm/s
Brim	8 mm

Tabla 3.2 Parámetros relevantes impresión

Para las tres impresoras se han utilizado los mismos parámetros.

- Es importante tener en cuenta que no se ha impreso a la máxima calidad que permiten las impresoras, debido a los elevados tiempos de fabricación de la misma.
- En cuanto a la densidad, se ha escogido un 15% de relleno de la pieza, dado que no es necesario que la pieza sea sólida pero si es conveniente que a la hora de realizar el palpado de los agujeros cónicos, la pieza no se deforme otorgando resultados erróneos.
- La temperatura escogida se encuentra dentro del rango recomendado por el fabricante.
- La velocidad se ha disminuido ligeramente para intentar que los movimientos circulares del extrusor, al ser más lentos, fueran más precisos y por tanto se obtuvieran mejores acabados superficiales de los agujeros cónicos, para que el proceso de medición posterior fuera más preciso.
- Por otra parte se ha asignado 8 mm de “Brim”, que evitarán que se desprege la pieza de la superficie de impresión. Además, esta parte al ir unida a la pieza se podrá utilizar también como zona de sujeción de la misma.

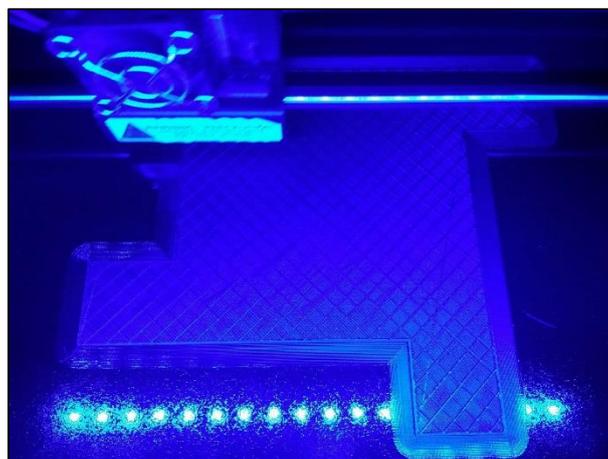


Figura 3.3 Impresión pieza en Witbox

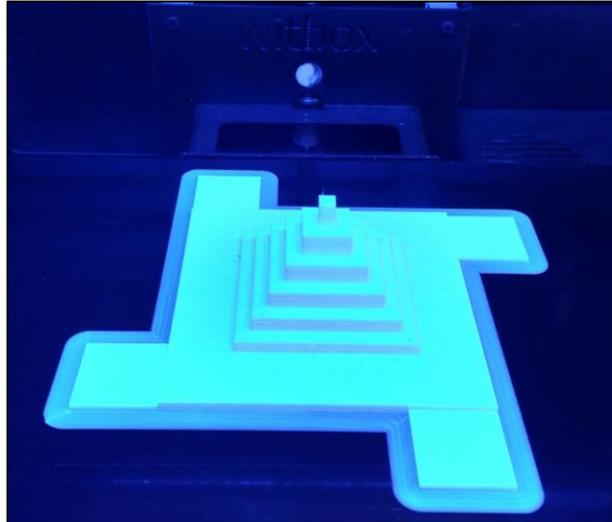


Figura 3.4 Pieza impresa finalizada en Witbox

En la Figura 3.3 se puede apreciar la estructura interna de la pieza, mientras que en la Figura 3.4 se puede ver la pieza impresa ya terminada.

3.2.2. Estimación del coste de fabricación de una pieza

En cuanto a los costes de fabricación de la pieza, se puede realizar una estimación a partir de los valores de tiempo y metros de filamento que nos indica el software Cura que se van a emplear. Para las tres impresoras tanto tiempo como filamento coincide, pues los parámetros no varían entre ellas; 53 gr. de filamento gastados para la fabricación y 9 horas de impresión. Por ello:

- Teniendo en cuenta que el coste de cada kilo de PLA es de unos 20€, y conociendo que se van a gastar 53 gr. para fabricar la pieza, el coste material es de 1,06 €.
- El coste de electricidad por hora de impresión se ha estimado en 0,05 €.
- Respecto a la amortización de la máquina, se considera que es de dos años, puesto que se trata de una tecnología en desarrollo y en breves periodos de tiempo puede sufrir evoluciones que provoquen que la impresora se quede obsoleta. Se ha consultado en tiendas especializadas en impresión 3D sobre el número de horas impresas con estas máquinas en el periodo mencionado. Se han impreso más de 5000 horas en este periodo de tiempo, con un mantenimiento cercano a los 200 €, correspondiente a recambios de extrusores, correas y rodamientos. Por tanto, y teniendo en cuenta el coste de cada máquina, se obtienen los costes de amortización de la misma por hora de impresión:
 - Witbox 1 y 2: 0,38 €/hora de impresión
 - Hephestos 2: 0,22 €/hora de impresión
- Por último, se considera que para realizar la impresión de las piezas patrón se requiere de una hora de atención por parte del operario, entre preparación con el software Cura, nivelación de la base de impresión, inicio de la impresión y extracción de la pieza una vez impresa. El coste que le supone a la empresa cada hora de trabajo del operario es de 12,5 €.
- Por tanto, sumando todos los costes y conocido el tiempo de impresión, 9 horas, se obtiene que imprimir la pieza patrón tiene un coste de 17,43 € para las Witbox 1 y 2, y un coste de 16 € para la Hephestos 2.

4. Medición y cálculo de errores

4.1 Proceso de medición

El procedimiento de medición para todas las piezas patrón impresas por las tres máquinas ha sido el mismo. Una vez situada la pieza en la MMC se sujeta para evitar que se mueva en cualquiera de las tres direcciones. En la Figura 4.1 se puede observar cómo se ha colocado la pieza patrón.



Figura 4.1 Pieza sujeta para medir

Después de colocarla en la posición de medición, se definen los planos que compondrán el sistema de referencia. Se ha seguido siempre el mismo orden, primero el plano Z, después el plano que define las coordenadas Y y por último el del eje X. El sistema de coordenadas también puede observarse en la Figura 4.2. Como se puede ver, corresponde con el sistema de referencia de la pieza CAD.

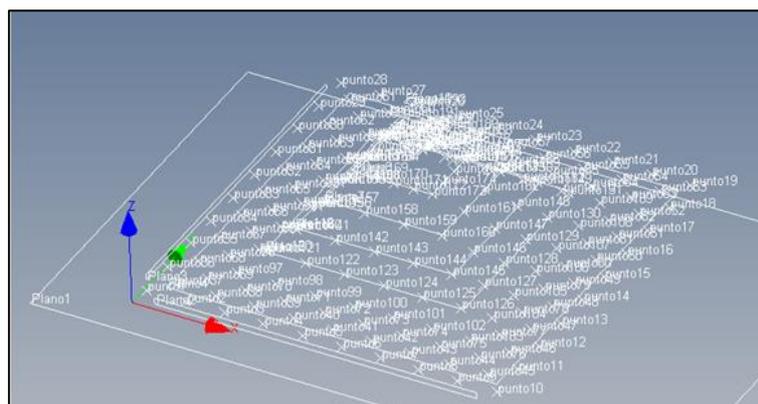


Figura 4.2 Elementos medidos y sistema de referencia

Una vez definido el sistema de coordenadas, se ha procedido a medir cada uno de los agujeros (alojamientos cónicos), en el orden correspondiente. La primera medición se ha realizado en modo manual, con el objetivo de palpar cada uno de los alojamientos para que la MMC almacenara las coordenadas de cada uno de ellos.

El orden que se ha seguido para realizar las mediciones anteriormente comentadas es el que se detalla en la Figura 4.3, resaltando en diferentes colores las cotas de los planos del eje Z.

28	27	26	25	24	23	22	21	20	19
61	60	59	58	57	56	55	54	53	
29	90	89	88	87	86	85	84	83	18
62	115	114	113	112	111	110	109	108	52
30	91	136	135	134	133	132	131	82	17
63	116	153	152	151	150	149	108	51	
31	92	137	166	165	164	163	130	81	16
64	117	154	181	180	179	178	177	148	107
32	93	138	167	182	191	190	189	176	162
65	118	155	183	192	193	188	175	147	106
33	94	139	168	184	185	186	187	174	161
66	119	156	169	170	171	172	173	146	105
34	95	140	157	158	159	169	127	78	13
67	120	141	142	143	144	145	104	47	
35	96	121	122	123	124	125	126	77	12
68	97	98	99	100	101	102	103	46	
36	69	70	71	72	73	74	75	76	11
37	38	39	40	41	42	43	44	45	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Figura 4.3 Distribución de los puntos en la pieza patrón

Se ha seguido este orden para poder visualizar fácilmente los diferentes grupos de puntos correspondientes a una vuelta en sentido anti horario completa (i.e. del punto 1 al 36, del 37 al 68, del 69 al 96, etc.). También por considerar que es una forma sencilla de apreciar movimientos fuera de control para el proceso de medición automática y poder interrumpir la medición.

Hay que destacar que tanto para todas las mediciones realizadas de forma manual como las que se han realizado posteriormente en modo automático, se ha seleccionado la opción de palpado autocentrante [10] que tiene la MMC. Esta opción permite que el palpador, una vez situado dentro del alojamiento, y sin ningún movimiento restringido, se centre de forma automática en el agujero hasta que se encuentren impedidos los desplazamientos en los ejes X e Y.

Una vez que todos los puntos han sido medidos de forma manual, se ha realizado la medición en modo automático, a baja velocidad. Para esta primera medición, el operario tiene que prestar especial atención, ya que si los grupos de seguridad (dirección en la que se desplaza la máquina después de palpar) no han sido definidos de forma correcta, se pueden producir golpes no deseados que pueden incluso romper el vástago del palpador. En caso de cualquier movimiento no previsto de la máquina, se ha de interrumpir el proceso de forma manual.

Terminada la primera medición automática de la pieza de forma correcta y sin problemas, se puede aumentar la velocidad para las siguientes mediciones. Para este trabajo, se han realizado cinco mediciones de cada uno de los alojamientos cónicos de la pieza en el modo automático, para posteriormente trabajar en la optimización con la media aritmética de estas mediciones.

4.2 Validación mediciones

En este apartado se pretende validar la decisión de utilizar el valor medio de las cinco mediciones realizadas, así como el proceso de medición en conjunto. Se presenta la siguiente tabla con los valores que se han considerado más importantes. Las columnas de la Tabla 4.1 hacen referencia a la impresión inicial y corregida de cada una de las impresoras, comenzando por la pieza inicial de la Witbox 1, siguiendo por la pieza corregida de esta misma máquina y siguiendo el mismo orden en la Hephestos 2 y la Witbox 2.

		PI W1	PC W1	PI H2	PC H2	PI W2	PC W2
Eje X	Error medio	0.1103	0.1030	0.2901	0.0708	0.4426	0.0701
	Error máximo	0.2987	0.2612	0.6521	0.2537	0.8014	0.2654
	Desviación típica media	0.0032	0.0014	0.0014	0.0015	0.0015	0.0017
	Desviación típica máxima	0.0164	0.0053	0.0172	0.0065	0.023	0.0409
Eje Y	Error medio	0.3194	0.0559	0.0960	0.1711	0.1407	0.0770
	Error máximo	0.5421	0.2595	0.3397	0.3577	0.3186	0.1994
	Desviación típica media	0.0029	0.0022	0.0013	0.0018	0.0014	0.0017
	Desviación típica máxima	0.011	0.0226	0.0273	0.0242	0.0266	0.0109

Tabla 4.1 Errores y desviación típica estándar en la validación, en mm.

Se puede observar que las desviaciones típicas medias de todas las mediciones son de al menos un orden de magnitud inferior que el error medio obtenido de fabricación de las piezas. Por tanto, se pueden considerar despreciables los errores producidos en el proceso de medición en comparación con los errores producidos por la fabricación de las impresoras, al menos, para esta primera verificación que se quiere realizar en este trabajo.

Puede observarse en la tabla superior que no se han incluido referencias respecto al eje Z. El motivo es el error de fabricación de la impresora de los alojamientos, que, a pesar de que aunque con el palpado autocentrante se obtenga el centro del alojamiento y se pueda comparar con el CAD las coordenadas X e Y, la altura obtenida de los alojamientos no era la adecuada, pues en función de la calidad superficial del alojamiento el palpador descendía en cada alojamiento hasta una profundidad diferente. Es por esto que para analizar los resultados del eje Z, se han utilizado los diferentes planos de la pieza patrón impresa. También para el proceso de optimización, se han utilizado estos valores del eje Z.

4.3 Análisis de los resultados

Una vez validado el proceso de medición, se pueden comenzar a analizar los errores obtenidos en las piezas impresas con las tres máquinas.

La información de cada impresora se presenta de la siguiente forma:

- Gráfico en la que está representada la distancia en el plano X-Y que separa el centro del alojamiento medido de cada punto con el centro del alojamiento en el CAD.
- Tabla resumen con el error medio y el error máximo del plano X-Y
- Gráfico con los errores en el plano X-Y
- Tabla comparativa eje Z

- Witbox 1:

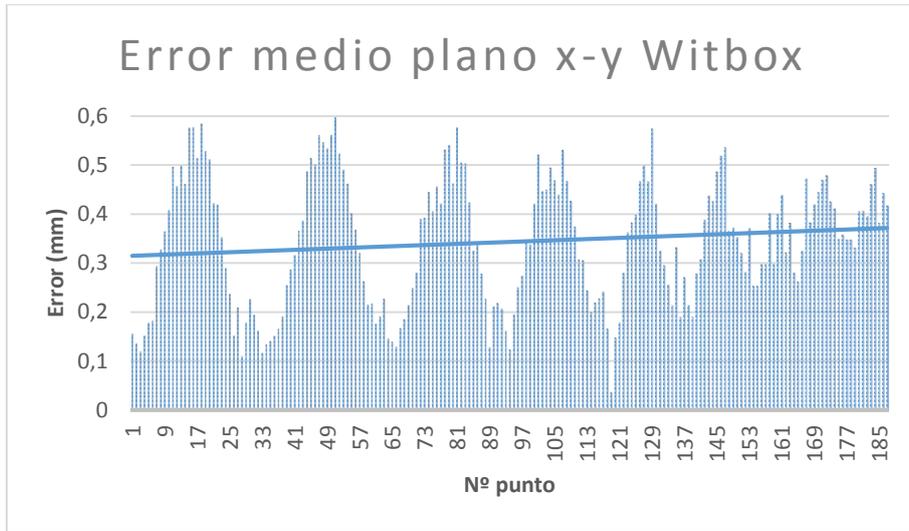


Figura 4.4 Error medio plano X-Y Witbox 1 pieza inicial

Se puede observar en la Figura 4.4 que a medida que nos alejamos del origen del sistema de referencia, el error aumenta. Puede observarse también que los puntos iniciales, que son los correspondientes a la base inicial, son fácilmente identificables por bloques, en los que se encuentran unos máximos que corresponden a los puntos más alejados al origen. Esto puede ser debido a errores de perpendicularidad de la propia impresora. La línea de tendencia nos muestra también que al alejarse los puntos del origen, los errores aumentan.

Los errores máximos y medios que se han calculado para esta primera impresión de la pieza patrón en la impresora Witbox 1 se muestran en la Tabla 4.2, con los valores expresados en milímetros.

	Error medio (mm)	Error máximo (mm)
Witbox 1	0.3141	0.5974

Tabla 4.2 Error medio y máximo Witbox 1 pieza inicial

Se presenta la comparativa entre las diferentes cotas del eje Z en la Tabla 4.3.

	Cota Z nominal (mm)	Cota Z medida (mm)
Base 1	4	3.9798
Base 2	9	8.9413
Base 3	15	14.9474
Base 4	22	21.9949
Base 5	30	29.9757
Base 6	39	38.9071
Base 7	49	-

Tabla 4.3 Comparación eje Z Witbox 1 pieza inicial

A la vista de los resultados medidos del eje Z, se considera que se han obtenido unos valores muy positivos, pues el error máximo del conjunto de todos los planos no alcanza los 100 micrómetros, que es la resolución con la que se ha impreso la pieza. Para el cálculo de la altura del eje Z de cada base se han medido más de 10 puntos distribuidos por toda la superficie del plano.

Además de los valores de los errores, es importante conocer si guardan alguna relación entre ellos, por lo que en la Figura 4.5 se dibujan los vectores de errores, amplificados por 20 para que se observen con facilidad.

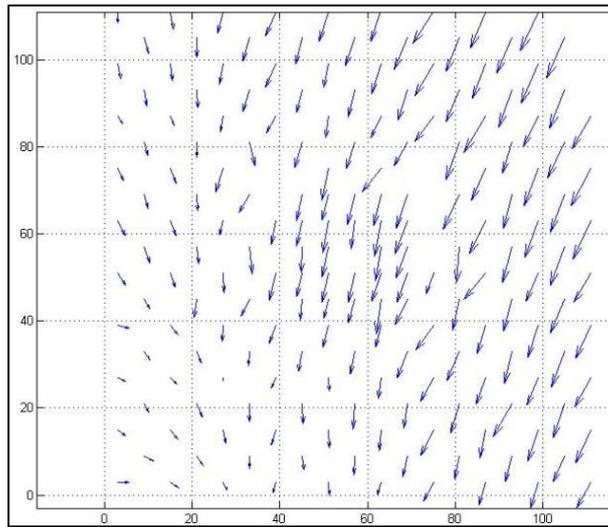


Figura 4.5 Vectores de errores Witbox 1 pieza inicial

Se percibe una tendencia de los vectores de error hacia las cotas inferiores del eje Y de la pieza, hacia la cual están orientados la mayor parte de los vectores de errores calculados.

- Hephestos 2

Al igual que en el caso anterior, se pueden observar en la Figura 4.6 los diferentes bloques, en los que a medida que los puntos se alejan del origen, aumenta su error.

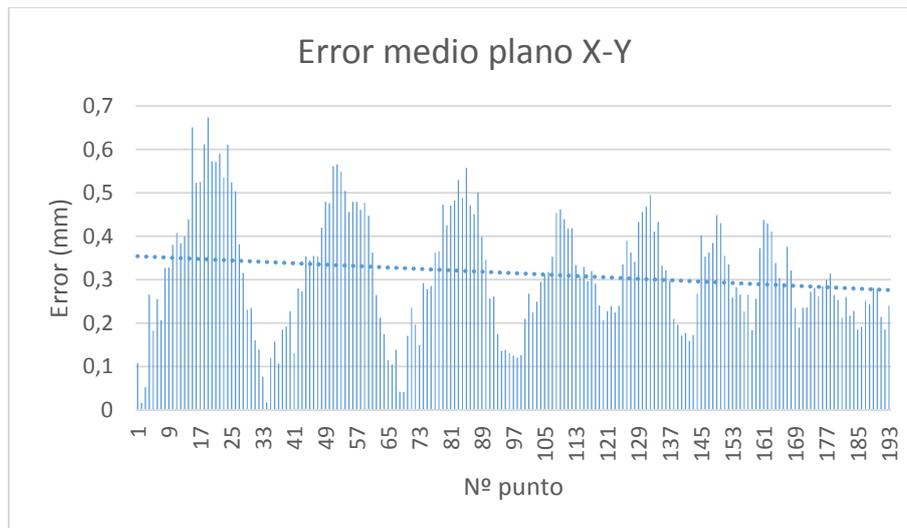


Figura 4.6 Error medio plano X-Y Hephestos 2 pieza inicial

Los valores del error medio y máximo se muestran en la Tabla 4.4.

	Error medio (mm)	Error máximo (mm)
Hephestos 2	0.2786	0.6737

Tabla 4.4 Error medio y máximo Hephestos 2 pieza inicial

A la vista de los valores obtenidos, se pueden apreciar unos errores similares entre las dos impresoras en lo que a su valor absoluto se refiere.

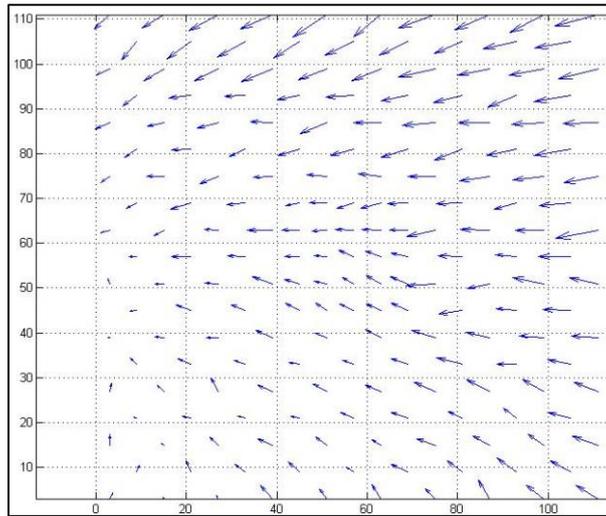


Figura 4.7 Vectores de errores Hephestos 2 pieza inicial

Como en el caso anterior, se observa una tendencia en la dirección del error hacia las cotas menores del eje X en la Figura 4.7.

Y por último para la Hephestos 2, la comparación entre las cotas de los planos del eje Z en la Tabla 4.5.

	Cota nominal (mm)	Cota medida (mm)
Base 1	4	4.2681
Base 2	9	9.3075
Base 3	15	15.2859
Base 4	22	22.2818
Base 5	30	30.2946
Base 6	39	39.2228
Base 7	49	49.1983

Tabla 4.5 Comparación eje Z Hephestos 2 pieza inicial

En el caso del eje Z, se pueden apreciar errores bastante grandes, teniendo en cuenta la resolución de 100 micras de la impresora. Uno de los motivos por los que se ha podido producir el error es debido a la propia estructura de la máquina. La Hephestos 2 es una máquina que viene desmontada y que el cliente monta. Es posible, que errores en el montaje de la misma hayan podido provocar estos errores, de hasta 300 micras. También, al ser esta impresora YFZX, es el extrusor y no la bandeja la que se desplaza en el eje Z, cuyo movimiento se produce a través de dos varillas roscadas. En el caso de la Witbox 1, el movimiento en el eje Z de la impresora lo produce la bandeja a partir de un husillo con acoplamiento flexible al motor.

De cara al proceso de optimización, se espera que el error medio teórico esperado no sea tan favorable como el esperado en la anterior impresora, dado que se tiene que corregir en mayor medida el eje Z.

- Witbox 2

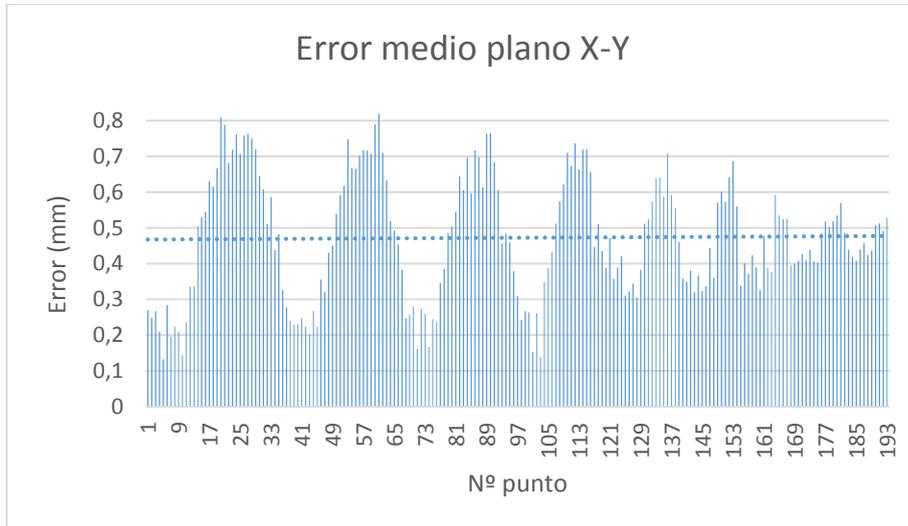


Figura 4.8 Error medio plano X-Y Witbox 2 pieza inicial

	Error medio (mm)	Error máximo (mm)
Hephestos 2	0.4382	0.8190

Tabla 4.6 Error medio y máximo Witbox 2

Los errores calculados en la Witbox 2 han sido lo más elevados de las tres impresoras, como puede comprobarse gráficamente en la Figura 4.8 y numéricamente en la Tabla 4.6. En el proceso de medición, se ha detectado un error de perpendicularidad, que ha provocado que el sistema de referencia no se haya podido definir de la forma deseada. Pese a ello, se ha decidido medir la pieza en las condiciones comentadas para evaluar el margen de mejora que se podría realizar sobre esta impresora, dado que el sistema de referencia de la pieza corregida se define de la misma forma que el de la pieza inicial.

Los vectores de errores se visualizan en la Figura 4.9.

Como en la Witbox 1, los errores en el eje Z son muy favorables, pues el error máximo es similar a la resolución impresa, como puede comprobarse en la Tabla 4.7. El modelo cinemático es el mismo que el de la Witbox 1, con la diferencia mecánica de que el husillo está acoplado de forma directa al motor.

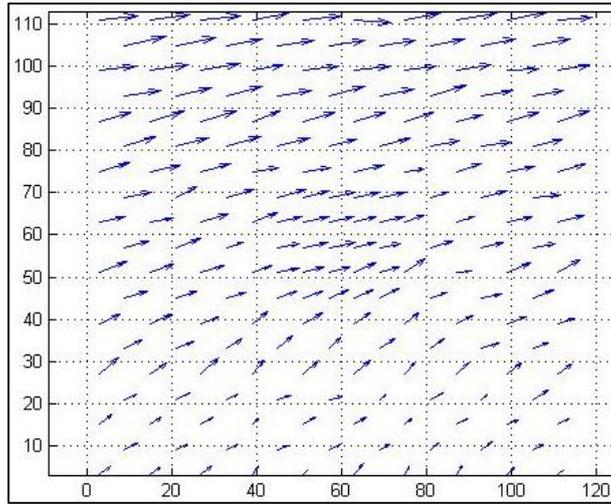


Figura 4.9 Vectores de errores Witbox 2 pieza inicial

	Cota nominal (mm)	Cota medida (mm)
Base 1	4	3.9589
Base 2	9	8.9737
Base 3	15	14.9814
Base 4	22	21.9884
Base 5	30	29.9159
Base 6	39	38.8947
Base 7	49	48.891

Tabla 4.7 Comparación eje Z Witbox 2 pieza inicial

5. Verificación volumétrica

5.1 Introducción

El proceso de identificación volumétrica consiste en una variación iterativa de los coeficientes de error que componen las 18 funciones de error a partir de una optimización no lineal. Para ello, se utilizan pares de puntos, medidos y optimizados para compararlos. Para la aproximación por regresión lineal se van a utilizar polinomios de Legendre [11]. Es muy importante tener en cuenta que el objetivo de esta verificación no es identificar cada error por separado, sino que es minimizar el error global de la máquina, a través de la función objetivo que corresponde con el error cuadrático medio evaluado para todos los puntos. Es por tanto una compensación matemática, no física [12]

El error volumétrico se reduce gracias a la minimización de las diferencias entre puntos teóricos y reales. [Cajal]

Los parámetros más significativos de la verificación volumétrica son [13]:

- Modelo cinemático: Ya han sido definidos en el capítulo segundo.
- Funciones de regresión a los errores: Se van a utilizar polinomios de Legendre de grado 3, dado que se consideran los más adecuados para este tipo de máquinas [11].

$$f(x) = a_1x + a_2\left(\frac{3}{2}x^2\right) + a_3\left(\frac{1}{2}(5x^3 - 3)\right) \quad \text{Ec. 17}$$

- Función objetivo del proceso de optimización: Reducción del error cuadrático medio evaluado para todos los puntos.
- Distribución de los puntos en el volumen de trabajo: La pieza patrón empleada comprende un volumen de trabajo suficiente, pues mayores volúmenes implicarían aumentar en gran medida los tiempos y costes de fabricación. Los puntos están distribuidos homogéneamente en la superficie de la pieza patrón.
- Accesibilidad a la medición de los puntos por el palpado por la MMC: Todos los puntos se pueden medir con facilidad en la dirección de palpado del eje Z.
- Incertidumbre de la medición: En el cuarto capítulo se ha validado el proceso de medición.

El proceso iterativo que se lleva a cabo se muestra en el diagrama de la Figura 5.1. A partir de los puntos teóricos, y con los errores inicializados todos ellos a 0, se calculan los nuevos puntos optimizados a partir de las ecuaciones que definen el modelo cinemático. Estos puntos optimizados se comparan con los puntos medidos para calcular el vector de diferencias entre puntos optimizados y puntos medidos. Este vector, empleando la función de minimización es el que se tiene que reducir, por lo que se varían de forma automática los parámetros de optimización para evaluar si dichas variaciones minimizan el vector de diferencias o no. Este proceso se realiza hasta que alcanzar alguno de los criterios de convergencia. El proceso iterativo es el mismo para cualquier modelo cinemático, pues lo único que cambian son las ecuaciones que definen los modelos, por lo que este proceso es extrapolable a otras máquinas independientemente de la tecnología que empleen.

En la Figura 5.1 se representa el diagrama de bloques del proceso de identificación [5]:

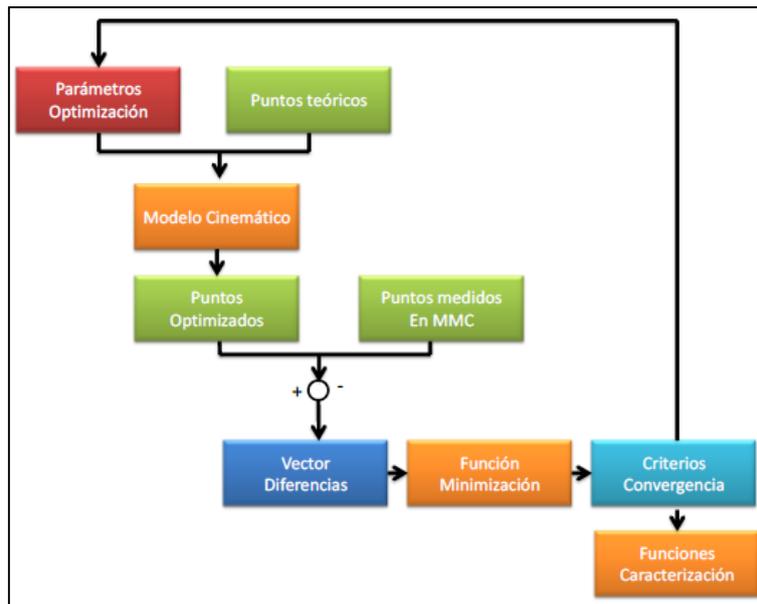


Figura 5.1 Diagrama de bloques del proceso de identificación [5]

Como se ha comentado previamente, se han utilizado las coordenadas X e Y de los alojamientos, mientras que para la coordenada Z se ha utilizado la coordenada del plano al que pertenecen cada uno de los puntos.

A través del proceso iterativo explicado, y una vez introducidos las coordenadas medidas, las coordenadas nominales e inicializado los errores, se procede a realizar la optimización. El proceso de optimización se da por concluido cuando se cumple uno de los siguientes parámetros, según [14]:

1. La función objetivo converge a una solución.
2. La variación del vector X de coeficientes es menor de la establecida en su tolerancia.
3. La variación de los residuos es menor que la especificada en su tolerancia.
4. La magnitud de la dirección de búsqueda es menor que la tolerancia especificada.
5. El número de iteraciones ha excedido el valor establecido como límite o el número de evaluaciones de la función objetivo ha excedido su límite.
6. El código de la función objetivo ha solicitado la finalización de la optimización.
7. El problema es inviable. Los límites inferior y superior de los parámetros son inconsistentes.
8. La línea de búsqueda no puede disminuir el residuo lo suficiente en la dirección actual de búsqueda.

5.2 Cálculo de errores

En este apartado se presentan las tablas con los coeficientes de las 18 funciones de error de cada una de las tres impresoras. También se muestra una tabla con los errores medios y máximos calculados con la optimización para cada uno de los ejes, así como el error medio y máximo global. Por último, una gráfica para cada impresora con los vectores de errores esperados según el proceso de optimización.

Las funciones de error que se van a calcular corresponden a los errores que se detallan en la Figura 5.2, según la normativa UNE 15300 y particularizando para el caso del eje X.

Error	UNE 15300
Posición	EXX
Rectitud horizontal	EYX
Rectitud vertical	EZX
Vuelco	EAX
Cabeceo	EBX
Rumbo	ECX

Figura 5.2 Nomenclatura errores eje X

En la Tabla 5.1 se muestran los coeficientes a1, a2 y a3 de la de las funciones de los errores de la Witbox 1.

- Witbox 1:

	a3	a2	a1
EXX (mm)	-7,20E-08	2,17E-05	-4,54E-03
EYX (mm)	1,14E-08	3,82E-06	-4,12E-03
EXZ (mm)	4,15E-09	7,49E-07	-2,49E-04
EAX (arcosegundos)	0	0	0
EBX (arcosegundos)	0	0	0
ECX (arcosegundos)	0	0	0
EYY (mm)	-1,21E-08	1,66E-05	-3,95E-03
EYX (mm)	-9,02E-09	-2,71E-06	-6,15E-04
EYZ (mm)	1,28E-08	2,76E-06	5,22E-04
ECY (arcosegundos)	0	0	0
EAY (arcosegundos)	-5,92E-10	1,76E-07	-1,24E-05
EBY (arcosegundos)	-1,19E-09	3,18E-07	-1,52E-05
EZZ (mm)	-1,95E-05	1,78E-03	-3,96E-02
EZX (mm)	6,13E-06	-6,42E-04	1,74E-02
EZY (mm)	-1,20E-05	1,10E-03	-2,44E-02
EBZ (arcosegundos)	1,95E-07	-1,71E-05	3,48E-04
ECZ (arcosegundos)	-3,59E-09	-1,83E-07	-1,08E-06
EAZ (arcosegundos)	7,61E-08	-5,92E-06	1,03E-04

Tabla 5.1 Coeficientes error Witbox 1

Una vez calculados estos coeficientes, se pueden realizar las estimaciones del proceso de optimización, como se puede comprobar en la Tabla 5.2 para la impresora Witbox 1.

	Error inicial	Error medio Optimizado	Eje X Optimizado	Eje Y Optimizado	Eje Z Optimizado
Error Medio	0.3141	0.0522	0.0292	0.0341	0.0098
Error máximo	0.5974	0.1701	0.1650	0.1335	0.0468

Tabla 5.2 Errores esperados Witbox 1, en mm.

El proceso de optimización de la Witbox 1 nos indica que el error medio teórico que se debería obtener es de 0.0522, mientras que el error máximo sería 0.1701. Hay que tener en cuenta que el error medio medido era de 0.3141, mientras que el máximo de 0.5974. Una vez realizado el proceso de compensación y habiendo impreso y medido la pieza patrón corregida, se podrá evaluar todo el proceso de verificación volumétrica.

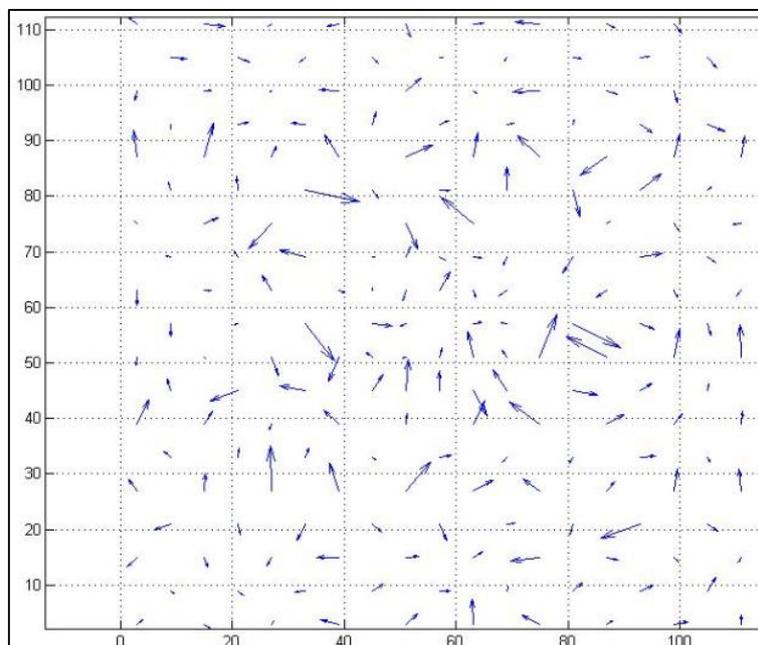


Figura 5.3 Vector de errores esperado Witbox 1

A la vista de los errores esperados en la estimación realizada a partir de los coeficientes de las funciones de errores, se puede observar en la Figura 5.3 que el módulo de los vectores se ha reducido considerablemente. En cuanto a la dirección, se observa que no siguen ninguna tendencia, sino que son aleatorios.

- Hephastos 2

De la misma forma que para la impresora anterior, en la Tabla 5.3 se pueden ver los coeficientes de las funciones de error de la Hephastos 2.

	a3	a2	a1
EXX (mm)	-1,86E-07	5,79E-05	-7,01E-03
EXY (mm)	-5,78E-09	-5,23E-05	-4,18E-04
EXZ (mm)	-1,09E-08	-6,14E-06	-1,92E-05
EAX (arcosegundos)	4,91E-07	-3,20E-04	-2,53E-05
EBX (arcosegundos)	-5,41E-07	1,57E-06	-1,78E-04
ECX (arcosegundos)	2,71E-06	1,82E-04	-1,47E-05
EYY (mm)	-5,80E-08	6,13E-06	-1,58E-03
EYX (mm)	-2,10E-08	-4,70E-06	3,85E-03
EYZ (mm)	-4,14E-07	1,25E-04	-2,32E-03
ECY (arcosegundos)	9,92E-11	-3,88E-07	1,23E-04
EAY (arcosegundos)	-4,07E-11	4,40E-09	2,72E-06
EBY (arcosegundos)	-1,30E-10	1,67E-07	-2,48E-05
EZZ (mm)	7,82E-07	-1,65E-04	6,76E-03
EZX (mm)	-1,81E-06	2,57E-04	-6,84E-03
EZY (mm)	-9,01E-07	1,60E-04	-1,36E-02
EBZ (arcosegundos)	-1,63E-06	-2,86E-06	3,91E-04
ECZ (arcosegundos)	7,26E-09	-7,01E-07	1,76E-05
EAZ (arcosegundos)	-4,14E-09	-1,48E-06	1,05E-04

Tabla 5.3 Coeficientes error Hephestos 2

	Error inicial	Error medio Optimizado	Eje X Optimizado	Eje Y Optimizado	Eje Z Optimizado
Error Medio	0.2786	0.0939	0.0366	0.0598	0.0426
Error máximo	0.6737	0.3189	0.1967	0.3000	0.0831

Tabla 5.4 Errores esperados Hephestos 2, en mm.

Los errores esperados para la Hephestos 2 son superiores a los señalados previamente para la Witbox 1. El motivo por el que la optimización no ha sido tan precisa es debido a los errores que se habían encontrado en el caso del eje Z, anteriormente comentados.

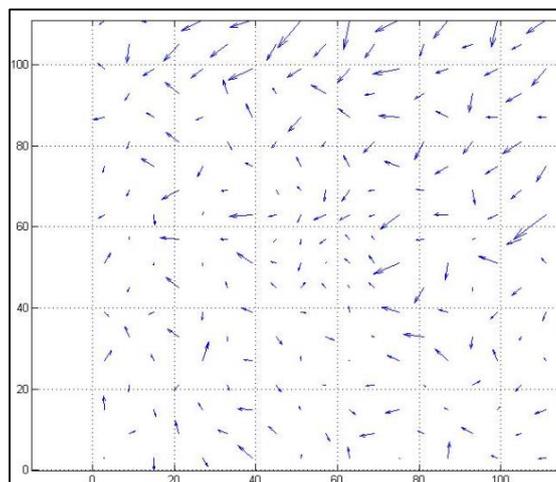


Figura 5.4 Vector de errores esperado Hephestos 2

Como ha ocurrido en el vector de errores de la impresora anterior, se ha reducido tanto la tendencia en una dirección de los vectores como el módulo de los mismos, aunque para el caso de los módulos y como se ha observado en la Tabla 5.4, no se han reducido tanto como en la Witbox 1. Se puede comprobar en la Figura 5.4.

- Witbox 2

Realizado el proceso de optimización para esta última impresora, se presentan en la Tabla 5.5 los coeficientes de las funciones de error de la Witbox 2.

	a3	a2	a1
EXX (mm)	9,07E-08	-1,76E-05	-2,41E-04
EXY (mm)	4,91E-08	-6,84E-06	1,54E-04
EXZ (mm)	2,30E-09	-4,35E-07	-1,15E-04
EAX (arcosegundos)	8,94E-09	1,29E-06	-1,68E-05
EBX (arcosegundos)	-4,66E-09	-2,24E-06	2,87E-05
ECX (arcosegundos)	-4,01E-08	3,23E-07	4,42E-05
EYY (mm)	3,41E-08	-1,30E-05	1,05E-03
EYX (mm)	2,30E-08	-7,20E-06	5,77E-03
EYZ (mm)	2,05E-09	-6,19E-07	4,59E-04
ECY (arcosegundos)	-1,59E-08	6,20E-08	-1,94E-05
EAY (arcosegundos)	1,56E-11	-2,58E-08	4,06E-06
EBY (arcosegundos)	2,33E-10	-3,58E-08	-2,19E-06
EZZ (mm)	-1,19E-06	-4,05E-05	3,83E-03
EZX (mm)	9,50E-07	-2,95E-04	1,14E-02
EZY (mm)	-8,23E-06	9,62E-04	-2,68E-02
EBZ (arcosegundos)	7,31E-08	-5,91E-06	1,07E-04
ECZ (arcosegundos)	1,62E-08	-1,80E-06	4,91E-05
EAZ (arcosegundos)	2,13E-08	-3,20E-06	8,76E-05

Tabla 5.5 Coeficientes error Witbox 2

	Error inicial	Error medio Optimizado	Eje X Optimizado	Eje Y Optimizado	Eje Z Optimizado
Error Medio	0.4382	0.0594	0.0345	0.0394	0.0096
Error máximo	0.8190	0.1533	0.1469	0.1458	0.0483

Tabla 5.6 Errores esperados Witbox 2, en mm.

En el proceso de optimización llevado a cabo con la impresora Witbox 2, se obtienen resultados muy parecidos a los de la Witbox 1, como puede verse en la Tabla 5.6. La única diferencia importante se encuentra en que los errores previos calculados para la Witbox 2 eran superiores a los de la Witbox 1. Para la Witbox 2, el error medio era de 0.4382, mientras que el máximo 0.8190, por lo que el margen de mejora es superior en el caso de esta impresora.

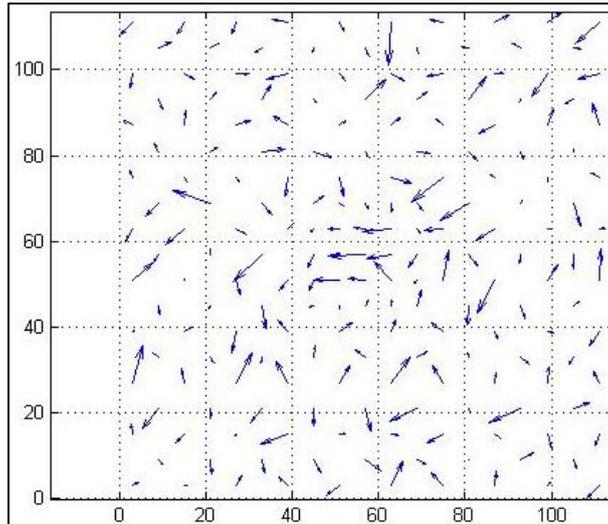


Figura 5.5 Vector de errores esperado Witbox 2

Resultado similar también en cuanto a los vectores de errores que el de la Witbox 1, visible en la Figura 5.5.

5.3 Proceso de compensación de errores e impresión pieza compensada

Una vez calculados los coeficientes de los errores mediante el proceso de optimización y estimados los errores medios teóricos que se podrían obtener en cada una de las impresoras, se realizan las compensaciones sobre el archivo en formato Gcode impreso. Para ello, y empleando el software Matlab, se leen cada una de las líneas de este fichero, unas 400.000 y se recalculan las nuevas coordenadas X e Y a las que se debe desplazar el extrusor, a partir de los coeficientes de los errores obtenidos y que se han mostrado en el apartado anterior.

En cuanto al eje Z, se ha decidido no realizar modificaciones sobre el Gcode. El motivo es que pequeñas variaciones en la altura del extrusor respecto a la bandeja pueden significar que el extrusor deje de imprimir por encontrarse demasiado cerca de la bandeja, o que, al estar más separado de lo recomendado, el filamento no se adhiera a las capas anteriores y la impresión final sea de una calidad inferior a la inicial.

Otro factor muy importante que se tiene que tener en cuenta antes de modificar las ecuaciones es la posición del origen de coordenadas de nuestra pieza patrón en el Gcode, puesto que los errores han sido calculados para dicho sistema de referencia. Por tanto, una vez leídas las coordenadas de cada línea, se deberá restar dicho offset, calcular la nueva posición de las coordenadas y posteriormente sumarles de nuevo el offset. Dicho offset ha sido calculado para cada una de las máquinas con el software Repetier-Host.

Las ecuaciones empleadas para calcular las coordenadas de los ejes X e Y compensadas son las siguientes, para los diferentes modelos cinemáticos:

- Witbox 1 y Witbox 2:

$$X_p = \text{off}_x + x - 1 * \left[[\delta_x(x) + \delta_x(y) + \delta_x(z)] + y\varepsilon_z(z) + z\varepsilon_y(z) + x_t - y_t[\varepsilon_z(y) + \varepsilon_z(x) - \varepsilon_z(z)] + z_t[\varepsilon_y(y) + \varepsilon_y(x) - \varepsilon_y(z)] + \tau_x \right] \quad \text{Ec. 18}$$

$$Y_p = offy + y - 1 * [[\delta_y(x) + \delta_y(y) - \delta_y(z)] - x[\varepsilon_z(z) - \varepsilon_z(y)] - z\varepsilon_x(z) + x_t[\varepsilon_z(y) + \varepsilon_z(x) - \varepsilon_z(z)] + y_t - z_t[\varepsilon_x(y) + \varepsilon_x(x) - \varepsilon_x(z)] + \tau_y] \quad \text{Ec. 19}$$

Las coordenadas que se sobrescriben en el nuevo Gcode son Xp e Yp. Para poder apreciar las diferencias entre los archivos originales y los corregidos, se muestra la Figura 5.6, Figura 5.7, Figura 5.8 y la Figura 5.9, con los Gcodes originales, y los Gcodes corregidos para las Witbox.

60229	G1	X123.582	Y57.001	E645.70747
60230	G1	X123.615	Y57.239	E645.71146
60231	G1	X123.705	Y57.459	E645.71541
60232	G1	X123.85	Y57.648	E645.71938

Figura 5.6 Gcode original Witbox 1

60229	G1	X123.5326	Y57.1743	E645.70747
60230	G1	X123.5658	Y57.4134	E645.71146
60231	G1	X123.6561	Y57.6345	E645.71541
60232	G1	X123.8017	Y57.8248	E645.71938

Figura 5.7 Gcode corregido Witbox 1

60229	G1	X125.15	Y57.648	E645.74336
60230	G1	X125.295	Y57.459	E645.74732
60231	G1	X125.385	Y57.239	E645.75127
60232	G1	X125.418	Y57.001	E645.75527

Figura 5.8 Gcode original Witbox 2

60229	G1	X124.9378	Y57.5235	E645.74336
60230	G1	X125.0841	Y57.3347	E645.74732
60231	G1	X125.1755	Y57.1148	E645.75127
60232	G1	X125.2099	Y56.8770	E645.75527

Figura 5.9 Gcode corregido Witbox 2

Como se puede apreciar, las coordenadas X e Y varían respecto a las originales, muestra de que se ha realizado una compensación. Posteriormente se evaluará la influencia de la compensación realizada.

- Hephastos 2

Con respecto a la impresora Hephastos 2, hay algunas diferencias, puesto que se trata de un modelo cinemático diferente. Las ecuaciones que se comentarán posteriormente son las siguientes:

$$X_p = offx + x + [\delta_x(x) + \delta_x(y) + \delta_x(z)] - y\varepsilon_z(y) - z\varepsilon_y(y) + x_t - y_t[\varepsilon_z(z) + \varepsilon_z(x) - \varepsilon_z(y)] + z_t[\varepsilon_y(z) + \varepsilon_y(x) - \varepsilon_y(y)] + \tau_x \quad \text{Ec. 20}$$

$$Y_p = -offy - y + [\delta_y(x) - \delta_y(y) + \delta_y(z)] - x[\varepsilon_z(y) - \varepsilon_z(z)] + z\varepsilon_x(y) + x_t[\varepsilon_z(z) + \varepsilon_z(x) - \varepsilon_z(y)] + y_t - z_t[\varepsilon_x(z) + \varepsilon_x(x) - \varepsilon_x(y)] + \tau_y \quad \text{Ec. 21}$$

Una vez leídos los puntos del fichero impreso, se les resta el offset para, al igual que en el caso anterior, situarnos en el origen. Como el eje Y se mueve en la dirección opuesta, a la hora de calcular la nueva coordenada Yp, en vez de sumar el offset que produciría errores, se vuelve al restar. Posteriormente, al sobrescribir las ecuaciones, las coordenadas son Xp y -Yp. Esta diferencia en el proceso de compensación es debida al signo negativo de la coordenada Y en la ecuación, debido a que la bandeja es la que realiza el movimiento de este eje. En la Figura 5.10 y la Figura 5.11 se pueden comprobar las diferencias.

```
60229 G1 X152.205 Y172.043 E646.09745
60230 G1 X152.115 Y172.263 E646.1014
60231 G1 X152.082 Y172.501 E646.1054
60232 G1 X152.115 Y172.738 E646.10938
```

Figura 5.10 Gcode original Hephestos 2

```
60229 G1 X152.6208 Y172.0530 E646.09745
60230 G1 X152.5308 Y172.2736 E646.1014
60231 G1 X152.4981 Y172.5121 E646.1054
60232 G1 X152.5317 Y172.7495 E646.10938
```

Figura 5.11 Gcode corregido Hephestos 2

Una vez que se han compensado los errores calculados en los Gcodes a imprimir, ya se pueden volver a imprimir las piezas patrón para evaluar los resultados. Los parámetros de impresión del software Cura no han variado respecto a la impresión inicial.

En las siguientes figuras se pueden ver las piezas impresas corregidas de la Witbox 2 y de la Hephestos 2.

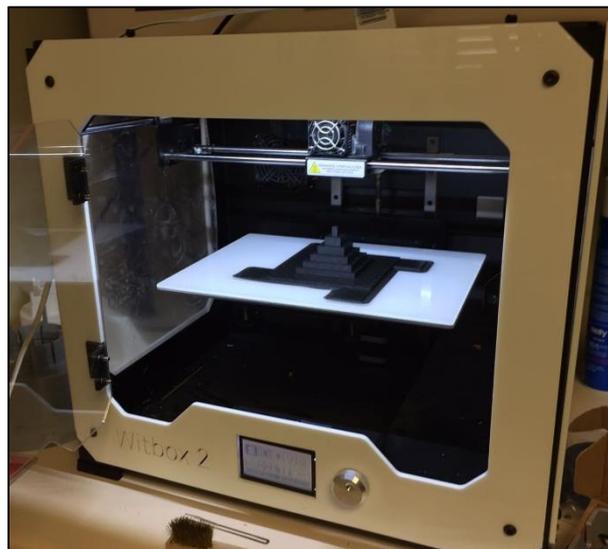


Figura 5.12 Pieza corregida Witbox 2

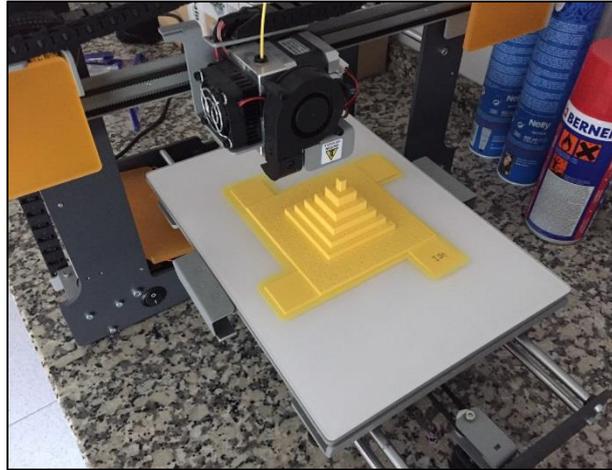


Figura 5.13 Pieza corregida Hephestos 2

La forma de proceder ha sido la misma que la anteriormente comentada. Una vez impresa la pieza, se ha medido de forma manual para localizar las coordenadas de los alojamientos, y una vez encontrados se han realizado 5 mediciones en modo automático, con palpado autocentrante.

En la Figura 5.14 se muestran las seis piezas patrón impresas con las tres máquinas. Las piezas de color amarillo se han impreso con la Hephestos 2, las piezas blancas con la Witbox 1 y las de color negro con la Witbox 2.



Figura 5.14 Piezas patrón originales y corregidas

6. Resultados

6.1 Análisis de los resultados obtenidos

Con las piezas corregidas ya impresas y medidas, se puede evaluar la verificación volumétrica realizada en estas tres máquinas. La forma de analizar los resultados es similar a la del capítulo cuarto. En la Figura 6.1 pueden apreciarse las diferencias entre los errores medios en el plano X-Y de la impresora Witbox 1. En color azul aparece el error de la pieza original, mientras que en color naranja aparece el de la pieza compensada.

- Witbox 1:

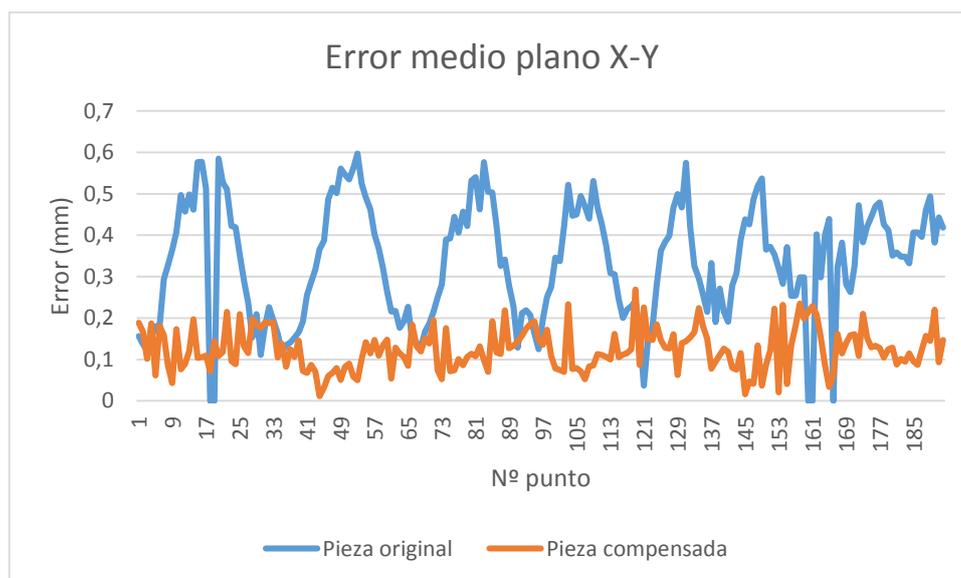


Figura 6.1 Comparación error medio Witbox 1

En la Tabla 6.1, se muestra un resumen del gráfico de la Figura 6.1, comparando también los errores de la pieza inicial y compensada con el calculado en el capítulo anterior de forma teórica.

	Error medio	Error máximo	% mejora error medio respecto pieza inicial
Pieza inicial	0.3141	0.5974	-
Pieza esperada	0.0522	0.1701	83%
Pieza compensada	0.112	0.2687	64%

Tabla 6.1 Comparación error medio Witbox 1

A la vista de los resultados obtenidos y observados tanto en la Figura 6.1 como en la Tabla 6.1, podemos valorar el proceso de mejora de esta impresora de forma muy positiva. El error medio se ha mejorado un 64% de un 83% previsto teóricamente. A pesar de tratarse de una impresora del año 2013 con la que se han impreso más de 3.000 horas, se puede afirmar que gran parte de los errores que se producen son corregibles, existiendo como en todas las máquinas ciertos errores aleatorios no compensables y otros errores que aunque de forma teórica son compensables, pueden estar relacionados con otros parámetros de impresión no considerados, tales como velocidad, temperatura o la propia nivelación de la bandeja.

En la Figura 6.2 se comparan los vectores de errores de la pieza original y de la compensada. Se aprecia que se ha eliminado la tendencia inicial, y que han disminuido los módulos de dichos vectores.

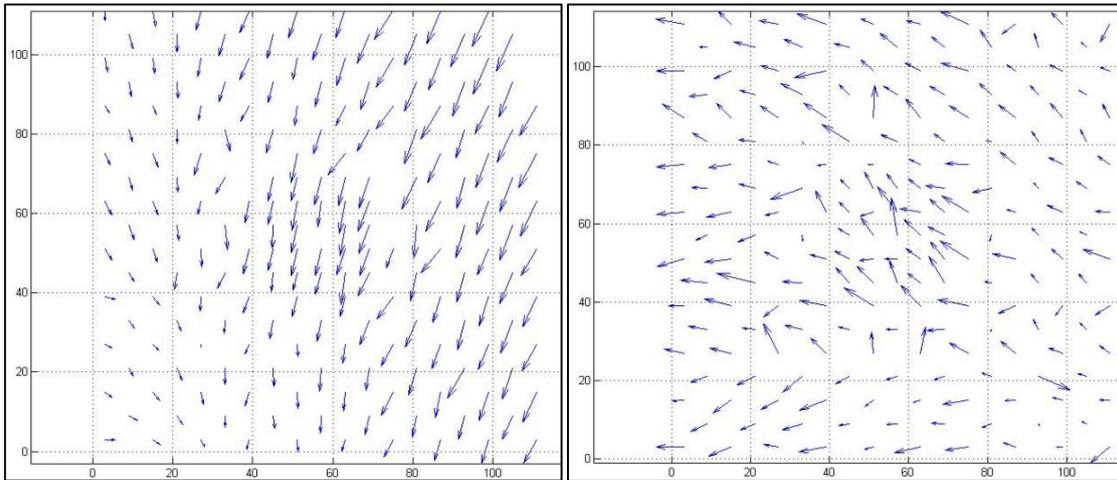


Figura 6.2 Comparación vector de errores W1. Izquierda, original. Derecha, compensada.

	Cota Z nominal (mm)	Cota Z medida inicial (mm)	Cota Z medida compensada (mm)
Base 1	4	3.9798	3.8980
Base 2	9	8.9413	8.8449
Base 3	15	14.9474	14.8451
Base 4	22	21.9949	21.85
Base 5	30	29.9757	29.8697
Base 6	39	38.9071	38.8011
Base 7	49	-	48.8286

Tabla 6.2 Comparación eje Z Witbox 1

En la Tabla 6.2 se comparan las alturas de las bases. Se puede observar que son ligeramente inferiores, alrededor de 0.1 mm, en todos los planos. Errores tan pequeños en el eje Z se pueden identificar con diferencias en la altura de la bandeja, que a pesar de no haber sido nivelada de nuevo antes de volver a imprimir la pieza corregida, debido al breve periodo de tiempo comprendido entre las impresiones de una pieza y otra, la propia vibración que tiene la máquina puede ser la causante de estas diferencias. También hay que tener en cuenta que para retirar la pieza impresa es necesario extraer la bandeja y volverla a situar en su posición.

- Hephestos2:

Los siguiente resultados que se van a analizar corresponden a la impresora Hephestos 2.

En la Figura 6.3, se compara el error medio en el plano X-Y, igual que en el caso de la impresora anterior, mientras que en la Tabla 6.3 se resume la información que aparece en la figura comentada.

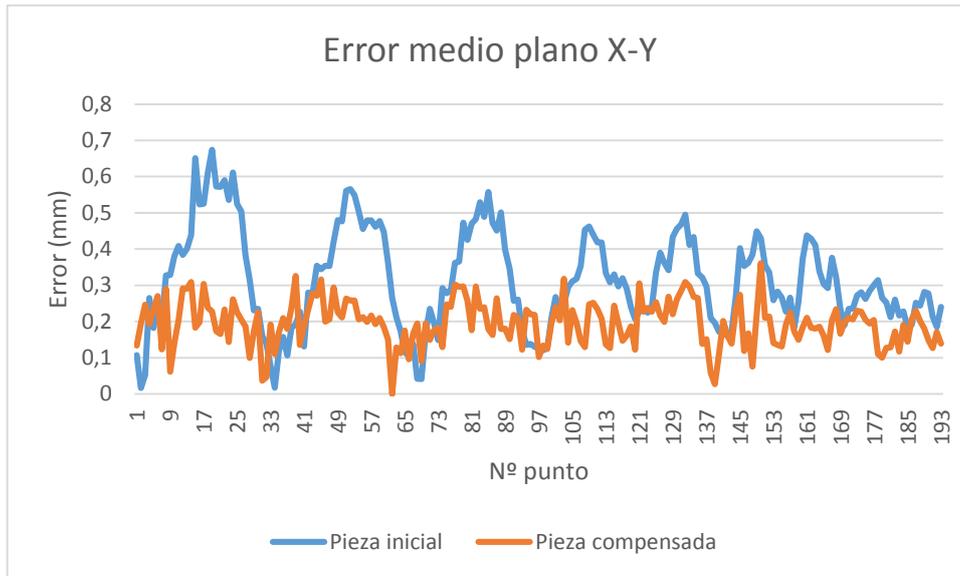


Figura 6.3 Comparación error medio Hephestos 2

	Error medio	Error máximo	% mejora error medio respecto pieza inicial
Pieza inicial	0.2786	0.6737	-
Pieza esperada	0.0939	0.3189	66%
Pieza compensada	0.1847	0.3615	34%

Tabla 6.3 Comparación error medio Hephestos 2

Como se ha comentado anteriormente, en esta impresora se esperan una compensación menos precisa que la anterior, debido a los errores del eje Z comentados. Pese a ello, y con un posible margen de mejora del 66%, se ha conseguido mejorar un 34%, lo que supone disminuir el error medio en casi 0.1 mm. En cuanto al error máximo, se ha conseguido reducir desde 0.6737 a 0.3615 milímetros.

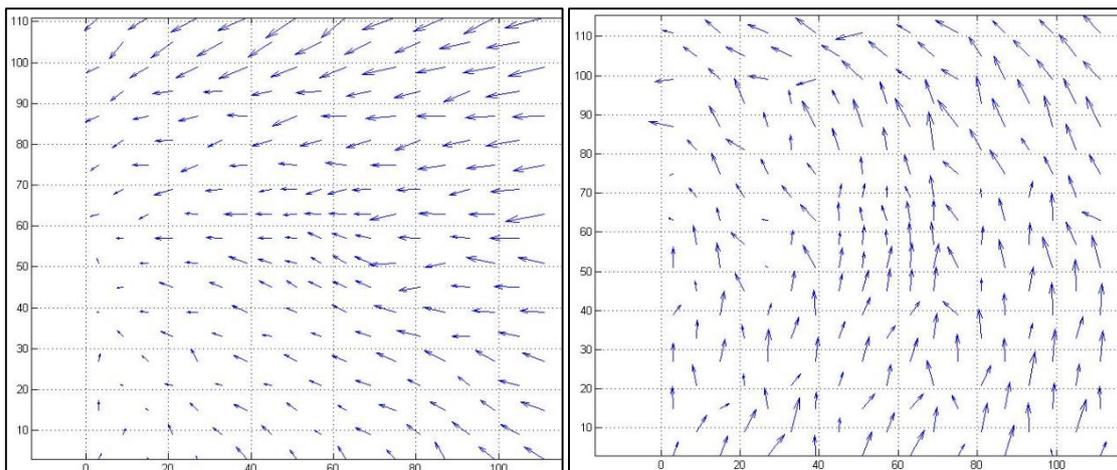


Figura 6.4 Comparación vector de errores H2. Izquierda, original. Derecha, compensada.

Si se observan las tendencias de los vectores de errores en la Figura 6.4, se comprueba que se ha modificado tanto su sentido como su módulo. No obstante, se sigue observando algo de tendencia, aunque muy inferior a la obtenida inicialmente.

En la Tabla 6.4 se comparan los errores obtenidos en el eje Z. Se aprecia que no se han modificado significativamente los valores. Hay que recordar que la nivelación de esta impresora es automática y simplemente hay que indicar la distancia a la que se quiere imprimir. Por tanto, se considera que no influye el haber retirado la base para extraer la pieza original y el colocarla de nuevo en su posición.

	Cota Z nominal (mm)	Cota Z medida inicial (mm)	Cota Z medida compensada (mm)
Base 1	4	4.2681	4.2269
Base 2	9	9.3075	9.2507
Base 3	15	15.2859	15.2942
Base 4	22	22.2818	22.2885
Base 5	30	30.2946	30.3008
Base 6	39	39.2228	39.2547
Base 7	49	49.1983	49.2162

Tabla 6.4 Comparación eje Z Hephastos 2

- Witbox 2

Por último, la impresora Witbox 2, en la que se habían encontrado errores de perpendicularidad en el sistema de referencia. Al haber medido de la misma forma, se observa el % de mejora que tiene esta impresora. De la misma forma que para las dos impresoras anteriores, primero se puede observar en la Figura 6.5 de forma gráfica los errores medios en el plano X-Y, y en la Tabla 6.5 el resumen comparativo de los errores tanto medio como máximo de la pieza original, de la teórica esperada y de la pieza compensada. También se muestra el % de mejora posible con el proceso de optimización llevado a cabo.

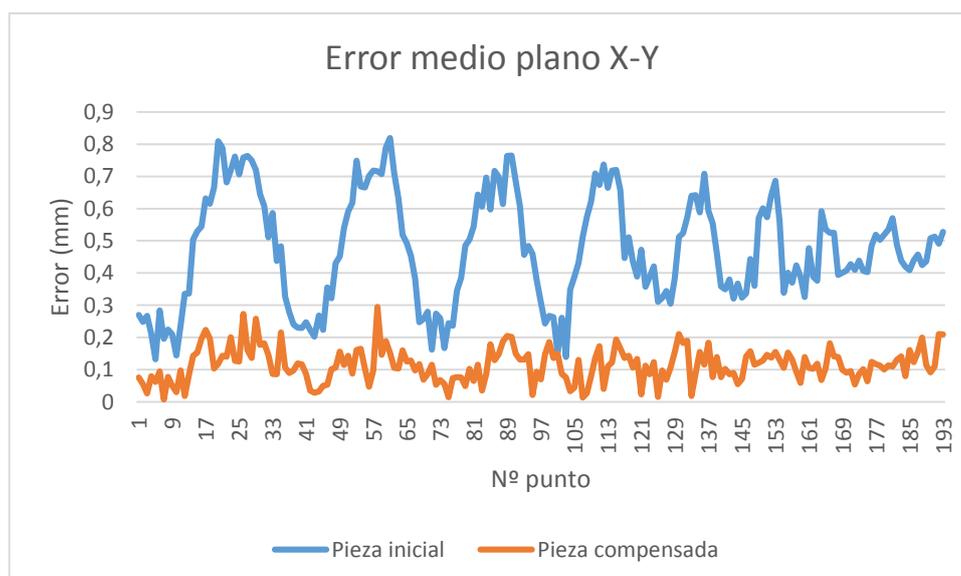


Figura 6.5 Comparación error medio Witbox 2

	Error medio	Error máximo	% mejora error medio respecto pieza inicial
Pieza inicial	0.4382	0.819	-
Pieza esperada	0.0594	0.1533	86%
Pieza compensada	0.0994	0.2947	77%

Tabla 6.5 Comparación error medio Witbox 2

Se han obtenido resultados muy positivos en lo que a esta impresora se refiere. Se ha disminuido el error desde 0.4328 a menos de 0.1 milímetros, lo que equivale a un 77% de mejora sobre un 86% calculado como máximo teórico. Respecto a los vectores de errores de esta impresora, que se observan en la Figura 6.6, se ha eliminado completamente la tendencia inicial y no se aprecia ninguna tendencia en la pieza compensada, lo que hace indicar que los errores obtenidos son aleatorios.

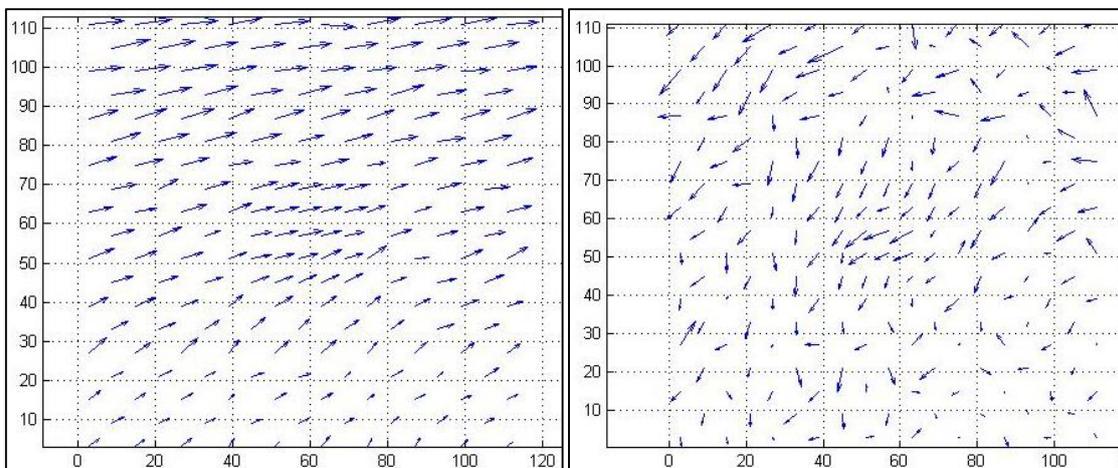


Figura 6.6 Comparación vector de errores W2. Izquierda, original. Derecha, compensada.

	Cota Z nominal (mm)	Cota Z medida inicial (mm)	Cota Z medida compensada (mm)
Base 1	4	3.9589	3.9111
Base 2	9	8.9737	8.9396
Base 3	15	14.9814	14.9442
Base 4	22	21.9884	21.9076
Base 5	30	29.9159	29.9046
Base 6	39	38.8947	38.8713
Base 7	49	48.891	48.8442

Tabla 6.6 Comparación eje Z Witbox 2

Por último, las alturas de las bases del eje Z que se pueden ver en la Tabla 6.6. Son ligeramente peores que las obtenidas en la pieza inicial. Hay que tener en cuenta que hubo que desmontar el extrusor, provocado por un atasco del material, y que se tuvo que volver a situar en la misma posición del eje Z. Esto puede haber introducido el pequeño error que se aprecia en la tabla anterior, ya que, aunque la nivelación sea automática y se haya recalculado el offset y asignado el mismo valor que para la pieza inicial, el sensor inductivo no varió su posición.

6.2 Comparativa entre las diferentes máquinas

Antes de terminar este capítulo, se presenta la Tabla 6.7 en la que se muestran los errores medios y máximos de todas las impresoras, así como sus % de mejora. Con esta tabla se pretende resumir lo comentado anteriormente y poder comparar fácilmente la validez del proceso de optimización llevado a cabo para cada impresora.

	Error medio (mm)	Error máximo (mm)	% mejora error medio respecto pieza inicial
Pieza inicial W1	0.3141	0.5974	-
Pieza esperada W1	0.0522	0.1701	83%
Pieza compensada W1	0.112	0.2687	64%
Pieza inicial H2	0.2786	0.6737	-
Pieza esperada H2	0.0939	0.3189	66%
Pieza compensada H2	0.1847	0.3615	34%
Pieza inicial W2	0.4382	0.819	-
Pieza esperada W2	0.0594	0.1533	86%
Pieza compensada W2	0.0994	0.2947	77%

Tabla 6.7 Comparativa errores impresoras

De las tres verificaciones volumétricas realizadas, se puede afirmar que las correspondientes a las impresoras Witbox han sido las que han dado mejor resultado, tanto a nivel teórico como a nivel experimental. Si se comparan la Witbox 1 y la 2, se aprecia un mejor % de mejora en el caso de la Witbox 2. Esto podría deberse a que esta impresora, al ser más moderna y ser una evolución de la Witbox 1, tiene una mejor repetibilidad y por tanto tiene menores errores aleatorios que la 1. Hay que recordar que una parte de los errores cometidos no son compensables al tratarse de errores aleatorios.

Respecto a la Hephestos 2, es también la que se ha obtenido un error medio más elevado. Aproximadamente, el error de la pieza compensada es el doble del error de la pieza teórica.

7. Conclusiones y líneas futuras

Una vez realizado el análisis de los resultados obtenidos, se resumen a continuación las conclusiones a las que se han llegado en este trabajo. A continuación se propondrán líneas futuras de trabajo.

7.1 Conclusiones

El objetivo principal de este proyecto consistía en calcular y reducir el error de fabricación de varias máquinas de fabricación aditiva de un coste reducido. Para ello, se ha realizado una verificación volumétrica. La tecnología de las máquinas empleadas es el Modelado de Fusión por Deposición.

En el proceso de optimización realizado, se ha comprobado la influencia que tienen los errores en los diferentes ejes. En el caso de la Hephastos 2, que como se ha comentado, presentaba los mayores errores en el eje Z, se ha obtenido el mayor error medio esperado. Esto es debido a que es el extrusor y no la bandeja la que realiza el movimiento en éste eje, como ocurre en el resto de impresoras analizadas.

En las impresoras cuyo movimiento del eje Z se realiza a través de la bandeja, se han obtenido mejores resultados en las cotas del eje Z de las bases de la pieza patrón.

Se ha observado un error de perpendicularidad destacable en las piezas impresas en la Witbox 2. A pesar de ello, se ha realizado el proceso de compensación y se ha obtenido un alto % de mejora de la pieza.

Una vez finalizado este trabajo, se puede afirmar que se ha cumplido su objetivo. Tal y como se ha podido observar a lo largo de esta memoria, estas impresoras poseen un error de fabricación, el cual ha sido minimizado considerablemente a través de un proceso de compensación.

7.2 Líneas futuras

Puesto que éste ha sido el primer trabajo realizado sobre procesos de verificación volumétrica en tecnología FDM y en concreto en las impresoras con las que se ha trabajado, se considera que existen ciertos aspectos que conviene desarrollar para continuar mejorando la precisión de este tipo de máquinas. Por ello, se proponen las siguientes líneas futuras:

- El trabajo se ha realizado con tres modelos de impresoras (Witbox 1, Hephastos 2 y Witbox 2) y para cada uno de ellos se han calculado los errores de fabricación. Resultaría interesante utilizar otras impresoras de los mismos modelos analizados con el fin de conocer si se reproducen los mismos errores y estos son compensables.
- Impresión de piezas de test para comprobar los resultados obtenidos.
- Modificar los parámetros de impresión empleados, para que conociendo cómo influyen cada uno de ellos, se puedan compensar de forma independiente.
- Realizar este mismo trabajo con otros modelos de impresoras diferentes a las utilizadas en este trabajo que utilizan la tecnología FDM, como por ejemplo Ultimaker 2 y Ultimaker 3.
- Emplear piezas patrón que abarquen toda la superficie de impresión, para poder compensar los errores en todo el volumen de trabajo.
- Utilizar materiales diferentes para la impresión de las piezas patrón, para comprobar cómo afecta el material de impresión a la fabricación.

- Por último, puesto que la realización de este trabajo es bastante laboriosa, sería conveniente desarrollar un proceso de compensación simplificado.

8. Bibliografía

- [1] Stratasys. (29 de Mayo de 2017). Obtenido de <http://www.stratasys.com/mx/impresoras-3d/technologies/fdm-technology>
- [2] BQ. (1 de Junio de 2017). Obtenido de <https://www.bq.com/es/mundo-3d>
- [3] Pisa, L. d. (2 de Octubre de 2014). Obtenido de «Witbox, una de las mejores impresoras 3D del mundo según el 'Top 15 Print Quality Ratings'»
- [4] BQ Witbox2. (30 de Mayo de 2017). Obtenido de <https://www.bq.com/es/witbox-2>
- [5] Cajal, C., Santolaria, J., Samper, D., & Velazquez, J. (2016). Efficient volumetric error compensation technique for additive manufacturing machines. *Rapid Prototyping Journal*, 22(1), 2-19.
- [6] Tong, K., Amine Lehtihet, E., & Joshi, S. (2003). Parametric error modeling and software error compensation for rapid prototyping. *Rapid Prototyping Journal*, 9(5), 301-313.
- [7] Cura, S. (6 de 6 de 2017). Ultimaker. Obtenido de <https://ultimaker.com/en/products/cura-software>
- [8] Moylan, S., Slotwinski, J., Cooke, A., Jurrens, K., & Donmez, M. A. (2012, August). Proposal for a standardized test artifact for additive manufacturing machines and processes. In *Proceedings of the 2012 annual international solid freeform fabrication symposium* (pp. 6-8). Austin, TX.
- [9] González-Madruga, D., Barreiro, J., Cuesta, E., González, B., & Martínez-Pellitero, S. (2014). AACMM performance test: Influence of human factor and geometric features. *Procedia Engineering*, 69, 442-448.
- [10] Manual de instrucciones Calypso. Software para técnica de medición por coordenadas. Carl Zeiss. 61212-2010405.
- [11] Sartori, S., & Zhang, G. X. (1995). Geometric error measurement and compensation of machines. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 44(2), 599-609.
- [12] Aguado, S., Samper, D., Santolaria, J., & Aguilar, J. J. (2012). Identification strategy of error parameter in volumetric error compensation of machine tool based on laser tracker measurements. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 53(1), 160-169.
- [13] Aguado, S., Samper, D., Santolaria, J., & Aguilar, J. J. (2012). Towards an effective identification strategy in volumetric error compensation of machine tools. *Measurement Science and Technology*, 23(6), 065003.
- [14] MathWorks Solve nonlinear least-squares (nonlinear data-fitting) problems - MATLAB lsqnonlin - MathWorks España. <http://www.mathworks.es/es/help/optim/ug/lsgnonlin.html>. Accessed 8 Feb 2017

