



Diseño y desarrollo de impresora 3D, para la industria 4.0

design and Development of a 3D Printer for Industry 4.0

Oscar Ricardo Riveros Aguirre ⁽¹⁾

Servicio Nacional de Aprendizaje SENA, Bogotá, Colombia.
raoscarr2020@gmail.com

RESUMEN

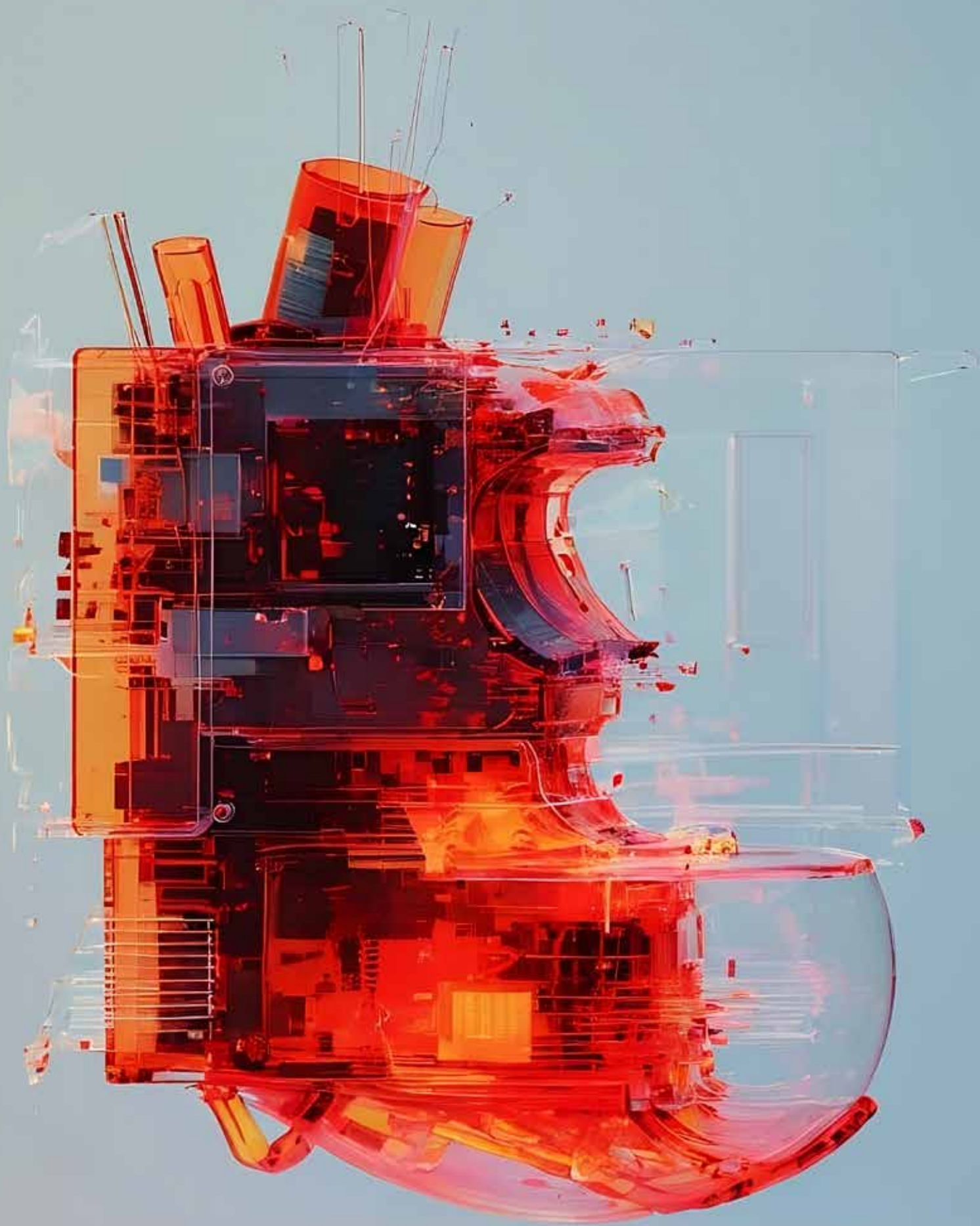
Este proyecto tiene como propósito el diseño y desarrollo de una impresora tipo cartesiana 3D empleando tecnologías disruptivas que integran la creación del gemelo digital con la solución NX de Siemens, y la puesta en marcha un prototipo funcional, permitiendo a través de él, la simulación y optimizar el proceso de impresión. La investigación está centrada en la necesidad de mejorar la precisión y calidad de impresión por medio de materiales biopolímeros como el PLA, PETG, ABS y Nylon mediante la técnica de fabricación aditiva. Finalmente, se abordarán temas técnicos y metodológicos, así como los resultados de la puesta a punto de la máquina.

Palabras Claves: Gemelo digital, Simulación de impresión 3D, Fabricación aditiva.

ABSTRACT

The purpose of this project is to design and develop a Cartesian 3D printer utilizing disruptive technologies that incorporate the creation of a digital twin through the Siemens NX solution. This includes the implementation of a functional prototype, enabling simulation and optimization of the printing process. The research focuses on addressing the need to enhance printing precision and quality by using biopolymer materials such as PLA, PETG, ABS, and Nylon with additive manufacturing techniques. Finally, the study explores technical and methodological aspects, as well as the outcomes of fine-tuning the machine.

Keywords: Digital twin, 3D printing simulation, Additive manufacturing.



1. INTRODUCCIÓN

La fabricación aditiva, también conocida como impresión 3D, engloba una serie de procesos que permiten crear productos o prototipos industriales mediante la técnica de adición de material capa por capa. Entre las técnicas más conocidas se encuentra la impresión con filamento metálico, como titanio, acero inoxidable y aluminio; la sinterización selectiva por láser (SLS), que emplea un láser de alta potencia para sinterizar partículas de polvo y fusionarlas capa por capa, formando un objeto sólido; la estereolitografía (SLA), que utiliza un láser ultravioleta para curar capas sucesivas de resina líquida fotosensible; y el uso de filamentos biopoliméricos como PLA, ABS o nylon, entre otros. Gracias a su capacidad innovadora, esta tecnología permite la creación de piezas complejas y personalizadas, revolucionando diversos campos. Actualmente, la impresión 3D se emplea en una amplia variedad de industrias, como la automotriz, la aeroespacial, la fabricación de prótesis, la robótica, la medicina y la educación, convirtiéndose en una herramienta clave en el proceso de validación de productos^[10].

Sin embargo, los desafíos relacionados con la precisión, el control del proceso y la calidad de impresión continúan siendo relevantes. Este proyecto propone diseñar y construir una impresora cartesiana 3D que incorpore la creación de un gemelo digital, lo que permitirá simular el proceso antes de la impresión física y, de este modo, mejorar los resultados finales [7]. La falta de herramientas adecuadas para detectar errores en el proceso de impresión 3D puede generar desperdicio de materiales, pérdida de tiempo y costos elevados en la fabricación de piezas complejas.

Este proyecto busca abordar estos inconvenientes mediante la integración de un gemelo digital creado en el sistema CAD/CAM/CAE NX de Siemens, que permita anticipar y corregir fallos en el proceso de diseño, y de un prototipo funcional que posibilite realizar pruebas de impresión controlando variables del proceso, como la temperatura de la cama, la temperatura de extrusión y el flujo de aire a través de los ventiladores de capa. Además, se emplearán herramientas informáticas como Visual Studio Code y Pronterface para ajustar las variables de la máquina, tales como los desplazamientos de los ejes y el control de la temperatura de la cama y del extrusor mediante la configuración del PID^[4].

1.1. Planteamiento del problema

La fabricación aditiva, también conocida como impresión 3D, se ha consolidado como una tecnología clave en la creación de piezas complejas y personalizadas. Sin embargo, los desafíos relacionados con la precisión, el control del proceso y la calidad de impresión continúan siendo significativos. La falta de herramientas adecuadas para detectar errores en el proceso de impresión 3D puede generar desperdicio de materiales, pérdida de tiempo y costos elevados, especialmente en la fabricación de piezas complejas.

En este contexto, surge la necesidad de desarrollar soluciones que permitan mejorar estos procesos. Este proyecto busca abordar dichos inconvenientes mediante la integración de un gemelo digital, creado en el sistema CAD/CAM/CAE NX de Siemens, que permita anticipar y corregir fallos en el proceso de diseño. Además, se plantea la construcción de un prototipo funcional que permita realizar pruebas experimentales para controlar y optimizar va-

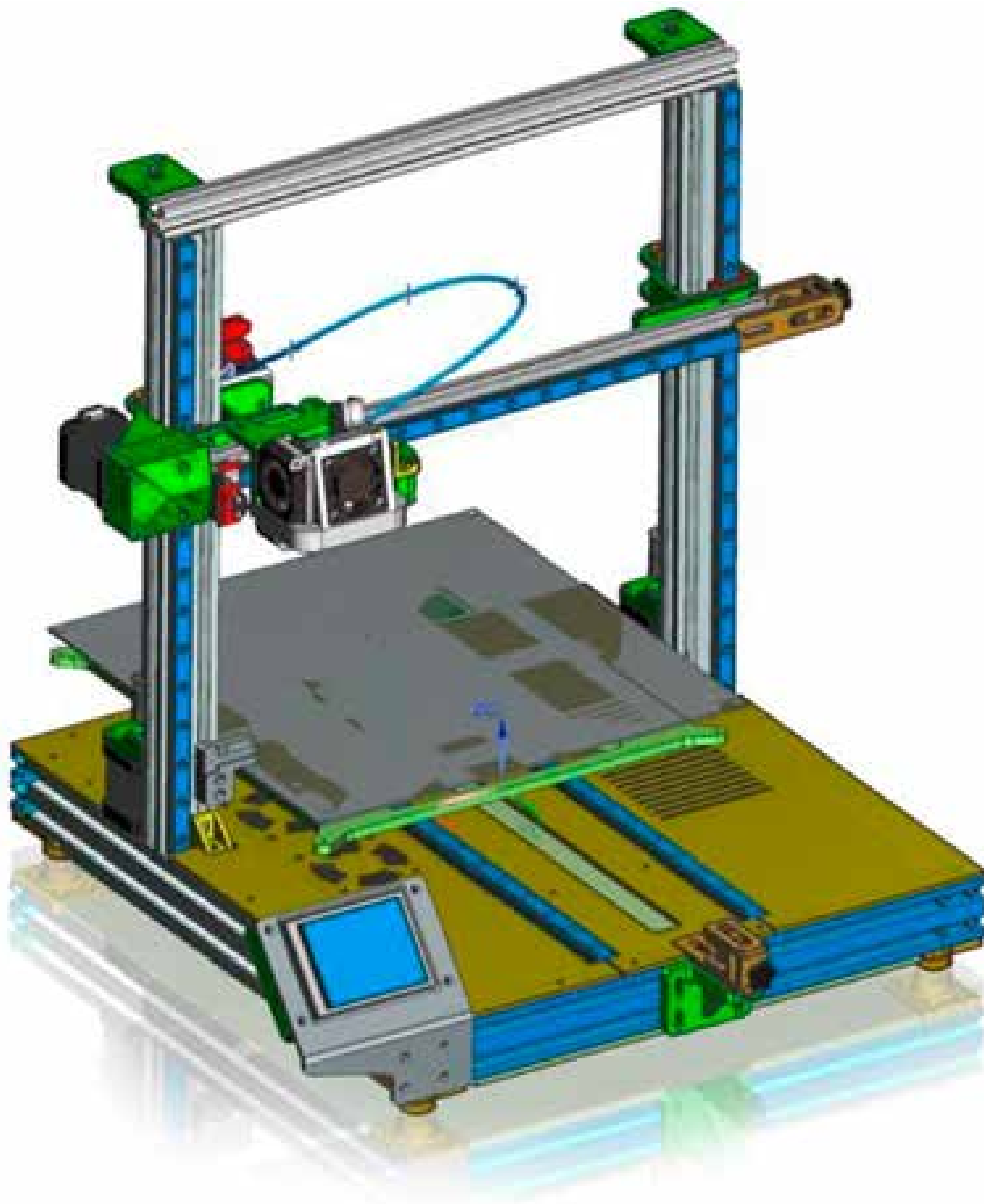


Figura 1. Gemelo digital de la Impresora 3D
Fuente: Propia NX de Siemens

riables críticas del proceso, como la temperatura de la cama, la temperatura de extrusión y el flujo de aire a través de los ventiladores de capa. Asimismo, se emplearán herramientas informáticas como Visual Studio Code y Pronterface para configurar y ajustar parámetros como los desplazamientos de los ejes y la calibración del PID para el control de temperatura.

2. OBJETIVO GENERAL

Desarrollar una impresora 3D cartesiana que integre un gemelo digital con el prototipo físico, permitiendo la monitorización en tiempo real del proceso de impresión y la optimización de los parámetros de impresión.

2.1. Objetivos específicos

Crear un gemelo digital de la impresora 3D, considerando los componentes mecánicos, electrónicos y de software, que permita optimizar el diseño y evaluar su desempeño antes de la construcción física.

Construir una impresora 3D basada en el gemelo digital, configurando los parámetros de impresión para validar su funcionalidad.

Optimizar diferentes parámetros de impresión, como velocidad, temperatura y flujo de material, para mejorar la calidad de las piezas producidas.

Realizar una serie de pruebas experimentales para validar el desempeño del prototipo y la precisión del gemelo digital.

Para el movimiento de los ejes se implementaron guías lineales tipo Hiwin Mgn12 más rodamientos MGN12H de alta precisión, logrando suavidad en los desplazamientos, alta resistencia al desgaste y bajo ruido. Tal como se observa en la figura 2.

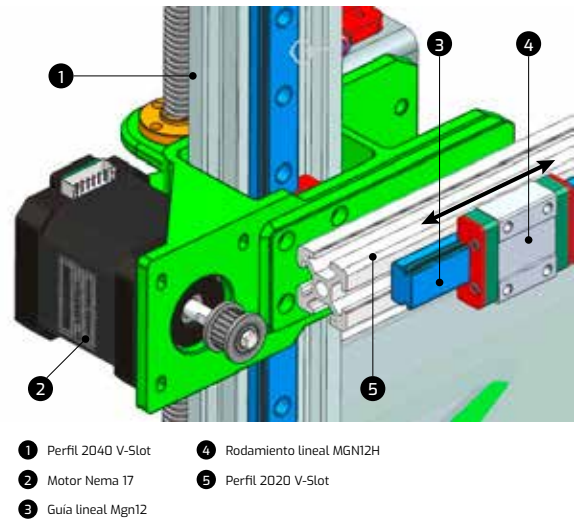


Figura 2. Gemelo digital perfil de Aluminio, Guía lineal, rodamiento, motor nema 17. Fuente: Propia NX de Siemens.

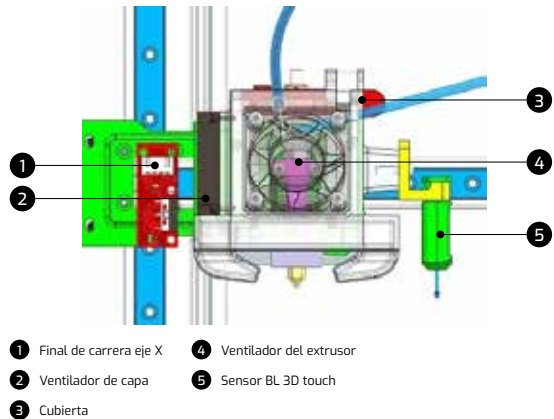


Figura 3. Gemelo digital, extrusor. Fuente: Propia NX de Siemens

Para controlar el movimiento del eje X se empleó un motor paso a paso Nema 17, integrado con sistema de transmisión por polea de 20 dientes, 5 mm de diámetro y correa dentada Gt2 6mm de ancho, lo que permite que el movimiento sea sincrónico y no haya pérdida de paso en cada giro del motor. Sobre este eje se encuentra también el sistema de extrusión el

cual está formado por una cubierta impresa en PLA, un ventilador de capa, un ventilador que suministra flujo de aire al disipador y un sensor de auto nivelación BLTouch, el cual además de servir como final de carrera del eje Z, proporciona la funcionalidad de nivelación de la cama caliente, como de aprecia en la figura 3.

La alimentación de filamento para extrusor se realiza en forma indirecta por medio del sistema Bowden, el cual está integrado por un motor Nema 17, tubo de teflón de 4mm, que se comunica con el sistema de extrusión, compuesto por un disipador, un bloque de aluminio en que se incorpora una boquilla de 0,4mm, un termistor 100 K NTC B 3950 $\pm$ 1%, ofreciendo un rango de temperatura de -40 a 260 °C, tubo de calentamiento de 12 V 40 Watts.

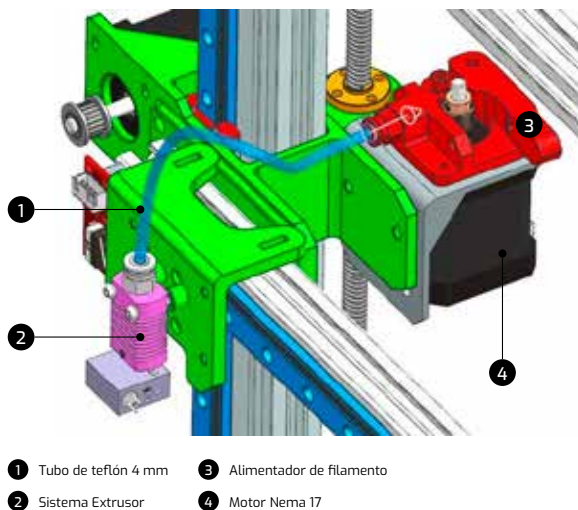


Figura 4. Gemelo digital del sistema extrusor.
Fuente: Propia NX de Siemens.

A su vez en el eje z se emplearon dos motores Nema 17 controlados en forma sincrónica por el mismo drive TMC2208 y un módulo para la conexión en paralelo splitter 2-1, cada motor se ensambla por medio de un acople flexible a una varilla roscada trapecoidal de 8mm, paso

4mm y de 350mm de longitud, el eje X se acopla a través de dos soportes impresos en PLA unido a las varillas roscadas por medio de tuercas antirretorno, lo que evita la pérdida de paso en el movimiento vertical. Ver figura 5.

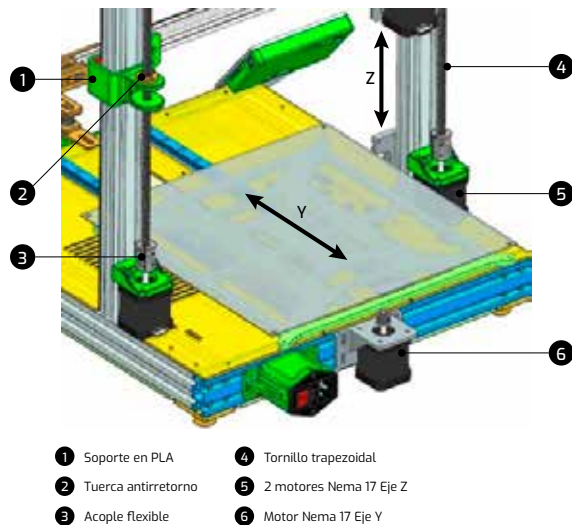


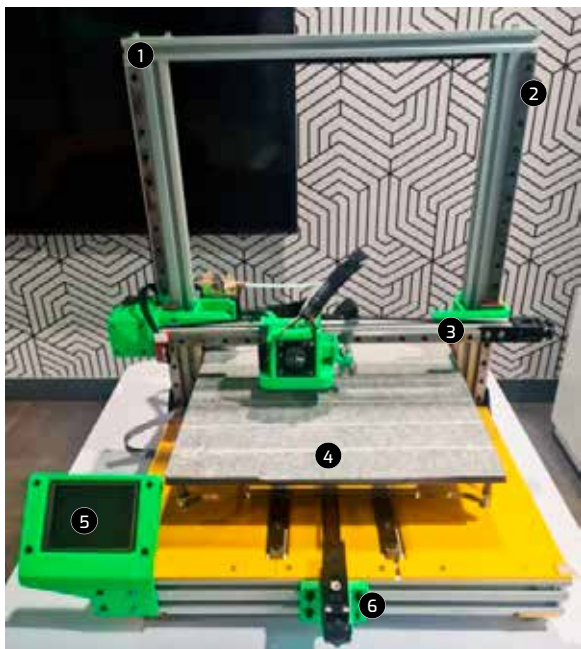
Figura 5. Gemelo digital eje dual Z, Eje Y.
Fuente: Propia NX de Siemens.

Por su parte el eje Y se acciona por medio de un motor paso a paso Nema 17, acoplado a una correa gt2 de 6 mm de ancho y paso 2mm, el movimiento es controlado a través de guías líneas tipo Hiwin Mgn12 más rodamientos MGN12H, como se muestra en la figura anterior.

Desarrollo del prototipo funcional: la construcción de prototipo funcional se emplearon componentes estándares como los perfiles de la estructura 2020 y 2040 V- Slot, guías líneas tipo Hiwin Mgn12 más rodamientos MGN12H para el movimiento de los ejes X, Y, Z, del mismo modo, se integró una pantalla táctil MKS TFT32 lo que permitió facilitar la operación de la impresora 3D. Como se aprecia en la figura 6.

Igualmente, varios componentes diseñados en el gemelo digital fueron impresos a través

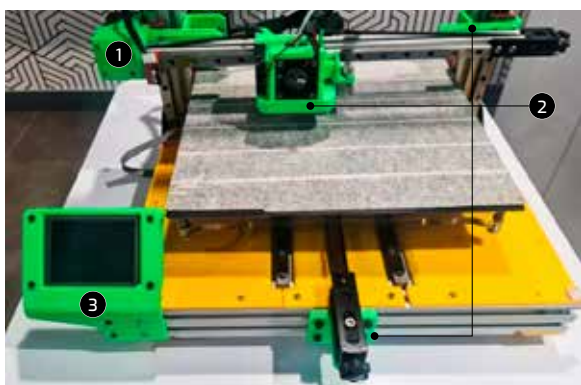
de la técnica de fabricación aditiva, utilizando filamento de PLA de 1,75 mm. Gracias a este proceso se logró la validación de diversas alternativas de diseño. Ver figura 7.



- | | |
|---|--------------------------|
| 1 Perfil 2040 V-Slot | 4 Guía lineal Mgn12 |
| 2 Cama Caliente Aluminio 300 X 300mm Mk2a | 5 Perfil 2020 V-Slot |
| 3 Pantalla Táctil | 6 Tensor de correa Eje Y |

Figura 6. Prototipo funcional impresora Cartesiana 3D.

Fuente: Elaboración propia.

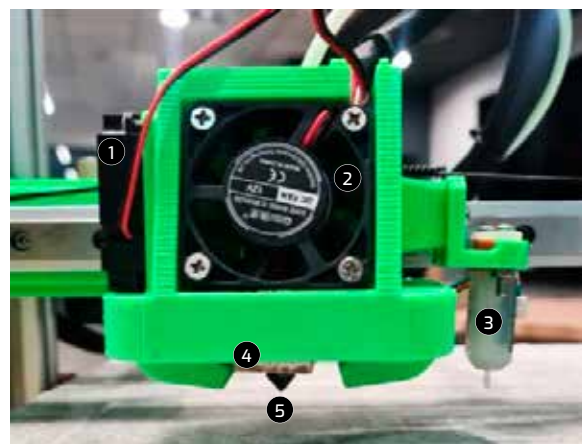


- | |
|-------------------------------|
| 1 Soporte motor Nema 17 Eje X |
| 2 Soporte en PLA |
| 3 Cubierta Pantalla Táctil |

Figura 7. Prototipo funcional: Componentes impresos en PLA.

Fuente: Elaboración propia.

El sistema de extrusión es el corazón de la impresora 3D, encargado de fundir el filamento y depositarlo capa a capa para dar la forma del producto. Este sistema está compuesto por un ventilador de capa, cuya función es enfriar cada capa depositada, asegurar la adhesión y evitar deformaciones. El ventilador del extrusor, enfría el bloque y la boquilla de 4 mm mantiene la temperatura constante y evita el atascamiento del filamento por sobrecalentamiento. Un sensor BL Touch, el cual cumple tres funciones; en primer lugar, permite la nivelación de la cama, en segundo lugar, facilita calibrar la distancia entre la boquilla y la cama de impresión (z offset) y finalmente, hace las veces de final de carrera del eje Z, garantizando una primera capa uniforme y adherente. Ver figura 8. ^[9].



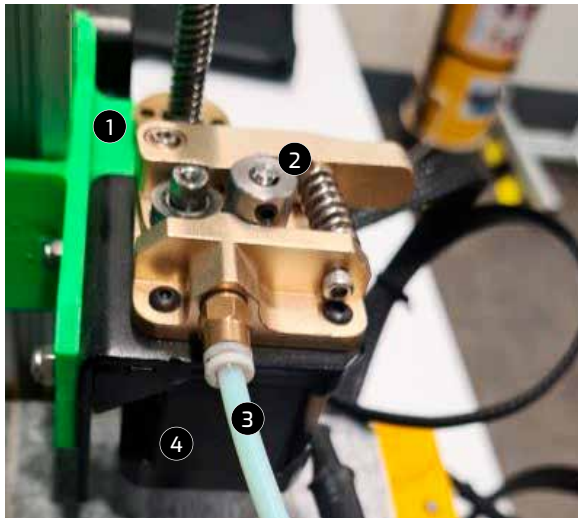
- | | |
|---------------------------|-------------------------|
| 1 Ventilador de Capa | 4 Bloque calefactor |
| 2 Ventilador del extrusor | 5 Boquilla de extrusión |
| 3 Sensor BL touch | |

Figura 8. Prototipo funcional: Sistema extrusor.

Fuente: Elaboración propia.

Por su parte, el sistema de alimentación se encarga de suministrar el filamento de manera constante y controlada. Está compuesta por un motor nema 17, un engranaje empujador de filamento ensamblado con un engranaje y a una polea, entre los dos presionan el filamento ase-

gurando un empuje suave y sin deslizamiento. Finalmente, un tubo de teflón flexible y resistente al calor el cual sirve de guía del filamento desde el alimentador hasta la boquilla, evitando que el filamento de doble o se enrede. Como puede verse en la figura 9^[2].



- | | |
|-------------|------------------|
| 1 Polea | 3 Tubo de teflón |
| 2 Engranaje | 4 Motor nema 17 |

Figura 10. Prototipo funcional: Sistema de alimentación.
Fuente: Elaboración propia.

Además, se empleó una placa base de control MKS Gen L V2.1 integrada con cuatro drivers TMC2209, cinco motores nema 17, dos finales de carrera uno para el eje X y otro para el eje Y, un sensor de auto nivelación BLTouch, dos ventiladores, un termistor 100 K NTC B 3950 $\pm$ 1% para el extrusor, un termistor Ntc 3950 100k para la cama caliente las conexiones se muestran en la figura 10.

2.2. Configuración del Firmware

Para este proceso, se empleó Visual Studio Code como el entorno de desarrollo (IDE), junto con la extensión PlataformIO, para configurar y compilar el firmware Marlin 2.1.2.1. Los

principales archivos de configuración Configuration.h y Configuration_adv.h., permiten ajustar parámetros como los ejes X, Y, Z, E (extrusor), pasos por mm, límites del movimiento, Z offset, temperaturas del extrusor y la cama caliente, los ventiladores de enfriamiento, el sensor de nivelación de la cama BLTouch, y la placa de control.

Gracias a Visual Studio Code, y la aplicación plataformIO se logró compilar rápidamente los parámetros en la tarjeta madre MKS Gen L V2.1

2.3. Optimización del proceso de impresión

Antes de iniciar las pruebas de impresión es necesario realizar varios procesos de calibración y ajuste de la máquina. Para ello se ha empleado el sistema pronterface, un software de control de impresoras 3D, que ofrece diversas herramientas para monitorear y ajustar en tiempo real los parámetros de la máquina. Entre estos parámetros se encuentran: los desplazamientos de los ejes X, Y, y Z, el PID para el control de la temperatura del extrusor y de la cama caliente, la alimentación del filamento y nivelación de la cama. Todo lo interior, con el objetivo de encontrar los parámetros óptimos obteniendo impresiones precisas y de alta calidad. A continuación, se detallan cada una de estas pruebas.^[6]

2.4. Calibración de los desplazamientos en los ejes X, Y, y Z de la máquina

Para realizar esta prueba, es necesario conectar la máquina, a través del puerto serie de placa controladora MKS GEN L V2.1, al PC. Se debe definir una marca de referencia en el eje X de la máquina. A continuación, en el sistema pronterface se envía la orden de desplazamiento 100 mm en el eje X. Posteriormente con un

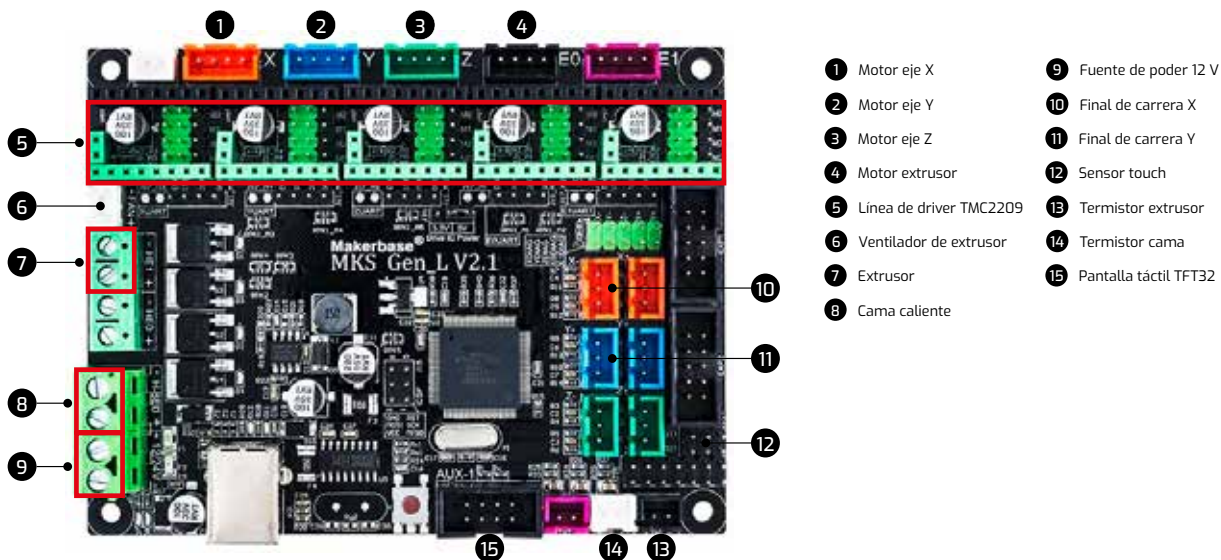


Figura 11. Diagrama de conexiones: placa base de control MKS Gen L V2.1. Fuente: <https://www.makerbase.store/>

pie de rey preferiblemente digital, se mide la distancia real realizado por sistema de extrusión. Para los demás ejes Y y Z se procede de forma similar hasta obtener la mayor precisión. El cálculo de los nuevos valores, los pasos por milímetro de cada eje están definidos con Ecuación 1. Esta calibración asegura que los desplazamientos de la maquina coincidan con las ordenes enviadas desde el software mejorando la precisión y calidad de impresión.

$$\text{Nuevo valor} = \frac{\text{Valor actual pasos del eje X} * \text{Distancia deseada}}{\text{Distancia medida}}$$

Ecuación 1: Calibración del sistema de alimentación del filamento

$$\text{Nuevo valor} = \frac{\text{Valor actual pasos del extrusor} * \text{Distancia deseada}}{\text{Distancia medida}}$$

Ecuación 2: Nivelación de la cama caliente

2.5. Calibración del sistema de alimentación del filamento

Una vez conectada la maquina al PC y configurada la temperatura de extrusión a 180 °C en pronterface, se debe esperar a que el termistor alcance este valor. Esto permitirá el accionamiento del motor nema 17. A continuación, se marca una referencia sobre el filamento. Enseguida, se envía una orden desde Pronterface para extruir 100 mm de filamento. Posteriormente, con un pie de rey digital, se mide la longitud real del filamento extruido. Si la longitud real no coincide con la ordenada, es necesario ajustar los pasos del motor empleando la Ecuación 2. Para ello, se ajustan los valores correspondientes Visual Studio Code, en el archivo Configuration.h, cargando los cambios en la tarjeta de control MKS Gen L V2.1., o a través del comando M92 EXX, donde XX es el nuevo valor calculado para los pasos de extrusor. Este proceso se repite hasta obtener una diferencia mínima entre la longitud ordenada y la real.

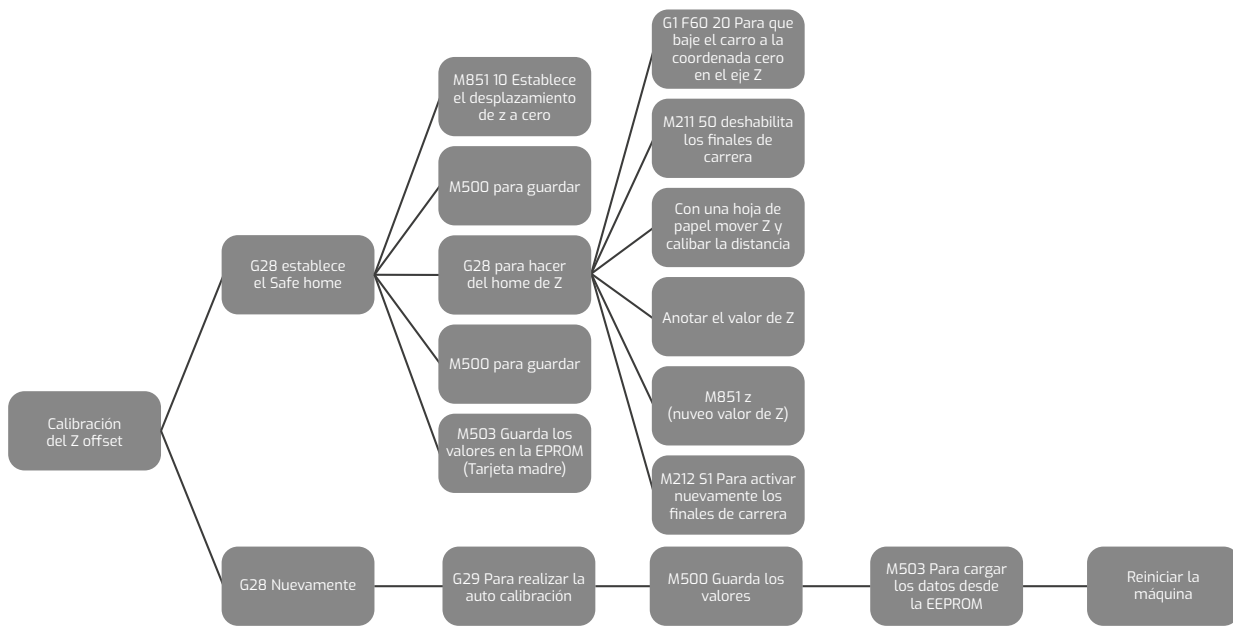


Figura 11. Proceso de calibración de z offset, nivelación de la cama caliente. Fuente: Elaboración Propia.

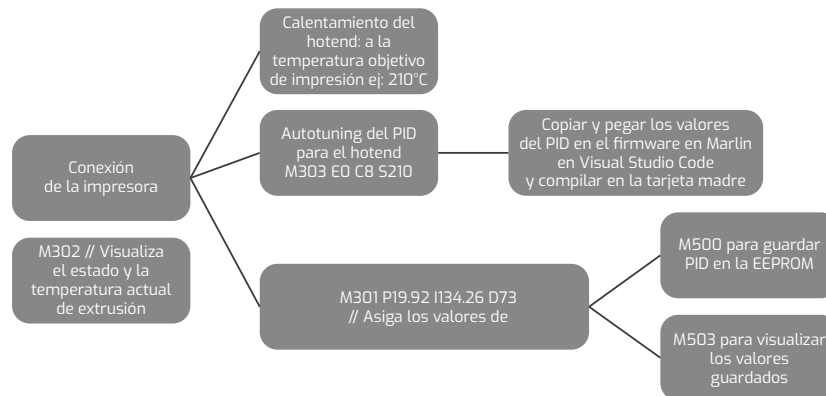


Figura 12. Proceso de calibración del PID del extrusor (hotend). Fuente: Elaboración propia.

Para determinar la nueva configuración de los pasos del extrusor, se emplea la Ecuación 2. [8].

2.6. Nivelación de la cama caliente

Para este proceso, se empleó Pronterface. Se conectar nuevamente la maquina por el puerto serie al PC y se enviaron los siguientes comandos en Gcode, primero que todo se debe

activar el auto leveling con la instrucción M420 S1, luego enviar todos los ejes a la posición home a través de G28. Posteriormente, realizar el proceso de toma de puntos con el sensor BLTouch G29. Enseguida con M500 se guardan los parámetros en la memoria EEPROM. Con M501 se activa los parámetros de la configuración actual de la memoria. Finalmente, con

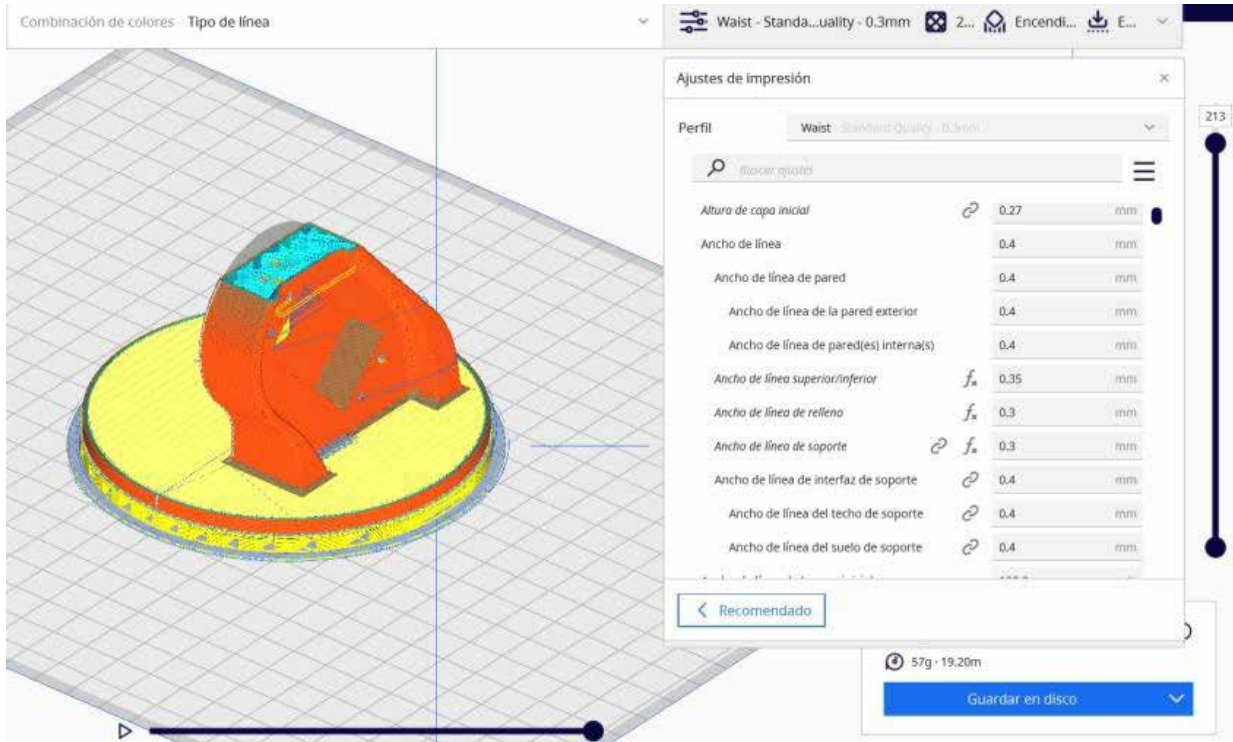


Figura 13. Pruebas de configuración. Fuente: Software de laminación Ultimaker Cura 5.5.0

M503 se visualizan los parámetros actualizados y con M420 Si se pone en ON el autoleveling guardado en la EEPROM. Ver figura 11.

2.7. Calibración del PID del extrusor y la cama caliente.

Para realizar este proceso, se utiliza la función de autoajuste (autotuning) del PID del extrusor mediante el comando en Gcode M303 E0 C8 210. Durante el autoajuste, la impresora mostrará en la consola de Pronterface una serie de comandos y valores para Kp, Ki y Kd. Estos valores pueden guardarse en la EEPROM empleando el código M301 o bien copiarse y pegarse en el firmware para luego cargarlo en la tarjeta de control. [8].

En el caso del PID de la cama caliente, se usa el comando M303 E-1 C8 S65. Los valores

obtenidos se ajustan en el archivo Configuración.h desde Visual Studio Code. Ver figura 12.

2.8. Validación experimental

Se imprimió una serie de piezas de prueba utilizando diferentes configuraciones de impresión. Se compararon las piezas impresas con los modelos CAD y se evaluarán la precisión, la calidad superficial y la repetibilidad. [5].

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se utilizaron diferentes herramientas de simulación que permitieron la optimización en cada proceso desde el diseño hasta construcción del prototipo de la impresora 3D. En primer lugar, en NX a partir de la aplicación llamada movimiento se realizó el análisis del de los desplazamientos y el análisis cinemático de cada uno de los ejes ver Figura 14.

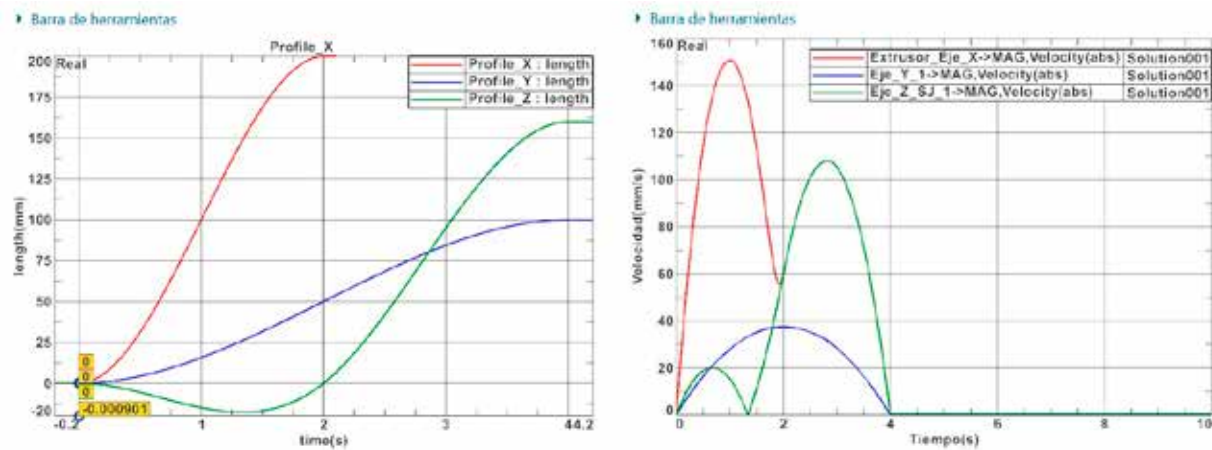


Figura 14. Análisis cinemático a). Desplazamiento de los ejes x, y, z. b) Velocidad absoluta de x, y, z. Fuente: Propia NX de Siemens aplicación de Movimiento.

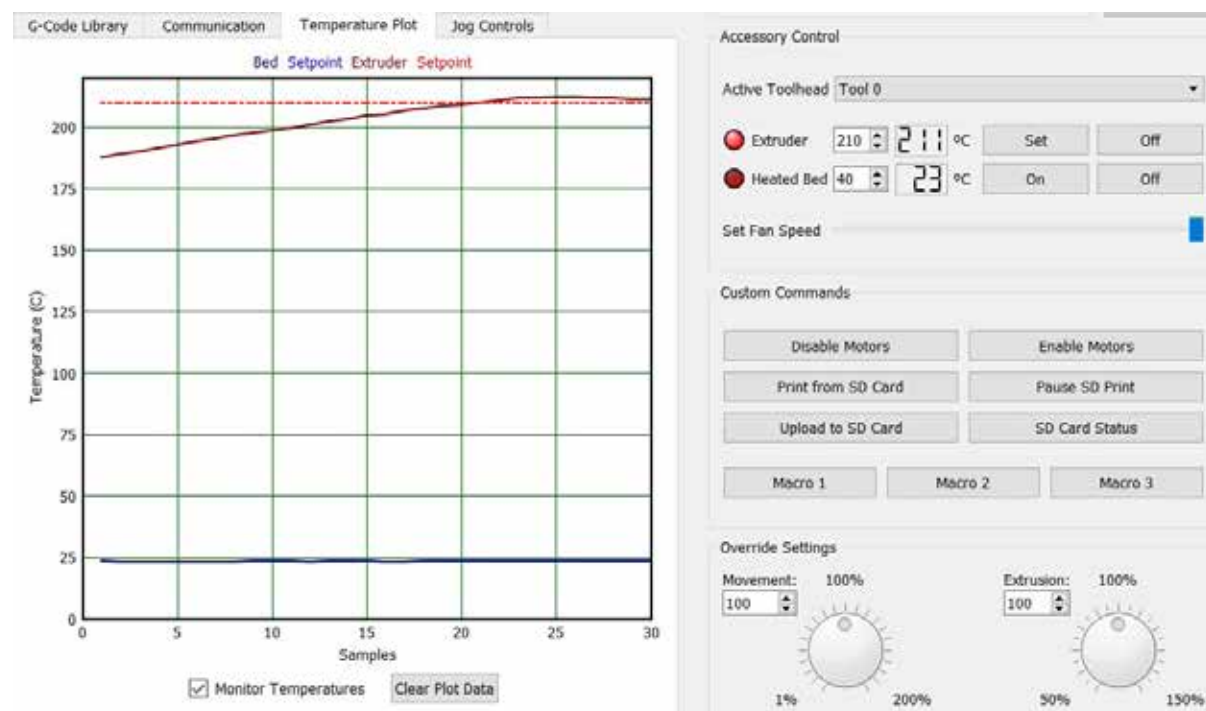


Figura 15. Calibración del PID del extrusor
Fuente: Software Simplify3D.

Otro proceso que se llevó a cabo, fue la calibración de PID de extrusor y la cama caliente utilizando la función autoajuste en el software Simplify3D. Para este proceso se fijó la temperatura objetivo del extrusor a 210 °C con el ventilador al 100%. Los valores PID resultantes de representan en la tabla 1. y se muestran en la figura 15.

De acuerdo a la observación la temperatura del extrusor se estabiliza rápidamente respondiendo el control IPD. Esta temperatura de 210 °C se mantiene en una zona de tolerancia de $\pm 0,1$ °C lo que permite asegurar la estabilidad del proceso y calidad de las impresiones.

Tabla 1. Constantes del control PID

Fuente: Software Simplify3D.

Calibración	Kp:	Ki:	Kd:
1	20.00	1.23	81.11

La calibración de la nivelación de la cama se realiza de manera iterativa utilizando el sensor BLTouch. Inicialmente, se envía el comando G8, para llevar los ejes de la maquina a la posición de origen (homing). A continuación, se ejecuta el comando G29, lo que hace que el sensor de nivelación inicie una secuencia de escaneo de la posición Z en cada punto de contacto con la cama formando una cuadrícula de 9 puntos. Los datos obtenidos de este proceso se muestran en la tabla 2. Con base en esta información, se procede a ajustar manualmente las tuercas de la cama hasta lograr una la menor dispersión. [3].

X0	-1	-0,585	0
Y0		Y1	Y2
X1	-0,39	0,055	0,375
X2	0,285	0,438	0,262

Tabla 2. Malla de nivelación bilineal

Fuente: Software Pronterface



Figura 16. Nivelación de la cama

Fuente: Prototipo funcional.

4. CONCLUSIONES

El gemelo digital es una herramienta poderosa que permite optimizar del diseño, al simular del comportamiento de los parámetros de la máquina. Esta simulación facilita el dimensionamiento y ensamble de los componentes, así como el análisis cinemático de los movimientos. Como resultado, se redujo significativamente los tiempos de fabricación.

La calidad de impresión depende en gran medida de la adherencia de la primera capa en la cama de impresión. Para mejorar este proceso se propone añadir un segundo ventilador de capa al extrusor y realizar los ajustes de los parámetros de impresión en el software Ultimaker Cura 5.5.0, como la velocidad y temperatura de las primeras capas. Estos cambios permitirán obtener piezas sólidas y con menos deformaciones.

Para evitar atascos del filamento, es crucial asegurar el correcto funcionamiento del alimentador y la ventilación del disipador térmico del extrusor. Antes de cada impresión, se recomienda realizar una prueba de extrusión de material verificando que la boquilla este libre de obstrucciones.

Las condiciones ambientales como la humedad y la temperatura del entorno, afectan significativamente la calidad y precisión de impresión. Para asegurar resultados óptimos, se aconseja realizar el procedimiento de calibración del PID de la temperatura del extrusor y de la cama en forma regular, antes de realizar cada impresión o cuando la impresora se traslade a otro sitio.

Antes de iniciar las pruebas de impresión es necesario realizar varios procesos de calibración

y ajuste de la máquina. Entre estos parámetros se encuentran: los desplazamientos de los ejes X, Y, y Z, el PID para el control de la temperatura del extrusor y de la cama caliente, la alimentación del filamento y nivelación de la cama.

Finalmente, se pueden generar plantillas con la configuración de los parámetros de impresión, dependiendo el tipo y características de cada pieza, esto se logra realizando pruebas de impresión obteniendo productos de buena calidad y precisión. 

REFERENCIAS

- Bowyer, A. (2010). Impresión 3D: Diseño y fabricación digital. Marcombo.
- A. Saldaña, M. L. (2021). Predicción de propiedades mecánicas de PoliÁcido Láctico (PLA) procesado mediante moldeo por compresión y fabricación aditiva (FDM). Revista española de mecánica de la fractura, , 137-144.
- Almeida Boderó, I., Sotomínguez Espinoza, G., & Cisneros Pérez, N. (2021). Aplicación de la manufactura aditiva en el procesamiento de alimentos. Polo del Conocimiento: Revista científico - profesional, 837-856.
- Bhushan, B. (2015). Handbook of 3D Printing. Springer.
- Chua, C. K. (2021). Topology optimization in additive manufacturing: Design for additive manufacturing. Springer.
- Gibson, I. (2015). Additive Manufacturing Technologies. Springer.
- Pearce, J. (2015). 3D Printing in Architecture. . Routledge. repara3d. (02 de 10 de 2024). Obtenido de <https://repara3d.com/calibracion-pasos-y-pid#calibracion-del-pid-proporcional-integral-derivativo>
- Sánchez, M. (2021). Fabricación aditiva: Un nuevo paradigma en la industria. Marcombo.
- Simpson, T. C. (2015). Diseño para fabricación aditiva. Alfaomega.