

DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE FABRICACIÓN HÍBRIDA PARA LA PRODUCCIÓN DE PRODUCTOS PERSONALIZADOS

Trabajo de grado para optar al título
de Ingeniero en Mecatrónica

Trabajo Fin de Grado

Autor:

Leyder Dalmir Quintero Bayona

Tutor:

Cristhian Iván Riaño Jaimes

Diciembre 2020



DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE FABRICACIÓN HÍBRIDA PARA LA PRODUCCIÓN DE PRODUCTOS PERSONALIZADOS

Autor

Leyder Dalmir Quintero Bayona

Tutor/es

Cristhian Iván Riaño Jaimes
PhD(c)

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero en Mecatrónica



Pamplona, Diciembre 2020

Preámbulo

La necesidad cada vez más demandante del aumento de la productividad y eficiencia ligadas a la obtención de productos de buena calidad, acabados uniformes, la exigencia en los parámetros dimensionales de las piezas personalizadas y la complejidad de las geometrías que a estas constituyen hacen imperativo el desarrollo de nuevas tecnologías para la manufacturación de las mismas. Una solución “rápida” y lógica para solventar esta necesidad es el uso de manufactura aditiva y sustractiva las cuales trabajando de la mano y complementándose entre ellas conforman la manufactura híbrida.

Por lo cual este documento plantea como objeto de estudio el desarrollo e implementación de un prototipo de manufactura híbrida el cual busca fusionar ambos métodos de manufactura con el fin de cumplir con los parámetros de fabricación y se analizaran los resultados obtenidos en esta investigación.

Agradecimientos

Este trabajo no habría sido posible sin el apoyo y el estímulo de mi tutor, PhD(c). Cristhian Ivan Riaño Jaimes, bajo cuya supervisión escogí este tema y di inicio a mi tesis. A mis compañeros y amigos que estuvieron presentes en estos años de carrera. A Dios por darme la sabiduría y entendimiento para afrontar problemas y dificultades, para poder hoy llegar a este momento culmen de mi carrera universitaria.

A los docentes de esta alma máter quienes estuvieron en este largo y arduo proceso de aprendizaje para adquirir habilidades y competencias para poder hoy estar en este punto de la carrera.

A mi madre y a mi padre por sus esfuerzos y amor para brindarme la oportunidad de tener una educación superior, a mis hermanos y amigos que me estuvieron deseando lo mejor a través de los años con sus consejos y amistad.

*A mis padres por darme su apoyo y amor incondicional
Es a ellos a quien dedico este trabajo.*

*"NO! Try not!
DO or DO NOT,
There is no try"*

-Yoda.

Resumen

Diseñar, proyectar y desarrollar un robot capaz de realizar los procesos impresión 3D + mecanizado implementando la configuración cartesiana. Se tomó un formato neutro y se propuso un interpretador según la norma ISO 10303 AP238, disponiendo de sus servicios para la creación entornos de simulación de robots, manufactura de piezas y posicionamientos de máquinas, con el fin de que la máquina realice los procesos de manufactura híbrida de la mejor manera posible, sacando mejor partida de la máquina. La complejidad de algunas piezas debido a las geometrías que la constituyen tanto externa como internamente imposibilitan el desarrollo del mismo, las largas horas de fabricación retrasan el avance de éstos, algunas veces las piezas fabricadas no terminan siendo las ideales para las aplicaciones para las cuales han sido creadas por el hecho de no estar correctamente fabricadas ya sea porque la máquina usada presenta errores de calibración haciendo así que las piezas no tengan las medidas deseadas, la implementación de la manufactura híbrida busca solventar todos estos problemas.

Palabras claves: Manufactura aditiva, manufactura sustractiva, maquinado, control numérico computarizado, manufactura híbrida, impresión 3d, Robot cartesiano.

Abstract

Design, project and develop a robot capable of performing 3D printing + machining processes implementing the Cartesian configuration. A neutral format will be taken and an interpreter will be proposed according ISO 10303 AP238, having its services for the creation of robot simulation environments, parts manufacturing and machine positioning, in order for the machine to carry out the processes of Hybrid manufacturing in the best possible way, getting the best out of the machine. The complexity of some parts due to the geometries that constitute it both externally and internally make it impossible to develop it, the long hours of manufacture delay their advancement, sometimes the manufactured parts do not end up being ideal for the applications for which they have been created due to the fact of not being correctly manufactured, either because the used machine has calibration errors, thus causing the parts to not have the desired measurements, the implementation of hybrid manufacturing seeks to solve all these problems.

Keywords: additive manufacturing, subtractive manufacturing, milling, computer numerical control, hybrid manufactrin, 3d printing, Cartesian robot.

Índice general

1	Introducción	1
2	Objetivos	3
2.1	Objetivo General	3
2.2	Objetivos Específicos	3
3	Marco Teórico y Estado del Arte	5
3.1	Marco Teórico	5
3.1.1	Manufactura Aditiva:	5
3.1.2	Manufactura Sustractiva:	8
3.1.3	Manufactura Híbrida:	10
3.1.4	Cinemática Cartesiana:	13
3.1.5	Firmware:	14
3.1.6	Slicers:	17
3.1.7	Intercambio de Herramienta:	17
3.2	Antecedentes	19
4	Metodología	27
4.1	Diagrama Metodológico	27
5	Desarrollo	31
5.1	Componentes	31
5.1.1	Motor Paso a Paso Nema17	31
5.1.2	Motor Paso a Paso Nema 23	32
5.1.3	GT2560 (Placa de Control)	33
5.1.4	Driver DRV8825	34
5.1.5	Fuente de Alimentación JR PSU004	35
5.2	Construcción del Prototipo	36
5.2.1	Ensamblaje CAD Completo y Diseño de piezas 3D.	36
5.2.2	Diseño de piezas 3D	37
5.2.3	Diseño de Intercambiador de Herramienta	39
5.2.4	Ensamblaje Mecánico y Electrónico	42
5.2.4.1	Preparación de tarjeta GT-2560	44
5.2.4.2	Diagrama de Conexiones	44
5.2.5	Ensamblaje Mecánico de Herramientas	45
5.2.6	Códigos Macros	47
6	Resultados	53
6.0.1	Propuesta de Interpretador	62

7 Conclusiones	69
Bibliografía	71
Lista de Acrónimos y Abreviaturas	75

Índice de figuras

3.1	Modelo de avión fabricado con un actuador integrado y sin estructuras de soporte.	5
3.2	Ejemplo de impresión 3D con sistema SLA.	6
3.3	Máquina de estereolitografía (SLA 250) de 3D Systems con esquema del proceso.	6
3.4	Ejemplo de impresión 3D con sistema FDM.	7
3.5	Principios de funcionamiento de sistemas LOM y SGC.	7
3.6	Máquina CNC Vcm 2016L multi-herramienta.	8
3.7	Ejemplo de maquinado CNC	9
3.8	Cadena de fabricación CAx actual	10
3.9	Arquitectura de plataforma de manufactura universal	10
3.10	Comparación entre fabricación tradicional de perfiles curvos contra la extrusión de perfiles curvos (híbrida).	11
3.11	Principio de funcionamiento del torneado asistido por láser	11
3.12	Clasificación del proceso híbrido	12
3.13	Representación esquemática de una configuración típica de modelado de deposición fundida (FDM).	13
3.14	Diagrama representativo del funcionamiento de Marlin en una impresora 3D, explicación: este firmware es quemado en la board para que esta haga una correcta interpretación de las ordenes y envíe ordenes a los motores, extrusor, etc, para generar una pieza en específico.	14
3.15	Paso a paso para generar un código-G a partir de un modelo 3D	16
3.16	Ejemplo de slicing de una pieza 3D con soportes.	17
3.17	Vista superior del Gripper para el intercambio de herramientas en disposición cerrada.	18
3.18	Vista en perspectiva ampliada que muestra esquemáticamente la transferencia de una herramienta desde el almacén al husillo en la posición de cambio de herramienta.	19
3.19	Representación IDEF0 de la estructura iAtractiva.	20
3.20	Vista esquemática del marco iAtractiva.	20
3.21	Estructura operativa del sistema de planificación de procesos Re-Plan.	21
3.22	Esquema de fabricación híbrida que incluye EFF y fresado	21
3.23	Prototipo de máquina desarrollado en casa.	22
3.24	Diseño de hardware del proceso HASM Aditivo.	23
3.25	Diseño de hardware y configuración del proceso HASM.	24
3.26	Fabricación híbrida mediante procesamiento de multiplanos.	24
3.27	Vista esquemática del software y flujo de control del proceso HASM.	25
4.1	Diagrama de metodología secuencial.	27

5.1	Motor Nema17 ref:17HS8401	31
5.2	Motor Nema23	32
5.3	Placa Geeetech GT-2560	34
5.4	Driver DRV8825.	35
5.5	Fuente de alimentación PSU004.	36
5.6	Ensamblaje completo en software CAD.	36
5.7	Componentes del prototipo.	37
5.8	Ensamblaje CAD del carro deslizador del eje X que tiene integrado el sistema de intercambio de herramienta.	39
5.9	Ensamblaje real del carro deslizador del eje X que tiene integrado el sistema de intercambio de herramienta.	40
5.10	Imagen de pieza de herramienta.	40
5.11	Imagen de pieza de herramienta.	41
5.12	Imágenes de herramienta encargada del maquinado en físico y CAD.	41
5.13	Foto de ensamblaje mecánico y electrónico.	42
5.14	a.Prueba de carro deslizante Z, b.Carro deslizante Y, c.Sistema de tuerca anti-backlash, d.Carro deslizante Y con rodamientos, e.Soporte Nema17 con acople 5M-8M, f.Soporte con rodamiento para varilla roscada 5/16in, g.Instalación de cadena porta-cables , h.Montaje del carro X porta-herramienta.	43
5.15	Paso a paso para quemar bootloader.	44
5.16	Diagrama de conexiones	45
5.17	Montaje mecánico de la herramienta Hotend.	45
5.18	Montaje mecánico de la herramienta Husillo.	46
5.19	Imágenes de sujeción de herramientas.	46
5.20	a.Imagen agarrando herramienta hotend, b.Herramienta hotend lista para el uso, c.Imagen agarrando herramienta husillo, d.Herramienta husillo lista para el uso	51
6.1	Configuración de impresora en Slicer Cura	53
6.2	Códigos G previo y posterior a la impresión.	54
6.3	a.Inicio de impresión primeras capas, b.Imagen durante en proceso de impresión , c.Pieza terminada , d.La máquina al terminar deja la herramienta en su lugar y va al origen.	55
6.4	56
6.5	Resultados de impresión y comprobación de medidas en cada eje X,Y y Z. . .	56
6.6	Adaptación motor DC a la pieza de acople.	57
6.7	Resultados de maquinado. a.Toma de herramienta, b.Proceso de maquinado, c.Vuelta a su lugar de herramienta, d.Resultado y medición de maquinado. .	58
6.8	Disposición de Herramientas sujetos por imanes de neodimio.	58
6.9	Simulación de la trayectorias de proceso híbrido.	59
6.10	Diagrama de proceso de manufactura híbrida	60
6.11	Validación de funcionamiento de proceso híbrido. a.Impresión 3D, b.Cambio de herramienta, c.Maquinado, d.Pieza terminada	60
6.12	Resultados dimensionales del proceso híbrido. a.Medición en X(20.1mm), b.Medición en Y(20.2mm), c.Medición en Z(10.1mm)	61

6.13 Simulación de la trayectoria de la capa AM en STEP-NC	62
6.14 Fabricación de la pieza de prueba utilizando una impresora RepRap 3D modelo Prusa Mendel i2.	63
6.15 Modelo de datos STEP-NC simplificado	63
6.16 Flujo básico de actividades para simulaciones de mecanizado basadas en STEP- NC	64
6.17 Ejemplo de un programa AM STEP-NC de una pieza de prueba FDM	65
6.18 Plataforma abierta STEP-NC inteligente para fabricación aditiva avanzada .	66
6.19 Plataforma genérica STEP-NC para fabricación aditiva avanzada	67
6.20 Flujo de datos entre actividades involucradas en la generación de datos STEP- NC usando Siemens NX, PTC Creo y STEP-NC Machine.	68

Índice de tablas

5.1	Tabla índice de componentes.	37
5.2	Tabla de parámetros de impresión 3D de Piezas. Donde (Ac) es "Altura de capa" [mm], (R) es "Densidad de relleno" [Porcentaje], (S) es "Soporte", (s.s) "Sin Soporte" y (c.s) "Con Soporte", y (V) es "Velocidad" en [mm/s].	38

Índice de Códigos

5.1	Configuración de Motherboard	47
5.2	Configuración Número de Extrusores	47
5.3	Configuración PID del Hotend	47
5.4	Configuración Driver de motores paso a paso usados en la placa	47
5.5	Configuración de Pasos por Unidad,Feed Rate y aceleración	48
5.6	Macro Lock	48
5.7	Macro Unlock	48
5.8	Macro Agarrar Herramienta Hotend	48
5.9	Macro Soltar Herramienta Hotend	49
5.10	Macro Agarrar Herramienta Husillo	49
5.11	Macro Soltar Herramienta Husillo	49
5.12	Código G Prueba de intercambio de herramientas	50
6.1	Extracto de código generado por Cura donde se tiene en cuenta la rutina previa a imprimir.	54

1 Introducción

La manufactura híbrida (HM) nace como un concepto que busca aprovechar al máximo las virtudes de otros métodos de manufactura, aditiva (AM) y sustractiva (SM), haciendo uso de algunas de sus formas, ya que cada una tiene diversas formas de implementar su propio concepto de manufactura, en mayor medida la AM que tiene muchas más variantes.

La implementación de estas máquinas se debe al reciente incremento de información relacionada a estos métodos de manufactura y el gran auge de las impresoras 3D que de pronto se han convertido en una herramienta indispensable para personas dedicadas al prototipado rápido, anteriormente las máquinas de este tipo eran demasiado costosas, muy pocas personas las conocían y, lo peor de todo, la forma en como operaban era una completa incógnita; gracias a la comunidad, a los grandes avances en esta área del conocimiento y al *Open Source* (Código Abierto o Fuente Abierta) cada vez más personas pueden hacer uso, modificaciones y redistribuciones de *Software* y diseño.

Hoy en día la impresión 3D por deposición fundida y el maquinado CNC son usados con gran frecuencia debido a su flexibilidad en diseños y códigos lo que permite que cada persona cree su propia máquina, pero, cada vez se busca más y es por ello que las personas ahora apuntan al desarrollo de máquinas que puedan realizar diversas acciones en una sola, empezando con la fabricación de impresoras 3D de múltiple extrusión y pasando luego por las máquinas CNC que realizan cambios de herramientas, las personas han ido buscando la manera de tener la posibilidad de realizar las acciones de impresión y maquinado, ya sea en procesos por separado o combinados, en una sola máquina sin perder el foco en buscar siempre productos de calidad, con parámetros dimensionales correctos, etc.

En este trabajo se busca el desarrollo de un prototipo que sea capaz de realizar ambos métodos de manufactura, impresión 3D FDM y maquinado CNC. Primeramente se realizará un diseño general del prototipo con el cual se garantice que la máquina pueda realizar un cambio de herramienta correcto, y esta será fabricada con piezas personalizadas por medio de impresión 3D. Se hará uso de una placa de obtención de datos y control *Open Source* donde se pueda implementar un firmware también *Open Source*. El prototipo funcionará en primera instancia con una serie de instrucciones en código G (Macros) generadas por el autor, estos funcionarán como un interpretador de acciones puntuales a realizar previas y posteriores a las acciones de impresión o maquinado, para conseguir manipular en comportamiento de la máquina a conveniencia y conseguir realizar acciones para las que no está diseñado; Luego de conseguir el comportamiento deseado se propondrá un interpretador estándar.

2 Objetivos

2.1 Objetivo General

- Desarrollar un prototipo que implemente los métodos de manufactura aditiva (impresión3D) y sustractiva (Fresado CNC).

2.2 Objetivos Específicos

- Conocer ventajas y desventajas de las diferentes configuraciones cartesianas.
- Diseñar un prototipo de referencia para la fabricación de productos por medio de manufactura híbrida.
- Proponer un interpretador para manufactura híbrida.
- Construir el prototipo diseñado.
- Validar el funcionamiento de la máquina implementando un proceso de HM.

3 Marco Teórico y Estado del Arte

3.1 Marco Teórico

3.1.1 Manufactura Aditiva:

Fry y cols. (2020) define la manufactura aditiva como un proceso mecánico que puede crear estructuras o productos mediante la deposición secuencial de filamento de materiales típicos (PLA, ABS, etc) en forma de planos delgados que son puestos unos encima de otros en capas generando así una estructura tridimensional. Este método de manufactura resulta muy efectivo al momento de hacer frente a formas complejas incluso cuando estas precisan de material de soporte. también menciona que la manufactura aditiva ha tenido un gran impacto en la creación de prototipos y fabricación de los mismos aportando importantes ventajas como lo son: el manejo computarizado lo cual aumenta la precisión en las dimensiones, flexibilidad en la producción, reducción de costos de volúmenes bajos, producción de piezas complejas con formas internas que no pueden ser producidas por otro método de manufactura. Aunque también cabe mencionar sus limitaciones principales: la necesidad de material de soporte que aumenta los tiempos de fabricación, acabados irregulares debido al apilamiento de capas, fuerza anisotrópica y la dificultad para incorporar componentes funcionales.

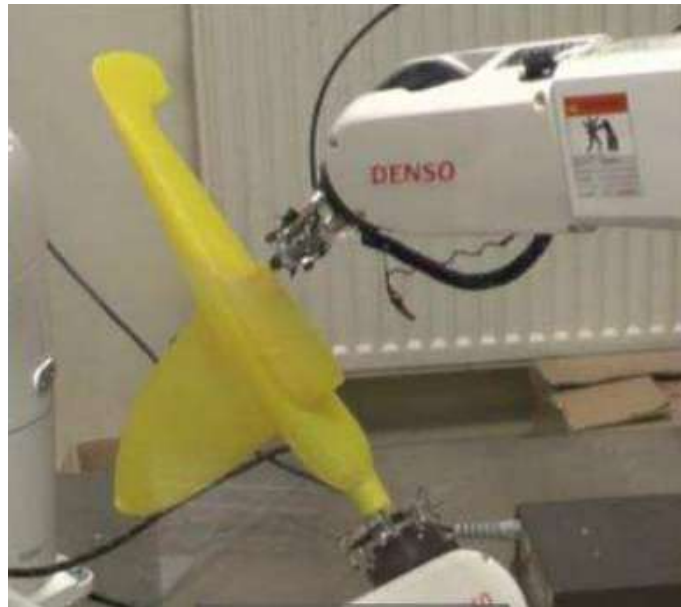


Figura 3.1: Modelo de avión fabricado con un actuador integrado y sin estructuras de soporte.

Fuente: Fry y cols.

Sin embargo los comienzos de la manufactura aditiva fueron muy diferentes de lo que pensamos, Wohlers Associates Inc. (2015) en su escrito “History of Additive Manufacturing” nos dan un recorrido por la historia de este método de manufactura que ve la luz en el año 1960 de la mano de un grupo de investigadores del Battelle Memorial Institute que buscaban crear objetos sólidos usando fotopolímeros usando un láser, este experimento consistía en que dos rayos láser con diferente longitud de onda y en medio un depósito con resina y pretendía polimerizar (solidificar) de material en que se encontrara en el punto de intersección. La resina de fotopolímero usada en este experimento fue inventada 10 años antes por DuPont.

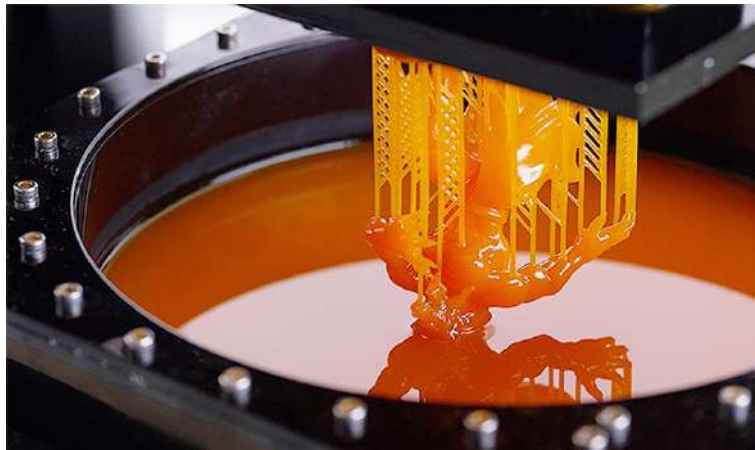


Figura 3.2: Ejemplo de impresión 3D con sistema SLA.

Fuente: RESTREPO

El primer uso comercial de este método de manufactura llega hasta el año 1987 con estereolitografía (SL) para sistemas 3D, un proceso que solidifica delgadas capas de resina polímera sensible a luz ultravioleta con un láser. La SLA-1, como sistema de prueba beta, fue la primera máquina AM disponible comercialmente en el mundo y fue la precursora de la alguna vez popular máquina SLA 250.

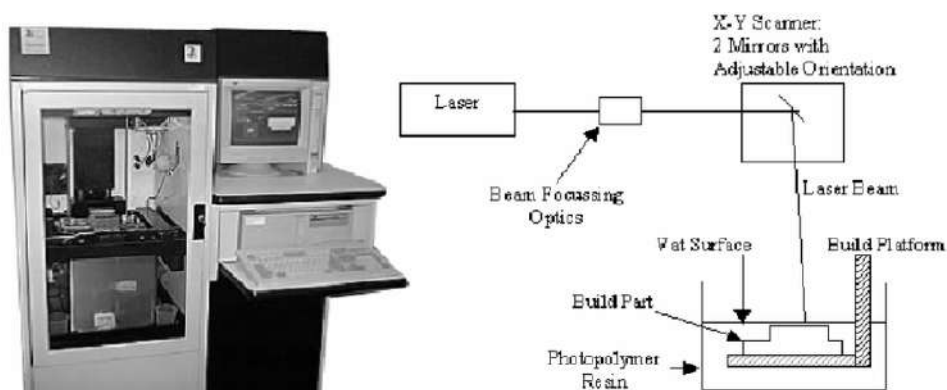


Figura 3.3: Máquina de estereolitografía (SLA 250) de 3D Systems con esquema del proceso.

Fuente: Rosen

Wohlers Associates Inc. (2015) En 1991 hacen su aparición los sistemas FDM (fused deposition modeling) o en castellano “Modelado por deposición fundida” de parte de Stratasys, que es la tecnología que con más frecuencia se puede observar en las impresoras 3D ya que es mucho más segura, no requiere de químicos, permite hacer impresiones mucho más grandes y son mucho más económicas que los sistemas SL, los sistemas FDM consisten en la extrusión de materiales termoplásticos en forma de filamento para producir partes prediseñadas capa a capa.



Figura 3.4: Ejemplo de impresión 3D con sistema FDM.

Fuente: RESTREPO

Junto al FDM este llegaron también, solid ground curing (SGC) “Curado de Suelo Sólido” por parte de Cubital y laminated object manufacturing (LOM) “Fabricación de objetos laminados” por parte de Helisys, aunque estos dos últimos métodos no son populares y por lo tanto la mayoría de las personas simplemente optan por sistemas FDM y es por ello que en este prototipo usaremos este método, por su sencillez al implementarlo y controlarlo.

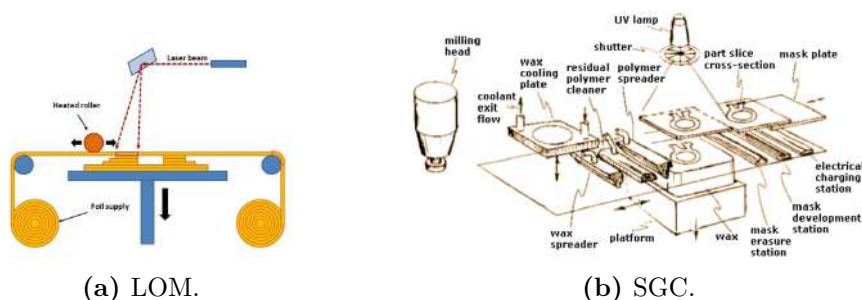


Figura 3.5: Principios de funcionamiento de sistemas LOM y SGC.

Fuente: from scratch y efunda

3.1.2 Manufactura Sustractiva:

Staff (2016) La manufactura sustractiva es un proceso por el cual los objetos 3D son generados por medio de la remoción de material de un bloque sólido de material. Este método de manufactura puede llevarse a cabo manualmente cortando o desbastando el material aunque actualmente es mas común ver estos procesos ser realizados por medio de máquinas CNC. Las máquinas CNC avanzadas utilizan una variedad de herramientas y realizan cortes en al menos los 3 ejes (X,Y y Z) de modo que se minimice el esfuerzo de los diseñadores para conseguir una pieza. Una de las ventajas mas significativas de este método de manufactura es la capacidad de maquinar una bisagra viva a partir de una pieza de plástico extremadamente delgada. Este tipo de procesos no son posible aún en una impresora 3D. Para esos prototipos que requieren de componentes de bisagra viva, es útil producir algunas piezas por medio de algún método de manufactura aditiva y usar una maquina de CNC para componentes especiales como lo es la bisagra viva.



Figura 3.6: Máquina CNC Vcm 2016L multi-herramienta.

Fuente: Staff

Powell (2018) La manufactura sustractiva hace su aparición en la década de 1940 y es usada principalmente para proyectos de maquinado que tienen una alta complejidad, acciones repetitivas y alta precisión. Este método fue inicialmente conocido como "Control Numérico Computarizado (CNC)". Jhon T. Parsons, como ingeniero autodidacta, desarrolló la primera máquina CNC, Las máquinas CNC de la actualidad comprenden máquinas como tornos, fresadoras, enrutadoras, etc - que utilizan códigos G y softwares CAD/CAM específicos para operar y fabricar productos personalizados.

Powell (2018) Este método de manufactura tiene dos principales categorías de máquinas, tecnologías de maquinado convencionales y tecnologías de maquinado no convencionales. Los procesos de mecanizado convencionales usan herramientas de corte en forma de cuña para eliminar material con el fin de crear diferentes diseños geométricos con el uso de diferentes máquinas o herramientas tales como tornos, fresadoras y taladradoras, este método es ideal para producir productos grandes con una calidad aceptable y cuando las formas geométricas son menos complejas. Por otro lado tenemos el mecanizado no convencional y este hace referencia a procesos de fabricación que eliminan material indeseado por medio de métodos de diferentes que involucran energía mecánica, térmica, eléctrica y química, el mecanizado no convencional funciona mejor cuando se trata con materiales duros o semi-blandos y es perfecto para generar geometrías mas complejas.

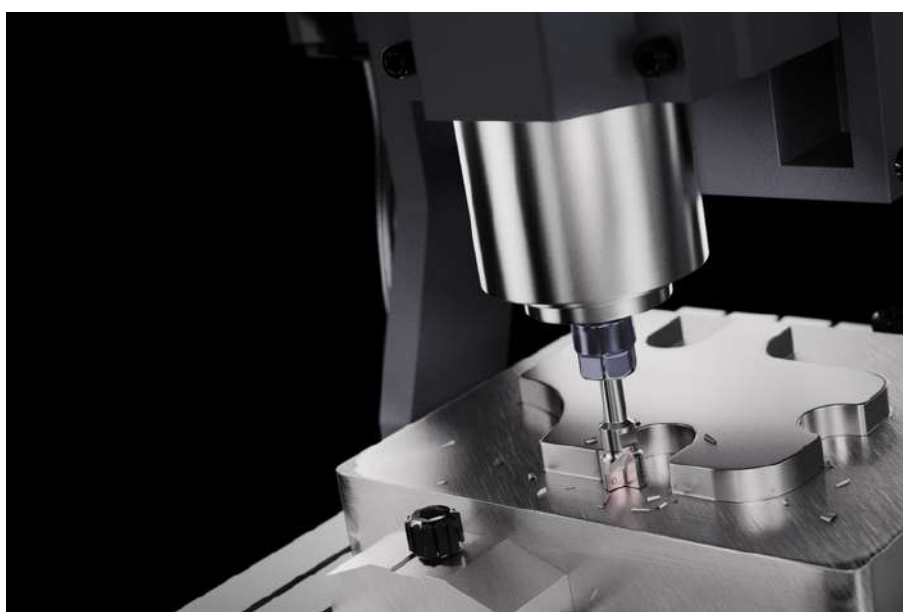
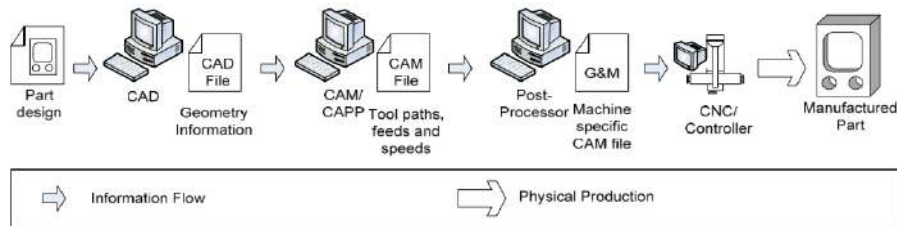


Figura 3.7: Ejemplo de maquinado CNC

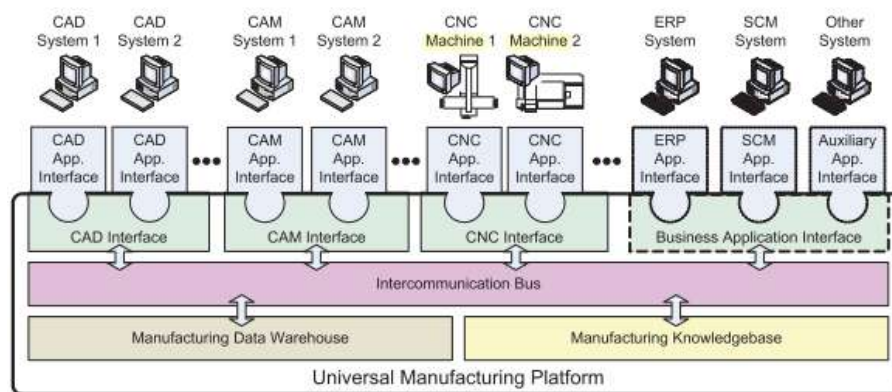
Fuente: Powell

Chrysosolouris y cols. (2009) La necesidad de reducir el tiempo de desarrollar y el aumento en la demanda para mas productos personalizados variados orientados a los clientes a llevado a la siguiente generación los sistemas de tecnologías de la información (IT) en la manufactura. La manufactura digital permitió en primera medida reducir los tiempos de fabricación, en segundo, la integración de conocimientos sobre diferentes procesos y departamentos de manufactura, tercero, busca la descentralización de la manufactura por el incremento de la variedad de partes y productos en numerosos sitios de producción y cuarto, el enfoque de las organizaciones de fabricación en sus competencias centrales, trabajando de manera eficiente con otras empresas y proveedores, sobre la base de una ingeniería cooperativa eficaz basada en IT.

Newman y Nassehi (2007) Los estándares STEP-NC proporcionan un modelo de datos jerárquico para almacenar información tanto del proceso como del producto a realizar. Este estándar es utilizado como base para la representación del conocimiento de la manufactu-

**Figura 3.8:** Cadena de fabricación CAx actual**Fuente:** Newman y Nassehi

ra contenido en la plataforma. Si bien es sabido que STEP-NC inculca el uso de funciones en la descripción del componente, no se limita a estas representaciones y puede ser usada para representar datos del proceso como trayectorias de las herramientas e incluso instrucciones de maquinado de bajo nivel. Por lo que este puede proporcionar un léxico apropiado y comprensible para conceptos de manufactura CNC.

**Figura 3.9:** Arquitectura de plataforma de manufactura universal**Fuente:** Newman y Nassehi

Newman y Nassehi (2007) "Por tanto, es imposible representar una estación de trabajo de maquinaria a nivel funcional con la versión actual de STEP-NC. De manera similar, las capacidades de un sistema CAM o un paquete CAD no se pueden modelar dentro del esquema STEP-NC. Por lo tanto, se ha desarrollado una estructura basada en XML para representar recursos para admitir la codificación de las diversas capacidades del sistema CAx. El enfoque abierto utilizado en el desarrollo del esquema de recursos XML permitirá que se modifique para cumplir con los nuevos estándares que se están desarrollando actualmente para la representación de recursos."

3.1.3 Manufactura Híbrida:

La manufactura híbrida significa la combinación de procesos y/o máquinas de manera que puedan fabricar piezas, partes o productos productiva y eficientemente. Lo que busca este nuevo método de manufactura es el peculiar efecto "1+1=3" como lo define Schuh y cols.

(2009) este efecto significa que las ventajas que tiene este método de manufacturación es mas del doble de las ventajas que puede tener un método por sí solo. Las tecnologías de manufactura híbrida brindan nuevas posibilidades para la manufacturación de materiales o piezas las cuales no puedan ser fabricados antes. El termino "Híbrido" es usualmente usado para identificar procesos o productos que combinan cierta cantidad de tipos de tecnologías, esto según Schuh y cols. (2009), "Híbrido" puede tener diversos significados: (1) La combinación de diferentes fuentes de energía que actúan al mismo tiempo en la zona de trabajo (ej:láser, maquinado); (2) Procesos que combina pasos de procesos que normalmente son realizados en dos o más pasos (ej: la integración de la fabricación de componentes y la estructuración de la superficie funcional o la integración de producción del producto semi acabado y su plegado en extrusión de perfil curvo); (3) Las máquinas híbridas, integran diferentes procesos en una sola plataforma (ej: centros de torneado y fresado); y (4) Productos que tienen una estructura híbrida o una función híbrida (ej: componentes de compuestos de metal y plástico).

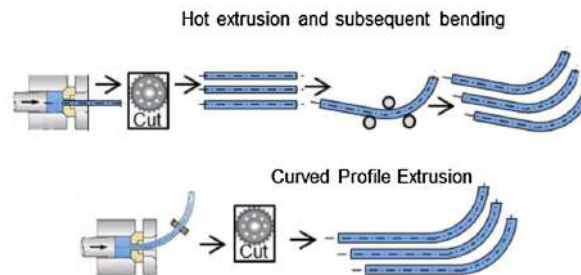


Figura 3.10: Comparación entre fabricación tradicional de perfiles curvos contra la extrusión de perfiles curvos (híbrida).

Fuente: Lauwers y cols.

Hoy en día, el termino "procesos híbridos" se utiliza a menudo para nombrar procesos pertenecientes a los diferentes grupos presentados. Como lo son el torneado asistido por láser (combinación de principios activos) y las máquinas multitarea (máquinas híbridas) a menudo se denominan procesos híbridos. También podemos encontrar varias descripciones del término de "procesos híbridos" en otros escritos de diferentes autores.

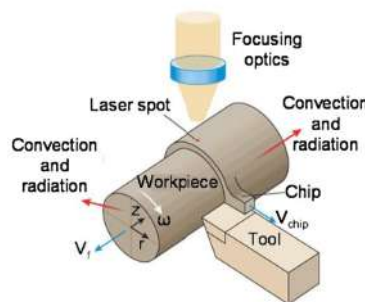


Figura 3.11: Principio de funcionamiento del torneado asistido por láser

Fuente: Lauwers y cols.

Rajurkar y cols. (1999) define la manufactura híbrida como la combinación de dos o más procesos para remover material. esos procesos híbridos son desarrollados para mejorar las ventajas y minimizar las potenciales desventajas que tienen las técnicas por separado. Kozak y cols. (1996) Dice que las características de rendimiento de los procesos de mecanizado híbridos deben ser considerablemente diferentes de las que son las características de los procesos de componentes cuando se realizan por separado. En los procesos de mecanizado híbridos (de remoción de material), generalmente hay dos categorías: procesos en los que todos los procesos que lo constituyen están directamente involucrados en la remoción de material y procesos en los que solo uno de los procesos participantes remueve directamente el material mientras que el otro solo ayuda en la remoción. cambiando positivamente las condiciones de mecanizado y haciendo mas óptimo y sencilla la remoción del material sobrante.

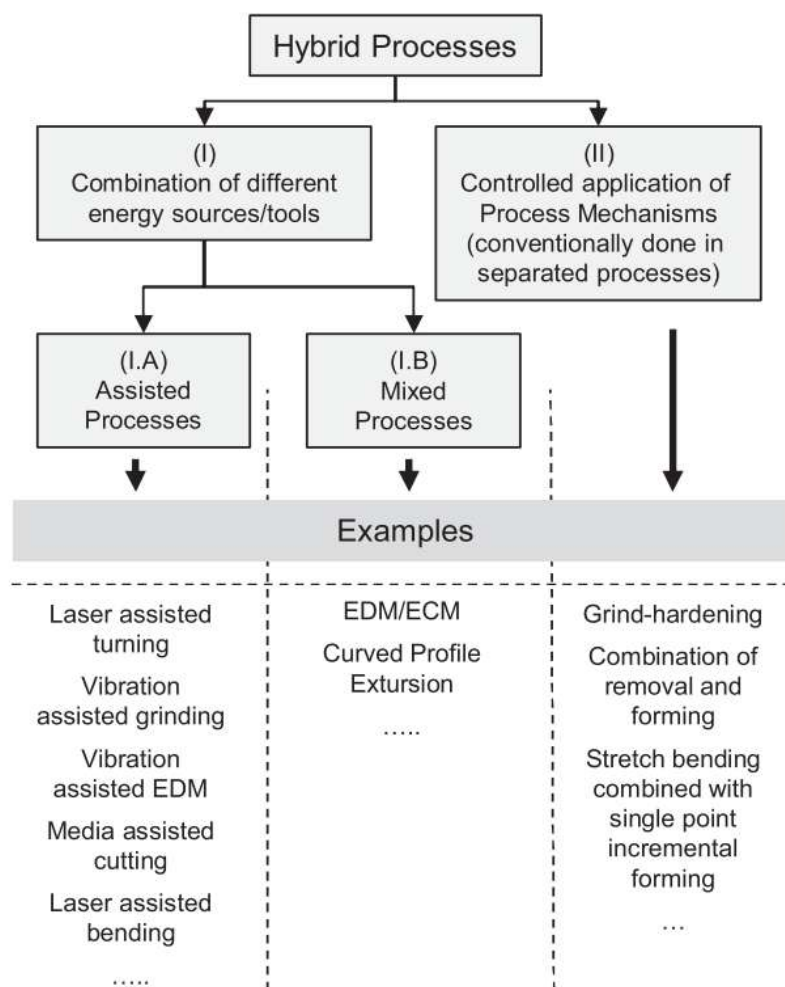


Figura 3.12: Clasificación del proceso híbrido

Fuente: Lauwers y cols.

3.1.4 Cinemática Cartesiana:

Este tipo de configuración robótica es una de las usadas debido a su sencillez a la hora de ser implementada, en la actualidad muchas de las impresoras conocidas por la mayoría de las personas tienen esta configuración por lo que empresas reconocidas mundialmente lanzan al mercado muchos de sus productos con esta configuración, empresas como Ender o Clarity, también cabe mencionar que existen una variedad de dispositivos en el mercado que optan por configuraciones diferentes como por ejemplo Delta o cilíndrica, al igual que otras impresoras de impresión 3D resultan ser más "sencillas" en su estructura básicamente por que están basadas en otros principios de funcionamiento como la esterolitografía y ahí está la gran diferencia entre las estructuras de estas máquinas, en el método de manufactura que implementen.

Esta configuración permite un desplazamiento con velocidades relativamente altas en sus 3 ejes de actuación (X,Y y Z) algunas configuraciones como la Delta resultan ser más rápidas pero no es un factor que resulte ser determinante en la impresión 3D ya que si bien esto significa inmediatamente una disminución en los tiempos de impresión no es garantía de buenos acabados y fabricación de piezas personalizadas de calidad y que no presenten daños estructurales internos o externos, además la impresión 3D por medio de FDM no es posible a velocidades extremadamente altas y esta configuración permite una óptima relación entre velocidad de impresión, tiempo de impresión y deposición del material ajustable. Para el modelado por deposición fundida (FDM) las configuraciones robóticas más usadas son Delta y Cartesiano, también Polar y Cilíndrico aunque en muchísima menor medida que las otras.

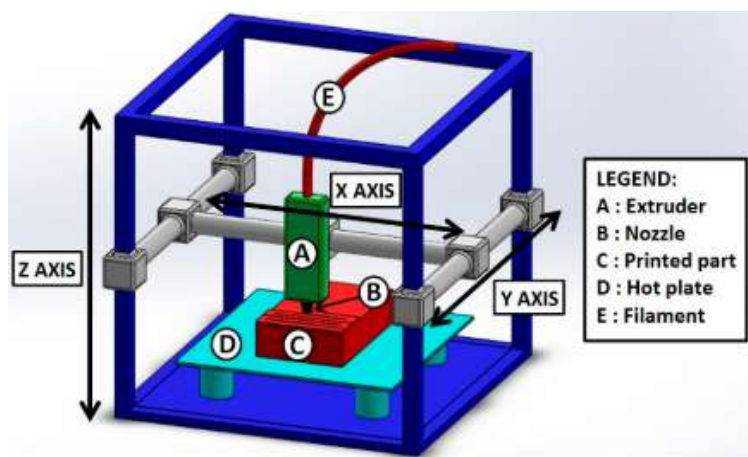


Figura 3.13: Representación esquemática de una configuración típica de modelado de deposición fundida (FDM).

Fuente: Mazzanti y cols.

Aparte de ser tan económica la construcción de estas máquinas tenemos que es una de las flexibles y adaptables que hay, lo que permite que haya una infinidad de formas en las que se pueden construir una máquina de impresión 3D, también otro factor es su compatibilidad y amplia información que se encuentra en internet de este tipo de máquinas empezando con códigos-G fácilmente manipulables y Sliders que traen por defecto esta configuración implementada en su software.

Características de una estructura cartesiana:

- 2 tipos:
 - Pórtico
 - Rectilíneo
- Volumen de trabajo teórico

$$L^3$$
- Capacidad de carga independiente de la configuración.
- Precisión y resolución constantes en el volumen de trabajo.
- Aplicaciones:
 - Paletizado.
 - Alimentación de máquina.
 - Impresión 3D.
 - Maquinado CNC.
- Geometría sencilla para el sistema de control

3.1.5 Firmware:

Pérez Porto y Merino (2009). define Firmware "al conjunto de instrucciones de un programa informático que se encuentra registrado en una memoria ROM , flash o similar. Estas instrucciones fijan la lógica primaria que ejerce el control de los circuitos de alguna clase de artefacto". Algunos de los firmware mas conocidos de para la impresión 3D es Marlin.

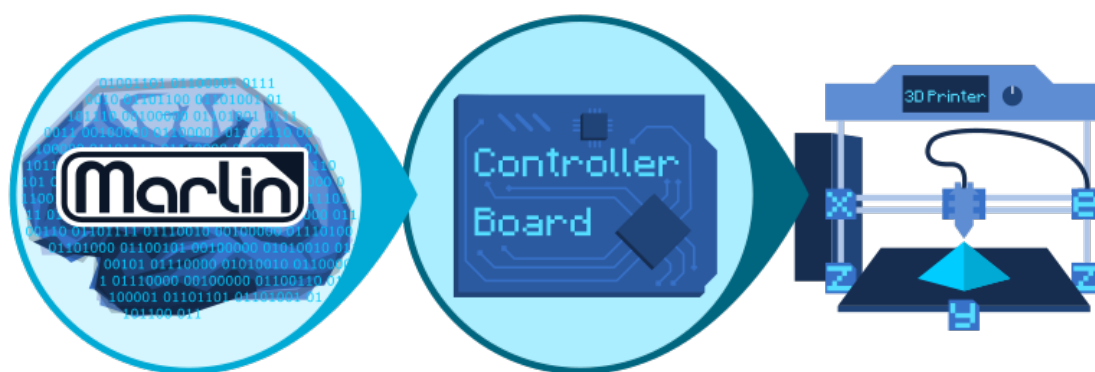


Figura 3.14: Diagrama representativo del funcionamiento de Marlin en una impresora 3D, explicación: este firmware es quemado en la board para que esta haga una correcta interpretación de las ordenes y envíe ordenes a los motores, extrusor, etc, para generar una pieza en específico.

Fuente: Jbrazio

Marlin según Rap (2020) es un firmware para la electrónica de u solo procesador RepRap, el cual es compatible con una cierta cantidad de boards que se pueden conseguir en el mercado

como: RAMPS, RAMBo, Ultimaker,BQ, GT-2560 y algunas otras más que están basadas en Arduino. Este firmware es también compatible con USB por medio del serial RS-232 y tarjetas SD para interpretar los G-codes que proporciona algún slicer como CURA o Simplify3D.

Principales Características de Marlin Jbrazio (2020):

- Código G completo con más de 150 comandos.
- Suite completa de movimientos del código G, que incluye líneas, arcos y curvas de Bézier.
- Sistema de movimiento inteligente con mirata, movimiento basado en interrupciones, aceleración lineal.
- Soporte para cinemática cartesiana, Delta, SCARA y Core/H-Bot.
- Control del calentador PID de bucle cerrado con ajuste automático, protección térmica, corte de seguridad.
- Soporte para hasta 5 extrusoras más una imprenta calentada.
- Interfaz de usuario del controlador LCD con más de 30 traducciones de idiomas.
- Impresión basada en host y tarjeta SD con inicio automático.
- Compensación de nivelación de cama — con o sin sonda de cama.
- Avance lineal para extrusión basada en presión.
- Soporte para extrusión volumétrica.
- Soporte para mezclas y multi-extrusoras (Cyclops, Quimera, Diamond).
- Soporte para sensores de ancho/des correr el filamento.
- Temporizador de trabajo de impresión y contador de impresión.
- OpenSource

Funcionamiento de Marlin Jbrazio (2020). El Firmware Marlin se ejecuta en la placa principal de la impresora 3D, gestionando todas las actividades en tiempo real de la máquina, Coordina los hotends extrusores, motores paso a paso, luces, sensores, pantalla LCD, encoder, botones y todo aquello involucrado en el proceso de impresión 3D. Marlin está basado en un lenguaje de control que es un derivado del código G. Los comandos de código G le dicen a la máquina que haga cosas simples tales como "establecer calentador de 1 a 180°" o "mover XY a una velocidad F hasta una distancia indicada", para poder imprimir con Marlin el modelo 3D debe ser convertido a código G mediante un Slicer. Como Marlin recibe comandos de movimiento, este lo que hace es agregarlos a una cola de movimiento para ser ejecutados de manera ordenada y secuencial. La "interrupción paso a paso" se encarga de procesar la cola de ordenes, convirtiendo los movimientos lineales en pulsos electrónicos a tiempos exactos en los motores paso a paso. Incluso a velocidades modestas Marlin necesita generar miles de puso en los motores paso a paso cada segundo.

Pero ¿Cual es el proceso para llegar a imprimir un producto personalizado? pues bueno, a continuación lo explicaré brevemente.

- Modelado, slicing e impresión

Jbrazio (2020) Aunque Marlin solo imprime código G, la mayoría de los slicers solo cortan archivos STL, por lo que es necesario diseñar nuestras propias piezas en algún software CAD gratuito o de paga como FreeCAD, OpenSCAD, Tinkercad, Autodesk Fusion 360, etc. Una vez tenemos listo nuestra pieza tenemos que guardar el archivo como .STL para poder ingresarlo a algún slicer y poder hacer las segmentaciones en capas generando así el código G que será ingresado a la impresora 3D para poder imprimir la pieza diseñada.

Paso a paso:

1. Modelado 3D de la pieza deseada.
2. Guardar la pieza en un documento .STL.
3. Ingresar el archivo .STL en un slicer de su preferencia.
4. Configurar los parámetros de impresión de la impresora.
5. Segmentar para generar el código G.
6. Ingresamos la memoria SD o USB a la impresora o comunicamos la impresora con el slicer por medio de USB.
7. inicializamos el proceso de impresión.

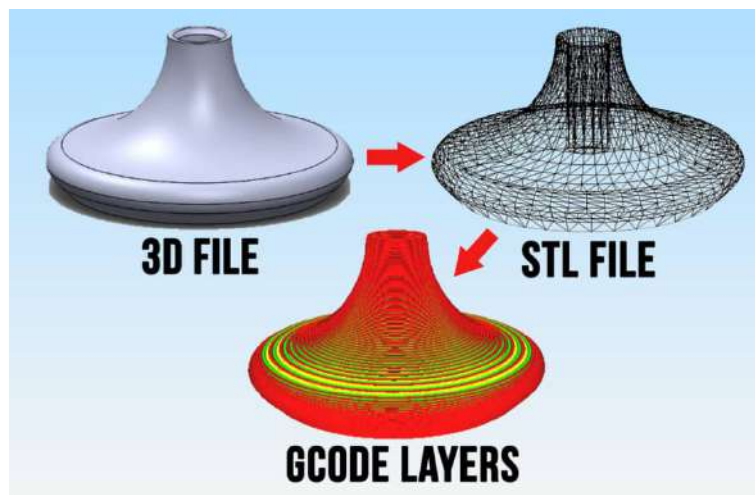


Figura 3.15: Paso a paso para generar un código-G a partir de un modelo 3D

Fuente: Simmons y Simmons

3.1.6 Slicers:

Simmons y Simmons (2019) Las impresoras 3D son máquinas sorprendentemente sencillas cuando las conoces a fondo. Ellas crean objetos de la nada gradualmente capa a capa apilando una encima de otra, y este proceso toma poco o mucho tiempo dependiendo de la pieza a imprimir, su volumen, su geometría y las configuraciones que tenemos en nuestra máquina, aunque, parezcan complicadas a simple vista, ellas operan siguiendo un orden secuencial de instrucciones muy simples. Los Slicers nos permiten personalizar las configuraciones y así cambiar de que forma queremos impresa nuestra pieza, a altas velocidades, con alturas de capas mas pequeñas, con o sin soporte, etc.

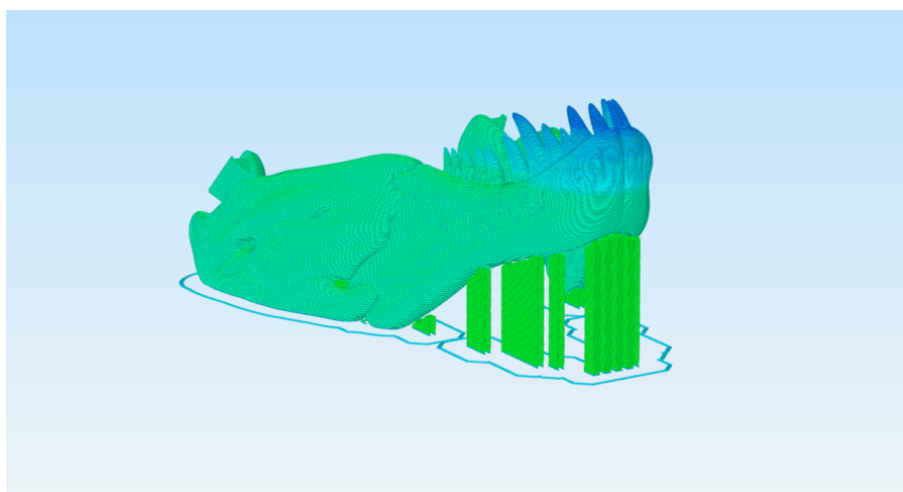


Figura 3.16: Ejemplo de slicing de una pieza 3D con soportes.

Fuente: Simmons y Simmons

Los programas que se encargan de realizar el "Slicing" son programas que cortan un objeto 3D en muchas laminas en las que se ve la el plano de la sección transversal del corte en 2D. Simmons y Simmons (2019) Si se llegase a detectar capas colgantes y se habilita la opción de material de soporte, generará una estructura de soporte debajo de estas áreas. Una vez obtenidas cada una de las secciones transversales del proceso Slicing, se calcula una trayectoria para la boquilla en función de los parámetros de impresión, Las rutinas de inicio y enfriamiento se agregan al principio y al final de la impresión.

3.1.7 Intercambio de Herramienta:

Cuando hablamos de manufactura híbrida casi que damos por sentado el uso de algún sistema o dispositivo que se encargue del intercambio de herramientas; Debido a que en este prototipo aplicaremos métodos de manufacturación aditiva y sustractiva, los cuales son casi que conceptos completamente contrarios ya que uno añade material y el otro lo retira es imperativo el uso de un intercambiador de herramientas para poder manejar ambos proceso con el mismo efector final.

Estos mecanismos encargados de cambiar de herramientas en las máquinas son muy importantes y su valor agregado ayuda en gran medida al desempeño de la máquina y a la eficiencia

de trabajo, logrando disminuir el tiempo de operación e incrementando la precisión en las medidas de los productos fabricados. Ruetshle y Haninger (1994) nos muestra un dispositivo Gripper con dos garras móviles para sujetar herramientas y hacer el intercambio de estas, su funcionamiento es bastante simple, este Gripper es montado en el efector final de cualquier máquina y desplazado a lo largo del eje se configura un offset en la programación del control numérico que utiliza para funcionar, el Gripper está sobre un pivote en una posición extendida para insertar y retirar las herramientas y en una posición cerrada para efectuar el agarre de las herramientas, y de las que estén dispuestas, entre el elemento de actuación y en una posición abierta para soltar la herramienta, cada una de las dos mordazas tiene una abertura enlace entre el efector final y cada herramienta, entre cada una de los dos enlaces y las mordazas del Gripper hay una superficie oblicua que interactúa cada una con su superficie opuesta y esto permite una buena sujeción de la herramienta.

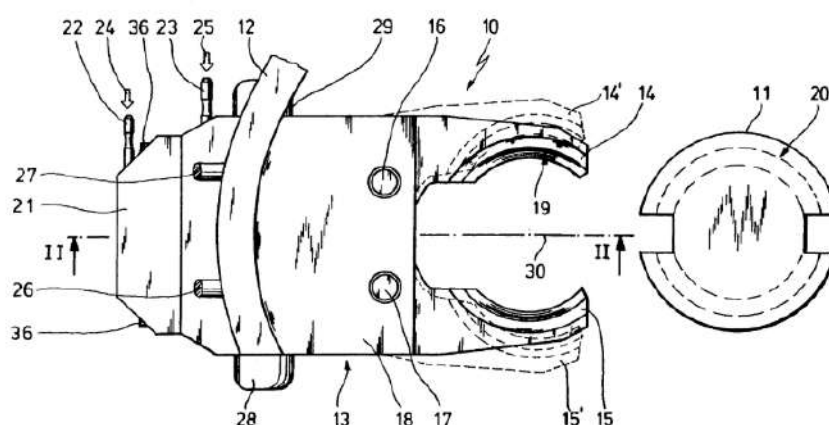


Figura 3.17: Vista superior del Gripper para el intercambio de herramientas en disposición cerrada.
Fuente: Ruetshle y Haninger

Oeckl y cols. (1970) nos menciona que el cabezal de una máquina con herramientas lleva dos husillos que pueden girar alternativamente desde una herramienta en funcionamiento hasta una posición de cambio de herramienta. Las herramientas se almacenan en la periferia de un almacén de herramientas circular. Cada herramienta se quita mecánicamente de un husillo en la posición de cambio de herramienta y se coloca en el cargador, y viceversa. Esta invención se refiere a un aparato para cambiar las herramientas por una máquina herramienta. En particular, esta invención se refiere a una máquina herramienta que tiene dos husillos cuyos ejes longitudinales forman un ángulo entre sí y que están montados de manera que se puedan girar o girar alternativamente desde una posición de trabajo a una posición de cambio de herramienta.

Oeckl y cols. (1970) También menciona que el objeto de esta invención es producir un aparato que evite las desventajas que habían en la máquina en ese momento y haga posible un cambio rápido de herramienta en un husillo. Así, en esta invención, es posible mover el husillo a la posición de cambio de herramienta adyacente al almacén de almacenamiento de herramientas y allí quitar la herramienta vieja e insertar una nueva herramienta.

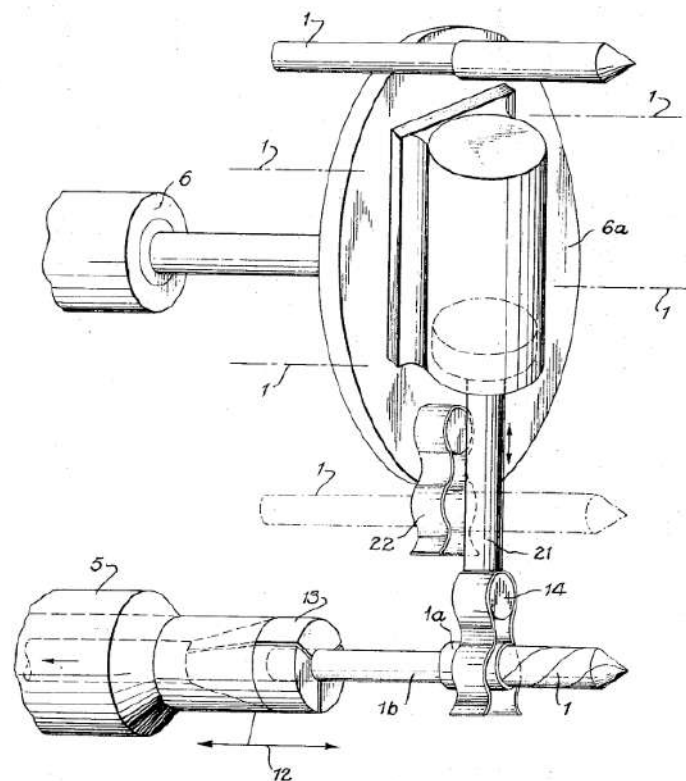


Figura 3.18: Vista en perspectiva ampliada que muestra esquemáticamente la transferencia de una herramienta desde el almacén al husillo en la posición de cambio de herramienta.

Fuente: Oeckl y cols.

3.2 Antecedentes

“Planificación de procesos para tecnologías de fabricación aditiva y sustractiva” Newman y cols. (2015). En los años recientes, las técnicas que mezclan diferentes procesos manufactureros, como las tecnologías aditivas y sustractivas, están ganando una atención significativa. Esto es debido a su capacidad de complementar un con el otro, haciendo así que las ventajas de uno suplan las desventajas del otro. No obstante, existen métodos de planificación de procesos limitados disponibles para sintetizar eficazmente tecnologías de fabricación aditiva y sustractiva. En este documento los autores proponen un marco denominado iAtractive para así permitir que las ventajas de las tecnologías aditivas y sustractivas se combinen con el proceso de inspección. Basado en iAtract, un sistema de planificación de procesos, desarrollan Re-Plan, que muestra las capacidades de la fabricación de procesos combinados a través de varios estudios de casos.

El marco iAtractive consiste en combinar procesos aditivos (fabricación de filamentos fundidos, FFF), sustractivos (es decir, mecanizado CNC) e inspección en una sola plataforma. Este enfoque tiene como objetivo reutilizar y re-acondicionar piezas existentes o incluso piezas recicladas, y reutilizarlas en piezas nuevas con nuevas características.

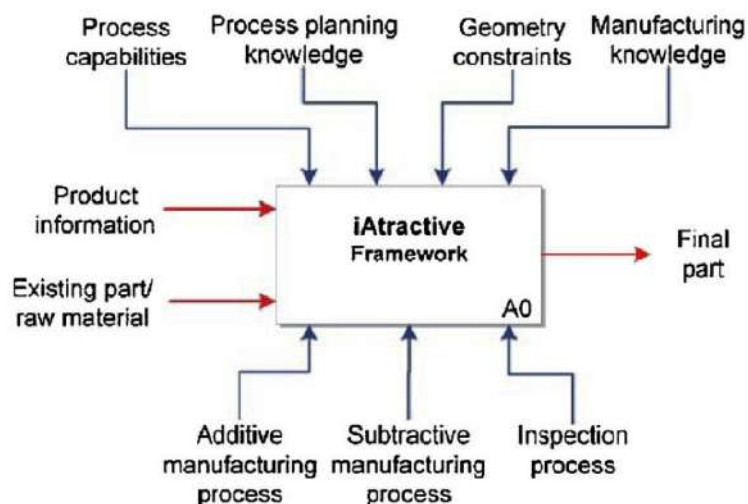


Figura 3.19: Representación IDEF0 de la estructura iAtractive.

Fuente: Newman y cols.

La información de las dimensiones de una pieza existente se puede obtener utilizando una técnica de inspección, como una estrategia de palpado con gatillo táctil. Esto permite que se siga fabricando mediante FFF y / o mecanizado CNC proporcionando nuevas funcionalidades. La visión del proceso iAtractive se muestra en la Fig 3.20.

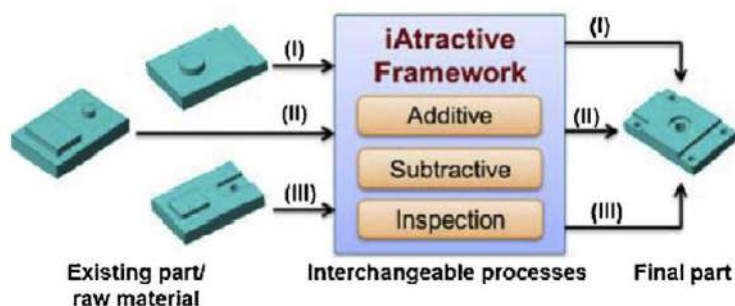


Figura 3.20: Vista esquemática del marco iAtractive.

Fuente: Newman y cols.

El sistema de planificación del proceso Re-Plan se ha desarrollado sobre la base del marco iAtractivo para permitir que el material de la pieza existente sea re-manufacturado en una nueva pieza, como se muestra en la Fig. 3.21. El material de la pieza existente es en sí mismo una pieza reciclada, usado, gastado o desechada. En términos generales, una pieza existente puede tener cualquier forma y tamaño. El material de la pieza ya fabricada se trata como materia prima para ser re-fabricado utilizando procesos aditivos y sustractivos junto con la inspección para monitorear y medir continuamente las dimensiones de las características de

la pieza, mediante las cuales se transforman en piezas finales (piezas nuevas).

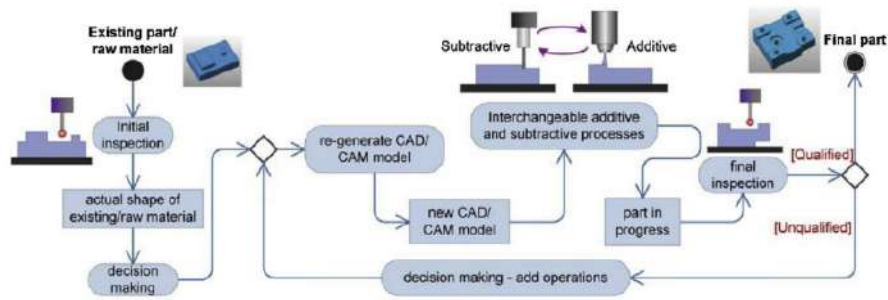


Figura 3.21: Estructura operativa del sistema de planificación de procesos Re-Plan.

Fuente: Newman y cols.

En conclusión queda demostrado que las piezas ya existentes pueden ser re-manufacturadas o convertidas en nuevas piezas para darles un nuevo uso con características y dimensiones nuevas, esto se logra mediante la correcta ejecución de los procesos aditivos y sustractivos. Todo parte de la obtención de la información dimensional de la pieza ya creada por medio de la inspección inicial, luego de esto se agrega o retira material según el proceso generado y así finalmente se obtienen la pieza nueva.

“Implementación de fabricación aditiva híbrida basada en extrusión de materia prima y fresado” Parenti y cols. (2019) de Paolo Parenti, Salvatore Cataldo, Alberto Grigis, Marco Covelli, Massimiliano Annoni. En este documento se muestra de una nueva forma la cadena de proceso que involucra la EFF de cerámica y metales, Fig. 3.22, esta comienza con la producción de materia prima o, alternativamente, con material comercial MIM / CIM. La materia prima es luego procesada por la máquina de extrusión que deposita las primeras capas de piezas en la mesa de trabajo.

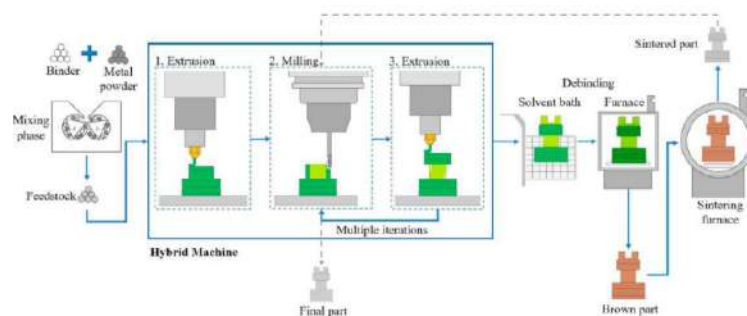


Figura 3.22: Esquema de fabricación híbrida que incluye EEF y fresado

Fuente: Parenti y cols.

Después de realizar algunas capas, tan pronto como se genera suficiente consistencia en la pieza, el fresado puede entrar en el proceso para dar más forma a la geometría y las superficies un mejor acabado. La presencia en la misma máquina de dos cabezales para fabricación aditiva y sustractiva permite una fácil implementación y alternancia entre deposición y fresado que

se pueden realizar en base a las características requeridas y especificaciones geométricas de la pieza a realizar.

Este proceso permite la obtención de cavidades internas con especificación de tolerancia ajustada o más en general, el aumento de la productividad para un objetivo de precisión definido. Paralelo a esto, el fresado puede ser aplicado en varios momentos de la cadena del proceso para así lograr una mejora en la precisión de la pieza a realizar y producto; mejorar la compensación de la contracción y lograr obtener piezas más exactas en sus dimensiones. El fresado también se puede realizar después de las operaciones de sintetización para obtener mejores acabados en las piezas, pero en este caso se necesitan nuevas colocaciones de trabajo. Se desarrolló internamente un prototipo de máquina utilizando una extrusora de dos pistones que se diseñó específicamente, a partir de un producto comercial de moldeo por inyección, Fig. 3.23.

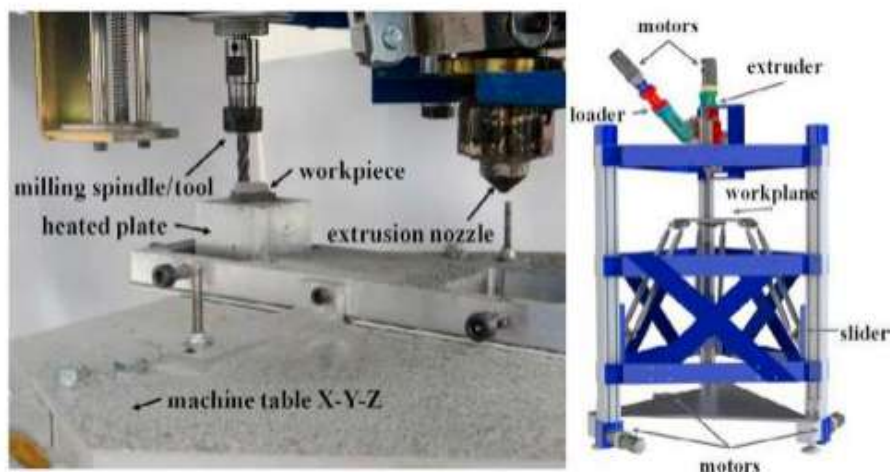


Figura 3.23: Prototipo de máquina desarrollado en casa.

Fuente: Parenti y cols.

“Es posible alimentar el cargador a través de una tolva, con gránulos de materia prima que son precalentados por las resistencias en la cámara de plastificación. Una vez que el material de entrada se calienta en el plastificante durante unos minutos, es posible activar el pistón que empuja el material a través de las esferas de plastificación (carrera máxima del pistón 77 mm) hacia la cámara de extrusión. El volumen de una carga completa de la extrusora es de 9000 mm³ (14 mm de diámetro) y es empujada por el pistón de extrusión hacia la boquilla. Debido a su voluminosidad, el cabezal de extrusión está rígidamente conectado al suelo mientras que la placa de trabajo es manejada por un sistema de manipulación específico”.Parenti y cols. (2019)

“De acuerdo con la cadena de proceso, las piezas estarán sobredimensionadas debido a las operaciones de remoción de viruta y la contracción que se produce durante el desglose y la sinterización. Una vez que el dibujo CAD tiene la escala adecuada, se genera un archivo STL. Utilizado durante más de 30 años con las impresoras Fused Deposition Modeling, el formato de archivo STL se ha convertido en el formato de transmisión de datos estándar de

la industria de Rapid Prototyping. Un punto crítico es la conversión de STL, obtenido por CAD, a un archivo de código ISO G, realizado por un software llamado slicer”.Parenti y cols. (2019)

Los resultados son satisfactorios la deposición de materia prima resulta ser la mejor opción para la generación de una base en bruto que posterior mente será procesada por medio del fresado, el proceso de fresado resultó ser una manera viable de obtención de buenos acabados de superficies y precisión en las piezas fabricadas.

“Un novedoso proceso de fabricación híbrida aditivo-sustractiva de 6 ejes: diseño y estudios de casos” Li y cols. (2018) de Lin Li , Azadeh Haghighi, Yiran Yang. En este documento se muestra un novedoso proceso de fabricación híbrida el consta de consta principalmente de cuatro componentes: un brazo robótico industrial de 6-DOF, dos cabezales intercambiables para procesos AM y SM (para cada uno, este proceso no es automático), y una plataforma de fabricación integrada equipada con un sistema de sujeción de pieza y adhesión para los procesos SM y AM respectivamente. El brazo robótico industrial adoptado en el proceso HASM pesa 25 kg y tiene una carga útil de 3 kg con un alcance de 580 mm. Los cabezales intercambiables, actualmente desarrollados para FDM y procesos de fresado, son atornillados a un dispositivo de diseño propio que se conecta al punto final del brazo del robot industrial. También se imprime un accesorio único de diseño propio utilizando la tecnología PolyJet AM para fijar el motor paso a paso y la extrusora al accesorio del punto final del robot. Se adopta una conexión directa de hotend y extrusora para el cabezal AM para una guía más precisa del filamento de plástico en la extrusora.

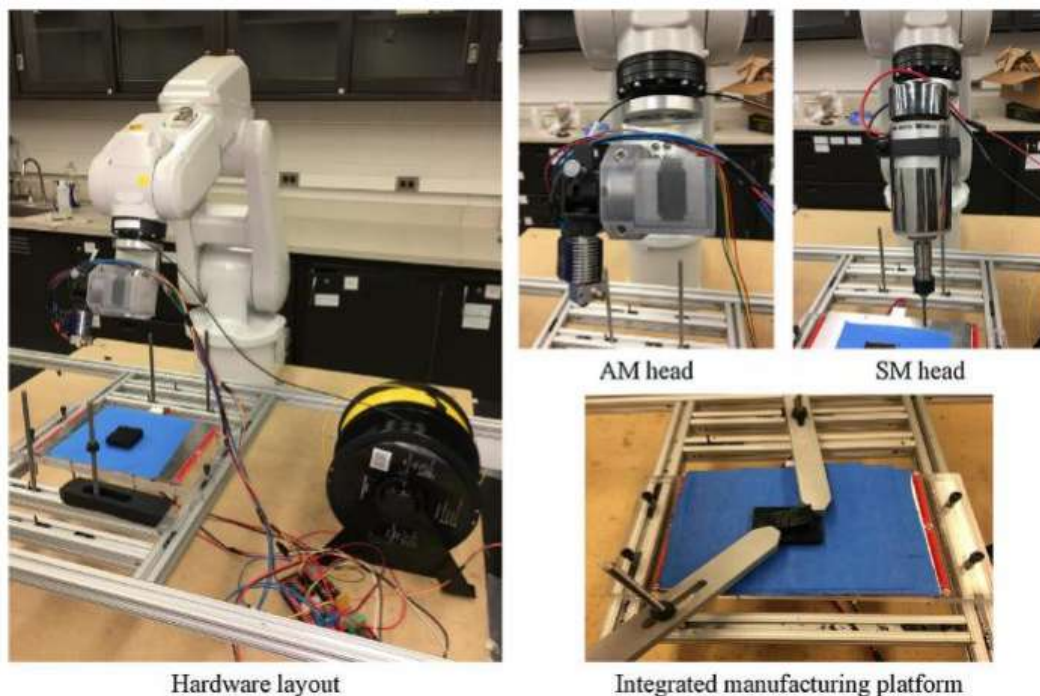


Figura 3.24: Diseño de hardware del proceso HASM Aditivo.

Fuente: Li y cols.

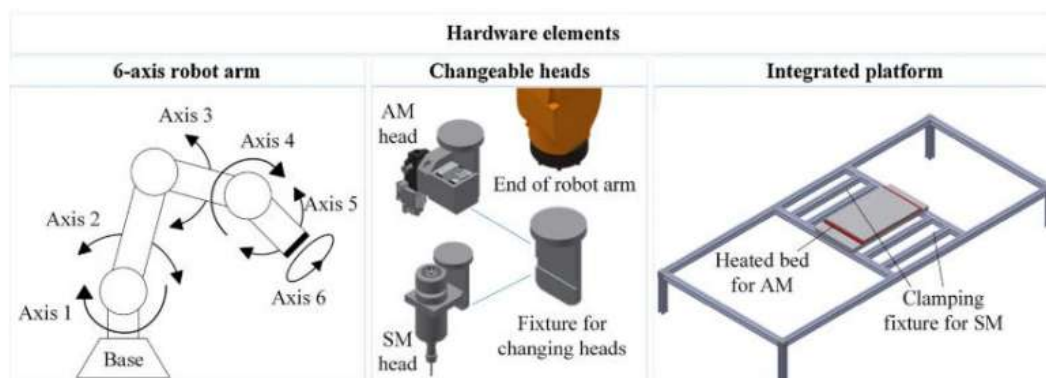


Figura 3.25: Diseño de hardware y configuración del proceso HASM.

Fuente: Li y cols.

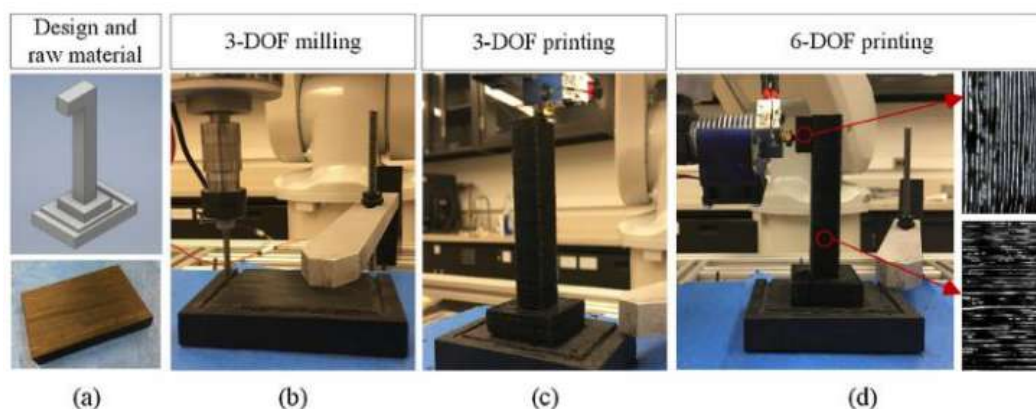


Figura 3.26: Fabricación híbrida mediante procesamiento de multiplanos.

Fuente: Li y cols.

La calidad de la superficie (Ej., Rugosidad y planitud de la superficie) es uno de las principales características de calidad que se ven afectadas por la adopción del proceso 6-DOF HASM. La mejora de la calidad de la superficie es un resultado directo de cualquier proceso de fabricación híbrido aditivo-sustractivo. La capacidad 6-DOF del proceso HASM puede contribuir aún más a la mejora de la calidad de la superficie. Para evaluar estas capacidades, en esta sección se realizan dos estudios de casos diferentes.

- Mejora en la calidad superficial como resultado del proceso HASM.
- Mejora en la calidad de superficie como resultado de la capacidad de 6-DOF.

Una de las principales capacidades del proceso HASM es el procesamiento de planos múltiples (es decir, impresión / maquinado) utilizando el cabezal SM o AM. Este procesamiento de varios planos se logra cambiando el plano de impresión / maquinado utilizando la configuración 6-DOF. Además, debido a éstas capacidades híbridas del proceso, se puede fabricar una

pieza con ambas características tanto aditivas como sustractivas sin reubicación o cambio de configuración.

En éste documento es propuesto y desarrollado un novedoso sistema aditivo-sustractivo de manufactura de 6-DOF, los elementos que constituyen este dispositivo fueron explicados en el documento, con dos cabezales por cada proceso adición y sustracción de material y una plataforma de manufactura funcional para cada uno de los procesos desarrollados. La propuesta de 6-DOF HASM es capaz de realizar movimientos por trayectorias no lineales por medio del ajuste de la dirección del eje de la herramienta.

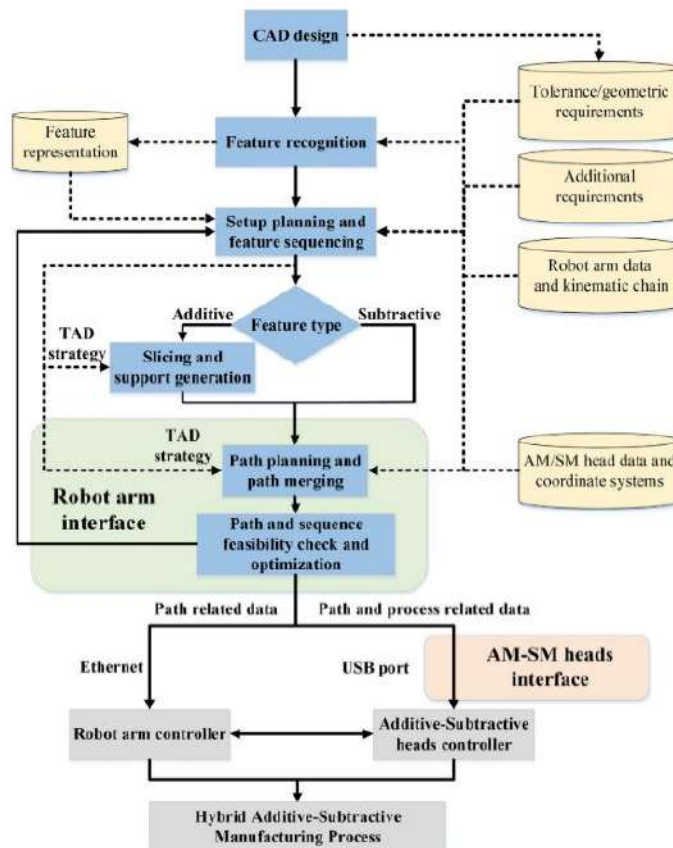


Figura 3.27: Vista esquemática del software y flujo de control del proceso HASM.

Fuente: Li y cols.

En éste documento es propuesto y desarrollado un novedoso sistema aditivo-sustractivo de manufactura de 6-DOF, los elementos que constituyen este dispositivo fueron explicados en el documento, con dos cabezales por cada proceso adición y sustracción de material y una plataforma de manufactura funcional para cada uno de los procesos desarrollados. La propuesta de 6-DOF HASM es capaz de realizar movimientos por trayectorias no lineales por medio del ajuste de la dirección del eje de la herramienta.

4 Metodología

4.1 Diagrama Metodológico

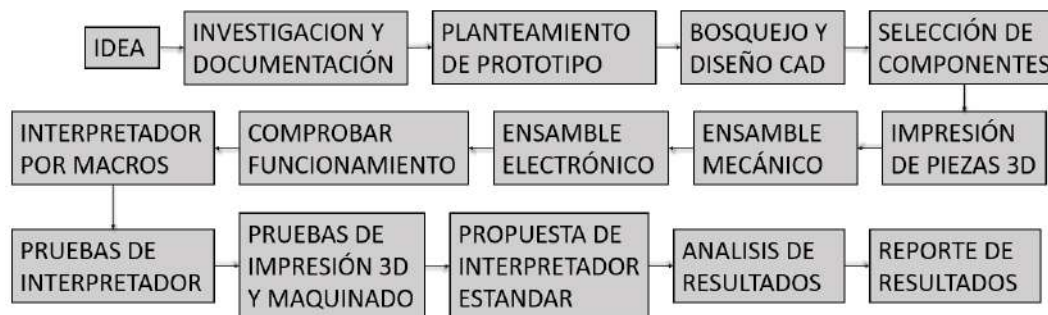


Figura 4.1: Diagrama de metodología secuencial.

Fuente: Autor

1. Idea: Primeramente se tiene una idea vaga de desarrollar una máquina capaz de realizar acciones tanto de manufactura aditiva como de manufactura sustractiva, y con el fin de construir una máquina con estas cualidades nace la propuesta de trabajo de grado donde también como investigación se busca proponer un interpretador estándar para manufactura híbrida.
2. Investigación y Documentación: Fase de investigación y documentación donde se busca información relacionada y que sirva de ayuda a razón de guía de como abarcar el trabajo propuesto, artículos y libros de las bases de datos de la universidad, sitios web, vídeos, etc; sirven como inspiración y como apoyo visual para la creación del prototipo a realizar y también ampliar conocimientos concernientes a la temática a trabajar.
3. Planteamiento del Prototipo: Dentro del proceso creativo de la máquina se debe comprender que acciones claves va a realizar la máquina y es por ello que se debe tener en cuenta una visión -si bien no clara- general de la forma que debe tener par cumplir su cometido y "garantizar" previo a su fabricación que funcionará correctamente, esto ya que la máquina deber realizar acciones tales como:
 - Soportar su propio peso.
 - Desplazamiento de ejes de traslación.
 - Intercambio de herramienta (crucial).
 - Posicionamiento de efector final.

- Imprimir.
 - Cortar.
4. Bosquejo y Diseño CAD: Una vez se concibe una imagen mental del prototipo a realizar comienza el proceso de diseño empezando con un bosquejo ligero del prototipo, seguido de la creación de las piezas que constituirán la máquina, también el ensamblaje total de la máquina es necesario para tener una vista previa y no tener contratiempos en la fabricación de la máquina, evitar lo mas posible el rediseño y reimpresión de piezas, de esa forma poder aprovechar todo el tiempo posible.
 5. Selección de Componentes: En la selección de componentes se debió tener en cuenta las tiendas disponibles y tiempos de entrega a causa de la emergencia sanitaria nacional, los componentes seleccionados cumplen un papel importante tanto en la construcción mecánica como en la parte electrónica para poder llevar a cabo el prototipo ya que estos determinaran las verdaderas capacidades de la máquina.
 6. Impresión de Piezas 3D: Tiempo para imprimir las piezas previamente diseñadas y tenerlas disponibles para el ensamblaje mecánico, algunas de esta piezas fueron impresas en *ABS* mientras que otras se imprimieron en *PLA*
 7. Ensamble Mecánico: Teniendo como punto de partida el diseño CAD se empieza a ensamblar el prototipo, con los componentes mecánicos comprados con antelación y las piezas diseñadas ya impresas.
 8. Ensamble Electrónico: Una vez tenemos el ensamble mecánico listo podemos ubicar los componentes electrónicos donde corresponden, motores paso a paso, finales de carrera, placa de control, drivers, entre otros, también el cableado de los motores y soldar las extensiones de cables hacen parte de esta fase de desarrollo.
 9. Comprobar Funcionamiento: Fase donde se harán pruebas para comprobar que tanto en el ensamblaje mecánico y electrónico fueron realizados correctamente, además se calibrará y programará la máquina editando un firmware libre.
 10. Interpretador por Macros: En esta fase se realizaran pruebas con el prototipo mediante la creación de código G con el fin de manipular el comportamiento de la máquina y conseguir realizar acciones puntuales como el intercambio de herramienta.
 11. Pruebas de Interpretador: Fase destinada a la comprobación del interpretador por macros de códigos G realizando pruebas de funcionamiento en acciones como que tome una herramienta u otra.
 12. Pruebas de Impresión 3D y Maquinado: En esta fase se realizaran pruebas tanto de impresión 3D como de maquinado CNC realizando primera.
 13. Propuesta de Interpretador Estándar: La propuesta de interpretador estándar será una proposición teórica de como debería ser el protocolo según una serie de pasos lógicos a seguir para implementarlo en escenarios de manufactura híbrida.
-

14. Análisis de Resultados: Fase para evaluar los resultados obtenidos en las etapas de pruebas y sacar conclusiones del desempeño de la máquina.
 15. Reporte de Resultados: Documentación en libro de trabajo final de grado sobre los resultados y conclusiones obtenidas en la etapa de pruebas.
-

5 Desarrollo

5.1 Componentes

Para esta sección mencionaremos los componentes electrónicos que se utilizaron para construir el prototipo de manufactura híbrida, tendremos en cuenta sus características, precio, facilidad de adquisición y si es el caso de una pieza impresa, tiempo de impresión, peso y algunos parámetros de su fabricación.

5.1.1 Motor Paso a Paso Nema17

Isaac (2020), El motor paso a paso Nema 17 es un motor de tipo bipolar, este tiene un ángulo de paso de 1.8° lo cual significa que cada vuelta equivalen a 200 pasos. Cada bobinado de los que tiene en su interior soporta 1.2A y 4V de tensión, por lo que es capaz de desarrollar una fuerza considerable 3.2kg/cm.

Isaac (2020) Además, este motor es lo suficientemente robusto como para ser utilizado en aplicaciones como las impresoras 3D caseras y otros robots que necesitan una consistencia considerable. Las impresoras caseras y la gran mayoría de las impresoras que son producidas en masa hacen uso de estos motores y también las cortadoras láser, máquinas CNC, máquinas pick and place, etc.



Figura 5.1: Motor Nema17 ref:17HS8401

Fuente: Isaac

Sus características técnicas son:

- Peso 350g
- Tamaño 42.3x48mm sin eje
- Diámetro del eje 5mm
- Longitud del eje 25mm
- 200 pasos por vuelta ($1,8^\circ/\text{paso}$)
- Corriente 1.2A por bobina
- Tensión de alimentación 4V
- Resistencia 3.3Ohm por bobina
- Torque motor de 3.2kg/cm
- Inductancia 2.8mH por bobina

5.1.2 Motor Paso a Paso Nema 23

Este motor paso a paso tiene muchas cualidades similares a las del Nema 17 como por ejemplo los pasos por revolución que siguen siendo los mismos 200 lo que significa que cada paso equivalen a 1.8° y las aplicaciones en las que son utilizados son las mismas también. Además de que también es bipolar y su diferencias las significativas son el torque con 19kg/cm y sus dimensiones con 58,4x58,5mm.



Figura 5.2: Motor Nema23

Fuente: Isaac

NEMA 23 Stepper Motor (2019) Sus características técnicas son:

- Peso 450g
- Tamaño 58,4x58,5mm sin eje
- Diámetro del eje 6mm
- Longitud del eje 25mm
- 200 pasos por vuelta (1,8°/paso)
- Corriente 2.8A por bobina
- Tensión de alimentación 3.2V
- Resistencia 4.2Ohm por bobina
- Torque motor de 19kg/cm
- Inductancia 3.6mH por bobina

5.1.3 GT2560 (Placa de Control)

geeetech (2018) GT2560 es una placa compacta que se integra con la poderosa función del Arduino Mega2560+Ultimaker y Arduino Mega2560+ramps 1.4 en cuanto a software y hardware y tiene más características premium: las interfaces optimizadas evitan eficazmente los problemas innecesarios, la compactación bien regulada de los componentes altamente integrados ahorra más espacio y es más fácil de montar en la mayoría de las aplicaciones.

Nota: Se debe tener en cuenta que esta placa no viene con el archivo Bootloader quemado y se debe realizar este proceso mediante la IDE de Arduino, con la opción "Arduino as ISP" y realizando las respectivas conexiones entre los pines MOSI, MISO, RESET, SCK, GND y +5V, entre una tarjeta Arduino ,que hace el papel de quemador, y los pines del puerto SD de la placa GT-2560.

geeetech (2018) Características:

- Micro controlador: ATMEGA2560
 - Dimensiones: 109*78*22
 - Extrusores: 2
 - Termistores: 3
 - Finales de carrera: 6
 - Ventiladores: 4 (1 controlable por PWM)
 - Drivers motores paso a paso: 5
 - Soporte LCD2004 y 12864: Sí
-

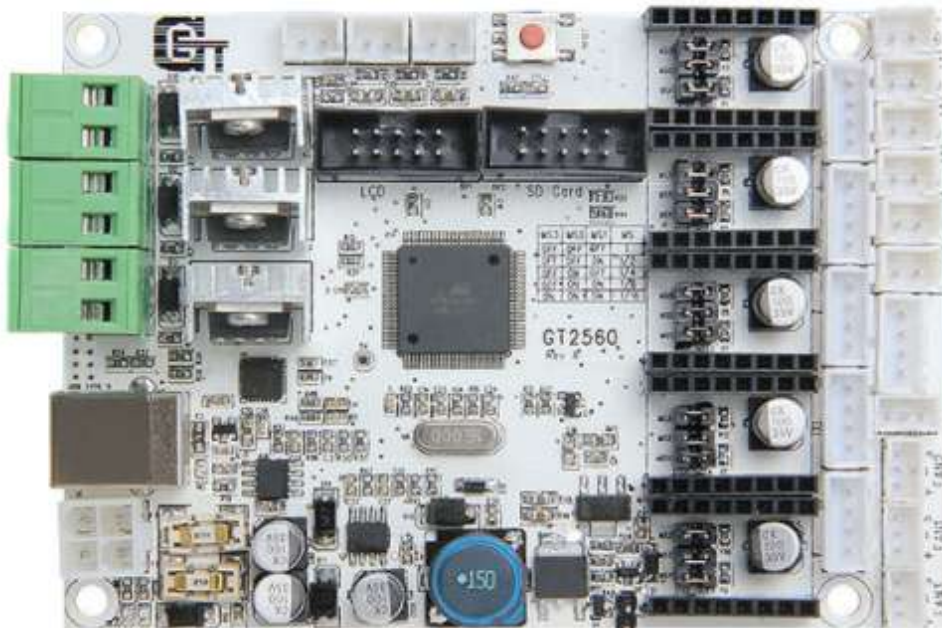


Figura 5.3: Placa Geeetech GT-2560

Fuente: geeetech

5.1.4 Driver DRV8825

DRV8825 (2020) El DRV8825 es un driver para motores paso a paso de TI, mejorado respecto al A4988. que tiene la capacidad de realizar micro-pasos de hasta 1/32 que le da al movimiento de los motores bipolares paso a paso mayor finura en sus movimientos, puede soportar hasta 2.2A por fase con ventilación forzada o 1.5A sin ventilación aumentando así la potencia de estos.

DRV8825 (2020) Características:

- Seis resoluciones de micro pasos diferentes: de paso completo hasta 1/32 micro pasos.
- Dispone de un regulador automático de tensión, que a efectos prácticos redundará en un funcionamiento más silencioso y con menos vibraciones.
- 2.2A por fase.
- Control de corriente ajustable que le permite ajustar la salida de corriente máxima con un potenciómetro.
- Tensión de alimentación 45 V máximo.
- Circuito impreso de 4 capas.
- Protección contra cortocircuito y sobre-temperatura.



Figura 5.4: Driver DRV8825.

Fuente: *DRV8825*

5.1.5 Fuente de Alimentación JR PSU004

DRPC (2016) Es un componente usualmente utilizado en computadores que se encarga de transformar una corriente eléctrica alterna en una corriente eléctrica continua transmitiendo la corriente eléctrica en diversas ramificaciones con diferentes valores de voltaje necesarios en este caso para alimentar la placa GT-2560, motores, drivers, etc.

DRPC (2016) Características:

- Potencia: 780W
 - 110-220 V
 - 50-60 HZ
 - 12V -39A
-



Figura 5.5: Fuente de alimentación PSU004.
Fuente: DRPC

5.2 Construcción del Prototipo

Para la construcción del prototipo de manufactura híbrida se utilizó un software CAD para modelado mecánico en 2D y 3D con el cual se diseñaron las piezas que conforman el prototipo, sub-ensamblajes y ensamblaje general, para poder tener una idea virtual del prototipo y observar que las piezas van a cumplir correctamente su función. Posteriormente se imprimieron en 3D todas las piezas diseñadas y se realizó el ensamble mecánico del prototipo.

5.2.1 Ensamblaje CAD Completo y Diseño de piezas 3D.

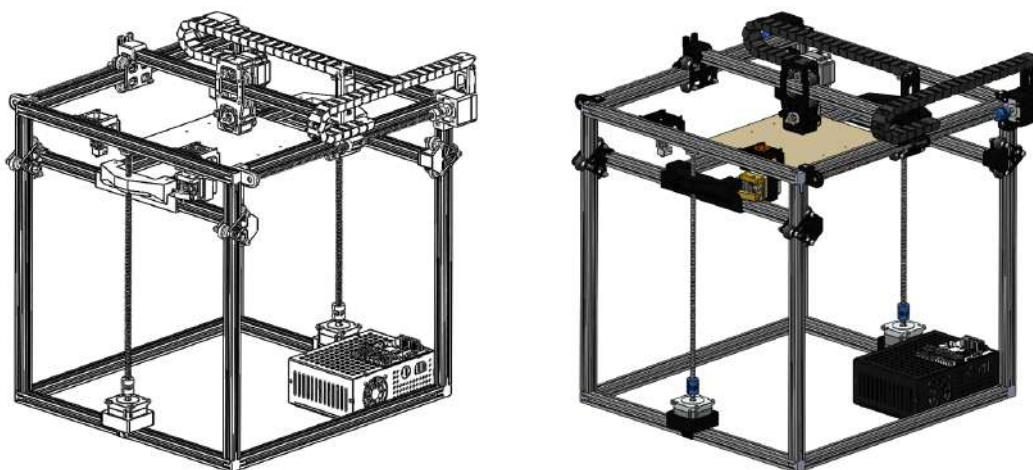


Figura 5.6: Ensamblaje completo en software CAD.
Fuente: Autor

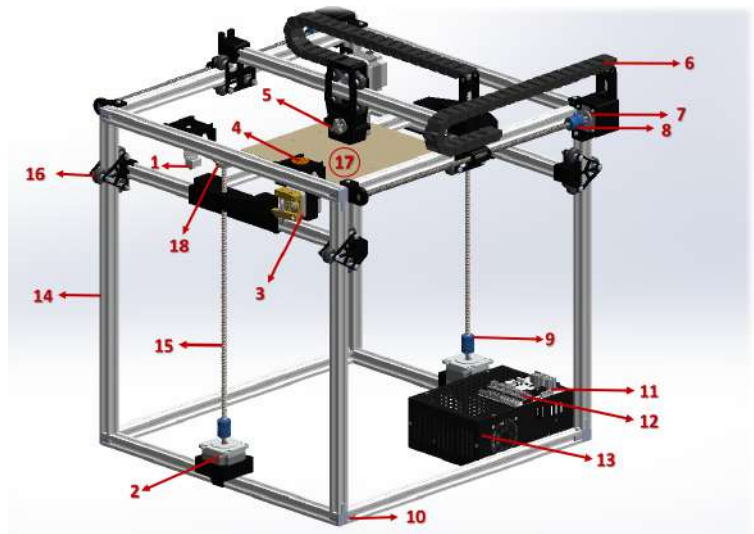


Figura 5.7: Componentes del prototipo.
Fuente: Autor

Índice de Partes			
1	Hotend.	10	Conector 3 vías.
2	Nema 23.	11	Placa GT2560.
3	Extrusor MK8.	12	Driver DRV8825.
4	Motor brushless.	13	Fuente de alimentación.
5	Locker.	14	Perfil aluminio 2020.
6	Cadena portacables.	15	Tornillo 5/16 in
7	Nema 17.	16	Rodamiento V 625zz.
8	Acople 5M-8M.	17	Mesa de trabajo.
9	Acople 6M-8M.	18	Chumacera 8M.

Tabla 5.1: Tabla índice de componentes.

5.2.2 Diseño de piezas 3D

Las mayoría de las piezas diseñadas no cumplen papeles estructurales sino que ayudan al desplazamiento en los 3 ejes cartesianos como los carros deslizantes y su mecanismo de transmisión, algunas otras son solo soportes para los motores Nema paso a paso que se encargaran del movimiento de la máquina y el sistema de intercambio de herramientas con su respectivo conjunto de piezas intercambiables.

Una vez se tuvo claridad del ensamble virtual se procedió a imprimir las piezas exportadas en formato STL, en total se diseñaron unas 27-28 piezas y en la siguiente tabla se especificarán datos de estas.

Parámetros de impresión 3D de Piezas							
Nombre	Nº	Tiempo	Gramos	Ac	R	S	V
Angulo Base	12	01:07:00	4	0.1	40	s.s	80
Apoyo cadena	1	02:19:00	8	0.1	40	s.s	80
Car Des X a	1	09:57:00	34	0.1	40	s.s	100
Car Des X b	1	04:26:00	16	0.1	40	s.s	100
Car Des Y a	2	04:42:00	15	0.1	40	s.s	100
Car Des Y b	2	09:11:00	34	0.1	40	c.s	100
Car Des Z a	4	04:20:00	14	0.1	40	s.s	100
Car Des Z b	4	02:21:00	6	0.1	40	s.s	100
Acople 5M-8M	4	02:13:00	9	0.1	40	s.s	80
Espaciador 6mm	16	00:10:00	1	0.1	40	s.s	80
Espaciador 5mm	8	00:08:00	1	0.1	40	s.s	80
Esq Stepper Motor 1	1	09:25:00	30	0.1	40	c.s	100
Esq Stepper Motor 2	1	09:25:00	30	0.1	40	c.s	100
Fijador Correa 1	1	04:58:00	16	0.1	40	c.s	80
Fijador Correa 2	1	07:48:00	34	0.1	40	c.s	80
Fijador Correa 3	1	03:57:00	15	0.1	40	c.s	80
Fijador Correa 4	1	02:11:00	18	0.1	40	c.s	80
Holder Nema 23	2	06:05:00	54	0.2	20	c.s	100
Holder Z	2	15:45:00	152	0.2	20	c.s	100
Soporte 22 8	2	02:41:00	13	0.1	40	c.s	80
F C X	1	00:08:00	1	0.1	20	s.s	80
F C Y	1	00:14:00	2	0.1	20	s.s	80
F C Z	1	00:41:00	5	0.1	20	s.s	80
Lock	1	00:11:00	1	0.1	100	s.s	80
Tool Brushless	1	04:13:00	30	0.1	20	c.s	100
Tool Hotend	1	03:13:00	22	0.1	20	c.s	100
Sujetador Hotend	1	00:28:00	22	0.1	20	s.s	80
TOTAL	72	193:06:00	989				

Tabla 5.2: Tabla de parámetros de impresión 3D de Piezas. Donde (Ac) es "Altura de capa" [mm], (R) es "Densidad de relleno" [Porcentaje], (S) es "Soporte", (s.s) "Sin Soporte" y (c.s) "Con Soporte", y (V) es "Velocidad" en [mm/s].

5.2.3 Diseño de Intercambiador de Herramienta

El intercambiador de herramienta es parte fundamental del prototipo que lleva a cabo la acción mas importante del proceso. Debido a que no habían empresas locales de maquinado en aluminio todo el sistema fue diseñado en CAD e impreso en 3D utilizando diferentes filamentos, PLA por su facilidad y rapidez para imprimir, y ABS debido a que tiene una mayor rigidez, para imprimir piezas claves como el "Locker" para que este no se dañe por des-laminación debido a los esfuerzos y fuerzas anisotrópicas que debe soportar al realizar el intercambio de herramientas y sujetarlas.

El sistema consiste básicamente en una geometría de 4 puntos que le da mayor firmeza a la sujeción de la herramienta y un "Locker" central que al girar sujeta la pieza diseñada para la herramienta que es el equivalente en negativo de la pieza principal del eje X.

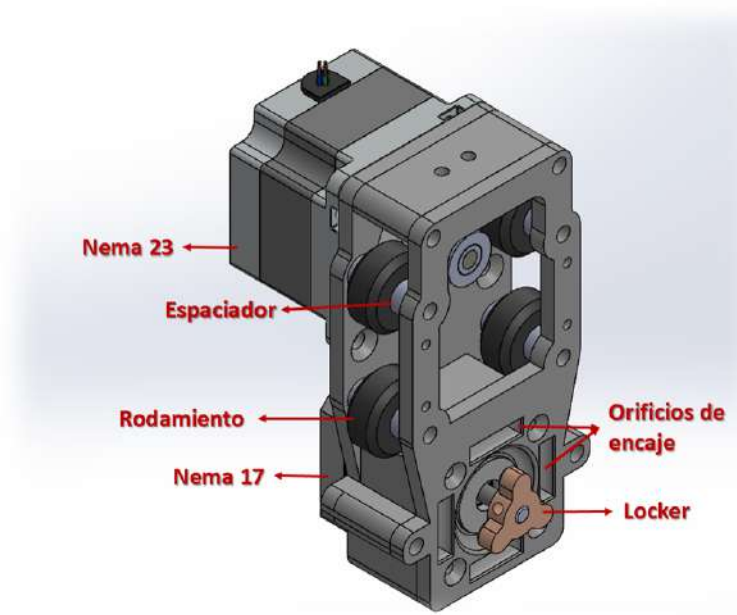


Figura 5.8: Ensamblaje CAD del carro deslizador del eje X que tiene integrado el sistema de intercambio de herramienta.

Fuente: Autor

Las piezas diseñadas para el Hotend y el Brushless comparten una base y se contempla el hecho de que las herramienta deben tener ejes colineales.



Figura 5.9: Ensamblaje real del carro deslizador del eje X que tiene integrado el sistema de intercambio de herramienta.

Fuente: Autor

Las herramientas están dispuestas en una de las aristas del modelo listas para que según lo requiera la acción a realizar la máquina tome una herramienta u otra, las piezas de las herramientas tienen una geometría que permite al "Locker" entrar en ella y que al girar pueda ser sujeta como se enseña en la figura 5.11.

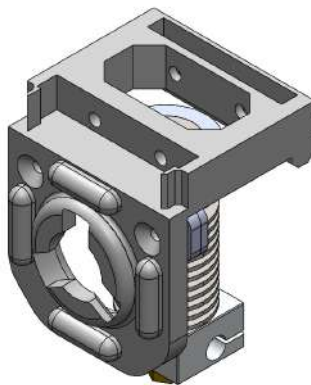


Figura 5.10: Imagen de pieza de herramienta.

Fuente: Autor

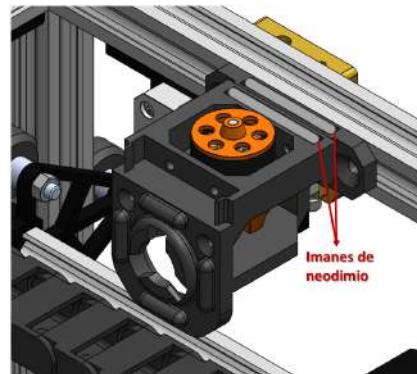
A continuación se muestra una imagen donde se aprecia como encaja la pieza de la herramienta cuando gira el "Locker" en el intercambio de herramienta, el "Locker" está impreso en 3D con filamento de ABS a una densidad alta para que la pieza no sufra fracturas y está fijado al eje del Nema17 con tornillos prisioneros de M4.



Figura 5.11: Imagen de pieza de herramienta.

Fuente: Autor

Para cuando las herramientas quedan en "reposo", es decir cuando no se utiliza la herramienta, las herramientas están sujetas a la máquina gracias a imanes de neodimio que están puestos tanto en la pieza de la herramienta como en la pieza atornillada a la extrusión de aluminio estructural.



(a) Herramienta de maquinado en físico (b) CAD de Herramienta de maquinado.

Figura 5.12: Imágenes de herramienta encargada del maquinado en físico y CAD.

Fuente: Autor

5.2.4 Ensamblaje Mecánico y Electrónico

El ensamblaje mecánico se llevó a cabo al acabar con el diseño general del prototipo, sin embargo algunas piezas tuvieron que ser rediseñadas a la par que el ensamblaje de cuerpo completo real se iba llevando a cabo y también algunas piezas que no se habían tenido en cuenta o mejoras que se iban realizando también iban siendo impresas sobre la marcha.

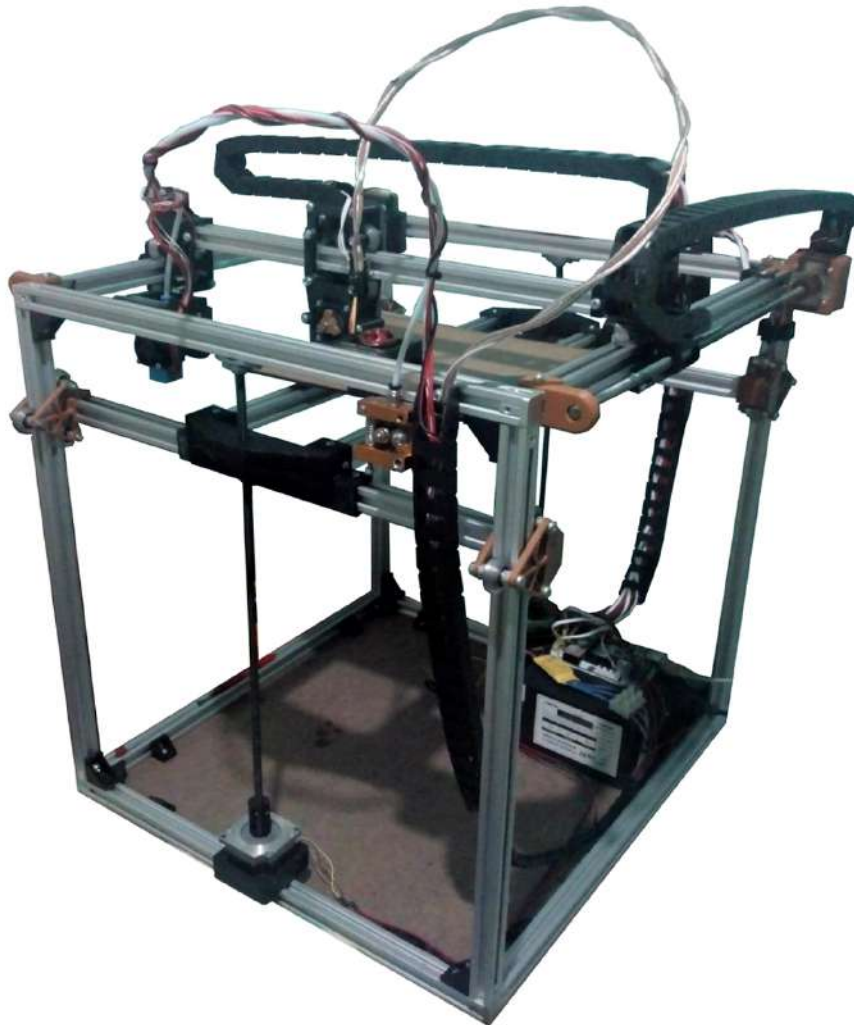


Figura 5.13: Foto de ensamblaje mecánico y electrónico.

Fuente: Autor

Para construir el prototipo se imprimieron todas las piezas diseñadas en una impresora 3D propia y se ensamblaron las diferentes partes que constituyen el prototipo. En la figura 5.14 se muestran imágenes de algunas de las piezas impresas siendo montadas en el ensamblaje completo.

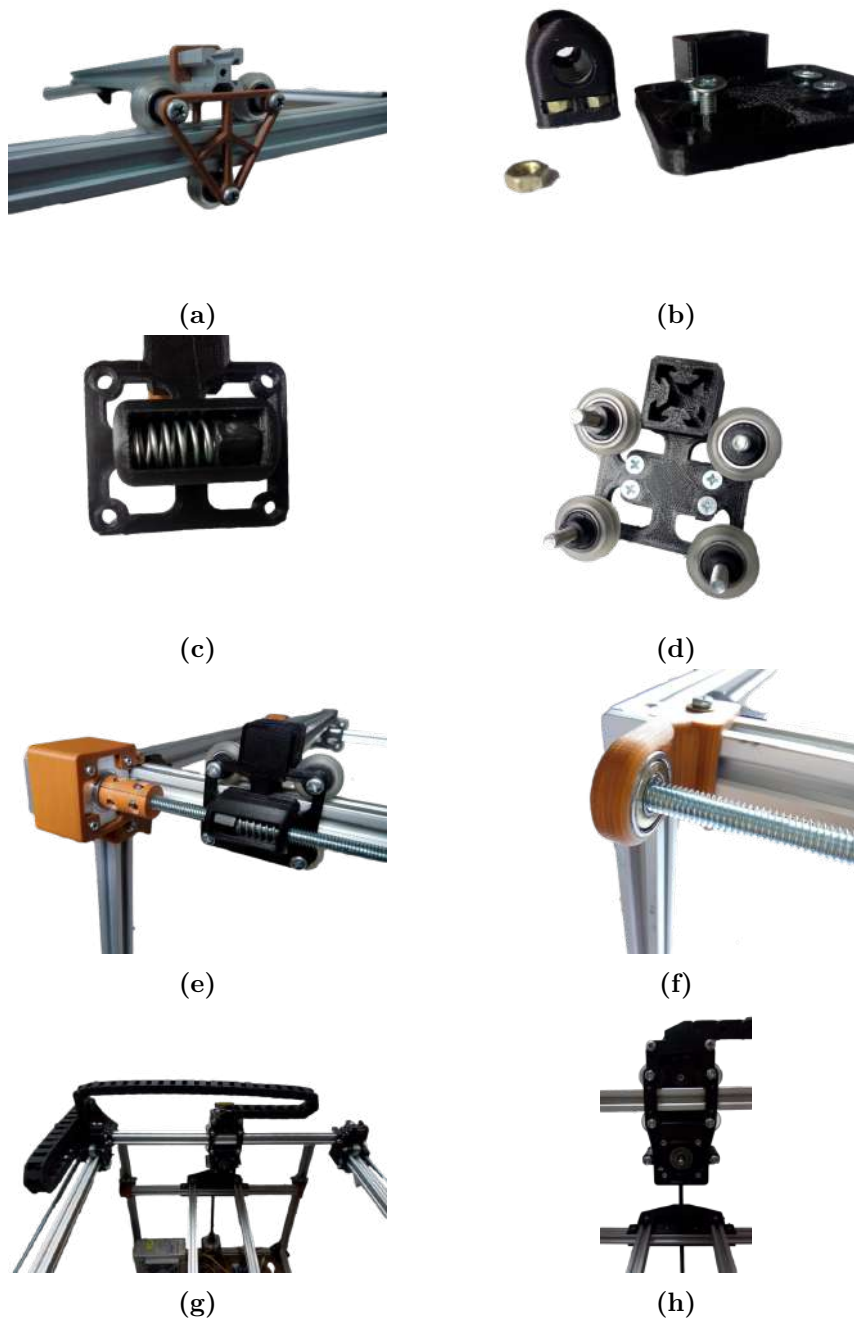


Figura 5.14: a.Prueba de carro deslizante Z, b.Carro deslizante Y, c.Sistema de tuerca antibacklash, d.Carro deslizante Y con rodamientos, e.Soporte Nema17 con acople 5M-8M, f.Soporte con rodamiento para varilla roscada 5/16in, g.Instalación de cadena portacables , h.Montaje del carro X porta-herramienta.

Fuente: Autor

5.2.4.1 Preparación de tarjeta GT-2560

Para poder cargar códigos a la tarjeta primero se debe quemar bootloader a la tarjeta, para luego poder cargar el Firmware Marlin de RepRap y así poder controlar la máquina ingresando código G por medio del serial, de esta forma también se programaran las macros de código G para el interpretador. En la figura 5.1 (a) Para quemar el bootloader se precisa de una tarjeta arduino uno, usando ésta como quemador para el chip Atmel Atmega-2560 que se encuentra en la CTC GT-2560. En la imagen 5.15 (b) Una vez dentro del código Ardui-

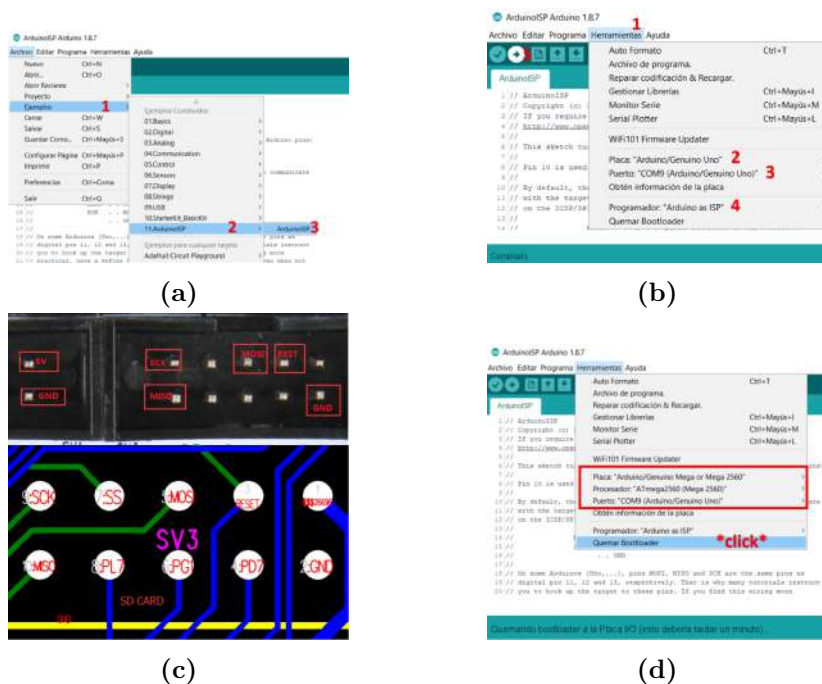


Figura 5.15: Paso a paso para quemar bootloader.

Fuente: Autor

noISP configuraremos los parámetros Placa, Puerto y Programador, y procedemos a cargar el código a la placa Arduino Uno. Se deben realizar las conexiones entre la placa arduino uno y gt-2560, D10-REST, D11-MOSI, D12-MISO, D13-SCK, 5v-5v y gnd-gnd, respectivamente, basandose en la figura 5.15 (c). Una vez realizadas las conexiones entre las dos tarjetas debemos configurar nuevamente la Placa y el Puerto como se muestra en la figura 5.15 (d).

5.2.4.2 Diagrama de Conexiones

Para el diagrama de conexiones se tuvieron en cuenta las indicaciones de la página web de la placa GT-2560 geetech (2018) en donde se puede encontrar tanto información técnica de la placa, como diagramas de conexiones. El diagrama mostrado en la siguiente figura es una representación de las conexiones realizadas en el prototipo y se especifica cuales son los componentes conectados a la placa de control, como la fuente de alimentación, hotend, termistor, motores pasos a paso nema 23 y nema 17, finales de carrera, etc.

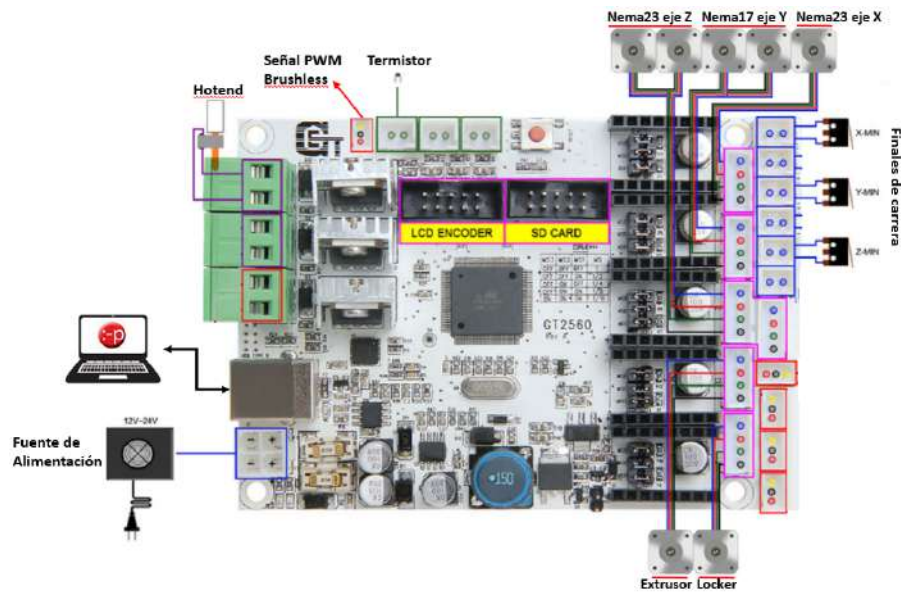
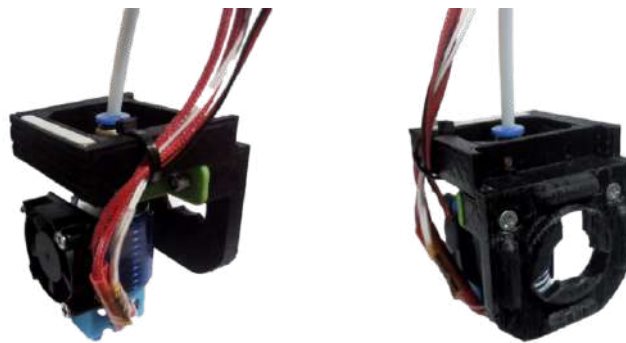


Figura 5.16: Diagrama de conexiones

Fuente: Autor

5.2.5 Ensamblaje Mecánico de Herramientas

Las herramientas consisten de una pieza impresa en 3D que encaja en el porta herramienta y en la base de reposo, en una es sujeta por el mecanismo de intercambio de herramienta con el "Locker" encajando con el reverso de su geometría en la cara exterior del porta herramientas y en la base de reposo es sujeta con imanes de neodimio.



(a) Vista isométrica

(b) Vista posterior

Figura 5.17: Montaje mecánico de la herramienta Hotend.

Fuente: Autor

Como ya se había mencionado anteriormente, este diseño de las piezas permiten que los ejes del Hotend y Brushless sean colineales, en las imágenes se enseña como se incorpora tanto el motor brushless como el Hotend a la pieza diseñada e impresa en 3D.



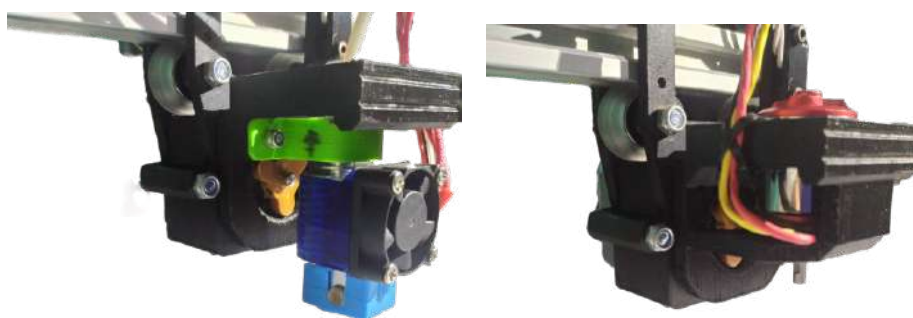
(a) Vista isométrica

(b) Vista posterior

Figura 5.18: Montaje mecánico de la herramienta Husillo.

Fuente: Autor

En la siguiente figura 5.17 (a) y (b) podemos observar como son sujetadas y acopladas las herramientas al porta-herramientas con el accionamiento del Locker, tanto el hotend como el husillo quedan en su sitio y bien asegurados, las piezas impresas en pla pasaron por un proceso de limado para que esta calzaran con la geometría de 4 puntos del porta-herramienta sin holgas. El motivo de que estas herramientas compartan el eje colineal es para tener mayor precisión en los procesos a realizar de manera que los offsets que se deban ingresar por código G sean mas simplificados, de hecho se habian impreso las piezas sin tener en cuenta los ejes del Hotend y Husillo y al caer en cuenta de este fallo se rediseñaron en base a la herramienta mas grande, el Husillo.



(a) Herramienta Hotend.

(b) Herramienta Husillo.

Figura 5.19: Imágenes de sujeción de herramientas.

Fuente: Autor

5.2.6 Códigos Macros

Para ejecutar acciones en la máquina estas deben ser ingresadas por medio de serial ya sean instrucciones individuales o un archivo completo con varias líneas de código G, para esto se utilizó Pronterface un host libre para comunicarnos constantemente con la máquina por medio de USB, ya que este software tiene Licencia Pública General de GNU. Para la realización de pruebas y conseguir agarrar una herramienta u otra, con el comando M114 se obtuvieron las coordenadas del efector final, porta-herramientas, para así poder programar las macros que serán ingresadas al software y luego serán ejecutadas por la máquina, se debe tener en cuenta que la programación en código G es secuencial. Por otra parte también se tuvo configurar la el firmware que se cargará a la placa GT-2560, calibrar los pasos por unidad y habilitar el segundo extrusor, porque este es el que cumple la función de "Locker" solo que la máquina interpreta estas acciones como otra y se tiene que optar por este tipo de prácticas ya que la placa y el firmware por defecto no está diseñado para este tipo de acciones.

En la versión 1.1.9 se puede configurar las diferentes Boards que soportan esta versión de Marlin como se muestra en los siguientes extractos de código.

Código 5.1: Configuración de Motherboard

```
1 // The following define selects which electronics board you have.
2 // Please choose the name from boards.h that matches your setup
3 #ifndef MOTHERBOARD
4 #define MOTHERBOARD BOARD_GT2560_REV_A_PLUS
5 #endif
```

Código 5.2: Configuración Número de Extrusores

```
1 // This defines the number of extruders
2 // :[1, 2, 3, 4, 5]
3 #define EXTRUDERS 2
```

Código 5.3: Configuración PID del Hotend

```
1 //PID Autotune finished! Put the last Kp, Ki and Kd constants from below into Configuration.h ↵
   ↵ -----> Código Pronterface: M303 E0 S210 C8
2 #define DEFAULT_Kp 23.42
3 #define DEFAULT_Ki 1.37
4 #define DEFAULT_Kd 99.75
```

Código 5.4: Configuración Driver de motores paso a paso usados en la placa

```
1 #define X_DRIVER_TYPE DRV8825
2 #define Y_DRIVER_TYPE DRV8825
3 #define Z_DRIVER_TYPE DRV8825
4 #define E0_DRIVER_TYPE DRV8825
5 #define E1_DRIVER_TYPE DRV8825
```

Código 5.5: Configuración de Pasos por Unidad, Feed Rate y aceleración

```

1 #define DEFAULT_AXIS_STEPS_PER_UNIT { 80.49, 4565.91, 4565.91, 94.76}
2 #define DEFAULT_MAX_FEEDRATE { 1000, 4, 3, 45}
3 #define DEFAULT_MAX_ACCELERATION { 200, 30, 10, 600}
4 #define DEFAULT_ACCELERATION 1200 // X, Y, Z and E acceleration for printing moves
5 #define DEFAULT_TRAVEL_ACCELERATION 2500 // X, Y, Z acceleration for travel moves

```

Una vez configurada y calibrada la máquina se podrán ejecutar los comandos de las macros. En primera medida se establece una serie de instrucciones para ejecutar las acciones del Locker como BLOQUEAR y DESBLOQUEAR.

Código 5.6: Macro Lock

```

1;CAMBIAR DE MOTOR DE EXTRUSOR A LOCKER
2T1
3;HABILITAR MOVIMINETO EN FRIO
4M302 S0
5;GIRAR PARA ASEGURAR HERRAMIENTA
6G0 E0.35 F200
7;VOLVER A SETEAR EL MOTOR EXTRUSOR
8T0

```

Código 5.7: Macro Unlock

```

1;CAMBIAR DE MOTOR DE EXTRUSOR A LOCKER
2T1
3;HABILITAR MOVIMINETO EN FRIO
4M302 S0
5;GIRAR PARA ASEGURAR HERRAMIENTA
6G0 E0 F200
7;VOLVER A SETEAR EL MOTOR EXTRUSOR
8T0

```

Luego calculamos las coordenadas en X/Y en las que están dispuestas las herramientas para programar las macros para tomar una herramienta u otra, programando así una rutina para cada una.

Código 5.8: Macro Agarrar Herramienta Hotend

```

1;POSICIONAMIENTO FRENTE A LA HERRAMIENTA
2G0 X284.00 Y296.00 F5000
3;ESPERAR UN SEGUNDO
4G4 S1 F5000
5;ENTRAR EN LA HERRAMIENTA
6G0 X284.00 Y315.00 F5000
7;ESPERAR UN SEGUNDO
8G4 S1
9;CAMBIAR DE MOTOR DE "NOZZLE" AL LOCKER
10T1
11;HABILITAR MOVIMIENTO EN FRÍO
12M302 S0
13;ACTIVAR LOCKER
14G0 E0.35 F200
15;VOLVER A SETEAR EL MOTOR EXTRUSOR
16T0

```

```

17;DISPOSICION PARA MOVIMIENTO
18G0 X284.00 Y315.00 F5000
19G0 X165.00 Y296.00 F5000
20;Offset Herramienta–Cama
21G0 Z5.8 F3000

```

Código 5.9: Macro Soltar Herramienta Hotend

```

1;POSICION DE REPOSO
2G0 X284.00 Y315.00 F5000
3;ESPERAR UN SEGUNDO
4G4 S1
5;CAMBIAR DE MOTOR DE "NOZZLE" AL LOCKER
6T1
7;HABILITAR MOVIMINETO EN FRÍO
8M302 S0
9;DESACTIVAR LOCKER
10G0 E0 F200
11;VOLVER A SETEAR EL MOTOR EXTRUSOR
12T0
13;PUNTO LIBRE
14G0 X284.00 Y299.00 F5000
15G0 X165.00 Y296.00 F5000

```

Código 5.10: Macro Agarrar Herramienta Husillo

```

1;POSICIONAMIENTO FRENTE A LA HERRAMIENTA
2G0 X69.00 Y296.00 F5000
3;ESPERAR UN SEGUNDO
4G4 S1 F5000
5;ENTRAR EN LA HERRAMIENTA
6G0 X69.00 Y315.00 F5000
7;ESPERAR UN SEGUNDO
8G4 S1
9;CAMBIAR DE MOTOR DE "NOZZLE" AL LOCKER
10T1
11;HABILITAR MOVIMINETO EN FRÍO
12M302 S0
13;ACTIVAR LOCKER
14G0 E0.35 F200
15;VOLVER A SETEAR EL MOTOR EXTRUSOR
16T0
17;DISPOSICION PARA MOVIMIENTO
18G0 X69.00 Y313.00 F5000
19G0 X165.00 Y311.00 F5000

```

Código 5.11: Macro Soltar Herramienta Husillo

```

1;POSICIONAMIENTO FRENTE A LA HERRAMIENTA
2G0 X69.00 Y315.00 F5000
3;ESPERAR UN SEGUNDO
4G4 S1
5;CAMBIAR DE MOTOR DE "NOZZLE" AL LOCKER
6T1
7;HABILITAR MOVIMINETO EN FRÍO
8M302 S0
9;ACTIVAR LOCKER
10G0 E0 F200

```

```

11;VOLVER A SETEAR EL MOTOR EXTRUSOR
12T0
13;PUNTO LIBRE
14G0 X69.00 Y296.00 F5000
15G0 X165.00 Y296.00 F5000

```

También se escribió un código G para comprobar que el intercambio de herramientas se realizaba de manera satisfactoria este código sigue una estructura secuencial al igual que los anteriores.

Código 5.12: Código G Prueba de intercambio de herramientas

```

1;Go HOME
2G28
3;CENTER OF WORK AREA
4G0 X165 Y165 F5000
5;AGARRAR HERRAMIENTA HOTEND
6G0 X284.00 Y296.00 F5000 ;POSICIONAMIENTO FRENTE A LA HERRAMIENTA
7G4 S1 F5000 ;ESPERAR UN SEGUNDO
8G0 X284.00 Y315.00 F5000 ;ENTRAR EN LA HERRAMIENTA
9G4 S1 ;ESPERAR UN SEGUNDO
10;CAMBIAR DE MOTOR DE "NOZZLE" AL LOCKER
11T1
12;HABILITAR MOVIMINETO EN FRÍO
13M302 S0
14;ACTIVAR LOCKER
15G0 E0.35 F200
16T0 ;VOLVER A SETEAR EL MOTOR EXTRUSOR
17G0 X284.00 Y315.00 F5000 ;DISPOSICION PARA MOVIMIENTO
18G0 X165.00 Y296.00 F5000
19;SOLTAR HERRAMIENTA HOTEND
20G0 X284.00 Y315.00 F5000 ;POSICION DE REPOSO
21G4 S1 ;ESPERAR UN SEGUNDO
22;CAMBIAR DE MOTOR DE "NOZZLE" AL LOCKER
23T1
24;HABILITAR MOVIMINETO EN FRÍO
25M302 S0
26;DESACTIVAR LOCKER
27G0 E0 F200
28T0 ;VOLVER A SETEAR EL MOTOR EXTRUSOR
29G0 X284.00 Y299.00 F5000 ;PUNTO LIBRE
30G0 X165.00 Y296.00 F5000
31;AGARRAR HERRAMIENTA HUSILLO
32G0 X69.00 Y296.00 F5000 ;POSICIONAMIENTO FRENTE A LA HERRAMIENTA
33G4 S1 F5000 ;ESPERAR UN SEGUNDO
34G0 X69.00 Y315.00 F5000 ;ENTRAR EN LA HERRAMIENTA
35G4 S1 ;ESPERAR UN SEGUNDO
36;CAMBIAR DE MOTOR DE "NOZZLE" AL LOCKER
37T1
38;HABILITAR MOVIMINETO EN FRÍO
39M302 S0
40;ACTIVAR LOCKER
41G0 E0.35 F200
42T0 ;VOLVER A SETEAR EL MOTOR EXTRUSOR
43G0 X69.00 Y313.00 F5000 ;DISPOSICION PARA MOVIMIENTO
44G0 X165.00 Y311.00 F5000
45;SOLTAR HERRAMIENTA HUSILLO
46G0 X69.00 Y315.00 F5000 ;POSICIONAMIENTO FRENTE A LA HERRAMIENTA
47G4 S1 ;ESPERAR UN SEGUNDO
48;CAMBIAR DE MOTOR DE "NOZZLE" AL LOCKER
49T1
50;HABILITAR MOVIMINETO EN FRÍO

```

```
51 M302 S0
52 ;ACTIVAR LOCKER
53 G0 E0 F200
54 T0 ;VOLVER A SETEAR EL MOTOR EXTRUSOR
55 G0 X69.00 Y296.00 F5000 ;PUNTO LIBRE
56 G0 X165.00 Y296.00 F5000
57 ;CENTER OF WORK AREA
58 G0 X165 Y165 F5000
```

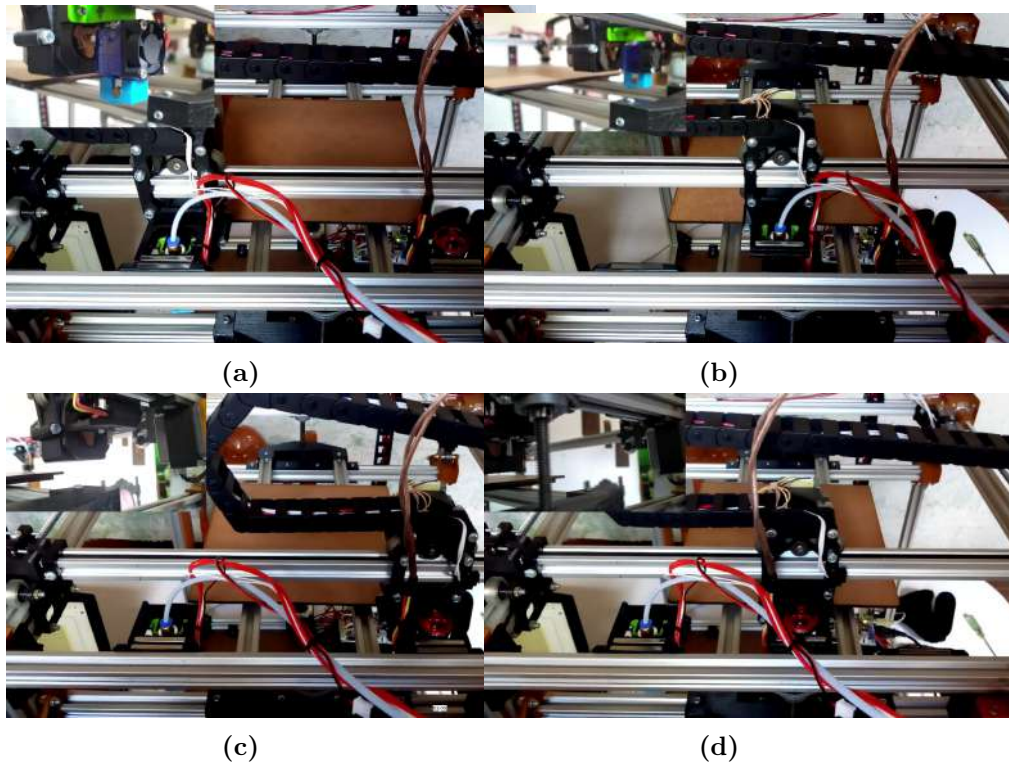


Figura 5.20: a.Imagen agarrando herramienta hotend, b.Herramienta hotend lista para el uso, c.Imagen agarrando herramienta husillo, d.Herramienta husillo lista para el uso

Fuente: Autor

6 Resultados

Una vez se tienen las rutinas para agarrar y soltar herramientas se optó por ingresar estos códigos como protocolos previos y posteriores a un Slicer en este caso Cura no sin antes realizar los respectivos ajustes de la máquina en los que se modificaron parámetros de anchura y profundidad, la altura no obstante no fue configurada porque las pruebas a realizar no lo requerían, pero, profundidad y anchura sí que eran necesarios ya que las acciones de intercambio de herramientas lo precisaban, en la figura 5.20 se muestra las configuraciones de la máquina en el Slicer Cura.



Impresora		Extruder 1	
Ajustes de la impresora		Ajustes del cabezal de impresión	
X (anchura)	330 mm	X mín.	-75 mm
Y (profundidad)	330 mm	Y mín.	-18 mm
Z (altura)	200 mm	X máx.	18 mm
Forma de la placa de impresión	Rectangular	Y máx.	35 mm
Origen en el centro	<input type="checkbox"/>	Altura del puente	55 mm
Plataforma calentada	<input checked="" type="checkbox"/>	Número de extrusores	1
Volumen de impresión calentado	<input type="checkbox"/>	Calentador compartido	<input checked="" type="checkbox"/>
Tipo de GCode	Marlin		

Figura 6.1: Configuración de impresora en Slicer Cura
Fuente: Autor

Para el momento de imprimir primera mente se debe tomar la herramienta hotend y una vez terminada la impresión se debe volver a colocar en su sitio, ara esto se ingresan los código que se programaron anteriormente código 5.8 y código 5.9 en unos apartados de Cura llamados "Gcode inicial del Extrusor" y "Gcode final del Extrusor", respectivamente, esto hará que el cura al generar un código para imprimir una pieza ingresada al Slicer se tengan en cuenta estos códigos.

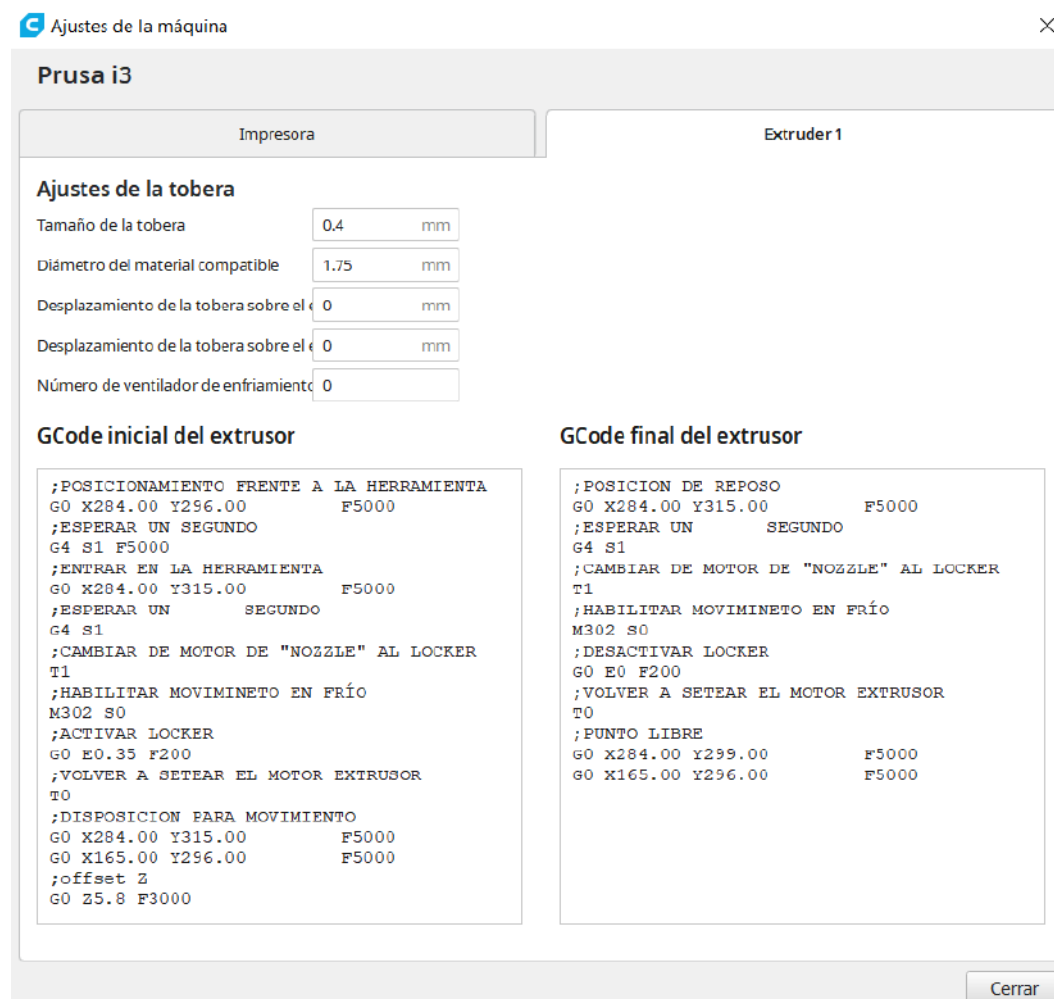


Figura 6.2: Códigos G previo y posterior a la impresión.

Fuente: Autor

En el código 6.1 podemos ver un extracto del código que ha generado el Slicer Cura al ingresarle una pieza de prueba para imprimir, en el podemos ver como se tiene en cuenta la rutina previa a la impresión de tomar la herramienta y generar el desfase en Z para que la punta del hotend coincida con la superficie de la mesa de impresión.

Código 6.1: Extracto de código generado por Cura donde se tiene en cuenta la rutina previa a imprimir.

```

1 G28 X0 Y0 ;move X/Y to min endstops
2 G28 Z0 ;move Z to min endstops
3 G1 Z15.0 F9000 ;move the platform down 15mm
4 G92 E0 ;zero the extruded length
5 G1 F200 E3 ;extrude 3mm of feed stock
6 G92 E0 ;zero the extruded length again
7 G1 F9000
8 ;Put printing message on LCD screen
9 M117 Printing...
10 G92 E0

```



```

11 G0 X284.00 Y296.00 F5000 ;POSICIONAMIENTO FRENTE A LA HERRAMIENTA
12 G4 S1 F5000 ;ESPERAR UN SEGUNDO
13 G0 X284.00 Y315.00 F5000 ;ENTRAR EN LA HERRAMIENTA
14 G4 S1 ;ESPERAR UN SEGUNDO
15 T1 ;CAMBIAR DE MOTOR DE "NOZZLE" AL LOCKER
16 M302 S0 ;HABILITAR MOVIMINETO EN FRÍO
17 G0 E0.35 F200 ;ACTIVAR LOCKER
18 T0 ;VOLVER A SETEAR EL MOTOR EXTRUSOR
19 G0 X284.00 Y315.00 F5000 ;DISPOSICION PARA MOVIMIENTO
20 G0 X165.00 Y296.00 F5000
21 ;prueba imprimir
22 G28 X Y F3000 ;ir al Home en X y Y unicamnete
23 G1 Z5.8 F3000
24 M428

```

Una vez generado el código G cargamos el código en Pronterface para controlar con este programa la máquina en caso de que ocurra un error inesperado y poder detener la máquina y también supervisar las acciones que esta realiza, y empezamos el proceso de impresión.

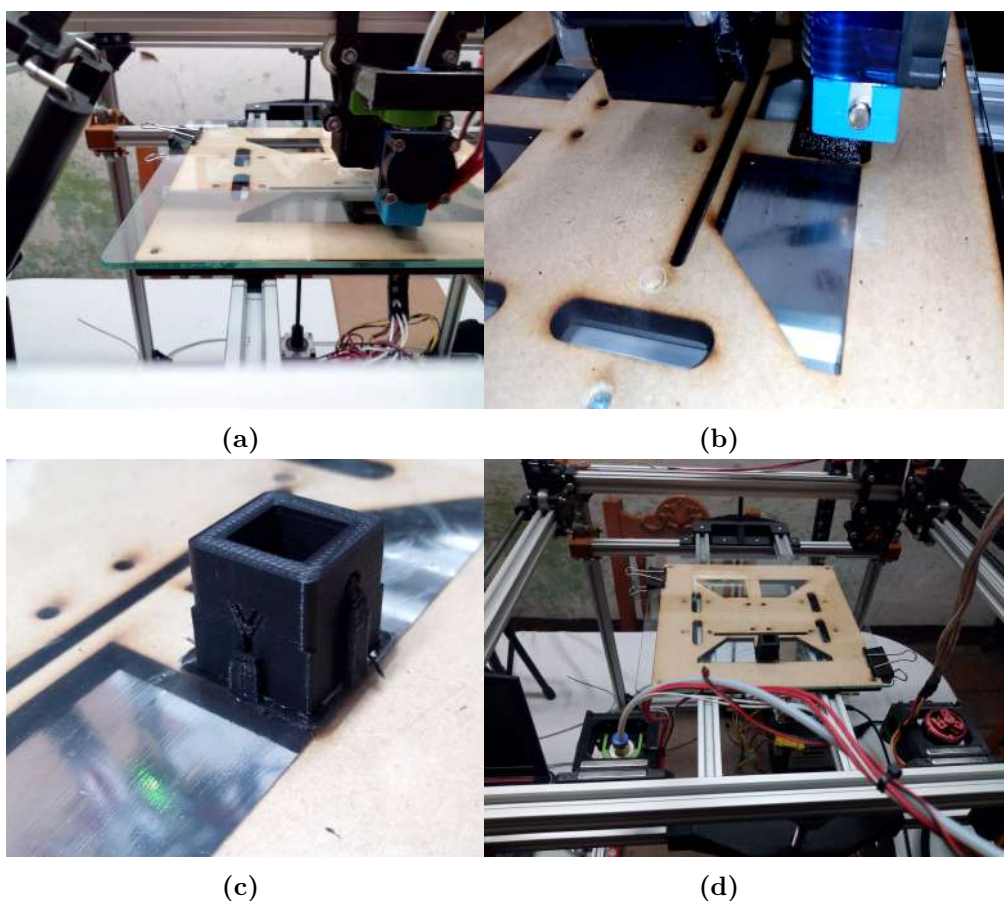


Figura 6.3: a.Inicio de impresión primeras capas, b.Imagen durante en proceso de impresión , c.Pieza terminada , d.La máquina al terminar deja la herramienta en su lugar y va al origen.

Fuente: Autor

En la figura 6.3 podemos ver el proceso de impresión, en este caso para comprobar el buen funcionamiento de la máquina se imprimió un cubo de prueba que se puede conseguir en cualquier biblioteca de STLs en internet. En la figura 6.4 podemos ver el resultado de la pieza impresa ya limpia y sin soportes.

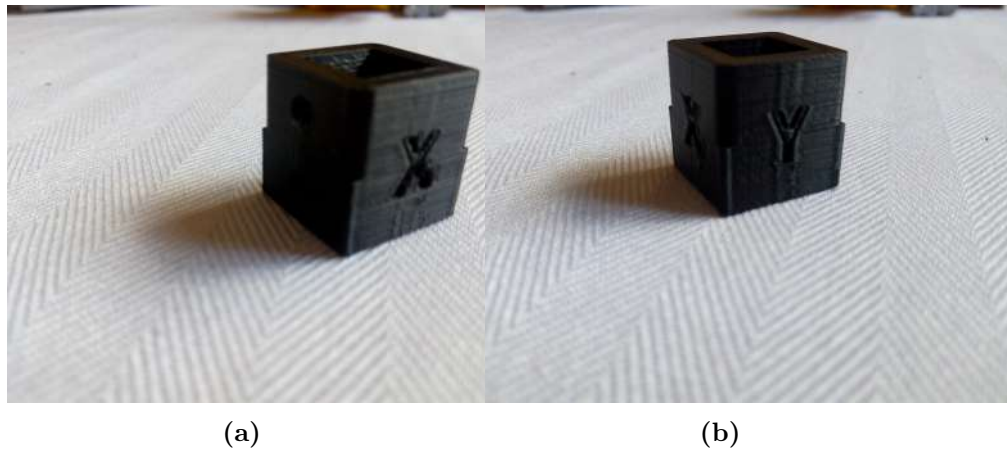


Figura 6.4
Fuente: Autor

En la figura anterior podemos ver el resultado que es bastante satisfactorio si bien se puede ver que hay unos detalles de "Ghosting" en los detalles de las letras, algo que puede ser arreglado de manera muy sencilla bajando la velocidad de impresión de las capas exteriores, los soportes también se imprimieron bien y las dimensiones de la pieza son las adecuadas.

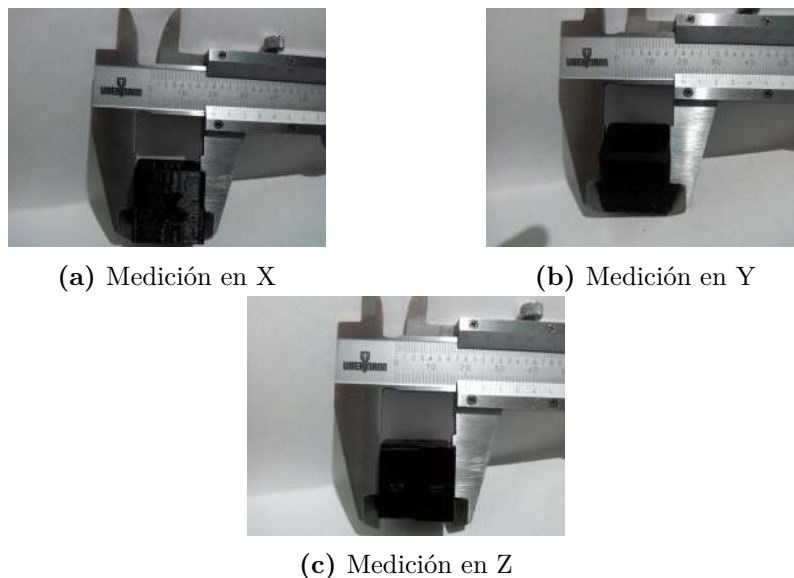


Figura 6.5: Resultados de impresión y comprobación de medidas en cada eje X,Y y Z.
Fuente: Autor

Si bien podemos observar que se obtuvieron resultados muy satisfactorios es imperativo aclarar que estos resultados fueron obtenidos después de muchas pruebas, el principal inconveniente encontrado en la máquina es debido a su construcción física, y es que a razón de los diferentes mecanismos de transmisión de movimiento algunas de las primeras pruebas resultaron fatales esto debido a las aceleraciones de la máquina en los diferentes ejes, problema que es fácilmente solucionado si se configuran de manera adecuada las aceleraciones de la máquina en los diferentes ejes, principalmente en X/Y, Z por otro lado no es mayor problema ya que este se mueve muy poco y en lapsos muy cortos. Para realizar la comprobación del funcionamiento del maquinado en la máquina esta se llevó a cabo con un material blando de prueba para que evitar daños en la máquina en caso de colisión, el material de prueba fue poliestireno expandido y se realizó una prueba con una geometría prismática, esto debido a que surgió un problema con el controlador ESC del motor brushless y ambos se averiaron por lo cual se adaptó un motor DC a la pieza impresa de la herramienta ya que debía ser la misma pieza para que las macros pre-programadas de intercambio de herramienta siguiesen funcionando de la manera en que lo venían haciendo.

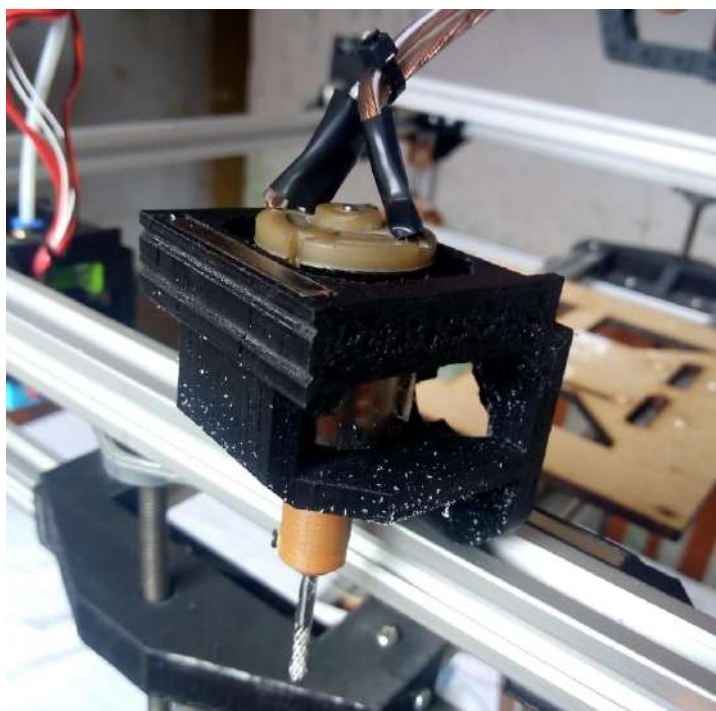


Figura 6.6: Adaptación motor DC a la pieza de acople.

Fuente: Autor

Los resultados de maquinado fueron los esperados en la prueba se realizaron las acciones de tomar herramienta, proceso de maquinado y vuelta al lugar de la herramienta en ese orden. El maquinado fue satisfactorio primero que todo las medidas eran las indicadas y no llegó a suceder ningún tipo de imprevisto en la prueba, también se tenía la duda de si el imán de neodimio que está en la pieza de acople sería un problema para el funcionamiento del motor, pero no fue así y la prueba se llevó con completa normalidad.

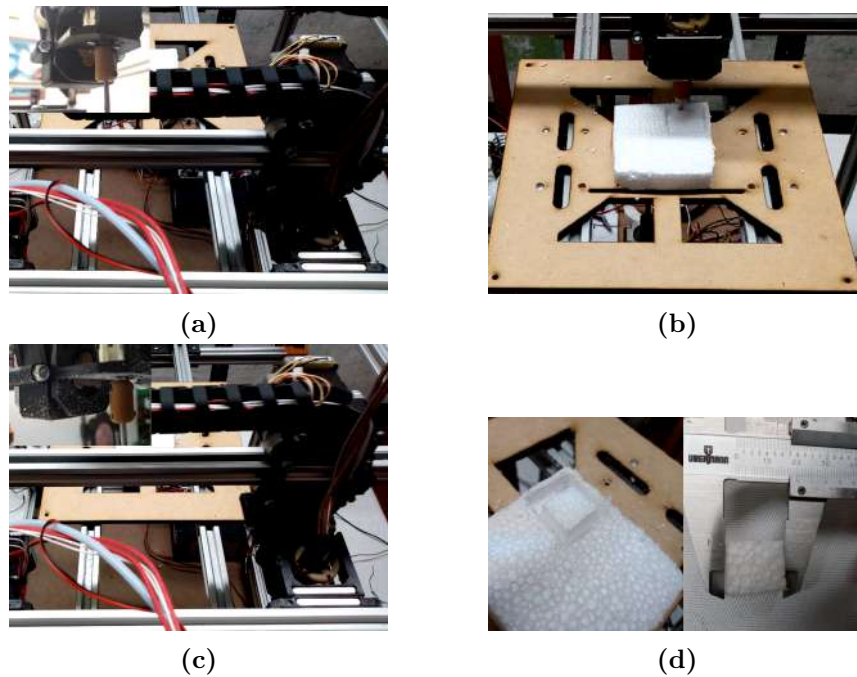


Figura 6.7: Resultados de maquinado. a.Toma de herramienta, b.Proceso de maquinado, c.Vuelta a su lugar de herramienta, d.Resultado y medición de maquinado.

Fuente: Autor

También cabe recalcar el buen funcionamiento de la disposición de herramientas, gracias a los imanes de neodimio las herramientas siempre permanecieron en su lugar y firmes, el proceso de intercambio de herramienta, impresión y maquinado se lleva acabo de manera correcta y sin complicaciones.

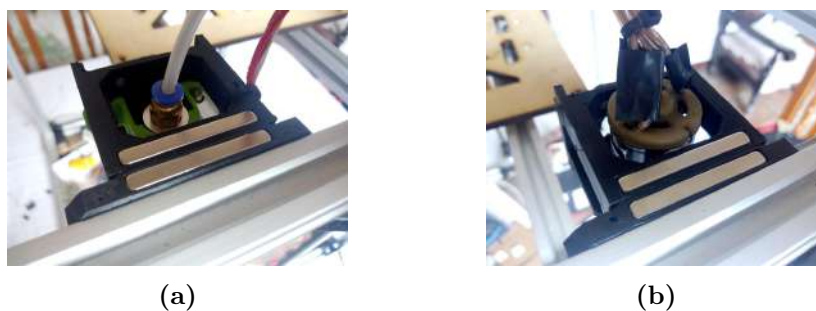


Figura 6.8: Disposición de Herramientas sujetos por imanes de neodimio.

Fuente: Autor

Una vez comprobamos el correcto funcionamiento de la máquina en los procesos de impresión 3D y maquinado CNC individualmente procedemos a programar un código G que pueda ser interpretado por la máquina con el fin de realizar un proceso de manufactura híbrida, para esto se diseñó una pieza estándar en un software CAD con unas dimensiones específicas de 20x20x10 (X/Y/Z) para comprobar el dimensionamiento de esta al acabar el proceso de HM. El código ejecutado en la máquina fue en parte generado por el "Cura Engine" para el *Slicing* de la pieza STL y se añadió de manualmente el resto del proceso de maquinado, incluyendo también el cambio de herramienta.

En el *software* Pronterface podemos visualizar los movimientos de la máquina para llevar a cabo el proceso de manufactura híbrida, desplazamientos del porta-herramienta para impresión 3D y maquinado CNC al cargar el archivo .gcode en el apartado de "Plate Building Tool" con el que cuenta este programa.

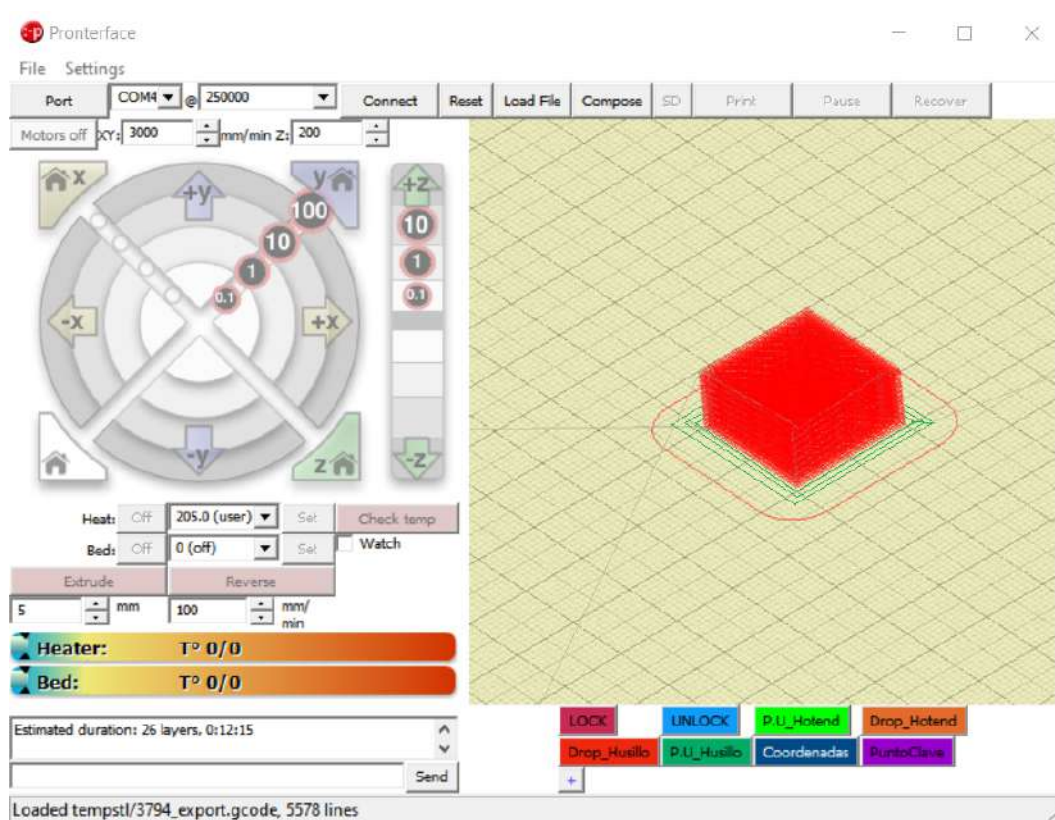


Figura 6.9: Simulación de la trayectorias de proceso híbrido.

Fuente: Autor

En la figura 6.9 se puede observar los procesos a realizar en esta operación híbrida. En rojo se muestra la impresión de la pieza generada por el *Slicing* y en verde las trayectorias de movimiento de la operación de careado (facing) que se le realiza a la pieza, entre ambos procesos se realiza el intercambio de herramienta, estas trayectorias de movimiento se visualizan en la figura con un color gris.

Una vez ejecutamos el código en el *Pronterface Host* observamos como la máquina ejecuta estos comandos por código-G gracias a la comunicación Rs-232 que se establece entre la GT-2560 (placa de control) y el Computador que se encuentra ejecutando *Pronterface Host*. En la figura 6.10 se muestra un diagrama secuencial de las acciones a realizar por la maquina para llevar a cabo el proceso híbrido.

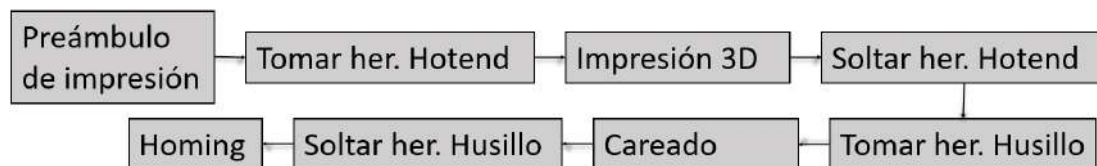


Figura 6.10: Diagrama de proceso de manufactura híbrida

Fuente: Autor

En la figura 6.11 se muestra el proceso híbrido como realiza la impresión 3D, intercambio de herramienta y el careado a la pieza impresa para conseguir más precisión en las dimensiones de la pieza, además de obtener también un acabado más regular ya que para hacer la prueba se configuró el parámetro de impresión de capa exterior con un flujo alto para así generar esa irregularidad que fue corregida con el careado.

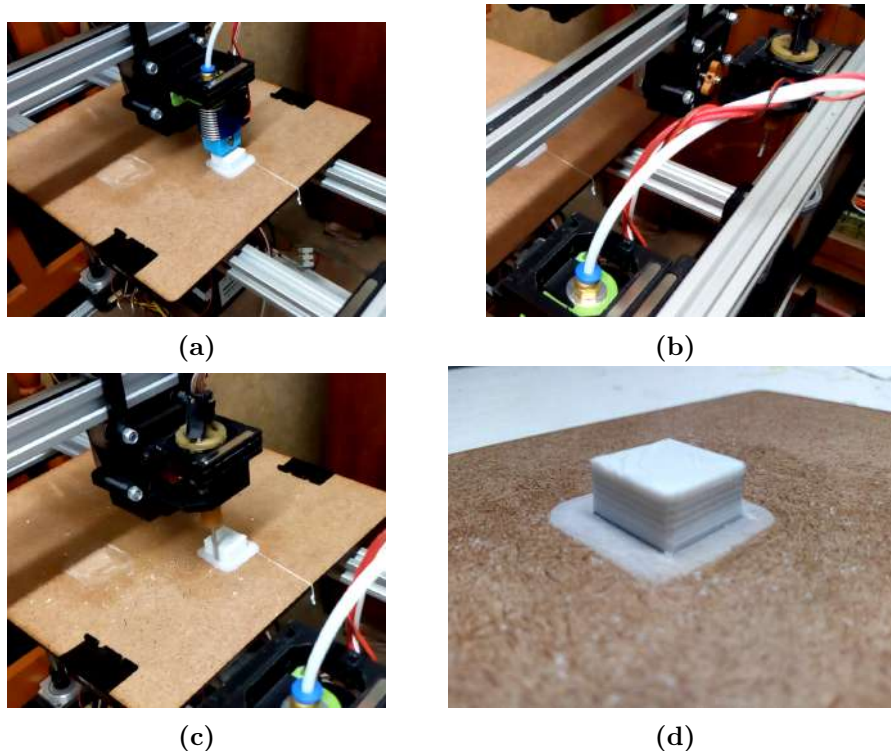


Figura 6.11: Validación de funcionamiento de proceso híbrido. a.Impresión 3D, b.Cambio de herramienta, c.Maquinado, d.Pieza terminada

Fuente: Autor

Los resultados dimensionales de la pieza oscilan en un margen de 0.1mm-0.2mm lo cual es un resultado bastante satisfactorio y aceptable para el prototipo construido.



(a)



(b)



(c)

Figura 6.12: Resultados dimensionales del proceso híbrido. a.Medición en X(20.1mm), b.Medición en Y(20.2mm), c.Medición en Z(10.1mm)

Fuente: Autor

6.0.1 Propuesta de Interpretador

Las impresoras 3d por lo general están regidas por la norma ISO 10646 debido a que los firmwares usados en los sistemas embebidos de control que se utilizan en ellas utilizan esta norma como por ejemplo el firmware Marlin de RepRap, la propuesta del interpretador es para la implementación de los estándares de STEP-NC para la manufactura híbrida consiguiendo fusionar las normas que rigen la manufactura sustractiva con la implementación de estas normas en la manufactura aditiva obteniendo así un módulo capaz de desempeñar acciones de manufactura híbrida. Efrain Rodriguez en su paper “A STEP-NC implementation approach for additive manufacturing” Rodriguez y Alvares (2020) muestra una manera de usar la información geométrica de las capas de una pieza cualquiera como datos de entrada para generar un programa STEP-NC de acuerdo a la normativa ISO 10303 AP-238, también el desarrollo de un software que cumple la función de convertir los datos de cada capa en datos AP-238 STEP-NC. Rodriguez y Alvares (2020) El método de implementación del estándar STEP-NC para manufactura aditiva es descrito usando un modelo de actividades de aplicación a través del IDEF0, en donde se plantea un orden lógico secuencial para llevar a cabo acciones de AM en un entorno STEP-NC como lo son, realizar el Slicing del modelo 3D de la pieza en un archivo de capa AM por medio del software, generar un programa STEP-NC para AM, en el caso de Rodriguez y Alvares que desarrolló este generador por medio de C también puede ser llevado a cabo con JAVA scripts. Luego de estos dos procesos viene la construcción del modelo cinemático de una máquina para AM en donde se ingresa el ensamblaje completo del modelo cad a STEP como entrada para construir un archivo *.xml con la representación del modelo 3D cinemático de la máquina para AM, también este mismo proceso puede ser llevado a cabo con cualquier otro tipo de modelo CAD como es el caso del prototipo de manufactura híbrida.

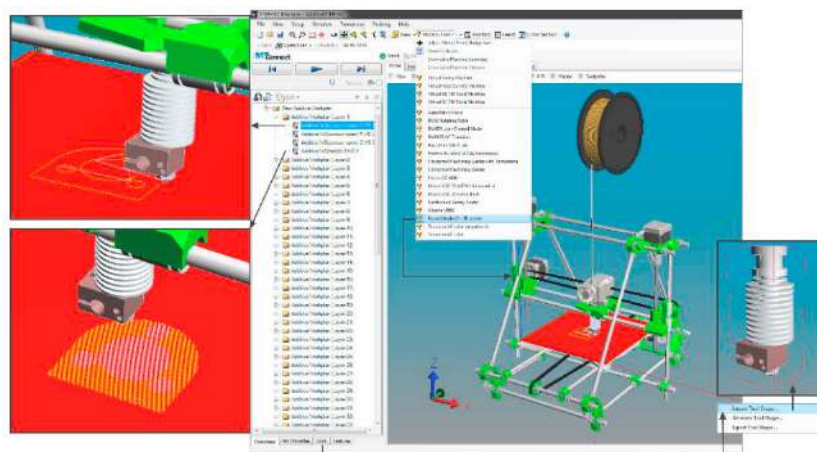


Figura 6.13: Simulación de la trayectoria de la capa AM en STEP-NC

Fuente: Rodriguez y Alvares

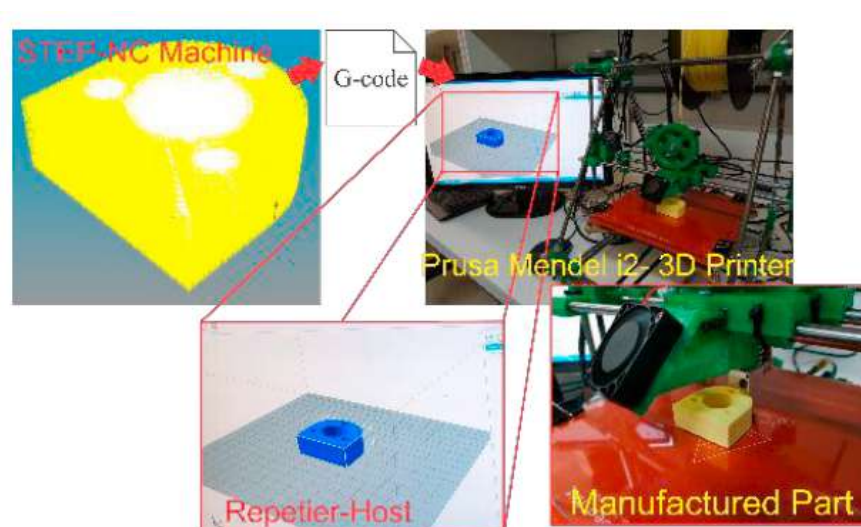


Figura 6.14: Fabricación de la pieza de prueba utilizando una impresora RepRap 3D modelo Prusa Mendel i2.

Fuente: Rodriguez y Alvares

IDEF0 es un método diseñado para modelar las decisiones, acciones y actividades en la organización en un sistema. Es muy útil para establecer el alcance de un análisis, especialmente para un análisis funcional. Zhang (2012) Este método es usado también para obtener o producir un “modelo de función”. Un modelo de función es una representación estructurada de las acciones, actividades o procesos dentro del sistema modelado o área temática. Para el prototipo de manufactura híbrida este es método es indispensable para así conseguir realizar procesos que tengan en cuenta la manufactura aditiva y sustractiva. Debido a que la normativa ISO 10303 está ya predeterminada para acciones de maquinado se puede hacer uso de esta para implementar procesos de manufactura aditiva como se mostró anteriormente. Todos estos procesos están representados en el modelo de datos simplificados STEP-NC.

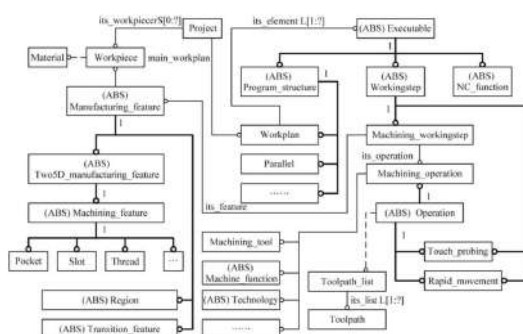


Figura 6.15: Modelo de datos STEP-NC simplificado

Fuente: Zhang

Para el desarrollo de estas operaciones de manufactura híbrida pueden usarse ambos apartados de aplicaciones de maquinado y el software de generado de trayectorias de capa AM en STEP-NC para así obtener un programa estándar capaz de realizar ambas acciones, además de programar en el entorno de simulación acciones de ambos métodos de manufactura en una sola pieza personalizada, ya que ambas están bajo cobertura de la norma ISO-10303, se pueden implementar las acciones de manera unificada y con la misma analogía que se llevó a acabo la programación por macros en el documento para generar las trayectorias de movimiento del robot cartesiano, ya sean de uso industrial, domestico o académico este sería un método aplicable a diferentes tipos de máquinas de manufactura como es el caso de del prototipo de manufactura híbrida.

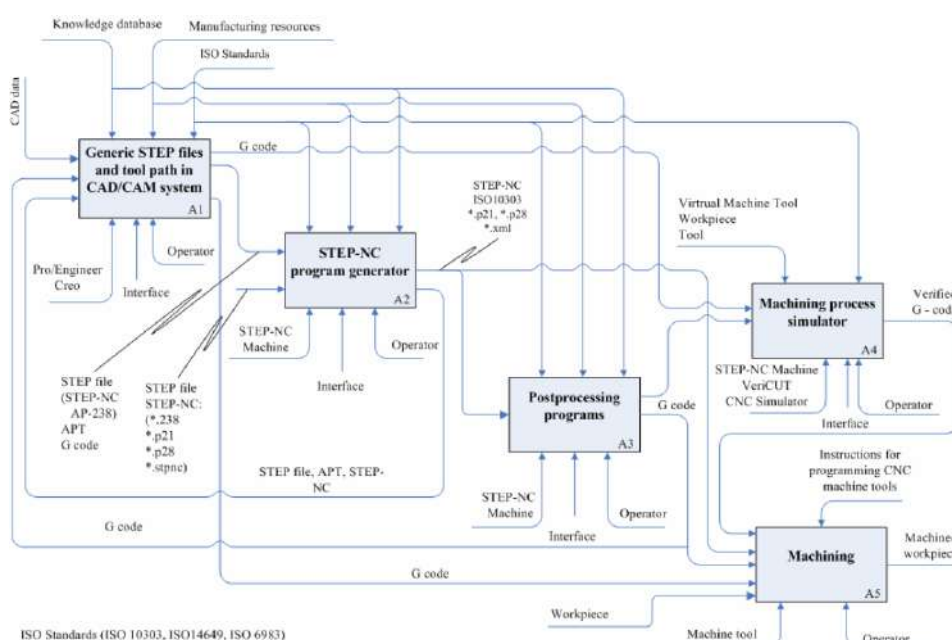


Figura 6.16: Flujo básico de actividades para simulaciones de mecanizado basadas en STEP-NC

Fuente: S Živanović; y Glavonjić

En la figura 6.12 se puede ver el diagrama de flujo de actividades para simulaciones de mecanizado basadas en STEP-NC que conforman el diagrama IDEF0 de alto nivel para mecanizado basado en STEP-NC, es decir A0, este describe el flujo básico de actividades, que de acuerdo con la metodología de IDEF0 este está representado en la figura 6.12 donde sus actividades básicas son: A1 - Archivos STEP genéricos y ruta de herramientas en sistemas CAD/CAM, A2- Generador de programas STEP-NC, A3-Programas de post-procesamiento, A4- Simulador de procesos de mecanizado y A5- Mecanizado. S Živanović; y Glavonjić (2014)

Bonnard (2018) En su proposición para un modelo STEP-NC para manufactura aditiva usan de hecho la normativa ISO 14649 debido a que la norma 10303 es mas compleja y además incrementa el almacenamiento de los datos generando archivos aún mas pesados,

para una máquina de impresión 3D que implementa modelado por deposición fundida se creó un archivo STEP-NC que contiene la información sobre la pieza, características, tecnología, estrategias, estructura, geometría y herramientas.

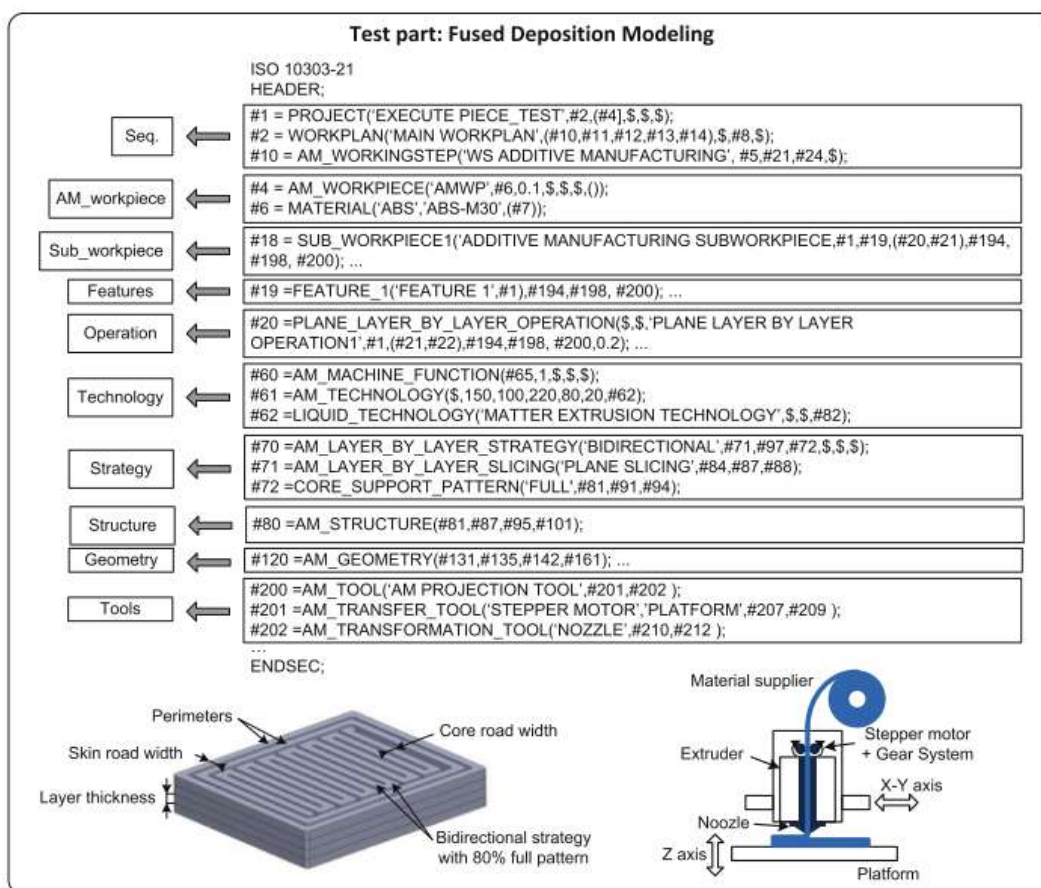


Figura 6.17: Ejemplo de un programa AM STEP-NC de una pieza de prueba FDM

Fuente: Bonnard

También se propone una arquitectura para la plataforma avanzada STEP-NC para manufactura aditiva donde se muestra un flujo de acciones a realizar en el proceso de fabricación de una pieza pre-diseñada como modelo CAD pero que su formato es ISO 10-303-203 a la cual se extraen todas sus características por medio del reconocimiento de características de AM gracias a PythonOcc en el segundo módulo, en el tercer modulo se que también fue desarrollado en python, proporciona trayectorias y planificación del proceso AM y genera un archivo STEP-NC con los datos de la pieza en el módulo 4, el módulo 5 está compuesto por dos sub-módulos: un módulo de visualización y simulación, y un módulo que permite modificaciones en la mesa o área de trabajo, el módulo seis es un módulo de optimización de fabricación. El módulo siete permite la inspección y encabeza la el monitoreo de datos de la máquina, estos dos últimos módulos 6-7 son archivados en una base de datos de conocimiento en la nube.Bonnard (2018)

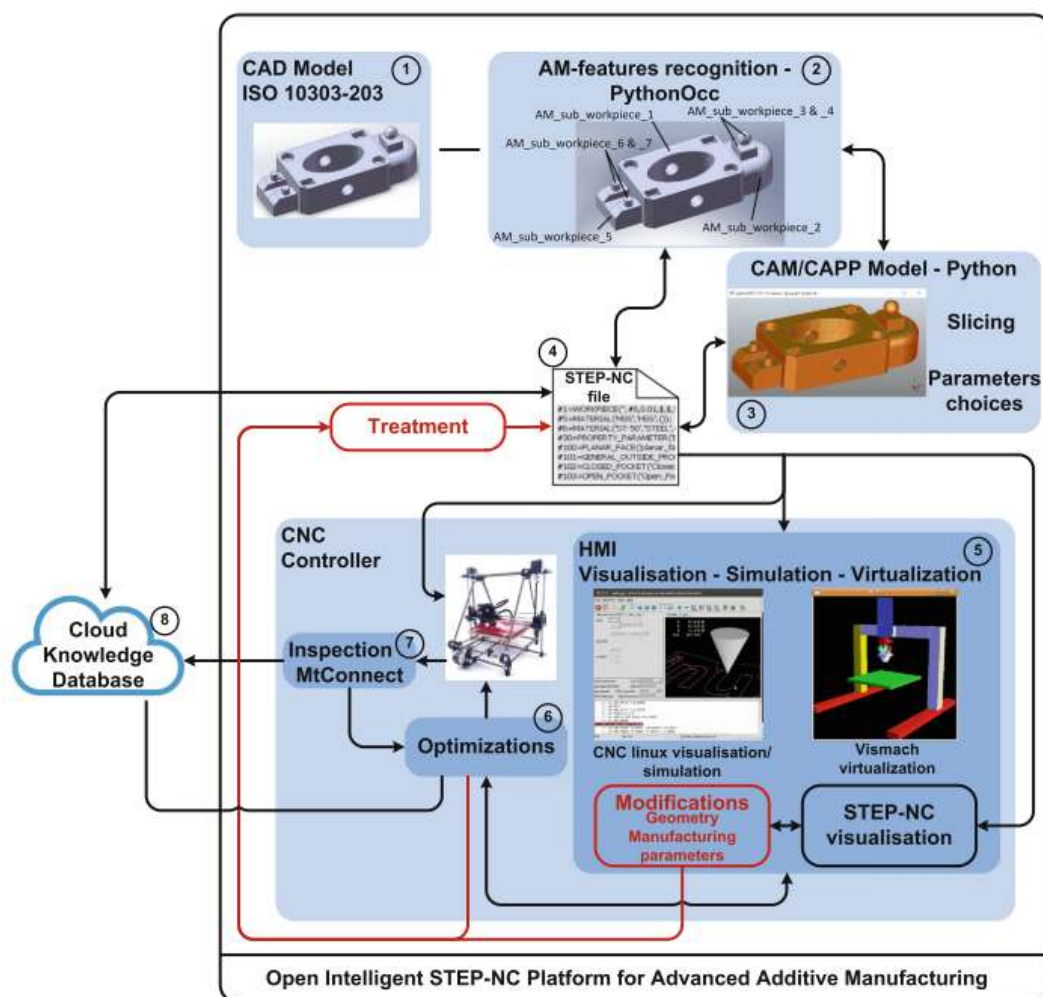


Figura 6.18: Plataforma abierta STEP-NC inteligente para fabricación aditiva avanzada
Fuente: Bonnard

Bonnard y cols. (2018) A diferencia del código G, la programación STEP-NC es casi que imposible de realizar manualmente, por lo que una plataforma STEP-NC que utiliza información de modelo CAD es esencial. La arquitectura de dicha plataforma debe satisfacer los objetivos de fabricación avanzada, la figura 6.15 muestra una plataforma genérica STEP-NC para fabricación aditiva avanzada de esta forma donde: A1- Módulo de reconocimiento de propiedades de la pieza, A2- Módulo generador de archivo STEP-NC, A3- Módulo de análisis de archivo, A4- Módulo de virtualización y simulación, A5- Módulo generador de trayectorias de herramienta, A6- Modulo de optimización, A7- Módulo de validación de trayectorias, A8- Módulo de fabricación, A9- Generación de trayectorias de inspección y simulación.

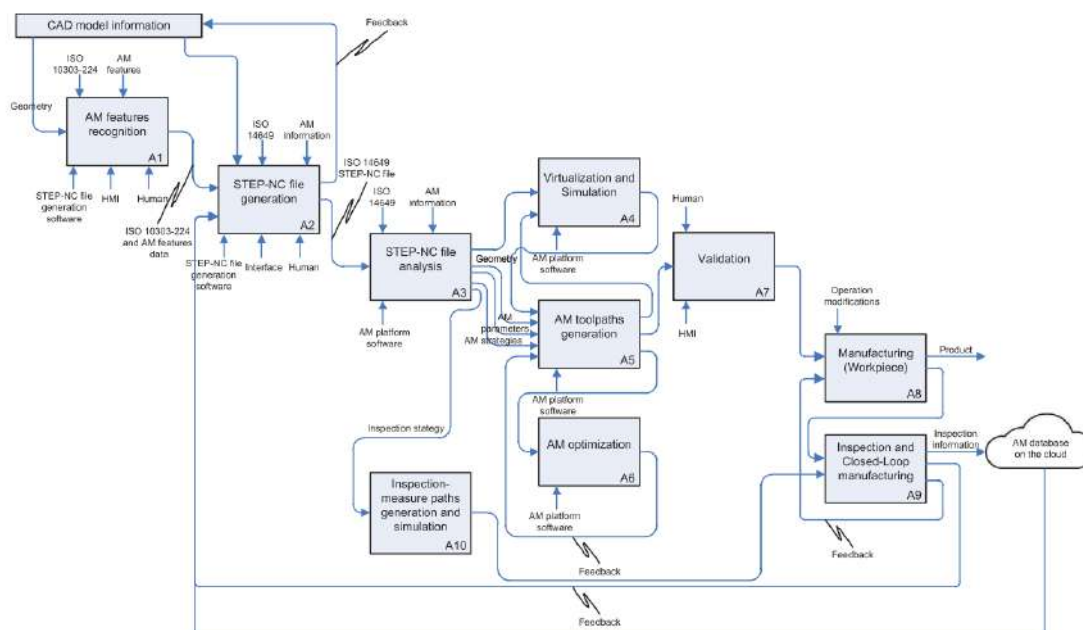


Figura 6.19: Plataforma genérica STEP-NC para fabricación aditiva avanzada

Fuente: Bonnard y cols.

De esta forma también se puede proponer una arquitectura para la manufactura híbrida teniendo en cuenta cantidad de herramientas y acciones a realizar, en un modelo de máquina que pueda englobar dentro de sí misma operaciones de AM y SM, para posteriormente llegar a implementar procesos completos de HM, gracias a la norma ISO-10303 AP-238, en donde se vincularon nuevas entidades para manufactura aditiva. Garrido y cols. (2002) Este estándar STEP ISO, ha sido utilizado como tecnología para intercambiar datos entre sistemas en el mismo dominio, como por ejemplo sistemas CAD, este estándar está en expansión y siempre está desarrollándose, revisándose y actualizándose para abordar entornos de ingeniería como CAD/CAM/CNC, ya que los programas AP-238 tienen la capacidad de definir un todo un conjunto de acciones a realizar para mecanizar las características "features" de una pieza.

Garrido y cols. (2002) Estas tareas están organizadas dentro de una unidad funcional "executable" y esta especifica los requerimientos de información necesarios para describir el flujo de control de un programa STEP-NC de mecanizado y también algunas otras acciones que no son precisamente de mecanizado, como por ejemplo de impresión, pero que pueden ser realizadas por medio de control numérico computarizado. De la entidad base (executable entity) derivan otras entidades que describen las acciones del proceso.

Alberto J Álvarez y cols. (2020) El desarrollo de un complemento por parte de STEP Tools para Mastercam que permite exportar un programa de mecanizado como STEP-NC directamente desde Mastercam es una gran aporte ya que nos brinda un entorno para la virtualización y simulación de los procesos a realizar por la máquina.

7 Conclusiones

Estos procesos de manufactura que combinan acciones aditivas y sustractivas cada vez ganan mas campo dentro de la industria, pero, también es necesario incorporar estas tecnologías a la academia y hacer uso de estas como una herramienta necesaria para el desarrollo de proyectos de prototipado rápido, haciendo posible la impresión 3D, maquinado CNC y ruteado de PCBs en una sola máquina.

Una ventaja conseguida con este prototipo es que la relación, Volumen general-Volumen de trabajo, que es de 1:5, también se obtienen resultados dimensionales tanto de impresión como de maquinado satisfactorios con una tolerancia en el rango de 0.1mm-0.21mm, los parámetros dimensionales también pueden mejorar con la inclusión de control de circuito cerrado o incluso redes neuronales para inspección de la pieza fabricada para mejorar aún más la calidad de fabricación.

El prototipo puede llegar a implementar dentro de su estructura muchas otras herramientas como por ejemplo un láser para grabado o corte, lo cual significa que la máquina es bastante flexible en los procesos que puede realizar, simplemente añadiendo la herramienta a la estructura y programando su macros-rutinas como se hizo con las dos herramientas mostradas en este documento.

En el apartado de cinemática si bien este ya es solvente en el prototipo, se puede implementar la configuración CoreXY para conseguir mayor rapidez en los movimientos de desplazamiento o intercambio de herramientas que no implican ninguna de las acciones de impresión o maquinado para ahorrar tiempo de fabricación y que a su vez sea tan robusta como para soportar procesos de maquinado, ya que este está diseñado principalmente para impresión 3D, en un futuro este prototipo también puede ayudar a mejorar la sustentabilidad ambiental con la disminución de materiales a usar en dichos procesos y favorecer a los costos de fabricación de piezas personalizadas.

El futuro desarrollo de un interpretador para manufactura híbrida bajo las normas ISO 14649 e ISO 10303 AP238 aporta trazabilidad a este tipo de procesos y a su vez la capacidad de que estos mismos puedan ser implementados por cualquier tipo de robot, ya sea industrial o de servicio.

Bibliografía

- Alberto J Álvarez, Rodríguez, E., Jaimes, C. I. R., y João C E Ferreira, J. S. T. (2020). STEP-NC Architectures for Industrial Robotic Machining : Review , Implementation and Validation. , 15, 1–20. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3017561
- Barrientos, A., Peñin, L. F., Balaguer, C., y Aracil, R. (2007). *Fundamentos de robótica* (Vol. 2). McGraw-Hill Madrid.
- Bonnard, R. (2018). An Advanced STEP-NC Platform for Additive Manufacturing. *Industrializing Additive Manufacturing - Proceedings of Additive Manufacturing in Products and Applications - AMPA2017*, 2. doi: 10.1007/978-3-319-66866-6
- Bonnard, R., Hascoët, J. Y., Mognol, P., y Stroud, I. (2018). STEP-NC digital thread for additive manufacturing: data model, implementation and validation. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 31(11), 1141–1160. Descargado de <https://doi.org/10.1080/0951192X.2018.1509130> doi: 10.1080/0951192X.2018.1509130
- Chrysosolouris, G., Mavrikios, D., Papakostas, N., Mourtzis, D., Michalos, G., y Georgoulas, K. (2009). Digital manufacturing: History, perspectives, and outlook. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 223(5), 451–462. doi: 10.1243/09544054JEM1241
- DRPC. (2016). *Fuente de poder jr psu004*. Descargado de <https://www.drpc.co/product/fuente-de-poder-jr-psu004/>
- Drv8825. (2020, Jun). Descargado de <https://makershopbcn.com/es/producto/drv8825-driver>
- efunda. (s.f.). *Highlights of solid ground curing*. urlhttps://www.efunda.com/processes/rapid_prototyping/sgc.cfm.
- from scratch, D. P. (s.f.). *Types of 3d printers or 3d printing technologies overview*. url<http://3dprintingfromscratch.com/common/types-of-3d-printers-or-3d-printing-technologies-overview/dlp>.
- Fry, N. R., Richardson, R. C., y Boyle, J. H. (2020). Robotic additive manufacturing system for dynamic build orientations. *Rapid Prototyping Journal*, 26(4), 659–667. doi: 10.1108/RPJ-09-2019-0243
- Garrido, J., Marín, R., Ignacio, J., y Sáez, J. (2002). Extensión del estándar ISO 10303 AP-238 para la automatización del acceso a datos de procesos CNC.
- geeetech. (2018). *Gt2560*. Descargado de <http://www.geeetech.com/wiki/index.php/GT2560>

- Isaac, I. (2020, May). *Nema 17: todo sobre el motor paso a paso compatible con arduino*. Hardware libre. Descargado de <https://www.hwlibre.com/nema-17/>
- Jbrazio. (2020, Oct). *What is marlin?* jbrazio. Descargado de <https://marlinfw.org/docs/basics/introduction.html>
- Jimo, A., Braziotis, C., Rogers, H., y Pawar, K. (2019). Traditional vs additive manufacturing supply chain configurations: A comparative case study. *Procedia Manufacturing*, 39(2019), 765–774. Descargado de <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.432> doi: 10.1016/j.promfg.2020.01.432
- Kozak, J., Rajurkar, K. P., y Balkrishna, R. (1996). Study of electrochemical jet machining process. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 118(4), 490–498. doi: 10.1115/1.2831058
- Lauwers, B., Klocke, F., Klink, A., Tekkaya, A. E., Neugebauer, R., y McIntosh, D. (2014). Hybrid processes in manufacturing. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 63(2), 561–583. Descargado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2014.05.003> doi: 10.1016/j.cirp.2014.05.003
- Li, L., Haghighi, A., y Yang, Y. (2018). A novel 6-axis hybrid additive-subtractive manufacturing process: Design and case studies. *Journal of Manufacturing Processes*, 33(May), 150–160. Descargado de <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.05.008> doi: 10.1016/j.jmapro.2018.05.008
- Mazzanti, V., Malagutti, L., y Mollica, F. (2019). FDM 3D printing of polymers containing natural fillers: A review of their mechanical properties. *Polymers*, 11(7). doi: 10.3390/polym11071094
- Nema 23 stepper motor*. (2019, Aug). Descargado de <https://components101.com/motors/nema-23-stepper-motor-datasheet-specs>
- Newman, S. T., y Nassehi, A. (2007). Universal Manufacturing Platform for CNC Machining. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 56(1), 459–462. doi: 10.1016/j.cirp.2007.05.110
- Newman, S. T., Zhu, Z., Dhokia, V., y Shokrani, A. (2015). Process planning for additive and subtractive manufacturing technologies. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 64(1), 467–470. Descargado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2015.04.109> doi: 10.1016/j.cirp.2015.04.109
- Oeckl, O., Richard Purschke, y Hoppach. (1970). Tool Changer For Machine Tools. , 1–5.
- Parenti, P., Cataldo, S., Grigis, A., Covelli, M., y Annoni, M. (2019). Implementation of hybrid additive manufacturing based on extrusion of feedstock and milling. *Procedia Manufacturing*, 34, 738–746. Descargado de <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.06.230><https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2351978919309618> doi: 10.1016/j.promfg.2019.06.230
- Powell, F. (2018, Oct). *Subtractive manufacturing 101*. Thomasnet. Descargado de <https://www.thomasnet.com/insights/an-overview-of-subtractive-manufacturing/>
-

- Pérez Porto, J., y Merino, M. (2009). *Definición de firmware*. Descargado de <https://definicion.de/firmware/>
- Rajurkar, K., Zhu, D., McGeough, J., Kozak, J., y Silva, A. D. (1999, Jul). New developments in electro-chemical machining. *CIRP Annals*, 48(2), 567–579. doi: 10.1016/s0007-8506(07)63235-1
- Rap, R. (2020, Feb). *Marlin*. Descargado de <https://reprap.org/wiki/Marlin>
- RESTREPO, S. S. (s.f.-a). *Fdm o modelado por deposición fundida, te explicamos todo!* url<https://www.3dnatives.com/es/modelado-por-deposicion-fundida29072015/>.
- RESTREPO, S. S. (s.f.-b). *Sla: Impresión 3d por estereolitografía, ¿te explicamos todo!* url<https://www.3dnatives.com/es/impresion-3d-por-estereolitografia-les-explicamos-todo/>!
- Rodriguez, E., y Alvares, A. (2020). ScienceDirect ScienceDirect ScienceDirect implementation approach approach for for additive additive manufacturing manufacturing A STEP-NC STEP-NC implementation. *Procedia Manufacturing*, 38(February), 9–16. Descargado de <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.002> doi: 10.1016/j.promfg.2020.01.002
- Rosen, D. (s.f.). *Rapid prototyping for robotics*. urlhttps://www.researchgate.net/figure/Stereolithography-Apparatus-SLA-250-from-3D-Systems-with-a-Schematic-of-the-Process_fig121710062.
- Ruetshle, E., y Haninger, R. (1994). Tool Changer for Tools of a Machine Tool. (19).
- S Živanović, y Glavonjić, M. (2014). Methodology for Implementation Scenarios for Applying Protocol Step-Nc. *Methodology for Implementation Scenarios for Applying Protocol Step-Nc*, 17(1), 71–74. Descargado de <http://www.jpe.ftn.uns.ac.rs/papers/2014/no1/15-Zivanovic.pdf>
- Schuh, G., Kreysa, J., y Orilski, S. (2009). Roadmap „hybride produktion“. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 104(5), 385–391. Descargado de <https://doi.org/10.3139/104.110072> doi: 10.3139/104.110072
- Simmons, J., y Simmons, J. (2019, Jul). *3d slicing software – the basics*. Descargado de <https://the3dbros.com/3d-slicing-software-the-basics/>
- Staff, C. M. (2016, Jan). *creativemechanisms*. Descargado de <https://www.creativemechanisms.com/blog/additive-manufacturing-vs-subtractive-manufacturing>
- Walter, M., Holmström, J., y Yrjölä, H. (2004, 01). Rapid manufacturing and its impact on supply chain management. *Proceedings of Logistics Research Network Annual Conference, Dublin, Ireland*.
- Wohlers Associates Inc. (2015). Wohler's report 2015 - 3D printing and additive manufacturing state of the industry. Annual Worldwide Progress Report. *Wohlers Report 2012*, 32–42.
-

Zhang, Y. (2012). STEP-NC Based High-level Machining Simulations Integrated with CAD / CAPP / CAM. , 9(October), 506–517. doi: 10.1007/s11633-012-0674-9

Lista de Acrónimos y Abreviaturas

AM	Manufactura Aditiva.
CAD	Diseño Asistido por Computadora.
CAM	Fabricación Asistida por Computadora.
CNC	Control Numérico Computarizado.
FDM	(Fused Deposition Modeling) Modelado por deposición fundida.
HM	Manufactura Híbrida.
IDEF0	Definición de integración para el modelado de funciones.
ISO	Organización Internacional de Estandarización.
SM	Manufactura Sustractiva.
STL	STereoLithografía.