



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
MECANICA – MECATRÓNICA

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA BIO IMPRESORA 3D

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
ING. DIEGO ARMANDO ZAMORA GARCÍA

TUTOR PRINCIPAL
DR. ALEJANDRO C. RAMÍREZ REIVICH

MÉXICO, D. F. OCTUBRE 2015

Contenido

Resumen	- 6 -
Introducción	- 7 -
Objetivos.....	- 9 -
Objetivo específico.....	- 9 -
Objetivos particulares.....	- 9 -
1. Estado del arte.....	- 10 -
1.1. Tecnologías de manufactura aditiva	- 10 -
1.2 Tecnologías de Ingeniería de tejidos	- 12 -
1.3 Bio impresión 3D	- 14 -
1.4 Las Bio impresoras actuales.....	- 17 -
2. Diseño conceptual	- 22 -
2.1 Lista de requerimientos	- 22 -
2.2 Análisis funcional.....	- 23 -
2.3 Generación de conceptos.....	- 27 -
2.4 Selección de conceptos.....	- 30 -
2.5 Diseño de precisión	- 31 -
2.5.1 Diseño híbrido.....	- 31 -
2.5.2 Aplicación más directa de la fuerza.....	- 32 -
2.6 Configuración general de la máquina	- 33 -
2.7 Hipótesis sobre el comportamiento de la máquina	- 37 -
3. Fenómenos físicos de la función dosificar.....	- 38 -
3.1 Proceso experimental.....	- 38 -
3.2 Primer prototipo rápido	- 38 -
3.3 Segundo prototipo rápido	- 43 -
3.4 Comportamiento del proceso de impresión 3D con fluidos viscosos.....	- 48 -
3.4.1 El fenómeno de micro extrusión.....	- 48 -
3.4.2 Grosor del filamento a imprimir	- 52 -
3.4.3 Deposición en el espacio tridimensional	- 53 -
4. Diseño de dimensiones y materiales.....	- 56 -
4.1 El robot cartesiano	- 56 -
4.2 Extrusor de material biológico	- 60 -
4.3 Carro de eje X	- 62 -
4.4 Carro de eje Z	- 66 -

4.5 Carro de eje Y	- 69 -
4.6 Estructura base	- 72 -
4.7 Resumen de características del equipo.....	- 73 -
5. Prototipo funcional, pruebas y resultados.....	- 75 -
5.1 Construcción mecánica.....	- 75 -
5.2 Implementación de electrónica y software	- 80 -
5.3 Pruebas y resultados	- 82 -
6. Conclusiones.....	- 87 -
Referencias	- 89 -

Índice de ilustraciones

Ilustración 1. Proceso general de impresión 3D.....	- 10 -
Ilustración 2. Principales procesos de manufactura aditiva, a) Modelado por deposición fundida, b) Estereolitografía, c) Sinterizado asistido por láser.....	- 12 -
Ilustración 3. Vista en microscopio de andamios celulares creados mediante la técnica de electro hilado [13].	- 13 -
Ilustración 4. Micrografía de la superficie de la lengua humana.	- 15 -
Ilustración 5. Modelo tridimensional de un cráneo humano hecho en un programa de CAD.	- 16 -
Ilustración 6. Rutas de impresión generadas por software.....	- 16 -
Ilustración 7. Proceso de Bio-impresión.....	- 16 -
Ilustración 8. Diagrama elaborado que ilustra el proceso general de Bio-fabricación....	- 17 -
Ilustración 9. Función principal con sus entradas y salidas de energía materia e información.....	- 23 -
Ilustración 10. Desglose de las dos funciones principales de una Bio-impresora 3D....	- 24 -
Ilustración 11. Diagrama funcional de la dosificación de material biológico.....	- 25 -
Ilustración 12. Diagrama funcional del posicionamiento en el espacio.	- 26 -
Ilustración 13. Diagrama funcional completo de la máquina a desarrollar.	- 27 -
Ilustración 14. Primer prototipo virtual de la bio-impresora 3D.	- 33 -
Ilustración 15. Segundo prototipo virtual de la Bio-impresora.....	- 34 -
Ilustración 16. Tercer prototipo virtual de la bio-impresora.....	- 35 -
Ilustración 17. Configuración final elegida para la estructura de la Bio-impresora.....	- 36 -
Ilustración 18. Primer prototipo rápido de bomba de micro extrusión.	- 39 -
Ilustración 19. Variables de bomba de micro extrusión.	- 39 -
Ilustración 20. CAD y construcción de prototipo rápido para fabricación de filamentos del material extruido.	- 44 -
Ilustración 21. Interface gráfica de usuario del software de control del prototipo de impresión de dos ejes.	- 44 -
Ilustración 22. Jeringas utilizadas durante las pruebas de impresión. De izquierda a derecha, jeringa con aguja, jeringa sin aguja y jeringa de impresión dental.	- 45 -
Ilustración 23. Impresiones realizadas con una jeringa con aguja metálica y fluido viscoso, se identifican las características presentes en el filamento impreso.....	- 45 -
Ilustración 24. Impresión realizada con una jeringa con aguja metálica y fluido no viscoso (agua).	- 46 -
Ilustración 25. Diferentes grosores de hebras impresas que se consiguieron variando las velocidades de desplazamiento y de extrusión.	- 47 -
Ilustración 26. Gráficos del comportamiento del fenómeno de micro-extrusión.	- 49 -
Ilustración 27. Tres diferentes casos de coordinación de velocidades para la variación del grosor del filamento a extruir.....	- 52 -
Ilustración 28. Grafico que relaciona el grosor del filamento a imprimir con las velocidades V_x y V_f	- 53 -
Ilustración 29. Coordinación de las velocidades de desplazamiento con la de extrusión. ...	- 54 -
Ilustración 30. Estructuras tridimensionales de fluido viscoso, se muestran las acumulaciones de material extra en las esquinas.	- 55 -

Ilustración 31. Configuración estructural y grados de libertad de un robot cartesiano. .	- 56 -
Ilustración 32. Tornillo y tuerca embalerada con un corte longitudinal donde se muestra el mecanismo interno de recirculación de baleros.	- 59 -
Ilustración 33. Guía lineal prismática y bloque lineal embalerado con un corte longitudinal donde se muestra el mecanismo interno de recirculación de rodillos.	- 59 -
Ilustración 34. Forma más adecuada de la punta de un extrusor para materiales viscosos. -	60 -
Ilustración 35. Diagramas de cuerpo libre del extrusor de jeringa	- 61 -
Ilustración 36. Extrusor de jeringa el cual realiza la función de dosificar el material biológico.	- 62 -
Ilustración 37. Geometría general del concepto del carro de X y las fuerzas involucradas.. -	62 -
Ilustración 38. A la izquierda el carro de X en su configuración geométrica final, a la derecha el ensamble de dos μ -extrusores y carro de X.	- 64 -
Ilustración 39. Concepto del carro de Z y las fuerzas involucradas en éste.	- 66 -
Ilustración 40. Carro de Z con geometría optimizada para aumentar su resistencia a las diversas fuerzas a las que estará sometido.	- 67 -
Ilustración 41. Ensamble del carro de Z y el resto de los elementos que se han analizado hasta el momento.	- 68 -
Ilustración 42. Carro de Y con las fuerzas a las que estará sometido.	- 69 -
Ilustración 43. Carro de Y con las modificaciones geométricas pertinentes para aumentar su resistencia y rigidez ante las fuerzas a las que estará sometido.	- 71 -
Ilustración 44. Ensamble de la Bio-impresora 3D con los elementos mostrados hasta el momento: μ -extrusores, carro de X, carro de Y y carro de Z.	- 71 -
Ilustración 45. Estructura de la base principal	- 73 -
Ilustración 46. Ensamble completo del prototipo virtual de la Bio-impresora 3D.	- 74 -
Ilustración 47. Máquina CNC utilizada para la fabricación de las piezas estructurales del prototipo de la Bio-impresora 3D.	- 75 -
Ilustración 48. Maquinado con la estrategia perfilado de las piezas del puente de la impresora.	- 76 -
Ilustración 49. Montaje de guías lineales y banda dentada en el carro de Z de la bio-impresora.	- 77 -
Ilustración 50. Ensamble de carro de Z y carro de Y del prototipo funcional de la Impresora 3D.	- 77 -
Ilustración 51. Ensamble del carro de Y y la estructura fija del prototipo de Bio-impresora 3D.	- 78 -
Ilustración 52. Prototipo funcional de la Bio-impresora 3D completamente ensamblado. -	79 -
Ilustración 53. Diagrama del flujo de información del sistema de control en lazo abierto del prototipo de impresora 3D.	- 80 -
Ilustración 54. Interface gráfica de usuario del software Mach3 interprete de código G y controlador.	- 80 -
Ilustración 55. Tarjeta USB CNC leafboy 77 para conversión de información serial en señales de paso y dirección para el control de motores.	- 81 -
Ilustración 56. Interface de potencia para el control de los motores del prototipo de Bio-impresora 3D.	- 82 -

Ilustración 57. Fabricación de una mono capa, estructura bidimensional de fluido viscoso. - 83 -

Ilustración 58. Fabricación de un toroide, estructura tridimensional de fluido viscoso. . - 84 -

Ilustración 59. Estructura tridimensional el forma de rejilla..... - 85 -

Ilustración 60. Estructura tridimensional en forma de rejilla vista desde un ángulo más inclinado. - 85 -

Diseño y construcción de una Bio impresora 3D

Resumen

La manufactura aditiva es un conjunto de técnicas de fabricación cuya aparición formal se realizó hace 40 años. Debido al vencimiento de algunas patentes en el año 2014 la impresión 3D ha tenido gran impulso y aplicación en diversas áreas, estas técnicas consisten en la fabricación de objetos capa por capa en el plano horizontal. La ingeniería de tejidos es una rama de la ciencia que estudia la creación de tejidos y órganos vivos para su aplicación cultivos celulares y medicina regenerativa. La unión de estas dos técnicas anteriores hace surgir una nueva rama de investigación y desarrollo denominada Bio-fabricación o Bio-impresión 3D, en la cual se pretende fabricar estructuras funcionales de tejidos vivos a través de la utilización de máquinas de manufactura aditiva para la impresión 3D de fluidos Bio-compatibles. En el presente trabajo se describe el proceso mediante el cual se diseñó una impresora 3D de extrusión de fluidos para su aplicación en la fabricación de estructuras tridimensionales de fluidos bio-compatibles, en el primer capítulo se realiza un estudio del estado del arte de la Bio-fabricación desde un punto de vista ingenieril y se presenta la teoría, técnicas y métodos pasados y actuales de la Bio-fabricación, en el segundo capítulo se realiza un diseño conceptual inicial del equipo de Bio-impresión 3D tomando en consideración los requerimientos iniciales, este diseño conceptual es acompañado por hipótesis acerca del comportamiento general que tendrá la máquina, se encuentra que existen dos funciones principales que se ejecutan en paralelo, la función dosificar el fluido Bio-compatible y la función posicionar en el espacio tridimensional. En el tercer capítulo se analiza mediante un enfoque científico la función dosificar el material biológico, se eliminan hipótesis que se habían planteado inicialmente y se substituyen por enunciados demostrados de manera experimental que ayudan a definir consideraciones de diseño. En el cuarto capítulo se especifican las dimensiones y detalles de la impresora 3D, se proporcionan modelos en CAD y se calculan las fuerzas que se requieren para el movimiento de los ejes. En el capítulo cinco se describe el proceso de construcción de un prototipo funcional que tiene el objetivo de demostrar la utilidad y viabilidad de los principios utilizados en el diseño.

Introducción

La fabricación automatizada de piezas y productos es una área de la ingeniería que se ha desarrollado a través de los años y que comenzó con la primera revolución industrial en la Inglaterra del siglo XVII, desde entonces se realizó la introducción gradual de maquinaria en la industria de la transformación para asistir en incluso reemplazar a los obreros. Las máquinas más usadas para la transformación en la industria metal-mecánica han sido, entre otras, los tornos y fresadoras, máquinas utilizadas para el corte y desbaste de todo tipo de metales que han dado forma a la mayoría de las piezas mecánicas fabricadas, estas tecnologías fueron denominadas manufactura substractiva debido a que remueven material para dar formas a las piezas.

Con el auge de los sistemas electrónicos basados en microprocesador se generaliza en los años 80 el uso de las máquinas de control numérico computarizado, estas máquinas fueron la evolución de los anteriores tornos y fresadoras mencionados pero controlados ahora de manera automática a través de la implementación de computadoras digitales. Este gran avance permitió la realización de piezas más complejas y con mayor precisión en sus dimensiones y acabados, además de una mayor repetibilidad y rapidez de fabricación. El impacto y difusión que tuvo esta tecnología automática fue muy grande [1] y continúa en expansión.

Otra rama de la fabricación automatizada de relativa reciente creación es la impresión 3D, este tipo de fabricación se denomina manufactura aditiva debido a que su estrategia es la adición de capas y capas de material en un plano horizontal hasta terminar la pieza a fabricar, en el año 2014 se vencieron las patentes de las tecnologías de impresión 3D FMD (Fused Model Desposition) y SLS (Selective Laser Sintering), con esto se llevó a cabo un gran impulso y desarrollo de la impresión 3D desde el punto de vista industrial, académico e incluso el del aficionado. Se vio la aparición en el mundo de muchas nuevas compañías dedicadas a la fabricación de equipos de impresión 3D, se crearon centros que ofrecen servicios de impresión 3D y nuevas aplicaciones se propusieron en diversas industrias como la metal-mecánica, la de plásticos, la de alimentos, la de construcción e incluso la de la moda.

A la par del desarrollo de las anteriores máquinas automatizadas, otra rama de la ciencia llamada ingeniería de tejidos se desarrollaba, ésta fue derivada de la medicina, la biología y la ciencia de materiales, su objetivo siempre fue la fabricación, pero no de piezas mecánicas, sino de tejidos vivos para su implantación en seres humanos, esto es cultivos celulares y medicina regenerativa. Su técnica fue la fabricación de andamios celulares, los cuales son estructuras porosas en las cuales es posible cultivar células vivas, pero ésta técnica representa muchos inconvenientes como la exacta colocación de dichas células y la morfología exacta que debe tener el andamio celular.

Con la unión de las tecnologías de manufactura aditiva e ingeniería de tejidos se creó una nueva rama del conocimiento denominada Bio-impresión 3D o Bio-fabricación, con ésta se pretende fabricar tejidos vivos e incluso órganos funcionales a través del uso de máquinas automatizadas, esto es un área de alta expectativa a nivel mundial y de alto valor agregado, por un lado los países menos desarrollados se aferran a producir

productos en masa y a abaratar sus costos de producción, por otro lado, los países desarrollados se centran en el diseño de productos de alto valor agregado con el caso de la Bio-fabricación, la cual es una mejor estrategia desde un punto de vista económico y social [2].

Con lo anterior en mente se propuso el desarrollo de una máquina Bio-impresora 3D, el objetivo fue realizar el diseño de un equipo que implementara la tecnología de manufactura aditiva para para la fabricación de estructuras tridimensionales de fluidos Bio-compatibles, como células, hidrogeles, colágenos y otros materiales utilizados en la ingeniería de tejidos.

Este equipo será de gran importancia en el futuro, será muy usado en los hospitales, laboratorios, institutos y universidades, será tan esencial como lo es hoy en día un multímetro para un electrónico o como lo es un horno para un panadero. Esto se debe a las posibilidades que ofrecen éstas máquinas en cuanto a Bio-fabricación, algunas de las aplicaciones inmediatas se describen a continuación.

- Fabricación de arreglos de gotas para cultivos.
- Fabricación de andamios celulares con morfología y porosidad variable.
- Fabricación de estructuras tridimensionales con múltiples fluidos.
- Impresión directa de células vivas embebidas en fluidos Bio-compatibles.

Como resultado del trabajo realizado se tiene un entendimiento de cómo se lleva a cabo el proceso de Bio-fabricación, cual es la mejor ruta que se debe seguir para fabricar tejidos, se cuenta con un diseño conceptual de un equipo de Bio-impresión y se cuenta con un prototipo funcional que construye estructuras tridimensionales de fluidos viscosos.

Objetivos

Objetivo específico

Diseñar una máquina que implemente la tecnología de manufactura aditiva para la fabricación de estructuras tridimensionales de fluidos Bio-compatibles con aplicaciones en ingeniería de tejidos y medicina regenerativa.

Objetivos particulares

- Encontrar las funciones principales o críticas que debe llevar a cabo el equipo de Bio-impresión 3D.
- Realizar propuestas conceptuales para dar solución a las funciones principales encontradas y seleccionar las mejores.
- Realizar un estudio de los fenómenos físicos involucrados en el cumplimiento de la o las funciones principales encontradas.
- Construir un prototipo rápido funcional para demostrar la utilidad del diseño planteado durante el trabajo.

1. Estado del arte

1.1. Tecnologías de manufactura aditiva

El proceso de prototipado rápido es definido por ingenieros y consultores como la creación de prototipos económicos para la validación ante clientes, proveedores o inversionistas de conceptos generados antes de la creación del producto final, recientemente un comité técnico formado en ASTM (American Society for Testing Materials) Internacional acordó que debe ser usada una nueva terminología para definir estas prácticas y entonces acuñó el término manufactura aditiva.

Las raíces de la manufactura aditiva datan de hace 150 años con las técnicas de topografía y foto-escultura, las cuales pueden categorizarse como procedimientos manuales. Las técnicas de manufactura aditiva moderna pueden rastrearse hasta 1951 con la creación del proceso actualmente conocido como estereolitografía [3].

El principio básico de la manufactura aditiva es que un modelo inicialmente creado digitalmente mediante software de CAD (Computer Aided Design) pueda ser fabricado directamente sin la necesidad de un proceso de planeación [4], lo anterior a través de una extracción de coordenadas del modelo tridimensional para ser usadas en robots que fabrican automáticamente el modelo, esta fabricación se da mediante la adición de material en capas en el plano horizontal, esta consecutiva adición en capas da como resultado la construcción final del producto impreso. El proceso general de manufactura aditiva sigue los pasos que se describen a continuación.



Ilustración 1. Proceso general de impresión 3D.

1. **CAD.** Se crea un modelo digital tridimensional de la estructura que se desea fabricar en un programa de diseño asistido por computadora.
2. **Conversión a STL.** El modelo generado debe convertirse a un formato STL el cual no contiene información acerca del color, texturas o propiedades físicas del objeto, solamente contiene información sobre su geometría.
3. **Transporte del archivo STL a la máquina.** El archivo anteriormente creado es importado a la máquina de manufactura aditiva la cual crea una serie de coordenadas espaciales del modelo, las rutas de impresión.
4. **Construcción.** La máquina de manufactura flexible realiza el proceso de manufactura de manera automática, existen tres principales procesos de construcción que se describirán más adelante.
5. **Remoción.** La estructura impresa terminada debe retirarse de la máquina de manufactura aditiva, para esto existen una serie condiciones que se deben considerar dependiendo del proceso de construcción, por ejemplo asegurarse que la temperatura en el área de impresión de la máquina no sea alta al retirar la pieza.
6. **Post-procesado.** Dependiendo del uso que se le desee dar a la recién creada pieza, es posible que se requiera una etapa de post-procesado para dar alguna terminación a la pieza como puede ser pulido o remoción de material extra.
7. **Aplicación.** El último paso es la utilización, en la cual las actuales técnicas de manufactura aditiva están pasando de las aplicaciones de prototipos demostrativos a la de productos terminados [5], [6].

Para llevar a cabo la etapa número 4, de construcción, existen hasta la fecha más de 200 diferentes técnicas de prototipado rápido, existen tres principales técnicas que por su aplicación han sobresalido entre las demás y se describen a continuación, cada una presenta sus ventajas y desventajas.

- **Modelado por deposición fundida.** Conocido por sus siglas en inglés FMD, en este proceso de construcción el material para la fabricación es calentado hasta el punto de fusión y es extruido a través de una boquilla de diámetro definido para obtener un filamento de material, este filamento es desplazado en el plano horizontal para crear una capa de la pieza, cuando una capa es completada el cabezal se desplaza hacia arriba para crear una nueva capa sobre la anterior.
- **Estereolitografía.** Conocido por sus siglas en inglés SLA o LS y también conocida como foto solidificación, es el proceso mediante el cual es solidificado un material foto-polimérico ante la presencia de un rayo de luz. En un tanque con el polímero foto sensible el rayo de luz es desplazado en la superficie del polímero solidificándolo y creando una capa del modelo, posteriormente el modelo es sumergido la profundidad correspondiente a una capa quedando el polímero líquido en la superficie listo para que el rayo de luz solidifique una nueva capa.
- **Sinterizado selectivo por láser.** Conocido por sus siglas en inglés SLS. Durante este proceso se deposita una capa de polvo de unas cuantas decimas de milímetro en un contenedor cuya temperatura se encuentra próxima al punto de fusión de este polvo, posteriormente un láser de CO2 sinteriza este polvo en

puntos selectos solidificando y uniendo el material para crear una capa de la pieza, este proceso se repite hasta concluir la construcción de la pieza.

En la ilustración 2 se muestran gráficamente los procesos anteriormente descritos.

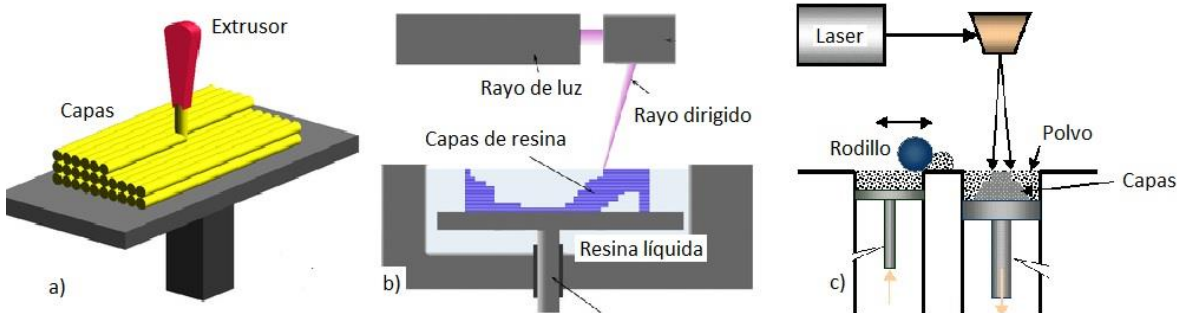


Ilustración 2. Principales procesos de manufactura aditiva, a) Modelado por deposición fundida, b) Estereolitografía, c) Sinterizado asistido por láser.

En la actualidad, diversos especialistas en la materia creen que la manufactura aditiva generará una nueva revolución industrial al disminuir los tiempos de fabricación de piezas, la disminución del material desperdiciado durante la fabricación y el aumento en la complejidad de los elementos impresos [7], [8].

1.2 Tecnologías de Ingeniería de tejidos

La Bio-fabricación es llevada a cabo por la disciplina que lleva el nombre de ingeniería de tejidos. La ingeniería de tejidos, es una rama de la ingeniería biomédica cuyo objetivo es la producción de células, tejidos y órganos funcionales con el objetivo de reparar, reemplazar o mejorar funciones biológicas, lo anterior con aplicaciones en medicina regenerativa. El método convencional de la ingeniería de tejidos para la creación de estructuras vivas es mediante el uso de andamios celulares [9] [10], los cuales son estructuras de materiales Bio-compatibles como ácido poliláctico, ácido poliglicólico, materiales basados en hidroxiapatita y materiales basados en hidrogeles entre otros muchos otros que existen y otros que se encuentran en desarrollo para tejidos y técnicas específicas [11].

Estos andamios son creados en condiciones asépticas con diferentes morfologías, propiedades químicas y materiales, después de creados, son cubiertos con células vivas y algunos factores de crecimiento, de esta manera las células implantadas en el andamio se reproducen y adquieren la morfología del mismo. Una vez adaptadas las células, el andamio es colocado en la parte de cuerpo en la que se requiere una regeneración del tejido. Un ejemplo muy conocido de esta técnica se puede apreciar en los experimentos realizados por el Dr. Charles Vacanti y sus colegas de la Universidad Médica de Massachusetts, quienes fabricaron un andamio en forma de oreja y lo implantaron en el dorso de un ratón [12]. En la ilustración 3 se aprecian acercamientos a andamios celulares.

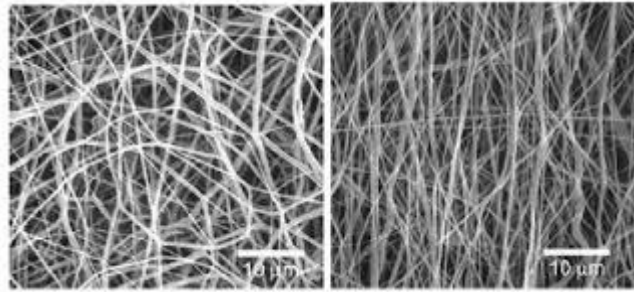


Ilustración 3. Vista en microscopio de andamios celulares creados mediante la técnica de electro hilado [13].

Las técnicas más utilizadas para la fabricación de andamios celulares junto con sus características, ventajas y desventajas se presentan en la tabla 1 mostrada a continuación.

Tabla 1. Técnicas de fabricación de andamios celulares.

Técnica	Tamaño del poro (μm) y porosidad (%)	Ventajas	Desventajas
Deshidrocongelación	< 200 < 99	<ul style="list-style-type: none"> • Simples pasos del proceso • Alta porosidad • Alta interconectividad de los poros 	<ul style="list-style-type: none"> • Control limitado de tamaño del poro y geometría. • Tiempo de uso
Electrohilado	0.01 – 900 70-92	<ul style="list-style-type: none"> • Pueden ser usados diversos materiales. 	<ul style="list-style-type: none"> • Usa solventes • La geometría del poro es incontrolable
Formación de gas	30 -40 < 90	<ul style="list-style-type: none"> • Proceso simple • Libre de disolvente 	<ul style="list-style-type: none"> • Tamaño del poro y geometría incontrolables • Limitada interconectividad de los poros
Formación de gas y lixiviación de partículas	< 200 88 – 94	<ul style="list-style-type: none"> • Alta porosidad • Libre de solvente 	<ul style="list-style-type: none"> • Geometría incontrolable
colada con disolvente y lixiviación de partículas	< 300 82 – 92	<ul style="list-style-type: none"> • Proceso simple • Alta porosidad 	<ul style="list-style-type: none"> • Uso de solvente • Espesor limitado en la estructura • Limitada interconectividad de los poros
Esterolitografía	170 - 500	<ul style="list-style-type: none"> • Libre de solvente • Geometría y porosidad controlable 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere materiales foto-reticulables.

Modelado por deposición fundida	160 – 700 < 80	<ul style="list-style-type: none"> • Porosidad controlable • Buena integridad estructural • Libre de solventes 	<ul style="list-style-type: none"> • Necesidad de alta temperatura • Solo materiales termoplásticos
Sinterización selectiva por laser	Depende de las necesidades	<ul style="list-style-type: none"> • Controlable porosidad y morfología 	<ul style="list-style-type: none"> • Proceso a alta temperatura.

Sin embargo, solo unos pocos tejidos simples pueden ser creados mediante estas técnicas debido a que los órganos poseen diversos tipos de células y una compleja red de vasos sanguíneos que difícilmente pueden ser construidos mediante las técnicas mostradas en la tabla 1. Otras de las limitaciones del enfoque de andamios celulares con las técnicas de fabricación convencionales son las siguientes:

1. Mala distribución celular en las estructuras 3D, especialmente debajo de la superficie del andamio.
2. Difícil e impreciso el posicionamiento de múltiples tipos de células.
3. La composición del andamio en diferentes posiciones.
4. Concentración local de factores de crecimiento específicos.
5. Imposibilidad de introducción de complejas redes sanguíneas.
6. Escaso control en la biodegradación del andamio

En el intento de superar estas limitaciones se creó el concepto de Bio-impresión alrededor del año 2003, científicos como el Dr. Gabor Forgacs, Dr. Vladimir Mironov y El Dr. Thomas Boland entre otros, imprimieron células vivas en una impresora de inyección convencional y demostraron que las células sobrevivían al proceso de impresión [14] [15]. Este fue el inicio del concepto y práctica de la Bio-impresión 3D.

1.3 Bio-impresión 3D

Al combinar las tecnologías de manufactura aditiva con la ingeniería de tejidos nace la Bio-impresión 3D, cuyo principio de funcionamiento es la creación de tejidos vivos mediante la impresión directa de células vivas y/o fluidos Bio-compatibles, ésta abre un nuevo horizonte en el concepto de Bio-fabricación debido a que elimina muchos de los problemas que se presentan mediante el enfoque de andamios celulares. Mediante la impresión 3D, es posible colocar diversos tipos de células en lugares específicos del espacio de manera muy precisa.

Ya se han realizado desarrollos en Bio-impresoras, el mecanismo de posicionamiento es el mismo para todos los casos, se cuenta un robot cartesiano, cuyos ejes se desplazan con determinada precisión siguiendo una serie de movimientos pre-programados en una lista de instrucciones denominada código G. Estos desplazamientos controlados se realizan para posicionar una herramienta de deposición de células vivas embebidas en materiales biodegradables que sirven a la vez de andamios estructurales. Es esta herramienta la que le da a una impresora 3D, la característica de Bio-impresora.

Existen diversos mecanismos para la herramienta colocadora de células vivas, entre los desarrollos más destacados se encuentran la extrusión [16], la impresión asistida por láser [17], la impresión con micro válvula [18], la impresión por inyección [19] y la impresión de fragmentos de tejido [20]. Las anteriores técnicas tienen sus ventajas y desventajas, cada una de ellas ha sobresalido en alguna aplicación particular y deben perfeccionarse [21].

Existen en la actualidad diversas investigaciones a nivel mundial acerca del desarrollo de Bio-impresoras, los resultados de las investigaciones de estos equipos de trabajo, marcan la actual pauta del proceso de Bio-impresión, el cual en general es una adaptación del tradicional proceso de manufactura mediante máquinas de control numérico por computadora pero con características enfocadas en el manejo de células vivas. Los Bio-materiales utilizados son tan amplios como los grupos de investigación dedicados a la ingeniería de tejidos, pero destacan los fluidos naturales como los colágenos [22].

A continuación se describirá el proceso actual de Bio-impresión mediante el cual se llega a la creación de una estructura viva, a este procedimiento han llegado algunos de los actuales investigadores en la rama de la Bio-fabricación. También se han presentado propuestas de diseño de líneas automatizadas de Bio-fabricación [23] [24].

1. Primero es necesario adquirir en formato digital un modelo tridimensional de la estructura a construir, este procedimiento es más comúnmente realizado con escáneres 3D, resonancias magnéticas y micrografías entre otras. Existen diversos formatos en los que se puede presentar este modelo, uno de los más usados es el STL (STereo Lithography), esto debido a los perfeccionados algoritmos existentes para la generación de rutas de impresión a partir de estos. En la ilustración 4 se muestra un modelo 3D realizado mediante micrografía.



Ilustración 4. Micrografía de la superficie de la lengua humana.

2. Después es necesario procesar el modelo tridimensional anteriormente descrito para corregir los errores durante la adquisición del modelo, esto se realiza con programas de CAD convencionales. Algunas empresas como Autodesk y Organovo ya están trabajando en conjunto para crear un software de CAD específico para Bio-aplicaciones.



Ilustración 5. Modelo tridimensional de un cráneo humano hecho en un programa de CAD.

3. Más tarde, el modelo tridimensional anteriormente adquirido y editado, debe pasar a un programa de manufactura asistida por computadora (CAM), el cual genera las rutas de impresión y las interpreta en código G para la impresora 3D. Los programas en código G son tradicionalmente hechos a mano, pero esta labor se vuelve muy compleja y tardada para estructuras tridimensionales, por lo tanto esta práctica comienza a obsoletizarse.

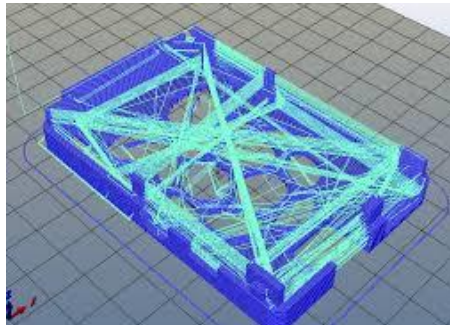


Ilustración 6. Rutas de impresión generadas por software.

4. En seguida, se pasa al proceso de Bio-impresión en el cual es utilizada la Bio-impresora 3D, la cual tiene almacenadas las “Bio-tintas” las cuales suelen ser hidrogeles impregnados de células vivas diferenciadas, después, siguiendo las rutas trazadas por el código G, se depositan las Bio-tintas de manera precisa en lugares específicos del espacio mediante el uso de robots cartesianos controlados por computadora.

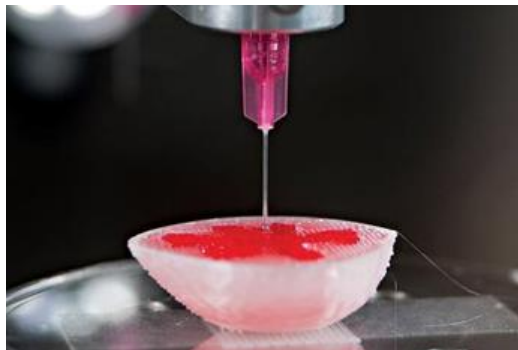


Ilustración 7. Proceso de Bio-impresión.

5. El último paso, una vez creada la estructura tridimensional, es ponerla en un Bio-reactor, el cual es una máquina que proporcionará al tejido las condiciones que tendría estando en el cuerpo humano, esto con el objeto de acondicionar al tejido.

En la siguiente ilustración se presenta, a modo de resumen, un diagrama del proceso de Bio-impresión 3D. Este proceso aún tiene desventajas y retos [25].

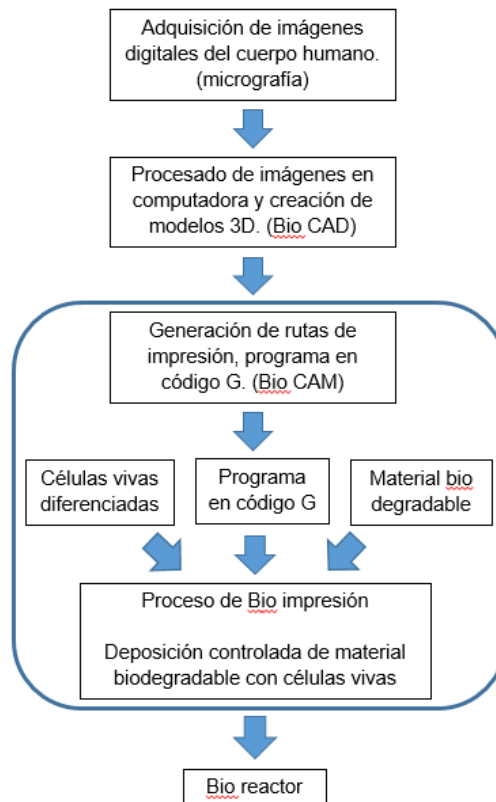
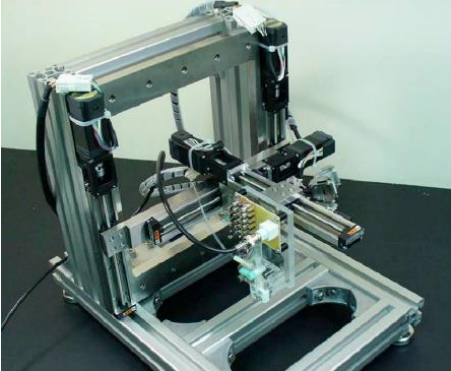
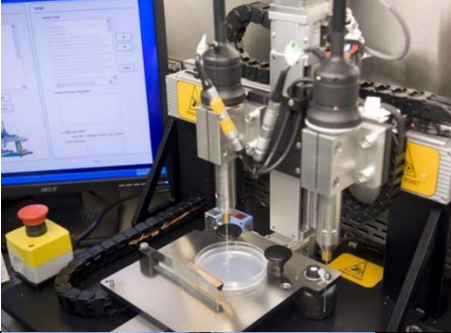
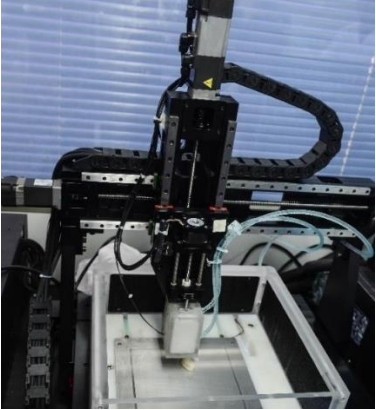







Ilustración 8. Diagrama elaborado que ilustra el proceso general de Bio-fabricación.


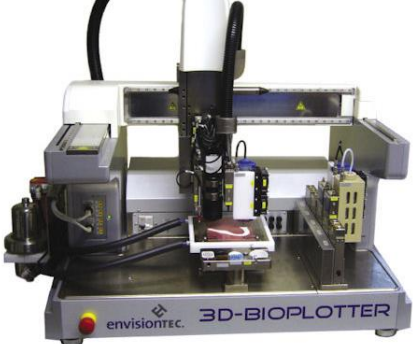

1.4 Las Bio-impresoras actuales

El proceso descrito en la sección anterior, está siendo estudiado y perfeccionado por diversos centros de investigación y universidades alrededor del mundo. En la tabla 2 se muestran algunas de las más importantes Bio-impresoras desarrolladas a nivel mundial junto con sus principales características, destacan en funcionalidad las máquinas suizas y alemanas. Fue importante realizar este estudio comparativo para tener un punto de referencia en cuanto al desarrollo y venta de máquinas comerciales con aplicaciones en Bio-fabricación.

Tabla 2. Principales Bio-impresoras desarrolladas.

Imagen	Datos	Características
	<p>Bio-impresora de inyección</p> <p>Dr. Makoto Nakamura Dr. Yuichi Nishiyama</p> <p>Universidad de Toayama, Japón, 2007.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Bio-impresora de inyección, usa un inyector de impresora Epson y dosifica gotas de hidrogel mediante el principio piezo eléctrico. ➤ La impresión requiere de una cama de sustancia para gelar al contacto el hidrogel depositado.
	<p>Bio-impresora Organovo</p> <p>Varios autores</p> <p>San Diego, California, USA, 2013.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Creadores de la primer Bio-impresora comercial para la investigación científica de tejidos vivos, la deposición es mediante extrusión.
	<p>Bio-impresora Regenovo</p> <p>Dr. Xu Ming-In</p> <p>Universidad Hanghou of Science and Technology, eastern Zhejiang, China, 2013.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Bio-impresora para investigación, el material es depositado mediante extrusión, tiene características similares a la Organovo.
	<p>Bio-impresora Re-human</p> <p>Varios autores</p> <p>Unique technology en Qingdao, Shandong, China, 2013</p>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ No ay muchos datos, se observa un robot cartesiano con múltiples extrusores.

	<p>Bio-impresora multi brazos.</p> <p>Ibrahim Ozbolat Howard Chen</p> <p>Universidad de Iowa, Iowa, USA,</p>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ La característica principal de esta Bio-impresora, es la de tener dos mecanismos de inyección con movimientos independientes. ➤ Es controlada mediante el software Mach 3.
	<p>Bio-impresora</p> <p>Dr. Lawrence Bonassar</p> <p>Universidad de Cornell, USA,</p>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Esta Bio-impresora trabaja bajo el principio de extrusión. ➤ Es una adaptación de un proyecto de impresora 3D de código abierto llamada Fab Home.
	<p>Bio-printer</p> <p>Dr. Gabor Forgacs</p> <p>Universidad de Missouri, USA, 2005</p>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Primera versión de la Bio-impresora de la universidad de Missouri, cuenta con un extrusor.
	<p>Bio-printer</p> <p>Dr. Gabor Forbacs</p> <p>Universidad de Missouri, USA, 2007</p>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Es una versión mejorada de la anterior Bio-impresora, ésta cuenta con un ambiente controlado y con múltiples inyectores de extrusión.

	<p>Discovery</p> <p>Varios autores</p> <p>RegenHU, Suiza, 2013.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Modularidad en las deposiciones celulares. ➤ Ambiente controlado (temperatura, humedad y composición de gas). ➤ Impresión bajo condiciones fisiológicas. ➤ Precisión micrométrica. ➤ Bio CAD-CAM Software. ➤ Iniciativa privada
	<p>3D Bioploter</p> <p>Varios autores</p> <p>EnvisionTEC, Brüsseler Straße 51 • D-45968 Gladbeck, Alemania, 2014.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Resolución de .001 mm ➤ Velocidad máxima de 150 mm/s. ➤ Area de trabajo 150*150*140mm. ➤ Cámara de video de alta resolución. ➤ Extrusor de .1mm.
	<p>Bioscaffolder 2.1</p> <p>Varios autores</p> <p>GeSiM Gesellschaft für Silizium- Mikrosysteme mbH Bautzner Landstrasse 45, 01454 Grosserkmannsdorf Germany</p>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Múltiples inyectores. ➤ Inyectores intercambiables. ➤ Creación de andamios celulares. ➤ Creación de estructuras vivas.

Al realizar observaciones a las diferentes máquinas, se puede apreciar que cuentan con algunas características comunes.

- Son robots cartesianos.
- Su control es digital basado en computadora.
- Entregan precisiones micrométricas.

Según las observaciones realizadas y el estudio llevado a cabo en fuentes de información especializadas, no se detalla el fenómeno involucrado en el proceso de impresión desde un punto de vista mecánico. La mayoría de los estudios llevados a cabo hasta el momento centran su atención en el comportamiento de las células pre y pos impresión, pero no hablan acerca de los fenómenos físicos involucrados en el proceso de fabricación.

Para lograr la creación de las estructuras tridimensionales con geometría específica ¿qué variables deben tomarse en cuenta? Al trabajar con diversos tipos de fluidos que

tendrán diferentes propiedades mecánicas como viscosidad y tensión superficial ¿Cómo debe comportarse la impresora para compensar los cambios que sufrirá la estructura al enfrentarse a la gravedad?

Estas fueron algunas de las preguntas realizadas inicialmente, preguntas clave para la fabricación adecuada de estructuras tridimensionales.

2. Diseño conceptual

2.1 Lista de requerimientos

El desarrollo e implementación de máquinas para la fabricación de estructuras tridimensionales de fluidos viscosos Bio-compatibles es hasta el día de hoy un área experimental. Solo es posible definir una serie de requerimientos iniciales ideales y después definir requerimientos marginalmente aceptables. Los requerimientos necesarios son sacados de diversas fuentes como artículos científicos, libros especializados y consultas a especialistas del área. Primero se procede a enlistar las variables involucradas en el proceso de creación de estructuras tridimensionales con fluidos viscosos Bio-compatibles, estas variables son independientes del equipo o maquinaria utilizada para su elaboración.

1. Exactitud de la máquina.
2. Resolución de la máquina.
3. Repetibilidad en la fabricación.
4. Velocidades.
5. Aceleraciones.
6. Volumen de trabajo.

Según los estudios realizados por los expertos en el área de la ingeniería de tejidos, los cuales han sido publicados en artículos recientes, solo existen tres variables importantes en el proceso de Bio-impresión 3D.

1. Resolución de la impresión.
2. Viabilidad celular.
3. Materiales usados.

Las primeras seis variables están relacionadas con la mecánica del equipo a utilizar, éstas pueden cuantificarse para definir los valores ideales y los valores marginalmente aceptables en los que se debe basar el diseño, estos valores se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Requerimientos ideales y marginalmente aceptables para el diseño.

Variable involucrada	Cuantificación	Valor ideal	Valor marginalmente aceptable
Exactitud en la máquina	μm	50 μm	100 μm
Resolución de la máquina	μm	50 μm	100 μm
Repetibilidad en la fabricación	% de similitud	100 %	90%
Velocidades	mm/s	1000 mm/s	100 mm/s
Aceleraciones	mm/s ²	1000 mm/s ²	100 mm/s ²
Volumen de trabajo	mm * mm * mm	300 mm * 300 mm * 200 mm	150 mm * 150 mm * 100 mm

Las variables de materiales usados y viabilidad celular dependen no solo de las características mecánicas del equipo a diseñar, sino también de factores como nutrientes utilizados, tipos de células cultivadas, morfología necesaria para la estructura que se desea fabricar, químicos utilizados en el material entre otros, por lo tanto estas variables no se atacarán en el presente trabajo, solo se utilizarán los fluidos Bio-compatibles estandarizados por la FDA (Food and Drug Administration) para la realización de cultivos celulares.

2.2 Análisis funcional

Se hizo uso de la técnica de análisis funcional [26], la cual es una representación abstracta del comportamiento de la máquina a diseñar en la que no se definen elementos mecánicos, ésta técnica tiene el objeto de identificar en una etapa temprana del diseño de ingeniería las funciones principales que la máquina debe llevar a cabo. La importancia de realizar este análisis radica en que la identificación de las funciones principales permitirá trabajar posteriormente en los procesos críticos o de mayor importancia en la máquina sin desviar la atención en partes o características secundarias que tendrían un bajo impacto en los resultados finales del funcionamiento de la máquina.

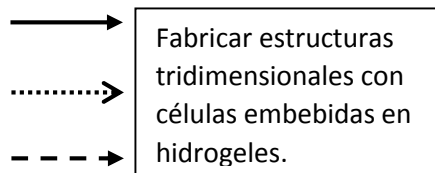
En toda maquinaria diseñada por el hombre, existen tres elementos que pueden ser manipulados y transformados: energía, materia e información. En el caso del presente diseño se define que la entrada de energía es eléctrica, la entrada de materia son fluidos viscosos Bio-compatibles en los que pueden o no ser embebidas células vivas diferenciadas y la entrada de información es la forma final que debe tener la estructura de fluido a fabricar. El trabajo presentado es un diseño adaptativo, esto implica que se conocen con anticipación algunas de las sub funciones que realizará la máquina. Para encontrar la función principal, la función más importante se debe realizar la siguiente pregunta ¿Qué labor llevará a cabo la máquina? Y la respuesta fue fabricar, fabricar estructuras tridimensionales con células embebidas en fluidos Bio-compatibles también conocidos como hidrogeles. En la ilustración 9 se muestra un diagrama de la función principal con sus entradas y salidas de energía, materia e información, cada una de estas caracterizada por un tipo de línea. Se puede apreciar que habrá una transformación en la forma de la materia.

Entradas:

Energía eléctrica.

Células embebidas en fluidos Bio-compatibles.

Geometría que se desea obtener.



Salidas:

Estructura tridimensional.

Ilustración 9. Función principal con sus entradas y salidas de energía materia e información.

Se sabe que es necesario que se varíe la forma de las estructuras a fabricar, esto para adaptarse a las necesidades geométricas y de porosidad que la aplicación de la estructura requieran, lo anterior coloca a la máquina en el rango de manufactura flexible, la cual es lograda por controles automatizados mediante sistemas micro procesados, al variar las estructuras a fabricar es necesario variar los movimientos de la máquina por lo cual se define una de sus principales funciones, la cual es el posicionamiento en el espacio tridimensional.

Abstrayendo la información y pensando en el funcionamiento de la máquina, se encuentra que su funcionamiento puede dividirse en dos funciones principales, dos funciones críticas que se ejecutan en paralelo, una es posicionar en el espacio tridimensional y la otra es dosificar el material biológico en puntos específicos de ese espacio tridimensional. También existen funciones auxiliares como son la de interactuar con el usuario y la de procesar información, lo que convierte a esta máquina en un equipo mecatrónico.

Para la función de posicionamiento en el espacio tridimensional, existen diversas soluciones robóticas, todas ellas requieren de cuidados y detalles que deben ser considerados para llevar a cabo su correcto funcionamiento, y aunque su diseño no es un problema trivial, no se requiere mayor investigación que la aplicación de las teorías existentes de robótica.

En lo que concierne a la función de dosificar el material biológico, la cual es considerada la función más importante de todo el diseño, requiere de un entendimiento más profundo de los fenómenos físicos involucrados. Entender estos fenómenos es la diferencia entre el éxito y el fracaso en el adecuado funcionamiento de la máquina. El desglose de las sub funciones mencionadas se muestra en la ilustración 10.

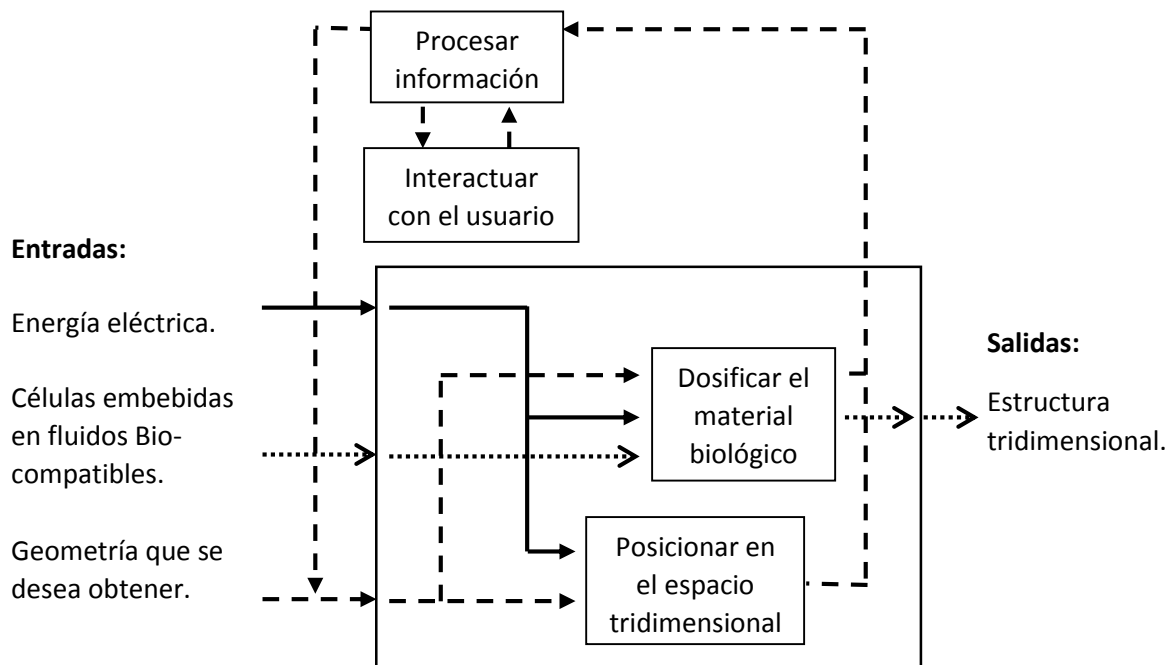


Ilustración 10. Desglose de las dos funciones principales de una Bio-impresora 3D.

Para las funciones de procesar información y de interacción con el usuario que aparecen en todos los diagramas funcionales se han definido previamente los principios de trabajo a utilizar, esto debido a la marcada superioridad de algunos elementos en específico para cumplir con tales funciones. El detalle de los principios de trabajo utilizados para estas funciones se mencionará en el capítulo correspondiente a la selección de conceptos

De las dos funciones principales (posicionar en el espacio tridimensional y dosificar el material biológico) se comenzó con analizar la función más importante, la cual es dosificar al material biológico, se considera la función de contenido debido a que es en donde la materia prima realiza un cambio de fase, es ahí en donde se realiza la transformación de la geometría del fluido Bio-compatible y es ahí en donde se encuentran las fronteras naturales que deben de ser entendidas y controladas [27]. Un diagrama funcional específico para la función dosificar el material biológico se muestra en la ilustración 11.

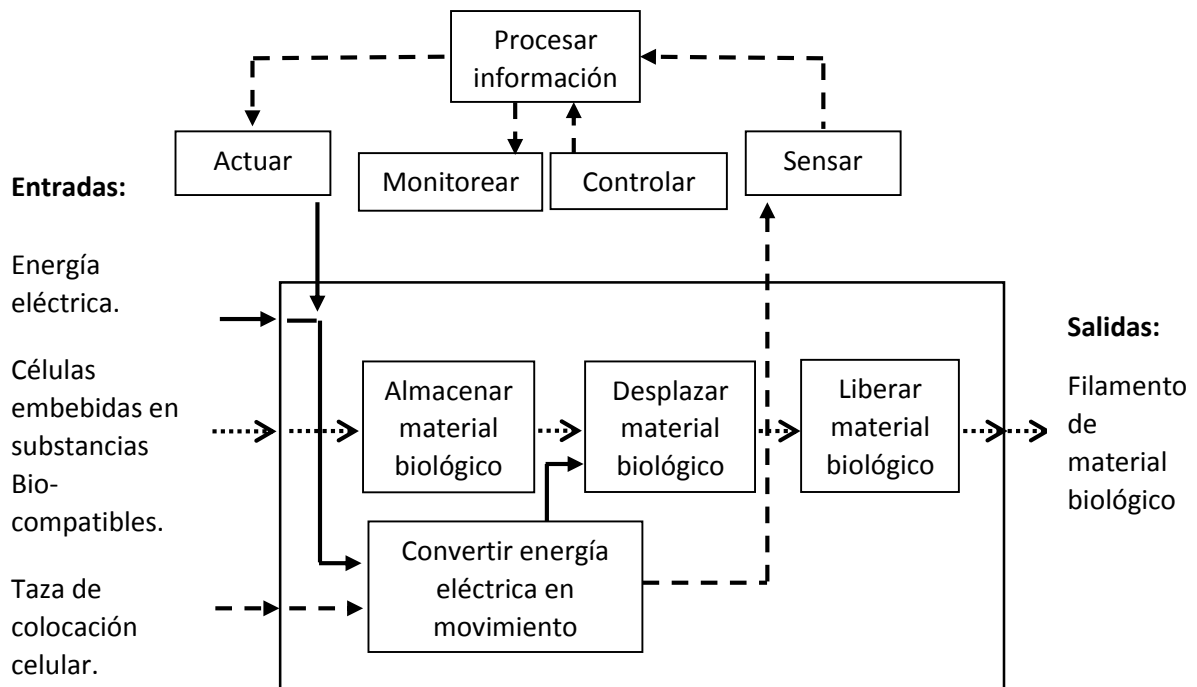


Ilustración 11. Diagrama funcional de la dosificación de material biológico.

Se realizará una transformación de la forma de los fluidos Bio-compatibles a trabajar, no se realizarán transformaciones químicas de las moléculas que los componen, esto implica tener primeramente almacenado en un lugar específico y controlado el fluido bio-compatible, posterior al almacenaje éste debe de ser desplazado hacia donde se encontrará la estructura tridimensional, el desplazamiento implica un proceso controlado del caudal que se utilizará, finalmente la liberación del material biológico es la forma en la que pasará de la fase de almacenaje a la fase de geometría deseada, esta última función tiene más implicaciones como que la liberación debe de realizarse en las porciones más pequeñas posibles y debe de ser ordenada para el orden también se mantenga en la estructura tridimensional que se está fabricando. A continuación se enlistan las tres subfunciones principales y las características que cada una debe de presentar.

Almacenar el material biológico.

- Debe tener el volumen adecuado dependiendo de las geometrías a fabricar
- Debe estar en un ambiente con temperatura y limpieza adecuadas

Desplazar el material biológico.

- Desplazamiento controlado del caudal
- Desplazamiento ordenado

Liberar el material biológico.

- Porciones lo más pequeñas posibles.
- Liberación ordenada

La segunda función principal es, como se ha comentado, el posicionamiento en el espacio tridimensional, será necesario en la máquina a diseñar no solo dosificar de manera controlada el material biológico, si no también posicionar este material biológico en puntos específicos del espacio tridimensional. Es claro que la complejidad y altura de las estructuras a fabricar dependerá en gran parte de las propiedades mecánicas del fluido que se trabaje, las propiedades principales que se deben de tomar en cuenta son la viscosidad y la tensión superficial, pero es importante que el movimiento del equipo de Bio-impresión 3D no sea una limitante y permita construir diversas estructuras complejas, permitiendo que la limitación en la altura y las geometrías quede solo en función de las capacidades del fluido Bio-compatible. En la ilustración 12 se muestra el diagrama funcional para el posicionamiento en el espacio tridimensional.

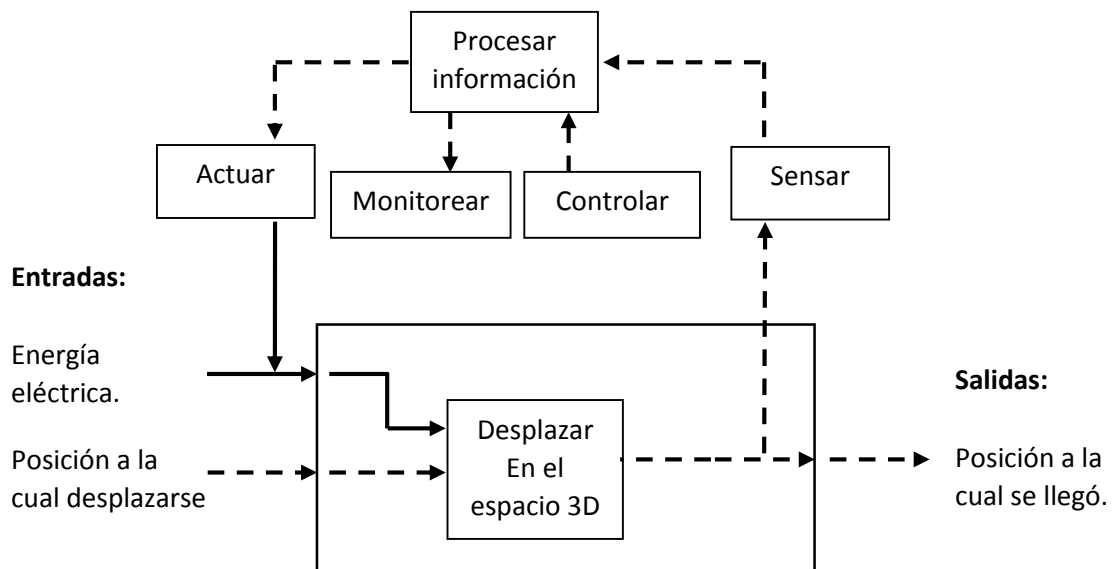


Ilustración 12. Diagrama funcional del posicionamiento en el espacio.

Se puede apreciar en el diagrama de la ilustración 12 que para el posicionamiento en el espacio tridimensional no existe transferencia de materia, solo de energía e información, es necesario encontrar el mejor principio de trabajo para la función desplazar en el espacio tridimensional, este desplazamiento debe de contar con ciertas características y requerimientos que ya se han definido en la primera sección de este capítulo.

Finalmente pueden integrarse todas las sub funciones en un solo diagrama funcional, este se muestra en la ilustración 13.

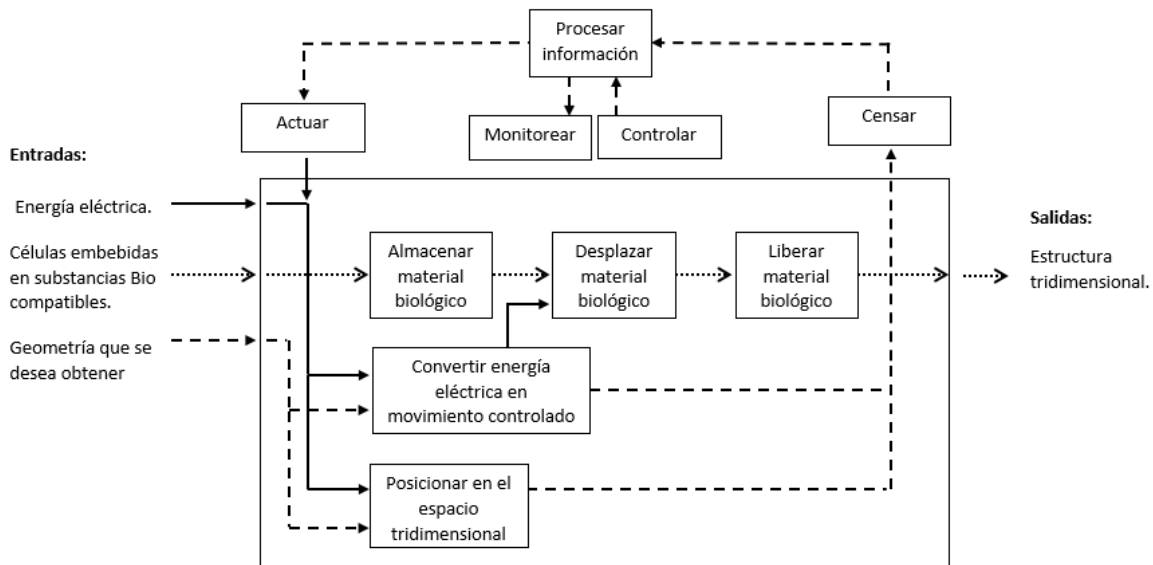


Ilustración 13. Diagrama funcional completo de la máquina a desarrollar.

En la siguiente sección se detallarán algunos principios de trabajo para dar solución a las funciones principales mencionadas y posteriormente se seleccionaran los que mejor se adapten a los requerimientos del diseño.

2.3 Generación de conceptos

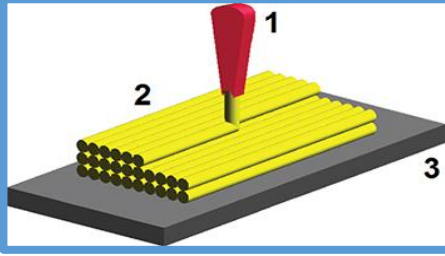
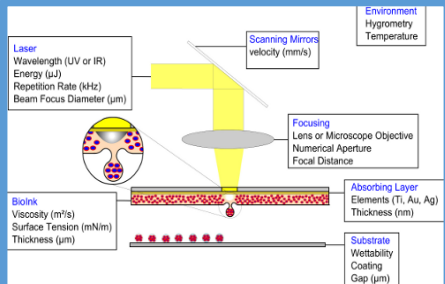
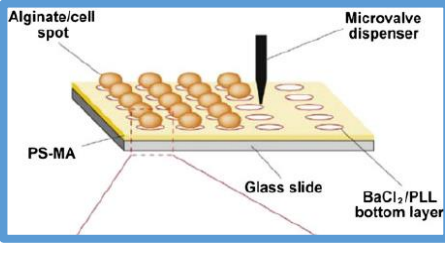
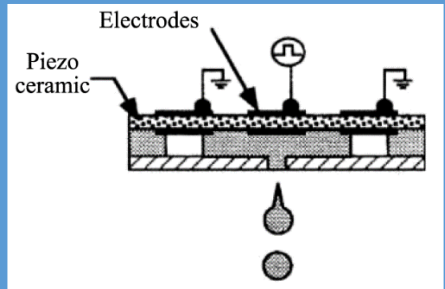
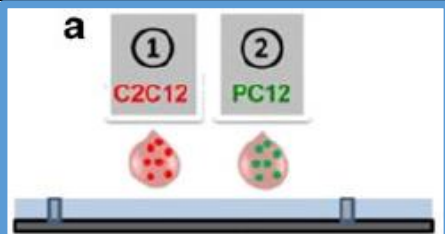
Para cada una de las dos funciones principales anteriormente mencionadas, se presentará una tabla con los conceptos existentes que tienen potencial de ser aplicados como principios de trabajo las funciones, se comenzará con la función dosificar el material biológico y se procederá con la de posicionar en el espacio tridimensional.

Para la función de dosificar el material biológico se presenta en la tabla 4 una lista de los principales principios de trabajo involucrados. Estos principios han sido desarrollados en diversas universidades del mundo y requieren de un entendimiento tanto de la mecánica como, la química y la biología involucradas. Es importante también recordar que en el objetivo del presente trabajo se especifica que se implementará la tecnología de manufactura aditiva, todos los principios de trabajo que se presentarán en la tabla 4 depositan el material biológico, no lo substraen, por lo tanto son tecnologías de manufactura aditiva.

Se han tomado en cuenta los conceptos existentes debido a que es necesario un entendimiento de diversas ramas de la ciencia para desarrollarlos, para ciertos principios de trabajo de Bio-impresión se han desarrollado a la par fluidos bio compatibles específicamente diseñados para ese principio. Por lo tanto para proponer nuevos principios de trabajo es necesaria la participación de un equipo multidisciplinario de ramas de la ingeniería, química y biología. En el presente trabajo, se escogieron de los principios

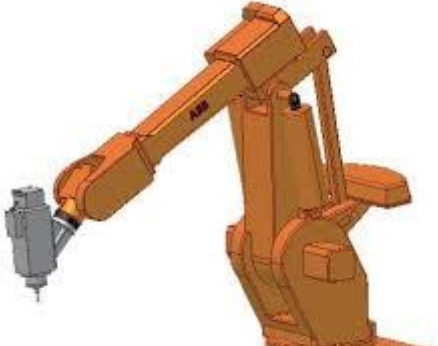
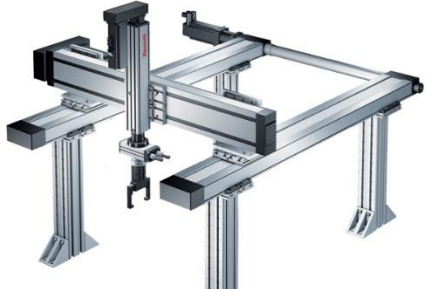


existentes el que más se adaptaba a las necesidades y requerimientos enunciados en las especificaciones. En la tabla 4 se muestran los principios de trabajo propuestos para la función dosificar el material biológico.

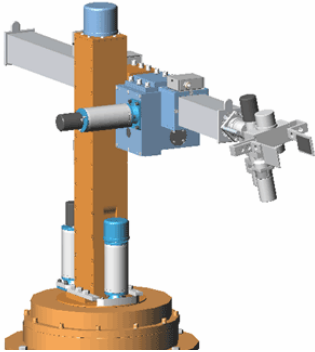
Tabla 4. Conceptos existentes para la función dosificar el material biológico.

Nombre	Descripción	Imagen
Extrusión	En este proceso se extruye el material de fabricación de manera controlada a través de un cabezal estrusor, el resultado de la liberación del material es un filamento continuo que se utiliza para construir la estructura.	
Impresión asistida por laser	Es un proceso que utiliza la estereolitografía para la fabricación de la estructura, es necesario que los materiales Bio-compatibles sean foto sensibles para ser solidificados al paso del laser.	
Micro válvula	Es un proceso en el cual se vierten gotas del material Bio-compatible a travez del control de una micro válvula, solo se pueden usar Bio-materiales con baja viscosidad para facilitar su paso por la micro válvula.	
Inyección	Es un proceso basado en el fenómeno piezo eléctrico para derramar gotas de fluido, solo se pueden usar fluidos de baja viscosidad, las resoluciones alcanzas por este proceso son mejores en comparación con los otros procesos.	
Impresión de Bio-esferoides.	En un proceso en el que son colocados fragmentos de tejido vivo para la construcción de las estructuras, los tejidos ya llevan las células vivas diferenciadas.	

Para el caso específico de la función posicionar en el espacio tridimensional es sabido que una gran precisión y una buena repetibilidad debe ser realizada por un robot cuyo sistema de procesamiento de información basado en la micro electrónica se encargue del control de las posiciones, por esta razón se muestran solo opciones robóticas en la tabla número 5 de selección de conceptos.

Tabla 5. Principios de trabajo para la función posicionar en el espacio tridimensional.

Nombre	Descripción	Imagen
Manipulador robótico.	Contiene eslabones de barras para el alcance de puntos en el espacio tridimensional.	
Robot cartesiano	Es un robot con tres grados de libertad cuyos ejes de desplazamiento lineal son perpendiculares entre sí.	
Robot delta	Es un robot paralelo con tres grados de libertad, es necesaria la orientación de la herramienta pues ésta rota conforme a su posición en el espacio.	
Drones	Existen conceptos de impresión 3D con vehiculos ereos no tripulados, pero el control de la precisión es muy bajo.	

<p>Robot de coordenadas cilíndricas.</p>	<p>Es un robot con dos grados de movimiento lineales y uno rotatorio, su area de trabajo es alrededor de su eje principal.</p>	
--	--	--

En este punto se puede hacer la pregunta acerca de porque no es usada la tecnología de manufactura substractiva para la fabricación de andamios celulares, y la respuesta es que, aunque existe muchos avances en las tecnologías de μ -maquinado, es más fácil variar la porosidad interna de las estructuras a fabricar usando impresión 3D que usando micro maquinado, lo anterior debido a que se requiere de movimientos más complejos para hacer que una herramienta de corte penetre hasta el centro de las estructuras.

2.4 Selección de conceptos

Fue importante definir una lista de criterios de selección para cada una de las dos funciones principales. Esta lista incluyó las variables involucradas mencionadas en la primera parte de este capítulo y la selección estuvo en función de los objetivos inicialmente establecidos.

En la función posicionar en el espacio tridimensional, es necesario definir algunos criterios de selección los cuales se especifican a continuación.

1. Rigidez estructural.
2. Precisión.
3. Implementación de control CNC.
4. Facilidad de uso.
5. Área de trabajo.
6. Aplicaciones médicas.

En la función dosificar el material biológico deben de ser tomadas en cuenta los siguientes criterios de selección.

1. Uso de diversos fluidos Bio-compatibles.
2. Alta velocidad para fabricar estructuras relativamente grandes.
3. Creación de estructuras más complejas.

Los principios de trabajo para la función de dosificar el material biológico se encuentran en continua evolución, su desarrollo se realiza en áreas no solo de la mecatrónica sino también de la química, la biología y la ciencia de materiales. En un futuro no muy lejano podría aparecer un nuevo principio de trabajo que cumpla de mejor manera que con el

seleccionado actualmente, sería de gran ayuda que si esto se presenta, se pudiera modificar la Bio-impresora 3D con este nuevo principio de trabajo sin afectar la totalidad del equipo. Por la anterior razón la parte mecánica que cumple con la función dosificar el material biológico será removible, haciendo modular a la máquina para futuras actualizaciones. Esto presentará la ventaja de poder actualizarse en caso de ser necesario y poder probar con diferentes dosificadores de material biológico.

En el caso de la función dosificar el material biológico, la selección de un adecuado principio de trabajo va más allá de una simple comparación desde un punto de vista de las características funcionales. Ya se han realizado estudios comparando los principios de trabajo en listado en la tabla 4 [28], y de acuerdo a éstos los que más cumplen con los criterios de selección escogidos es la micro extrusión.

El proceso de micro extrusión permite el uso de una gran variedad de fluidos bio-compatibles desde los más líquidos hasta los más viscosos, dependiendo de la geometría de la punta extrusora que se le coloque, se puede variar el rango de grosores de filamentos como se verá más adelante y se cuenta con un buen control del dosificado si se realiza mediante sistemas con microprocesador.

El método para seleccionar los conceptos en el caso de la función posicionar en el espacio tridimensional fué una tabulación de las opciones a seleccionar contra los criterios de selección, se calificaron todas las opciones para cada criterio asignando, a la opción más idónea el valor más alto, en este caso el 5, para la segunda más idónea el número 4, y así sucesivamente hasta el número 1. Al finalizar la opción seleccionada fue la que contó con una sumatoria mayor en su correspondiente columna de evaluación. La evaluación se realizó de una manera cualitativa.

Para la selección del principio de trabajo a utilizar para la función posicionar en el espacio tridimensional se tomaron en cuenta las características de cada configuración descritas en la bibliografía consultada [29], y el principio de trabajo seleccionado fue el robot cartesiano debido a que éstos tienen un costo de producción más reducido, la configuración cartesiana no requiere de estructuras complejas con cadenas cinemáticas cerradas o rotacionales en sus ejes y su estructura es más rígida por lo tanto tienen mejor precisión [30] lo cual simplifica su diseño y fabricación y consecuente el control de la posición dentro del espacio de trabajo.

2.5 Diseño de precisión

2.5.1 Diseño híbrido

Los principios de trabajo utilizados en máquinas de alta precisión son los conocidos como diseño cinemático, el cual dicta los siguientes principios.

- Mínimo contacto entre dos superficies.
- Mínimo número de restricciones necesarias.

El diseño cinemático está enfocado a mecanismos con alto nivel de precisión, utilizados por lo general en sistemas ópticos y de gran ligereza [31]. Pero el diseño cinemático puro comienza a presentar problemas cuando aumentan las cargas que deben de ser soportadas por los sistemas de desplazamiento, y es que este enfoque trabaja bajo la suposición de que las superficies de contacto serán muy rígidas y tendrán cero deformación cuando se presentan los contactos, lo cual sucede con una buena aproximación en cargas muy pequeñas.

Para cargas grandes se utiliza el principio de diseño elástico, el cual establece que para soportar cargas grandes, se debe de realizar el mayor contacto posible entre las dos superficies involucradas para distribuir la carga, lo anterior supone el material utilizado presentará cierta ductilidad y las superficies de contacto se ajustarán entre ellas al contacto ante la presencia de la carga.

Para la aplicación actual, la cual requiere de precisión y también de la carga de algunos elementos, es necesario utilizar un enfoque diferente el cual hace uso de los dos principios anteriormente citados, es posible diseñar sistemas de transmisión lineal cuyas restricciones sean las mínimas necesarias pero utilizando una mayor área de contacto entre sus superficies para aumentar el nivel de carga permitido, a este enfoque se le conoce como diseño híbrido, y fue el usado para las transmisiones de potencia en el presente trabajo.

2.5.2 Aplicación más directa de la fuerza

¿En dónde debe de ser aplicada la fuerza de acción para lograr un desplazamiento lineal de un cuerpo? Para un cuerpo que permanece estático en un espacio hipotético sin gravedad si se aplica una fuerza de acción cuya línea de acción pasa exactamente por el centro de gravedad de dicho cuerpo, entonces el cuerpo presenta una aceleración en la dirección de la fuerza y no se presentan rotaciones. Si la línea de acción de la fuerza mencionada no pasara exactamente por el centro de gravedad, entonces aparte de un desplazamiento lineal también se provocaría una rotación causada por el par generado por la fuerza y la distancia entre su línea de acción y el centro de gravedad.

Del enunciado anterior se puede deducir un valioso principio, los actuadores de un elemento móvil lineal deben de ser colocados lo más próximo posible al centro de gravedad del elemento móvil, con esto se logra disminuir el par que se generará sobre las guías lineales y por lo tanto las deformaciones asociadas por estos esfuerzos innecesarios.

Si el elemento móvil está en contacto con elementos externos la forma en la que este contacto modifica las fuerzas también debe de considerarse. En el caso particular de los carros de la bio-impresora el contacto que tendrá con elementos externos será solo entre el cabezal extrusor y la estructura a fabricar, pero las fuerzas generadas en este contacto son tan pequeñas que su efecto se despreciará para fines prácticos.

2.6 Configuración general de la máquina

El equipo de Bio-impresión 3D trabajara en cuartos limpios, éstos son habitaciones con un ambiente controlado y están diseñadas para tener bajos niveles de contaminación, estas salas deben de tener sus parámetros ambientales estrictamente controlados entre ellos: partículas en el aire, temperatura, humedad, flujo de aire, presión interior e iluminación [32]. Es necesario este ambiente debido a que se trabajará con materiales de grado médico que tendrán contacto directo con partes internas del cuerpo humano, una contaminación de cualquier tipo en la estructura a fabricar podría traer consigo efectos indeseados en el organismo en el caso de un injerto, o dañar las pruebas realizadas en el caso de una investigación. El mínimo ambiente de control necesario para la realización de las impresiones es una cámara de flujo laminar.

Durante la etapa de conceptualización se generaron algunos prototipos virtuales para decidir la configuración general de la máquina, se sabía que debía ser un robot cartesiano que debía cumplir con las especificaciones mencionadas en los requerimientos. A continuación se presentan los primeros conceptos de la configuración de la máquina, éstos fueron producidos en el software de diseño SolidWorks en su versión 2013. Todos ellos utilizan los el mecanismo tornillo tuerca para transformar los movimiento rotacionales del motor en movimiento lineal.

El primer prototipo diseñado fue una adaptación de un router CNC, cuenta con su estructura principal en la parte de abajo, tres grados de libertad eslabonados uno con respecto al otro, el primer grado de libertad es el eje Y, éste se desliza con respecto a la referencia mecánica, el segundo grado de libertad es el X el cual se encuentra referenciado al carro de Y, el tercer grado de libertad es el eje Z que se encuentra referenciado al eje X y el último grado de libertad es el μ -extrusor, el cual es un desplazamiento lineal en la misma dirección que el eje Z.

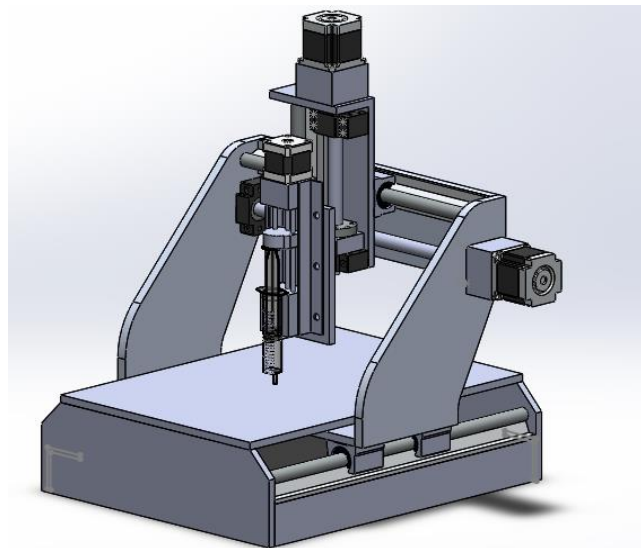


Ilustración 14. Primer prototipo virtual de la bio-impresora 3D.

Estas cadenas cinemáticas podrían acumular errores de desplazamientos acumulados en cada uno de sus ejes, para disminuir esto se utilizó diseño semi-cinemático en cada uno de sus mecanismos de desplazamiento. Se analizó también la posibilidad de tener solo dos cadenas cinemáticas con solo dos eslabones cada una para disminuir los errores de posición acumulados, pero esto implicaría someter a aceleraciones indeseadas a la estructura de fluido bio-compatible durante la fabricación. Estas aceleraciones por mínimas que fueran generarían fuerzas que tenderían a deformar la estructura por lo cual esta opción fue eliminada.

El problema que presentó el primer prototipo mostrado en la ilustración 14 fue que los mecanismos de desplazamiento de los ejes (Guías lineales y tornillos de desplazamiento) se encontraban muy expuestos al área de trabajo de impresión, esto provocaría que durante los desplazamientos la impresión se contaminara con los μ -goteos de aceite del mecanismo, aunque existen lubricantes de grado médico que no son perjudiciales para la salud es indeseable que la impresión se contamine con algún otro compuesto que no sea específicamente los que requiere el fluido bio-compatible.

Un segundo prototipo virtual se muestra en la ilustración 15, éste también es un robot cartesiano con los mismos mecanismos de desplazamiento lineal pero éstos se encuentran en la parte inferior del área de impresión. Cuenta con un brazo que se extiende desde la parte inferior hasta la superior y en la punta se encuentra colocado el μ -extrusor, el área de trabajo se encuentra sobre una caja diseñada para contener los mecanismos de desplazamiento en su interior.

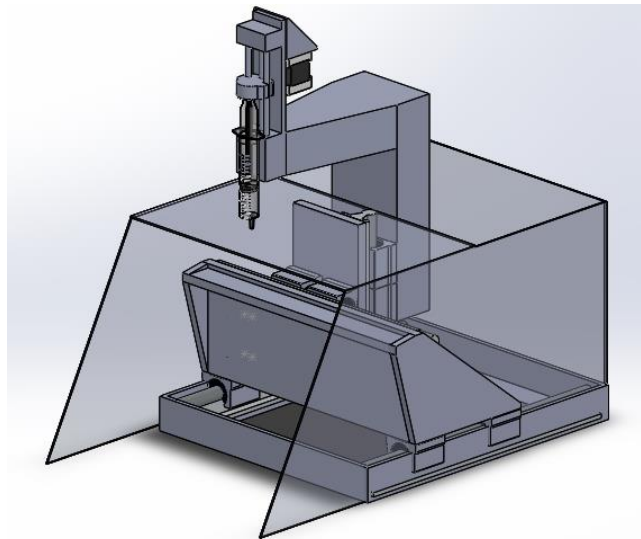


Ilustración 15. Segundo prototipo virtual de la Bio-impresora.

El inconveniente que presentó este segundo prototipo fue el hecho de que el brazo extendido era demasiado largo y generaría errores significativos de posición, la flexión en el brazo no era tolerable para la resolución y la aplicación que se requiere. Otro inconveniente es la vibración que se presentará en las aceleraciones y desaceleraciones de la máquina, la masa del μ -extrusor es lo suficientemente grande como para realizar un efecto péndulo, efecto que se maximizará al poner más μ -extrusores necesarios para la impresión de diversos materiales en una misma estructura. Por lo anterior el concepto de

este segundo prototipo fue descartado para esta aplicación, pero puede ser viable para ser aplicado en otras situaciones de cargas más ligeras.

Para la siguiente iteración de organización estructural del prototipo, se tenía que implementar las mejores características de los dos prototipos anteriores, la rigidez estructural de la primera versión y el aislamiento de los mecanismos y limpieza de la segunda versión. La primera versión presentó una mejor rigidez estructural, pero ¿Cómo evitar que los mecanismos lubricados contaminaran el área de impresión durante los desplazamientos de la máquina? Se pensó en mantener los mecanismos en la parte superior pero sacarlos del área de trabajo interna hacia el exterior, de ésta manera se tienen las mejores ventajas de los dos prototipos anteriores.

En la ilustración 16 se muestra una imagen del prototipo digital con configuración gantry con los mecanismos en la parte superior pero por la parte de afuera del área de impresión, para el desplazamiento en Z las paredes laterales del carro de Y realizan la función de aislar los mecanismos de desplazamiento de Z y el área de impresión al interponerse entre ellos, para el desplazamiento en X los mecanismos se encuentran en la parte posterior del carro del Z el cual cumple la función de aislar de la misma forma que el carro de Y, los mecanismos de desplazamiento de Y quedan en la parte inferior por lo cual no intervienen en el área de trabajo, los mecanismos de desplazamiento del μ -extrusor no se lubricarán debido a la baja potencia que se requiere para su desplazamiento y a lo corto de su carrea. De esta manera la estructura a fabricar no se ve contaminada durante el proceso de impresión y se logra una mejor rigidez que con una extensión de brazo.

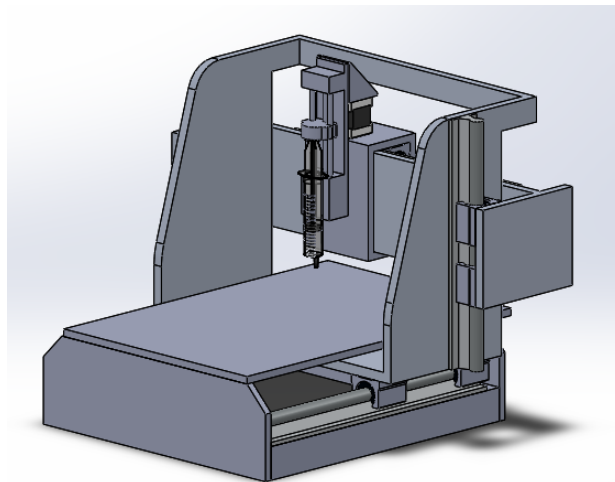


Ilustración 16. Tercer prototipo virtual de la bio-impresora.

El concepto seleccionado para la configuración general de la estructura de la Bio-impresora es el que se muestra en la ilustración 16, Es necesario analizar detalladamente cada elemento del ensamble para darle la geometría más óptima, pero de manera general se tiene que el área de impresión se mantendrá estática unida a la referencia mecánica que es la estructura de la máquina, a la estructura se unirá el carro de Y formando el primer grado de libertad, al carro de Y se unirá el carro de Z, formando el segundo grado de libertad, al carro de Z se unirá el carro de X formando el tercer grado de libertad y al

carro de X se le unirá el μ -extrusor formando el cuarto grado de libertad. En la ilustración 17 se muestra un prototipo digital de la configuración estructural y se especifican sus partes.

En la configuración mostrada se cumple con los principios y las consideraciones de diseño más importantes enunciadas con anterioridad para el cumplimiento completo de la función fabricar estructuras tridimensionales de material biológico, éstas se enuncian a continuación.

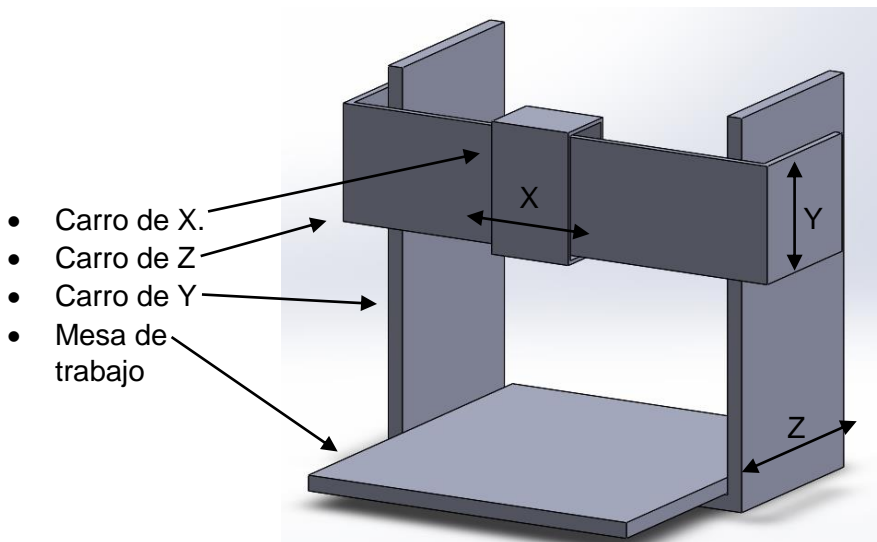


Ilustración 17. Configuración final elegida para la estructura de la Bio-impresora

- La estructura de fluido Bio-compatible a fabricar no se verá sometida a fuerzas innecesarias provocadas por la aceleración y desaceleración de su masa, esto debido a que la mesa de trabajo se encuentra unida a la referencia mecánica, no representa un grado de libertad de la máquina.
- Las guías lineales y tornillos de avance no se exponen al área de trabajo para minimizar la contaminación provocada por la lubricación de éstos. Las guías del carro de X están por detrás del carro de X y del carro de Y, las guías de Y están en los laterales, y las guías del carro de X están en la parte inferior del área de impresión.
- La configuración de robot gantry ofrece una mayor rigidez estructural y por lo tanto se minimizan los errores durante el posicionamiento y la vibración durante los desplazamientos de la máquina.
- La colocación de las guías lineales y tornillos de avance se ha realizado de tal modo que se cumpla con el principio de diseño de aplicar la fuerza lo más directamente posible al centro de masa del objeto a desplazar linealmente

minimizando de esta forma los pares generados en las guías lineales y por lo tanto los errores de posición.

- Se hará uso del diseño híbrido para los desplazamientos de los ejes y para la unión del elemento de dosificación del material biológico con la bio-impresora 3D ya que este será modular según las especificaciones iniciales.

2.7 Hipótesis sobre el comportamiento de la máquina

El diseño conceptual inicial que se ha presentado con anterioridad cuenta con algunas primeras características y requerimientos que han salido de bibliografía existente al respecto, este diseño conceptual está acompañado de algunas hipótesis acerca de cómo se lleva a cabo el procedimiento de impresión, éstas se enuncian a continuación.

- Para variar el grosor de la hebra a extruir, es necesario cambiar el cabezal extrusor por otros de diferentes diámetros, por lo tanto el equipo de bio-impresión 3D debe contar con un juego de cabezales extrusores de diferentes diámetros.
- El caudal del material biológico a través de la punta extrusora guardará una relación lineal con la velocidad de desplazamiento del émbolo y ésta relación será constante en el tiempo.
- Es posible implementar un controlador CNC de tres ejes para hacer funcionar la Bio-impresoras 3D con todas sus características realizando las adecuaciones necesarias al postprocesador que genere el código G.
- La velocidad de avance del émbolo debe mantenerse constante en todo el proceso de impresión 3D extruyendo a caudal constante mientras se fabrican las estructuras tridimensionales.

Estas hipótesis fueron puestas a prueba a través de la experimentación con prototipos rápidos de construcción económica, los prototipos, los experimentos, los datos y la información relevante obtenida se detallan en el siguiente capítulo.

3. Fenómenos físicos de la función dosificar

3.1 Proceso experimental

Como se identificó en el diseño conceptual del equipo de Bio-impresión 3D, existen dos funciones principales que se ejecutan en paralelo, la función posicionar en el espacio tridimensional y la función dosificar el material biológico, como se comentó, la función de contenido o la más importante es la función dosificar el material biológico, es en esta función en donde se llevará a cabo el cambio de fase de la materia prima al pasar de una forma física a otra forma física. Es necesario entender los fenómenos físicos involucrados en esta función de contenido para llevar a cabo con éxito los procesos de Bio-impresión 3D, en base a este argumento se procedió a la construcción de prototipos rápidos de construcción económica, se definen como prototipos rápidos de construcción económica debido a que los materiales utilizados son económicos de fácil obtención y los procesos para su manufactura son poco sofisticados y más artesanales, lo anterior no implica una disminución en la calidad de la demostración que se desea realizar.

3.2 Primer prototipo rápido

El primero de estos experimentos tuvo la finalidad de investigar como es el fenómeno de micro extrusión con el principio de trabajo escogido de bomba de émbolo. Los equipos que realizan la función de dosificar fluidos en pequeñas dosis reciben en la industria médica el nombre de bombas de infusión o micro infusión dependiendo del caudal que puedan manejar, por la anterior definición el prototipo desarrollado puede identificarse como una bomba de micro extrusión al poder dosificar micro litros. Una imagen del prototipo rápido construido se muestra en la ilustración 18.

El sistema de transmisión de potencia mecánica del prototipo trabaja bajo el principio del tornillo tuerca, se utilizaron materiales de reciclaje de rápida localización para la elaboración del prototipo, en el sistema electrónico de control se cuenta con una tarjeta de desarrollo arduino Mega la cual recibe información de la velocidad del actuador desde una computadora a través del protocolo USB y la envía en forma de pulsos digitales de 5Vcd al driver de μ -pasos pololu A-4988, a su vez este driver está conectado al motor a pasos para realizar el movimiento adecuado y controlado del émbolo de la jeringa que realiza la función de bomba de émbolo. Desde un programa en la computadora es posible variar la velocidad de avance del émbolo del prototipo (v_e).

Detalles técnicos de los elementos clave utilizados en la construcción del prototipo.

- Tarjeta de desarrollo Arduino Mega 2560.
- Drivers para motores a pasos Pololu A4988 (Configurado en 1/16 de paso).
- Motor a pasos bipolar Nema 17 de 70 oz-in.
- Tornillo de avance con perfil V de 5/16”.
- Jeringa para impresión dental Mono Jet.

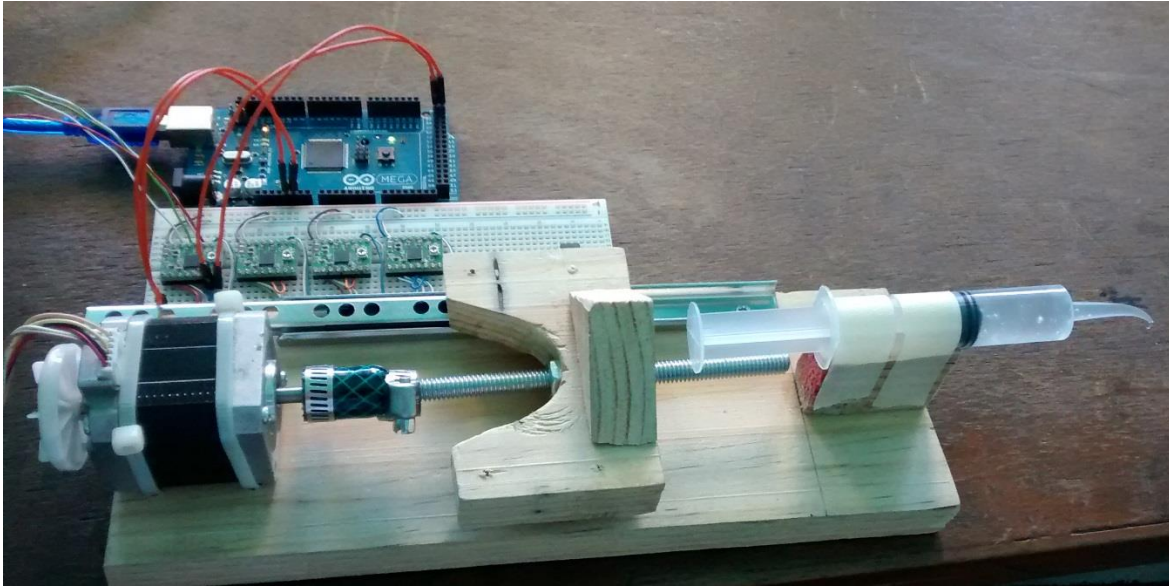


Ilustración 18. Primer prototipo rápido de bomba de micro extrusión.

Las variables involucradas en el proceso micro extrusión mediante la implementación de una bomba de émbolo son las que se muestran en la ilustración 19 y se describen a continuación.

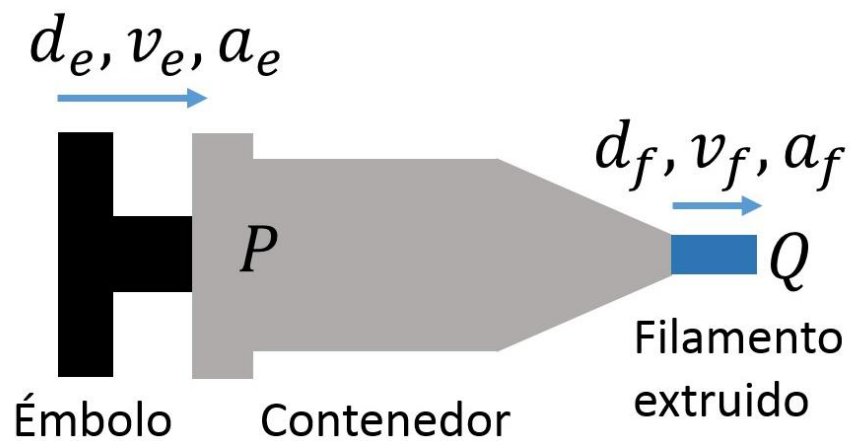


Ilustración 19. Variables de bomba de micro extrusión.

- d_e – Desplazamiento del émbolo.
- v_e – Velocidad de desplazamiento de émbolo.
- a_e – Aceleración del émbolo.
- P – Presión dentro del contenedor de la bomba.
- Q – Caudal en la punta extrusora.
- d_f – Desplazamiento del filamento extruido.
- v_f – Velocidad del filamento extruido.
- a_f – Aceleración del filamento extruido.

El planteamiento analítico para este fenómeno de transporte de fluidos se describió inicialmente mediante la ecuación de continuidad para fluidos, la cual se presenta a continuación, en la ecuación el símbolo A representa el área de la sección transversal tanto en el émbolo como en la puna extrusora.

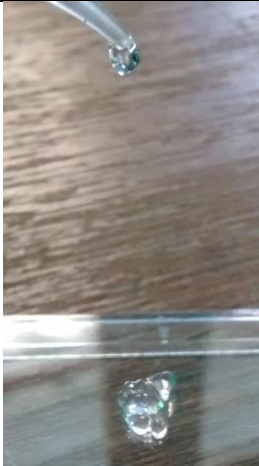
$$A_e v_e = A_f v_f$$




Las pruebas realizadas consistieron en llenar la jeringa con fluido viscoso llamado pantenol de consistencia similar a los fluidos Bio-compatibles utilizados para la fabricación de andamios celulares, las pruebas fueron realizadas en un ambiente con temperatura constante y consistían en programar velocidades específicas de avance del émbolo (v_e) y observar cómo se comportaba la relación desplazamiento del émbolo (d_e) – caudal en la punta extrusora (Q). Los datos más representativos de las pruebas de extrusión junto con imágenes se muestran en la tabla 7. El caudal en la punta extrusora para cada caso fue calculado utilizando despejes de la ecuación de continuidad para fluidos.


$$v_f = \frac{A_e v_e}{A_f}$$

$$Q = A_2 v_2$$

Tabla 6. Pruebas de extrusión realizadas al primer prototipo.

Velocidad de Salida del fluido	Caudal del fluido	Observaciones	Ilustración
100 mm/s	314.159 mm ³ /s	El fluido se acumula en la punta de la jeringa e una bola y cae cuando el peso vence la resistencia del material, no se genera una hebra de material.	

250 mm/s	785.398 mm ³ /s	Durante la extrusión se acumulan aglutinados del fluido en la punta de la jeringa y caen de manera repentina uno tras otro, no se genera un hilo continuo.	
500 mm/s	1570.796 mm ³ /s	El fluido se acumula un poco en la punta de la jeringa, pero después cae y el hilo de fluido es continuo	
1000 mm/s	3141.592 mm ³ /s	No se genera una gran acumulación en la punta de la jeringa, el hilo es continuo pero se genera un movimiento oscilatorio circular.	

2000 mm/s	6283.185 mm ³ /s	A esta velocidad de extrusión, el fluido sale y genera vórtices durante su trayecto a la placa de recolección, el hilo es continuo y su comportamiento es muy errático.	
-----------	-----------------------------	---	---

Después de variar las velocidades de extrusión, se observó que existe un factor importante de compresión del fluido, el émbolo comienza a avanzar y no se presenta una precipitación del fluido por la punta de la jeringa hasta que la presión acumulada dentro de la jeringa es lo suficientemente grande como para romper la tensión superficial del fluido, vencer las fricciones involucradas, vencer la inercia del fluido y entonces precipitar el fluido por la punta extrusora. También se observó que una vez detenido el avance el émbolo, debido a la presión interna en el contenedor, el material continuaba fluyendo por la punta del extrusor y el caudal disminuía de manera gradual hasta llegar cero.

Las observaciones realizadas a este primer prototipo rápido ha dado un espectro de velocidades de extrusión en los cuales se logra un hilo continuo y estable bajo las condiciones especificadas. En el caso en el que el hilo no es continuo se debe a que la viscosidad y tensión superficial del fluido lo mantienen unido formado un cúmulo de material que finalmente cae por gravedad al llegar a acumular una masa determinada. En el caso de las velocidades altas, el fluido sale en un filamento pero éste se comporta de manera errática debido a que se presenta en un flujo turbulento, los diversos vectores de velocidad en las partículas del fluido provocan oscilaciones en el comportamiento del hilo extruido.

De esta manera quedó refutada la hipótesis que se planteó en la etapa del diseño conceptual inicial que establecía que se presentaría una relación lineal entre el desplazamiento del émbolo (d_e) y el desplazamiento del fluido en la punta extrusora (d_f) y que además esta relación permanecería constante en el tiempo, no permanece constante respecto al tiempo, aunque en un punto del proceso de extrusión se equilibra la presión interna de la bomba de émbolo y entonces es posible mantener lineal esta relación.

Las observaciones realizadas durante las pruebas se pueden resumir de la siguiente manera.

- Al iniciar el avance del émbolo no se precipita de manera inmediata el filamento a extruir.
- El filamento extruido solo es continuo para un rango definido de velocidades de avance del émbolo (v_e).

- El filamento en la punta extrusora continúa fluyendo aun después de que se ha detenido el avance del émbolo.
- No existe una relación lineal constante entre el avance del embolo (d_e) y el caudal en la punta extrusora (Q).

3.3 Segundo prototipo rápido

La impresión con micro extrusión de fluidos viscosos se comportará diferente cuando el fluido viscoso sea extruido y se deje caer en el aire, que cuando éste entre en contacto con otra superficie, el proceso cambia debido a que debe de tomarse en cuenta que la fricción entre el fluido viscoso y una superficie rígida es diferente a la fricción entre el fluido viscoso y el aire. Con el objeto de estudiar el fenómeno descrito anteriormente en la impresión de filamentos de fluido, se procedió a la construcción de un segundo prototipo rápido, esta vez con un grado más de libertad de manera horizontal (eje X) para observar cómo se comporta el fenómeno cuando el micro extrusor se desplaza de manera horizontal y se deposita el fluido viscoso en una superficie plana rígida. Se desarrolló un software para PC en el entorno de desarrollo LabView para el control de las velocidades de avance en el eje de X y de extrusión.

El prototipo fue diseñado en un programa de CAD y posteriormente sus piezas fueron procesadas a través de un software de CAM para generar las rutas de corte adecuadas y fabricarlas en una máquina de control numérico (CNC) mediante estrategias de perfilado, las piezas fueron fabricadas en MDF de 18 mm y se utilizaron elementos sencillos para el resto de la mecánica como tornillos sin fin y guías lineales embaleradas para cajones de madera. Se diseñó y construyó una nueva bomba de micro extrusión y fue montada en la estructura principal a modo de carro de X, el sistema de transmisión de potencia para ambos ejes el de tornillo tuerca, la mesa de impresión del prototipo se apoya sobre tres tornillos que pueden ser ajustados desde abajo para nivelar el área de trabajo y que permanezca perfectamente ortogonal a la dirección del extrusión, tres apoyos son una restricción cinemática para aplicaciones de precisión.

Detalles técnicos de los elementos clave utilizados en la construcción del prototipo.

- Computadora portátil trabajando con Windows 8
- Tarjeta de desarrollo Arduino Mega 2560.
- Dos drivers para motores a pasos Pololu A4988 (Configurado en 1/16 de paso).
- Motor a pasos bipolar Nema 17 de 70 oz-in.
- Motor a pasos bipolar Nema 23 de 200 oz-in.
- Tornillo de avance con perfil V de 5/16”.
- Jeringa para impresión dental Mono Jet.

La imagen del diseño en CAD y del prototipo construido se muestra en la ilustración 20.

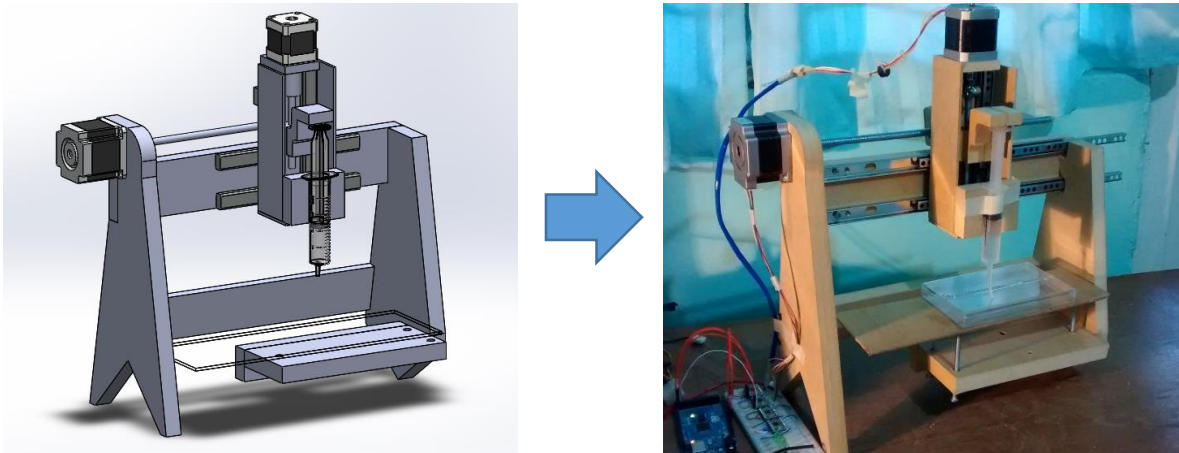


Ilustración 20. CAD y construcción de prototipo rápido para fabricación de filamentos del material extruido.

Con este prototipo mecatrónico y desde la interface de control en la computadora fue posible realizar diversas pruebas manipulando la velocidad del carro de X (v_x), velocidad del fluido en la punta extrusora (v_f), y la longitud de la hebra que se desea fabricar. Todas estas características convierten a este segundo prototipo en un banco de pruebas. La interface gráfica de control está desarrollada pensando en el usuario, es intuitiva y de fácil manejo. La interface gráfica de usuario para el control de las velocidades se muestra en la ilustración 21.

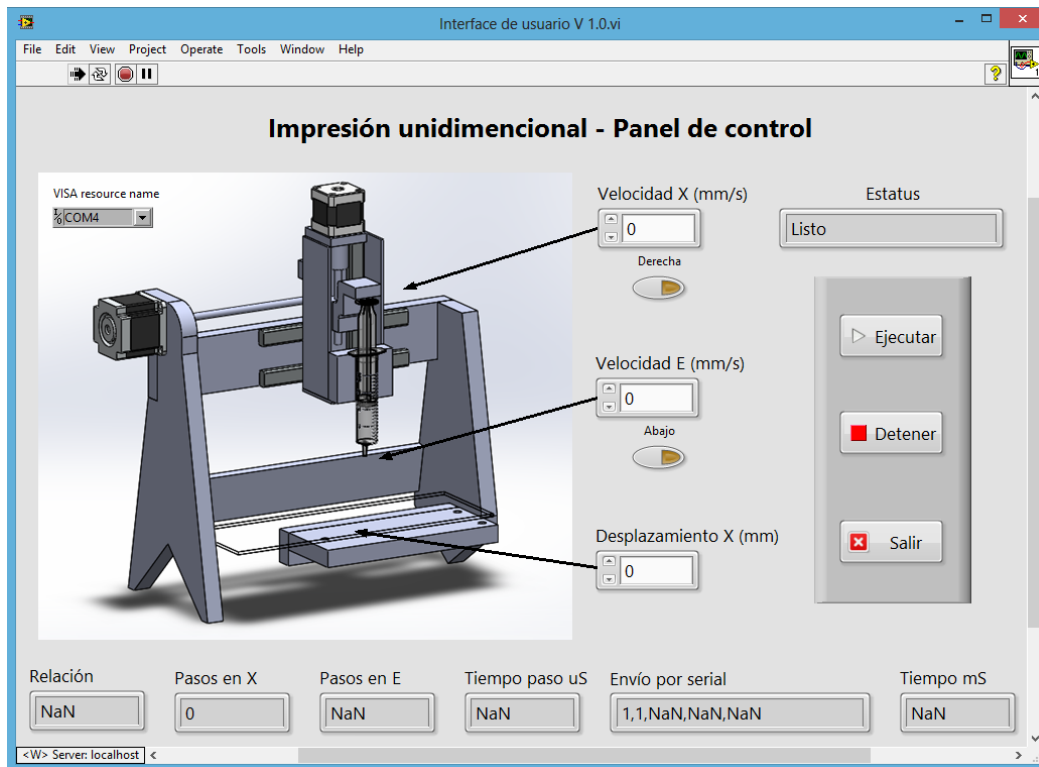


Ilustración 21. Interface gráfica de usuario del software de control del prototipo de impresión de dos ejes.

Se realizaron pruebas de impresión en condiciones ambientales constantes (25° C) y se imprimieron líneas de fluido a diferentes velocidades tanto de desplazamiento lineal como

de velocidad de desplazamiento en la punta del micro extrusor, para estos experimentos se utilizó el mismo fluido que en el primer experimento, se utilizaron tres tipos de jeringas, una jeringa convencional sin aguja, la misma jeringa convencional con aguja y una jeringa de impresión dental. Sus diferencias geométricas se muestran en la ilustración 22.



Ilustración 22. Jeringas utilizadas durante las pruebas de impresión. De izquierda a derecha, jeringa con aguja, jeringa sin aguja y jeringa de impresión dental.

Se llevaron a cabo procesos de impresión en un ambiente a temperatura constante (25 °C), se imprimieron de manera consecutiva líneas de 10 cm de largo del fluido viscoso sobre la superficie plana rígida de impresión utilizando las tres jeringas mostradas en la ilustración 22. En la ilustración 23 se muestran algunas impresiones y posteriormente se describen algunos elementos presentes en las impresiones realizadas identificadas en la imagen, se utiliza nomenclatura de numeración.

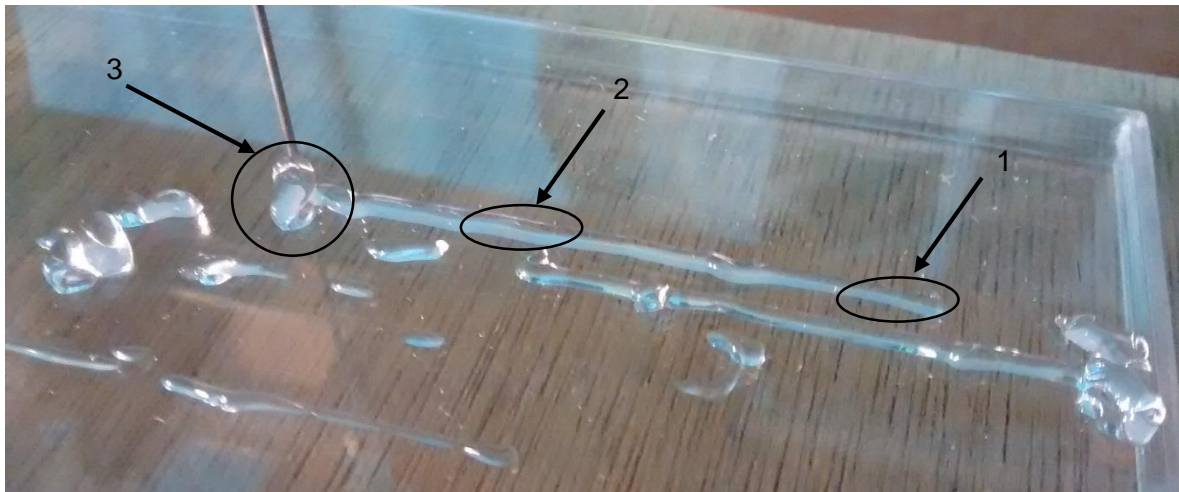


Ilustración 23. Impresiones realizadas con una jeringa con aguja metálica y fluido viscoso, se identifican las características presentes en el filamento impreso.

1. Es el inicio de la impresión del filamento de fluido viscoso, en los primeros milímetros no se precipita el fluido, después comienza a salir y ser depositado en la base para impresión, la hebra inicial es muy delgada en comparación con el resto.
2. Después de unos centímetros de impresión, el filamento adquiere un grosor constante, este se mantiene por el resto de la impresión y la geometría de la sección transversal del filamento permanece relativamente constante en comparación con los primeros centímetros.
3. Este es el final de la hebra impresa, el flujo de material viscoso continúa aun cuando ya se ha detenido el avance del micro extrusor (Carro de X) y el embolo de la jeringa, esto se ve reflejado en un cúmulo de material al final de la línea impresa.

Las observaciones realizadas al llevar a cabo estas impresiones con los tres tipos diferentes de jeringas fueron que los efectos iniciales y finales de deformación de la hebra durante el proceso de impresión se amplificaron al utilizar una jeringa de aguja y fueron atenuados al utilizar la jeringa sin aguja.



Ilustración 24. Impresión realizada con una jeringa con aguja metálica y fluido no viscoso (agua).

La explicación de este fenómeno es que la presión dentro del contenedor aumenta ante la presencia de una fuerza en el émbolo debido al efecto definido por la fórmula presión = fuerza / área ($P=F/A$), al disminuir el diámetro de la sección transversal con el uso de la aguja metálica aumenta la presión dentro del contenedor manteniendo constante la fuerza de acción provocada por el émbolo, o al aumentar la fuerza en el émbolo para precipitar el fluido por la punta de la jeringa la presión dentro del contenedor aumenta más que las jeringas que no cuentan con una sección transversal tan estrecha, este aumento de la presión provoca que se presente una mayor compresibilidad en el fluido y por lo tanto mayores errores en la impresión. En la ilustración 24 se muestra una impresión con agua entubada la demuestra que debido a la baja viscosidad del fluido no se ve potenciados los fenómenos mostrados en la ilustración 23.

Durante las pruebas también se pudo observar que es posible variar el grosor del filamento a extruir coordinando las velocidades de desplazamiento lineal del eje X y del actuador lineal del extrusor. Cuando las velocidades de desplazamiento de X y de

extrusión son iguales se tiene en teoría una hebra que es del mismo grosor que el diámetro del cabezal extrusor, cuando se disminuye la velocidad de desplazamiento con respecto a la de extrusión entonces aumenta el grosor del hebra y cuando se aumenta la velocidad de desplazamiento lineal con respecto a la velocidad de extrusión entonces se logra una disminución en el grosor de la hebra a extruir. En la tabla 7 se muestran las velocidades utilizadas se especifica un aumento del grosor del filamento impreso.

Tabla 7. Velocidades de émbolo y de desplazamiento.

Velocidad del filamento (v_f) mm/s	Velocidad de desplazamiento (v_x) mm/s	Observaciones
100	500	Filamento impreso discontinuo
250	500	Filamento continuo
500	500	Aumento en el grosor del filamento
1000	500	Aumento en el grosor del filamento
2000	500	Aumento en el grosor del filamento

Lo anterior puede expresarse mediante la siguiente ecuación, siempre que el valor de k se mantenga constante, el grosor del filamento impreso se mantendrá constante, y esto será válido en el rango de “a” hasta “b” donde el valor de dichas constantes dependerá del fluido viscoso Bio-compatible a utilizar.

$$\frac{v_f}{v_x} = k \quad R: [a, b]$$

Lo anterior implica que existe un rango de grosores que pueden fabricarse con un mismo diámetro de la boquilla extrusora y un mismo material del fluido viscoso. Una imagen de diferentes grosores de hebras a fabricar se muestra en la ilustración 25.



Ilustración 25. Diferentes grosores de hebras impresas que se consiguieron variando las velocidades de desplazamiento y de extrusión.

Lo anterior es válido siempre y cuando el filamento extruido se realice durante la etapa tres del proceso de micro extrusión. Cuando las impresiones son realizadas a velocidad constante, tanto en avance en X como de extrusión, es posible obtener filamentos impresos uniformes a mitad del proceso, pero cuando se realiza un cambio de velocidad

en cualquiera de los ejes, aun cuando ya se está extruyendo un filamento uniforme, entonces se presentan nuevamente las deformaciones en los filamentos.

3.4 Comportamiento del proceso de impresión 3D con fluidos viscosos.

De las observaciones realizadas en la experimentación, se pudo obtener la siguiente información importante. Durante el proceso de micro extrusión, no se cumplen las hipótesis que se habían formulado en un inicio, las cuales se enuncian a continuación a modo de recordatorio.

- El caudal del material biológico guardará una relación lineal con la velocidad de desplazamiento del émbolo.
- Para variar el grosor de la hebra a extruir, es necesario variar el diámetro del cabezal extrusor.

Las anteriores hipótesis se desecharon mediante las pruebas realizadas y se generaron tres enunciados que definen el comportamiento del fenómeno, estos son útiles pues dan algunas pautas que se deben de tomar en cuenta para el diseño de los elementos mecánicos de la función de dosificado, éstas se explican más adelante. A continuación se presentan los enunciados correctos acerca del comportamiento del fenómeno.

- Durante el proceso de extrusión, el caudal del material biológico (Q) y el desplazamiento del émbolo (d_e) no guardan una relación lineal, si no que siguen un comportamiento definido por las gráficas mostradas en la ilustración 26.
- El grosor de la línea a fabricar no está definido solamente por el diámetro del cabezal extrusor, en esta variable también influye la coordinación de las velocidades de desplazamiento del cabezal (v_x) y la velocidad de salida del material biológico (v_f) a través de la punta extrusora.
- Para la realización de la deposición del material biológico en el espacio bidimensional y tridimensional, debe existir en todo momento una coordinación entre la velocidad de salida del filamento (v_f) y la velocidad resultante del movimiento bidimensional o tridimensional (v_r).

Los anteriores enunciados se explican de manera más detallada a continuación.

3.4.1 El fenómeno de micro extrusión

La relación desplazamiento del émbolo (d_e) y desplazamiento del filamento en la punta extrusora (d_f) puede ser definida de mejor manera mediante la identificación de cuatro etapas en el proceso de micro extrusión: la etapa de presurizado, etapa de precipitación, etapa de filamento estable y la etapa de despresurización. Es posible explicar de mejor manera el proceso de micro extrusión mediante la graficación de variables importantes en el proceso, se realizaron tres gráficas en las que se expone la presión (P) contra el

tiempo (t), el caudal (Q) contra tiempo (t) y el desplazamiento del filamento (d_f) contra desplazamiento del émbolo (d_e). Según las observaciones y datos recabados de las pruebas realizadas, las gráficas quedan como se muestra en la ilustración 26, las cuatro

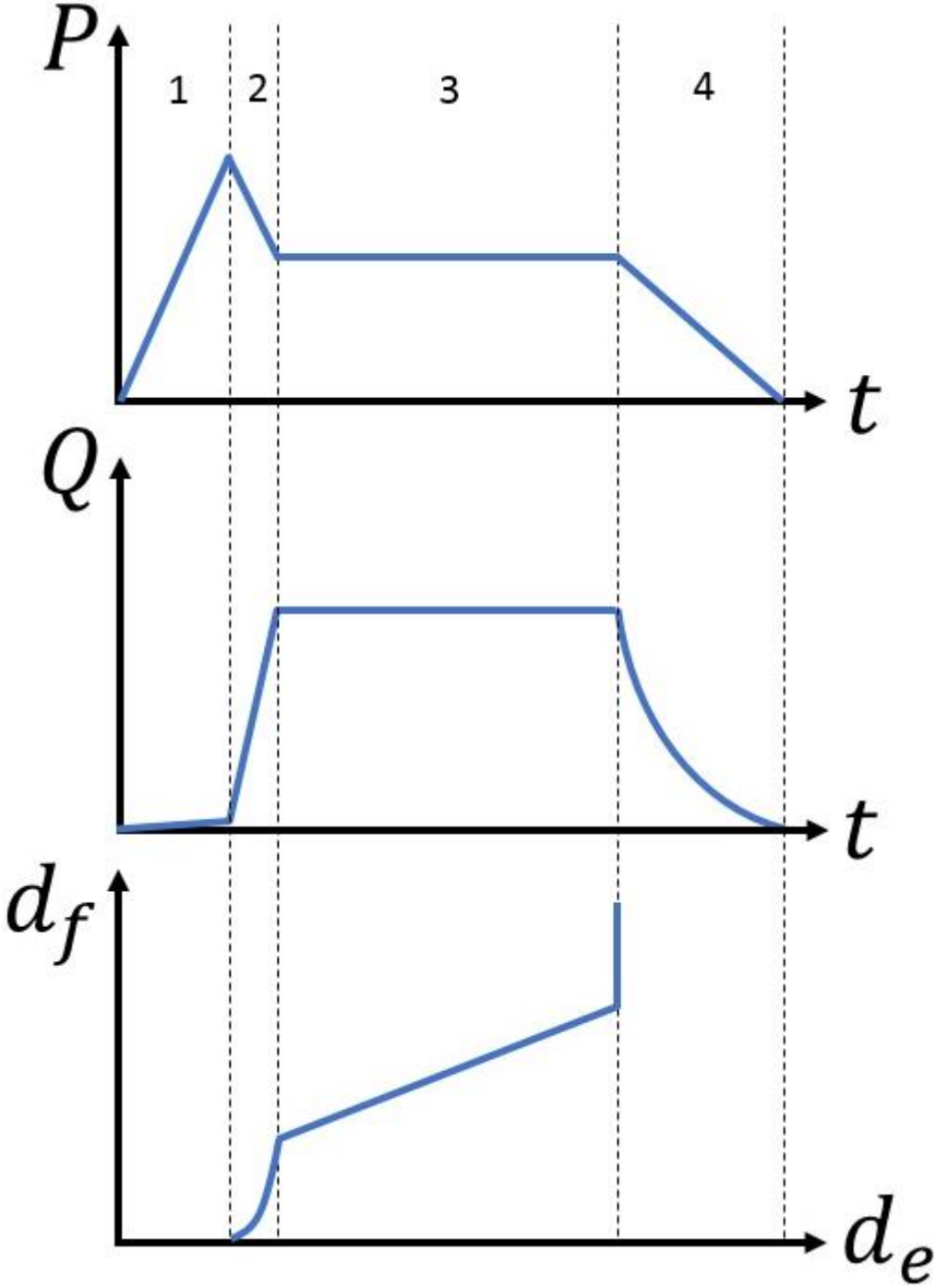


Ilustración 26. Gráficos del comportamiento del fenómeno de micro-extrusión.

etapas del proceso de micro extrusión se separan con líneas punteadas en las gráficas y se identifican con números, cada una de las etapas es descrita a continuación.

1. Etapa de presurizado. En esta etapa comienza el avance del émbolo del extrusor, el fluido viscoso dentro de la bomba comienza a comprimirse pero aún no hay salida de éste en la punta extrusora. En la primera gráfica se aprecia el aumento de la presión (P) dentro de la bomba, en la segunda gráfica se aprecia que el caudal (Q) es muy pequeño tendiendo a cero y en la tercera gráfica se muestra que no existe desplazamiento del filamento (d_f) en la punta extrusora a pesar de que existe desplazamiento en el émbolo (d_e).
2. Etapa de precipitación. El émbolo continúa avanzando a velocidad constante, la presión dentro de la bomba vence la tensión superficial del fluido, su inercia y la fricción de este con las paredes internas de la bomba, entonces comienza la precipitación del fluido viscoso a través de la boquilla extrusora.
3. Etapa de filamento estable. El émbolo continúa avanzando a velocidad constante, la presión dentro de la bomba y el caudal en la punta extrusora se han estabilizado y permanecen constantes, es una etapa en la cual el filamento es uniforme y como se aprecia en la gráficas, es lineal la relación entre (d_e) y (d_f).
4. Etapa de despresurización. Al inicio de esta etapa se detiene el avance del émbolo, pero debido a la presión interna de la bomba y las propiedades elásticas de los fluidos utilizados, continúa fluyendo el fluido viscoso a través de la punta extrusora, el caudal disminuye gradualmente hasta cero.

Para una impresión 3D precisa y uniforme es necesario que la extrusión se lleve a cabo con un caudal constante en la punta extrusora, esto se logra en la etapa tres del proceso de micro extrusión, por lo tanto las etapas uno, dos y cuatro son indeseables para el proceso de impresión. Las causas para la presencia de estas etapas, según deducciones surgidas de las observaciones realizadas a las pruebas, son las siguientes.

1. Compresión del fluido viscoso a imprimir. Esta es una constante, ya que al utilizar biomateriales aprobados por la FDA, no es posible modificarlos en su estructura química y debe de aceptarse y compensarse su módulo volumétrico de elasticidad.
2. Deformación del contenedor en la bomba de μ -extrusión. Este es otro de los factores observados durante la experimentación, al aumentar la presión dentro del contenedor, se presenta una deformación plástica del contenedor de fluido Bio-compatible, la magnitud de esta deformación dependerá de las características geométricas y materiales del contenedor. Esta observación dicta una consideración de diseño importante, es preferible utilizar los materiales frágiles a los dúctiles por su bajo módulo de elasticidad y por lo tanto mejor propensión a la deformación plástica. Por lo tanto, para la fabricación del contenedor se recomienda el uso de un cerámico, como el vidrio.

3. Compresión de burbujas de aire en el fluido viscoso. Este es otro componente que amplifica las regiones uno, dos y cuatro del fenómeno de microextrusión, por su naturaleza misma, el aire es un elemento muy compresible en comparación con los fluidos viscosos que se utilizarán, por lo tanto es recomendable que no estén presentes burbujas de aire en el interior de la bomba de émbolo.
4. Presión = Fuerza/Área (Geometría). La geometría del extrusor ejerce un efecto importante. Al usar diferentes tipos de jeringa, con agujas y sin agujas, se observó que mientras más pequeña sea la sección transversal de la jeringa, se requerirá una mayor presión para precipitar el fluido, una mayor presión implica una mayor amplificación de las regiones uno, dos y cuatro del fenómeno de micro extrusión.
5. Velocidad. La velocidad a la que avanza el embolo se relaciona en proporción directa con la amplificación de las gráficas mostradas. Una velocidad menor de extrusión producirá un caudal más uniforme mientras que una velocidad mayor producirá mayores efectos de compresión. Esto es debido a que con velocidades bajas, se da tiempo al fluido de liberar las fuerzas de compresión y expandir su volumen en proporción al avance del émbolo.
6. Aceleraciones. Los cambios de velocidad durante el proceso micro extrusión generan errores de geometría en los filamentos debido a que durante éstos no se trabaja en la etapa tres del fenómeno de micro extrusión, la presión interna y el caudal requieren estabilizarse al alcanzar una nueva velocidad después de haber experimentado aceleraciones, al salir de la etapa tres de filamento continuo las extrusiones no son uniformes.
7. Expansión volumétrica del fluido viscoso al salir de la bomba de micro extrusión debido al descenso de presión a la que está sometido el fluido viscoso.

Las anteriores observaciones resultado de las experimentaciones no presentan valores numéricos específicos pues estos deberán ser asignados dependiendo del fluido Bio-compatible a utilizar, pero la comprensión general del fenómeno de micro extrusión da pautas para el diseño del extrusor y la forma en la que debe llevarse a cabo el proceso de impresión 3D. Las siguientes son consideraciones que deben de seguirse para el diseño del equipo y el proceso de impresión.

1. El extrusor contenedor del fluido a extruir debe estar fabricado de un material rígido para evitar los errores en la extrusión debidas a las deformaciones del contenedor, el material adecuado para su fabricación es el vidrio, además de ser transparente y permitir la visualización del desplazamiento del fluido.
2. La geometría del cilindro contenedor del material a extruir tiene que ser de tal forma que su sección transversal sea lo suficientemente amplia como para no aumentar la presión en su interior debido al fenómeno $P=F/A$, por lo tanto es un error utilizar extrusores que tengan agujas.

3. La velocidad de extrusión debe de ser lo suficientemente baja como para no amplificar los efectos del fenómeno de μ -extrusión, ésta velocidad estará determinada por el tipo de fluido a utilizar, y se deberá determinar mediante experimentación. Pero es importante tener en consideración la relación entre la velocidad de extrusión y el efecto de compresión.
4. El controlador microprocesado de la Bio-impresora debe de coordinar las velocidades de desplazamiento de los ejes con la velocidad de deposición del micro extrusor para lograr deposiciones uniformes en el espacio.

3.4.2 Grosor del filamento a imprimir

Otra de las observaciones importantes es relacionada con el grosor del filamento a imprimir, como se había comentado, se pensaba que para variar el grosor del filamento a imprimir era necesario cambiar la punta extrusora, esto no es necesario pues coordinando la velocidad de desplazamiento del filamento a extruir (v_f) y la velocidad de desplazamiento del micro extrusor (v_x), es posible variar el filamento a extruir dentro de un margen determinado por el fluido a utilizar. Como se muestra en la ilustración 27, con la coordinación de estas velocidades se pueden presentar los tres siguientes casos.

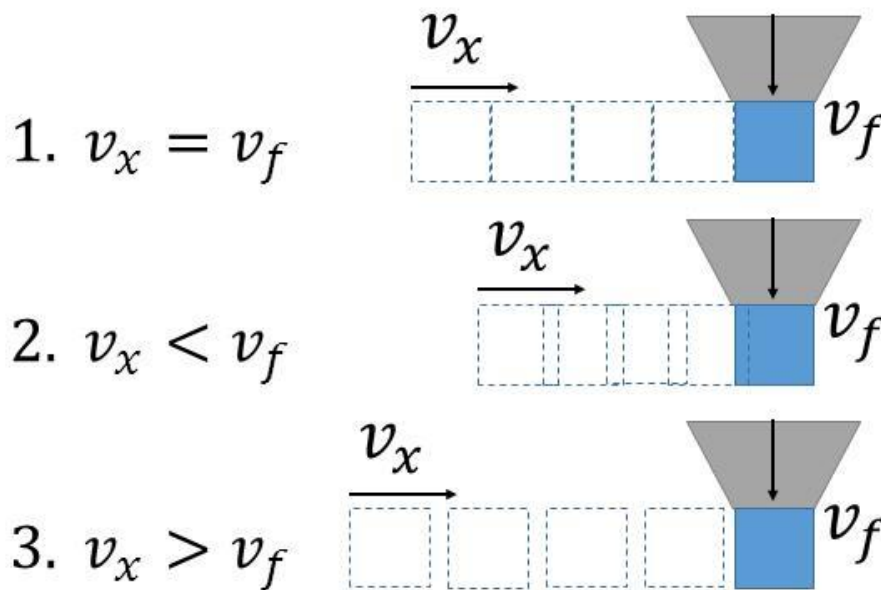


Ilustración 27. Tres diferentes casos de coordinación de velocidades para la variación del grosor del filamento a extruir.

1. La velocidad de desplazamiento (V_x) del micro extrusor es igual a la velocidad de salida del filamento (V_f). En este caso el grosor del filamento a extruir es el mismo que el diámetro de la punta extrusora. Aunque la geometría de la sección transversal del filamento impreso no es perfectamente circular, se sabe que el volumen extruido puede calcularse multiplicando el área de la boquilla extrusora por la longitud de la hebra, y de esta manera se sabe que el área de la sección trasversal del filamento a imprimir será el mismo que el área en la punta extrusora.

2. La velocidad de desplazamiento (V_x) del micro extrusor es menor a la velocidad de salida del filamento (V_f). En este caso el grosor del filamento a extruir es mayor que el diámetro de la punta extrusora, esto debido a que se deposita más material en un mismo segmento lineal de impresión.
3. La velocidad de desplazamiento (V_x) del micro extrusor es mayor a la velocidad de salida del filamento (V_f). En este caso el grosor del filamento a extruir es menor que el diámetro de la punta extrusora, esto debido a que se deposita menos material en un mismo segmento lineal.

Es importante recordar que el grosor del filamento a extruir solo es posible variarse en un rango determinado como se muestra en la gráfica de la ilustración 28, en ésta se especifica que manteniendo constante la velocidad del filamento a extruir (V_f) y variando la velocidad de desplazamiento lineal (V_x) desde (a) hasta (b) es posible variar el grosor del filamento a imprimir (k).

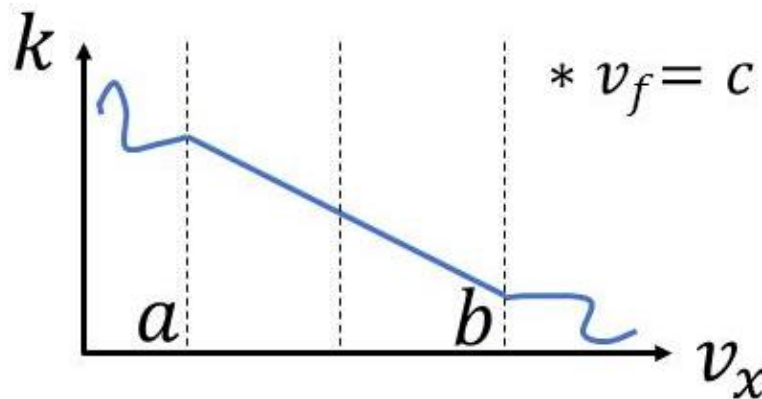


Ilustración 28. Gráfico que relaciona el grosor del filamento a imprimir con las velocidades V_x y V_f .

Si la impresión se realiza a una velocidad (V_x) más baja que (a) para una velocidad constante dada (V_f) intentando hacer una línea gruesa, entonces el filamento tendrá cúmulos de fluido viscoso apelmazado y no cumplirá con la condición de ser un filamento con sección transversal uniforme. Si la impresión se realiza a una velocidad (V_x) más alta que (b) para una velocidad constante dada (V_f) intentando hacer una línea más delgada, entonces el filamento impreso presentará discontinuidades y no cumplirá con la condición de ser un filamento con sección transversal uniforme.

3.4.3 Deposición en el espacio tridimensional

Para lograr una deposición uniforme y continua en el espacio tridimensional es necesario tomar en cuenta los desplazamientos en la máquina Bio-impresora 3D, ésta cuenta con cuatro grados de libertad: tres ejes que se desplazan linealmente y son perpendiculares entre sí (ejes X, Y y Z) y un cuarto eje para el extrusor (Eje A), el cual es de desplazamiento lineal y paralelo al eje Z, éste funciona para desplazar el émbolo de la bomba de μ -extrusión.

Estos cuatro desplazamientos deben ser coordinados para lograr una deposición uniforme en el espacio tridimensional, ya se demostró que para variar el grosor del filamento a extruir al imprimir una línea recta, es necesario coordinar la velocidad de desplazamiento lineal del extrusor (V_x) y la velocidad de salida del filamento (V_f). ¿Pero qué sucede en el caso de tres dimensiones? El desplazamiento en tres dimensiones está conformado por tres componentes de desplazamiento ortogonales entre sí, los cuales son los desplazamientos en los ejes X, Y y Z. La suma vectorial de las tres velocidades genera la velocidad resultante en el espacio tridimensional como se muestra en la siguiente ecuación, lo mismo sucede con la el desplazamiento (d_r), y la aceleración resultantes (a_r).

$$\vec{v}_x + \vec{v}_y + \vec{v}_z = \vec{v}_r$$

El desplazamiento con el que debe estar coordinada la extrusión es con el dicho desplazamiento resultante (d_r) de los ejes X, Y y Z de la máquina, este enunciado es válido tanto para dos dimensiones y tres dimensiones, y para trayectorias rectas, curvas y discontinuas. En la ilustración 29 se muestra de manera gráfica este enunciado, en azul se muestran los filamentos impresos de tres casos diferentes y en negro sus componentes de velocidad referenciados a los ejes de desplazamiento. En los tres casos para que se logre un filamento uniforme k debe permanecer constante.

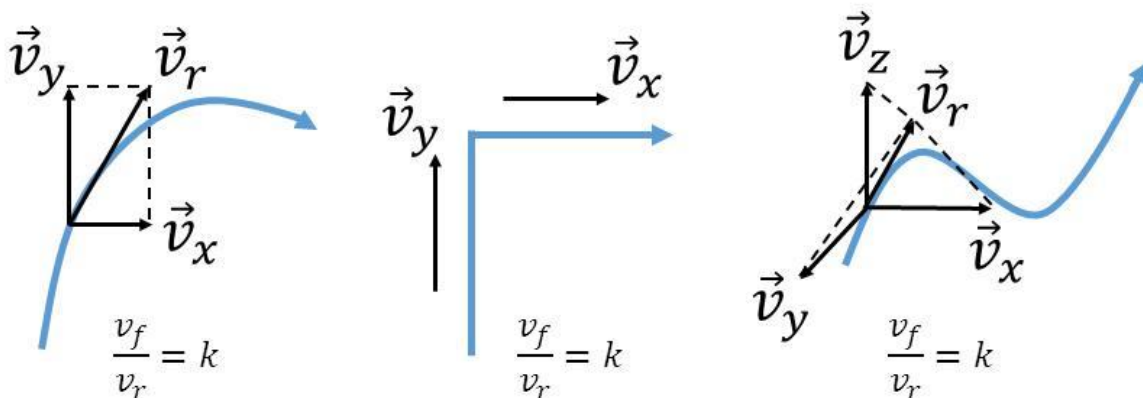


Ilustración 29. Coordinación de las velocidades de desplazamiento con la de extrusión.

Los desplazamientos irregulares en el espacio tridimensional involucran variaciones de velocidad debido a los cambios de trayectoria, por lo tanto la velocidad de desplazamiento resultante (v_r) se encontrará en constante cambio durante el proceso de impresión en tres dimensiones. Debido a esto y a lo estipulado anteriormente acerca de que debe existir una coordinación entre (v_f) y (v_r), puede deducirse que también debe existir una variación de la velocidad de salida del filamento (v_f) durante el proceso de impresión en tres dimensiones, y que esta variación debe estar coordinada con la variación de la velocidad resultante (v_r).

Como se mencionó anteriormente la relación entre la velocidad de avance del émbolo (v_e) y la velocidad de salida del filamento en la punta extrusora (v_f) es lineal solo en la etapa

tres del proceso de micro extrusión y bajo la condición de que se mantenga una velocidad constante de avance del émbolo (v_e), si se toma en cuenta que debido a la naturaleza de los desplazamientos en el espacio tridimensional es necesaria una continua variación de las velocidades (v_f) y (v_r) es entonces posible deducir que durante el proceso de impresión en el espacio tridimensional no existirá una relación lineal entre (v_e) y (v_f) y por lo tanto se generaran errores de extrusión en todo el proceso de impresión los cuales serán mayores cuanto mayor sea el cambio de velocidad durante el desplazamiento en el espacio tridimensional.

Estos errores en los que se deposita material extra durante las desaceleraciones o no se deposita el suficiente material durante las aceleraciones, se van acumulando capa por capa y terminan deformando de una manera considerable la estructura de fluido viscoso que se desea fabricar. Las partes de una estructura tridimensional de fluido en donde son mayores los cambios de rapidez durante su fabricación son en las terminaciones angulares, esto debido a que para realizar un cambio brusco de trayectoria es necesario primero disminuir la velocidad de desplazamiento (v_r) a cero en la punta angular para posteriormente acelerar en la nueva dirección. Ejemplos de este fenómeno se pueden apreciar en la ilustración 30 las cuales son estructuras tridimensionales de fluido viscoso que presentan deformaciones en las puntas angulares como se muestra.

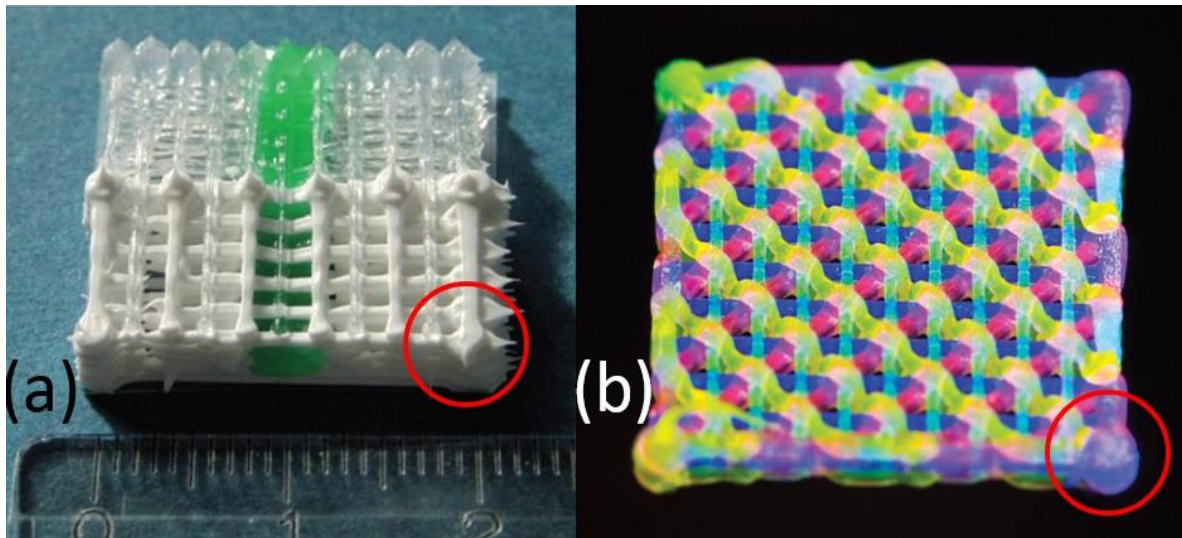


Ilustración 30. Estructuras tridimensionales de fluido viscoso, se muestran las acumulaciones de material extra en las esquinas.

4. Diseño de dimensiones y materiales

4.1 El robot cartesiano

El robot cartesiano, o también conocido como robot gantry cuenta con tres grados de libertad, tres ejes de desplazamiento lineal que son ortogonales entre sí, también debe contar con una base intercambiable del mecanismo de dosificación del material biológico, esto con el objeto de probar en un futuro diferentes técnicas de extrusión intercambiando solo el dispositivo dosificador. En la ilustración 31 se muestra una imagen de la configuración general de un robot cartesiano con sus direcciones y sentidos de desplazamiento.

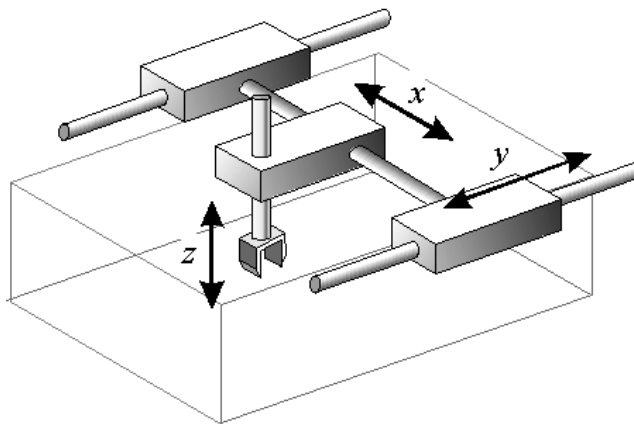


Ilustración 31. Configuración estructural y grados de libertad de un robot cartesiano.

Cada uno de estos grados de libertad deben ser actuados, y para esto se usarán motores eléctricos, existe la posibilidad de utilizar servomotores para mover los ejes, pero estos sistemas suelen ser más caros, existe la opción de usar motores a pasos en los cuales si se usan los drivers adecuados y se programa un correcto algoritmo de control, entregan resultados muy precisos. Los motores a pasos en combinación sus drivers de micro pasos y con el mecanismo tornillo sin fin – tuerca entregan resoluciones suficientes para los requerimientos de diseño.

En la estructura de un robot cartesiano se identifican las siguientes partes

1. Base principal
2. Mesa de trabajo
3. Carro de Y
4. Carro de X
5. Carro de Z
6. Herramienta actuadora

Un robot cartesiano también puede dividirse en los subsistemas que lo conforman

1. Estructura de soporte
2. Transmisión mecánica

3. Herramienta actuadora

La estructura se presenta en todas las partes del robot cartesiano, desde la base principal hasta la base de la herramienta actuadora. La estructura debe contar con las siguientes características.

1. Alta rigidez
2. Ligereza en los carros
3. Material de grado médico
4. No contar con pliegues o cavidades

Antes de continuar se realizó la pregunta, ¿Qué se debe definir primero, el material o la forma? Después de un poco de razonamiento se llegó a la conclusión de que depende de la aplicación. Si la aplicación del elemento a diseñar dicta que se debe usar tal material entonces se debe optimizar la geometría para lograr la rigidez deseada, pero si la aplicación dicta que la pieza debe tener una geometría específica entonces se debe buscar el material con el cual se cumplan las propiedades que debe tener la pieza. En el caso particular del diseño de la estructura de la Bio-impresora, su aplicación en transformación de materiales vivos y uso en cuartos limpios dicta una consideración importante que es el uso de materiales de grado médico. Por lo tanto en este trabajo para esta etapa de diseño de la estructura primero debe de seleccionarse el material a utilizar.

Un cuarto limpio o sala blanca es una habitación con un ambiente controlado y están diseñadas para tener bajos niveles de contaminación, estas salas deben de tener sus parámetros ambientales estrictamente controlados entre ellos: partículas en el aire, temperatura, humedad, flujo de aire, presión interior e iluminación. Es necesario que la Bio-impresora 3D opere en condiciones de cuarto limpio debido a que trabajará con materiales de grado médico que tendrán contacto directo con partes internas del cuerpo humano, una contaminación de cualquier tipo en la estructura a fabricar podría traer consigo efectos indeseados en el organismo en caso de implantación o dañar las pruebas realizadas en el caso de la investigación. El mínimo ambiente de control necesario es una cámara de flujo laminar para la realización de las impresiones 3D.

Como se ha comentado anteriormente el material a utilizar en la máquina debe de ser de grado médico, esto debido a que la máquina transformará materiales de aplicaciones médicas y se utilizará en cuartos limpios y estériles. Dos organizaciones de las más importantes a nivel internacional son las encargadas de dictar los estándares mediante pruebas de laboratorio para el uso de tales materiales, una es la FDA (Food and Drug Administration) y la otra es la USP (U.S. Pharmacopeial Convention). Los tres grandes grupos de materiales de grado médico que se pueden encontrar son metales, polímeros y cerámicos. En la tabla 8 se hace una comparación de sus propiedades para seleccionar el material más idóneo, en gris se sombrea el material que presenta la característica más adecuada para cada propiedad, el material seleccionado será el que cuente con mayores selecciones.

Tabla 8. Comparativa de propiedades de los materiales.

Propiedades	Metales	Polímeros	Cerámicos
Peso específico	Mayor	Menor	Medio
Resistencia última a tensión	Mayor	Medio	Menor
Módulo de elasticidad	Medio	Menor	Mayor
Coefficiente de expansión térmica	Medio	Mayor	Menor
Facilidad de manufactura	Medio	Mayor	Menor
Precio	Medio	Menor	Mayor

El peso específico, el cual se define como la fuerza que ejerce sobre la tierra por unidad de volumen es una propiedad a tomar en cuenta debido a la ligereza que presentan los materiales de bajo peso específico. Con materiales de bajo peso se conseguirían unas fuerzas inerciales menores en las aceleraciones y desaceleraciones, como muestra la tabla los materiales de menor peso específico son los polímeros. La resistencia última a la tensión se define como la fuerza que soporta un material antes de fallar, de los tres tipos de materiales mostrados los que presentan una mayor resistencia última son los metales. El módulo de elasticidad es una medida de la elasticidad del material, con módulos de elasticidad altos se presenta una menor deformación ante cargas y esto se traduce en una mayor rigidez, el material más rígido de los tres es el cerámico. El Coeficiente de expansión térmica mide la deformación de un material ante las variaciones de temperatura, con un menor coeficiente de expansión térmica se consigue una mayor estabilidad ante la temperatura, esta característica la tienen los cerámicos. La facilidad de manufactura está relacionada con los procesos de transformación de forma de cada tipo de material, el que es más fácil de manufacturar es el polímero. El precio y la disponibilidad son también variables importantes a considerar, en este caso el material que presenta un mejor valor son los metales.

El material elegido es el metal, específicamente el acero inoxidable austenítico SAE 316 el cual presenta alta resistencia a la corrosión frente a diversos químicos agresivos, ácidos y atmósfera salina, se utiliza para adornos arquitectónicos, equipo para el procesamiento de alimentos, farmacéutico, fotográfico, textil, etc.

Los principios de diseño conceptual dictaron la configuración general de la estructura y las partes que la compondrían, para poder definir correctamente las dimensiones de las partes que tendrá la maquinaria se realizó primero un análisis cinemático que determinó los desplazamientos velocidades y aceleraciones a los que están sometidos los ejes, y posteriormente un análisis cinético que determinó las fuerzas de acción y de reacción a las que está sometida la estructura, posteriormente con estas fuerzas encontradas se pudo dimensionar la geometría de los elementos de mecánicos de la Bio-impresora 3D.

Tanto en los momentos de aceleración y desaceleración del carro, es la unión entre el tornillo y la tuerca la que soportará las fuerzas de acción y de reacción, y estas fuerzas serán las causadas por la inercia de las masas y por la fricción en las guías de

desplazamiento. El mecanismo tornillo sin fin y tuerca, tiene la ventaja de que puede disminuir el avance lineal por paso angular del motor sin la necesidad de adicionar mecanismos reductores. Los mecanismos tornillo sin fin y tuerca más precisos que existen, son las tuercas embaladas o embaleradas, las cuales cuentan con sistemas recirculantes de baleros que aseguran una máxima precisión al presentar una precarga y eficiencia al minimizar las fricciones mediante los rodamientos. Una imagen de un tornillo y tuerca embalados con un corte longitudinal para la visualización del mecanismo interno de recirculación de baleros se muestra en la ilustración 32. Para el equipo de Bioimpresión 3D se utilizarán tornillos embalados de la serie Miniature TSI Precisión Rolled Bearing Ball Screw del fabricante Thomson®, sus características se mencionan más adelante.

El sistema de transmisión lineal, también debe de poseer guías lineales con el objeto de soportar el peso de los carros (los móviles), también debe existir precisión en estos desplazamientos, pues de esto dependerá la precisión en el resultado final de la impresión 3D. En la ilustración 33 se muestra una imagen de una guía lineal con un corte de sección en su bloque para mostrar el sistema de recirculación de rodillos, en este caso de rodillos. Para la fabricación de la máquina se utilizarán las guías lineales 1PA single continuos support del fabricante Thomson®, éstas tendrán un diámetro de 16 mm.



Ilustración 32. Tornillo y tuerca embalada con un corte longitudinal donde se muestra el mecanismo interno de recirculación de baleros.

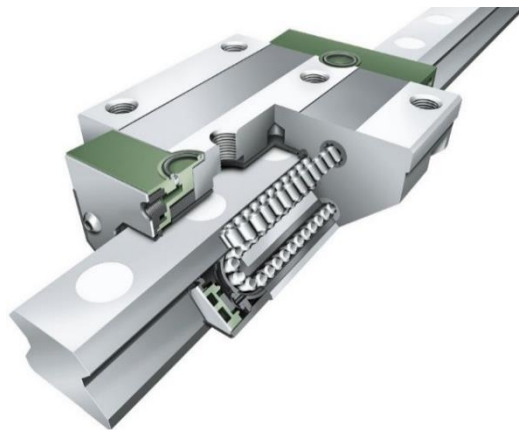


Ilustración 33. Guía lineal prismática y bloque lineal embalado con un corte longitudinal donde se muestra el mecanismo interno de recirculación de rodillos.

4.2 Extrusor de material biológico

La primera parte del diseño que se realizó fue el de la función de contenido, en este caso es el diseño del micro extrusor, con anterioridad se especificaron ciertas pautas que se deben de tomar en cuenta para su diseño las cuales surgieron de la observación de los fenómenos físicos de la función dosificar con una bomba de émbolo. Un dibujo conceptual de la forma que debería tener este dosificador se muestra en la ilustración 34. Se puede observar que existe una disminución suave de la sección transversal del contenedor cilíndrico en la punta de dosificado, esto para disminuir los efectos $P = \frac{f}{A}$. El material con el que se debería fabricar es un cerámico, para disminuir los errores en la extrusión provocados por la deformación del contenedor.

De acuerdo a las pautas anteriores, queda claro que es un error el utilizar una jeringa convencional con una aguja, la aguja que tiene la función de penetrar a través de la piel no es necesaria en un proceso de extrusión. En cambio provoca mayores errores de flujo al presentar una mayor resistencia al avance del fluido y aumentar la compresibilidad del mismo debido a la pequeña área de la sección transversal que presenta.

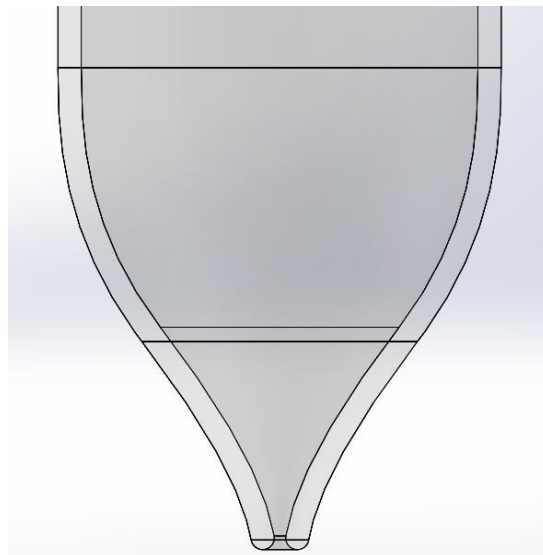


Ilustración 34. Forma más adecuada de la punta de un extrusor para materiales viscosos.

El material Bio-compatible para la extrusión deberá ser introducido por succión desde la punta o introducido desde la parte superior, el fluido será empujado por un émbolo el cual será a su vez empujado por un mecanismo tornillo sin fin y tuerca. El diseño del micro extrusor cumple con los principios de diseño semi-cinemático y aplicación más directa de la fuerza. El diseño es simétrico desde una vista frontal del ensamble, las fuerzas no hacen algún cambio de sentido desde esta perspectiva, pero desde una vista lateral existen algunas distancias de los elementos mecánicos que podrían producir pares indeseados en el ensamble. En la ilustración 35 se muestran los diagramas de cuerpo libre de la vista frontal y lateral con las fuerzas involucradas.

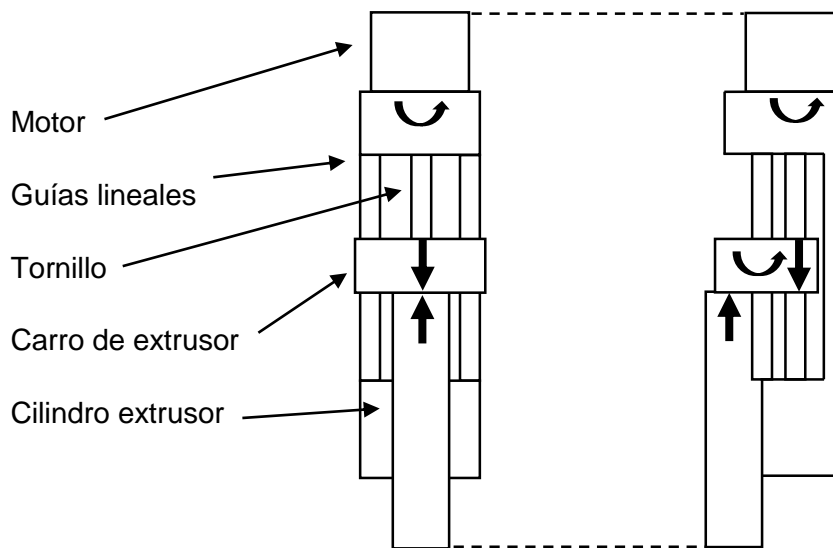


Ilustración 35. Diagramas de cuerpo libre del extrusor de jeringa

En la vista frontal se aprecia que la dirección de la fuerza tiene una misma línea de acción por lo tanto en este sentido no existen pares indeseados generados en el sistema. Desde una vista lateral, es posible observar que la fuerza realiza cambios de dirección al pasar del tornillo de avance hacia el émbolo del extrusor, esta distancia generará un par en las guías lineales que será proporcional a la distancia entre la línea de acción de la fuerza del tornillo y del émbolo y que provocará errores al deformarse el material del carro extrusor. Las medidas que se tomaron para disminuir este efecto fue la disminución en lo posible de dicha distancia y la manipulación de la geometría del carro extrusor para disminuir la deformación que presente.

La estructura principal del extrusor será fabricada con el polímero nylon ó poliamidas, la marca comercial Nylamid® produce una serie especial para aplicaciones Farmacéuticas y de alimentos denominada Nylamid® H la cual cuenta con las características de contar con normatividad higiénica FDA, USDA y NSF, presenta nula absorción de líquidos y resistencia química, lo que lo hace fácil de limpiar. El proceso de corte de las placas de Nylamid® H deberá realizarse preferentemente con procesos CNC para asegurar la presión y la exactitud de los cortes, se utilizarán dos guías lineales circulares de acero cromado de 6 mm de diámetro, sobre ellas correrá el carro del extrusor. El carro del extrusor deberá ser machueleado para funcionar como tuerca de avance del micro extrusor. Para su desplazamiento se utilizará un motor a pasos Nema 17 de 70 oz-in de par diferencial.

Las características técnicas finales del extrusor se enuncian a continuación, una imagen del prototipo virtual se muestra en la ilustración 36.

- Volumen máximo de fluido a extruir: 18 ml.
- Diámetro de boquilla extrusora: 500 μ m.
- Velocidad máxima del émbolo: 10 mm/s.

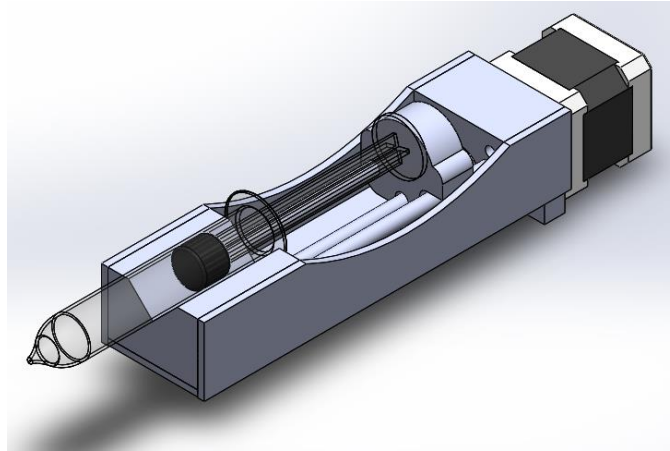


Ilustración 36. Extrusor de jeringa el cual realiza la función de dosificar el material biológico.

4.3 Carro de eje X

Como se definió en la etapa conceptual, el extrusor estará montado sobre el carro del eje X, para poder dar una geometría a esta pieza de la máquina es necesario primero identificar las fuerzas a las que estará sometida. Debido a que es un elemento que se mantendrá en movimiento constante y cuyas cargas no variarán en el tiempo entonces es un caso dinámico con cargas constantes.

La fabricación de las estructuras tridimensionales de fluidos Bio-compatibles se llevará a cabo capa por capa, estas capas se realizarán en el plano X – Y y el desplazamiento lineal en el eje Z se llevará a cabo solo al pasar de una capa terminada a otra nueva por fabricar, por lo tanto los desplazamientos en Z serán mínimos. En la ilustración 37 se muestran las fuerzas de acción y reacción involucradas en el concepto del carro de X, las flechas azules indican el sistema de referencia utilizado el cual también está en concordancia con el sistema de referencia que se utilizará durante los trabajos de impresión 3D.

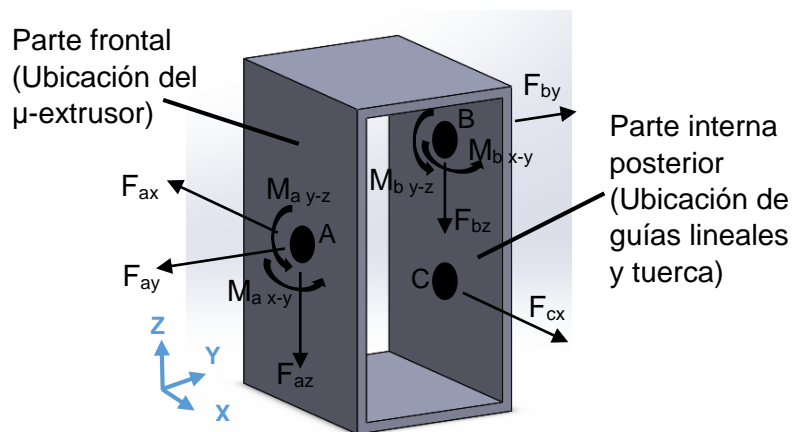


Ilustración 37. Geometría general del concepto del carro de X y las fuerzas involucradas.

El carro de X es el elemento mecánico que desplaza a los extrusores en la dirección de X, está formado por una caja en la cual los extrusores son colocados en la parte delantera y en la parte interna posterior se colocan la guía línea y el tornillo de avance.

En el punto A que representa la unión entre el micro extrusor y el carro de X, existen tres fuerzas y dos momentos actuando. Las fuerzas (F_{ax}) y (F_{ay}) que actúan en las direcciones de X y Y con un sentido que depende del desplazamiento del carro, son provocadas por la aceleración y desaceleración de la masa de los micro extrusores, la fuerza (F_{az}) representa el peso de los micro extrusores en la dirección negativa de Z, los momentos (M_{ax-y}) y (M_{ay-z}) son provocados por las fuerzas (F_{ax}) y (F_{ay}) en el centro de masa del micro extrusor y la distancia de éste al punto A de manera perpendicular.

El punto B que representa la unión del carro de X con el bloque lineal de la guía de X está expuesto a dos fuerzas y dos momentos. La fuerza (F_{by}) es provocada por la aceleración y desaceleración de la suma de las masas del μ -extrusor y del carro de X en el sentido de Y, la fuerza (F_{bz}) es el peso de los micro extrusores y el carro de X, los momentos (M_{bx-y}) y (M_{by-z}) son provocados por la distancia entre el punto B y el centro de masa equivalente de los cuerpos del micro extrusor y el carro de X de manera perpendicular en su correspondencia en cada eje.

El punto C que representa la unión entre el carro de X y la tuerca del tornillo actuador de X está sometido solo a una fuerza F_{cx} , que es la generada por la aceleración y desaceleración de la suma de las masas del micro extrusor y del carro de X en el sentido de X.

Después de la observación del flujo de fuerzas en el elemento, se han propuesto los siguientes puntos para la geometría del elemento y la ubicación de algunas de sus partes, el prototipo digital mejorado del carro de X y el carro de X con dos micro extrusores montados se muestra en la ilustración 38.

- La guía lineal será puesta en la parte superior y el tornillo en la parte inferior del carro de X, esto es debido a que el centro de masa del micro extrusor está recargado en la parte superior debido al peso del motor y para disminuir el par que podría generar con respecto al punto de sujeción del carro de X se debe disminuir dicha distancia, esto se logra colocando la guía lineal en la parte superior del carro de X, específicamente en el punto B.
- Debido a que F_{az} tenderá a deformar la estructura del carro de X en el plano Y-Z, es necesario reforzar el perfil lateral incorporando una geometría que aumente la rigidez en ese sentido de deformación. El resultado es un aumento del momento de inercia de la sección transversal en ese plano.

La fabricación de esta pieza deberá llevarse a cabo con un segmento de lámina de acero inoxidable austenítico SAE 316 de calibre 20 (.9 mm de grosor), se realizarán procesos de cortado, doblado y soldado se los segmentos, los cortes deberán ser realizados mediante

máquinas CNC de plasma o laser para obtener los mejores acabados en los cortes y las mayores exactitudes en las piezas.

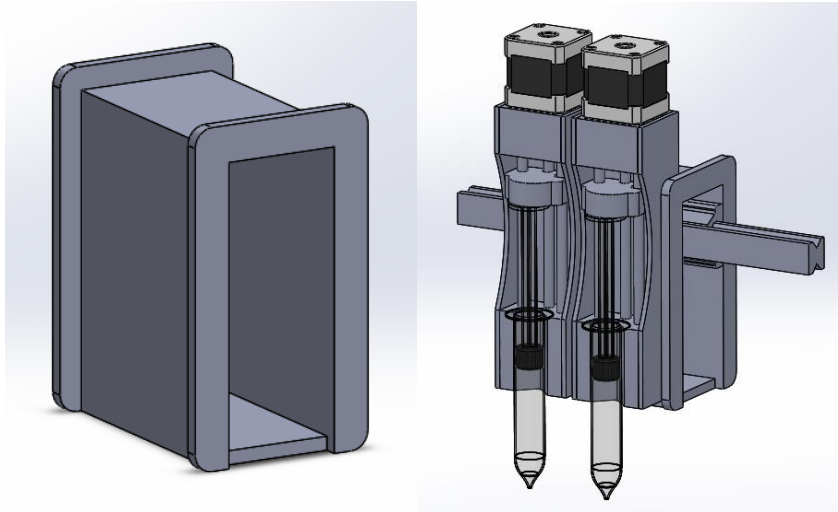


Ilustración 38. A la izquierda el carro de X en su configuración geométrica final, a la derecha el ensamblaje de dos μ -extrusores y carro de X.

En este punto es importante recordar la aceleración a la cual estarán sometidos los ejes, este dato viene dado desde la lista de requerimientos mostrada con anterioridad en el presente trabajo, debido a que la velocidad de fabricación no serán una constante, más bien dependerá de los requerimientos del Bio-material a trabajar, se considerará la máxima aceleración deseada la cual es de $1000 \frac{mm}{s^2} = 1 \frac{m}{s^2}$. La fuerza necesaria para obtener una aceleración de $1000 \frac{mm}{s^2} = 1 \frac{m}{s^2}$ tendiendo una masa de .7 Kg en el carro de X y los dos extrusores es de:

$$F = ma$$

$$F = .7 \text{ kg} * 1 \frac{m}{s^2} = .7 \text{ N}$$

Tomando en cuenta que el mecanismo que se utilizará para el desplazamiento del carro de X es tornillo – tuerca, el par necesario mínimo para mover el carro de X a dicha aceleración aplicando la ecuación para el caso en el que el movimiento de la tuerca es en sentido opuesto a la aplicación de la carga [33] se calcula con la siguiente ecuación:

$$\tau = \left(\frac{Fd}{2} \right) \left[\frac{L + \pi\mu d}{\pi d - \mu L} \right]$$

Donde:

τ = Par necesario para desplazar el carro a dicha aceleración.

F = Magnitud de la fuerza necesaria para desplazar el carro a dicha aceleración.

d = Diámetro de paso de las cuerdas del tornillo.

L = Avance de la cuerda.

μ = Coeficiente de fricción entre la cuerda y la tuerca.

Los anteriores datos se obtendrán de la página web del fabricante de los tornillos de avance, éstos serán de la serie Miniature TSI Precisión Rolled Bearing Ball Screw del fabricante Thomson® y se utilizarán las tuercas embaleradas del mismo fabricante.

$$d = 12 \text{ mm} = 0.012 \text{ m}$$

$$L = 0.05'' = 2 \text{ mm} = 0.002 \text{ m.}$$

$$\mu = 0.2$$

Algunos otros datos relevantes sobre el tornillo embalerado son los siguientes.

$$\text{Capacidad dinámica de carga} = 4.5 \text{ KN}$$

$$\text{Capacidad estática de carga} = 7.6 \text{ KN}$$

$$\text{Máximo backlash} = 0.05 \text{ mm}$$

$$\text{Precisión} = \pm 23 \mu\text{m}/300\text{mm}$$

Por lo tanto el par necesario para realizar el desplazamiento de la carga a dicha aceleración es el siguiente:

$$\tau = \left(\frac{0.7 * 0.012}{2} \right) \left[\frac{0.002 + (\pi * 0.2 * 0.012)}{\pi * 0.012 - 0.2 * 0.002} \right]$$

$$\tau = 0.001063 \text{ Nm} = 0.15053 \text{ Oz} - \text{in}$$

Es necesario mencionar que los cálculos realizados para la determinación del torque son ideales, un factor importante a tomar en cuenta es la fricción de las guías lineales las cuales presentarán una resistencia a su desplazamiento que dependerá de la aceleración, las propiedades del lubricante usado y el nivel de sobrecarga con el que esté ajustado el bloque lineal. Para compensar estos factores variables se utilizará un factor de seguridad de 4 para calcular el par necesario final τ_f .

$$\tau_f = FS * \tau$$

$$\tau_f = 4 * 0.15053 \text{ Oz in} = 0.602012 \text{ Oz in}$$

Las unidades Oz-in (Onzas por pulgada) son comunes en las especificaciones de los fabricantes de motores a pasos, éstos se encuentran estandarizados en diferentes tamaños de la cara frontal del motor y está directamente relacionado con la cantidad de par que pueden generar, existen las familias nema 17, nema 23, nema 34 e incluso nema 42 para los motores más grandes. Para este caso, debido al bajo par necesario para el desplazamiento del carro de X es posible usar un Motor a pasos Nema 23 de 300 Oz-in el cual esta sobrado en cuanto a potencia para disminuir el riesgo de pérdida de pasos durante la operación y evitar sobre calentamiento.

Como se mencionó, la capacidad de carga dinámica del tornillo es de 4.5 KN, la cual es suficiente para la aplicación pues presenta una carga de .7 N durante el desplazamiento a

las aceleraciones máximas. La forma en la que estará montado este motor en el carro de Z se mostrará en la siguiente sección de este capítulo.

4.4 Carro de eje Z

El carro del eje Z es el elemento mecánico que realiza la función de desplazar a los extrusores hacia arriba y hacia abajo, como se comentó, los desplazamientos de este elemento en la dirección de Z serán mínimos debido a que la fabricación se realizarán capa por capa en el plano X-Y y cada una de éstas tiene un grosor máximo de 0.5 mm. El carro del eje X que fue analizado en la sección anterior, será montado en el carro de Z analizado en la presente sección. El carro de Z será desplazado por dos tornillos de avance ubicados en los laterales, serán iguales al que se usó en el desplazamiento de X, las guías lineales también se encontrarán en los extremos. Una imagen de la parte posterior del concepto y de las fuerzas involucradas se muestra en la ilustración 39.

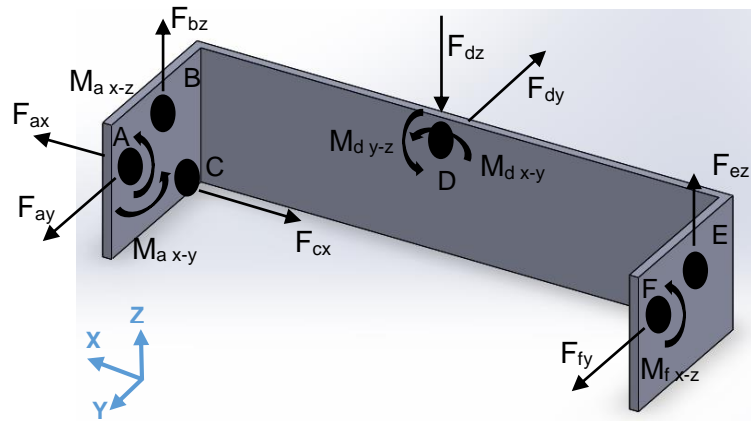


Ilustración 39. Concepto del carro de Z y las fuerzas involucradas en éste.

En la ilustración 39 los puntos negros representan los puntos de acción de fuerzas y momentos. El punto A es en donde se ubicará la guía lineal del Eje Z, ésta será una guía prismática circular para limitar cuatro grados de libertad, por lo tanto existirán dos fuerzas de reacción (F_{ax} y F_{ay}) en las direcciones de X y Y, y dos momentos (M_{ax-y} y M_{ax-z}) actuando en éste punto. En el punto B se encontrará la unión entre la tuerca de avance y el carro de Z, aquí solo existirá una fuerza lineal provocada por el empuje del tornillo en la dirección de Z (F_{bz}), este mismo caso se aplica al punto E, en donde se realizará la unión de la tuerca de avance y el carro de Z en el lado derecho del ensamble visto desde la parte trasera (F_{ez}). El punto F se ubicará la otra guía lineal del carro de Z, en este caso debido a que solo representa restricciones de dos grados de libertad, tendrá dos reacciones, una fuerza (F_{fy}) y un momento (M_{f-x-z}). El punto C es el lugar de aplicación de una fuerza lineal (F_{cx}) debida a la aceleración y desaceleración del carro de X y los dos micro extrusores montados en éste.

En este punto es posible apreciar que debido a la sujeción del tornillo en el punto C se presentan fuerzas que tienen componentes en las tres direcciones ortogonales, pero solo se toma en cuenta la fuerza con respecto al desplazamiento de la tuerca debido a que la

función del tornillo debe ser solo la de transmitir fuerza en esa dirección, no soportarla en las otras direcciones, por esta razón el tornillo debe de estar en voladizo.

Finalmente el punto D será en donde se unan el carro de X y el carro de Z a través de una guía lineal, las fuerzas de acción en este punto de ubicación variable serán provocadas directamente por el bloque lineal embalado (F_{dz} y F_{dy}), la fuerza de acción (F_{dy}) es una carga distribuida debido a la unión de la guía lineal con el carro de Z, en ese mismo punto también están presentes los momentos (M_{dy-z} y M_{dy-x}).

Después de la observación del flujo de fuerzas en el elemento, se han propuesto los siguientes puntos para la geometría del elemento y la ubicación de algunos de sus partes.

- El carro de Z presenta concentraciones de esfuerzos en donde el material tiene uniones, por lo tanto, es recomendable colocar en la parte superior e inferior partes de material con una geometría optimizada para neutralizar las concentraciones de esfuerzos.
- Las guías lineales que dirigirán el desplazamiento del carro de Z deberán ser colocadas en la parte trasera y los tornillos de desplazamiento en la parte delantera de las tapas laterales. Lo anteriores es con el objeto de disminuir los momentos generados sobre las guías lineales.

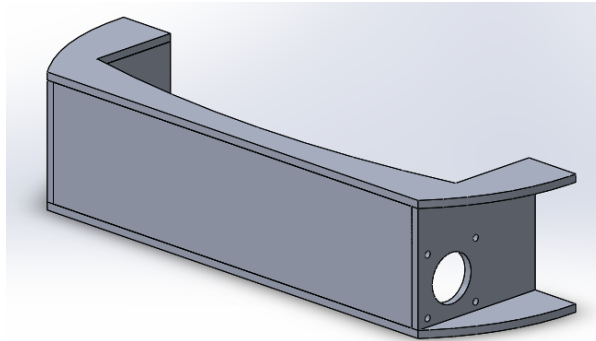


Ilustración 40. Carro de Z con geometría optimizada para aumentar su resistencia a las diversas fuerzas a las que estará sometido.

Al concepto inicial del carro de Z se le colocaron una tapa superior y una tapa inferior, como se mencionó en los puntos anteriores, con el objeto de aumentar su resistencia ante las fuerzas presentadas en la ilustración 39. En la ilustración 40 se muestra una imagen del ensamble del carro de Z y en la ilustración 41 se muestra el ensamble total de la máquina hasta el momento.

La fabricación de esta pieza deberá llevarse a cabo con un segmento de lámina de acero inoxidable austenítico SAE 316 de calibre 16 (1.5 mm de grosor), se realizarán procesos de cortado, doblado y soldado de los segmentos, los cortes deberán ser realizados mediante máquinas CNC de plasma o laser para obtener los mejores acabados en los cortes y las mayores exactitudes en las piezas.

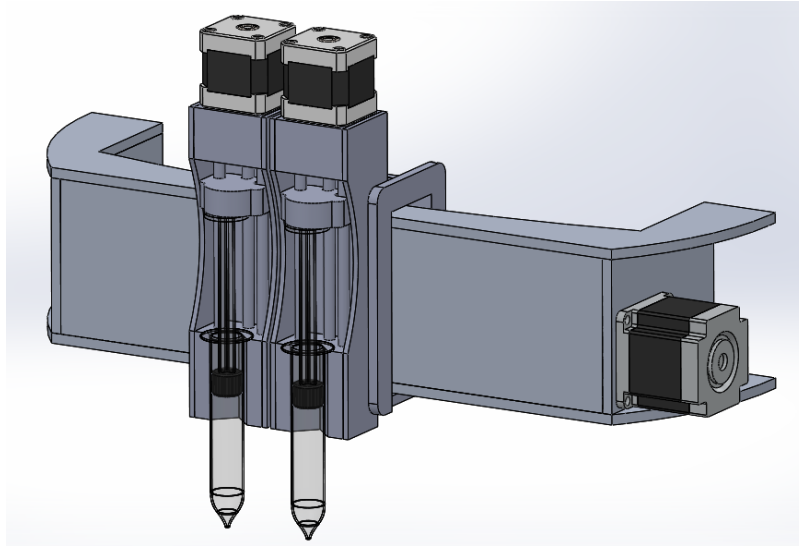


Ilustración 41. Ensamble del carro de Z y el resto de los elementos que se han analizado hasta el momento.

Recordando que la aceleración máxima para este eje es de $1000 \frac{mm}{s^2} = 1 \frac{m}{s^2}$, la fuerza necesaria para mover la masa de 3 Kg del total del ensamble hasta el momento es de: $F = 3 \text{ kg} * 1 \frac{m}{s^2} = 3 \text{ N}$ más la fuerza necesaria para contrarrestar los efectos de la gravedad $F = 3 \text{ kg} * 9.81 \frac{m}{s^2} = 29.43 \text{ N}$ da como resultado.

$$F = 29.43 \text{ N} + 3 \text{ N} = 32.43 \text{ N}$$

Tomando en cuenta que el mecanismo que se utilizará para la transmisión de potencia del carro de X es tornillo – tuerca, el par necesario mínimo para mover el carro de X a dicha aceleración aplicando la ecuación para el caso en el que el movimiento de la tuerca es en sentido opuesto a la aplicación de la carga se calcula con la misma ecuación presentada en la sección anterior.

$$\tau = \left(\frac{Fd}{2} \right) \left[\frac{L + \pi\mu d}{\pi d - \mu L} \right]$$

El modelo de tornillo a usar en los tres ejes de desplazamiento es el mismo, por lo tanto se utilizan los mismos datos que en el caso anterior actualizando la fuerza que se requiere para acelerar la masa.

$$\tau = \left(\frac{32.43 * 0.012}{2} \right) \left[\frac{0.002 + (\pi * 0.2 * 0.012)}{\pi * 0.012 - 0.2 * 0.002} \right]$$

$$\tau = 0.04929 \text{ Nm} = 6.98 \text{ Oz} - \text{in}$$

Aplicando un factor de seguridad de 4 para encontrar el par necesario final en el eje Z.

$$\tau_f = FS * \tau$$

$$\tau_f = 4 * 6.98 \text{ Oz in} = 27.92 \text{ Oz in}$$

Se utilizarán dos motores a pasos Nema 23 de 300 Oz – in para el movimiento de este eje, en base a el par necesario arrojado por los cálculos se puede concluir que los motores trabajaran bajo su potencia nominal lo que evitará sobre calentamiento y pérdida de pasos.

4.5 Carro de eje Y

El carro del eje Y es el elemento mecánico que realiza la función de desplazar a los extrusores hacia adelante y hacia atrás viendo a la impresora 3D desde el frente, éste elemento estará directamente conectado a la referencia mecánica a través de sus guías lineales en la dirección de Y. Al igual que los demás grados de libertad de la máquina, este será desplazado mediante el mecanismo tornillo-tuerca y la fuente de potencia mecánica será un motor a pasos. Una imagen del concepto inicial y de las fuerzas involucradas se muestra en la ilustración 42, las flechas azules indican el marco de referencia el cual también coincide con el sistema de referencia que se utilizará durante los trabajos de impresión.

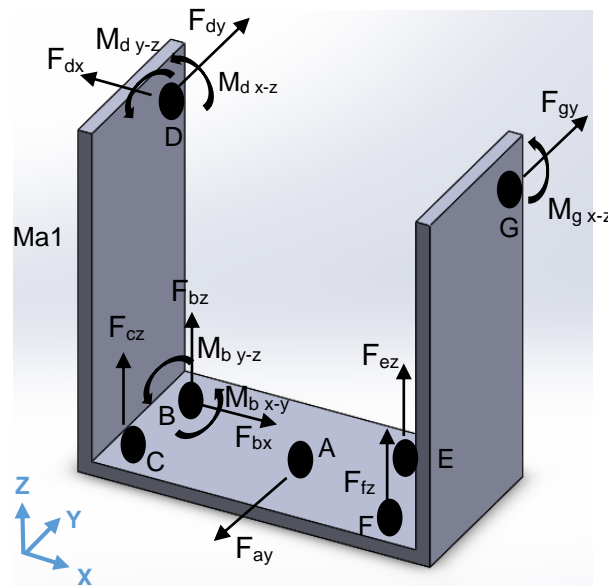


Ilustración 42. Carro de Y con las fuerzas a las que estará sometido.

En la ilustración los puntos negros representan los puntos de acción de fuerzas y momentos. Comenzando con la parte superior, El punto D representa al unión del carro de Y con el bloque lineal del carro de Z, debido a que será una guía prismática circular las reacciones que presenta son dos fuerzas (F_{dy} y F_{dx}) y dos momentos ($M_{d\ y-z}$ y $M_{d\ x-z}$). El punto G en la parte superior es el contacto con la otra guía lineal del carro de Y debido a que serán rodamientos sobre riel, representa solo dos restricciones, una fuerza (F_{gy}) y un momento ($M_{g\ x-z}$).

En la parte inferior se colocarán los bloques lineales para el desplazamiento en el sentido de las Y, éstos se representan con los puntos B y E, en el punto B se colocará una guía prismática circular, por lo que sus reacciones son dos fuerzas (F_{bz} y F_{bx}) y dos momentos ($M_{b_{x-y}}$ y $M_{b_{y-z}}$). En el punto E se utilizará una guía lineal de riel de dos contactos, por lo tanto solo presenta una fuerza de reacción (F_{ez}). Los puntos C y F representan la unión de los motores a pasos y los tonillos de avance con el carro de Y, éstos solo presentarán una fuerza cada uno (F_{cz} y F_{fz}) en el sentido de Z. Finalmente el punto A en la parte inferior representa la unión del carro de Y con el tornillo de avance de Y a través de una tuerca embalerada, éste solo presenta una fuerza en dirección de Y (F_{dy}) debido al par que ejerce el motor. Después de la observación del flujo de fuerzas en el elemento, se han propuesto los siguientes puntos para la geometría del elemento.

- Las aceleraciones y desaceleraciones del carro de X en el sentido de X provocará las fuerzas (F_{dx}) y debido a la altura del carro de Y se generarán momentos flectores en la base que pueden provocar deformaciones significativas, debido a lo anterior se debe reforzar esa zona con la colocación de una geometría que aumente el momento de inercia en el sentido de esa deformación.
- Las guías lineales que dirigirán el desplazamiento del carro de Z deberán ser colocadas en la parte trasera y los tornillos de desplazamiento en la parte delantera de las tapas laterales. Lo anteriores es con el objeto de disminuir los momentos generados sobre las guías lineales al aproximar lo más posible la línea de acción de la fuerza al centro de masa del elemento a desplazar.
- La parte superior del carro de Y requiere de la unión a través de un puente para dar mayor rigidez a la estructura. De esta forma se evitarán también vibraciones mecánicas durante los desplazamientos.

En la ilustración 43 se muestra el prototipo digital final de carro de Y y en la ilustración 44 se muestra el ensamble completo de la máquina hasta el momento. La fabricación de esta pieza deberá llevarse a cabo con placa de aluminio de ½ pulgada, este metal sufre una oxidación pasiva, pero se encuentra lo suficientemente alejada del área de impresión como para no contaminarla. Para su manufactura se recomienda fresado con estrategia de perfilado con Router CNC para garantizar su exactitud en dimensiones, para la unión de los elementos se deben realizar proceso de soldado.

Recordando que la aceleración máxima para este eje es de $1000 \frac{mm}{s^2} = 1 \frac{m}{s^2}$, la fuerza necesaria para mover la masa de 7 Kg del total del ensamble hasta el momento es de:

$$F = ma$$

$$F = 7 \text{ kg} * 1 \frac{m}{s^2} = 7 \text{ N}$$

Tomando en cuenta que el mecanismo que se utilizará para la transmisión de potencia del carro de Y es tornillo – tuerca, el par necesario mínimo para mover el carro de Y a dicha aceleración se encuentra aplicando la misma ecuación de la sección anterior.

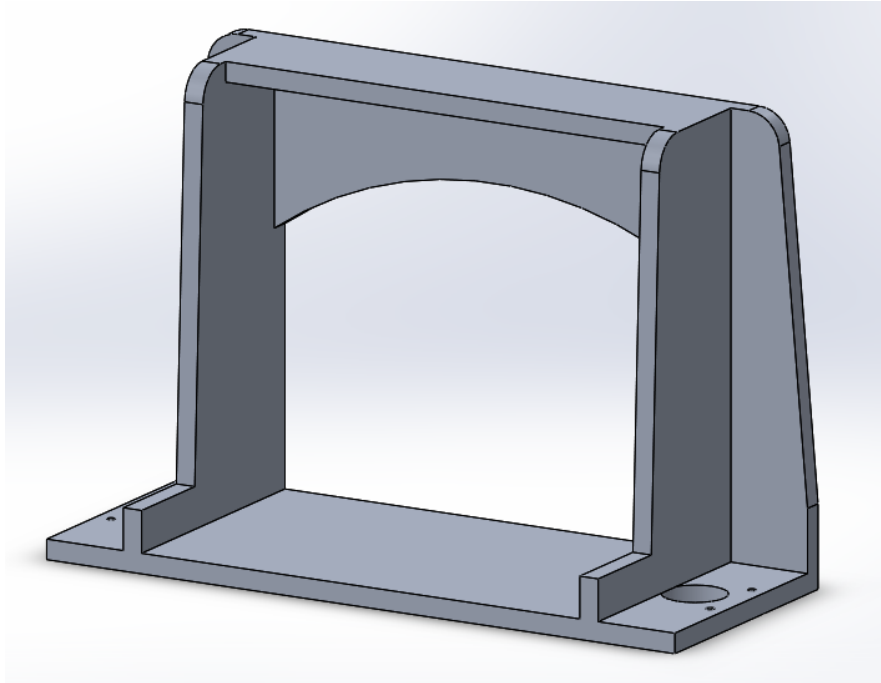


Ilustración 43. Carro de Y con las modificaciones geométricas pertinentes para aumentar su resistencia y rigidez ante las fuerzas a las que estará sometido.

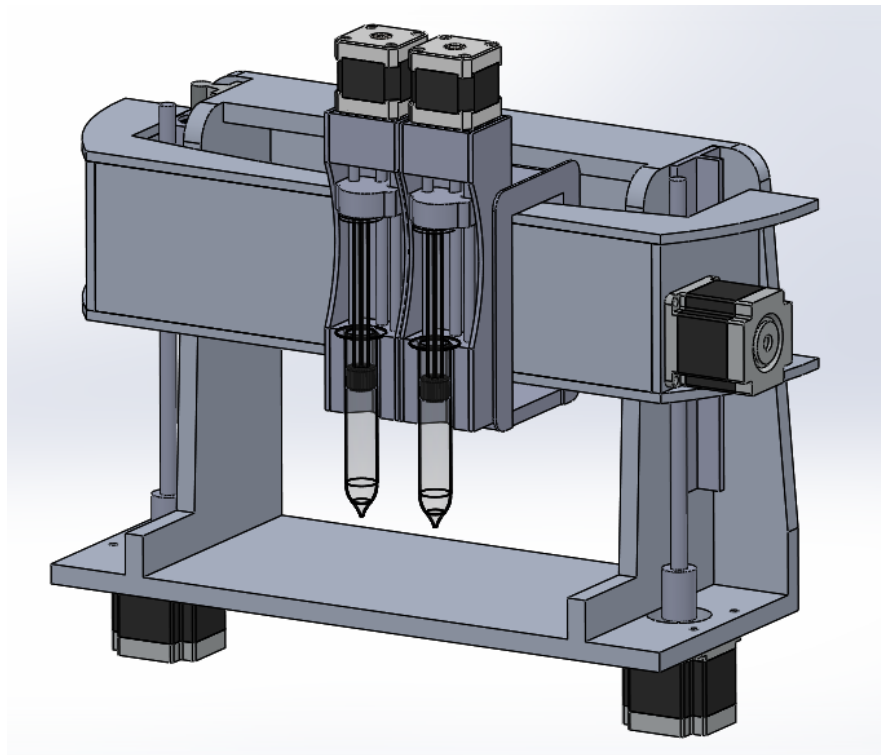


Ilustración 44. Ensamble de la Bio-impresora 3D con los elementos mostrados hasta el momento: μ -extrusores, carro de X, carro de Y y carro de Z.

$$\tau = \left(\frac{Fd}{2}\right) \left[\frac{L + \pi\mu d}{\pi d - \mu L}\right]$$

El modelo de tornillo a usar en los tres ejes de desplazamiento es el mismo, por lo tanto se utilizan los mismos datos que en el caso anterior, actualizando la fuerza que se requiere para acelerar la masa se encuentra que el par mínimo necesario es de:

$$\tau = \left(\frac{7 * 0.012}{2}\right) \left[\frac{0.002 + (\pi * 0.2 * 0.012)}{\pi * 0.012 - 0.2 * 0.002}\right]$$

$$\tau = 0.01063 Nm = 1.5053 Oz - in$$

Aplicando un factor de seguridad de 4 para realizar los trabajos con potencia sobrada y compensar los efectos de la fricción y la temperatura queda:

$$\tau_f = FS * \tau$$

$$\tau_f = 4 * 1.5053 Oz in = 6.0212 Oz in$$

Se utilizará un motor a pasos Nema 23 de 400 Oz – in para el movimiento de este eje, será un motor bipolar de 4 hilos y será alimentado por un driver de micro-pasos.

4.6 Estructura base

Finalmente se diseñó la base de la máquina, ésta tiene la función de sostener, ser la referencia mecánica para el resto de los elementos móviles de la máquina, por lo tanto la característica principal que debe de presentar es rigidez. Para lograr lo anterior el diseño de la base cuenta con lo siguiente.

- La base principal es un ensamble cuadrado soldado de ángulo de acero inoxidable, el cual servirá también para posicionar la guía lineal prismática circular del eje de las Y. El otro extremo del ángulo deberá ser rectificad para servir como la otra guía lineal de un grado de restricción.
- En la parte frontal y posterior al cuadrado de ángulo se le atornillarán segmentos de aluminio, a estos se le unirán otros dos segmentos de aluminio rectangulares en los laterales. Lo anterior servirá para cubrir el sistema de desplazamiento de Y y demás para dar un soporte a la mesa de trabajo, la cual reposará sobre los segmentos de aluminio de la parte superior y posterior.
- En la parte inferior de la estructura general, se colocarán tres patas de goma, dos en la parte posterior y una en la parte frontal, al colocar restricciones exactas en la unión entre el equipo de Bio-impresión 3D y la superficie donde estará colocado se logra una colocación firme y se evita el “baile” del aún en superficies no perfectamente planas.

Una imagen del ensamble de la estructura de la base del equipo se muestra en la ilustración 45. En ésta se puede observar el cuadro de ángulo de inoxidable, el marco de

aluminio, la guía lineal prismática circular con sus dos bloques lineales, el tornillo embalado con su soporte y los boques para la guía de una restricción.

El ángulo de inoxidable mide 30 mm de lado y tiene un grosor de 5mm, la placa de aluminio que cubre la periferia es de un grosor de 9 mm. El largo de los lados de esta estructura base es de 42 cm de ancho por 37 cm de largo, sobre las caras frontal y trasera del cuadro de aluminio se colocará la mesa de trabajo para la realización de las impresiones 3D.

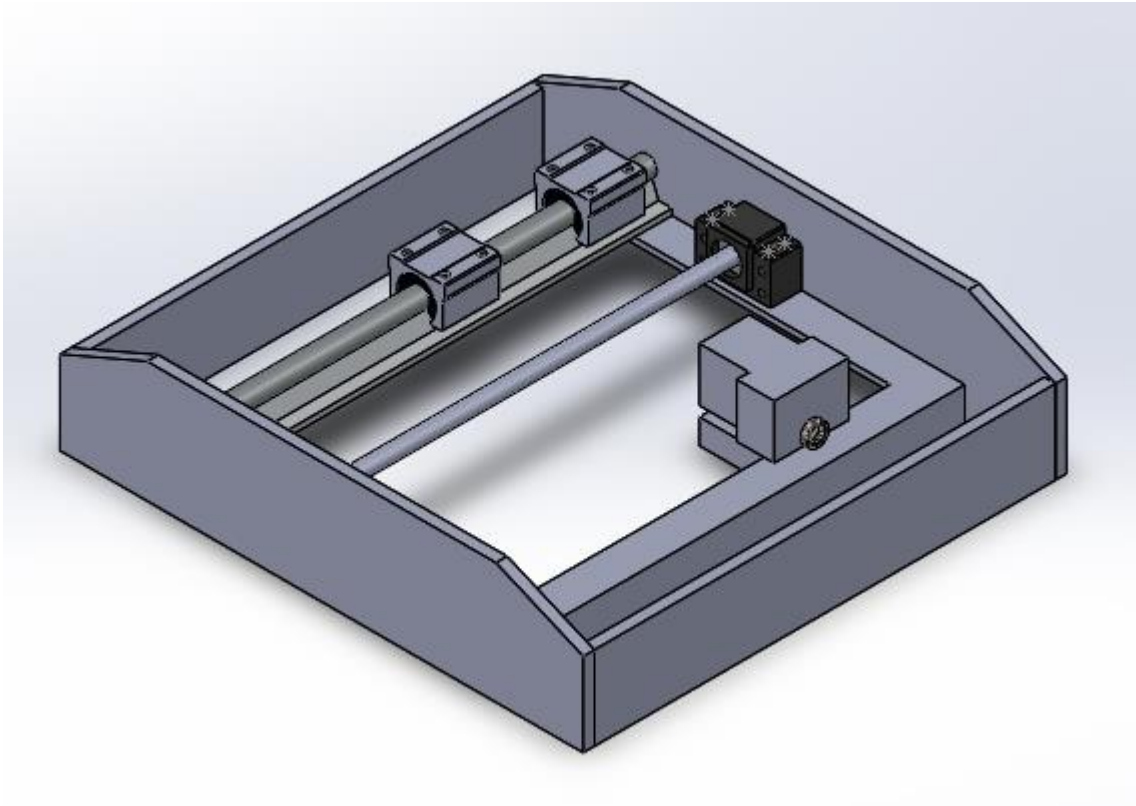


Ilustración 45. Estructura de la base principal

4.7 Resumen de características del equipo

Las características técnicas finales del equipo de Bio-impresión 3D se enlistan a continuación.

- Resolución en los ejes: 0.625 μm
- Aceleración máxima: 1 m/s^2
- Velocidad máxima: 2000 mm/min
- Área de trabajo: 20cm en X, 20 cm en Y, 10 cm en Z

En la ilustración 46 se muestra un prototipo digital completo del equipo de Bio-impresión 3D.

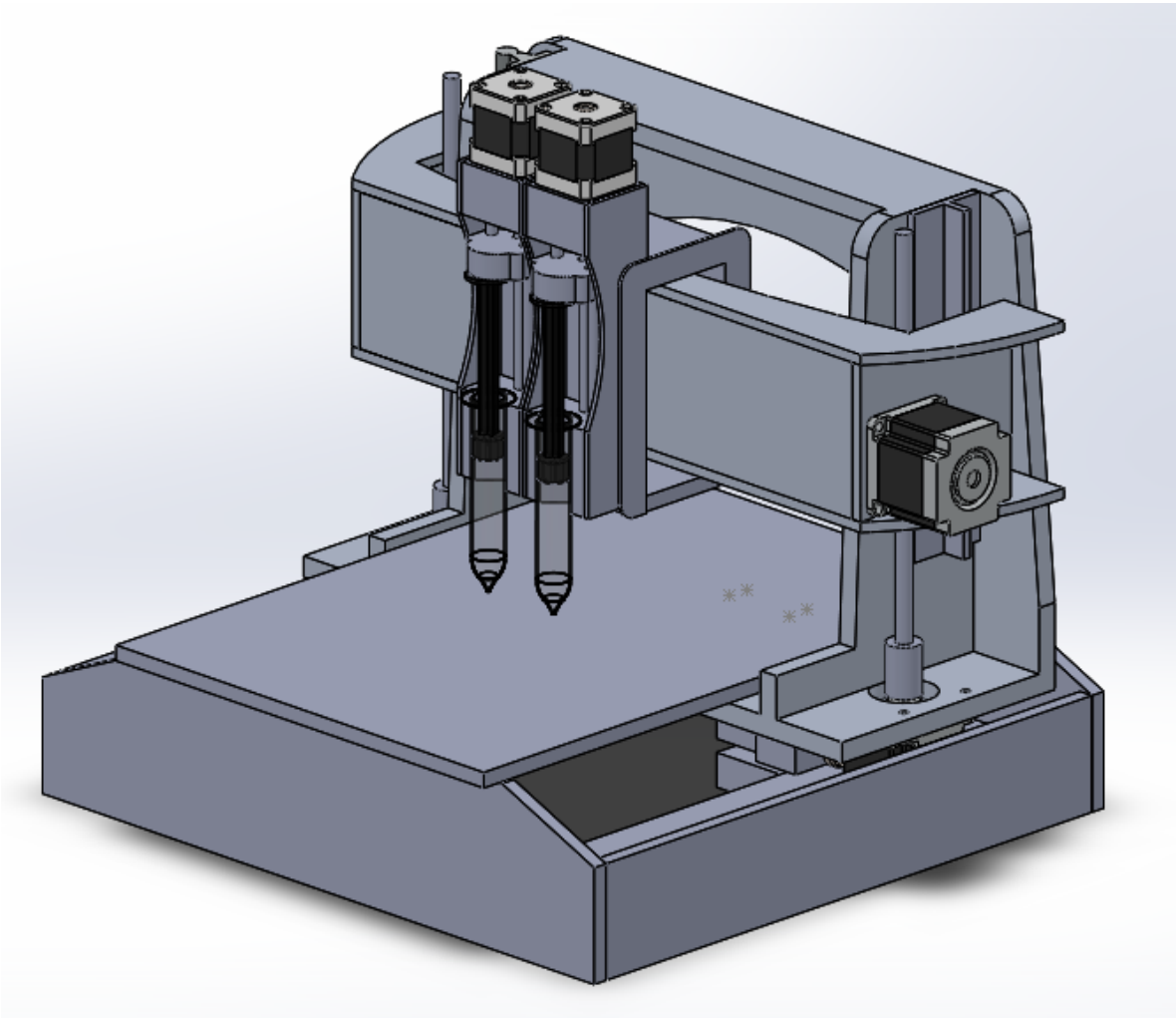


Ilustración 46. Ensamble completo del prototipo virtual de la Bio-impresora 3D.

5. Prototipo funcional, pruebas y resultados

Con el objetivo de poner en práctica los principios más importantes definidos durante la labor de tesis, se procedió a la construcción de un prototipo rápido funcional para la creación de estructuras tridimensionales de fluido Bio-compatible. Con este prototipo de construcción económica se lograron obtener estructuras con materiales viscosos y se demostró la utilidad y funcionalidad del diseño.

5.1 Construcción mecánica

Como se mencionó anteriormente, una máquina de precisión requiere de procesos de manufactura de precisión para la fabricación de sus elementos mecánicos, para la construcción de las piezas que integran el prototipo se utilizó una máquina de control numérico la cual, mediante operaciones de perfilado, fabricó las partes de la estructura de la impresora para su posterior ensamble. Del CAD (Diseño asistido por computadora) del prototipo se obtuvieron vectores que se introdujeron en programas de CAM (Manufactura asistida por computadora) para la generación de las rutas de corte en código G. En las ilustraciones 47 y 48 se muestra la máquina de control numérico utilizada y las piezas terminadas recién maquinadas del carro de Y del prototipo en la mesa de trabajo de la máquina CNC.

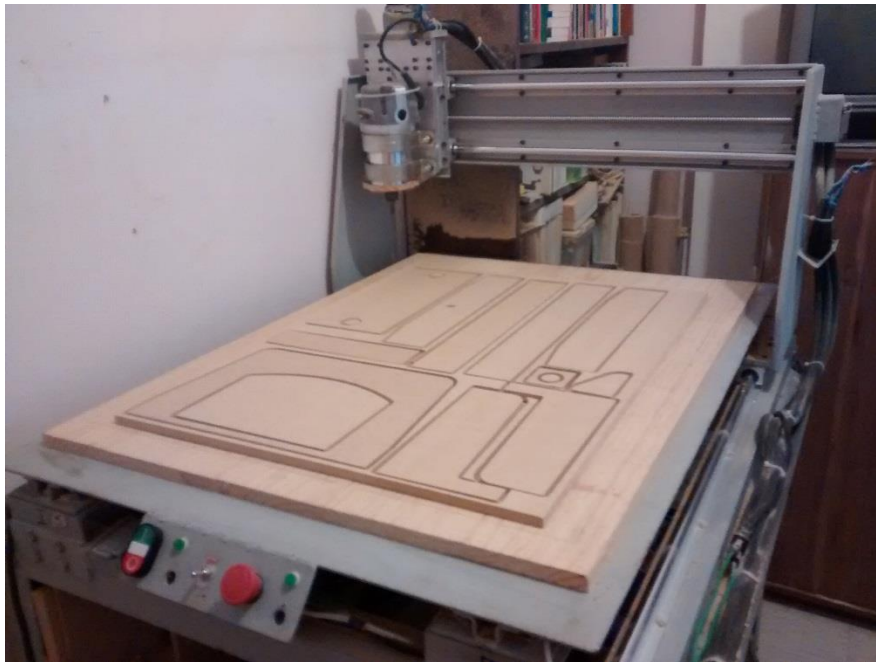


Ilustración 47. Máquina CNC utilizada para la fabricación de las piezas estructurales del prototipo de la Bio-impresora 3D.

El material utilizado para la fabricación de la estructura del prototipo funcional es MDF, tablero de mediana densidad en español el cual es un conglomerado de fibras de madera y resina, éste no es un material indicado para su uso en condiciones estériles de laboratorio, pero es perfectamente viable para una demostración funcional de la estructura y la rigidez que presenta. La base principal del prototipo y el carro de Y está fabricado en

MDF de 12 mm de grosor, el puente del prototipo está fabricado en MDF de 6 mm y la bomba de micro extrusión para la deposición del material biológico está fabricada en MDF de 3 mm de grosor.

El área de trabajo de este prototipo es de 15 cm en el eje X, 20 cm en el eje Y y 7 cm en el eje Z, estas medidas son suficientes para construir estructuras con aplicación en ingeniería de tejidos. Las medidas totales del prototipo armado son de 60 cm de largo, 50 cm de ancho y 35 cm de alto.

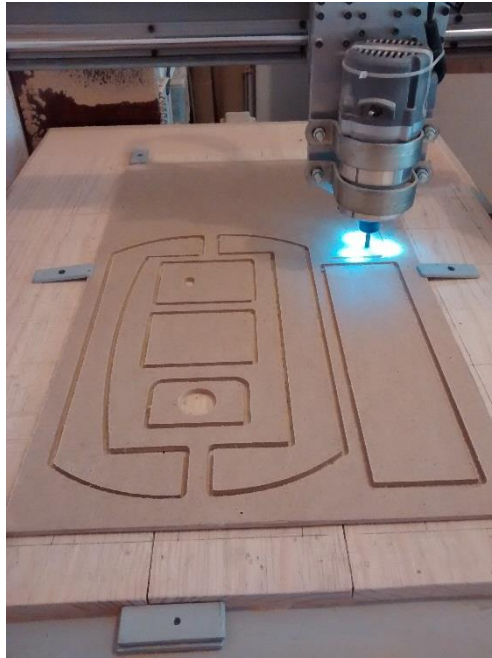


Ilustración 48. Maquinado con la estrategia perfilado de las piezas del puente de la impresora.

Las partes del puente del prototipo fueron ensambladas a tope y unidas con pegamento para madera y pijas, la unión de los elementos cuando el material a utilizar sea acero inoxidable deberá ser con soldadura.

Se utilizaron dos guías embaleras para cajones de madera de 30 cm de largo para guiar los desplazamientos de los ejes X, Y y Z, éstos fueron colocados en la parte interna posterior del puente del prototipo, se utilizó una banda y polea dentadas para la conversión del movimiento rotacional de los motores en desplazamiento lineal, el eje del motor que cuenta con la polea dentada se colocó en un lateral del puente, aunque este mecanismo reduce la resolución que puede alcanzar la máquina al aumentar las unidades lineales de avance por paso del motor, debido a la presencia de un diámetro en la polea, es perfectamente viable para demostrar el principio de trabajo de un desplazamiento lineal controlado.

La totalidad de los mecanismos de desplazamiento están cubiertos por la estructura del puente del prototipo y aislados del área de impresión con el objeto minimizar la contaminación producida por la liberación de partículas de polvo o aceite con el movimiento de los carros. En la ilustración 49 se puede apreciar la parte posterior el

ensamble del carro de Z, dentro de él se encuentran las dos guías lineales y la banda dentada.



Ilustración 49. Montaje de guías lineales y banda dentada en el carro de Z de la bio-impresora.

El carro de Z fue montado en el carro de Y, estos dos elementos están unidos entre sí a través de guías lineales de cajón, estas se encuentran colocadas de manera paralela una con respecto a la otra pero con una rotación de 90 grados en el eje Z una con respecto a la otra. La razón de lo anterior es que estas guías presentan una mayor rigidez y resistencia a la flexión en un plano que en el otro, colocando de esta forma las guías lineales se logra obtener una mayor rigidez en ambas direcciones de deflexión. Una imagen del ensamble del carro de Y se muestra en la ilustración 50.

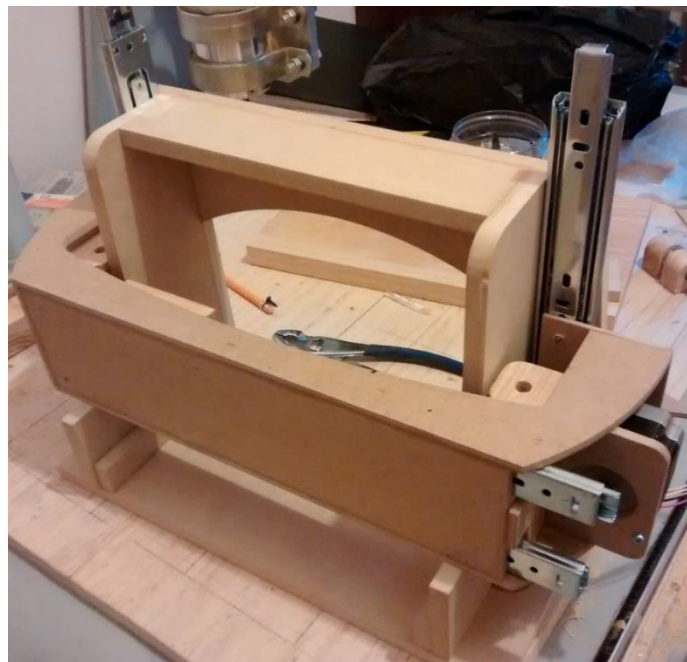


Ilustración 50. Ensamble de carro de Z y carro de Y del prototipo funcional de la Impresora 3D.

Finalmente el carro de Y fue unido a la estructura general de la máquina con las mismas técnicas que en las versiones anteriores, (Con las guías lineales rotadas 90° entre sí y un sistema de transmisión mecánica de banda dentada). El ensamble se muestra en la ilustración 51.



Ilustración 51. Ensamble del carro de Y y la estructura fija del prototipo de Bio-impresora 3D.

En la ilustración 52 se muestra el prototipo completamente armado de la Bio-impresora 3D.

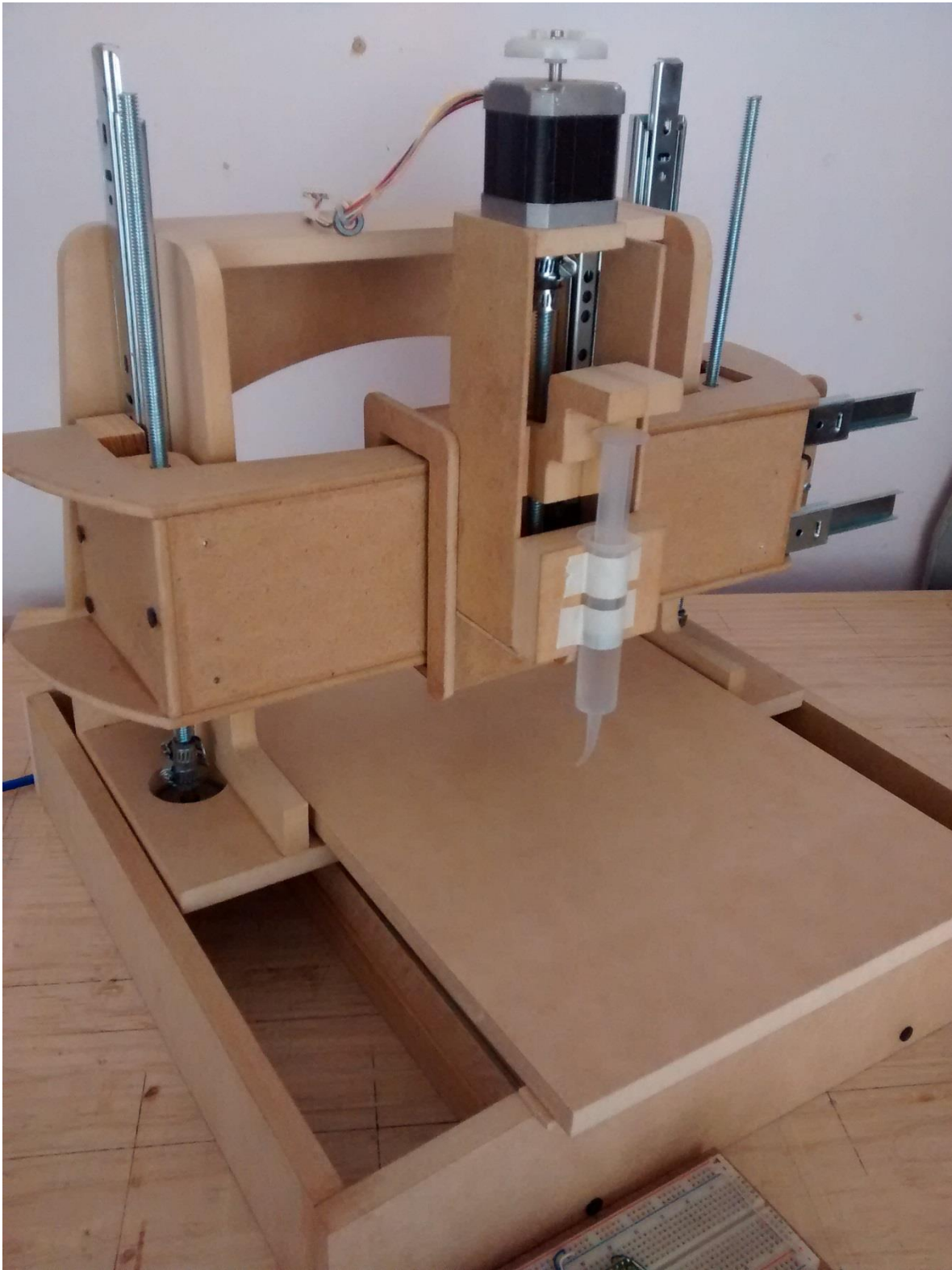


Ilustración 52. Prototipo funcional de la Bio-impresora 3D completamente ensamblado.

5.2 Implementación de electrónica y software

El sistema de control implementado es de lazo abierto e integra elementos de software y de electrónica, En la ilustración 53 se muestra un diagrama del flujo de información en el proceso de impresión y los elementos de software y electrónica involucrados.

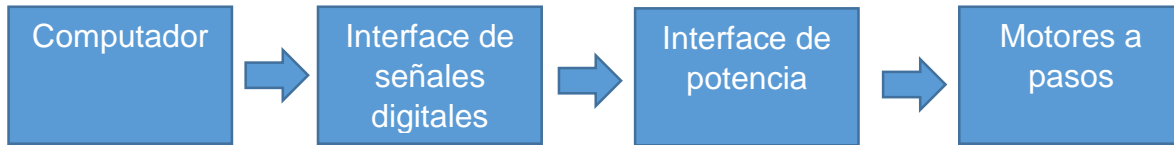


Ilustración 53. Diagrama del flujo de información del sistema de control en lazo abierto del prototipo de impresora 3D.

Computadora. La computadora implementada para el prototipo es un portátil que opera con sistema operativo Windows 8 y para el control del prototipo de impresora 3D se utilizó un software comercial que interpreta código G llamado Mach3 de la empresa Artsoft®, este software se encarga de interpretar archivos de texto en los cuales se encuentra escrito el código G que define las rutas de desplazamiento durante un proceso de impresión, es un software específicamente diseñado para su aplicación en máquinas de control numérico de manufactura sustractiva como en el caso de fresadoras, routers y torno, pero con las adecuaciones necesarias pudo ser implementado en el control de la impresora 3D. En la ilustración 54 puede apreciarse la interface gráfica del programa, para más detalles acerca de su uso o configuración se puede consultar la página web del fabricante [34].

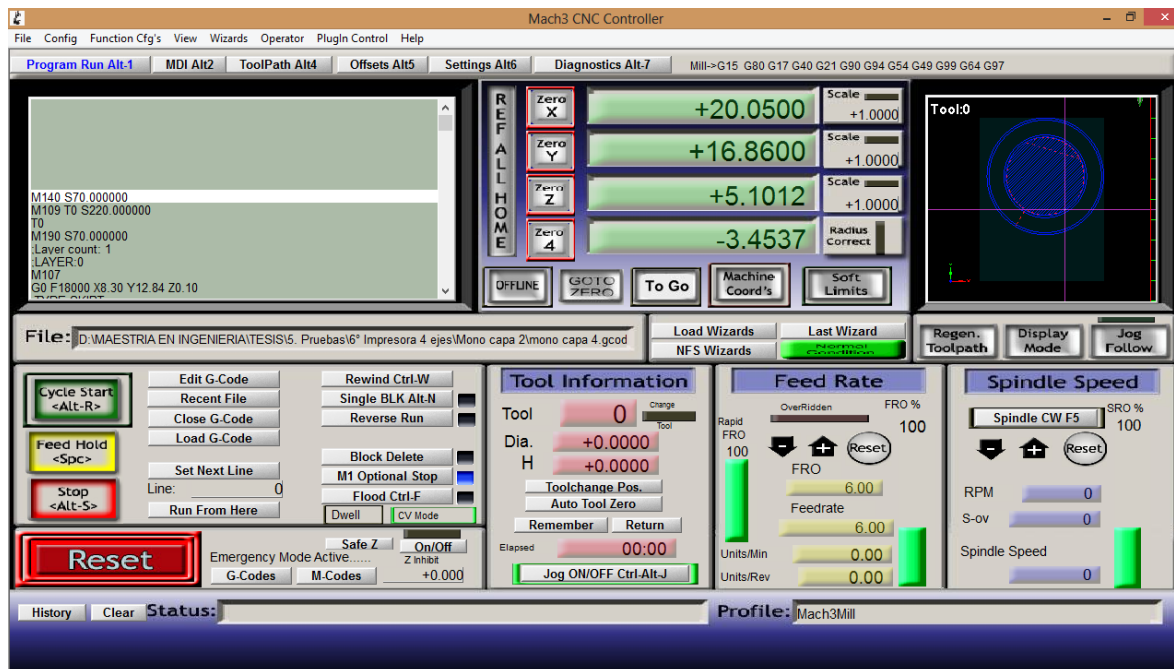


Ilustración 54. Interface gráfica de usuario del software Mach3 interprete de código G y controlador.

Interface de señales digitales. El software mach3 trabaja principalmente controlando el puerto LPT (paralelo), envía señales digitales de niveles lógicos de 5Vdc y 0Vdc para controlar el paso y la dirección de cada motor a pasos, pero en la actualidad el puerto paralelo esta discontinuado en la mayoría de las computadoras de uso personal, los puertos con los que se cuenta son de transmisión serial de información, por lo tanto se implementó una tarjeta electrónica microprocesada la cual interpreta la información serial que Mach3 envía por un puerto USB y la transforma en una señal paralela de pulsos y direcciones para los motores a pasos. Lo anterior se logra con el uso de un plug-in añadido al software Mach3 que lo dota de la capacidad de transmitir información serial a través de un puerto USB. La tarjeta específica utilizada para el proyecto es la leafboy 77 y su imagen se muestra en la ilustración 55.



Ilustración 55. Tarjeta USB CNC leafboy 77 para conversión de información serial en señales de paso y dirección para el control de motores.

Interface de potencia. La interface de potencia corresponde a los drivers implementados para la energización y control de los motores a pasos, para el presente prototipo se utilizaron cuatro drivers TB6560 del fabricante Toshiba® integrados en una tarjeta electrónica, ésta tarjeta recibe señales digitales de 5 Vcd para el paso y la dirección de cada uno de los cuatro motores del prototipo, es necesario también energizar la tarjeta con un voltaje de 12 Vcd, cuenta con sus terminales aisladas ópticamente para aislar fallas en la etapa de potencia y evitar que se propaguen a la electrónica digital de control. El nombre comercial de la tarjeta es 6B6560 – 4V3, una imagen de ella se muestra en la ilustración 56.

Motores a pasos. El prototipo funcional de la Bio-impresora 3D cuenta con cuatro grados de libertad de desplazamiento lineal actuados con motores a pasos, éstos son motores bipolares de 8° por paso lo que significa que se requieren 400 pasos para realizar un movimiento rotacional completo de 360°, pero esta característica ha sido modificada utilizando las opciones de micro pasos que ofrecen los drivers TB6560 de Toshiba® en la interface de potencia con el objetivo de aumentar la resolución de la impresora y

proporcionar un desplazamiento más suave en los ejes. Para los ejes X, Y y Z se utilizaron motores de recuperación Nema 23 de 160 Oz-in, para el eje A el cual controla la bomba de μ -extrusión se utilizó un motor Nema 17 de 70 oz-in.

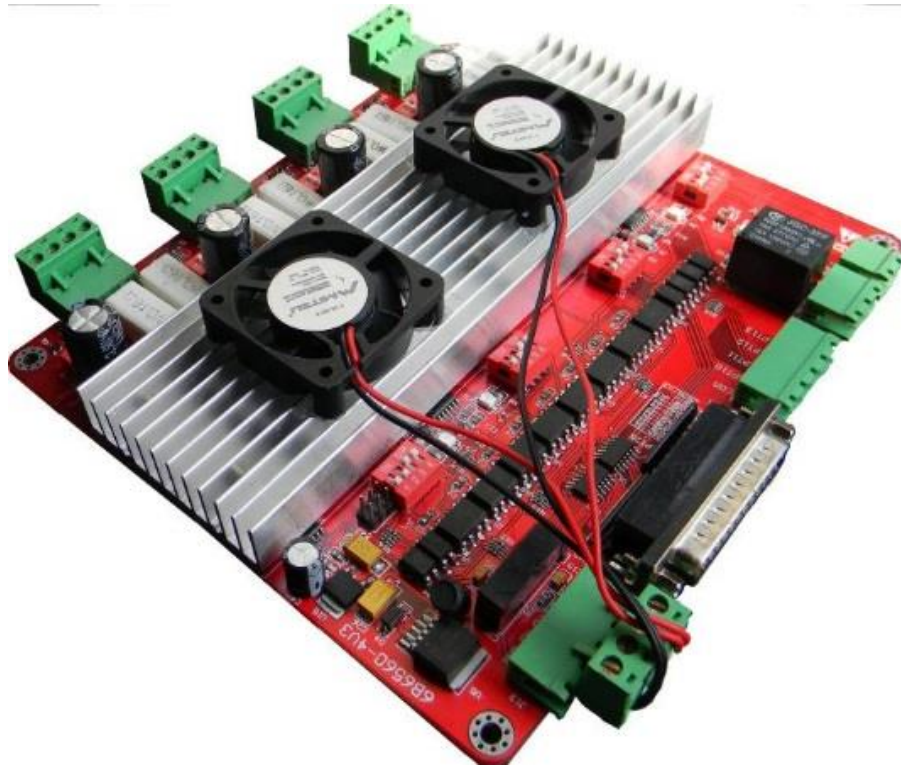


Ilustración 56. Interface de potencia para el control de los motores del prototipo de Bio-impresora 3D.

5.3 Impresiones 3D realizadas

A continuación se muestra una lista de parámetros importantes a tomar en cuenta durante el proceso de impresión, éstos pueden ser variados desde la interface de usuario, sus valores dependerán del material que se esté usando y los resultados que se esperan obtener en la impresión 3D.

Parámetros de impresión

- Velocidad de extrusión. Debe de estar relacionada con el tipo de fluido a utilizar, de ésta dependerá la velocidad de fabricación, también se debe de tomar en cuenta que a mayor velocidad de extrusión mayor efecto de compresibilidad dentro del contenedor según el fenómeno de micro extrusión como se explica en el capítulo de fenómenos de la función dosificar.
- Grosor de las capas. Como la fabricación es elaborada capa por capa, el grosor de cada una de ellas es un factor importante, también está relacionada con la velocidad de fabricación, a menor grosor de capas mayor tiempo de impresión, el grosor de las capas está relacionado de manera directa con el grosor del filamento a imprimir.

- Porosidad interna de la estructura. Este parámetro genera redes internas en la pieza a fabricar de forma que puede no estar completamente llena en su interior, este parámetro puede ser útil cuando se requieran porosidades internas o puede ser eliminado para construir una estructura completamente sólida.

En la ilustración 57 se muestra una mono capa impresa en 3D, aun cuando presentan grosor, se considera que son estructuras bidimensionales, se utilizan para cultivos experimentales de piel, hueso o cartílago entre otros. Esta forma plana permite la rápida agregación de nutrientes o factores de crecimiento en toda la superficie de la estructura beneficiando al total de la células existentes en la estructura. El código G fue generado en el software de código abierto Cura®. Sus parámetros de impresión fueron los siguientes.

- Velocidad de extrusión: 100 mm/min.
- Grosor de la capa: .3 mm
- Porosidad interna: 100% (Sin porosidad)

También se aprecia que la estructura no es completamente plana, en la parte posterior tiene una cresta resultado de la acumulación del material durante los desplazamientos del cabezal extrusor, se pueden observar las rutas de impresión llevadas a cabo y existe en esta prueba una marcada línea en medio de la impresión en donde el cabezal extrusor cambió de ruta. A pesar de lo anterior la estructura plana circular tiene el diámetro establecido desde el diseño y el promedio de su altura corresponde a una capa de 0.3 mm.

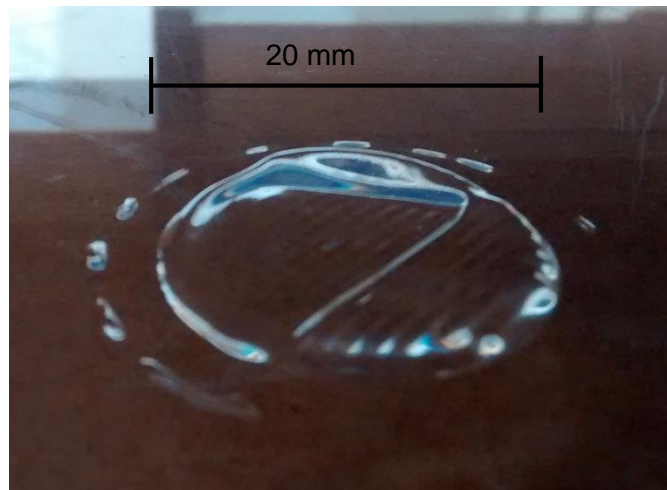


Ilustración 57. Fabricación de una mono capa, estructura bidimensional de fluido viscoso.

En la ilustración 58 se presenta una estructura tridimensional de fluido viscoso conocida como agregado, éstas estructuras se utilizan para el cultivo celular de segmentos de tejido que deben ser reemplazados o reparados en el cuerpo humano. Estas estructuras presentan el problema de una difícil penetración de los nutrientes y factores de crecimiento en las zonas más profundas de la estructura, éstos problemas se solucionan agregando en el fluido Bio-compatible los nutrientes necesarios e imprimiéndolos directamente con las células vivas. Los parámetros de impresión de la estructura tridimensional fueron los siguientes.

- Velocidad de extrusión: 100 mm/min.
- Grosor de la capa: 0.1 mm.
- Porosidad interna: 100% (Sin porosidad).

En el modelo en CAD la estructura tiene una forma de anillo, tiene 25 mm de diámetro, 10 mm de ancho y un hueco interno de 12 mm. Los resultados del proceso de impresión que se muestra en la ilustración presentan una estructura deformada en comparación con el modelo en CAD, especialmente en las aristas del anillo en donde la terminación debía ser perfectamente angular a 90°, la estructura tiende a hacer un redondeo probablemente debido a las propiedades de viscosidad y tensión superficial del fluido utilizado. Aun así la estructura presentó la altura adecuada, la estructura no se colapsó durante la impresión y mantuvo la forma a la altura deseada de 10 mm. Las pruebas que se llevan a cabo para cultivos celulares en agregados son por lo regular de éstos tamaños, por lo cual es viable concluir que la estructura es funcional para ciertas aplicaciones.

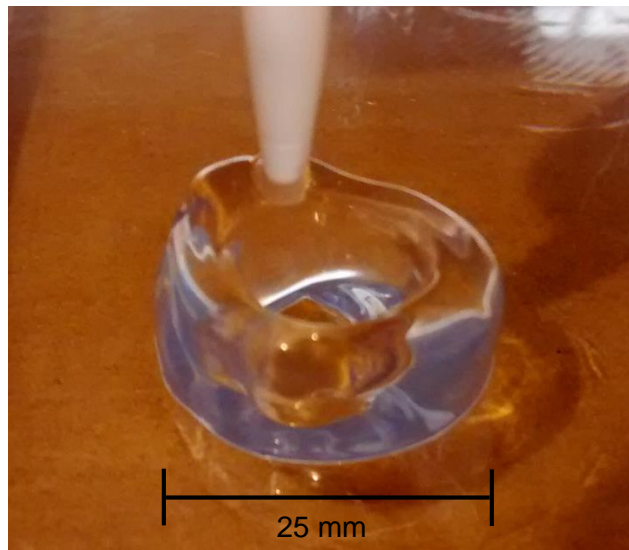


Ilustración 58. Fabricación de un toroide, estructura tridimensional de fluido viscoso.

En las ilustraciones 59 y 60 se presenta una estructura tridimensional de fluido viscoso con forma cuadrangular y estructura interna en forma de rejilla, este tipo de estructuras es utilizado para el cultivo celular de segmentos de tejido que deben ser reemplazados o reparados en el cuerpo humano. La geometría porosa de estas estructuras tiene el objetivo de permitir la penetración celular hasta las capas más profundas y de esta manera impregnar la totalidad de la estructura. Los parámetros de impresión de la estructura tridimensional fueron los siguientes.

- Velocidad de extrusión: 200 mm/min.
- Grosor de la capa: 0.1 mm.
- Porosidad interna: 30%.

Se puede observar en las esquinas de la estructura un aumento en la altura de las estructuras, es el mismo efecto presente en las estructuras de la ilustración 30, como se

explicó resultado del exceso de flujo de material viscoso durante los momentos de aceleración y desaceleración debido a la no linealidad de la relación entre el desplazamiento del émbolo (d_e) y el desplazamiento del filamento en la punta extrusora (d_f).

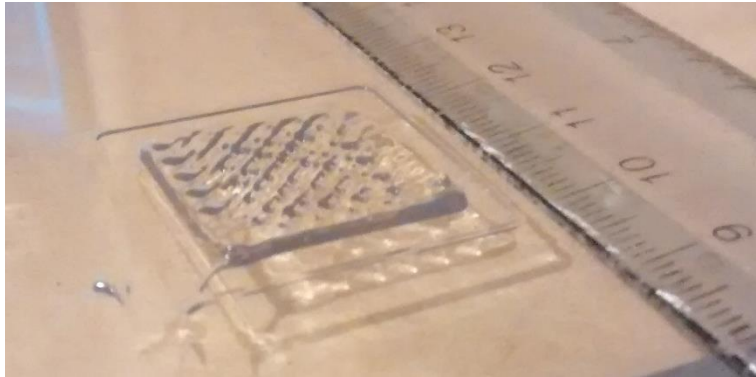


Ilustración 59. Estructura tridimensional en forma de rejilla.



Ilustración 60. Estructura tridimensional en forma de rejilla vista desde un ángulo más inclinado.

Como se mostró, se realizaron diversas pruebas de impresión con el prototipo, principalmente las denominadas mono capas y agregados que son estructuras bidimensionales y tridimensionales respectivamente, durante estas impresiones se obtuvieron los siguientes resultados

- Se mostró una mejora en la morfología de las impresiones 3D después de configurar las características y recomendaciones generadas a través de los modelos del fenómeno de micro-extrusión, estas mejoras son medidas con respecto a las impresiones realizadas antes de aplicar las características y recomendaciones.
- Al utilizar una jeringa de impresión dental y no una jeringa convencional con aguja se disminuyeron los efectos indeseados del fenómeno de micro extrusión.
- Se pueden fabricar hebras de fluido de un grosor desde 100 μm hasta 2 mm (hasta donde se pudo medir) con una misma jeringa extrusora.
- Aunque el software interpreta adecuadamente el código G y se generan los movimiento adecuados, con forme el tamaño de la estructura aumenta también

aumentan las deformaciones que presenta, como se explicó en el capítulo 3 as causas de éste fenómenos son las siguientes:

- No existe una relación lineal entre e desplazamiento del émbolo (d_e) y el desplazamiento del filamento en la punta extrusora (d_f) debido a los constantes cambios de velocidad durante el proceso de impresión.
- Los errores de impresión se acumulan capa por capa de tal manera que a mayor tamaño de la estructura impresa, mayor será el error en su geometría.
- Al liberarse el material del interior del contenedor de la bomba de micro extrusión se expande debido a la disminución en la presión, este aumento en el volumen genera deposiciones extra de material.

6. Conclusiones

Se presentó el diseño conceptual de un equipo de Bio-impresión 3D basado en las características y recomendaciones generadas a partir del entendimiento de los fenómenos físicos involucrados en el proceso de micro extrusión, la función principal. Del trabajo realizado se pueden dar las siguientes conclusiones.

- Durante el proceso de micro extrusión basado en bomba de émbolo, no existe una relación lineal entre el desplazamiento del émbolo (d_e) y el desplazamiento del filamento en la punta extrusora (d_f) durante el inicio y el final de una impresión y durante las aceleraciones y desaceleración del posicionamiento en el espacio como se observó durante las pruebas con prototipos rápidos, por lo tanto es necesaria la implementación de un sistema de control en lazo cerrado que cense directamente el desplazamiento del filamento en la punta extrusora.
- La no linealidad de la relación anteriormente citada se identificó como una de las principales causas de las deformaciones en estructuras tridimensionales impresas debido a que al depositar fluido viscoso extra o al no depositar el suficiente se generan errores que se van acumulando capa por capa y que finalmente terminan deformando la estructura de una forma considerable.
- Es posible mejorar la morfología de las impresiones 3D de fluidos viscosos a través de la manipulación de las características mecánicas del equipo de Bio-impresión 3D que las fabricó, no solo desde el punto de vista de la ingeniería de materiales como se tiene aceptado hasta el momento. Esta afirmación es sustentada por la información generada durante las pruebas realizadas que indica que algunos de los factores de amplificación o atenuación de las regiones 1, 2 y 4 son mecánicos, estos son:
 - Geometría de la punta extrusora.
 - Rigidez del material de la bomba extrusora.
 - Velocidad de fabricación.
- No es recomendable la implementación de un controlador CNC convencional para el control del equipo de Bio-impresión 3D. Los parámetros a establecer en la interface de usuario son diferentes para una Bio-impresora 3D que para una máquina de fresado CNC, aunque se mantenga el corazón del control de movimiento el cual es el algoritmo de Bresenham, se recomienda el rediseño de una interface de usuario específica y acorde a las necesidades del usuario.
- Es necesario continuar con el desarrollo y validación de estos equipos para mejorarlos según se presenten las necesidades que dicta el área de la medicina, es necesario buscar mejoras para evitar la deformación de la estructura desde el punto de vista de la ingeniería mecatrónica.

Como trabajo a futuro se recomienda la integración de equipos multidisciplinarios de trabajo en las áreas de diseño de ingeniería, ingeniería de materiales, química y medicina para obtener productos integrales que se enfoquen en la aplicación directa de la tecnología en la solución de los problemas de la medicina regenerativa. Se recomienda trabajar en el modelado y control del fenómeno de micro extrusión y el comienzo de

pruebas de impresión utilizando fluidos Bio-compatibles usados usualmente en la fabricación de andamios celulares como son las gelatinas, colágenas y otros fluidos naturales y sintéticos. Se recomienda también la integración de células vivas para probar y mejorar la utilizada de tales estructuras.

Referencias

- [1] H. Ernst, "The use of patent data for technological forecasting: The diffusion of CNC-technology in the machine tool industry," *Small Business Economics*, vol. 9, pp. 361-381, 1997.
- [2] J. Brinckmann, *Competence of Top Management Teams and Successful of New Technology Based Firms*, Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag, 2007.
- [3] D. L. Bourell, J. J. B. Jr., M. C. Leu and D. W. Rosen, "A Brief History of Additive Manufacturing and the 2009 Road map for Additive Manufacturing: Looking Back and Looking Ahead," in *Workshop On Rapid Technologies*, US - Turkey, 2009.
- [4] I. Gibson, D. W. Rosen and B. Stucker, *Additive Manufacturing Technologies*, New York; Heidelberg; Dordrecht; London: Springer, 2010.
- [5] N. Hopkinson and P. Dickens, "Analysis of rapid manufacturing - using layer manufacturing processes for production," *Mechanical Engineering Science*, vol. 217, pp. 31-39, 2003.
- [6] D. Bak, "Rapid prototyping or rapid production? 3D printing processes move industry towards the latter," *Assembly Automation*, vol. 23, no. 4, pp. 340-345, 2003.
- [7] C. D. Winnan, *The Next Technology GoldRush, USA*, 2013.
- [8] H. Lipson and M. Kurman, *Fabricated*, Indianapolis: Wiley & Sons, 2013.
- [9] S. YANG, K.-F. LEONG, Z. DU and C.-K. CHUA, "The Design of Scaffolds for Use in Tissue Engineering. Part I. Traditional Factors," *TISSUE ENGINEERING*, vol. 7, no. 6, pp. 679 - 689, 2001.
- [10] S. YANG, K.-F. LEONG, Z. DU and C.-K. CHUA, "The Design of Scaffolds for Use in Tissue Engineering. Part II. Rapid Prototyping Techniques," *TISSUE ENGINEERING*, vol. 8, no. 1, pp. 1-11, 2002.
- [11] P. Ma, *Bio materials and medicine regenerative*, Cambridge: Cambridge, 2014.
- [12] Y. Cao, J. P. Vacanti, K. T. Paige, J. Upton and Vacanti, "Transplantation of chondrocytes utilizing a polymer-cell construct to produce tissue-engineered cartilage in the shape of a human ear," *Plastic and reconstructive surgery*, vol. 2, no. 100, pp. 297-302, 1997.
- [13] L. G. Zhang and T. Webster, "Review-Nanotechnology and nanomaterials: Promises for improved tissue regeneration," *Nanotoday*, pp. 66-80, 2009.
- [14] V. Mironov, R. Markwald and G. Forgacs, "Organ Printing: Self-assembling Cell Aggregates as "Bioink", " *SCIENCE & MEDICINE*, vol. 9, pp. 69-71, 2003.
- [15] E. A. Roth, T. Xu, M. Das, C. Gregory, J. Hickman and T. Boland, "Inkjet printing for high-throughput cell patterning," *Biomaterials*, vol. 25, pp. 3707-3715, 2004.
- [16] R. Chang, J. Nam and W. Sun, "Direct Cell Writing of 3D Microorgan for In Vitro Pharmacokinetic Model," *Tissue Engineering*, vol. 14, no. 2, pp. 157-166, 2008.
- [17] Y. Nahmias, C. M. V. Robert E. Schwathz and D. J. Odde, "Laser-Guided Direct Writing for Three-Dimensional Tissue Engineering," *Biotechnology and Bioengineering*, vol. 92, no. 2, pp. 129-136, 2005.
- [18] U. Demirci and G. Montesano, "Cell encapsulating droplet vitrification," *Lab on a Chip*, vol. 7, pp. 1428-1433, 2007.

- [19] T. Xu, J. Jin, C. Gregory, J. J. Hickman and T. Boland, "Inkjet printing of viable mammalian cells," *Biomaterials*, vol. 26, no. 1, pp. 93-99, 2005.
- [20] V. Mironov, T. Boland, T. Trusk, G. Forgacs and R. R. Markwald, "Organ printing: computer-aided jet-based 3D tissue engineering," *Trends Biotechnol*, vol. 21, pp. 157-161, 2003.
- [21] C. J. Ferris, K. G. Gilmore, G. G. Wallace and M. i. h. Panhuis, "Biofabrication: An overview of the approaches used for printing of living cells," *Appl Microbiol Biotechnol*, vol. 97, pp. 4243-4258, 2013.
- [22] X. Li, R. Cui, L. Sun, K. E. Aifantis, Y. Fan, Q. Feng, F. Cui and F. Wantari, "3D Printed Biopolymers for Tissue Engineering Application," *International Journal of Polymer Science*, vol. 2014, pp. 1-13, 2014.
- [23] R. A. Rezende, S. V. Selishchev, V. A. Kasyanov, J. V. L. d. Silva and V. Mironov, "An Organ Biofabrication Line: Enabling Technology for Organ Printing. Part I: From Biocad to Biofabricators of Spheroids," *Biomedical Engineering*, vol. 47, no. 3, pp. 116-120, 2013.
- [24] R. A. Rezende, S. V. Selishchev, V. A. Kasyanov, J. V. L. d. Silva and V. Mironov, "An Organ Biofabrication Line: Enabling Technology for Organ Printing. Part II: From Encapsulator to Biofabrication Line," *Biomedical Engineering*, vol. 47, no. 4, pp. 213-218, 2013.
- [25] T. Billiet, M. Vandenhoute, J. Schelfhout and P. D. Sandra Van Vlierbeghe, "A review of trends and limitations in hydrogel-rapid prototyping for tissue engineering," *Biomaterials*, no. 33, pp. 6020-6041, 2012.
- [26] G. Pahl, W. Beitz, J. Feldhusen and K. Grote, *Engineering design*, London: Springer, 2007.
- [27] G. L. Glegg, *The selection of Design*, New York; Melbourne; Madrid; Cape Town; Singapore; Sao Paulo; Delhi: CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, 1972.
- [28] S. V. Murphy and A. Atala, "3D bioprinting of tissues and organs," *nature biotechnology*, vol. 32, no. 8, pp. 773 - 785, 2014.
- [29] A. Jorge, *Fundamentals of robotic mechanical systems*, New York: springer-verlag, 2003.
- [30] R. works, "which is better? Scara vs cartesian robots," [Online]. Available: <https://www.robots.com/blog/viewing/which-is-better-scara-vs-cartesian-robots.html>. [Accessed 1 mayo 2015].
- [31] A. H. Slocum, *Precision Machine Design*, New Jersey: Prentice-Hall, 1992.
- [32] A. B. B.E., "A Basic Design Guide for Clean Room Applications," PDH Online, Meadow Estates, 2012.
- [33] D. H. Myszka, *Máquinas y mecanismos*, México: Pearson education, 2012.
- [34] Artsoft, "machsupport," [Online]. Available: <http://www.machsupport.com>. [Accessed 16 febrero 2015].
- [35] V. Mironov, T. Boland, T. Trusk, G. Forgacs and R. Markwald, "Organ printing: computer-aided jet-based 3D tissue engineering," *Trends in Biotechnology*, vol. 21, pp. 157-161, 2003.
- [36] V. Mironov, N. Reis, D. Phil and B. Derby, "Bioprinting: A Beginning," *Tissue*

- Engineering*, vol. 12, no. 4, pp. 631-634, 2006.
- [37] P. J. Bartolo, M. Domingos, T. Patricio, S. Cometa and V. Mironov, "Biofabrication Strategies for Tissue Engineering," *Advances on Modelling in Tissue Engineering*, pp. 137-176, 2011.
- [38] J. Nam, B. Starly, A. Darling and W. Sun, "Computer aided tissue engineering for modeling and design of novel tissue scaffolds," *Computer-Aided Design & Application*, vol. 1, p. 633, 2003.
- [39] W. Sun, B. Starly, A. Darling and C. Gomez, "Computer aided tissue engineering: application to biomimetic modelling and design of tissue scaffolds," *Biotechnol appl. Biochem*, vol. 39, pp. 49-58, 2004.
- [40] Y. Du, E. Lo, S. Ali and A. Khademhosseini, "Directed assembly of cell-laden microgels for fabrication of 3D tissue constructs," *Harvard-MIT Health Sciences and Technology*, vol. 105, no. 28, pp. 9522-9527, 2008.
- [41] K. W. Binder, A. J. Allen, J. J. Yoo and A. Atala, "Drop-on-demand inkjet bioprinting: a primer," *Gene Therapy and Regulation*, vol. 6, no. 1, pp. 33-49, 2011.
- [42] Thomson, "thomson linear," [Online]. Available: http://www.thomsonlinear.com/website/com/eng/products/ball_screws_and_lead_screws/lead_screws/v_thread.php. [Accessed 10 febrero 2015].
- [43] G. L. Glegg, *The selection of design*, Cambridge: Cambridge University Press, 2009.