



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

KOALA 3D: IMPRESORA 3D CAPAZ DE FABRICAR OBJETOS DE ALTURA MAYOR
QUE SU PROPIA ALTURA.

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA
INGENIERÍA, MENCIÓN MECÁNICA

MAXIMILIANO ALEJANDRO VÉLEZ MONTECINOS

PROFESOR GUÍA:
JUAN CRISTOBAL ZAGAL MONTEALEGRE

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
RUBEN FERNANDEZ URRUTIA
RICARDO FRANCO MENDOZA GARCIA
ALEJANDRO VARGAS USCATEGUI

SANTIAGO DE CHILE
2017

RESUMEN DE LA TESIS PARA OPTAR AL
GRADO DE: Magister en Ciencias de la Ingeniería,
Mención Mecánica.
POR: Maximiliano Alejandro Vélez Montecinos
FECHA: 25/05/2017
PROFESOR GUÍA: Juan Cristóbal Zagal
Montealegre

KOALA 3D: IMPRESORA 3D CAPAZ DE FABRICAR OBJETOS DE ALTURA MAYOR QUE SU PROPIA ALTURA.

Actualmente las herramientas de fabricación están limitadas a producir objetos cuyas dimensiones no sobrepasen los límites de su volumen de manufactura. En el caso de las impresoras 3D la relación entre el volumen de manufactura y el tamaño de la máquina se aproxima a la unidad debido a su principio de funcionamiento. Lipson comenta en su libro “Fabricated” que es posible aumentar esta relación al infinito si es que la impresora 3D se acopla a un mecanismo que se mueva libremente por el espacio.

En el presente trabajo se relata el proceso de desarrollo y caracterización de Koala 3D, una impresora 3D móvil que es capaz de fabricar objetos de mayor tamaño que su propia altura. Esto lo hace gracias a que continuamente modifica la posición de su volumen de manufactura al trepar la pieza (estructura) que va imprimiendo en paralelo.

El desarrollo de Koala 3D se hizo dividiendo el prototipo en dos subconjuntos: una impresora 3D y un robot trepador. Para el diseño de la parte impresora se basó en modelos que funcionan mediante el método de modelado por deposición fundida e innovándose en el mecanismo que posiciona el material sobre el área de manufactura. La parte trepadora se diseñó procurando que se moviera con precisión a lo largo de la estructura impresa y que fuera capaz de soportar largas sesiones de manufactura.

Para el control del prototipo se emplearon plataformas y programas dedicados al rubro de la impresión 3D que se utilizan ampliamente en comunidades “hágalos-usted-mismo”. El hardware Ramps 1.4 fue capaz de operar ambas partes a pesar de no estar diseñada para el control de un robot trepador o móvil. El firmware Marlin cargado en el controlador de la máquina facilitó la interacción entre el usuario y el prototipo mediante la utilización del código máquina.

Luego de fabricados y calibrados los distintos mecanismos del sistema se finalizó el trabajo caracterizando y estudiando el desempeño del prototipo. La energía consumida y la calidad de los objetos manufacturados fueron similares a impresoras de escritorio utilizadas en la actualidad. También se estudiaron las oscilaciones del sistema al manufacturar una pieza estandarizada, analizando las implicancias del diseño en este fenómeno y dando recomendaciones para trabajos futuros.

Tabla de contenido

Presentación.....	1
1.1 Introducción	1
1.2 Motivación	1
1.3 Objetivos	3
1.3.1 Objetivo General	3
1.3.2 Objetivos Específicos.....	3
Antecedentes	4
2.1 El auge de la fabricación personal.....	4
2.2 Impresoras 3D de escritorio	4
2.3 Robots Trepadores	5
2.4 Impresoras 3d móviles.	6
2.3.1 MiniBuilders	6
2.3.2 Geoweaver	7
2.3.3 3&D bot	7
2.5 Plataformas y recursos de código abierto para el desarrollo de impresoras 3D.....	8
2.4.1 Arduino.....	8
2.4.2 RAMPS.....	9
2.4.3 Firmware para impresión 3D.....	10
2.4.4 Slicer.	10
2.4.5 Motor paso a paso.	10
2.4.6 Servo motor.....	11
Metodología.....	13
3.1 Organización del trabajo.	13
3.2 Desarrollo del robot.	13
3.3 Validación y caracterización.....	14
Conceptualización, diseño, manufactura, operación y caracterización del prototipo	16
4.1 Generación del concepto.	16
4.1.1 Consideraciones preliminares.	16
4.1.2 Definición general del concepto	17
4.1.3 Funcionamiento del concepto.....	18
4.2 Diseño mecánico del prototipo.....	19

4.2.1	Selección mecanismo de las partes del prototipo	19
4.2.2	Diseño elementos mecánicos.....	25
f)	Determinación torque requerido y selección motor paso a paso para mover extrusor en el área de manufactura transversal a la columna.....	30
a)	Diseño preliminar del sistema de sujeción superior e inferior.	32
b)	Diseño final del sistema de sujeción superior e inferior.	37
4.3	Diseño de la electrónica y sistema de control.	47
4.4	Manufactura del prototipo.	49
4.4.1	Fabricación de componentes.	50
4.4.2	Armado prototipo.	52
4.5	Operación del prototipo y ajustes.....	54
4.6	Ensayos de caracterización.	56
4.6.1	Mediciones directas.	56
4.6.2	Potencia y consumo energético.	57
4.6.3	Calidad superficial y tolerancia de objetos impresos.....	57
4.6.4	Oscilación del prototipo durante el proceso de manufactura.	59
Presentación y Discusión de Resultados		61
5.1	Prototipo final	61
5.2	Pruebas de calibración.	63
5.3	Pruebas de desempeño.....	66
5.4	Caracterización.....	69
5.4.1	Potencia y consumo energético.	69
5.4.2	Calidad superficial y tolerancia de objetos impresos.....	71
5.4.3	Oscilación del prototipo durante el proceso de manufactura.	74
Conclusiones		78
Bibliografía		79
Anexo A: Recursos utilizados		83
Anexo B: Códigos.....		85
Anexo C: Datos experimentales		88

Índice de figuras.

Figura 1. Se presenta un concepto futurista de impresora 3d que motiva el presente trabajo. Estas no tendrían restricción de espacio de impresión en ningún eje, operarían sin intervención humana y podrían trabajar en equipo.....	3
Figura 2. Métodos popularmente implementados en Impresoras 3d de Escritorio (a) modelado por deposición fundida (b) estereolitografía.....	5
Figura 3. Robots Minibuilders en el proceso de manufactura de una estructura de concreto (a) Robot manufacturando los cimientos de la estructura (b) Robot imprimiendo los muros de la estructura (c) Robot aplicando una capa de refuerzo a la construcción.	7
Figura 4. Impresora Geoweaver manufacturando formas de silicona.....	7
Figura 5. 3&D bot manufacturando un objeto de silicona.....	8
Figura 6. Diferentes tipos de placas del controlador Arduino (a) Arduino Mega (b) Arduino Uno (c) Arduino Nano	8
Figura 7. Shields utilizadas para ampliar las capacidades de Arduino Uno (a) Shield para controlar motores (b) Shield detector de humo (c) Shield para camara de video (d) Shield para habilitar GSM/GPRS.	9
Figura 8. Shield RAMPS 1.4 acoplada a Arduino Mega.	9
Figura 9. Secuencia de funcionamiento de un motor paso a paso cuando este funciona en modalidad paso completo o full step.....	11
Figura 10. Partes de un servo motor típico.....	12
Figura 11. Diagrama de funcionamiento de un servo motor	12
Figura 12. Esquema de metodología para ejecutar la etapa de conceptualización.	13
Figura 13. Esquema de metodología de la etapa de diseño e ingeniería.	14
Figura 14. Esquema de metodología en la etapa de fabricación del prototipo.....	14
Figura 15. Esquema de metodología en la etapa de caracterización y validación del prototipo.	15
Figura 16. Descripción de la columna manufacturada por Koala 3D.....	17
Figura 17. Descripción general de las partes del concepto Koala 3D.	18
Figura 18. Etapas del funcionamiento de Koala 3D cuando se encontraba manufacturando una columna mediante el método FDM.	19
Figura 19. Tipos de impulsor utilizados para empujar el material hacia el extrusor. Ambos se utilizan cuando se imprime tridimensionalmente con el método FDM (a) Impulsor directo, (b) impulsor tipo Bowden.	20
Figura 20. Alternativas analizadas para movilizar el extrusor en el plano transversal a la columna (a) sistema correa-polea (b) sistema de brazos articulados (c) sistema engranaje-cremallera.....	21
Figura 21. Partes que componen el sistema correa polea. (a) Vista isométrica y (b) vista alzada.	21
Figura 22. Partes que componen el sistema de brazos articulados para mover el extrusor dentro del área de manufactura transversal a la columna. (a) Vista isométrica y (b) vista alzada.	22
Figura 23. Dos posiciones del extrusor con igual ángulo de giro θ pero distintas resolución de movimiento S debido a la diferente extensión de los brazos R.	22

Figura 24. Partes que componen el sistema engranaje cremallera para mover el extrusor dentro del área de manufactura transversal a la columna. (a) Vista isométrica y (b) vista alzada.	23
Figura 25. Alternativas analizadas para implementar el mecanismo de sujeción. Dentro de las opciones a estudiar estaba un sistema (a) de succión, (b) tenazas y (c) prensas.	24
Figura 26. Sistema ampliamente utilizado para mover la mesa de impresión del extrusor en impresoras que utilizan el método FDM. Este mecanismo se compone de un tornillo sinfín acoplado a un motor paso a paso, el cual enrosca en una tuerca acoplada a la mesa donde se deposita el material.....	25
Figura 27. Presentación conceptual del acople del sistema tornillo sinfín y tuerca al mecanismo de sujeción superior e inferior. Este sistema permitió que Koala 3D desplazara el extrusor en el eje longitudinal a la columna y a su vez la trepara.	25
Figura 28. Presentación extrusor utilizado implementado en la parte impresora, detallando sus partes más importantes.	26
Figura 29. Impulsor tipo Bowden compuesto por un conjunto reductor de engranaje y un motor paso a paso (a) vista frontal y (b) vista posterior.	26
Figura 30. Diseño Final del Impulsor tipo Bowden para su implementación en Koala 3D (a) dimensiones generales en milímetros del impulsor armado (b) impulsor extrusionado indicándose las partes principales que lo componen.	27
Figura 31. Área de manufactura transversal a la columna de 45x45cm. La zona blanca corresponde donde el extrusor imprime la columna y la zona achurada es para purgar material antes de comenzar la impresión.	28
Figura 32. Diseño final chasis parte impresora considerando un sistema motriz engranaje cremallera (a) dimensiones generales en milímetros del sistema (b) extrusionado del sistema donde se indican las principales partes.	28
Figura 33. Disposición de los sistemas motrices de ambos cuerpos móviles encargados de posicionar el extrusor dentro del área de manufactura transversal a la columna. (a) Cuerpo móvil Y y (b) cuerpo móvil X.....	29
Figura 34. Esquema para analizar la resolución de movimiento necesario del cuerpo móvil, determinando el diámetro y modulo del engranaje.....	29
Figura 35. Disposición de los finales de carrera en la parte impresora	30
Figura 36. Partes que debe trasladar cada motor del sistema motriz de la parte impresora (a) el motor adjunto al cuerpo móvil Y debe movilizar el extrusor, 8 bujes, 2 engranajes, cuerpo móvil X e Y, 2 barras de acero, una cremallera y su propia masa (b) el motor adjunto al cuerpo móvil X debe desplazar el extrusor, 4 bujes, un engranaje, el cuerpo móvil X y su propio peso.	31
Figura 37. Diseño preliminar del mecanismo de sujeción basado en prensa mecánica de banco. Esta se compone de un sistema motriz compuesto por un tornillo sinfín y una tuerca acoplados a dos mordazas una fija y otra móvil. Si bien tiene similitudes ambos sistemas, (a) la prensa de banco se acciona manualmente y la tuerca esta acoplada a la mordaza fija mientras que en (b) el sistema diseñado es automatizado y la tuerca se adjuntó a la mordaza móvil.	33
Figura 38. Diseño preliminar de las mordazas fijas de la prensa superior e inferior considerando el mecanismo de elevación del prototipo. En (a) la mordaza fija de la prensa superior se acoplaron tuerca y bujes mientras que en (b) la prensa inferior se adhirió el motor paso a paso junto al tornillo sinfín y barras guías.	34

Figura 39. Piezas del diseño preliminar que componen ambos mecanismos de sujeción. En (a) se muestra la base del sistema motriz la cual permite el acoplamiento del motor acoplado al tornillo sinfín y las barras que guían el movimiento de la (b) mordaza móvil.	34
Figura 40. Vista de planta del diseño preliminar de la prensa donde se presentan las fuerzas a las que está sometida la mordaza móvil al ser presionada contra la columna.....	35
Figura 41. Oscilaciones producto del movimiento del extrusor en una determinada dirección al manufacturar la columna impresa. Considerando el eje coordenado del área de manufactura, en (a) se ve la oscilación en la dirección Y y en (b) se muestra la oscilación en X.	37
Figura 42. Diseño final del carro auxiliar implementado para eliminar la oscilación en la dirección Y. Esta pieza además permite el ensamble del impulsor en su parte posterior y un contrapeso en su parte anterior.....	38
Figura 43. Rodamientos que mantienen solidario el prototipo a la columna y disminuyen las oscilaciones del prototipo en ejes X e Y. Estos se ubican en (a) mordazas fijas superior y (b) mordaza fija inferior.	38
Figura 44. Diseño final de las (a) bases del sistema motriz y (b) mordazas móviles.....	39
Figura 45. Funcionamiento del sistema retráctil en el mecanismo de sujeción. (a) Vista isométrica mecanismo de sujeción, (b) vista en corte del sistema retráctil en modo prensa, (c) vista en corte del sistema retráctil en modo guía.	40
Figura 46. Vista lateral que muestra las fuerzas que interactúan sobre el diseño final del prototipo cuando su prensa/carro superior está sosteniendo todo el sistema.....	40
Figura 47. Vista de planta de la viga impresa donde se muestran en rojo las posiciones del extrusor que se utilizaron para determinar las características mecánicas de los resortes de las prensas/carros.	42
Figura 48. Simplificación sistema tornillo sinfín – tuerca para estimar el torque necesario para el funcionamiento del mecanismo de elevación de Koala 3D.	43
Figura 49. Impresora cuando se encuentra manufacturando la columna impresa, esta es la condición crítica utilizada para la selección del Motor Z.....	45
Figura 50. Diagrama de cuerpo libre del sistema de sujeción y la mordaza móvil de la prensa/carro cuando está afirmando todo el prototipo. La fuerza de los servos solo se encuentra representada cuando se analiza solo la mordaza móvil.....	46
Figura 51 Esquema de la electrónica que controla a Koala 3D.	48
Figura 52 Esquema que presenta la comunicación entre el ordenador y la impresora.	49
Figura 53 (a) Sistema de conexión entre secciones de la base de impresión (b) vista general de la base de impresión (c) detalle parte intercambiable de la base de impresión (d) abrazaderas para empotrar la base de impresión a la superficie.	51
Figura 54 Despiece de componentes. Se acoplaron bujes, ejes y tuercas a cada componente.	52
Figura 55 Partes armadas por separado: impulsor de material, parte impresora y parte trepadora.	53
Figura 56 Prototipo armado sobre su base de impresión, listo para ser operado y calibrado.	53
Figura 57 Programa empleado para calibrar control PID, el cual es utilizado para mantener la temperatura del extrusor constante.....	55
Figura 58 Modificaciones en el diseño original para lograr una impresión 3D de calidad. (a) Resortes entre la base de la parte impresora y el carro auxiliar para nivelar la punta del extrusor respecto a la mesa de impresión. (b) Goma de caucho ubicada en la mordaza móvil para reforzar apriete de la prensa.....	55
Figura 59 Instrumentos de medición utilizados para la obtención del voltaje y corriente consumido por Koala 3D.	57

Figura 60 Proceso para la obtención de la calidad superficial con que manufactura la impresora. (a) probeta manufactura visualizada en microscopio Olympus modelo BH conectado a un ordenador; (b) fotografía obtenida desde el ordenador; (c) fotografía monocromática procesada en Matlab; (d) Gráfico que presenta la cantidad de pixeles negros y que se utiliza para la obtención de la rugosidad aritmética.	58
Figura 61 Se presenta (a) montaje experimental y (b) programa utilizado para capturar la oscilación del prototipo al manufacturar una columna.	60
Figura 62 Captura del programa Repetier donde se muestra la temperatura del extrusor desde que se acciona la resistencia calefactora hasta que llega a la temperatura objetivo de 200°C luego de calibrar controlador PID.	64
Figura 63 Pruebas realizadas para probar el desempeño de Koala 3D al imprimir una columna de sección 30x30 mm ² . (a) Primera prueba fallida por falta de nivelación entre la punta y la mesa de impresión; (b) segunda prueba fallida por falta de sujeción entre la prensa/carro superior y la columna; (c) tercera prueba exitosa donde se pudo imprimir 100 mm de columna, las distancias estan en mm.....	65
Figura 64 Pruebas realizadas para probar el desempeño de Koala 3D en la etapa de transición, midiendo la caída del prototipo con un reloj comparador.(a) La Prensa/carro superior llega al final de su recorrido; (b) el prototipo cambia de mecanismo de sujeción desde la prensa/carro superior a la prensa/carro inferior; (c) la prensa/carro superior regresa al origen de su recorrido, donde nuevamente el prototipo cambia de sistema de sujeción.	66
Figura 65 Time-lapse del proceso de manufactura de una columna de sección 30x30 mm ² y altura de 200 mm.	67
Figura 66 Columnas impresas con diferente posición en el programa Repetier Host (a) Columna posicionada en (x,y)=(6,3.3); (b) columna posicionada en (x,y)=(7.1,3.3); (c) columna posicionada en (x,y)=(7.7,3.3).	68
Figura 67 Time-lapse proceso de manufactura de un moai al centro de una columna.	69
Figura 68 Moai impreso por Koala 3D. (a) Vista frontal; (b) vista lateral.....	69
Figura 69 Potencia consumida por los elementos electro-mecánicos que son parte de Koala 3d al manufacturar un cubo de 1cm ³ . El proceso considera ambas etapas de manufactura: impresión y transición.....	70
Figura 70 Gráfico de torta que presenta los porcentajes de energía consumida por cada elementos electromecánico que componen a Koala 3D.	71
Figura 71 Fotografías microscópicas de las muestra manufacturadas a distinto espesor de capa y velocidad de impresión.	72
Figura 72 Piezas impresas para comparar las tolerancias entre Koala y dos impresoras 3D de escritorio populares dentro del mercado.	73
Figura 73 Deflexión en columnas impresas de altura igual a 200 mm.(a) Columna con deflexión 7.7 mm en el extremo libre; (b) Columna con deflexión 0.99mm en el extremo libre.....	74
Figura 74 Oscilaciones a una altura de manufactura igual a 610mm con una velocidad de impresión estándar. (a) Oscilación en la dirección x; (b) oscilación en la dirección y; (c) oscilación en la dirección z.	75
Figura 75 RMS para distintas alturas de impresión en la dirección (a) x e (b) y.	76

Índice de tablas.

Tabla 1 Resumen de los diez principios de la impresión 3D	2
Tabla 2 Comparación entre impresoras que utilizan modelado por deposición fundida y estereolitografía ..	5
Tabla 3 Robots trepadores de columnas y postes que se utilizan con distinto proposito.....	6
Tabla 4 Comandos populares de código G que se utiliza en impresión 3D	10
Tabla 5 Comparación entre la modalidad de micropasos y torque aplicado [31]	11
Tabla 6 Características del engranaje seleccionado como parte del sistema motriz de la parte impresora.	30
Tabla 7 Estimaciones de pesos parte impresora que se deben trasladar para movilizar el extrusor dentro del área transversal a la columna.	31
Tabla 8 Características motor Nema 16	32
Tabla 9 Estimaciones de peso prototipo para poder estimar motores de la parte trepadora.	36
Tabla 10 Variación en la longitud de los resortes cuando Koala 3D está manufacturando la columna.	42
Tabla 11 Características del resorte acoplado a las ruedas retractiles [51].....	43
Tabla 12 Parámetros utilizados para el cálculo del torque requerido para elevar el sistema.	44
Tabla 13 Características motor Nema 17 con engranaje reductor	45
Tabla 14 Características Servo Motor	47
Tabla 15 Parámetros implementados en firmware Marlin para vincularlo a Koala 3D	49
Tabla 16 Parámetros utilizados para manufacturar partes mediante impresión 3D.....	50
Tabla 17 Parámetros utilizados en el fresado de partes de bronce SAE 64.....	50
Tabla 18 Parámetros utilizados en el torneado de partes de bronce SAE 64	51
Tabla 19 Parámetros utilizados normalmente para imprimir piezas de PLA mediante el método de modelado por deposición fundida	54
Tabla 20 Velocidades para las cuales se midió el tiempo en que tardaba en imprimir un cubo de 1 cm³ ..	56
Tabla 21 Parámetros que se variaron para caracterizar la calidad superficial con que manufactura Koala 3D	58
Tabla 22 Resumen de parámetros utilizados en el diseño de Koala 3D	62
Tabla 23 Resumen de parámetros de impresión y caracterización de Koala 3D en operación.....	62
Tabla 24 Comparación de dimensiones de manufactura y dimensiones totales de Koala 3D junto a otras 2 impresoras 3D de escritorio.	63
Tabla 25 Muestra y parámetros que se utilizaron para su impresión	72
Tabla 26 Valores de Tolerancias según eje cartesiano de manufactura	73
Tabla 27 Posición x en Repetier y ángulo de deflexión de ambas pruebas realizadas	74
Tabla 28 Resultados obtenidos de la aplicación de las ecuaciones que modelan las oscilaciones de la columna manufacturada	77

Capítulo 1

Presentación

1.1 Introducción

El desarrollo de los métodos de fabricación y herramientas computacionales utilizadas para el diseño digital han permitido la aparición de un grupo de procesos de fabricación denominados como Manufactura Aditiva [1]. Estos métodos han cambiado el paradigma de la manufactura, reduciendo los tiempos del ciclo de desarrollo de un producto [2], [3] y entregando la posibilidad de manufacturar cualquier objeto sin importar su morfología [4].

Desde la década de los ochentas se han creado varios procesos para producir objetos por medio de la impresión 3D pero solo desde hace 20 años [5] métodos, tales como, el modelado por deposición fundida [6] y la estereolitografía [7] se han implementado a más bajo costo emergiendo impresoras 3d de escritorio, las cuales pueden ser adquiridas por menos de 500USD¹. Gracias a esta nueva generación de impresoras, personas de diversas profesiones e industrias se ven beneficiadas por la impresión 3D ya sea por manufacturar o utilizar objetos impresos.

Lipson resume en 10 principios las características de las cuales se puede obtener ventaja de las impresoras 3D (ver Tabla 1), además de presentar posibles mejoras a dichas características que podrían generar gran impacto en diversos ámbitos [8]. Es así como en el séptimo principio, donde se destaca lo portable y compacto que es una impresora 3D respecto a otras tecnologías, Lipson indica que si el sistema de manufactura de una impresora 3D se adjunta a un sistema móvil se podría eliminar la restricción que actualmente tienen las impresoras 3D de manufacturar objetos de igual o menor tamaño que su volumen de impresión. El desarrollo de este concepto permitiría reducir el tamaño de las impresoras 3d sin la necesidad de disminuir la escala de los diseños a imprimir, lo cual facilitaría el transporte de esta herramienta a lugares de difícil acceso y donde la capacidad de carga es limitada, tal como en incursiones militares o viajes aeronáuticos.

1.2 Motivación

Si bien hoy en día existen impresoras móviles que aplican lo dicho en el séptimo principio por Lipson ninguna de estas máquinas lo hace tomando en consideración el paradigma descrito por T. Vildrandt [9] en el cual propone implementar una máquina universal de fabricación (UDF, por sus siglas en ingles) que sea de código abierto, multimaterial, alta resolución, fácil de operar, autónoma y portable. Impresoras, tales como, la Fab@Home [10] y RepRap [11] han avanzado en la generación de una UDF pero no han logrado generar elementos más grandes que el tamaño de su volumen de manufactura.

¹ comparación de precios de impresoras en <http://www.3ders.org/pricecompare/3dprinters/>

Tabla 1 Resumen de los diez principios de la impresión 3D

Número	Principio	Descripción
1	La complejidad es gratis	La complejidad del diseño no afecta en el costo de manufactura
2	Las variaciones son gratis	Las modificaciones en la forma del diseño no necesitan cambios en la cadena productiva
3	No es necesario el ensamblaje de piezas	Debido a su naturaleza permite la manufactura de piezas ensambladas
4	No hace falta estocaje	Menor tiempo de producción hace que se puedan producir productos según la demanda que estos tengan
5	Diseño sin límite	Ya no hay límites en la generación de formas y texturas que existían en la manufactura por métodos tradicionales
6	No son necesarias habilidades especiales para su implementación	Debido a la que es automatizada la producción de piezas esta puede ser manufacturada sin una capacitación especial.
7	Fabricación compacta y portátil	En contraste con otras máquinas, la impresora 3D son pequeñas y pueden producir objetos casi del mismo tamaño que ellas
8	Menos material de desecho	Se pierde muy poco material debido que es una manufactura donde se genera la pieza agregando material.
9	Infinitos materiales de fabricación	Lo poco agresivo de la fabricación permite la mezcla de materiales de diverso origen
10	Capacidad de crear réplicas exactas	Es posible crear un modelo digital con un escáner 3D y luego reproducirlas gracias al quinto principio

En el presente trabajo se describe el desarrollo de una máquina denominada Koala 3D, la cual imprime una columna de altura mayor que su propia altura considerando las principales tendencias de código abierto en el rubro de la impresión 3D.

Koala 3D se confeccionó con el propósito de ser el punto de inicio para una serie de futuros prototipos que persigan materializar la confección de una máquina de manufactura aditiva portátil, con la capacidad de moverse multiaxialmente y que operen sin intervención humana. Basados en el trabajo de Korb [12], si estas máquinas podrían tener capacidad de comunicarse con otra de características similares y trabajar en equipo, se aceleraría la manufactura de objetos de grandes proporciones que actualmente demoran horas, días en imprimirse (ver Figura 1).

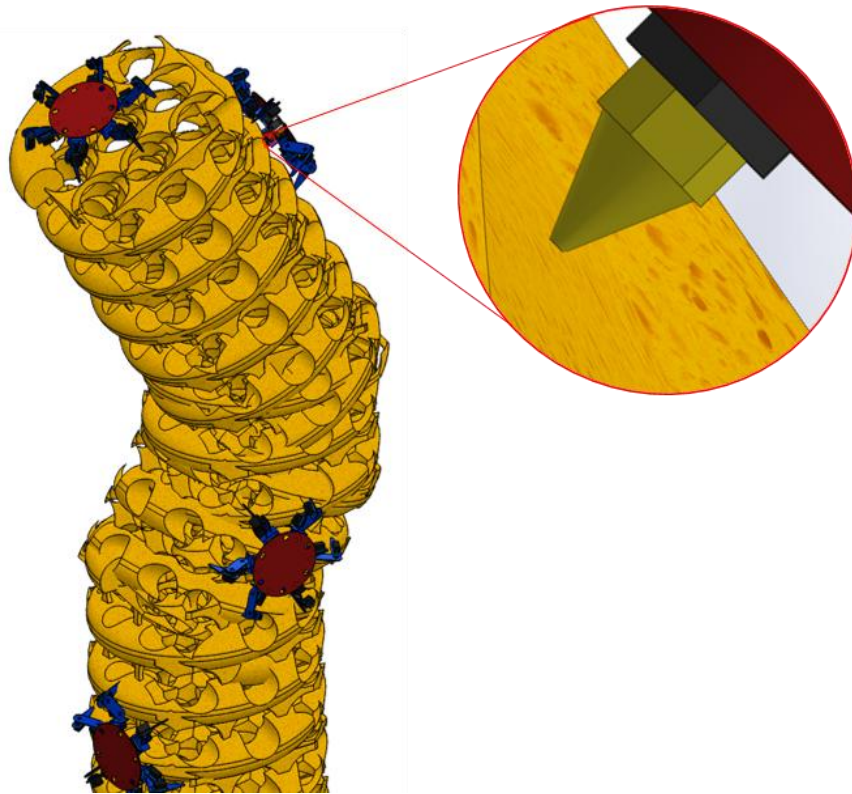


Figura 1. Se presenta un concepto futurista de impresora 3d que motiva el presente trabajo. Estas no tendrían restricción de espacio de impresión en ningún eje, operarían sin intervención humana y podrían trabajar en equipo.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Diseñar, construir y caracterizar una nueva impresora 3D que pueda imprimir un objeto de mayor tamaño que su propio tamaño.

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Diseñar y manufacturar una herramienta de prototipado rápido basada en las tecnologías de código abierto más utilizadas.
2. Generar una columna impresa de sección constante cuya altura sea más grande que la altura de la impresora.
3. Caracterizar el desempeño del sistema resultante midiendo tolerancia de manufactura, rugosidad superficial del objeto impreso, vibraciones del mecanismo en operación y gasto energético del sistema al imprimir.

Capítulo 2

Antecedentes

2.1 El auge de la fabricación personal

Los primeros ordenadores eran del tamaño de una habitación, de difícil uso y se encontraban principalmente en empresas e instituciones académicas. No fue hasta principios de los años 60 que se creó un computador de uso individual (“personal computer”), este era más compacto, económico y no era necesario ser un experto en programación para utilizarlo [13]. Cuarenta años más tarde se repitió la historia pero esta vez en el área de la manufactura, pasando de un sistema de fabricación industrial a uno personal [14]. Avances en computadores personales y equipos de precisión han permitido la implementación de herramientas de fabricación digital a bajo costo, tales como, impresoras 3D, cortadoras laser y routers CNC (por sus siglas en inglés, Computer Numerical Control) [15]. Estas herramientas son operadas por un computador personal en el cual previamente se cargó un modelo tridimensional diseñado en un software CAD.

Hay importantes indicadores que muestran que la fabricación digital ha permitido disminuir el costo de experimentación y manufactura a baja escala de productos customizados [16] promoviendo la concepción de comunidades “*hágalo-usted-mismo*”, incentivando el uso de la impresión 3D y software libre para acercar la manufactura a la gente [17].

2.2 Impresoras 3D de escritorio

Una impresora 3D es un dispositivo capaz de generar un objeto tridimensional adicionando material capa por capa con base en un modelo previamente diseñado en una computadora. Debido a su naturaleza no sustractiva presenta muchas ventajas respecto a las otras herramientas de fabricación digital, entre ellas, el ahorro de material, manufactura de diseños de morfología compleja y fabricación de sistemas prensamblados.

Mientras que en el 2001 la impresora 3D más económicas costaba 45000 dólares, 15 años más tarde esta cuesta alrededor de 200 dólares. Su bajo precio sumado a su fácil utilización y relativa seguridad respecto a las otras herramientas han hecho que este último tiempo haya aumentado el mercado de las impresoras 3D de escritorio [18].

Los métodos que mejor se han adoptado para este tipo de impresoras son dos: modelado por deposición fundida y estereolitografía [19]. El modelado por deposición fundida (FDM, por sus siglas en inglés) consiste en calentar y extruir un termoplástico a través de una boquilla depositándose capa por capa hasta manufacturar el objeto (ver Figura 2a). La estereolitografía (SLA, por sus siglas en inglés) se produce al solidificar un fopolímero líquido mediante radiación uv formando una a una las capas de la pieza (ver Figura 2b).

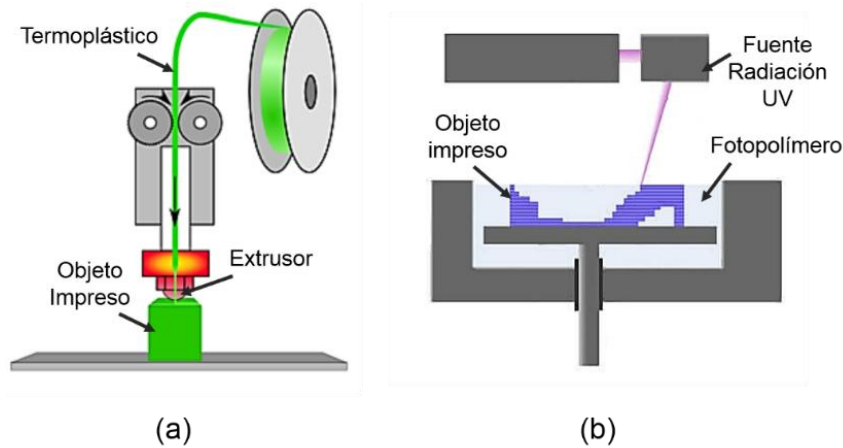


Figura 2. Métodos popularmente implementados en Impresoras 3d de Escritorio (a) modelado por deposición fundida (b) estereolitografía.

Las ventajas de un método por sobre el otro dependerá de la aplicación que le dé el usuario al producto manufacturado. Por ejemplo, en la Tabla 2 se comparan dos impresoras: Replicator+ [20], utiliza para su funcionamiento el modelado por deposición fundida mientras que Formlab [21] manufactura mediante estereolitografía.

Tabla 2 Comparación entre impresoras que utilizan modelado por deposición fundida y estereolitografía

	Replicator +	Formlab 2
Material de Manufactura	Ácido poli láctico	Resina de Fotopolímero
Resolución máxima de impresión	0.15	0.05
Tiempo en que imprime un cubo solido de 1x1 cm con resolución de 0.15 mm (min)	30	90
Resistencia Ultima a la tracción material de manufactura (MPa)	73	31
Impresión en multicolor	Sí	No

2.3 Robots Trepadores

Actualmente existe una amplia variedad de robots trepadores, los cuales varían su diseño y principio de accionamiento según su aplicación y superficie donde se deban adherir. Estos robots son utilizados principalmente en la industria para la inspección en espacios de difícil acceso, mantenimiento de equipos a gran altura y vigilancia en lugares remotos. Otros son desarrollados con el objetivo de implementar estrategias de escalada más eficientes.

Considerando que nuestro prototipo debe escalar una columna, en la Tabla 3 se resumen los principales robots trepadores de postes y columnas en la actualidad.

Tabla 3 Robots trepadores de columnas y postes que se utilizan con distinto proposito

Nombre	Peso (kg)	Velocidad de ascenso (mm/s)	Mecanismo de sujeción	Mecanismo de avance	Función
RiSE v3[22]	5.4	210	Brazos	Articulación	Busqueda y vigilancia
UT-PCR v3[23]	10	10	Ruedas	Ruedas	No especificada
3DClimber[24]	42	17	Prensas	Articulación	Inspección
HR-MP20[25]	19	218	Succión/magnetismo	Ruedas	Inspección

2.4 Impresoras 3d móviles.

Actualmente existen prototipos de impresoras 3D móviles que manufacturan objetos que no estan confinados dentro de su volumen de manufactura, incluso algunas logrando imprimir objetos más grande que su propio tamaño. A continuación, se presentan los trabajos más relevantes que se han desarrollado.

2.3.1 MiniBuilders

Los minibuilders [26] son tres robots móviles que imprimen estructuras de concreto de mayor tamaño que su propio tamaño. Trabajando en conjunto cada uno de los robots desarrollados tiene que realizar una tarea distinta, ligada a las diferentes fases de la construcción. Cada robot está vinculado a sensores y un sistema de posicionamiento local que entrega datos a un software personalizado.

Un primer robot construye las 20 primeras capas de la estructura (ver Figura 3a). El extrusor se encuentra sobre un robot seguidor de línea movilizado por ruedas el cual gira alrededor de la estructura depositando el filamento en forma de espiral. Luego un segundo robot manufactura el resto de la estructura (ver Figura 3b). Este se ancla mediante unos rodillos a la estructura previamente impresa y usando como guía la base comienza a desplazarse imprimiendo muros y techo. Finalmente, un tercer robot se adhiere a la superficie mediante succión, moviéndose libremente por toda la construcción depositando material con el motivo de mejorar las propiedades estructurales (ver Figura 3c).



Figura 3. Robots Minibuilders en el proceso de manufactura de una estructura de concreto (a) Robot manufacturando los cimientos de la estructura (b) Robot imprimiendo los muros de la estructura (c) Robot aplicando una capa de refuerzo a la construcción.

2.3.2 Geoweaver

Geoweaver [27] es un robot hexápodo de código abierto accionado por 12 servo motores, el cual imprime formas de silicona de baja resolución en el plano donde se mueve (ver Figura 4). El sistema utiliza dos servos para controlar la posición del extrusor, uno para extruir el material de manufactura y el resto para la locomoción. Ha sido diseñado considerando el control con un Arduino Uno, el cual recibe los comandos de un programa CAD.

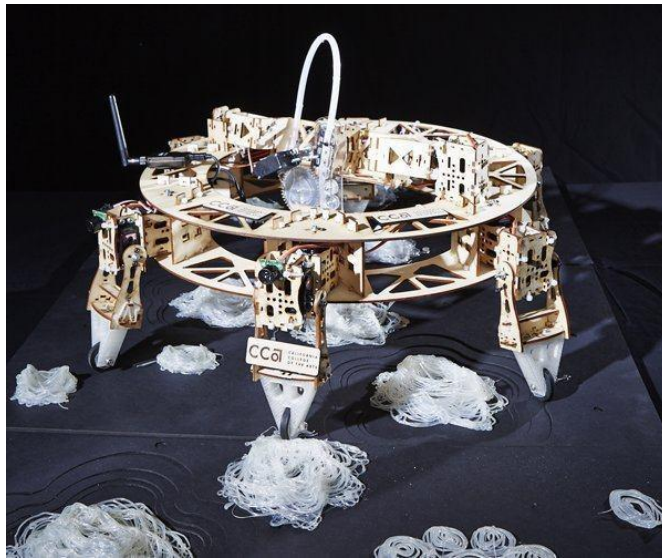


Figura 4. Impresora Geoweaver manufacturando formas de silicona.

2.3.3 3&D bot

3&D bot [28] es una impresora que manufactura objetos de silicona y arcilla desplazándose en el plano (ver Figura 5). Este prototipo se mueve libremente en todas las direcciones gracias a sus cuatro ruedas omnidireccionales. Su control es en base a la plataforma Arduino y un sistema de seguimiento mediante video, conectados inalámbricamente a un servidor.

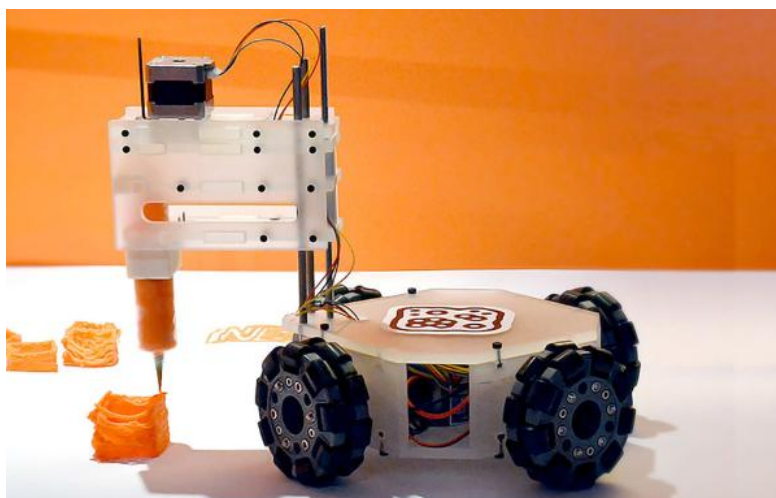


Figura 5. 3&D bot manufacturando un objeto de silicona.

2.5 Plataformas y recursos de código abierto para el desarrollo de impresoras 3D.

En el desarrollo de impresoras 3D de escritorio de código abierto se utilizan componentes y programas que se encuentran continuamente en desarrollo y ampliamente documentados por comunidades “*hagalo-usted-mismo*”. A continuación se describen las principales plataformas y recursos utilizados en el rubro.

2.4.1 Arduino

Arduino es un controlador lógico programable de código abierto basado en un microcontrolador Atmel AVR, diseñado para facilitar la implementación de la electrónica y programación en proyectos multidisciplinarios [29]. En la Figura 6 se muestran varios tipos de Arduino, los cuales se diferencian principalmente por su nivel de procesamiento de datos y periféricos acoplados a él, tales como, antena wifi, portamicrosd, etc.

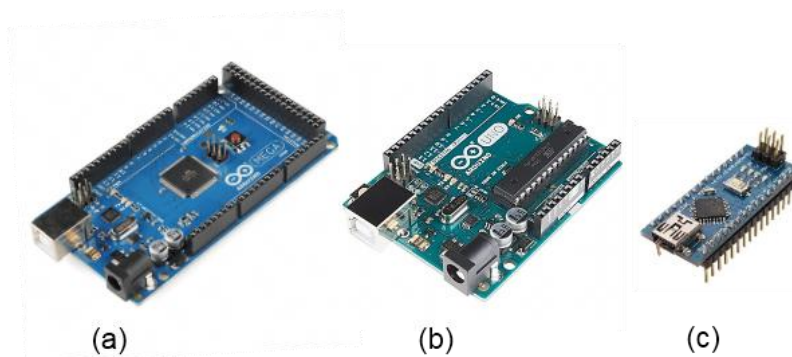


Figura 6. Diferentes tipos de placas del controlador Arduino (a) Arduino Mega (b) Arduino Uno (c) Arduino Nano

Las capacidades del Arduino se pueden aumentar acoplándole “Shields”, los cuales son tarjetas electronicas que acompañadas de librerías facilitan la implementación de algún dispositivo. En la Figura 7 se muestran ejemplos de Shields.

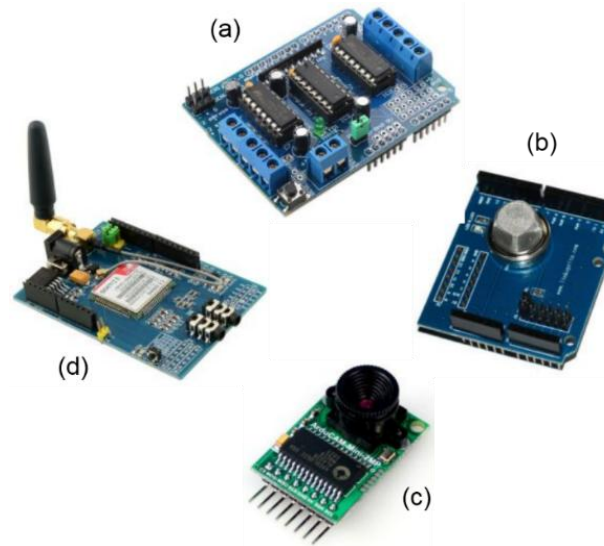


Figura 7. Shields utilizadas para ampliar las capacidades de Arduino Uno (a) Shield para controlar motores (b) Shield detector de humo (c) Shield para camara de video (d) Shield para habilitar GSM/GPRS.

2.4.2 RAMPS

Es un Shield que al acoplarse con Arduino le da todas las características y requisitos para operar una impresora 3D (ver Figura 8). Este recurso originalmente diseñado para el manejo de las impresoras RepRap, es ampliamente utilizado para la implementación de impresoras de escritorio de bajo costo y experimentación de nuevas técnicas de manufactura.

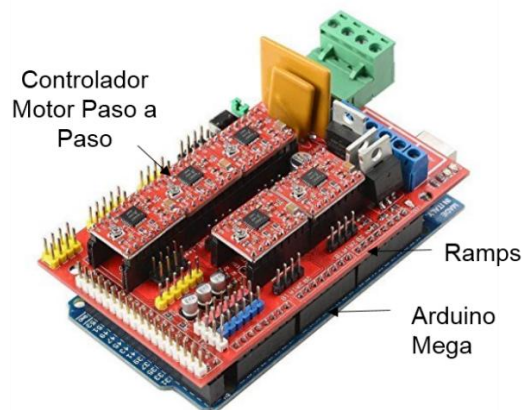


Figura 8. Shield RAMPS 1.4 acoplada a Arduino Mega.

2.4.3 Firmware para impresión 3D.

Es un programa informático que permite el control, monitoreo y manipulación de datos de circuitos electrónicos. Existen *firmwares* de código abierto para el control de impresoras 3D los cuales facilitan la implementación del código máquina, el control de la temperatura del extrusor y regulación de aceleración-desaceleración de los motores paso a paso. Entre los actualmente disponibles el más utilizado es el *firmware* Marlin [30] compatible con la plataforma RAMPS. Algunas ventajas que presenta respecto a otros *firmwares*:

1. Soporta sensores que detectan fallas de impresión.
2. Su información de implementación está muy bien documentada.
3. No frena totalmente el extrusor al llegar a una esquina del objeto impreso, mejorando la calidad de la impresión.
4. Permite la implementación de elementos ajenos a una impresora 3d común los cuales se comandan mediante una señal de modelación por ancho de banda (PWM).
5. Soporta hasta 4 extrusores.

2.4.4 Slicer.

Son programas encargados de dividir en capas el modelo 3D y generar el código G, el cual es un lenguaje que contiene las órdenes para que la impresora 3D manufacture el modelo 3D. En la Tabla 4 se presentan los principales códigos utilizados para imprimir mediante modelado por deposición fundida.

Tabla 4 Comandos populares de código G que se utiliza en impresión 3D

Código	Función
G1	Movimiento recto de la herramienta a una coordenada específica.
G4	La máquina herramienta queda a la espera de un comando por un tiempo determinado.
G28	La herramienta se envía al origen del sistema coordenado o cero máquina
G92	Fijar la posición actual de la herramienta en una posición específica
M42	Enviar señal PWM desde el controlador

2.4.5 Motor paso a paso.

Los motores paso a paso son motores de corriente continua que pueden girar en ángulos discretos. Ellos tienen múltiples bobinas posicionadas equidistantes a lo largo del estator, las cuales son llamadas fases del motor. El rotor gira al energizar secuencialmente cada bobina tal como se muestra en la Figura 9.

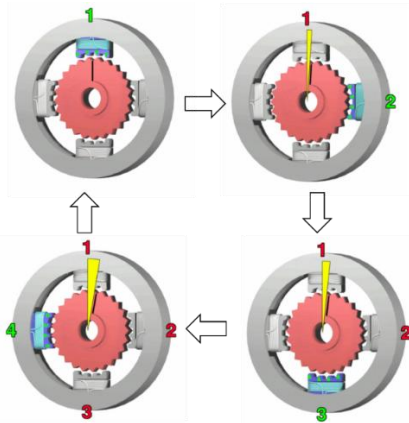


Figura 9. Secuencia de funcionamiento de un motor paso a paso cuando este funciona en modalidad paso completo o full step.

La resolución de giro del eje dependerá de la manera en que se activen y desactiven las bobinas del estator. En modalidad de paso completo o full step, las bobinas son energizadas una a una obteniéndose una resolución de giro equivalente a la distancia entre los dientes imantados del rotor. La resolución de giro del estator aumenta si la energización y desenergización de las bobinas se hace de manera más paulatina subdividiendo el movimiento en micropasos o microsteppings. Si es mayor la cantidad de subdivisiones que se implementen por paso se obtendrá un movimiento más preciso y con menos resonancia, pero sacrificando un porcentaje del torque si es que el motor se opere en modalidad fullstep (ver Tabla 5).

Tabla 5 Comparación entre la modalidad de micropasos y torque aplicado [31]

Micropasos	Porcentaje del Torque Máximo
1	100%
8	70.7%
16	9.8%

2.4.6 Servo motor

Los servomotores son dispositivos electromecánicos que se componen de un motor eléctrico de corriente continua, un juego de engranajes, un potenciómetro y un circuito eléctrico, como se puede observar en la Figura 10. Estos tienen la capacidad de ubicarse y mantenerse en cualquier posición angular dentro de su rango de operación.

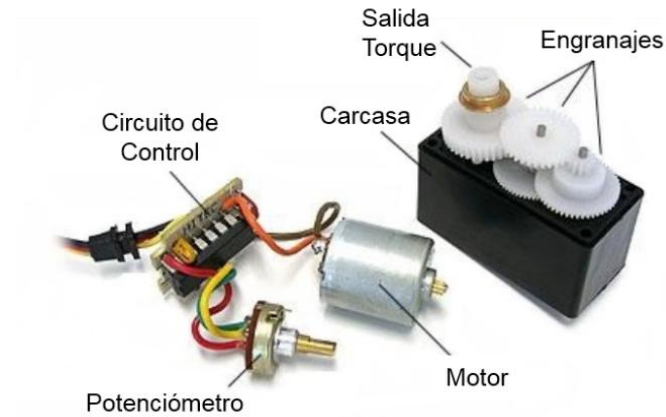


Figura 10. Partes de un servo motor típico.

El circuito eléctrico al interior del servo motor interpreta las instrucciones de un controlador externo el cual envía una señal PWM haciendo rotar el motor hasta que el potenciómetro acoplado al eje del motor le indica al controlador que se alcanzó el ángulo deseado. El ciclo de funcionamiento es presentado en la Figura 11.

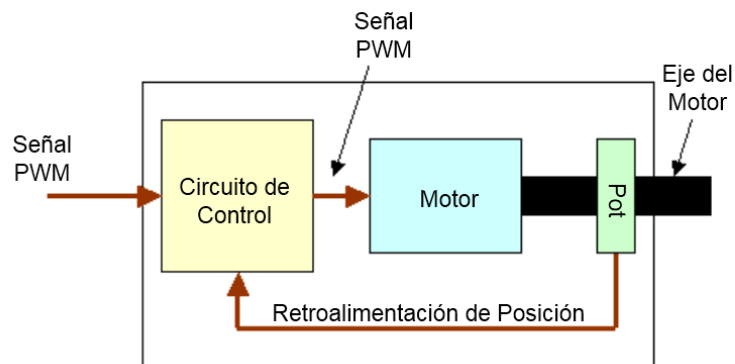


Figura 11. Diagrama de funcionamiento de un servo motor

Capítulo 3

Metodología

3.1 Organización del trabajo.

El trabajo se dividió en 5 etapas: conceptualización, diseño, fabricación, operación y caracterización. Las primeras 4 corresponden a los pasos necesarios para materializar el concepto ideado (desarrollo del robot), mientras que en la quinta se desarrolló y ejecutaron experimentos para validar el concepto y caracterizar el prototipo desarrollado.

3.2 Desarrollo del robot.

Conceptualización.

Se comenzó por revisar los antecedentes considerando los objetivos que motivaron el presente trabajo. Con base en la información recopilada se especificó los alcances y se generaron una serie de candidatos a concepto. Estos se evalúan, analizando su viabilidad de implementación y se seleccionó uno de los conceptos para desarrollarlo. En la Figura 12 se presenta un esquema del proceso de conceptualización llevado a cabo.

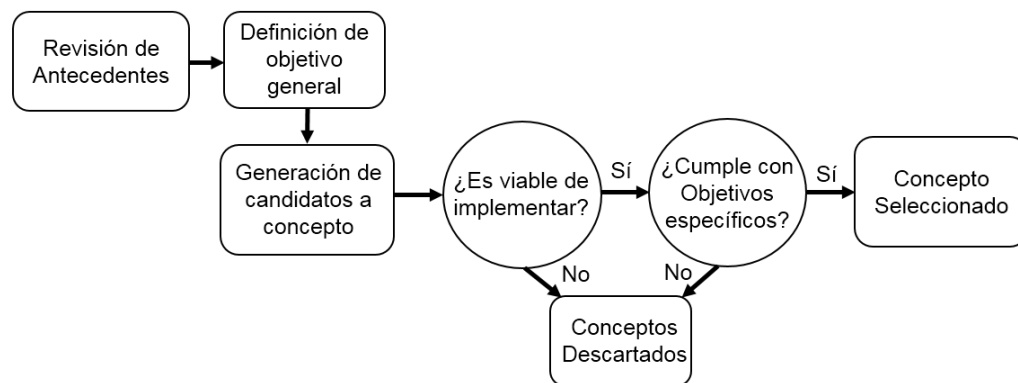


Figura 12. Esquema de metodología para ejecutar la etapa de conceptualización.

Diseño e ingeniería.

Los mecanismos mediante los cuales operaría el futuro prototipo se estudiaron de manera general, evaluándolos tanto técnica como económicamente. Una vez que son seleccionados, se procedió al diseño mecánico en detalle y, paralelamente, se estudió el sistema que controló dicho mecanismo. En un proceso iterativo, el diseño mecánico se somete a un análisis cinemático-dinámico para verificar interferencias y distribución de fuerzas. Terminado este proceso se procede a la manufactura del prototipo. En la Figura 13 se presenta un esquema del procedimiento completo.

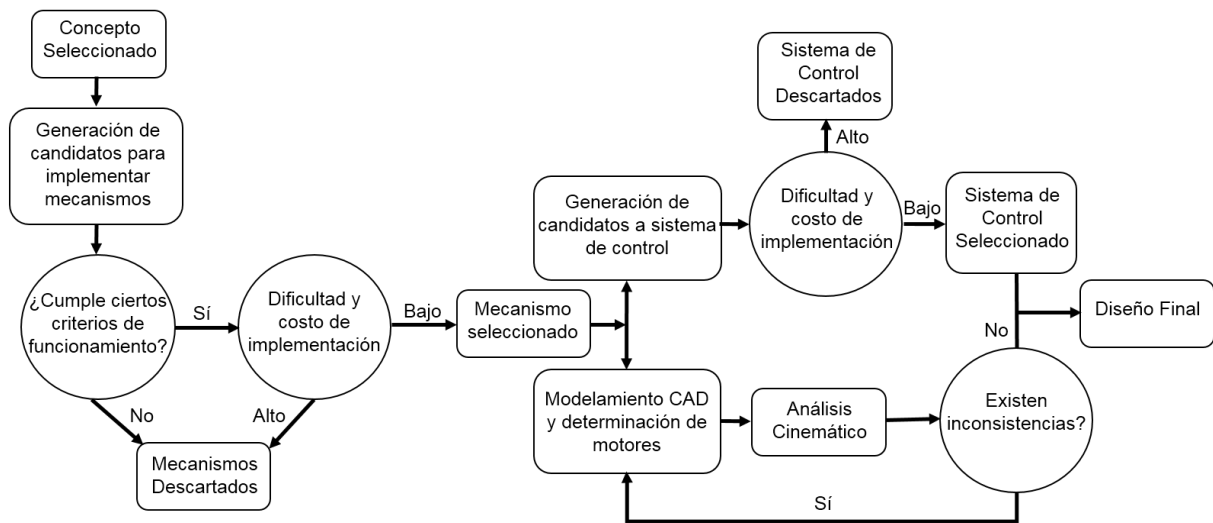


Figura 13. Esquema de metodología de la etapa de diseño e ingeniería.

Manufactura y operación.

Según las especificaciones realizadas al momento de diseñar, se procedió a la compra y fabricación de componentes para el posterior armado de Koala 3D. Los procesos y parámetros de manufactura se definieron considerando la forma, calidad superficial requerida y material de la pieza. Finalmente armado el prototipo, se operó y calibró. En la Figura 14 se presenta un esquema del proceso de manufactura.

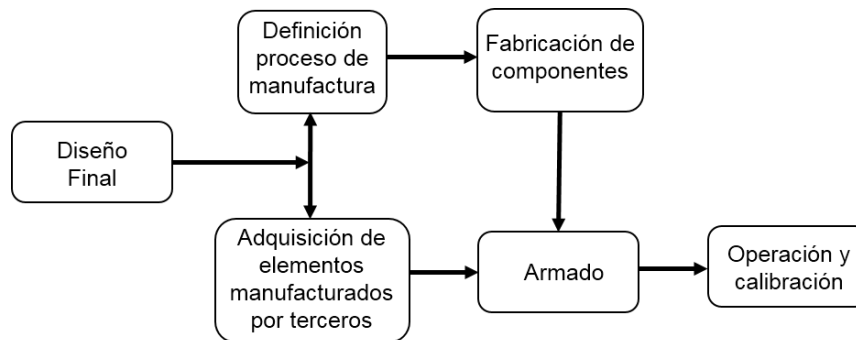


Figura 14. Esquema de metodología en la etapa de fabricación del prototipo.

3.3 Validación y caracterización.

Se comenzó por definir la forma en que se va a validar el cumplimiento de objetivos y características del prototipo a medir. Luego se diseñó el procedimiento y montaje experimental para la captura de datos y toma de videos. Los datos se procesan con el objetivo de llegar a un valor útil que permitiera comparar el prototipo creado con otras máquinas similares. En la Figura 15 se presenta un esquema del proceso de validación y caracterización de Koala 3D.

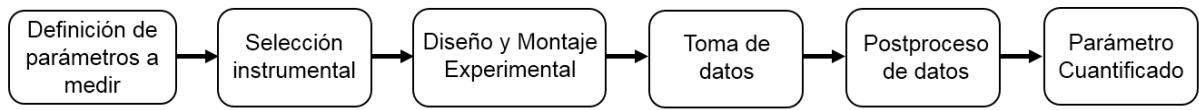


Figura 15. Esquema de metodología en la etapa de caracterización y validación del prototipo.

Capítulo 4

Conceptualización, diseño, manufactura, operación y caracterización del prototipo

4.1 Generación del concepto.

Al revisar el estado del arte de la impresión 3D se vislumbró la posibilidad de generar una innovación explotando lo mencionado por Lipson en el séptimo principio (ver sección 1.1). Según lo anterior, era posible generar un nuevo concepto utilizando los recursos desarrollados por la comunidad “*hágalo-usted-mismo*” en el diseño de un sistema impresor y montarlo sobre un sistema motriz.

Se estudiaron diversos sistemas motrices tomando en cuenta uno de los requisitos principales para manufacturar piezas de calidad: el sistema donde se encuentre montado el dispositivo generador de las capas del objeto (impresora 3D) se debía trasladar de manera estable. Un sistema de traslación multiaxial como un drone se descartó debido a lo sensible que son las perturbaciones del ambiente. Otra alternativa analizada fue un sistema bidireccional tal como una impresora montada en un carro, la cual fue una opción que cumplía con uno de los objetivos del trabajo pero la estabilidad de su movimiento dependería de cuan lisa sea la superficie donde estuviera trasladándose. Por lo tanto una opción con movimiento unidireccional que a su vez fuera manufacturando la superficie por la cual se movilizara fue la opción desarrollada y la cual se presenta a continuación.

4.1.1 Consideraciones preliminares.

El prototipo desarrollado tiene como objetivo principal imprimir un elemento de mayor tamaño que su propio tamaño tomando en consideración las tecnologías de código abierto más utilizadas. En el año que se realizó este trabajo, el método más desarrollado y fácil de implementar era el método FDM [32]. Además existía la “*wiki*” desarrollada por la comunidad ReRap [33], la cual presentaba basta documentación para el desarrollo de impresoras FDM. Una de las ventajas de este método que permitió su fácil implementación era el hecho que la distribución y fundido del material fueran realizados por el mismo extrusor, en contraste con el método SLA que la fuente de rayos UV solo solidifica el material pero no lo suministra (ver sección 2.2).

Luego de seleccionado el método por el cual la impresora operaría, se procedió a definir la morfología del objeto que fabricaría: una columna de ácido poli láctico (PLA) de altura mayor a la altura del prototipo y sección cuadrada igual a 30x30 mm² (ver Figura 16). Una de las suposiciones de este enfoque es que la base de la columna no sería fabricada por el prototipo.

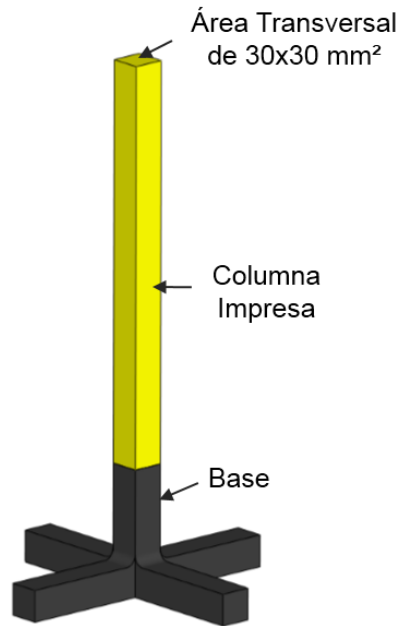


Figura 16. Descripción de la columna manufacturada por Koala 3D

4.1.2 Definición general del concepto

Para aplicar lo dicho por Lipson en el séptimo principio de la manufactura aditiva, la impresora 3D debía acoplarse a un sistema que le permitiera modificar continuamente la posición de su volumen de manufactura al menos en un eje. Basándose en la geometría del objeto descrito en la sección 3, el concepto se compuso de una impresora 3D FDM acoplada a un robot trepador el cual se movía en la dirección longitudinal a la columna.

En la Figura 17 se presenta de manera general las partes que compusieron el concepto. La parte trepadora se constituyó de dos mecanismos de sujeción y un sistema que permitió la elevación del prototipo mediante la generación de un movimiento relativo entre el sistema de sujeción superior y el resto del prototipo. La parte impresora se encargó de mover el extrusor de manera que fuera depositando el material en toda el área de manufactura transversal a la columna. El extrusor al finalizar la impresión de cada capa de la columna impresa subía para imprimir la siguiente capa, este movimiento longitudinal a la columna lo realizaba utilizando el mismo mecanismo de elevación perteneciente a la parte trepadora.

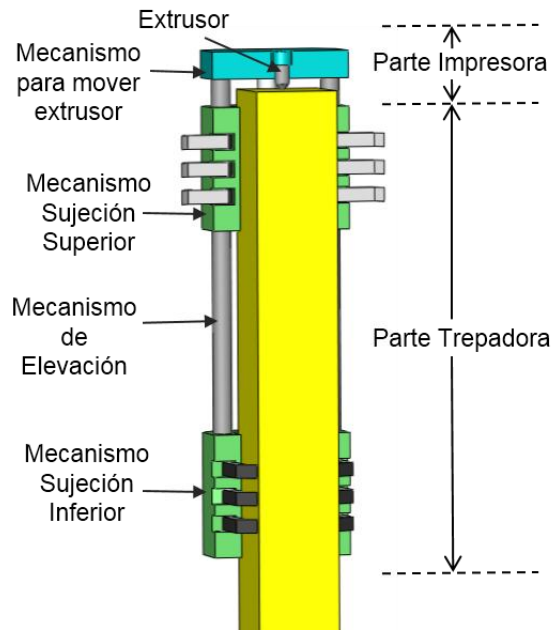


Figura 17. Descripción general de las partes del concepto Koala 3D.

4.1.3 Funcionamiento del concepto

En la Figura 18 se puede ver el funcionamiento del sistema: (1) Se acopla el prototipo a la base prefabricada mediante su mecanismo de sujeción superior cuando este se encuentra en el punto más alejado del mecanismo de sujeción inferior; (2) se manufactura un tramo de columna hasta que el mecanismo de sujeción inferior alcanza al superior; (3) luego de esto ocurre un periodo de transición donde el prototipo se afirma mediante el mecanismo de sujeción inferior mientras el mecanismo de sujeción superior vuelve a su posición inicial (4) para comenzar la manufactura de un nuevo tramo de columna. Dicho proceso se repite continuamente hasta que se completa la manufactura del objeto o columna esperada.

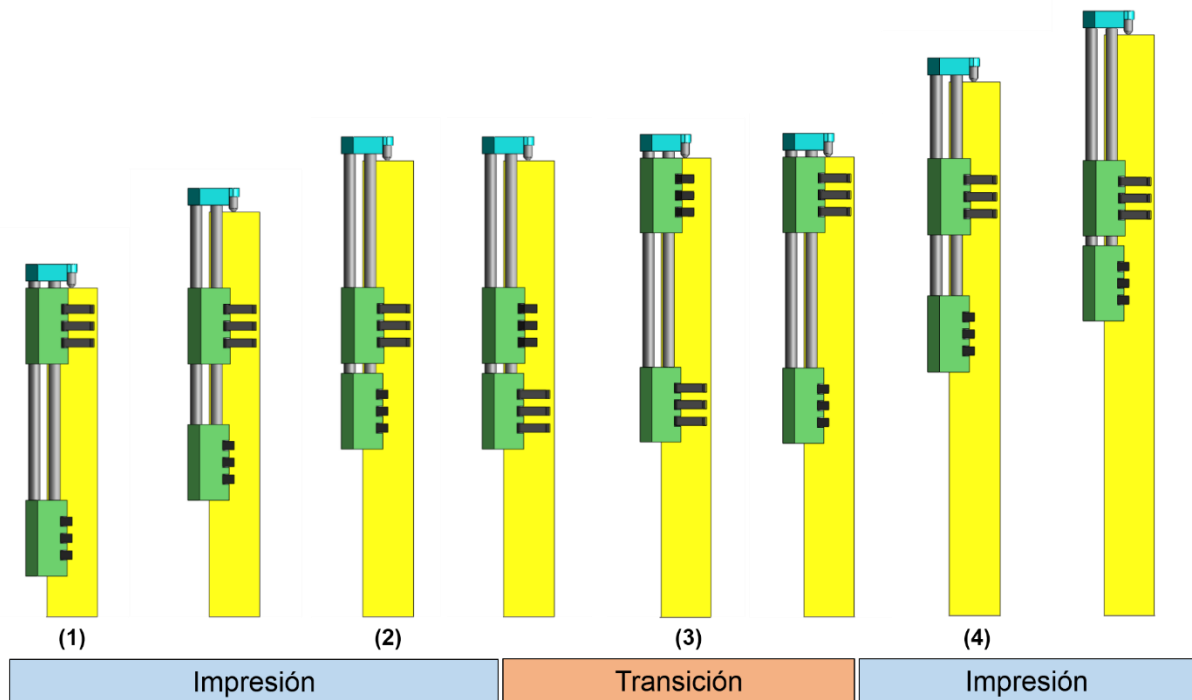


Figura 18. Etapas del funcionamiento de Koala 3D cuando se encontraba manufacturando una columna mediante el método FDM.

Debido a la similitud con que se desplazaba el prototipo a lo largo de la columna a medida que la manufacturaba y la forma con que trepa un Koala una caña de bambú, el concepto se bautizó con el nombre de “Koala 3D”.

4.2 Diseño mecánico del prototipo

Una vez que se definió de manera general el funcionamiento y partes que componían el futuro prototipo se procedió a diseñar la parte impresora y trepadora comenzando por seleccionar los mecanismos por los cuales operarían los diferentes sistemas (sección 4.2.1) para luego seguir con la especificación de sus dimensiones, material de sus componentes y potencia requerida de los actuadores (sección 4.2.2).

4.2.1 Selección mecanismo de las partes del prototipo

A continuación se presenta el proceso de cómo se seleccionaron los mecanismos por los cuales funcionaría la parte impresora y trepadora del prototipo.

Parte impresora

- a) Mecanismo para la alimentación del material de manufactura.

Se evaluaron cualitativamente dos métodos por los cuales impulsar el material hacia la punta caliente del extrusor en base a la información recopilada en la red [34] [35], los cuales se muestran

en la Figura 19. Estos se diferencian por la distancia a la que se encuentra el mecanismo impulsor respecto a la punta caliente del extrusor.

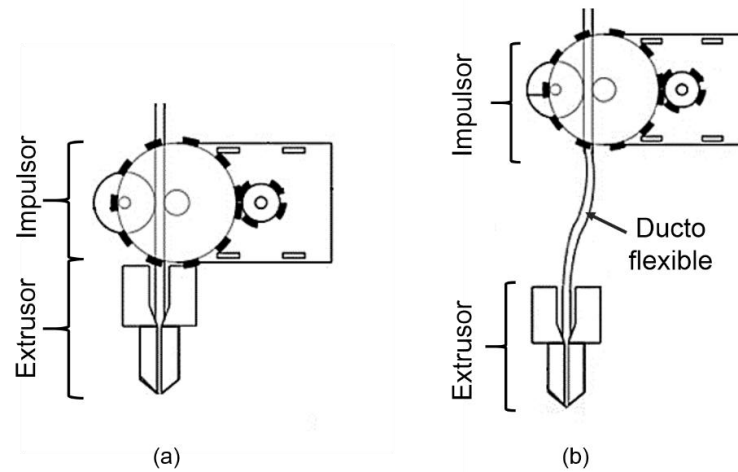


Figura 19. Tipos de impulsor utilizados para empujar el material hacia el extrusor. Ambos se utilizan cuando se imprime tridimensionalmente con el método FDM (a) Impulsor directo, (b) impulsor tipo Bowden.

En el caso del método directo (Figura 19a) se requiere menor potencia para impulsar el material de manufactura ya que al prescindir del ducto de conexión entre el impulsor y extrusor se elimina la fricción que se genera entre el filamento y el ducto que lo guía, implementándose un sistema impulsor de menor tamaño que si fuera del tipo Bowden. Este método permite una fácil calibración de los parámetros que influyen en la retracción e impulsión del material debido a la eliminación de la holgura o juego que posee el filamento dentro del ducto.

Las ventajas del método Bowden (Figura 19b) se obtienen al reducir la masa total que se desplaza para depositar el material sobre el área de manufactura dado que sólo se mueve el extrusor y el impulsor se mantiene fijo. Comparándolo con el método directo, existe una reducción en la potencia requerida para desplazar el extrusor, lo cual resulta en una disminución del volumen total del mecanismo que genera el desplazamiento. Además, al ser menos la masa que está en movimiento, se reduce el momentum que posee el extrusor traduciéndose en movimientos más precisos y suaves al cambiar de dirección teniendo como consecuencia un sistema con menos vibraciones.

Al considerar que el robot imprimiría una columna de altura no especificada se procuró evitar al mínimo las vibraciones del sistema ya que estas propiciarían la falla de la impresión o la ruptura de la columna impresa. Es por esto que se escogió la implementación del método Bowden en lugar del directo, a pesar de las ventajas que presentaba este último.

b) Mecanismo para movilizar el extrusor dentro del área de manufactura

Luego de seleccionar el impulsor se procedió a diseñar el mecanismo para mover el extrusor en el área de manufactura. El mecanismo debía tener la capacidad de posicionar al extrusor de forma

precisa en las distintas coordenadas del área de manufactura transversal a la columna (ver sección 4.1.2) como también ser compacto y fácil de implementar. En la Figura 20 se muestran las tres opciones estudiadas para mover el extrusor bidimensionalmente: la alternativa (a) genera el movimiento del extrusor por medio de un conjunto polea-correa; la alternativa (b) mueve el extrusor gracias a la configuración que toman los brazos que lo sostienen; y la alternativa (c) mueve el extrusor mediante un conjunto engranaje-cremallera.

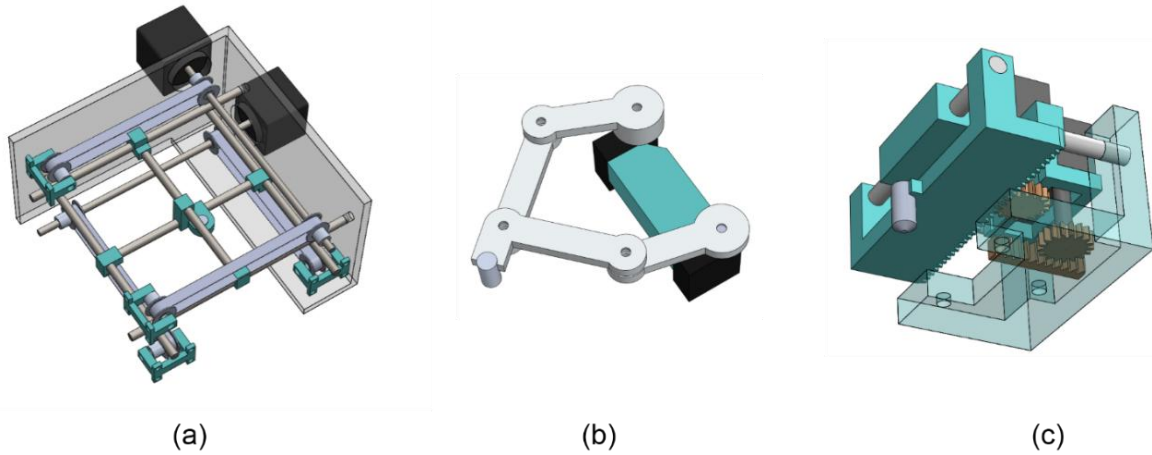


Figura 20. Alternativas analizadas para movilizar el extrusor en el plano transversal a la columna (a) sistema correa-polea (b) sistema de brazos articulados (c) sistema engranaje-cremallera.

La alternativa (a) es un mecanismo muy utilizado en la impresión de objetos mediante el método FDM debido a su fácil implementación y exactitud con que se deposita el material dentro del área de manufactura. Como se puede ver en la Figura 21, para generar el movimiento del extrusor en dos dimensiones este se acopla a dos correas las cuales al girar mueven el extrusor a las distintas posiciones dentro del área de impresión. Debido a que la extensión del recorrido del extrusor depende directamente del largo de la correa, el área de manufactura debe estar circunscrita dentro de las paredes que contienen el mecanismo que mueve el extrusor.

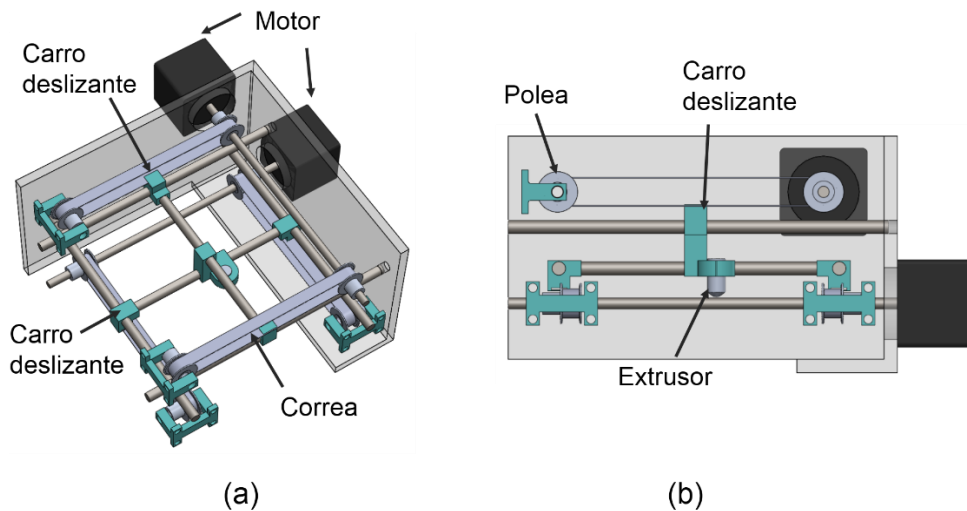


Figura 21. Partes que componen el sistema correa polea. (a) Vista isométrica y (b) vista alzada.

La alternativa (b) es un mecanismo basado en un robot llamado SCARA para la manipulación industrial de elementos dentro de una cadena productiva [36]. Esta opción consiste en dos brazos articulados controlados por dos servo motores que al girar propician que los brazos modifiquen su configuración geométrica cambiando la posición del extrusor dentro del área de manufactura (ver Figura 22).

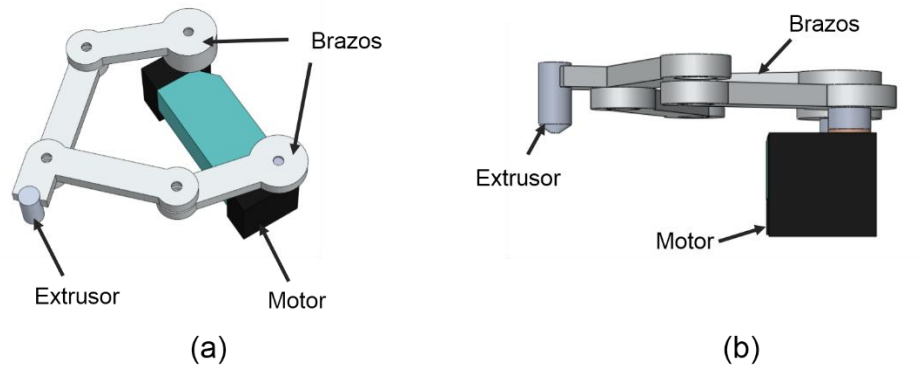


Figura 22. Partes que componen el sistema de brazos articulados para mover el extrusor dentro del área de manufactura transversal a la columna. (a) Vista isométrica y (b) vista alzada.

Este sistema fue el más compacto de las tres alternativas analizadas pero el más difícil de implementar. Al contrastarse ambas posiciones de la Figura 23 y aplicar la ecuación 3.1 se pudo observar que para una extensión de brazos distinta (R_i), obtenida al variar los ángulos de giro de ambos motores (α_i y β_i), pero conservando el mismo ángulo de giro (θ_i) se tienen distintas resoluciones de movimiento (S_i). Lo anterior complica el control del mecanismo ya que para obtener una capa impresa de igual espesor y resolución en toda su área se tendría que programar diferentes velocidades y aceleraciones del extrusor dependiendo de la trayectoria que este realizara al depositar el material.

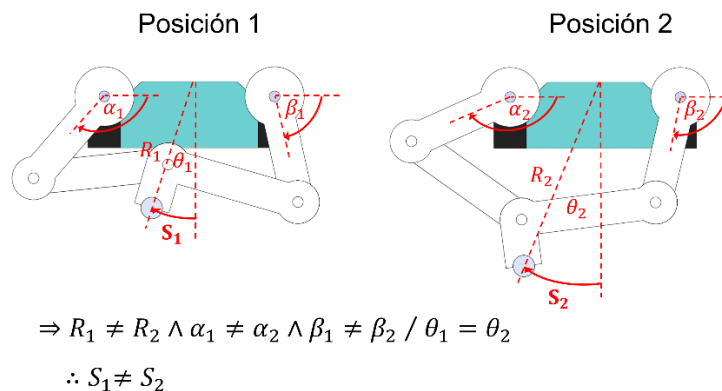


Figura 23. Dos posiciones del extrusor con igual ángulo de giro θ pero distintas resolución de movimiento S debido a la diferente extensión de los brazos R .

$$S_i = R_i \theta_i \quad (3.1)$$

Para la implementación de la alternativa 3 se basó en una plataforma CNC de código abierto llamada Piccolo [37]. En la Figura 24 se muestra el mecanismo de manera general, el cual se compone de dos cuerpos móviles impulsados por engranajes rectos que engranan sobre cremalleras para generar el movimiento del extrusor sobre el área de manufactura.

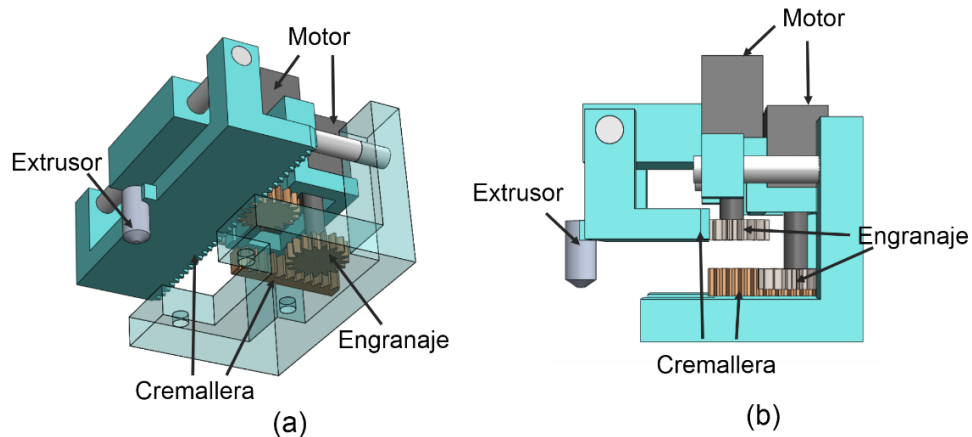


Figura 24. Partes que componen el sistema engranaje cremallera para mover el extrusor dentro del área de manufactura transversal a la columna. (a) Vista isométrica y (b) vista alzada.

El posicionamiento del extrusor tanto en la alternativa 1 como la 3 se genera mediante la combinación de dos movimientos rectos perpendiculares entre ellos. Lo anterior facilitó la programación y generación del código G en comparación con la alternativa 1 ya que se tendría la misma resolución de movimiento no importando la trayectoria que realice el extrusor. Una diferencia entre ambas opciones se produjo al comparar el volumen de ambos mecanismos para mover el extrusor dentro de un área de $30 \times 30 \text{ mm}^2$, se estimó que el volumen de la alternativa 1 sería alrededor de cuatro veces mayor a la alternativa 3 considerando el mismo tamaño de extrusor y motores.

La alternativa 3 fue finalmente el mecanismo que se implementó ya que reúnen las cualidades de las opciones 1 y 2, es decir, es un sistema fácil de implementar y compacto.

Parte trepadora

a) Mecanismo de sujeción

El mecanismo de sujeción debía procurar que el prototipo no resbalará al estar imprimiendo una capa de material y que al desplazarse este se mantuviera lo más alineado a la columna. En la Figura 25 se presentan 3 alternativas de mecanismos de sujeción popularmente utilizado en robots trepadores de postes [38]: (a) succión, (b) tenazas y (c) prensas.

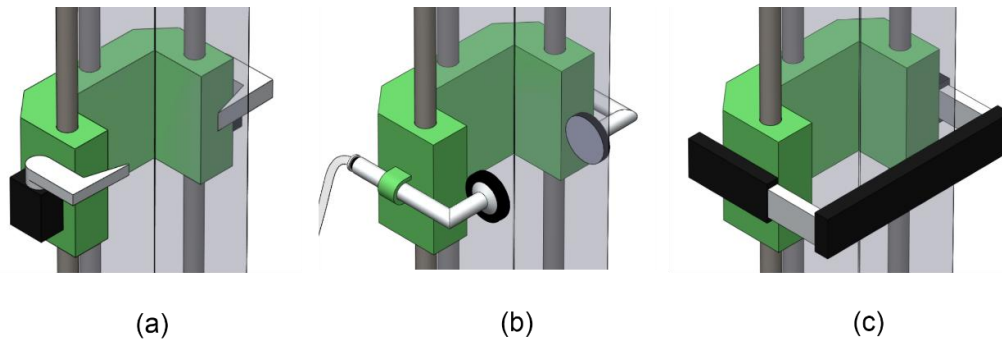


Figura 25. Alternativas analizadas para implementar el mecanismo de sujeción. Dentro de las opciones a estudiar estaba un sistema (a) de succión, (b) tenazas y (c) prensas.

El mecanismo de sujeción mediante succión (Figura 25a) no fue posible de implementar ya que para la generación de una presión negativa el mecanismo requiere que la superficie donde se va a adherir el prototipo sea suave, no porosa y sin grietas, lo cual es totalmente contrario a las cualidades que presenta una superficie manufacturada mediante el método FDM.

Los mecanismos de tenazas (Figura 25b) y prensas (Figura 25c) funcionan bajo el mismo principio para lograr la adherencia del prototipo, esto es, aplicando presión sobre la columna para aumentar la fuerza de roce entre la columna y la superficie del mecanismo que está en contacto con ella. La principal diferencia entre el mecanismo de prensas y tenazas es la manera en la que se ejerce esta presión. En el caso de las prensas la presión se ejerce comprimiendo la columna entre dos superficies paralelas entre ellas mientras que en el caso de las tenazas la presión se ejerce en un área pequeña donde el prototipo apoya todo su peso.

Las prensas, en comparación con las tenazas, distribuyen mucho mejor las presiones sobre la estructura a la cual se adhieren disminuyendo la posibilidad de dañarla. Otra ventaja es que gracias a su morfología mantendrían alineado el prototipo a la columna, necesario para que el extrusor mantenga una distancia equivalente en toda el área de manufactura transversal a la columna. Debido a estos atributos se concluyó que la mejor opción de las tres estudiadas era el sistema de prensas.

b) Mecanismo de elevación.

Una vez seleccionado el método de sujeción se procedió a la selección del mecanismo de elevación. Como se dijo en la sección 4.1.3, el prototipo se pensó de manera que fuera generando las distintas capas de la columna y simultáneamente la fuera escalando, utilizando el mismo mecanismo para ambas funciones. Como se escogió un extrusor con una punta 0.4 (ver sección 4.2.2) el máximo espesor de capa que se podría obtener es de 0.35 mm [39] por lo que el mecanismo de elevación que se implementase debía moverse a lo menos a esa resolución.

Un mecanismo utilizado por impresoras 3D de escritorio del tipo FDM para mover la mesa de impresión respecto al extrusor a medida que se van generando las capas del objeto es un sistema tuerca-tornillo sinfín [40][41]. En la Figura 26 se muestra como es la implementación de este sistema en impresoras 3D estáticas: una tuerca se acopla a la mesa de impresión y un motor paso a

paso con un tornillo sinfín se adhieren al chasis de la impresora. La mesa, guiada por ejes de acero, al girar el tornillo se mueve linealmente acercándose o alejándose a la punta del extrusor.

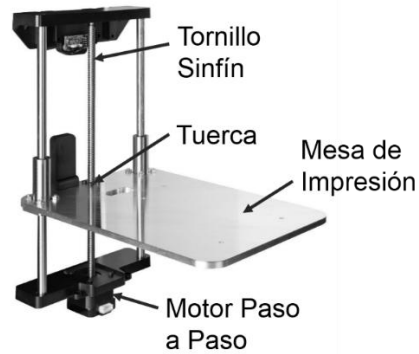


Figura 26. Sistema ampliamente utilizado para mover la mesa de impresión del extrusor en impresoras que utilizan el método FDM. Este mecanismo se compone de un tornillo sinfín acoplado a un motor paso a paso, el cual enrosca en una tuerca acoplada a la mesa donde se deposita el material.

En la Figura 27 se muestra de qué manera se implementó este mecanismo a nuestro concepto, acoplándose la tuerca al mecanismo de sujeción superior mientras que el motor con el tornillo sinfín se unieron al mecanismo de sujeción inferior.

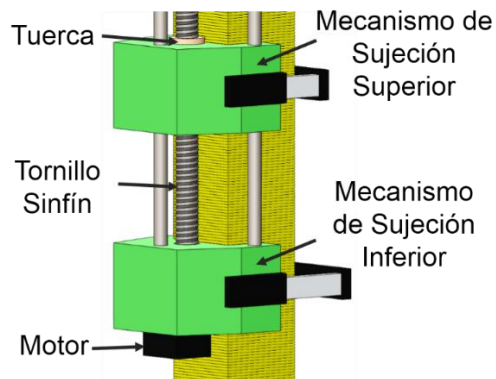


Figura 27. Presentación conceptual del acople del sistema tornillo sinfín y tuerca al mecanismo de sujeción superior e inferior. Este sistema permitió que Koala 3D desplazara el extrusor en el eje longitudinal a la columna y a su vez la trepara.

4.2.2 Diseño elementos mecánicos.

Luego de seleccionar mediante que mecanismo funcionaría cada parte, se realizó un diseño en detalle de sus partes, analizando interferencias y seleccionando los motores por los cuales operaría el prototipo.

Parte Impresora

- Extrusor de modelado por deposición fundida.

El extrusor que se implementó en el diseño fue uno prefabricado del tipo J-HEAD modelo E3D, el cual se muestra en la Figura 28. Casi en su totalidad manufacturado de acero inoxidable, este poseía una boquilla que al ingresar filamento de diámetro 1.75mm era fundido y extruido a un diámetro de 0.4mm. Una resistencia calefactora era el encargado de fundir el material antes de ser extruido, la temperatura era controlada por una termocupla contigua al calefactor. Un ventilador de 30x30mm acoplado a un intercambiador de calor de aletas provocaba el gradiente de temperaturas necesario para que el material no se aglutinara antes de ser depositado en el área de manufactura.

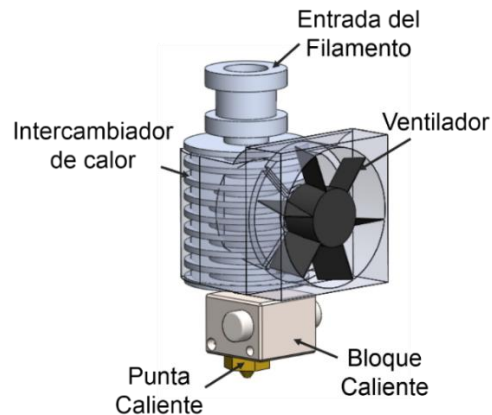


Figura 28. Presentación extrusor utilizado implementado en la parte impresora, detallando sus partes más importantes.

b) Impulsor de material de manufactura tipo Bowden.

En la Figura 29 se muestran las partes que constituyen un típico impulsor que funciona mediante el método Bowden. El filamento es impulsado por un conjunto de dos engranajes reductores (ver Figura 29a), donde el engranaje conductor se acopla a un motor paso a paso y el engranaje conducido se acopla a un eje el cual hace girar al piñón extrusor. Para asegurar que el filamento no resbale, este se somete a presión posicionándolo entre el piñón extrusor y un rodamiento empujado por un resorte, este sistema de apriete se muestra en la Figura 29b.

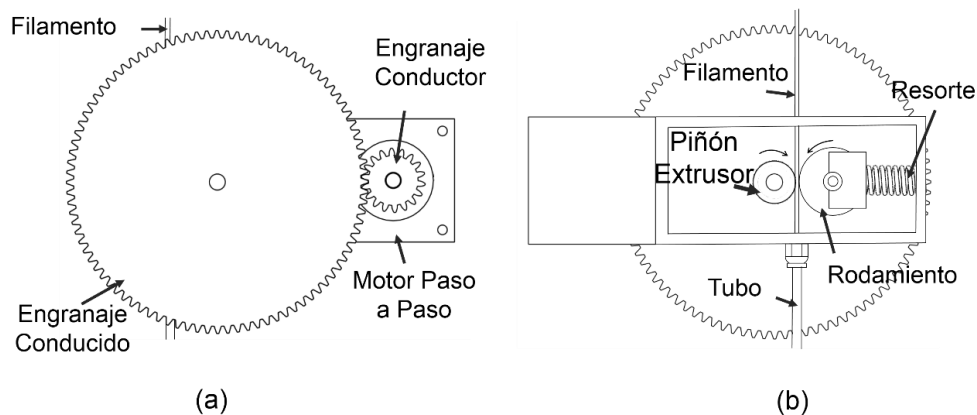


Figura 29. Impulsor tipo Bowden compuesto por un conjunto reductor de engranaje y un motor paso a paso (a) vista frontal y (b) vista posterior.

La implementación del impulsor se basó en un diseño tipo Bowden disponible en la página Thingiverse [42] cuya relación entre los engranajes reductores era de 5 es a 1. En la Figura 30a se ve el diseño modificado considerando las partes del sistema de apriete disponibles en el laboratorio. En la parte superior del impulsor se ubican 2 extensiones perforadas para acoplar mediante pernos y tuercas el sistema a la parte trepadora. La mayoría de las partes presentadas en la Figura 30b fueron diseñadas de PLA exceptuando el sistema de apriete y motor paso a paso.

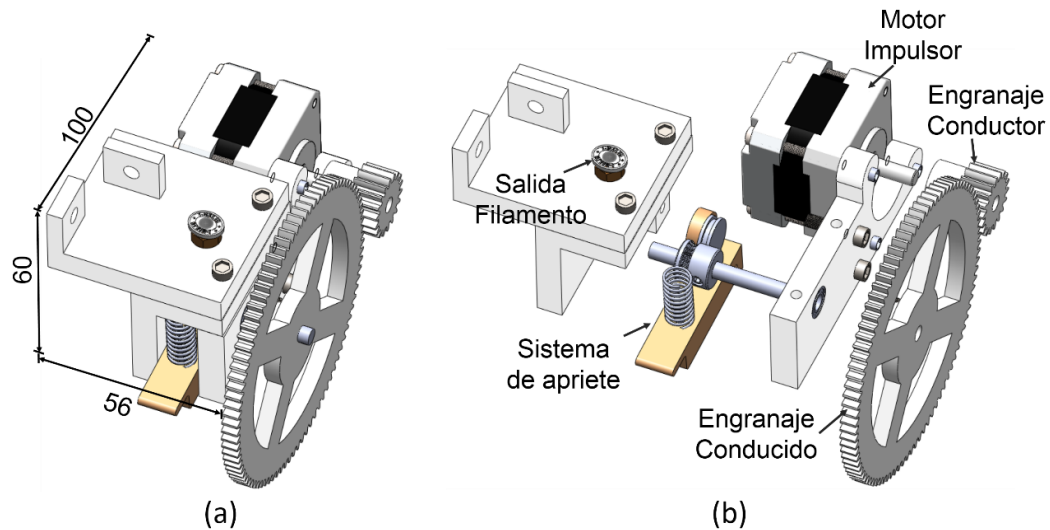


Figura 30. Diseño Final del Impulsor tipo Bowden para su implementación en Koala 3D (a) dimensiones generales en milímetros del impulsor armado (b) impulsor extrusionado indicándose las partes principales que lo componen.

c) Mecanismo desplazamiento extrusor

Antes de diseñar el mecanismo que trasladaba el extrusor se procedió a estimar las dimensiones del área de manufactura transversal en el cual este se iba a mover. Esta área comprendía una zona donde el extrusor manufacturaba una de las capas de la columna y otra zona extra donde purgaba material y realizaba el cero máquina (ver sección 2.4.4) al inicio y final de cada impresión. Considerando la sección transversal de la columna manufacturada de $30 \times 30 \text{ mm}^2$ más un 50% como zona extra, se obtuvo un área total de manufactura igual a $45 \times 45 \text{ mm}^2$ (ver Figura 31).

Basándose en un sistema cartesiano bidimensional, la parte impresora era compuesta por dos cuerpos móviles que se desplazaban perpendicularmente entre ellos para que el extrusor se posicionará en las coordenadas del área de manufactura transversal a la columna. Considerando un eje coordinado orientado en relación al área de manufactura, la Figura 32 muestra la disposición de los elementos que componían la parte impresora: un cuerpo móvil que tenía acoplado el extrusor (cuerpo móvil X) y que deslizaba sobre un cuerpo que se desplazaba en la base de la parte impresora (cuerpo móvil Y).

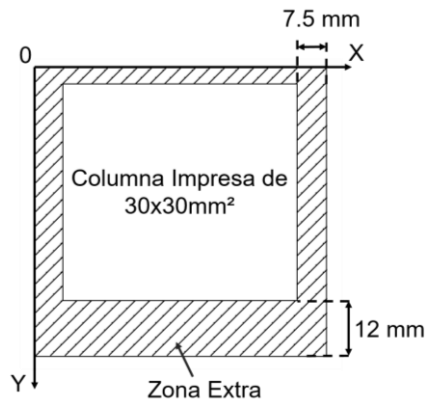


Figura 31. Área de manufactura transversal a la columna de 45x45cm. La zona blanca corresponde donde el extrusor imprime la columna y la zona achurada es para purgar material antes de comenzar la impresión.

Ambos cuerpos móviles y la base se compusieron de PLA, polímero liviano y con buena resistencia mecánica, utilizado como soporte de motores paso a paso del orden implementado [43] y para la manufactura de objetos con morfología compleja [44]. Además, a ambos cuerpos se les acoplaron bujes de bronce para que deslizaran de manera precisa sobre barras de acero de SAE1020 cuyo diámetro se sobredimensionó para evitar la deflexión causada por el peso de los cuerpos móviles.

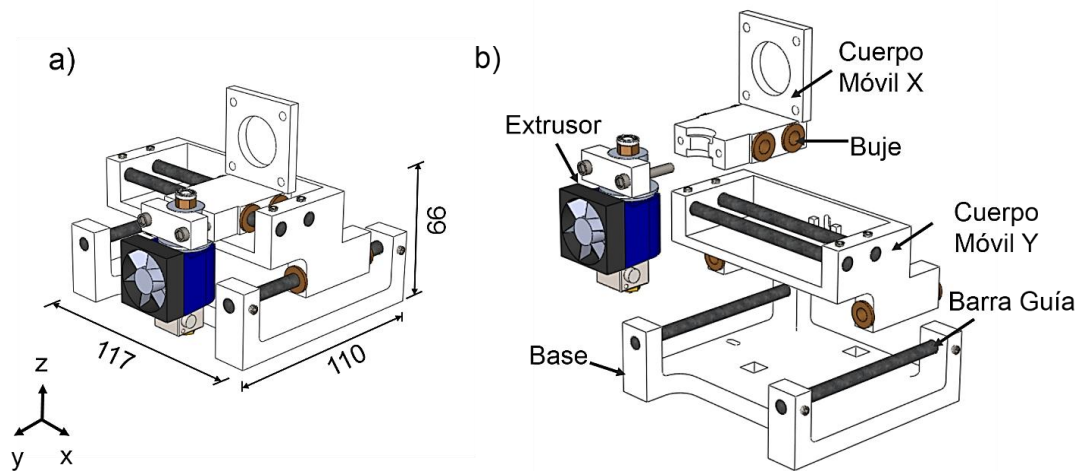


Figura 32. Diseño final chasis parte impresora considerando un sistema motriz engranaje cremallera (a) dimensiones generales en milímetros del sistema (b) extrusionado del sistema donde se indican las principales partes.

d) Sistemas motrices de la parte impresora: engranajes y cremalleras.

Al diseñarse la base y cuerpos móviles se implementaron dos sistemas motrices capaces de desplazar los cuerpos móviles X e Y. En la Figura 33 se muestra la disposición que tenían ambos sistemas en la parte impresora: (a) cuerpo móvil Y y (b) cuerpo móvil X. Cada uno se compuso por un engranaje recto acoplado al eje de un motor paso a paso por un prisionero y una cremallera adherida a la base de la parte impresora o al cuerpo móvil Y mediante un perno pasante.

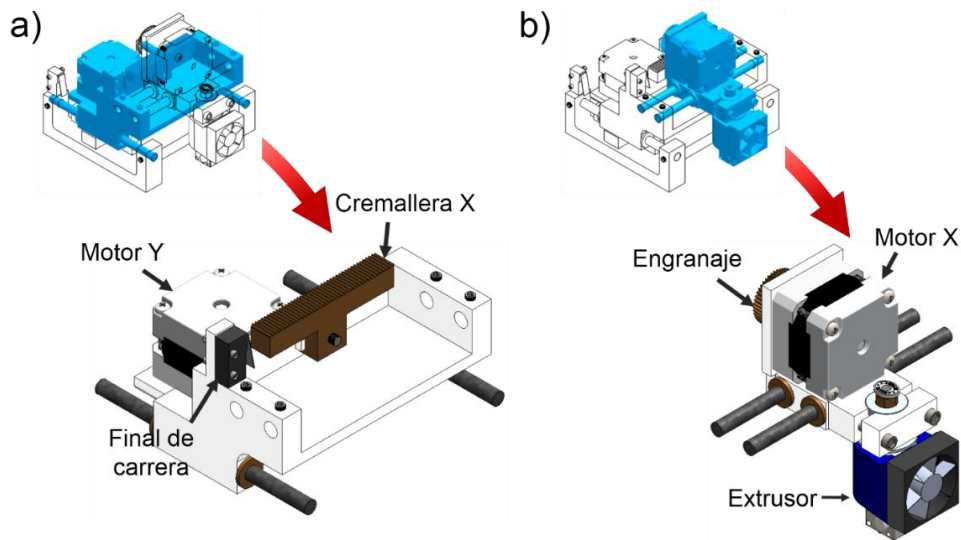


Figura 33. Disposición de los sistemas motrices de ambos cuerpos móviles encargados de posicionar el extrusor dentro del área de manufactura transversal a la columna. (a) Cuerpo móvil Y y (b) cuerpo móvil X.

La determinación de las características geométricas del engranaje recto y la cremallera se relacionaron con el diámetro del filamento a la salida de la boquilla del extrusor y de la resolución angular a la cual puede rotar el eje del motor paso a paso. Como se puede ver en la Figura 34 El engranaje de radio (R) al rotar un ángulo (θ) debía asegurar que el extrusor recorriera la distancia equivalente al diámetro del filamento extruido (S).

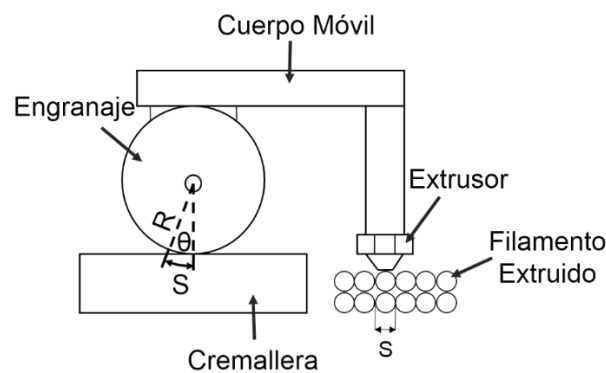


Figura 34. Esquema para analizar la resolución de movimiento necesario del cuerpo móvil, determinando el diámetro y modulo del engranaje

Se estimó la utilización de un motor paso a paso tipo Nema de resolución angular de 1.8° en una modalidad de paso completo, o full step, tal de conservar el torque máximo admisible (ver sección 2.4.5). Al considerarse esta resolución angular y aplicando la ecuación 3.1 (ver sección 4.2.1) se obtuvo un engranaje de radio igual a 13mm, valor máximo admisible para apilar filamento extruido de 0,4mm sobre el área de manufactura transversal a la columna.

Como se puede ver en la Tabla 6, el modulo del engranaje y cremallera seleccionado fue igual a 0.5 de tal manera de propiciar que el mayor número de dientes estuviera en contacto entre ambos

elementos. El material electo para su posterior fabricación fue bronce fosforado SAE 64, este material es ampliamente utilizado para la confección de elementos mecánicos que están sometidos a fricción constante [45].

Tabla 6 Características del engranaje seleccionado como parte del sistema motriz de la parte impresora.

Nombre	Valor
Numero de Dientes	52
Modulo	0.5
Material	Bronce SAE 64

e) Finales de carrera mecánicos.

Como se mencionó anteriormente el extrusor se posicionaba al inicio y final de cada impresión en un punto de referencia llamado cero máquina. Para detectar cuando el extrusor estaba en esa posición se colocaron interruptores mecánicos al inicio del recorrido de cada cuerpo móvil (Figura 35). El cuerpo móvil al hacer contacto con este interruptor manda una señal al controlador de la impresora para indicar que la punta del extrusor se encontraba en la posición (0,0) del área de manufactura.

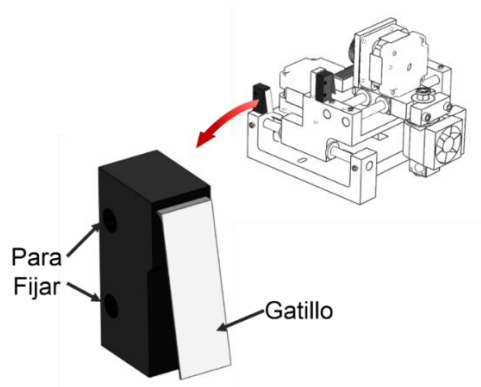


Figura 35. Disposición de los finales de carrera en la parte impresora

f) Determinación torque requerido y selección motor paso a paso para mover extrusor en el área de manufactura transversal a la columna.

La determinación del torque necesario para mover uno de los cuerpos móviles se hizo realizando un análisis dinámico cuando el cuerpo presentaba la mayor tasa de variación de la cantidad de movimiento lineal a lo largo de su trayectoria [46] . Al observar el funcionamiento de una impresora 3d de escritorio típica que manufactura mediante modelado por deposición fundida, el instante de mayor exigencia se da al comienzo de cada movimiento cuando la velocidad pasa de 0 m/s a 0.1 m/s en 0.1 s, es decir, el extrusor tiene una aceleración lineal de 1 mm/s².

Para facilitar el control se utilizó el mismo motor en ambos movimientos, por lo que para la determinación del torque requerido se consideró el cuerpo móvil que más elementos trasladaba desde un punto a otro. Como se puede ver en la Figura 36 el motor más solicitado era el motor que trasladaba al cuerpo móvil Y, debido que este debía mover sus componentes sumado a los componentes del cuerpo móvil X. Basándose en el diseño y especificaciones señaladas en la sección anterior se estimó que la masa que debía trasladar el motor del cuerpo móvil Y era igual a 1 kg (ver tabla Tabla 7).

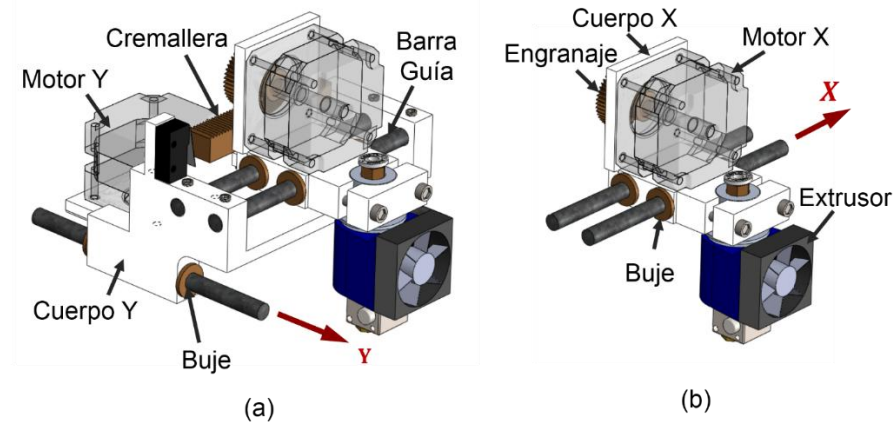


Figura 36. Partes que debe trasladar cada motor del sistema motriz de la parte impresora (a) el motor adjunto al cuerpo móvil Y debe movilizar el extrusor, 8 bujes, 2 engranajes, cuerpo móvil X e Y, 2 barras de acero, una cremallera y su propia masa (b) el motor adjunto al cuerpo móvil X debe desplazar el extrusor, 4 bujes, un engranaje, el cuerpo móvil X y su propio peso.

Tabla 7 Estimaciones de pesos parte impresora que se deben trasladar para movilizar el extrusor dentro del área transversal a la columna.

Nombre piezas	Tipo de material	Cantidad	Peso total estimado (gm)
Cuerpo Y	PLA	1	25
Cuerpo X	PLA	1	25
Cremallera	Bronce	2	100
Engranaje	Bronce	2	100
Extrusor	Varios	1	50
Motor paso a paso	Varios	2	700
Total			1000

La ecuación 3.2 muestra la equivalencia entre la tasa de variación del momento lineal del cuerpo móvil Y (\dot{M}_{GY}) y la fuerza que genera esa tasa de cambio (F_{GY}). Al reemplazar la aceleración máxima que produciría el mecanismo al comienzo de cada trayectoria (\dot{v}) y la masa (m) que se debía trasladar en la ecuación 3.2, se obtuvo la fuerza que debía proporcionar el motor acoplado al cuerpo móvil Y (F_{GY}), cuyo resultado es presentado en la ecuación 3.3, igual a 1N.

$$M_{GY} = F_{GY} \quad (3.2)$$

$$F_{GY} = m\dot{v} \quad (3.3)$$

Esta fuerza era ejercida por el engranaje acoplado al motor al engranar sobre una cremallera, entonces el torque mínimo que debe ejercer el motor para mover el cuerpo móvil Y viene dado por la ecuación 3.4. El torque mínimo debía ser igual a 0.023 Nm reemplazando la fuerza calculada y radio del engranaje.

$$T_{GY} = R_G \times F_{GY} \quad (3.4)$$

Finalmente las características del motor seleccionado se presentan en la Tabla 8, este fue un Nema 16 que proporcionó un torque de 0.17 Nm a 12 V y 2 A. Si bien este valor fue casi ocho veces el valor que se calculó, se debía tener en cuenta que la formulación utilizada no consideraba las pérdidas de roce ni tampoco la falta de paralelismo entre los ejes que guiaban el movimiento, situación que se podía producir al manufacturar el prototipo. Además el motor no se operó a su máxima capacidad, ya que se utilizó a un 50% de la potencia sugerida por el fabricante para no trabajar a la máxima corriente que soportan los controladores de los motores paso a paso y en una modalidad de 1/8 por paso (ver sección 2.4.5) tal de aumentar la resolución de movimiento del extrusor en el área transversal de manufactura.

Tabla 8 Características motor Nema 16

Nombre	Valor
Ángulo de paso	1.8°
Cantidad de Fases	2
Torque Máximo	0.18 N.m
Peso	0.2 kg

Parte trepadora

- a) Diseño preliminar del sistema de sujeción superior e inferior.

El diseño del mecanismo de sujeción se basó en el funcionamiento de una prensa mecánica de banco, como la que se muestra en la Figura 37a. Este tipo de prensa se componen de dos mordazas paralelas, donde una de ellas se encuentra fija a la base de la prensa y la otra se mueve debido a la rotación de un tornillo sinfín, el cual aumenta o disminuye la distancia entre ambas mordazas. Una de las ventajas importantes de este mecanismo es que no es necesario estar aplicando una fuerza externa al sistema para mantener presionado el objeto entre las mordazas debido a que la tuerca traba al tornillo sinfín impidiendo su deslizamiento axial.

Como se puede ver en la Figura 37b, el mecanismo de sujeción del prototipo se compuso inicialmente de una mordaza fija, una móvil y un sistema motriz que generaba el movimiento relativo entre ambas mordazas. El sistema motriz constaba de dos motores ubicados uno a cada costado de la mordaza fija, a los cuales se les acoplaron tornillos sinfín que roscaban sobre tuercas

unidas a la mordaza móvil. Al girar ambos tornillos sinfín en el mismo sentido provocaban que el mecanismo prensara o aflojara la columna por medio del desplazamiento de la mordaza móvil. Ambas mordazas estaban compuestas de PLA.

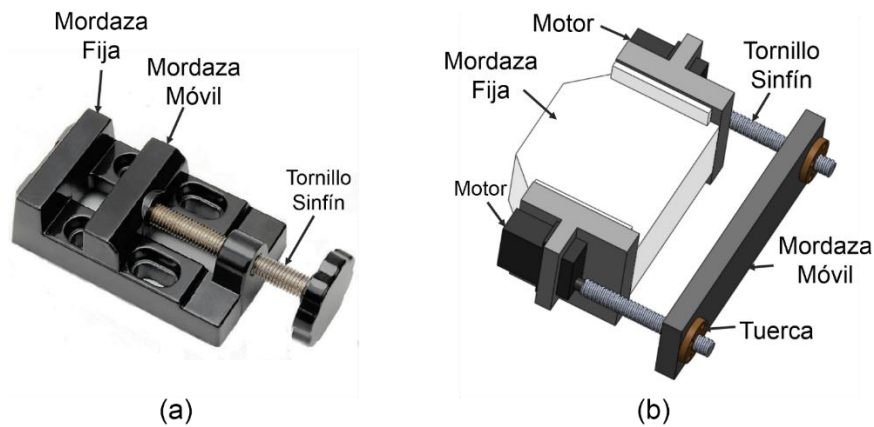


Figura 37. Diseño preliminar del mecanismo de sujeción basado en prensa mecánica de banco. Esta se compone de un sistema motriz compuesto por un tornillo sinfín y una tuerca acoplados a dos mordazas una fija y otra móvil. Si bien tiene similitudes ambos sistemas, (a) la prensa de banco se acciona manualmente y la tuerca esta acoplada a la mordaza fija mientras que en (b) el sistema diseñado es automatizado y la tuerca se adjuntó a la mordaza móvil.

La mordaza fija en comparación con la móvil fue diseñada de mayor envergadura debido a que además de servir de soporte para el sistema motriz de la prensa, también debía considerar el acople del mecanismo de elevación. Como se mencionó en la sección 4.2.1, el mecanismo de elevación estaba compuesto por un tornillo sinfín acoplado a un motor más su respectiva tuerca. El tornillo sinfín se supuso prefabricado y era del tipo trapezoidal con un diámetro de 8 mm y largo de 200 mm.

En la Figura 38a y b se muestra el diseño preliminar de las mordazas fijas de las prensas superior e inferior, respectivamente. El diseño de la mordaza fija de la prensa inferior contemplaba el acople del motor junto al tornillo sin fin y el empotramiento de 3 barras de acero plata² de diámetro igual a 8 mm. La prensa superior se diseñó tal que la tuerca se acoplara mediante pernos pasantes además de estimar extrusiones negativas de diámetro 16 mm y altura 20 mm para el calce de bujes de bronce necesarios para que los ejes de la prensa inferior deslizaran de manera precisa. Ambas mordazas poseían extensiones para unir el sistema motriz de la prensa mediante pernos pasantes y tuercas.

² barras ampliamente utilizadas en la manufactura de impresoras 3d.

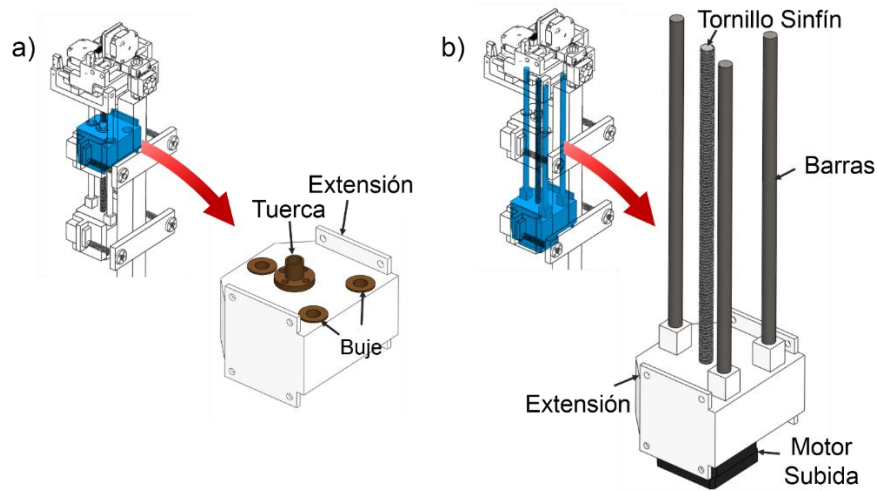


Figura 38. Diseño preliminar de las mordazas fijas de la prensa superior e inferior considerando el mecanismo de elevación del prototipo. En (a) la mordaza fija de la prensa superior se acoplaron tuerca y bujes mientras que en (b) la prensa inferior se adhirió el motor paso a paso junto al tornillo sinfín y barras guías.

El sistema motriz se encontraba embebido en una pieza de PLA que además hacía de interfaz entre la prensa móvil y la fija (ver Figura 39a). Esta pieza sobredimensionada consideraba el acople del motor mediante pernos y el empotramiento de dos barras encargada de sostener y guiar el movimiento de la mordaza móvil.

En la Figura 39b Se presenta un diseño preliminar de la mordaza móvil, el cual tomaba en cuenta la unión de cuatro bujes de bronce y dos tuercas, elementos que se acoplaban a las barras de acero y tornillos sinfín ubicados en ambos soportes del sistema motriz de la prensa. La tuerca y tornillo sinfín fueron los mismos utilizados en el mecanismo de elevación.

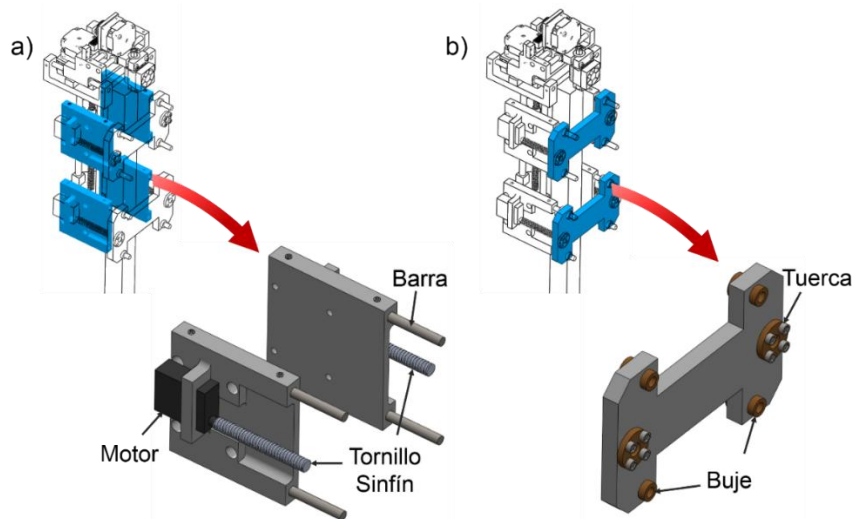


Figura 39. Piezas del diseño preliminar que componen ambos mecanismos de sujeción. En (a) se muestra la base del sistema motriz la cual permite el acoplamiento del motor acoplado al tornillo sinfín y las barras que guían el movimiento de la (b) mordaza móvil.

El espesor de la mordaza móvil se dimensionó considerando las fuerzas a las cuales estaba sometida al momento de ser prensada a la columna, asumiendo que las superficies de contacto se encuentran paralelas entre sí. Como se puede ver en la Figura 40 los motores al jalar con una fuerza F_s a la mordaza móvil contra la columna generaban una fuerza normal F_n ubicada al centro de la pieza. Esta normal debía generar fuerza de fricción F_f entre la mordaza móvil y la columna a lo menos igual al peso F_w del prototipo para evitar que la prensa se soltara y el prototipo cayera por efecto de la gravedad, esta equivalencia es presentada en la ecuación 3.5.

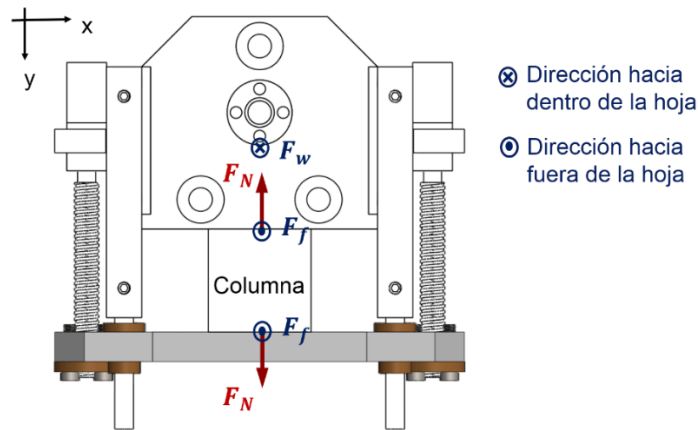


Figura 40. Vista de planta del diseño preliminar de la prensa donde se presentan las fuerzas a las que está sometida la mordaza móvil al ser presionada contra la columna.

Como se muestra en la ecuación 3.6, por definición, la fuerza de fricción es proporcional a la fuerza normal y el coeficiente de roce (μ). Esta igualdad al reemplazarla en la ecuación 3.5 permitió la obtención de la ecuación 3.7, logrando relacionar el peso del prototipo F_w y la fuerza normal F_n .

$$F_w = 2F_f \quad (3.5)$$

$$F_f = \mu \times F_n \quad (3.6)$$

$$F_w = 2(\mu \times F_n) \quad (3.7)$$

Se estimó que el prototipo tenía una masa de 7 kg (ver Tabla 9) y que el coeficiente de roce entre ambas superficies de PLA era 0.3. Debido a que no se tenía el coeficiente de roce de ambas superficies en contacto se promediaron los resultados obtenidos en el documento [47] el cual estudia diversos polímeros. Reemplazando estos valores en la ecuación 3.7 se obtuvo una fuerza normal igual a 166.6 N.

Simplificando la configuración de fuerza como una viga soportada sobre dos apoyos simples en sus extremos y la fuerza normal al centro, el esfuerzo máximo (S_b) viene dado por las ecuaciones

3.8 [48], donde t es el espesor, l el ancho y w el alto de la mordaza móvil. Si se despeja el espesor se puede obtener la ecuación 3.9.

Tabla 9 Estimaciones de peso prototipo para poder estimar motores de la parte trepadora.

Nombre piezas	Tipo de material	Cantidad	Peso total estimado (gm)
De Tabla 7	Varios	1	1000
Base impresora	PLA	1	100
Motor Impulsor	Varios	1	400
Partes plásticas	PLA	4	3500
Servomotor	Varios	2	200
Bujes	Bronce	11	300
Ejes guías	Acero	15	300
Motor Z	Varios	1	500
Tornillos de Potencia	Acero	5	200
Parte electrónica	Varios	1	500
		Total	7000

$$S_b = \frac{3F_n l}{2wt^2} \quad (3.8)$$

$$t = \sqrt{\frac{3F_n l}{2wS_b}} \quad (3.9)$$

Se obtiene un espesor t de 2 mm si se reemplazan los valores de la tensión de fluencia y módulo de flexión del PLA [49] en la ecuación 3.10, valor mínimo admisible para que no falle estructuralmente la mordaza móvil. Aplicando un factor de seguridad de 5 el espesor se dejó de 10 mm, anticipándose que cuando se manufacture la pieza no será totalmente sólida y presentará anisotropía en sus propiedades mecánicas³.

Luego de finalizar parte importante del diseño de Koala 3D, mediante un programa CAD se realizó un estudio cinemático del prototipo en operación, pronosticándose movimientos indeseados que podrían perjudicar la calidad del producto manufacturado. Estos movimientos correspondían a oscilaciones producto del desplazamiento del extrusor en la dirección X (Figura 41a) e Y (Figura 41b) durante el proceso de manufactura. Las oscilaciones se incrementaban si la prensa superior se encontraba cerca de la superior debido a que la sujeción del prototipo se concentraba en un extremo [50].

³ Proyectando que la pieza será manufacturada mediante impresión 3D.

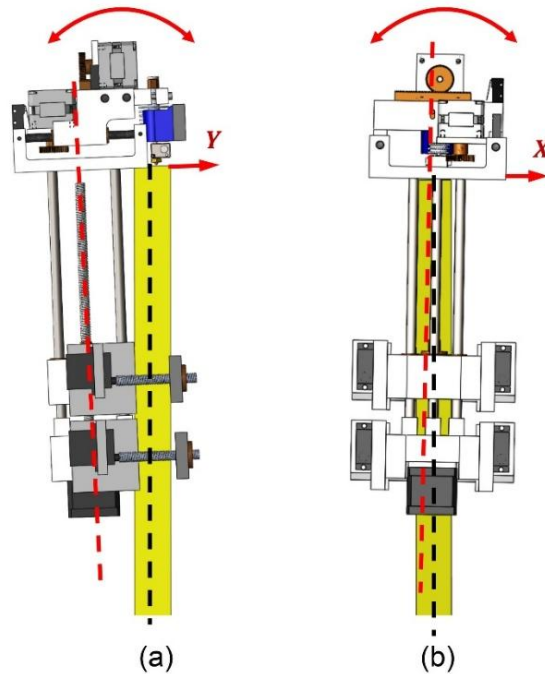


Figura 41. Oscilaciones producto del movimiento del extrusor en una determinada dirección al manufacturar la columna impresa. Considerando el eje coordenado del área de manufactura, en (a) se ve la oscilación en la dirección Y y en (b) se muestra la oscilación en X.

b) Diseño final del sistema de sujeción superior e inferior.

Para mejorar el primer diseño se implementó una pieza, denominada como carro auxiliar, para dar un tercer punto de apoyo al prototipo y evitar las oscilaciones en la dirección Y. Su diseño era similar al de las prensas pero sin el sistema motriz y se encontraba en la región superior de la parte trepadora en contacto directo con la parte impresora del prototipo (ver Figura 42). Además, la pieza permitía el acople del impulsor tipo Bowden y un contrapeso.

El contrapeso tenía como función alinear el centroide del prototipo con el eje longitudinal de la columna, de manera de evitar el pandeo de esta a medida que se iba manufacturando. Este contrapeso se compuso de un trozo de acero de 600 gramos embebido en una pieza de PLA, ubicándose a una distancia de 200 mm del origen del área de manufactura (ver sección 4.2.2). El cálculo de la distancia se realizó mediante un programa CAD de forma que el centro de masa del prototipo se mantuviera al centro de la columna.

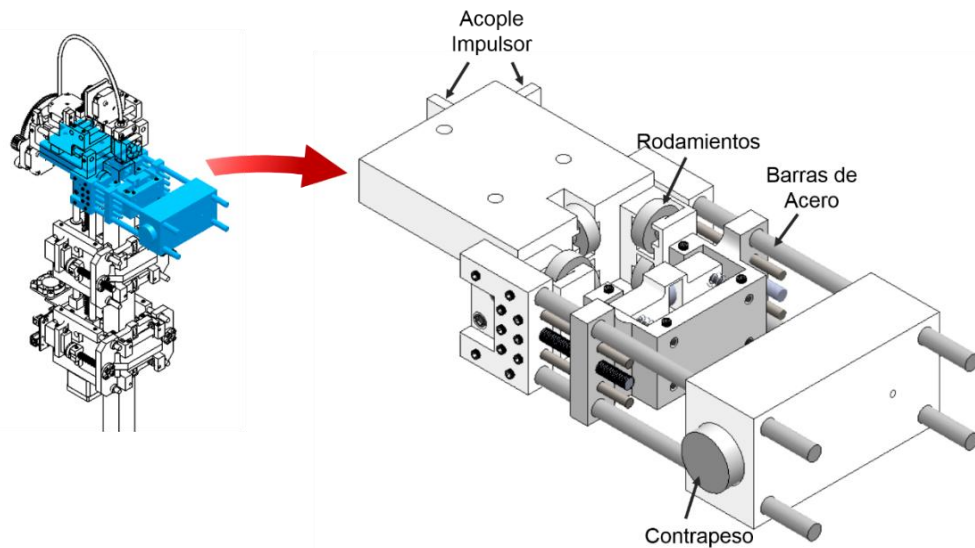


Figura 42. Diseño final del carro auxiliar implementado para eliminar la oscilación en la dirección Y. Esta pieza además permite el ensamble del impulsor en su parte posterior y un contrapeso en su parte anterior.

Luego se modificaron las mordazas fijas de ambas prensas aumentando el área de contacto entre el prototipo y la columna para restringir la oscilación en el eje X. Si bien esto propiciaba que el prototipo estuviera totalmente solidario a la columna cuando este fuera trepando, la fricción generada entre ambas superficies en contacto haría necesaria la implementación de un motor de mayor envergadura para que el prototipo subiera. La solución para reducir la fricción generada entre ambas superficies fue agregar rodamientos radiales a las mordaza fija superior (Figura 43a) e inferior (Figura 43b).

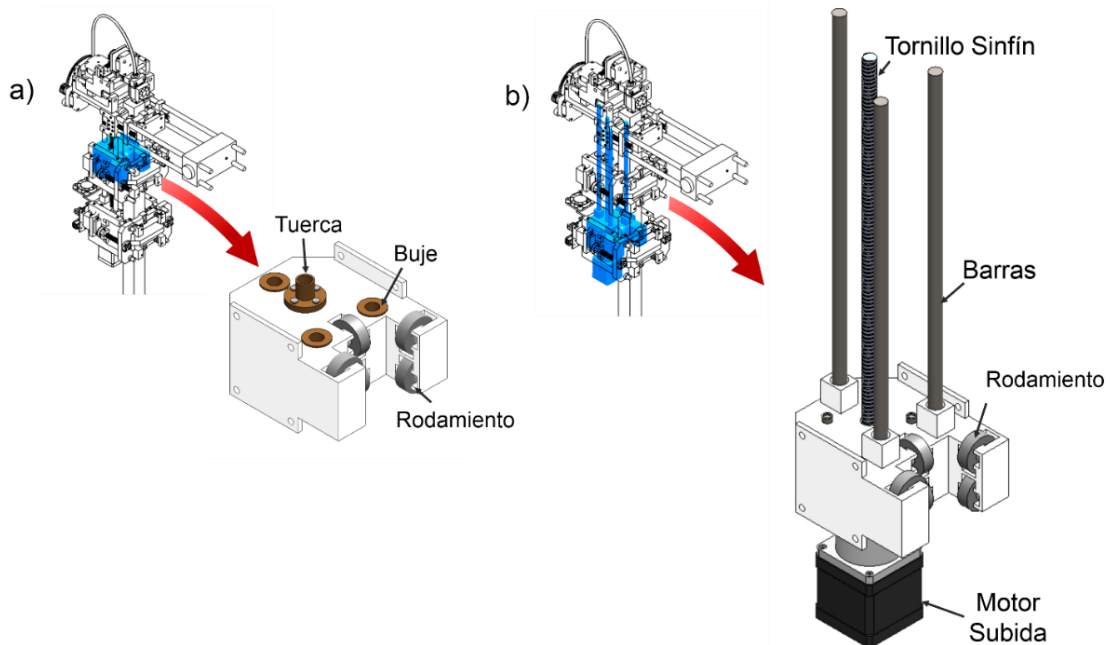


Figura 43. Rodamientos que mantienen solidario el prototipo a la columna y disminuyen las oscilaciones del prototipo en ejes X e Y. Estos se ubican en (a) mordazas fijas superior y (b) mordaza fija inferior.

En las bases de los sistemas motrices del sistema de sujeción se agregó una escuadra para mantener el sistema lo más alineado posible entre sí (ver Figura 44(a)). Al igual que en las mordazas fijas, en las móviles se agregaron rodamientos radiales pero sobre sistemas retractiles accionados por resortes, cuya función era cambiar la modalidad del mecanismo de sujeción de prensa a carro (ver Figura 44(b)).

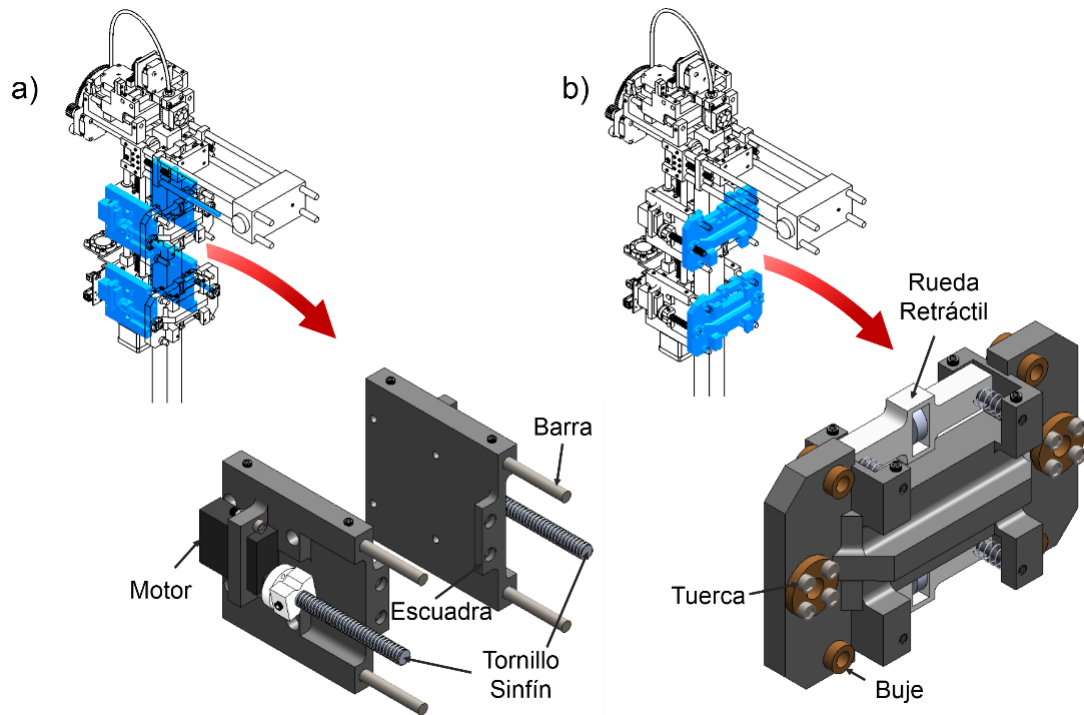


Figura 44. Diseño final de las (a) bases del sistema motriz y (b) mordazas móviles.

En la Figura 45a) se observa el sistema de sujeción superior cortado por un plano para presentar como se comporta el sistema retráctil cuando está en modo prensa Figura 45(b) y en modo guía Figura 45(c). Al encontrarse el prototipo manufacturando la columna el sistema está sujeto por el sistema de sujeción superior (modo prensa) mientras el sistema de sujeción inferior se encuentra guiando el movimiento (modo guía). Solo cambian de modo al ocurrir la transición ya que el sistema de sujeción superior debe posicionarse al inicio de su recorrido para comenzar un nuevo proceso de impresión (ver sección 4.1.3)

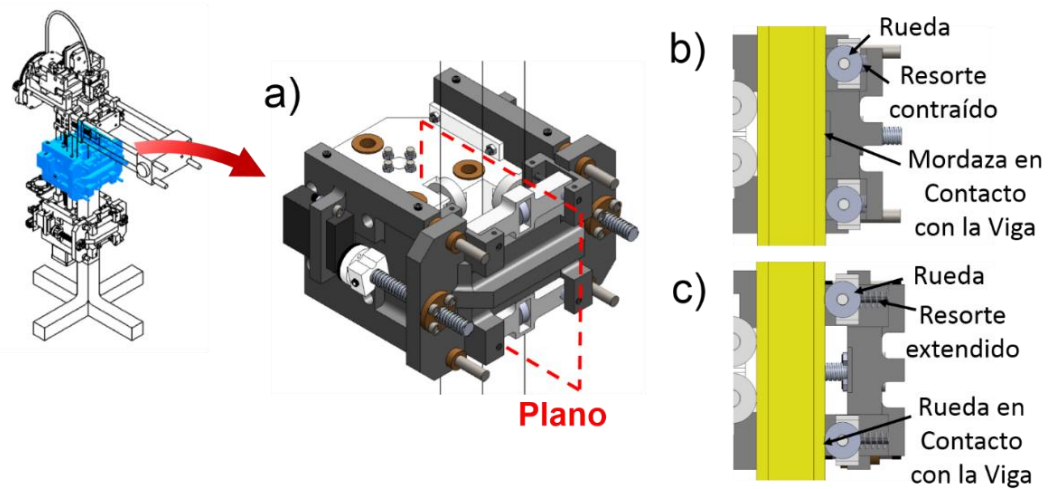


Figura 45. Funcionamiento del sistema retráctil en el mecanismo de sujeción. (a) Vista isométrica mecanismo de sujeción, (b) vista en corte del sistema retráctil en modo prensa, (c) vista en corte del sistema retráctil en modo guía.

Las mordazas al funcionar como carro (prensa/carro inferior y carro auxiliar, en la figura anterior) debía propiciar que el prototipo en operación estuviera lo más vertical posible respecto a la viga. Esto dependía directamente de la fuerza que aplicaban los resortes del sistema retráctil sobre la columna impresa. Para la selección del resorte empleado, primero se realizó un análisis de las fuerzas que interactuaban sobre el prototipo cuando este se encontraba en operación (ver Figura 46).

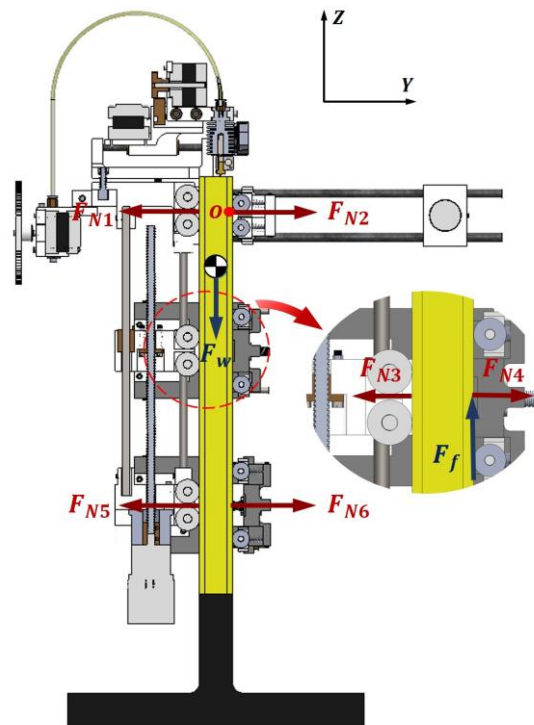


Figura 46. Vista lateral que muestra las fuerzas que interactúan sobre el diseño final del prototipo cuando su prensa/carro superior está sosteniendo todo el sistema.

Para que el sistema permaneciera estático en su posición se impuso que la sumatoria de fuerzas y torques fueran iguales a cero. La ecuación 3.10 es la sumatoria de fuerzas en el eje Y, de la cual se obtuvo una relación entre todas las fuerzas normales (F_N) ejercidas por el carro auxiliar, prensa/carro superior e inferior. En la ecuación 3.11, al realizar sumatoria de fuerzas en el eje Z se relacionó el peso del prototipo F_w con la fuerza de roce F_f que ejercía la prensa/carro superior sobre la viga. Al sumarse los torques sobre el punto O se obtuvo la ecuación 3.12, donde la distancia desde la fuerza al punto O se denomina con la letra “d” cuyo subíndice indica a que fuerza corresponde.

$$\sum F_y = 0 \rightarrow -F_{N1} + F_{N2} - F_{N3} + F_{N4} - F_{N5} + F_{N6} = 0 \quad (3.10)$$

$$\sum F_z = 0 \rightarrow -F_w + F_f = 0 \quad (3.11)$$

$$\sum M_o = 0 \rightarrow F_w d_w + F_{N4} d_4 + F_{N6} d_6 - (F_{N5} d_5 + F_{N3} d_3) = 0 \quad (3.12)$$

Al intentar resolver las ecuaciones se observó que se tenían más incógnitas que ecuaciones, por lo que se estaba en presencia de un sistema hiperestático. Entonces, para poder resolver este sistema de ecuaciones se tuvo que realizar algunas suposiciones con el objetivo de reducir el número de incógnitas al mínimo posible:

- 1) El carro superior poseía unas ruedas retractiles las cuales se podían regular modificando la longitud de sus resortes, ésta distancia conocida multiplicada por la constante del resorte permitió estimar la fuerza F_{N2} .
- 2) Al ser regulable la Fuerza F_{N2} esta se pudo ajustar de manera que se cumpliera que $F_{N2} = F_{N1}$.
- 3) Las fuerzas normales estaban alineadas con su fuerza contraria y se encontraban aplicadas al centro de cada prensa/carro. Por lo tanto F_{N1} y F_{N2} ; F_{N3} y F_{N4} ; F_{N5} y F_{N6} tenían la misma distancia al punto O y esta distancia se midió directamente del diseño del prototipo.
- 4) La fuerza F_f se relacionó con la fuerza normal F_{N4} por el coeficiente de roce μ . Este coeficiente se asumió considerando que se tenía en contacto PLA con PLA.
- 5) Se utilizó el mismo resorte en las tres prensas/carros. Cada sistema contenía cuatro resortes, dos por cada rueda retráctil.

Al considerarse lo anterior fue posible reescribir las ecuaciones 3.10, 3.11 y 3.12 en la forma de las ecuaciones 3.13 y 3.14, donde k , x_2 y x_6 son la constante del resorte y las variaciones de la longitud de los resorte correspondiente a las normales F_{N2} y F_{N6} , respectivamente.

$$-F_{N3} - F_{N5} = 2(4kx_2) - \frac{F_w}{\mu} \quad (3.13)$$

$$F_{N5} d_5 + F_{N3} d_3 = F_w d_w + \frac{F_w}{\mu} d_4 + 4kx_6 \quad (3.14)$$

A pesar de las suposiciones realizadas aún se tenían dos ecuaciones para la obtención de tres incógnitas: la constante del resorte k y las fuerzas normales F_{N3} y F_{N5} . Por lo tanto la resolución del sistema se hizo mediante un proceso iterativo donde se especificaba un k correspondiente a un resorte disponible en el mercado y luego se verificaban el signo de las fuerzas resultantes, si estos valores daban menor o igual a cero implicaba que la prensa/carro estaría siendo jalada por la viga o viceversa, situación que es imposible que ocurra considerando el sistema implementado.

El sistema de ecuaciones se resolvió para dos posiciones del extrusor (ver Figura 47). Estas posiciones fueron seleccionadas debido a que en ambas el centro de masa del prototipo tomaba la mayor distancia al eje longitudinal de la columna, longitud representada por d_w en la ecuación 3.14.

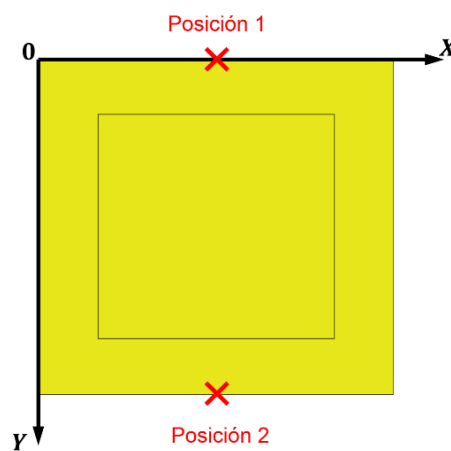


Figura 47. Vista de planta de la viga impresa donde se muestran en rojo las posiciones del extrusor que se utilizaron para determinar las características mecánicas de los resortes de las prensas/carros.

Las variaciones de la longitud de los resortes del carro auxiliar y prensas/carros fueron equivalentes en ambas posiciones anteriormente descrita. Estos valores se obtuvieron del diseño CAD del prototipo (ver Tabla 10).

Tabla 10 Variación en la longitud de los resortes cuando Koala 3D está manufacturando la columna.

Nombre	Símbolo	Valor (mm)
Variación de la Longitud de los resortes ubicados en el carro auxiliar	x_2	3
Variación de la Longitud de los resortes ubicados en la prensa/carro superior	x_4	8
Variación de la Longitud de los resortes ubicados en el prensa/carro inferior	x_6	10

Se observó que al reemplazar una constante del resorte entre los valores 100 a 200 en las ecuaciones 3.14 y 3.15, se cumplía el criterio de selección anteriormente descrito para ambas posiciones extremas del extrusor. Un resorte de acero alemán roslau con características presentadas en la Tabla 11 presentaba una constante del resorte (k) de 176 N/m, el cual se verifica aplicando la ecuación 3.15.

Tabla 11 Características del resorte acoplado a las ruedas retractiles [51]

Nombre	Símbolo	Valor
Módulo de Cizalladura	G	79 GPa
Diámetro Resorte	C	0.01 mm
Diámetro del Alambre	d	5E-3 m
Número de espiras activas	N	4
Longitud del Resorte	L_r	0.015 m

$$k = \frac{d^4 G}{8D^3 N} \quad (3.15)$$

- c) Determinación del torque requerido y selección del motor de las prensas/carros y mecanismo de elevación.

La determinación del torque necesario para mover verticalmente el prototipo se realizó considerando una simplificación del sistema tornillo sinfín – tuerca como un cuerpo con un peso F_w (ver Tabla 12) deslizando por un plano inclinado [52], como se presenta en la Figura 48.

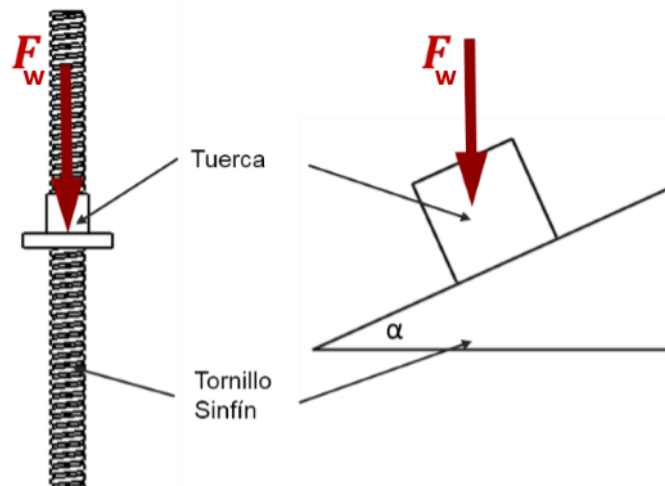


Figura 48. Simplificación sistema tornillo sinfín – tuerca para estimar el torque necesario para el funcionamiento del mecanismo de elevación de Koala 3D.

El tornillo sinfín que se implementó fue de acero plata y poseía un tipo de rosca acme trapezoidal. El valor del ángulo de inclinación del plano inclinado (α) dependía directamente del avance y el diámetro medio del tornillo sinfín, estos parámetros se presentan en la Tabla 12.

Tabla 12 Parámetros utilizados para el cálculo del torque requerido para elevar el sistema.

Nombre	Símbolo	Valor
Diámetro medio del tornillo	d_m	0.007 m
Avance del tornillo por vuelta	l_p	0.008 m
Ángulo de la rosca	2α	29°
Peso de diseño prototipo	F_w	7 kg

Se realizó una sumatoria de fuerzas en una situación de equilibrio sobre la simplificación presentada en la Figura 48 y tomando en cuenta las características del tornillo se pudo concebir la ecuación 3.16, donde T es el Torque ejercido por el motor y f la fuerza de roce generada por el contacto entre la tuerca de bronce y el tornillo de acero, cuyo coeficiente de fricción se consideró igual a 0.16 [53].

$$T = \frac{F_w d_m}{2} \left(\frac{l_p + \pi f d_m \sec \alpha}{\pi d_m - f l \sec \alpha} \right) \quad (3.16)$$

Dependiendo de cual prensa mantenga al prototipo adherido a la viga se tendrán distintos valores de la Fuerza F_w . El valor máximo se produjo cuando la prensa/carro superior se encontraba sujetando todo el sistema, tal como se presenta en la Figura 49. Se estimó que la masa que debía subir el motor paso a paso en esta condición fue de 7 kg (ver Tabla 9), esto contemplaba, la masa del contrapeso, la parte impresora del prototipo, el impulsor de material de manufactura y la parte trepadora excluyendo la prensa/carro superior. Al reemplazarse los valores especificados en la ecuación 3.16, se obtuvo un valor de torque mínimo admisible igual a 0.16 N.m.

Luego de calculado el torque se procedió a la selección del motor que iba acoplado al tornillo sinfín. Este fue un motor paso a paso Nema 17 adjunto a un conjunto reductor 5 es a 1, cuyo torque máximo era de 1.68 Nm (ver Tabla 13). Este torque está sobredimensionado debido a la formulación ideal de la ecuación 3.17, la cual no considera pérdidas por roce ni desalineaciones de las barras guías al momento de la construcción. Además, se estimó que al momento de la implementación del prototipo, el motor no operaría a su máxima potencia ya que funcionaría en modalidad de micropasos a una tasa de 1/16 (ver sección 2.4.5).

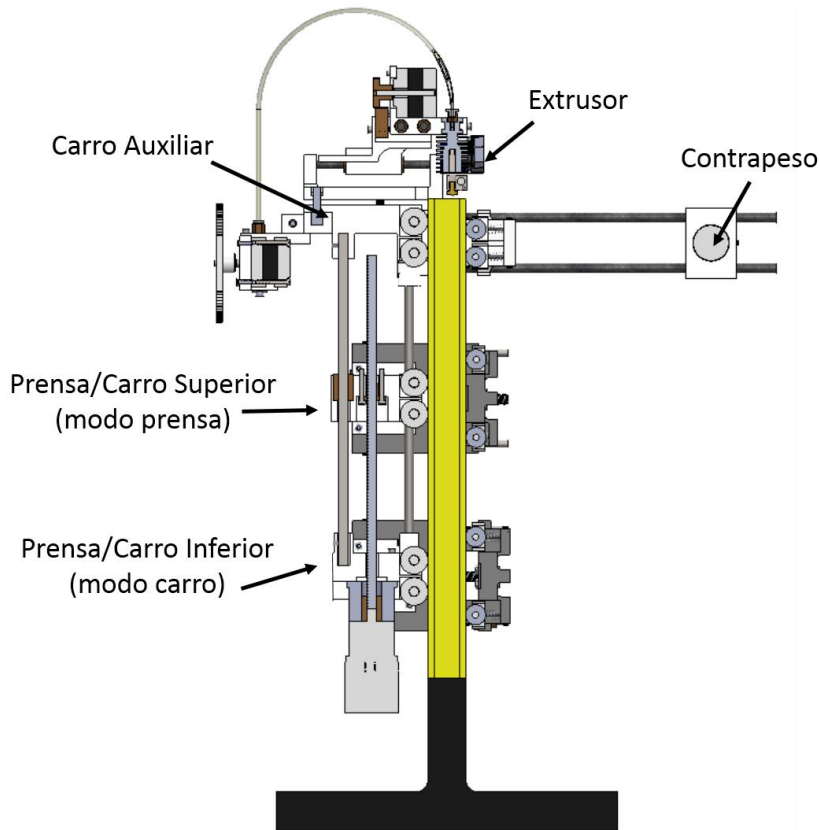


Figura 49. Impresora cuando se encuentra manufacturando la columna impresa, esta es la condición crítica utilizada para la selección del Motor Z.

Tabla 13 Características motor Nema 17 con engranaje reductor

Nombre	Valor
Ángulo de paso	1.8°
Cantidad de Fases	2
Relación de engranaje	5:1
Torque Máximo	1.68 Nm
Peso	0.6 kg

Se escogieron servo motores para accionar el sistema motriz de ambas prensa. Si bien este tipo de motor no presentaba el grado de precisión que tiene un motor paso a paso, es más liviano a igual potencia. Lo anterior lo hace adecuado para la aplicación.

En la Figura 50 se presentan dos diagramas de fuerzas: del sistema de sujeción completo y el otro de la prensa móvil. La diferencia entre ambos es que en el primero son consideradas como fuerzas internas la de los servos (F_f) y en el segundo, como externas. Se puede observar que al funcionar el sistema de sujeción como prensa, los servos aplican una fuerza de fricción (F_f) sobre la viga

impresa evitando que el prototipo cayera por su propio peso F_w ⁴ expresado matemáticamente, se debía cumplir la condición presentada en la ecuación 3.17 la cual correspondía a la sumatoria vectorial de fuerzas en el eje z igualada a cero.

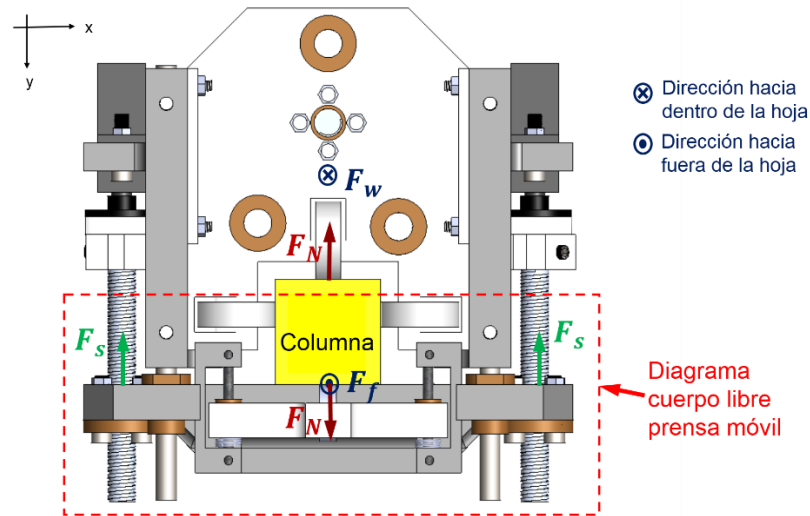


Figura 50. Diagrama de cuerpo libre del sistema de sujeción y la mordaza móvil de la prensa/carro cuando está afirmando todo el prototipo. La fuerza de los servos solo se encuentra representada cuando se analiza solo la mordaza móvil

$$F_w = F_f \quad (3.17)$$

La estimación de la fuerza de roce se hizo en base a la fuerza normal F_n que ejerce la prensa sobre la viga y el coeficiente de roce entre la prensa y la viga (μ), como se muestra en la ecuación 3.18. Ambos materiales que estaban en contacto fueron considerados como PLA con un coeficiente de roce igual⁵ a 0.3. La fuerza normal ejercida por la prensa se pudo relacionar con la que ejercen los servo motores (F_s) realizando una suma vectorial de las fuerzas en la dirección Y, como se presenta en la ecuación 3.19.

$$F_f = \mu \times F_n \quad (3.18)$$

$$2 F_s = F_n \quad (3.19)$$

Reemplazando las ecuaciones 3.17 y 3.18 en la ecuación 3.19 se obtiene un valor de F_s equivalente a 114.4 N. El mecanismo con que el servo motor accionaba la prensa se compuso de un tornillo sinfín con una tuerca cuya rosca fue del tipo ACME trapezoidal, el mismo sistema implementado para accionar el movimiento en el eje Z. Al reemplazar el valor obtenido de la fuerza F_s en la

⁴ Se consideró la situación crítica de la Figura 49.

⁵ Valor utilizado anteriormente.

ecuación 3.20 se obtuvo el torque mínimo necesario que debía ejercer el servo motor para que el prototipo se mantuviera sujeto a la viga, el cual era igual a 0.245 Nm.

$$T = \frac{F_s d_m}{2} \left(\frac{l_p + \pi f d_m \sec \alpha}{\pi d_m - f l \sec \alpha} \right) \quad (3.20)$$

Las características del servo motor seleccionado se presentan en la Tabla 14. El torque máximo que podía aplicar el servo motor era de 0.28 N.m el cual ejercía una fuerza F_s de 137.23 N . Si bien este valor era cercano al calculado se debe considerar que se estimó con un alto factor de seguridad al considerar que los materiales en contacto eran de PLA y no PLA con un material más abrasivo, como por ejemplo, papel de lija.

Tabla 14 Características Servo Motor

Nombre	Valor
Torque Máximo	0.28 Nm
Ángulo de Giro	360°
Velocidad Máxima	300 °/s
Peso	0.03 kg

4.3 Diseño de la electrónica y sistema de control.

En esta sección se describe el diseño de la electrónica y control del prototipo, el cual se basó en el trabajo realizado por la comunidad “*hagalo-usted-mismo*” en el rubro de la impresión 3D a través del método FDM.

Electrónica.

La electrónica del prototipo estaba compuesta por una Ramps 1.4 acoplada a un Arduino Mega (ver sección 2.4). Como se puede ver en la Figura 51, este sistema estaba diseñado para controlar todo lo necesario para que funcionará una impresora 3D FDM de escritorio. En el caso particular de Koala 3D se agregó un mecanismo de sujeción actuado por 4 servo motores, los cuales fueron controlados gracias a unas salidas digitales (PWM) que poseía incorporada la placa RAMPS 1.4.

El suministro energético era realizado por dos entes: las placas electrónicas estaban conectadas directamente a un ordenador mediante un puerto USB, mientras que actuadores y sensores eran energizados por una fuente de poder de 6 y 12V.

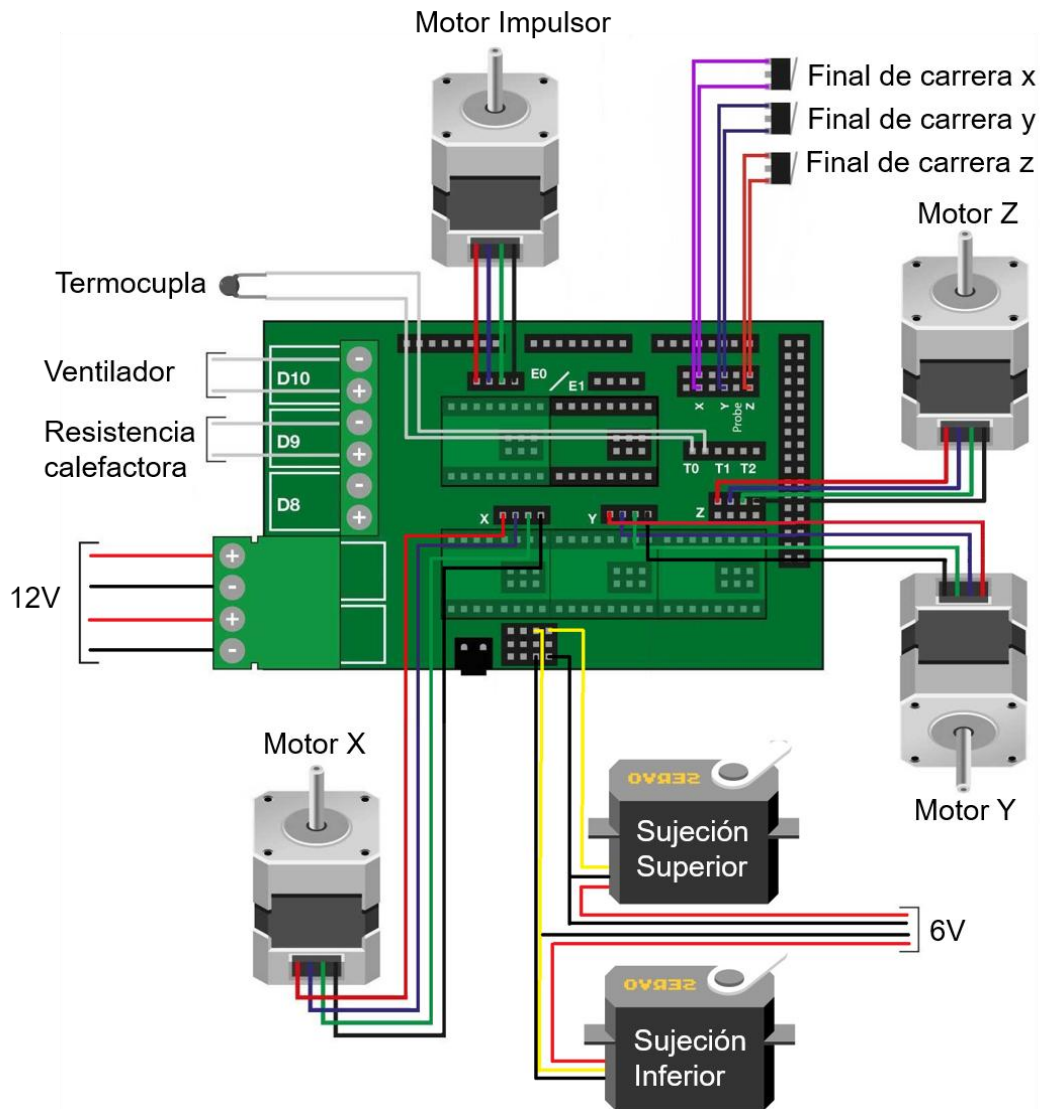


Figura 51 Esquema de la electrónica que controla a Koala 3D.

Control.

El control del prototipo se realizó a través de un “firmware” de código abierto llamado Marlin. Este programa fue diseñado para traducir el código G en acciones que debía realizar una impresora 3D para manufacturar un objeto mediante el método FDM.

Para implementar Marlin en una impresora 3D particular se deben especificar las dimensiones del volumen de manufactura, la relación entre el avance del extrusor con la rotación de los motores que lo conducen y las constantes del controlador PID encargado de mantener estable la temperatura a la cual es extruido el material de manufactura. En la Tabla 15 se presentan los principales parámetros modificados en el “firmware” original para vincularlo con Koala 3D⁶.

⁶ El código cargado al controlador se encuentra disponible en https://www.mediafire.com/folder/577qrbjpo5rih/Koala_3D_printer.

Tabla 15 Parámetros implementados en firmware Marlin para vincularlo a Koala 3D

Parámetro	Valor
Baudrate	115200
Constantes Control PID Temperatura	$K_p=27$; $K_i= 2.03$; $K_d= 89.57$
Pasos por mm	$x= 89.431$; $y=45.607$; $z= 1546$; $e= 528.169$
Aceleración máxima (mm/s ²)	$x= 100$; $y= 100$; $z= 3.3$; $e= 200$
Velocidad máxima (mm/s)	$x= 200$; $y= 200$; $z= 3.3$; $e= 200$
Dimensiones máxima de manufactura (mm)	$x= 47$; $y=47$; $z=100$

La operación de Koala 3d se hizo a través de Repetier Host, un programa que permitió transformar un modelo CAD en código G y luego enviar este código desde un ordenador al controlador del prototipo para que este realizara las distintas funciones que permitían la manufactura de un modelo. Además, el programa posibilitaba la verificación del estado de la temperatura durante todo el proceso de impresión (ver Figura 52).

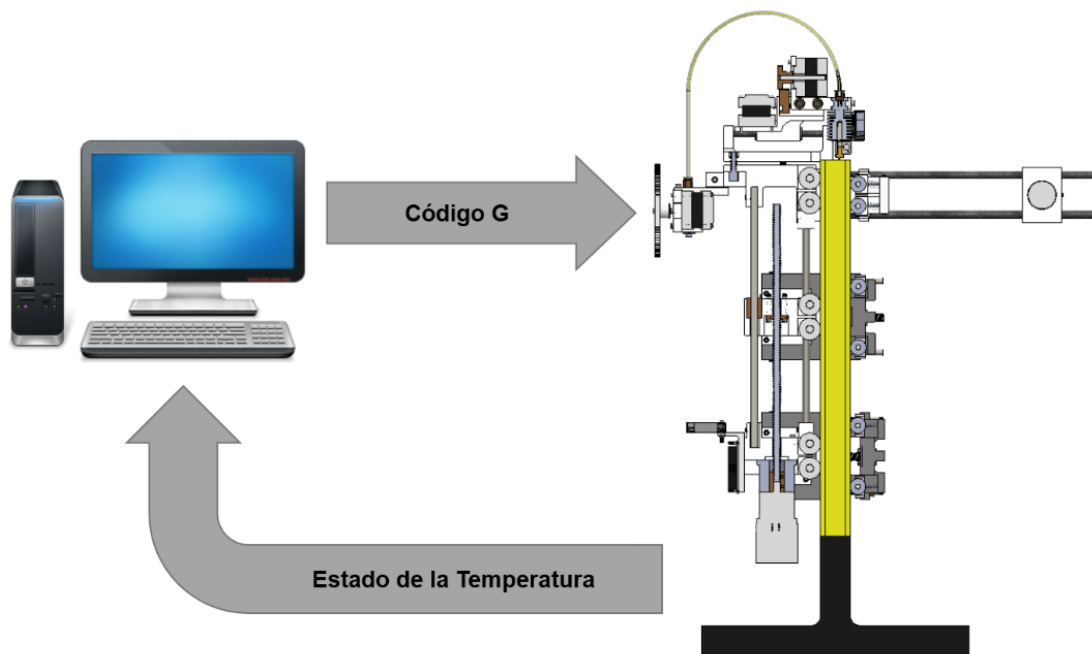


Figura 52 Esquema que presenta la comunicación entre el ordenador y la impresora.

4.4 Manufactura del prototipo.

Luego de finalizar el diseño de todos los componentes del prototipo, se procedió a la compra y fabricación de componentes para el posterior armado de Koala 3D. Los procesos y parámetros de manufactura se definieron considerando la forma, calidad superficial requerida y material de la pieza.

4.4.1 Fabricación de componentes.

Por motivos de reducir costos y acelerar su implementación siempre se priorizo la compra de componentes (ver Anexo A: Recursos utilizados) en lugar de fabricar una pieza, pero dentro del diseño existían componentes no disponibles en el mercado y que fueron creados específicamente para esta aplicación, no quedando otra alternativa que su fabricación (ver Anexo A: Recursos utilizados).

Los componentes plásticos fueron manufacturados mediante impresión 3D utilizando ácido poliláctico (PLA) y una impresora Replicator 2. Los parámetros de impresión implementados en Makerware (“slicer” de la Replicar 2) se muestran en la Tabla 16. Además, en el modelamiento 3D de las piezas se utilizaron tolerancias de fabricación igual a 0.5 mm para el perfecto acople de bujes y ejes.

Tabla 16 Parámetros utilizados para manufacturar partes mediante impresión 3D

Parámetro	Valor
Temperatura de manufactura (C)	235
Diámetro de punta del extrusor (mm)	0.4
Velocidad de punta cuando está imprimiendo (mm/s)	60
Altura de capa (mm)	0.3
Porcentaje de Relleno (Infill)	50

Una vez finalizada la impresión, cada pieza era sometida a un proceso de remoción del soporte de manufactura mediante cortantes y escariadores. Como la impresión 3D utilizada no era de alta resolución, los hilos para la inmersión de pernos y prisioneros se hicieron manualmente utilizando machuelos de 3 y 4 mm para rosca estándar.

Los engranajes y cremallera de bronce fueron confeccionados en una fresadora mecánica vertical y horizontal, respectivamente. Acoplado una herramienta de desbaste al husillo se generó la forma principal de las piezas. Luego se utilizó un módulo cortante en conjunto con un plato divisor universal para la confección de los dientes. En la Tabla 17 Se muestran los parámetros empleados en la mecanización de ambos componentes.

Tabla 17 Parámetros utilizados en el fresado de partes de bronce SAE 64

Parámetro	Valor
Diámetro de la herramienta de desbaste (mm)	15
Velocidad de giro husillo (rpm)	640
Constante del plato divisor universal	40
Profundidad de avance desbaste (mm)	1
Profundidad de avance acabado (mm)	0.5

Para fabricar los bujes de bronce se utilizó un torno mecánico. Se comenzó acoplado una herramienta de acero rápido al porta herramienta, desbastando y refrentado el material hasta dar el diámetro exterior y largo especificado. Secuencialmente, se realizó la perforación utilizando una broca de centro, broca helicoidal y escariador, los cuales se montaban en el contrapunto del torno. En la Tabla 18 se muestran los parámetros empleados en la mecanización de los bujes.

Tabla 18 Parámetros utilizados en el torneado de partes de bronce SAE 64

Parámetro	Valor
Velocidad de corte (m/min)	30
Velocidad de giro husillo (rpm)	63
Diámetro de material en bruto (mm)	26
Profundidad de avance desbaste (mm)	1
Profundidad de avance acabado (mm)	0.1
Tolerancia diámetro interno (mm)	+/- 0.05

La parte inferior de la base de impresión se manufacturó soldando perfiles de acero cuadrado de 30x30x3 mm. El resto de la base fue de PLA e impresa 3D, esta se acoplaba a presión a la estructura de acero utilizando un tipo de unión macho-hembra (ver Figura 53a). En el extremo más cercano a la punta del extrusor se acopló un tramo de columna intercambiable para desechar luego de las pruebas (ver Figura 53c). El empotramiento de la parte inferior se hizo mediante cuatro abrazaderas impresas (ver Figura 53d).

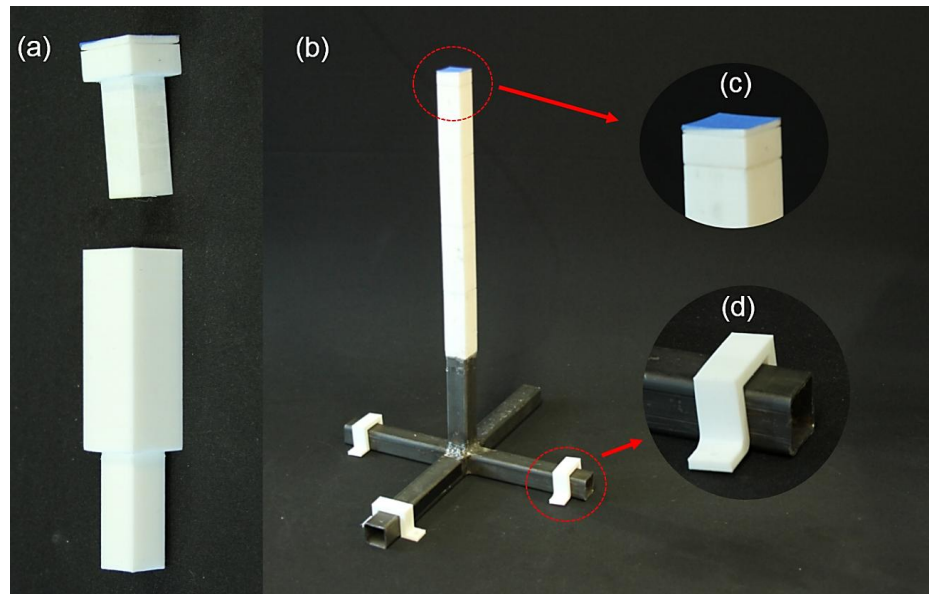


Figura 53 (a) Sistema de conexión entre secciones de la base de impresión (b) vista general de la base de impresión (c) detalle parte intercambiable de la base de impresión (d) abrazaderas para empotrar la base de impresión a la superficie.

4.4.2 Armado prototipo.

Para optimizar el proceso de armado, el diseño del prototipo se pensó de manera que este contara con la menor cantidad de partes y que para su ensamblaje se utilizaran pocas herramientas. Esta etapa tardo alrededor de cinco horas, principalmente utilizándose llaves allen de 3 y 4 milímetros para fijar prisioneros y pernos.

Como se puede ver en la Figura 54 se comenzó por armar cada componente antes de integrarlo a las parte impresora o trepadora del prototipo. Los bujes se insertaron a presión en los elementos que deslizaban sobre ejes, cubriéndolos de teflón si es que quedaba una holgura no deseada entre este y el orificio. Los rodamientos que eran parte del sistema guía iban sobre ejes de plásticos acoplados a una ranura impresa en la mordaza fija y la pieza que portaba la rueda retráctil.

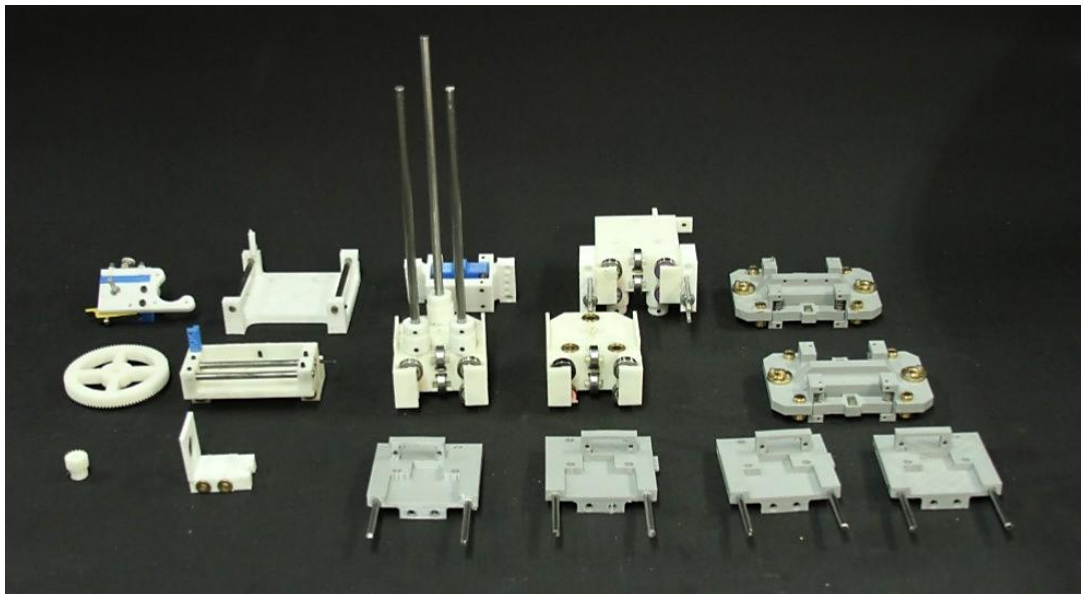


Figura 54 Despiece de componentes. Se acoplaron bujes, ejes y tuercas a cada componente.

Armando la parte impresora y trepadora por separado, se unieron sus componentes mediante ejes de acero plata de 3, 6 y 8 mm (ver Figura 55). Los ejes son fijados por prisioneros de 3 y 4 mm calibrando el apriete de manera que los ejes queden paralelos entre ellos para facilitar el deslizamiento de los cuerpos móviles que guían. Paralelamente, se armó la estructura del impulsor y sistema de apriete del filamento en su interior.

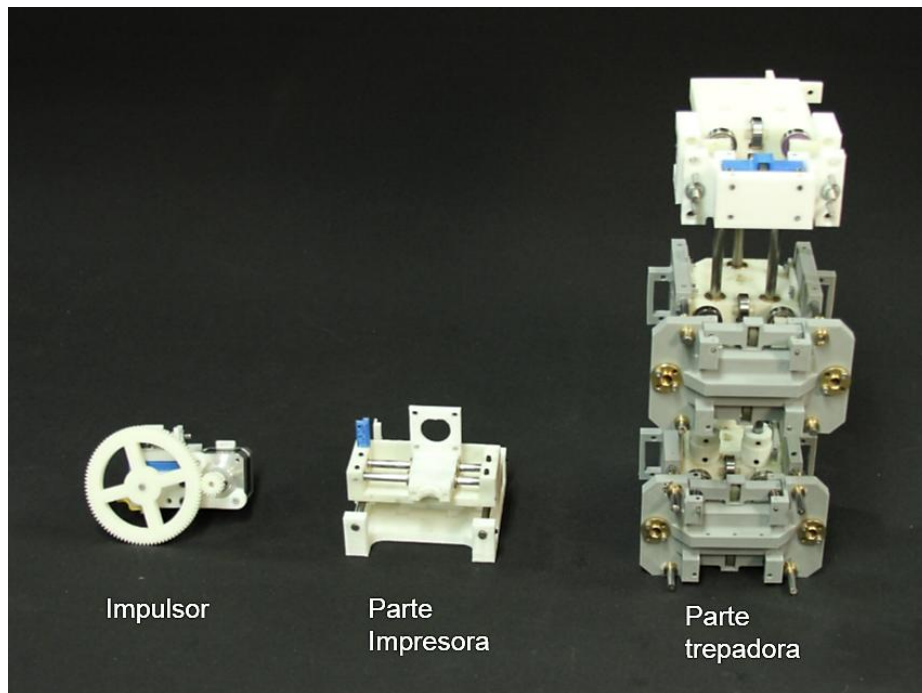


Figura 55 Partes armadas por separado: impulsor de material, parte impresora y parte trepadora.

Finalmente se unen los subconjuntos del prototipo, adjuntando los sistemas motrices a las prensas/carros, impulsor y cuerpos móviles X e Y. Una vez montado sobre la base, se agrega al prototipo el contrapeso, extrusor, finales de carrera y electrónica. En la Figura 56 se muestra a Koala 3D completamente ensamblado y montado en la base de impresión.

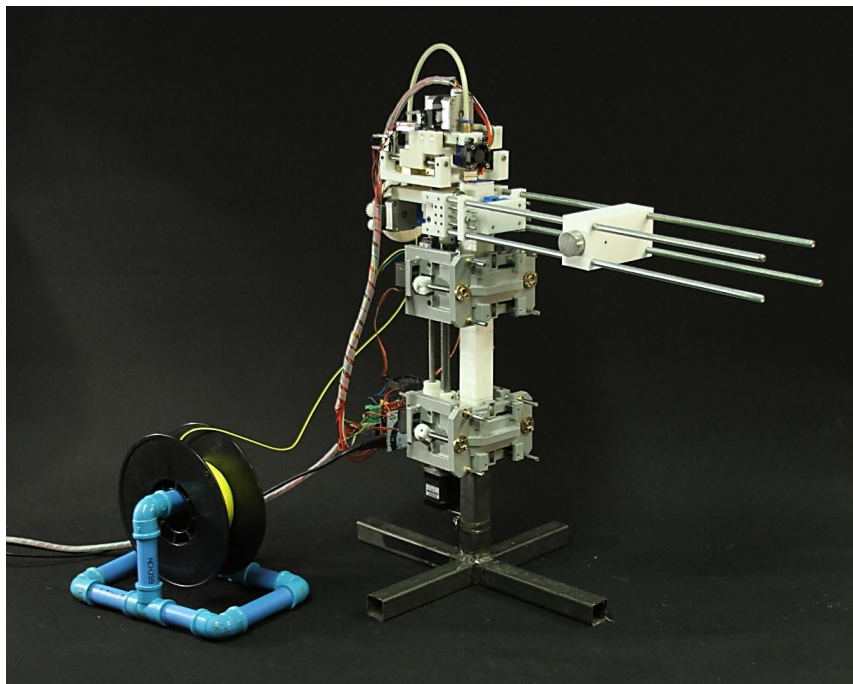


Figura 56 Prototipo armado sobre su base de impresión, listo para ser operado y calibrado.

4.5 Operación del prototipo y ajustes.

Koala 3D se operó utilizando parámetros que se emplean normalmente en la manufactura de objetos de PLA mediante impresión 3D (ver Tabla 19), parámetros especificados en páginas de internet dedicadas al rubro de la impresión 3D [54]. La utilización de estos valores asegura una buena adhesión entre capas, acabado superficial de calidad y optimas propiedades mecánicas de la pieza manufacturada.

Tabla 19 Parámetros utilizados normalmente para imprimir piezas de PLA mediante el método de modelado por deposición fundida

Parámetro	Valor
Velocidad de impresión (mm/s)	20-150
Velocidad de viaje (mm/s)	100
Distancia de retracción (mm)	7.5
Velocidad de retracción (mm/s)	40
Temperatura de extrusión (C)	200 - 235

El PID encargado de controlar la temperatura del extrusor se reguló utilizando un programa llamado Pronterface⁷, esta plataforma permitió enviar órdenes a la impresora utilizando código G. Como se muestra en la Figura 57, al ingresar el código M303 en la consola del programa se inicia un algoritmo que itera hasta dar con las constantes óptimas para el control estable de la temperatura de extrusión. Una vez obtenidos estos valores se modificaron en el firmware Marlin (ver sección 2.4.3).

Una vez ajustados los parámetros de manufactura se procedió a realizar las pruebas de impresión, evaluando ambas fases del proceso de manufactura.

⁷ <http://www.pronterface.com/>

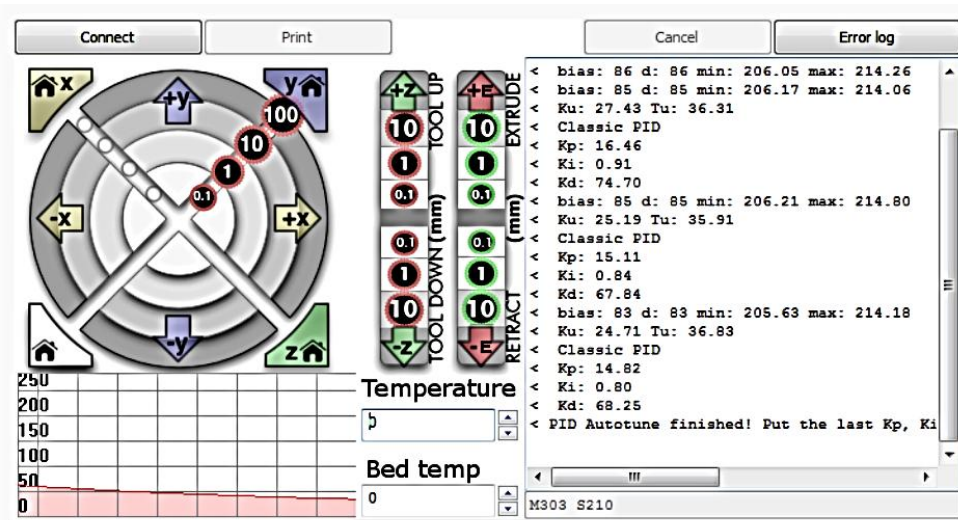


Figura 57 Programa empleado para calibrar control PID, el cual es utilizado para mantener la temperatura del extrusor constante.

Primero se verifico la deposición de material dentro del volumen de manufactura dejando fijo el prototipo a la viga mediante su prensa/carro superior. El progreso de los resultados de esta prueba concluyó en agregar dos elementos al diseño original del prototipo. Para nivelar la punta del extrusor con la cama de la mesa, se agregaron resortes entre la base de la parte impresora y el carro auxiliar (ver Figura 58a). Una goma de caucho adherida a la mordaza evitó que la prensa se soltara y el prototipo cayera por efecto de la gravedad al momento de manufacturar un objeto (ver Figura 58b).

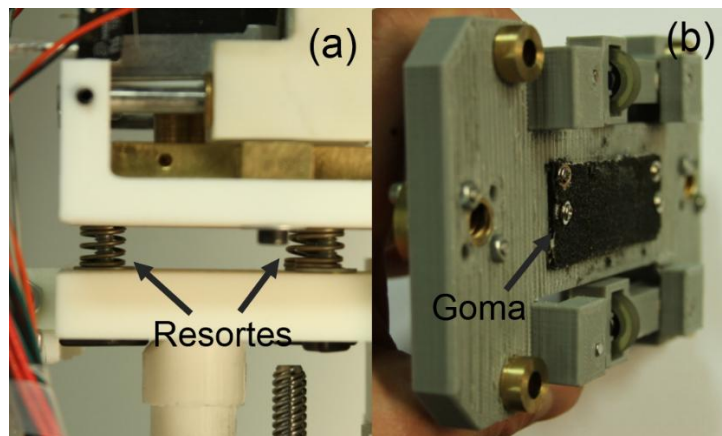


Figura 58 Modificaciones en el diseño original para lograr una impresión 3D de calidad. (a) Resortes entre la base de la parte impresora y el carro auxiliar para nivelar la punta del extrusor respecto a la mesa de impresión. (b) Goma de caucho ubicada en la mordaza móvil para reforzar apriete de la prensa.

La fase de transición se evaluó simulando el cambio de sujeción, esto es, una vez que la prensa/carro superior llega al final de su recorrido esta debe pasar al modo carro para retornar al inicio y volver a sujetar al prototipo (ver sección 4.1.3). Utilizando un reloj comparador, se

cuantificó el deslizamiento del prototipo en el eje z al realizar este proceso y permitió ajustar la elevación del extrusor en el código G antes de comenzar una nueva etapa de impresión⁸.

Luego de haber calibrado el control y el mecanismo del prototipo se procedió a someterlo a pruebas de mayor exigencia:

1. Se imprimió una columna de mayor envergadura que la altura del espacio de manufactura estático del prototipo, pasando por ambas fases del proceso de fabricación. La columna de 200 mm de alto poseía una sección cuadrada de 30x30 mm con un hueco al centro de 20x20 mm².
2. Se manufacturó una pieza pequeña de forma compleja verificando algunos parámetros de impresión y analizando la capacidad de fabricación de la impresora.

Los resultados de las diversas pruebas anteriormente descritas se presentan en la sección 5.2 y 5.3.

4.6 Ensayos de caracterización.

En esta sección se presenta el montaje y procedimiento experimental para la captura de datos. En algunos casos fue necesario el procesamiento de los datos para comparar el prototipo creado con otras máquinas similares.

4.6.1 Mediciones directas.

Una vez terminada la confección del prototipo, este se pesó en una balanza mecánica y se midieron sus dimensiones totales con un flexómetro. El volumen de impresión se verifica utilizando el programa Repetier en modalidad manual, trasladando el extrusor y la prensa/carro superior de extremo a extremo, considerando los ejes en los cuales se pueden desplazar.

El tiempo de impresión se midió para distintas velocidades (ver Tabla 20) considerando un cubo de 1 cm³.

Tabla 20 Velocidades para las cuales se midió el tiempo en que tardaba en imprimir un cubo de 1 cm³

Parámetro	Velocidad		
	Mínima	Estándar	Máxima
Velocidad de perímetros (mm/s)	20	50	150
Velocidad de llenado (mm/s)	10	20	80
Velocidad de viaje (mm/s)	50	50	50

⁸ El código G implementado en Repetier para programar la etapa de transición se encuentra en Anexo B: Códigos.

4.6.2 Potencia y consumo energético.

Si se espera que futuras versiones de Koala 3D sean totalmente portátil éstas deben equiparse con baterías que suplan la energía necesaria para realizar las distintas funciones durante un largo periodo de tiempo. Es por eso que a modo referencial se midió la potencia y consumo energético de esta primera versión, la cual es dependiente de una fuente energética externa.

La obtención del consumo eléctrico se hizo indirectamente midiendo la corriente y voltaje suministrados desde la fuente de poder, utilizando un sensor de corriente y un divisor de voltaje conectados a un Arduino Uno (ver Figura 59). En el Anexo B: Códigos se puede verificar el programa cargado en el controlador.

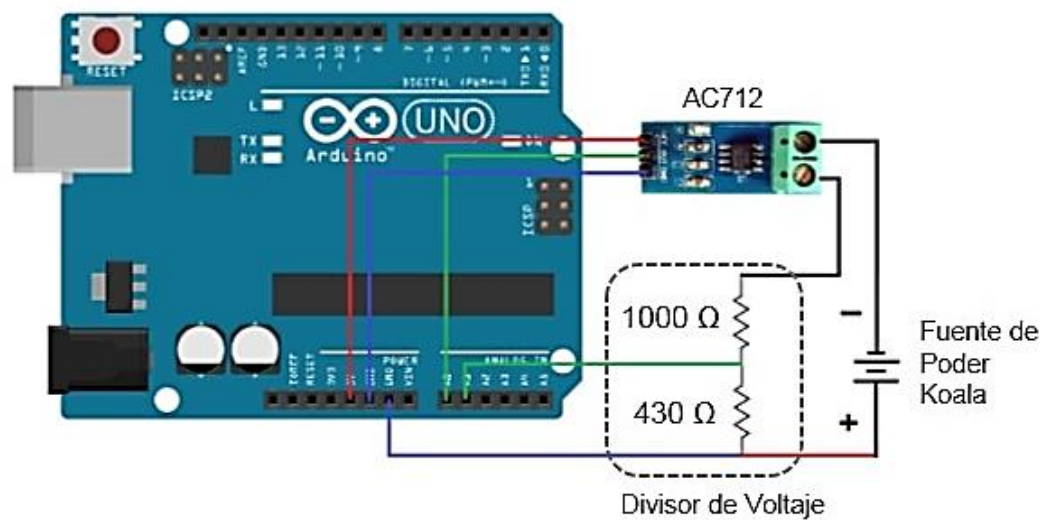


Figura 59 Instrumentos de medición utilizados para la obtención del voltaje y corriente consumido por Koala 3D.

Las mediciones se realizaron durante todo el proceso de impresión de un cubo de 1 cm³, a velocidad estándar, identificando el consumo en cada una de sus fases de manufactura. El consumo individual de cada componente se capturo realizando el mismo tipo de ensayo, pero activando solo los componentes de interés mediante la manipulación del código G.

4.6.3 Calidad superficial y tolerancia de objetos impresos.

La calidad superficial y tolerancia de los objetos impresos son medidas importantes a la hora de elegir entre adquirir una u otra impresora 3D, ya que determina el nivel con que manufactura las piezas previamente modeladas.

Para la determinación de la calidad superficial con que imprime Koala 3D se manufacturaron 5 probetas, variando la velocidad de deposición de material y la altura de capas (ver Tabla 21) dentro de los límites recomendados, considerando el método de impresión utilizado y el diámetro de la

punta del extrusor [39]. Las probetas fueron columnas de 30x30x60 mm con un hueco al centro de 20x20 mm.

Tabla 21 Parámetros que se variaron para caracterizar la calidad superficial con que manufactura Koala 3D

Nº probeta	Altura de capa (mm)	Velocidad perímetro (mm/s)
1	0.1	50
2	0.2	50
3	0.3	50
4	0.3	150
5	0.3	20

Una vez impresas las probetas se visualizaron con un microscopio extrayéndose imágenes de alta resolución, capturando una extensión aleatoria a lo largo de la probeta igual a 5 mm (ver Figura 60a y b). Cuatro capturas se unían y procesaban transformándolas en fotografías monocromáticas mediante un código programado en Matlab (ver Anexo B: Códigos), donde la probeta era de color negro y el fondo de la fotografía de color blanco (ver Figura 60c). La matriz generadora de la imagen al contener solo dos valores (unos y ceros) facilitaba la medición de cimas y valles del perfil capturado (ver Figura 60d), valores que fueron promediados para obtener la rugosidad media aritmética.

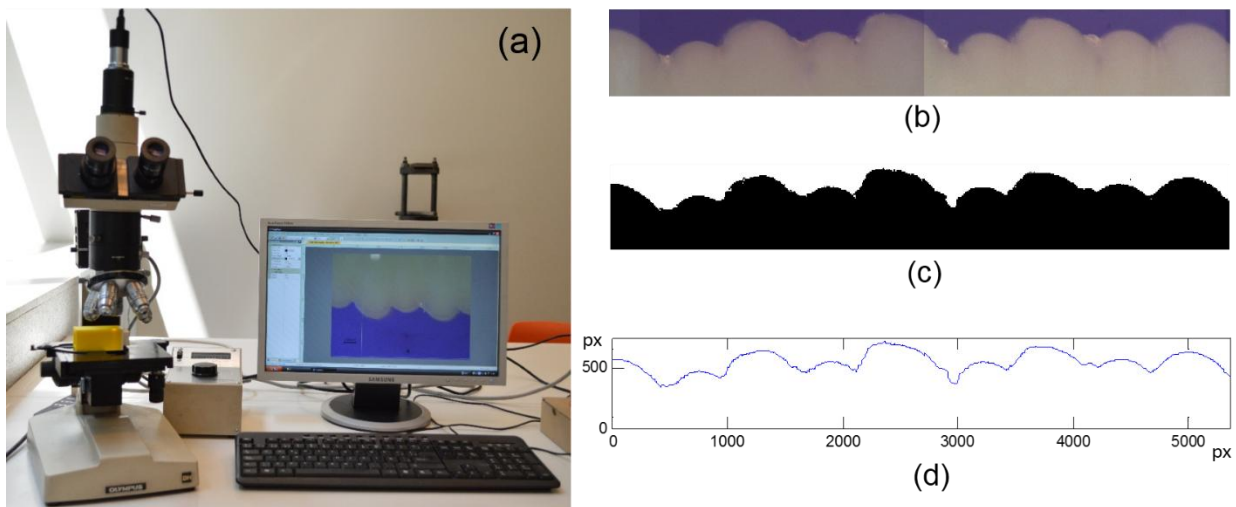


Figura 60 Proceso para la obtención de la calidad superficial con que manufactura la impresora. (a) probeta manufactura visualizada en microscopio Olympus modelo BH conectado a un ordenador; (b) fotografía obtenida desde el ordenador; (c) fotografía monocromática procesada en Matlab; (d) Gráfico que presenta la cantidad de pixeles negros y que se utiliza para la obtención de la rugosidad aritmética.

Para cuantificar la tolerancia con que el prototipo manufacturaba las piezas, se imprimió un objeto de prueba comparando las medidas con que se diseñó y las dimensiones una vez manufacturado.

Las mediciones fueron realizadas utilizando un pie de metro y considerando la disposición con que fue impresa la pieza, atribuyendo a cada eje cartesiano una tolerancia de fabricación.

También se analizó la deflexión de las columnas impresas que tenían mayor altura que su volumen de impresión estático (sin la etapa de transición), tomándoles fotografías y verificando su ángulo de curvatura respecto al modelo CAD de la columna.

4.6.4 Oscilación del prototipo durante el proceso de manufactura.

El prototipo a causa de sus movimientos durante el proceso de manufactura provocaba que la columna donde iba trepando vibrara, pudiendo inducir al rompimiento de esta y, consecuentemente, a la falla del proceso de impresión. Es por esto que se analizaron las oscilaciones simulando el proceso de manufactura de una columna de alto mayor a la altura del prototipo.

Se comenzó por imprimir una columna de 500 mm utilizando una impresora externa y subdividiendo la impresión en 10 partes iguales, las cuales se acoplaban a presión mediante un sistema de machihembrado (similar al sistema presentado en la Figura 53a). Estos segmentos se iban uniendo y sucesivamente midiendo la oscilación para cada altura cuando el prototipo manufacturaba un milímetro de columna. En todas las mediciones el prototipo se sostenía a través de la prensa/carro superior y su posición respecto al extrusor variaba según la altura que se estuviera testeando. Se consideró que cuando comenzaba el proceso de manufactura de la columna de 500 mm, la prensa/carro superior se encontraba en la parte alta de su recorrido.

Para medir las oscilaciones del sistema se utilizó una plataforma de seguimiento óptico llamada Optitrack⁹. Este sistema capturaba la posición de unos marcadores en el tiempo (a 120 fps), los cuales se posicionaron en la parte superior de la impresora. La disposición del montaje y el programa utilizado para grabar los datos se muestran en la Figura 61(a) y (b), respectivamente.

Los datos capturados se procesaron mediante el método de regresión local (LOESS) para eliminar el ruido. Luego para cada una de las señales se calculó el valor eficaz (RMS) y se graficó en función de la altura de la columna, en base a esto se obtuvo una curva de tendencia entre ambas variables.

⁹ Modelo V120 trío.

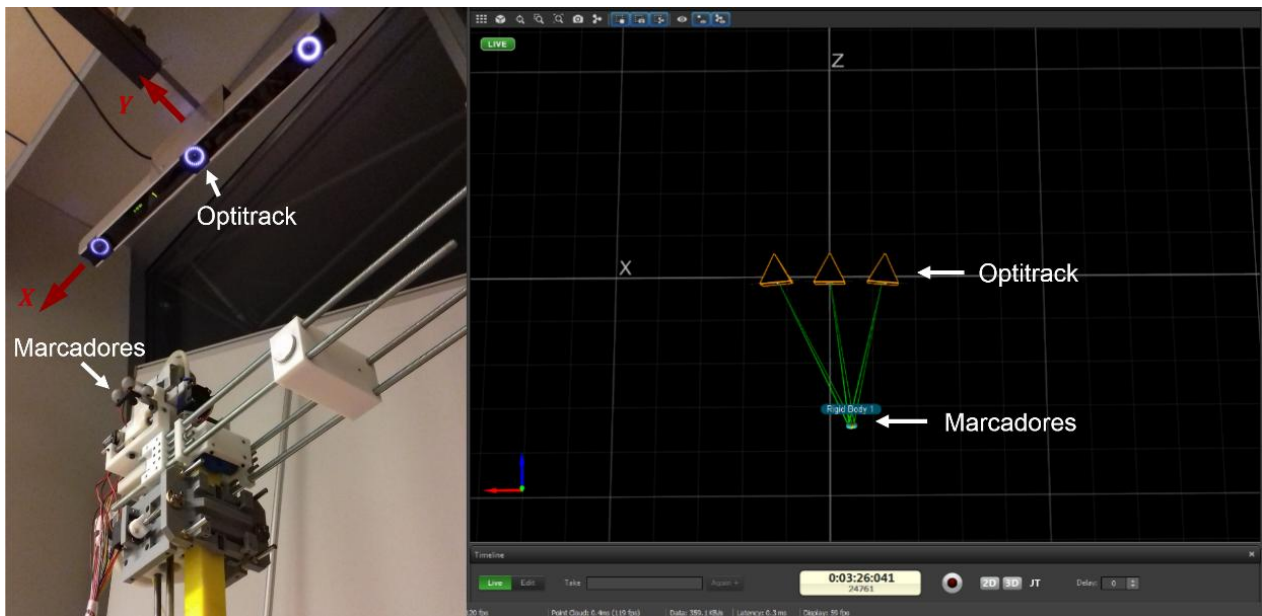


Figura 61 Se presenta (a) montaje experimental y (b) programa utilizado para capturar la oscilación del prototipo al manufacturar una columna.

Utilizando la línea de tendencia obtenida de los datos experimentales y basándose en el modelo matemático propuesto por Euler-Bernoulli para estimar el momento torsor (M) y deflexión máxima (c_h) que soporta una viga en voladizo (ver ecuación 3.21 y 3.22), se estimó la altura a la cual fallaría por flexión la columna manufacturada a causa de la magnitud de las oscilaciones. Se consideró como el largo de la viga (h) igual a la altura de la columna de PLA, El RMS como la flecha máxima (c_h), el momento de inercia (I) se obtuvo en base a la sección transversal de la columna, empleando el módulo de Young (E) y tensión de fatiga (S_f) del PLA.

Para eliminar el momento torsor (M) del sistema de ecuaciones se reemplazó la ecuación (3.21) en la ecuación (3.22) obteniéndose la ecuación (3.23), estimándose la altura crítica en la que fallaría la columna.

$$M = \frac{S_f c_h}{I} \quad (3.21)$$

$$c_h = \frac{h^2 M}{3EI} \quad (3.22)$$

$$\left(\frac{h}{c_h}\right)^2 = \frac{3E}{S_f} \quad (3.23)$$

Capítulo 5

Presentación y Discusión de Resultados

5.1 Prototipo final

En la Tabla 22 se visualiza un resumen de los parámetros de diseño de Koala 3D. Al ser fabricado en un 70% de PLA impreso, lo que facilita la implementación del prototipo en otras partes del mundo que posea una impresora 3D de escritorio. Además el costo total de fabricación es de 1010 USD, bastante cercano a las impresoras FDM de escritorio que actualmente se venden en el mercado

El peso del prototipo es de 5.7 kg, correspondiendo un 75% a la parte trepadora y un 25% a la parte impresora. Un mecanismo de elevación y agarre más compacto y simétrico permitiría un mejor desempeño del prototipo en las diferentes pruebas de caracterización a las cuales fue sometido.

El programa y placa de control permitieron una rápida implementación del código G y acople de actuadores y sensores en el prototipo. El firmware Marlin es gratuito y para conectarlo con Koala 3D se deben realizar pocos cambios en su codificación. La conexión de Koala 3D con la Tarjeta RAMPS 1.4 es similar al de una impresora 3D de escritorio estática y se encuentra ampliamente documentado en la red.

Al no existir un concepto de impresora 3D móvil masificado, las herramientas utilizadas en el rubro no se encuentran diseñadas para implementar una máquina con estas características específicas. Por ejemplo, hoy en día no es posible programar bucles (“loops”) en el código G para imprimir una pieza de altura infinita sin tener que repetir los comandos. Por este motivo el diseño del prototipo se desarrolló y limitó pensando en los recursos elaborados por la comunidad hágalo-usted-mismo y su aplicación en impresoras 3d de escritorio estáticas.

Tabla 22 Resumen de parámetros utilizados en el diseño de Koala 3D

Parámetro	
Sistema de movimiento en Z	Tornillo sinfín-tuerca
Sistema de transmisión en X e Y	Engranaje- cremallera
Sistema de sujeción	Prensas
Mecanismo para modificar centro de masa	Contrapeso estático
Tipo de Impulsor de material	Tipo Bowden
Tarjeta de control	Ramps 1.4 + Arduino
Volumen de Manufactura	5922 cm ³
Dimensiones (Ancho×Largo×Alto)	24x15x53 cm
Material de Manufactura	PLA
Costo de partes compradas	214 USD
Costo de partes manufacturadas	796.5 USD
Tiempo de ensamblado	4
Peso total	5.7 kg

En la Tabla 23 se puede ver los parámetros en que operó Koala 3D, los cuales son similares a los utilizados por impresoras de escritorio que funcionan mediante el método FDM. La potencia consumida es más baja que la necesaria para operar bajo condiciones similares en impresoras 3D populares, tales como la Ultimaker 2, logrando manufacturar objetos de calidad superficial equivalente (ver sección 5.4.2).

Tabla 23 Resumen de parámetros de impresión y caracterización de Koala 3D en operación.

Parámetro	Máxima	Estándar
Velocidad en Z (mm/s)	-	130
Velocidad en X/Y (mm/s)	150	50
Caudal de impresión (mm ³ /s)	18	6
Resolución de impresión en x/y (mm)	0.1	0.3
Potencia consumida en operación (W)	-	50
Rugosidad (mm)	46.42	37.13

Como se puede ver en la sección 5.3, el prototipo cumplió con los objetivos conceptuales que motivaban el presente trabajo.

En la Tabla 24 Se comparan las dimensiones de manufactura y totales de Koala y dos impresoras 3D estaticas. A pesar que ninguna de las máquinas logra superar la unidad en la razón de volúmenes, Koala si lo hace en el sentido que se mueve, manufacturando una columna de altura 12

veces superior que la altura del prototipo (razón de alturas). Los valores obtenidos para la impresora Koala 3D fueron en base a la experiencia particular descrita en la sección 4.6.4, por lo que en trabajos futuros se deben probar nuevas geometrías de la columna impresa y materiales más resistente a la flexión para entregar valores más absoluto de razón de altura y volúmenes.

Tabla 24 Comparación de dimensiones de manufactura y dimensiones totales de Koala 3D junto a otras 2 impresoras 3D de escritorio.

Impresora 3D	Dimensiones de la máquina (cm ³) ¹⁰	Volumen de Manufactura (cm ³)	Razón de Alturas	Razón de Volúmenes
Makerbot	52.8x44.1x41	28.5x19.5x16.5	0.4	0.1
Formlab	35x33x52	14.5x14.5x17.5	0.34	0.06
Koala 3D	24x15x53	3x3x658	¹¹ 12.4	0.31

Con el motivo de acelerar el desarrollo del concepto de una impresora sin restricción de espacio de impresión, los planos, códigos e información se dejara disponible en la red para su uso bajo licencia de código abierto. El enlace de descarga está en el pie de página¹².

5.2 Pruebas de calibración.

Las primeras pruebas consistieron en ensayos para calibrar el prototipo manufacturado. Primero se ajustaron los parámetros de impresión y luego se verificó el proceso de manufactura y analizó el funcionamiento del prototipo en su totalidad. Estas pruebas fueron la base para seguir con pruebas de mayor complejidad.

La temperatura elegida para extruir el PLA fue de 200°C del rango recomendado. Al configurar este valor el material a la salida del extrusor presentaba un diámetro homogéneo y no se observaban burbujas en su superficie producto del sobrecalentamiento.

En la Figura 62 Se presenta la respuesta del PID calibrado mediante el procedimiento indicado en la sección 4.5. Al activar el calefactor del extrusor la temperatura objetivo se alcanza en un minuto y medio, tiempo cercano al tiempo que tarda la Ultimaker 2 en realizar la misma acción[55]. El calefactor luego de llegar a los 200°C variaba su temperatura menos de 5°C durante el resto del periodo de impresión. Paginas expertas [56][57] en el tema recomiendan que las inestabilidades no superen los 10°C para evitar la producción de piezas con poros y/o estrías, y como consecuencia, de baja resistencia mecánica.

¹⁰ anchoxfondoxaltura

¹¹ Este valor se obtuvo en base a la simulación del proceso de impresión realizada en la sección 4.6.4

¹² https://www.mediafire.com/folder/577qrbjpo5rih/Koala_3D_printer

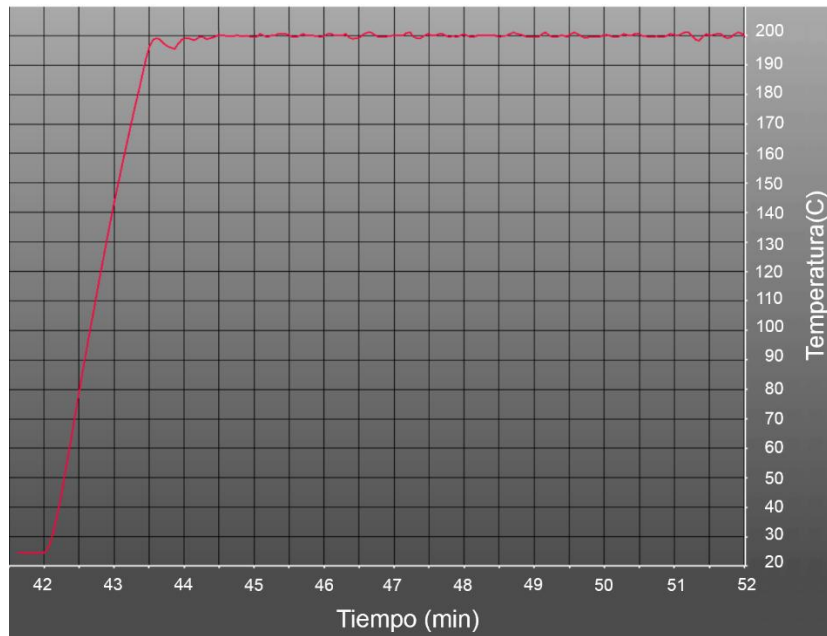


Figura 62 Captura del programa Repetier donde se muestra la temperatura del extrusor desde que se acciona la resistencia calefactora hasta que llega a la temperatura objetivo de 200°C luego de calibrar controlador PID.

La primera pieza manufacturada por Koala 3D se presenta en la Figura 63a, esta es una prueba fallida donde el prototipo no acabó de imprimir la primera capa ya que el extrusor dejó de suministrar material. Al analizar la impresión se observó que en algunas zonas se imprimió material y en otras no, esto indicaba una desnivelación entre la mesa de impresión y el recorrido del extrusor sobre el área de manufactura. En las zonas donde esta distancia era muy pequeña, la salida de material se obstruía provocando la aglomeración del material y formación de un tapón al interior del extrusor.

Luego de implementar el sistema de nivelación presentado en la Figura 58a (sección 4.5), se obtuvieron buenos resultados al comienzo de cada prueba, pero luego de cierta altura la impresión fallaba. Como se puede ver en la Figura 63b, en la parte superior del objeto impreso se visualizan surcos que fueron realizados por la punta del extrusor al desplazarse sobre el área de impresión, esto indicaba que la distancia entre la punta y la columna impresa iba disminuyendo en el transcurso de la manufactura de la pieza hasta que la salida de material quedaba por debajo del nivel donde se ubicaba la última capa extruida, provocando el bloqueo del extrusor.

Luego de varias pruebas se concluyó que el deslizamiento del prototipo en el eje Z era debido a que la prensa/carro superior se iba aflojando producto de la vibración causada por el prototipo en operación. Para la eliminación de este fenómeno se procedió a suprimir todas las holguras (juegos) existentes en ambos mecanismos de sujeción, ajustando tolerancias y fijaciones. Particularmente, la holgura en el sistema motriz causado por el conjunto de engranajes al interior del servo motor fue eliminada agregando una goma de caucho a las mordazas móviles, tal que cuando el mecanismo de sujeción prensaba, el caucho hacía de resorte tensor manteniendo los dientes de los engranajes permanentemente en contacto.

Luego de implementar ambas mejoras al diseño original se logró imprimir un objeto (columna) del alto del volumen de manufactura estático (ver Figura 63c).

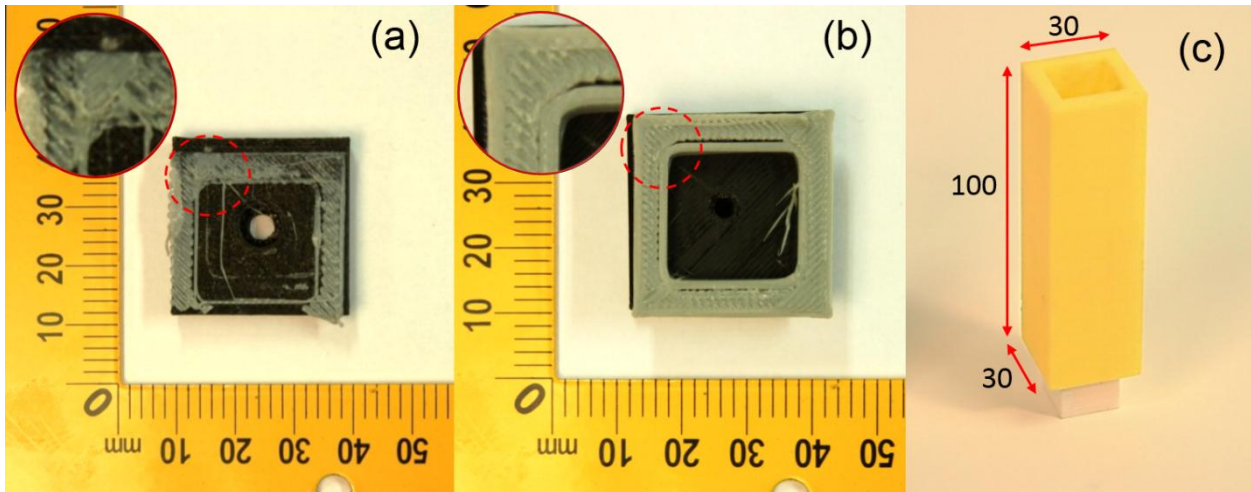


Figura 63 Pruebas realizadas para probar el desempeño de Koala 3D al imprimir una columna de sección $30 \times 30 \text{ mm}^2$. (a) Primera prueba fallida por falta de nivelación entre la punta y la mesa de impresión; (b) segunda prueba fallida por falta de sujeción entre la prensa/carro superior y la columna; (c) tercera prueba exitosa donde se pudo imprimir 100 mm de columna, las distancias están en mm.

Para testear la etapa de transición se siguió el procedimiento descrito en la sección 4.5 reiteradas veces, observando un comportamiento similar al presentado en la Figura 64. El deslizamiento del prototipo en el eje Z oscilaba entre 0.5 y 0.8 mm, destacándose que al realizar el primer cambio de prensa (Figura 64a y b) el sistema caía alrededor de un sexto de lo que cae en el segundo cambio de prensa (Figura 64b y c).

El deslizamiento del prototipo en el eje Z al realizar la etapa de transición se atribuyó al diseño mecánico de las prensas/carros. El mecanismo al presionar se generaba un par torsor entre la fuerza de roce (F_f) y el peso del prototipo (F_w) (ver Figura 46), ya que solo los rodamientos retraídos fueron los de la mordaza móvil y la fricción era generada en un costado de la columna. La única manera que tenía el sistema de equilibrar ese par torsor era inclinándose (cayendo) y desalineando las fuerzas normales resultantes ejercidas sobre la columna por ambas mordazas.

Cambiar el diseño del prototipo no fue una opción ya que involucraría mucho tiempo y la bajada es muy pequeña para tomar esa decisión. La solución se buscó por otro lado, se procedió a programar una compensación en la dirección longitudinal a la columna (eje z) antes de que el prototipo comenzara la siguiente fase de impresión (ver sección 4.1.3). La compensación era equivalente a la bajada promedio de 0.6 mm y se implementó directamente en el código G generado por el programa “Repetier Host”.

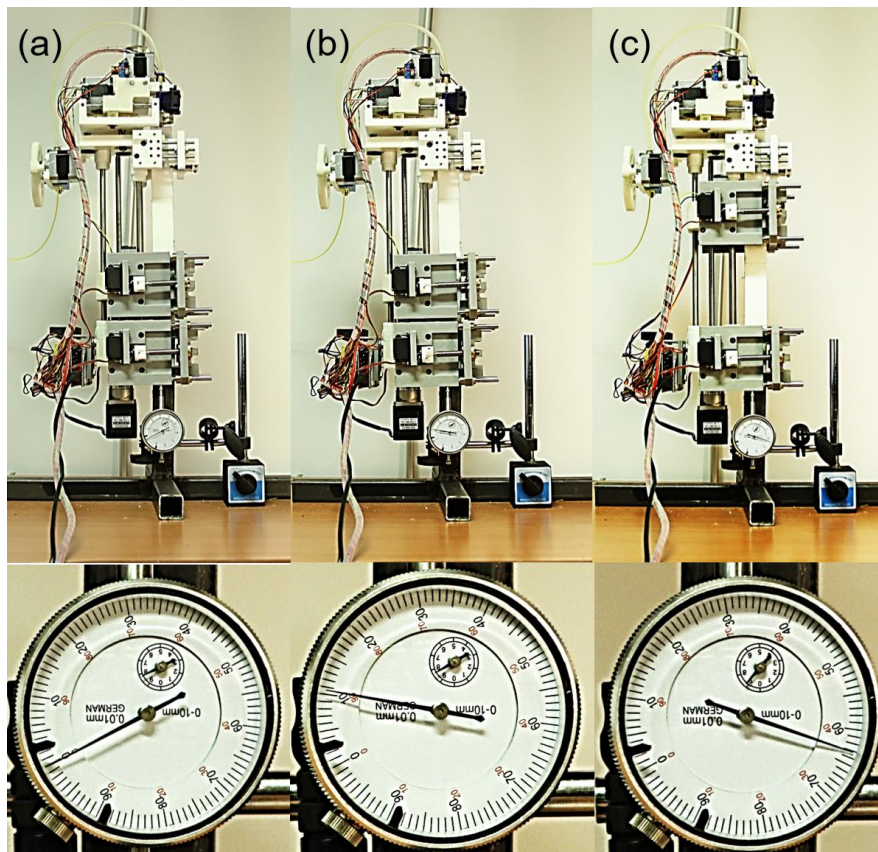


Figura 64 Pruebas realizadas para probar el desempeño de Koala 3D en la etapa de transición, midiendo la caída del prototipo con un reloj comparador. (a) La Prensa/carro superior llega al final de su recorrido; (b) el prototipo cambia de mecanismo de sujeción desde la prensa/carro superior a la prensa/carro inferior; (c) la prensa/carro superior regresa al origen de su recorrido, donde nuevamente el prototipo cambia de sistema de sujeción.

5.3 Pruebas de desempeño.

A continuación se presentan pruebas de alta exigencia donde se revisa el cumplimiento de objetivos conceptuales por parte del prototipo. El primer ensayo consistió en que Koala 3D imprimiese una pieza más grande que el tamaño de su volumen de manufactura con la mínima intervención humana. Luego se verificó la capacidad del prototipo de fabricar piezas con forma compleja y que simultáneamente imprimiera la estructura por donde escala.

En la Figura 65 se muestra a Koala 3D imprimiendo una columna de 200 mm de alto, distancia mayor a la altura de su volumen de impresión, por lo que el prototipo pasó por ambas fases del proceso de manufactura para su fabricación. La columna fue impresa a velocidad estándar y cada etapa de impresión duró alrededor de 7 horas. El periodo de transición tardó alrededor de un minuto considerando que la prensa/carro retornaba al origen de su recorrido a una velocidad de 2 mm/s.

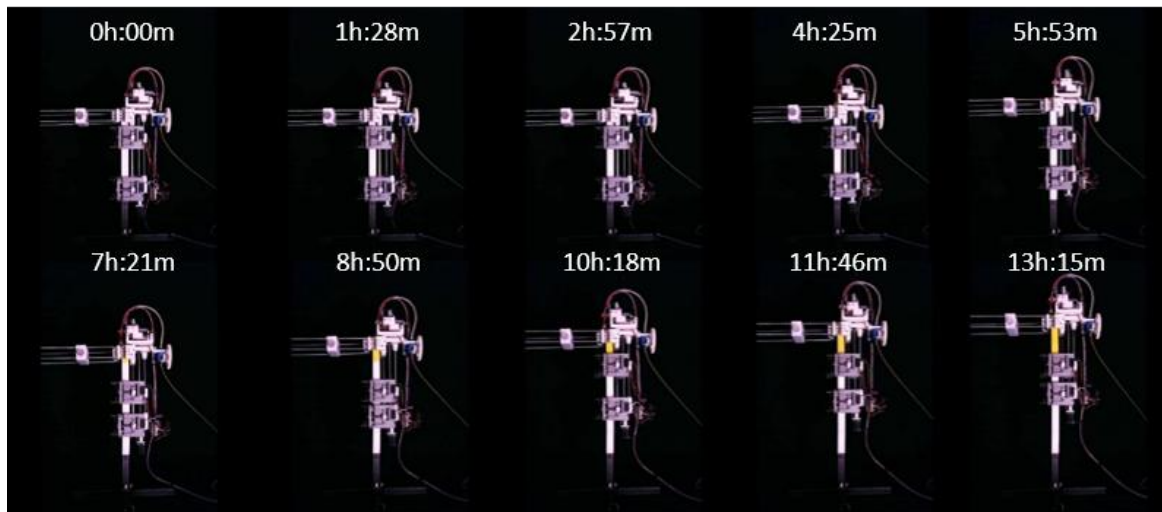


Figura 65 Time-lapse del proceso de manufactura de una columna de sección 30x30 mm² y altura de 200 mm.

En esta prueba fue muy importante centrar correctamente la columna a imprimir respecto a la base de impresión tal de evitar interferencias en el desplazamiento del prototipo sobre la estructura. Se realizaron tres ensayos para dar con la posición adecuada en el programa Repetier Host (ver Figura 66).

En la primera prueba solo se imprimió 15mm (a), distancia que existe entre la punta del extrusor y el rodamiento más cercano del carro auxiliar, el cual no pudo deslizar al tocar con la primera capa impresa, cayendo el prototipo y fallando la impresión. En los otros resultados (b y c) se logró imprimir el tramo completo de la columna con éxito, pero se observó una diferencia en la curvatura de ambas. Esta diferencia se debió a que la segunda prueba (b) se encontraba descentrada respecto a la base, por lo que el prototipo al entrar en contacto con la columna modificaba sucesivamente la posición de su área de manufactura acumulándose el error a medida que progresaba el proceso de fabricación.

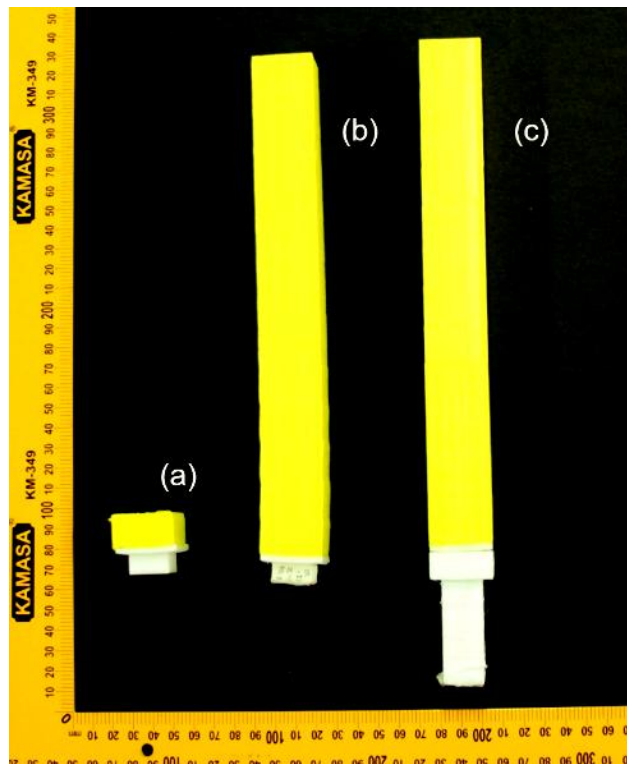


Figura 66 Columnas impresas con diferente posición en el programa Repetier Host (a) Columna posicionada en $(x,y)=(6,3.3)$; (b) columna posicionada en $(x,y)=(7.1,3.3)$; (c) columna posicionada en $(x,y)=(7.7,3.3)$.

Koala 3D fue capaz de manufacturar un objeto de forma más compleja que una columna. En la Figura 67 se puede ver el proceso de manufactura de una estatua de moai al centro de una columna hueca de sección igual a 30x30 mm. Ambas formas se manufacturaron simultáneamente y su impresión tardó alrededor de 1 hora.

La estatua fue fácil de remover ya que se descartó el uso de soporte y se utilizó una longitud de retracción del filamento extruido tal de evitar las estelas de plástico entre la pieza y la columna (ver Tabla 19). En la Figura 68 se observa una vista frontal y lateral de la estatua manufacturada, la cual tiene una altura de 37 mm y diámetro máximo igual a 15 mm.

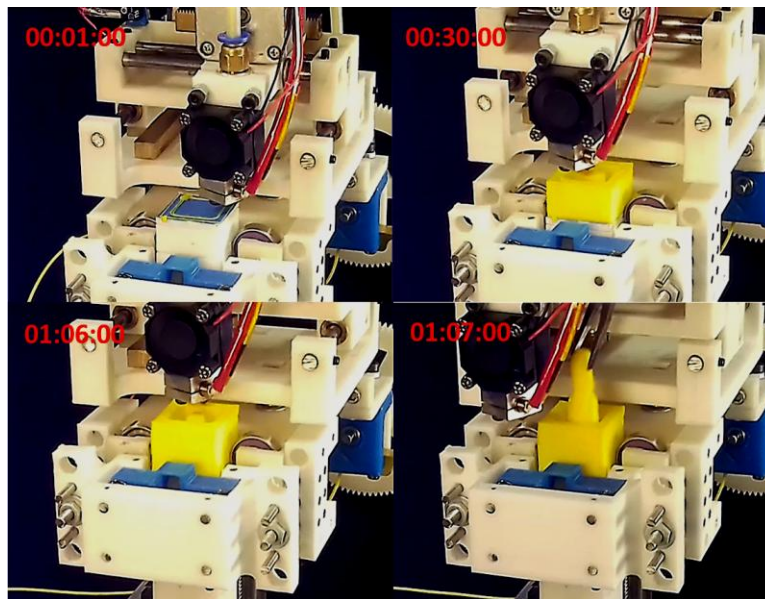


Figura 67 Time-lapse proceso de manufactura de un moai al centro de una columna.

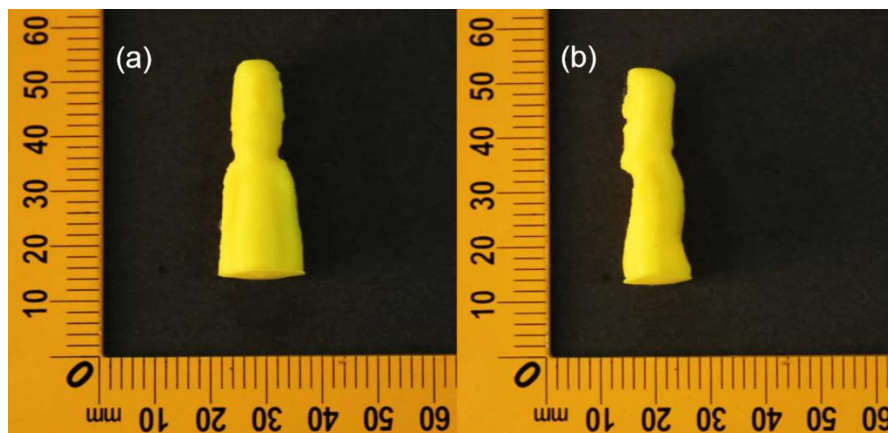


Figura 68 Moai impreso por Koala 3D. (a) Vista frontal; (b) vista lateral.

5.4 Caracterización

A continuación se describe la configuración experimental y procesamiento de datos que se siguió para caracterizar al prototipo.

5.4.1 Potencia y consumo energético.

Los resultados que se presentan en esta sección corresponden a la potencia y energía consumida durante la fabricación de una pieza de 1 cm^3 . Si bien los resultados obtenidos eran independientes de la velocidad de impresión utilizada se eligió analizar los datos obtenidos a velocidad mínima (ver Tabla 20) por la cantidad de puntos generados.

En la Figura 69 se puede observar la potencia consumida por elemento durante el proceso de manufactura. Al comienzo los motores paso a paso se encontraban energizados para bloquear el movimiento del extrusor mientras la resistencia calefactora consumía 35 W promedio para alcanzar la temperatura de impresión (ver Figura 62). Después de 120 segundos la punta del extrusor alcanzaba los 200°C y comenzaba la etapa de impresión, activándose los motores paso a paso y el controlador que regulaba la temperatura. Las constantes PID configuradas hacían que la potencia consumida por la resistencia calefactora oscilara entre los 5 y 40 W durante esta etapa. Una vez finalizada la impresión, la potencia era consumida por el conjunto de acciones necesarias para que la prensa/carro superior retornara al origen de su recorrido.

Los servos motores solo actúan en el periodo de transición para cerrar y abrir las prensas/carros mientras que en las otras etapas su potencia consumida era nula. Esto fue debido a que el sistema tornillo sinfín-tuerca conectado al motor se bloqueaba longitudinalmente al no rotar ninguna de sus partes.

La potencia máxima total consumida por el prototipo era de 50W y se alcanzaba durante el periodo de impresión. Este valor era cercano al 20% de la potencia máxima que podría consumir una Ultimaker 2 en operación [58]. Esto era debido a que normalmente las impresoras de escritorio utilizaban una segunda resistencia calefactora en la mesa de impresión para asegurar la adhesión de la pieza manufacturada, operando al doble de voltaje y corriente de lo que consumía Koala 3D.

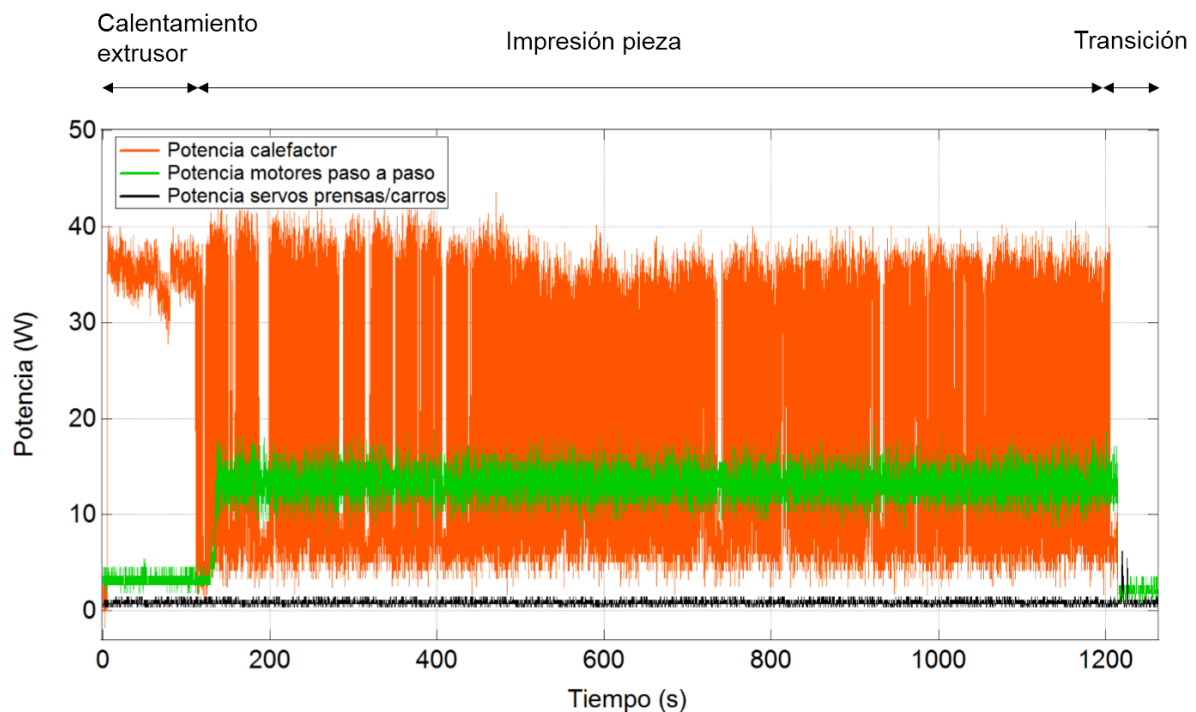


Figura 69 Potencia consumida por los elementos electro-mecánicos que son parte de Koala 3d al manufacturar un cubo de 1cm³. El proceso considera ambas etapas de manufactura: impresión y transición.

Al integrar la potencia en el tiempo se obtiene la energía consumida. En la Figura 70 Se presenta la energía porcentualmente por elemento durante la impresión de un cm³ a velocidad mínima. De un total de 36 kJ durante el proceso, más de la mitad es dedicado al sistema calefactor, seguida por los motores paso a paso con un 41% y solo un 6% suministrado a los servos motores.

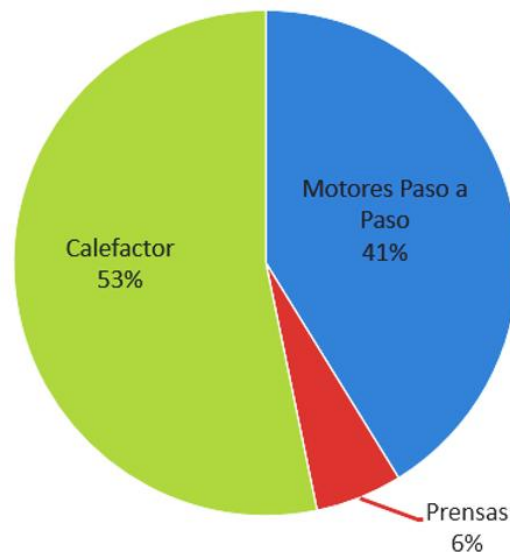


Figura 70 Gráfico de torta que presenta los porcentajes de energía consumida por cada elementos electromecánico que componen a Koala 3D.

5.4.2 Calidad superficial y tolerancia de objetos impresos.

A continuación se muestra los resultados obtenidos para medir la calidad superficial y tolerancia de objetos impresos por Koala 3D. En la sección 4.6.3 se especificó los parámetros utilizados en la producción de piezas y el porqué de la elección.

Si se comparan cualitativamente las muestras presentadas en la Figura 71, se visualizan mayores diferencias en los perfiles al modificar el espesor de capa que al variar la velocidad de impresión. En las muestras impresas a 0.3 mm de altura de capa (muestras 3 a 5) se marcaron más las cimas y valles que las muestras impresas a mayor resolución (muestras 1 y 2), por lo que se infiere que a menor altura de capa, mejor era la calidad superficial de la pieza. Debido a lo similar de los perfiles no fue posible estudiar que sucedía al variar la velocidad de impresión, estimándose la necesidad de ponderar numéricamente la característica mediante el método explicado en la sección 4.6.3.

En la Tabla 25 se observa que a menor velocidad de impresión se obtiene una rugosidad aritmética más baja. Esto es debido que al imprimir lento, el material extruido tiene el tiempo de enfriarse y presentar una mayor resistencia al extrusor en movimiento, el cual tiende a jalarlo y deformarlo. Como se puede ver en la Figura 71, las capas en la muestra 5 (20 mm/s) se encuentran distribuidas homogéneamente respecto a la línea media del perfil mientras que en la muestra 4 (150 mm/s) las capas se posicionan de forma irregular.

El mejor resultado se obtuvo para la muestra 2 a pesar de no ser impresa a alta resolución, lo cual va en contradicción con lo esperado y analizado cualitativamente. Esto es debido a que la rugosidad aritmética es un parámetro que no captura la calidad superficial de la pieza de forma correcta cuando la línea media de cada capa (surco) oscila mucho entre una y otra, tal como es el caso de la muestra 1.

Existen métodos que utilizan algoritmo genético para la medición de la calidad superficial y que entregan un valor preciso en objetos manufacturados mediante impresión 3d [59]. El empleo de un método más complejo para cuantificar este parámetro escapa del alcance del presente trabajo y se estima que la rugosidad superficial cumple con el objetivo de caracterizar el prototipo y las muestras producidas.

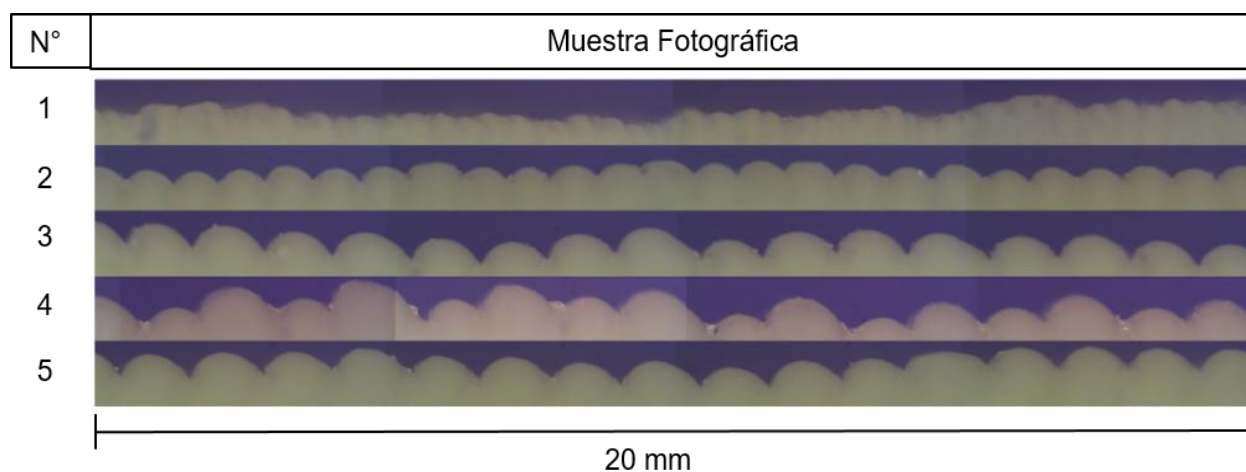


Figura 71 Fotografías microscópicas de las muestra manufacturadas a distinto espesor de capa y velocidad de impresión.

Tabla 25 Muestra y parámetros que se utilizaron para su impresión

N° probeta	Altura de capa (mm)	Velocidad de impresión (mm/s)	Rugosidad aritmética (μm)
1	0.1	50	23.76
2	0.2	50	16.57
3	0.3	50	30.2
4	0.3	150	38.09
5	0.3	20	29.91

Se manufacturó una pieza de prueba en Koala 3D y en otras dos impresoras que funcionaban bajo el mismo método de fabricación (ver Figura 72), comparando las principales dimensiones del modelo digital diseñado con las del modelo físico manufacturado. En la Tabla 26 se presentan las tolerancias en cada uno de los ejes cartesianos que definían la posición del extrusor dentro del volumen de impresión.

Las menores desigualdades entre ambos modelos se obtuvieron en la coordenada Z, con un error 10 veces menor al del plano X/Y. Esta diferencia es debido a que la resolución de manufactura depende de la posición del extrusor respecto a la pieza. En el plano X/Y la resolución se encuentra definida por el diámetro de la punta del extrusor mientras que para el eje z puede ser un valor entre la mitad y un cuarto de este diámetro. El programa “slicer”, al generar el código G, redondea las dimensiones de la pieza a valores múltiplos de la resolución permitida por la punta del extrusor.

Al comparar las tolerancias en el plano X/Y, la pieza manufacturada por Koala presentó el mayor error dimensional. Se piensa que esto es debido a la inexactitud del mecanismo de posicionamiento del extrusor, ya que el engranaje al modificar su sentido de rotación cambia el punto de contacto con el diente de la cremallera, generándose una holgura y por lo tanto una diferencia entre lo que debería avanzar el extrusor con lo que realmente se desplazó.

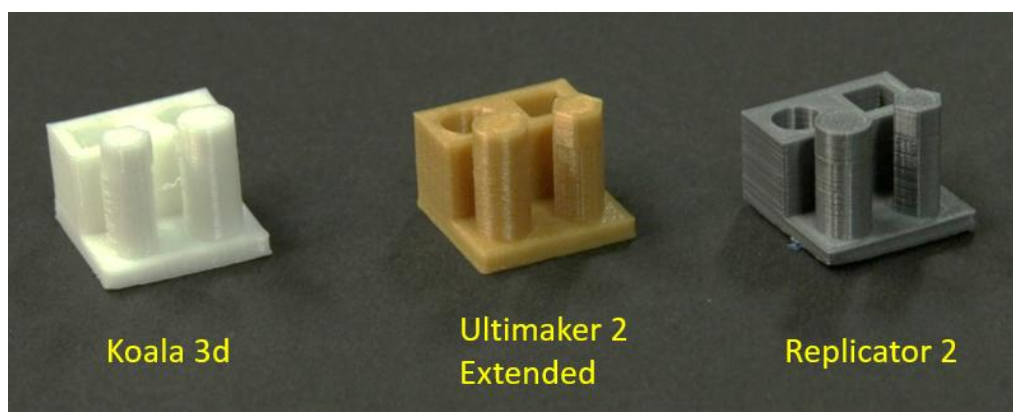


Figura 72 Piezas impresas para comparar las tolerancias entre Koala y dos impresoras 3D de escritorio populares dentro del mercado.

Tabla 26 Valores de Tolerancias según eje cartesiano de manufactura

Máquina	Tolerancia en x/y (mm)	Tolerancia en z (mm)
Koala 3D	0.5	0.08
Ultimaker 2	0.2	0
Replicator 2	0.4	0.02

Las tolerancias de las columnas impresas en la prueba de desempeño (ver sección 4.5) presentaban los mismos valores en el plano X/Y que los presentados en la Tabla 26, es decir, el modelo virtual se dibujó de 30x30 mm y luego de manufacturado media 30.5x30.5 mm. Fue difícil verificar la tolerancia en Z debido a que las muestras estaban curvas (ver Figura 73).

En la Tabla 27 se presenta la posición de la columna en X fijada en el programa “slicer” y el ángulo de deflexión que se obtuvo para cada prueba. No se presenta la coordenada Y ya que no se observó

una curvatura en esa dirección, por lo que se infiere que esta se encontraba bien calibrada respecto al centro de la base de impresión.

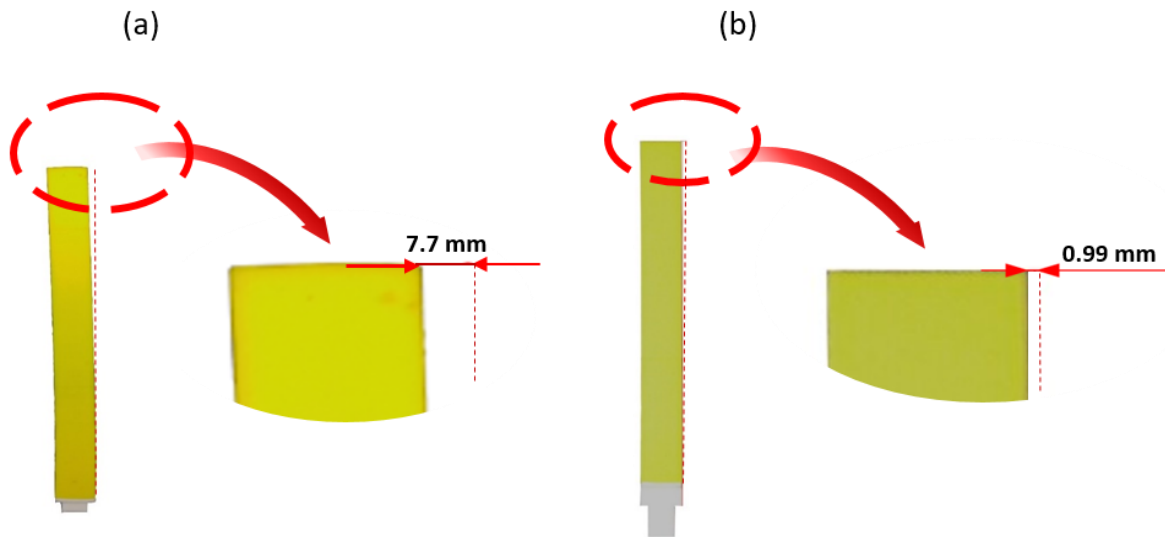


Figura 73 Deflexión en columnas impresas de altura igual a 200 mm.(a) Columna con deflexión 7.7 mm en el extremo libre; (b) Columna con deflexión 0.99mm en el extremo libre.

Tabla 27 Posición x en Repetier y ángulo de deflexión de ambas pruebas realizadas

Prueba	Posición x en Repetier Host (mm)	Ángulo de deflexión
A	7.1	1.82
B	7.7	0.223

5.4.3 Oscilación del prototipo durante el proceso de manufactura.

A continuación se presentan los resultados obtenidos al seguir el procedimiento descrito en la sección 4.6.4.

La Figura 74a y b presentaban comportamientos similares: cada minuto de impresión se producía una oscilación de baja altura seguida de una mayor. Este fenómeno es debido a que el extrusor comenzaba imprimiendo los contornos de cada capa del objeto a una velocidad medianamente constante para luego imprimir a una velocidad variable el relleno de la sección con líneas en un ángulo de 45°, provocando una mayor oscilación de la columna en esta última etapa. Las vibraciones en el eje Z (Figura 74c) presentaban baja magnitud y tiene una forma escalonada debido a que el prototipo subía al terminar la manufactura de cada capa hasta completar el milímetro de

columna (3 capas en total). Se obtuvieron tendencias similares al realizar la prueba a otras alturas (ver Anexo C: Datos experimentales).

El ruido presente en las mediciones era producto de la sensibilidad del Optitrack a los brillos que producían los elementos metálicos del prototipo, tal como, engranajes, cremalleras, ejes guías y motor paso a paso. En las mediciones a mayor altura se producían más interferencia debido a la cercanía del prototipo con el instrumento de medición.

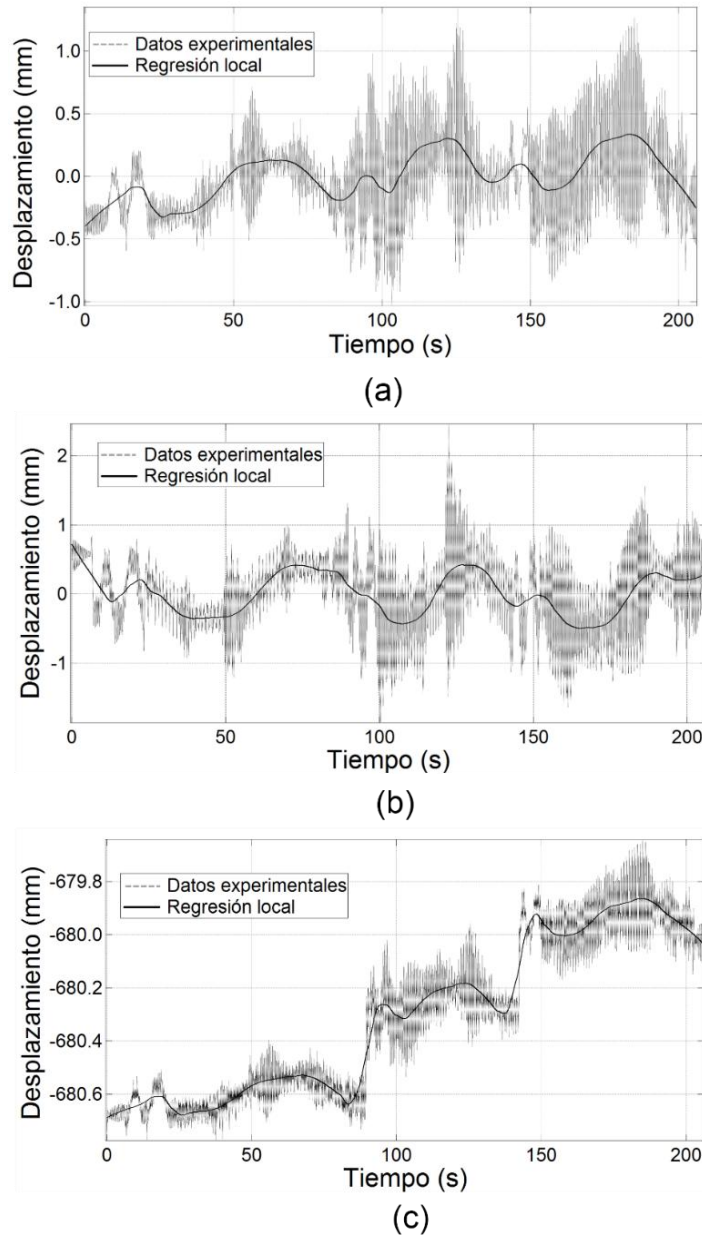


Figura 74 Oscilaciones a una altura de manufactura igual a 610mm con una velocidad de impresión estándar. (a) Oscilación en la dirección x; (b) oscilación en la dirección y; (c) oscilación en la dirección z.

En la Figura 75 se presenta un resumen de los valores eficaces (RMS) de las vibraciones producida en los ejes que se estimó podrían causar fatiga estructural y una falla en el proceso de impresión. Ambas variables estudiadas presentaban una tendencia a aumentar a medida que el prototipo subía de nivel. Esto es debido que a mayor distancia de aplicación de una perturbación, aumenta la deflexión y momento torsor en el extremo libre y empotramiento de la columna, respectivamente, provocando que la tensión máxima aplicada en la columna se aproxime a la tensión de fluencia del material (PLA).

Al comparar las líneas de tendencia cuadrática de ambos datos experimentales, se observa una tasa de crecimiento mayor en un 50% en la dirección x respecto a la otra dirección. Debido a como se dispuso Koala 3D al operar, el vector peso no se encontraba alineado con el plano de simetría del prototipo, lo que generaba un desbalance que propiciaba la oscilación en la dirección x. También la orientación del prototipo provocó que la ubicación de la prensa/carro superior influyera más en este sentido, esto se puede verificar en la diferencia presentada entre los valores obtenidos antes y después de la transición, en contraste con los valores de la oscilación y, los cuales se encuentran traslapados.

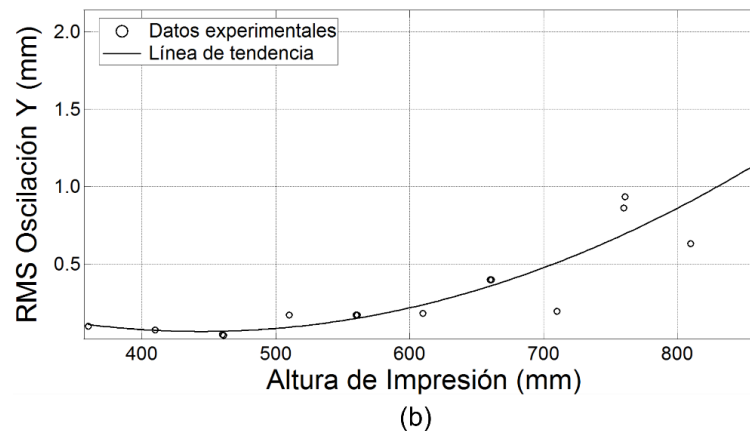
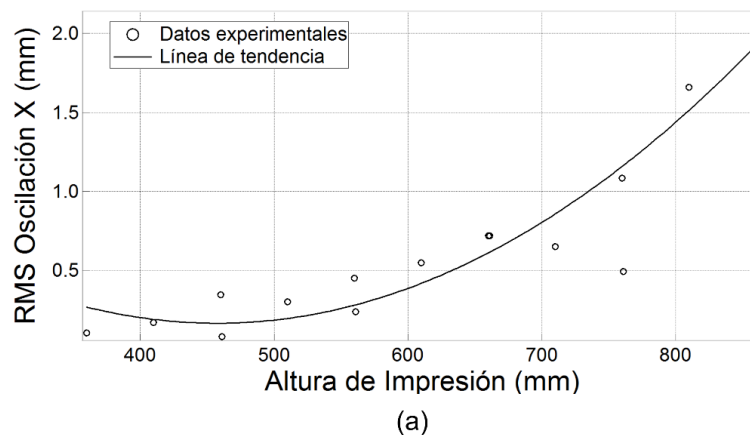


Figura 75 RMS para distintas alturas de impresión en la dirección (a) x e (b) y.

Ya que las probabilidades de que falle primero la columna en la dirección x son altas, esta se estudiará y someterá al sistema de ecuaciones presentado en la sección 4.6.4. La relación entre el valor eficaz y la altura en esta dirección viene dada por la línea de tendencia cuadrática presentada en la ecuación 5.1.

$$RMS_x = 2.4325 - 0.0099h + 1.1 \times 10^{-5}h^2 \quad (5.1)$$

Al resolver el sistema de ecuaciones considerando los parámetros del material presentados en la Tabla 28 se obtiene una altura máxima de impresión igual a 6,6 metros. Este es un valor teórico y aproximado ya que se supuso que el comportamiento de las oscilaciones seguiría con esa misma tendencia hasta que acabase la manufactura de la pieza y que la tensión de fatiga era igual a la tensión ultima del material [60].

Tabla 28 Resultados obtenidos de la aplicación de las ecuaciones que modelan las oscilaciones de la columna manufacturada

Parámetro	Valor
Módulo elástico PLA(GPa)[49]	3.3
Tensión Ultima PLA (MPa) [49]	48.5
Altura máxima de impresión (m)	6.6

Se debe tener presente que la altura máxima de impresión estimada es para el caso particular de una columna de PLA con la geometría especificada en la sección 4.6.4, es por eso que en trabajos futuros se espera que se prueben distintas geometrías y materiales más resistentes a la flexión. También para lograr una impresión rápida y de calidad es aumentar la velocidad de impresión, pero eliminando en parte las oscilaciones, se recomienda implementar un contrapeso dinámico, que con un controlador PID determine su posición para mantener el peso del prototipo alineado con el centro de la columna.

Capítulo 6

Conclusiones

El objetivo principal del presente trabajo fue exitosamente logrado ya que se diseñó, fabricó y caracterizó una impresora 3d que es capaz de manufacturar objetos de mayor altura que su propio tamaño. En su desarrollo se consideró las principales tendencias utilizadas en la implementación de impresoras 3d de escritorio con la idea de aportar a la generación de una máquina universal de fabricación.

Fue posible desarrollar un prototipo fácil de implementar, bien documentado y con un precio accesible al consumidor promedio. El diseño y manufactura se planificaron tal que se utilizaran repuestos disponibles en el mercado y piezas manufacturadas mediante herramientas de fabricación digital. La información para la manufactura y operación se encuentra disponible en la red con el objetivo de incentivar su uso y continuo desarrollo por parte de la comunidad hágalo-usted-mismo. El costo del prototipo es de 1010 USD, cercano al precio de las impresoras 3d que actualmente se venden en el mercado.

A pesar de que Koala 3D no posee adjuntos todos los mecanismos recomendados para producir piezas de calidad óptima, la rugosidad y tolerancias se encuentran dentro del orden al contrastarlas con piezas producidas por otras máquinas más sofisticadas. El prototipo al no equiparse con ventiladores a la salida de material, mesa de impresión calefaccionada ni sistema de auto nivelación consume la mitad de energía que impresoras 3d estáticas que si tienen implementados los elementos anteriormente mencionados. Este punto es muy importante si es que en un futuro se desea independizar energéticamente al prototipo mediante el uso de baterías y así facilitar su portabilidad.

Se pudo observar que el desplazamiento en el extremo libre de la columna a medida que esta se va manufacturando aumenta a medida que la estructura se hace más esbelta, causando a cierta altura la falla mecánica del material. En cuanto a los valores entregados se debe tener presente que la altura máxima de impresión se estimó para el caso particular de una columna de sección cuadrada de 30x30 mm con un espesor de pared de 5mm por lo que se cree es posible tener razón de altura y de volumen de manufactura mayores a las indicadas, ya sea modificando la geometría o material del objeto impreso. También se aconseja que en un trabajo futuro se implemente un sistema que mantenga el centro de masa del prototipo al centro de la columna impresa.

Se considera que con el trabajo realizado se dan las bases para continuar hacia la generación de una impresora que sea capaz de moverse libremente en el espacio y así poder conseguir una razón de volumen de manufactura superior a la unidad y aprovechar esta ventaja competitiva.

Bibliografía

- [1] X. Yan and P. Gu, “A review of rapid prototyping technologies and systems,” *CAD Comput. Aided Des.*, vol. 28, no. 4, pp. 307–318, 1996.
- [2] S. Ashley, “Rapid prototyping systems,” *Mech. Eng.*, vol. 113, no. 4, p. 34, 1991.
- [3] R. Noorani, *Rapid prototyping: principles and applications*. 2005.
- [4] K. V. Wong and A. Hernandez, “A review of additive manufacturing,” *ISRN Mech. Eng.*, vol. 2012, pp. 1–10, 2012.
- [5] M. Ratto and R. Ree, “3D printing and social change,” *First Monday*, vol. 17, no. 7, 2012.
- [6] S. S. Crump, “Apparatus and method for creating three-dimensional objects,” 1989.
- [7] C. W. Hull, “Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography,” 1986.
- [8] M. K. Hod Lipson, *Fabricated: the new world of 3D printing*. 2013.
- [9] T. Vilbrandt, E. Malone, H. Lipson, and A. Pasko, “Universal desktop fabrication,” *Heterog. objects Model. Appl.*, vol. 4889, no. 1, pp. 259–284, 2008.
- [10] E. Malone and H. Lipson, “Fab@Home: the personal desktop fabricator kit,” *Rapid Prototyp. J.*, vol. 13, no. 4, pp. 245–255, 2007.
- [11] R. Jones, P. Haufe, E. Sells, and P. Irvani, “RepRap—the replicating rapid prototyper,” *Robot. Self-X Syst.*, vol. 29, no. 1, pp. 177–191, 2011.
- [12] J. Korb, “Robots Acting Locally and Building Globally,” *Science (80-.)*, vol. 343, no. 6172, 2014.
- [13] P. E. Ceruzzi, *A history of modern computing*. MIT Press, 2003.
- [14] N. A. Gershenfeld, *Fab : the coming revolution on your desktop--from personal computers to personal fabrication*. Basic Books, 2007.
- [15] C. Mota and Catarina, “The rise of personal fabrication,” in *Proceedings of the 8th ACM conference on Creativity and cognition - C&C '11*, 2011, p. 279.
- [16] “IFTF: Manufacturing: Do It Yourself?” [Online]. Available: <http://www.iftf.org/our-work/global-landscape/ten-year-forecast/2007-ten-year-forecast/manufacturing-do-it-yourself>. [Accessed: 08-Jan-2017].
- [17] S. L. Martinez and G. Stager, *Invent to learn : making, tinkering, and engineering in the classroom*. 2013.
- [18] “A factory on your desk | The Economist.” [Online]. Available: <http://www.economist.com/node/14299512>. [Accessed: 08-Jan-2017].
- [19] “Best 3D Printers of 2017 | Reviews & Prices | 3D Hubs.” [Online]. Available:

- <https://www.3dhubs.com/best-3d-printer-guide>. [Accessed: 08-May-2017].
- [20] “The MakerBot Replicator+ | MakerBot.” [Online]. Available: <https://www.makerbot.com/replicator/>. [Accessed: 20-Jan-2017].
- [21] “Form 2 Desktop SLA 3D Printer – Formlabs.” [Online]. Available: https://formlabs.com/3d-printers/form-2/?utm_content=main-nav. [Accessed: 24-Feb-2017].
- [22] G. C. Haynes *et al.*, “Rapid pole climbing with a quadrupedal robot,” in *2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2009, pp. 2767–2772.
- [23] A. Baghani, M. N. Ahmadabadi, and A. Harati, “Kinematics Modeling of a Wheel-Based Pole Climbing Robot (UT-PCR),” in *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2099–2104.
- [24] M. Tavakoli, A. Marjovi, L. Marques, and A. T. de Almeida, “3DCLIMBER: A climbing robot for inspection of 3D human made structures,” in *2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2008, pp. 4130–4135.
- [25] “HR-MP20 Magnetic Platform Lifting Vehicle | Helical Robotics.” [Online]. Available: <http://www.helicalrobotics.com/node/47>. [Accessed: 14-Apr-2017].
- [26] “Minibuilders.” [Online]. Available: <http://robots.iaac.net/>. [Accessed: 11-May-2017].
- [27] “Geoweaver — Maeshiro Design.” [Online]. Available: <http://maeshirodesign.com/geoweaver/>. [Accessed: 11-May-2017].
- [28] “3&D Bot | NEXT.” [Online]. Available: <http://next.dad.puc-rio.br/project/3d-bot/>. [Accessed: 11-May-2017].
- [29] “Arduino.cl.” [Online]. Available: <http://arduino.cl/>. [Accessed: 01-Mar-2017].
- [30] “Marlin - RepRapWiki.” [Online]. Available: <http://reprap.org/wiki/Marlin>. [Accessed: 08-May-2017].
- [31] “Designfax – Technology for OEM Design Engineers.” [Online]. Available: <http://www.designfax.net/cms/dfx/opens/article-view-dfx.php?nid=4&bid=373&et=featurearticle&pn=01>. [Accessed: 10-Apr-2017].
- [32] “Fused Deposition Modeling: Most Common 3D Printing Method.” [Online]. Available: <http://www.livescience.com/39810-fused-deposition-modeling.html>. [Accessed: 01-Apr-2017].
- [33] “RepRapWiki.” [Online]. Available: http://reprap.org/wiki/RepRap_Options. [Accessed: 15-Apr-2017].
- [34] “Bowden or Direct? A Primer on Extruder Styles.” [Online]. Available: <http://www.fabbaloo.com/blog/2015/11/11/bowden-or-direct-a-primer-on-extruder-styles>. [Accessed: 29-Mar-2017].
- [35] J. Vaughan, *Web scale discovery services*, vol. 50, no. 5. ALA TechSource, 2011.

- [36] A. Visioli and G. Legnani, "On the trajectory tracking control of industrial SCARA robot manipulators," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 49, no. 1, pp. 224–232, 2002.
- [37] "Piccolo, the tiny CNC-bot." [Online]. Available: <http://www.piccolo.cc/>. [Accessed: 29-Apr-2017].
- [38] B. Chu, K. Jung, C.-S. Han, and D. Hong, "A survey of climbing robots: Locomotion and adhesion," *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, vol. 11, no. 4, pp. 633–647, Aug. 2010.
- [39] "What is the best layer height for your printer - 3D Modular Systems." [Online]. Available: <http://doc.3dmodularsystems.com/what-is-the-best-layer-height-for-your-printer/>. [Accessed: 08-Apr-2017].
- [40] "Ultimaker Original+." [Online]. Available: <https://ultimaker.com/en/products/ultimaker-original>. [Accessed: 01-Apr-2017].
- [41] "Zortrax M200 3D Printer | Valued by THOUSANDS of users." [Online]. Available: <https://zortrax.com/printers/zortrax-m200/>. [Accessed: 08-Apr-2017].
- [42] "Cyborg Geared Bowden Extruder by danilobsb." [Online]. Available: <http://www.thingiverse.com/make:77521>. [Accessed: 08-May-2017].
- [43] "Longer X motor support | RepRapPro Tricolour Mendel by twisterss - Thingiverse." [Online]. Available: <http://www.thingiverse.com/thing:129205>. [Accessed: 20-Jan-2017].
- [44] "Alien Roller Coaster by stevedwin - Thingiverse." [Online]. Available: <http://www.thingiverse.com/thing:154607>. [Accessed: 08-Mar-2017].
- [45] "C93700 Bearing Bronze | National Bronze Mfg." [Online]. Available: http://www.nationalbronze.com/C93700_Bearing_Bronze.php. [Accessed: 15-Apr-2017].
- [46] F. P. (Ferdinand P. Beer, E. R. (Elwood R. Johnston, P. J. Cornwell, and B. P. Self, "Vector mechanics for engineers. Dynamics," in *McGraw-Hill Book Company Inc.*, McGraw-Hill, 1977, pp. 435–540.
- [47] E. Gustafsson, "Investigation of friction between plastic parts," Chalmers University of Technology, 2013.
- [48] C. Zweben, W. Smith, and M. Wardle, "Test Methods for Fiber Tensile Strength, Composite Flexural Modulus, and Properties of Fabric-Reinforced Laminates," in *Fifth Conference on Composite Materials: Testing and Design*, 1979, pp. 228–262.
- [49] B. M. Tymrak, M. Kreiger, and J. M. Pearce, "Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions," *Mater. Des.*, vol. 58, pp. 242–246, 2014.
- [50] M. Avcar, "Free Vibration Analysis of Beams Considering Different Geometric Characteristics and Boundary Conditions," *Int. J. Mech. Appl.*, vol. 4, no. 3, pp. 94–100, 2014.
- [51] "Características mecánicas del acero." [Online]. Available: <http://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn100.html>. [Accessed: 01-Apr-2017].

- [52] R. G. Budynas and K. J. Nisbett, “Shigley’s mechanical engineering design,” 2011, pp. 400–408.
- [53] “Friction and Friction Coefficients.” [Online]. Available: http://www.engineeringtoolbox.com/friction-coefficients-d_778.html. [Accessed: 18-Apr-2017].
- [54] “How to Succeed when printing in PLA.” [Online]. Available: <http://www.matterhackers.com/articles/how-to-succeed-when-printing-in-pla;> <https://all3dp.com/3d-printing-speed/>. [Accessed: 25-Apr-2017].
- [55] “Ultimaker 2+ 3D Printer.” [Online]. Available: <https://ultimaker.com/en/products/ultimaker-2-plus>. [Accessed: 22-May-2017].
- [56] “Troubleshooting Guide to 26 Common 3D Printing Problems | All3DP.” [Online]. Available: <https://all3dp.com/1/common-3d-printing-problems-troubleshooting-3d-printer-issues/>. [Accessed: 22-May-2017].
- [57] “Print Quality Troubleshooting Guide | Simplify3D Software.” [Online]. Available: <https://www.simplify3d.com/support/print-quality-troubleshooting/>. [Accessed: 22-Aug-2017].
- [58] “Specification sheet Ultimaker 2+.”
- [59] A. Boschetto, V. Giordano, and F. Veniali, “Surface roughness prediction in fused deposition modelling by neural networks,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 67, no. 9–12, pp. 2727–2742, Aug. 2013.
- [60] R. G. (Richard G. Budynas, J. K. Nisbett, and J. E. Shigley, *Shigley’s mechanical engineering design*, 9th ed. in SI units. Singapore: McGraw-Hill, 2011.

Anexo A: Recursos utilizados

Partes manufacturadas.

Partes Impresas 3D			
Parte Impresora	Precio material gastado (US\$)	Precio uso máquina (US\$)	Precio total (US\$)
Base parte impresora	4.7	33.7	38.3
Cuerpo movil Y	2.8	25.1	27.8
Cuerpo movil X	0.9	7.6	8.4
Parte Trepadora			
Mordaza fija superior	7.8	57.3	65.2
Mordaza fija inferior	7.6	55.9	63.5
Base sistema motriz	11.3	97.0	111.3
Mordazas móviles	21.1	60.7	81.8
Carro auxiliar	16.7	119.8	136.5
Porta electrónica	0.7	5.7	6.3
Impulsor			
Cuerpo del impulsor	2.5	19.2	21.6
Engranaje pequeño	0.1	1.9	2.1
Engranaje grande	0.9	7.8	8.7
Partes Mecanizadas			
Parte impresora	Precio material gastado (US\$)	Precio uso máquina (US\$)	Precio total (US\$)
Buje para eje 6 mm	4	31	35
Engranaje cuerpo móvil	10	20	30
Cremallera	8	42	50
Parte trepadora			
Buje para eje 8 mm	4	31	35
Buje para eje 6 mm	4	36	40
Buje para eje 4 mm	4	31	35

Partes compradas.

Parte Impresora	Cantidad	Precio Unitario (US\$)	Precio total (US\$)
Extrusor J Head E3D	1	9.5	9
Eje acero plata D6xL300mm	1	4	4
Finales de carrera	3	3	9
Motor paso a paso Nema 17	2	8.6	17
Parte Trepadora			
Servo motor 3kg	4	5	20
Motor Nema 17 con reducción 5:1	1	31.3	31
Tornillo sinfín D8xL300mm	1	4.8	5
Tuerca Acme 8 mm	1	1	1
Rodamiento radial plástico 5 mm	6	1	6
Rodamiento radial 6 mm	18	1	18
Impulsor			
Sistema de apriete	1	15.9	15.9
Eje acero plata D6xL200mm	2	1.1	2.2
Rodamiento radial 5 mm	1	0.5	0.5
Motor paso a paso Nema 17	1	8.6	8.6
Electronica			
Ramps 1.4+ controladores	1	30	30
Arduino Mega 2560	1	35	35
Ventilador 40x40mm 12v	1	1.0	1.0

Resumen.

Piezas manufacturada (US\$)	796.5
Piezas compradas (US\$)	214.1
Total piezas (US\$)	1010.6

Anexo B: Códigos

Código arduino para medir corriente consumida por el prototipo.

```
const int analogIn = A0;
int mVperAmp = 66; // constante para sensor AC712
int RawValue= 0;
int ACSoffset = 2500;
double Voltage = 0;
double Amps = 0;
void setup(){
Serial.begin(9600);
}
void loop(){
RawValue = analogRead(analogIn);
Voltage = (RawValue / 1024.0) * 5000; // Obtención mV
Amps = ((Voltage - ACSoffset) / mVperAmp);
Serial.print(millis()); // Muestra el voltaje medido
Serial.print(",");
Serial.println(Amps,10); // Muestra la corriente medida
delay(100); //2500
}
```

Código arduino para medir voltaje consumido por el prototipo.

```
float v1 = 4.98; // valor real de la alimentacion de Arduino, Vcc
float r1 = 979.9; // 1M
float r2 = 428.2; // 100K

void setup() {
Serial.begin(9600);
Serial.print(((int)(v1 / (r2 / (r1 + r2)))));
Serial.println("");
delay(2000);
}
void loop() {
float v = (analogRead(0) * v1) / 1024.0;
float v2 = v / (r2 / (r1 + r2));
Serial.println(v2);
delay(100);
}
```

Código matlab para medir rugosidad aritmética.

```
clc
a=imread('total2.png');
b=rgb2gray(a);
c=b<100;
subplot(3,1,1);
imshow(c);
[fil,col]=size(c);
j=1;
graf=zeros(1,col);
while(j<=col)
    t= fil-sum (c(:,j));
    graf(1,j)=t;
    j=j+1;
end
subplot(3,1,2);
plot(graf)
axis([0 col 0 fil])

m=mean(graf);
mz=abs(graf-m);
RApx=mean(mz);
RAMicron = RApx*0.48837

alcuadrado= (graf-m).^2;
RMS=mean(alcuadrado)
```

Código G implementado para realizar transición.

```
G28 X ; home x
G28 Y; home y
;apreta prensa inferior
M42 P5 S200
G4 P2000
M42 P5 S255
;desapreta prensa superior
M42 P4 S30
G4 P1050
M42 P4 S255
;;home en z
G28 Z
;apreta prensa superior
```

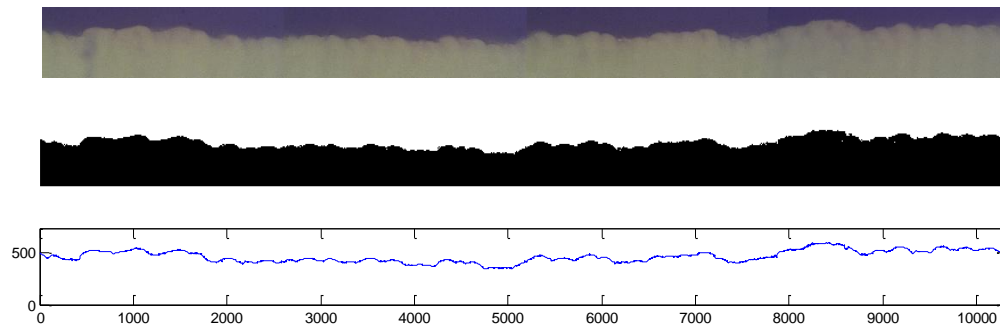
M42 P4 S200
G4 P4000
M42 P4 S255
;apreta prensa superior por segunda vez para asegurar
M42 P4 S200
G4 P2000
M42 P4 S255

;desapreta prensa inferior
M42 P5 S30
G4 P600
M42 P5 S255
;offset
G92 Z0 ; SET Z IN ZERO
G1 Z1.7 F3000.000

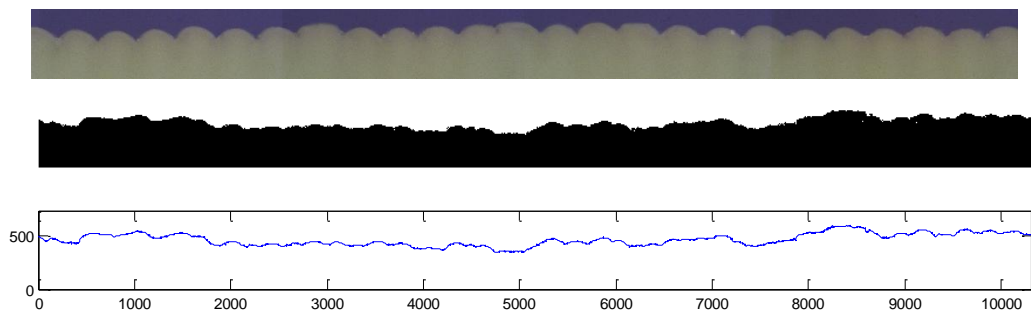
Anexo C: Datos experimentales

Datos experimentales Sección 5.4.2

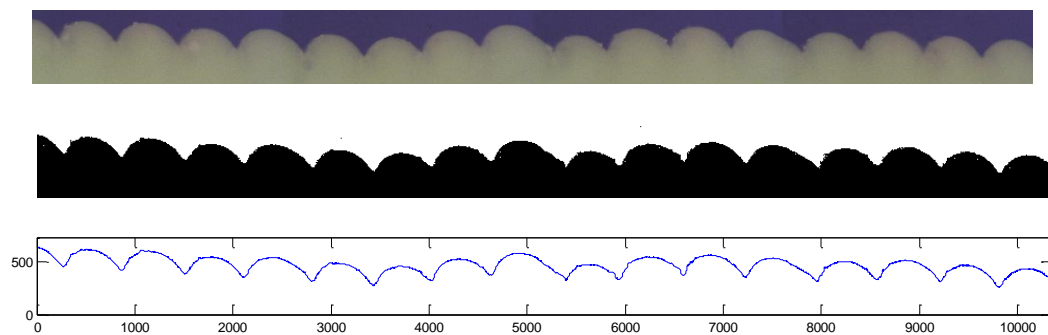
Muestra 1 y postproceso con matlab



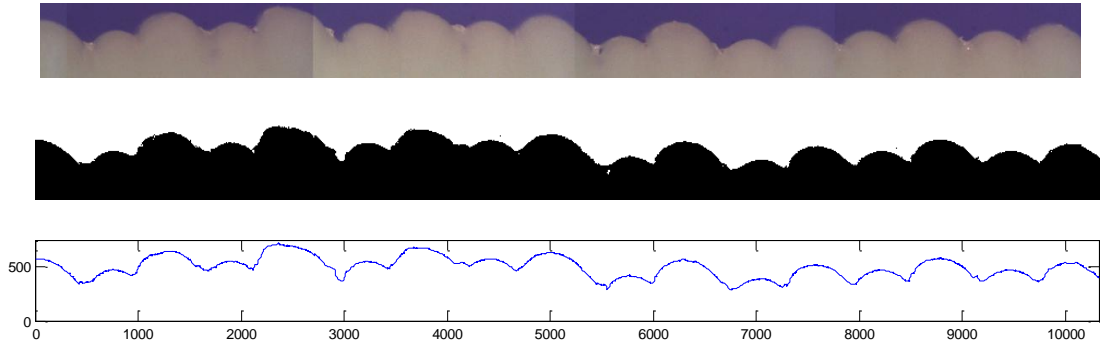
Muestra 2 y postproceso con matlab



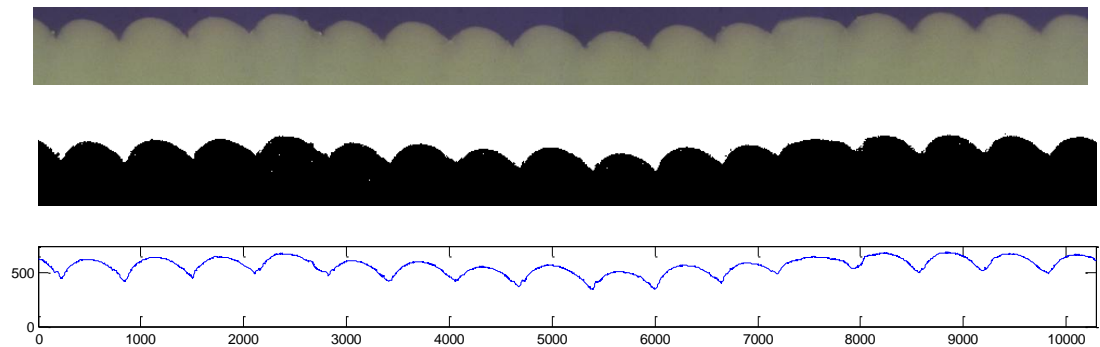
Muestra 3 y postproceso con matlab



Muestra 4 y postproceso con matlab

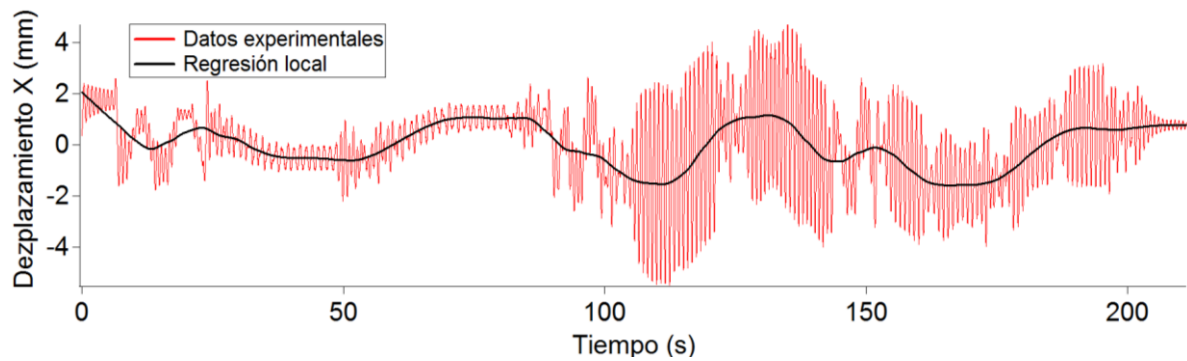


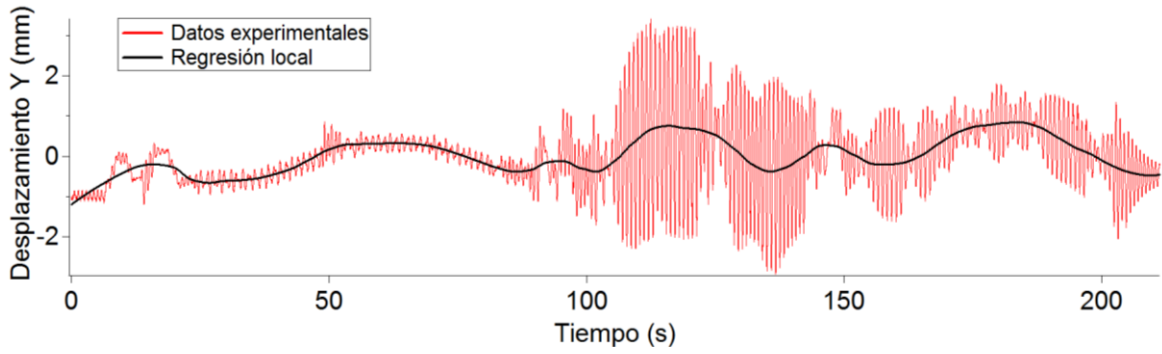
Muestra 5 y postproceso con matlab



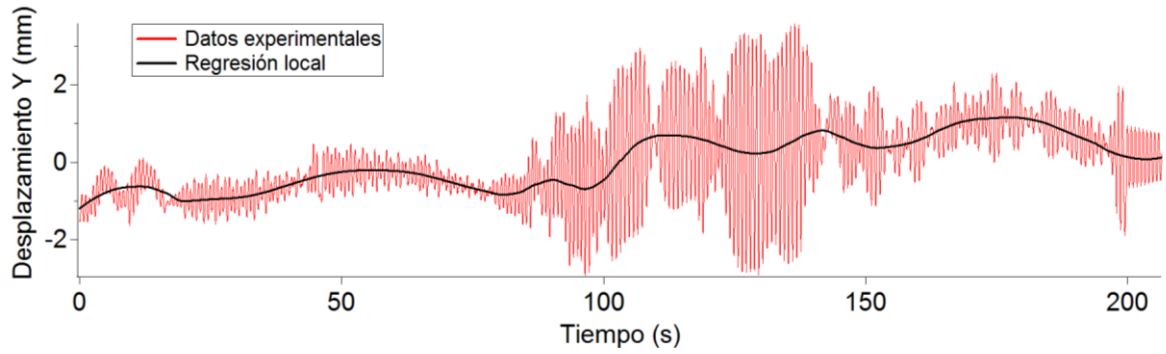
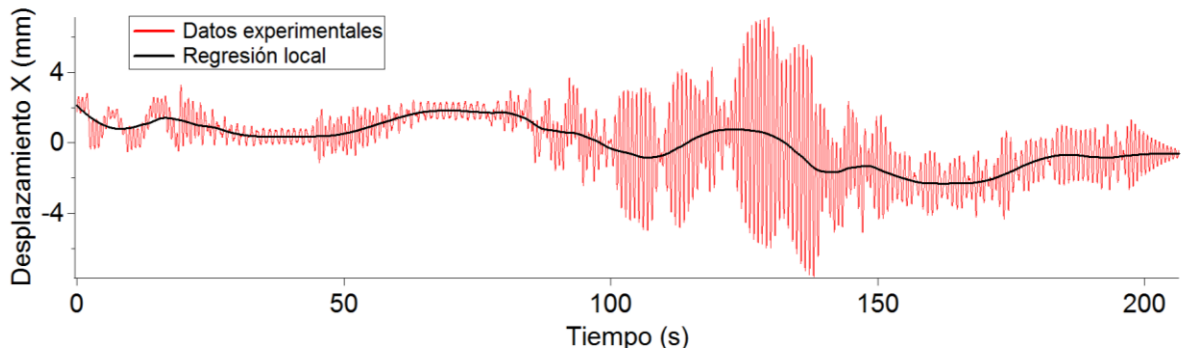
Datos experimentales Seccion 5.4.3

- Altura $Z=0$ mm; Mecanismo de sujeción superior arriba

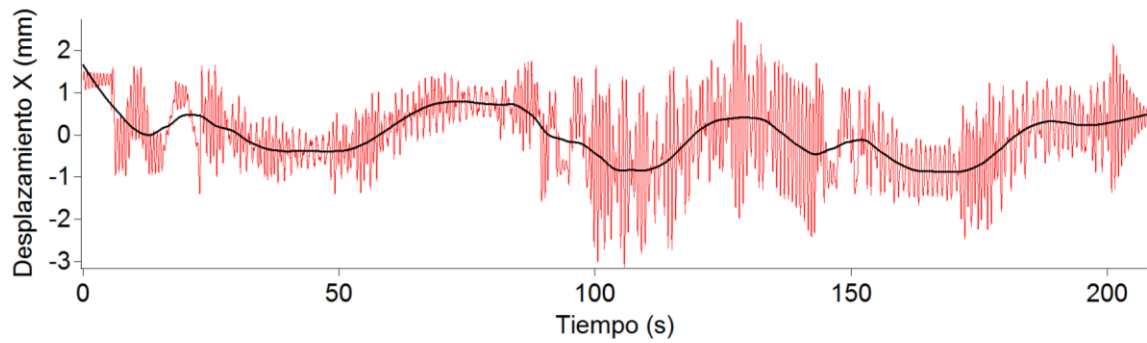


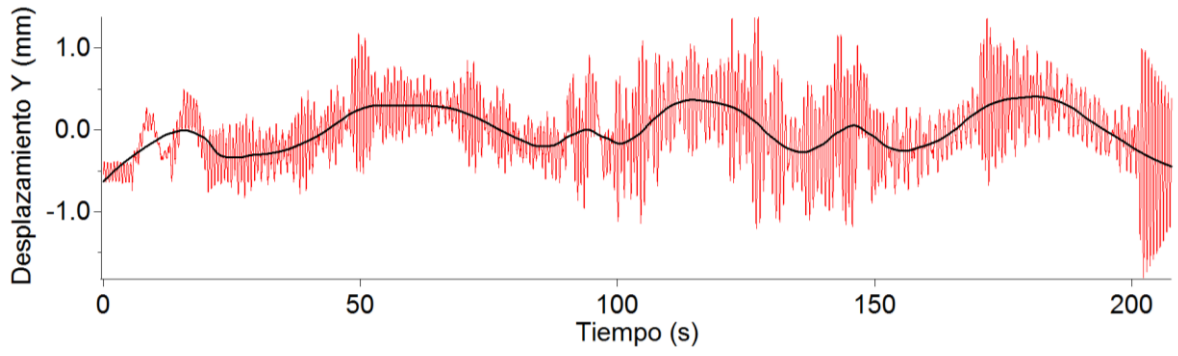


- Altura Z=50 mm; Mecanismo de sujeción superior al medio

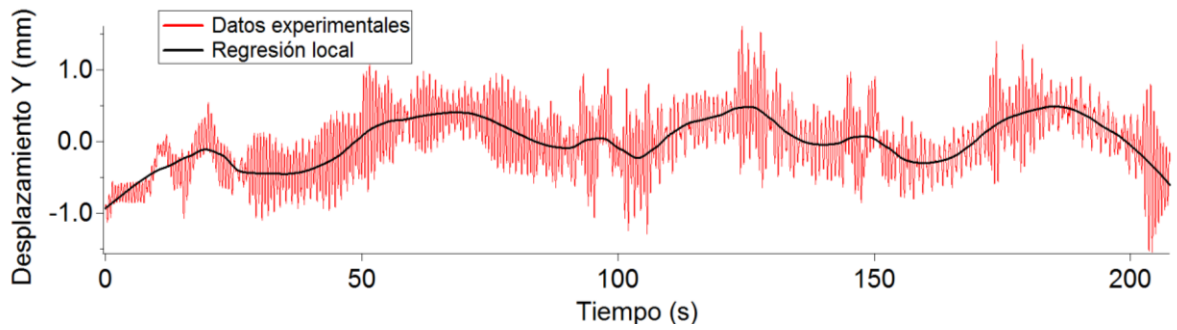
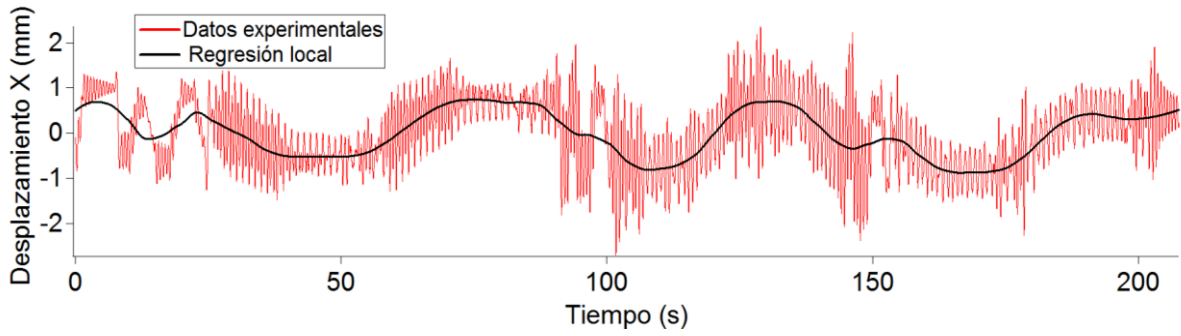


- Altura Z=100 mm; Mecanismo de sujeción superior abajo

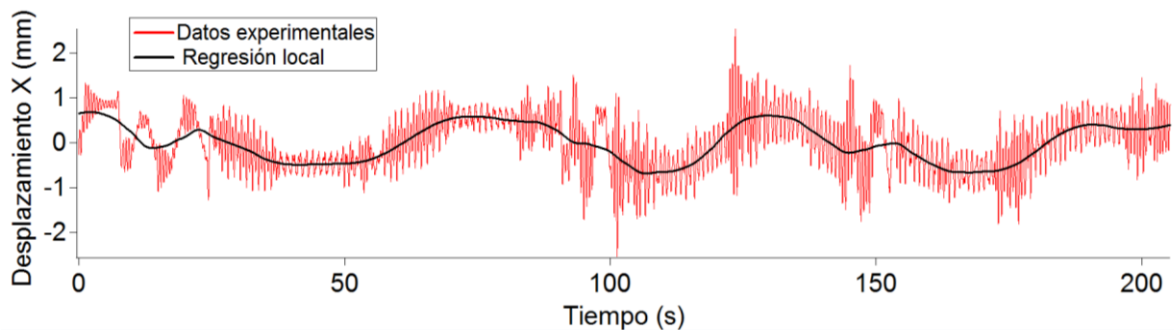


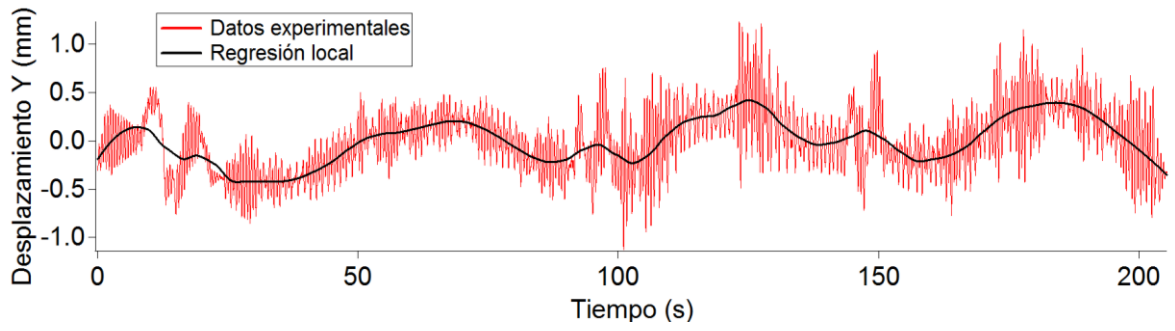


- Altura Z=150 mm; Mecanismo de sujeción superior al medio

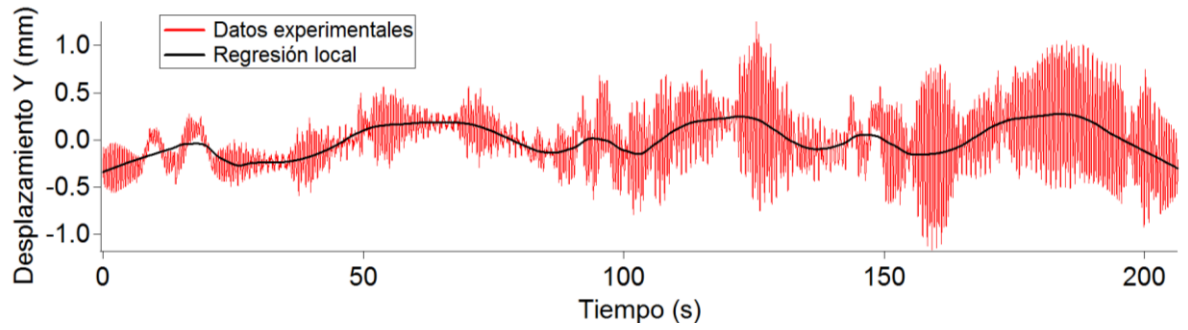
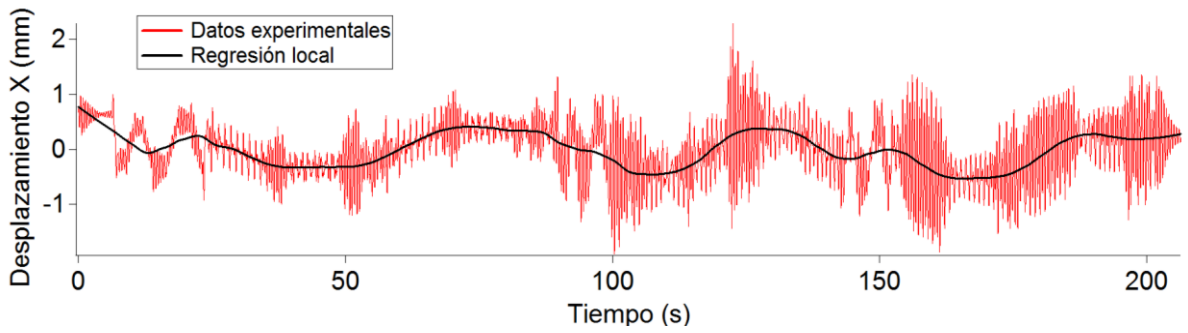


- Altura Z=200 mm; Mecanismo de sujeción superior abajo

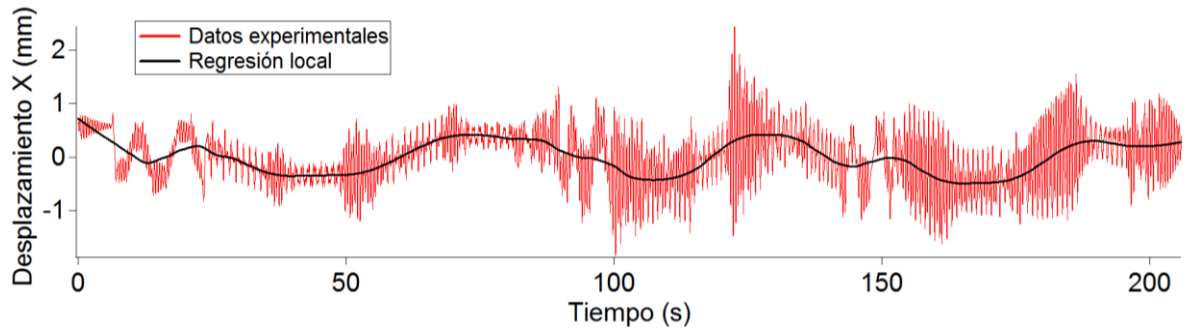


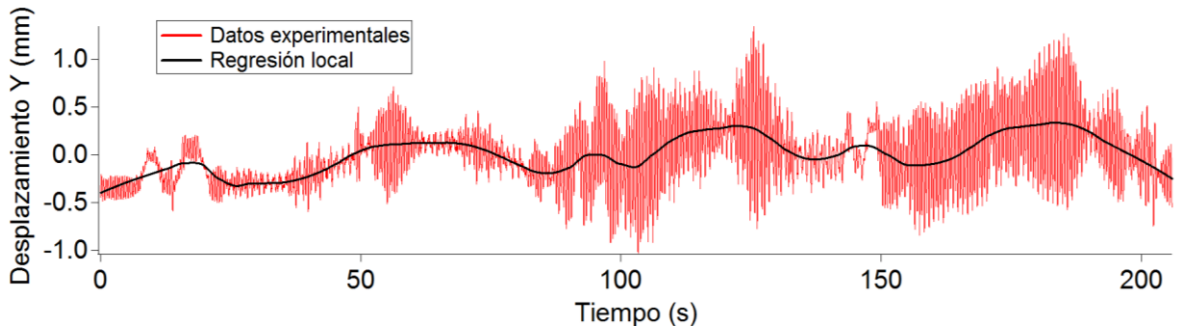


- Altura Z=200 mm; Mecanismo de sujeción superior arriba

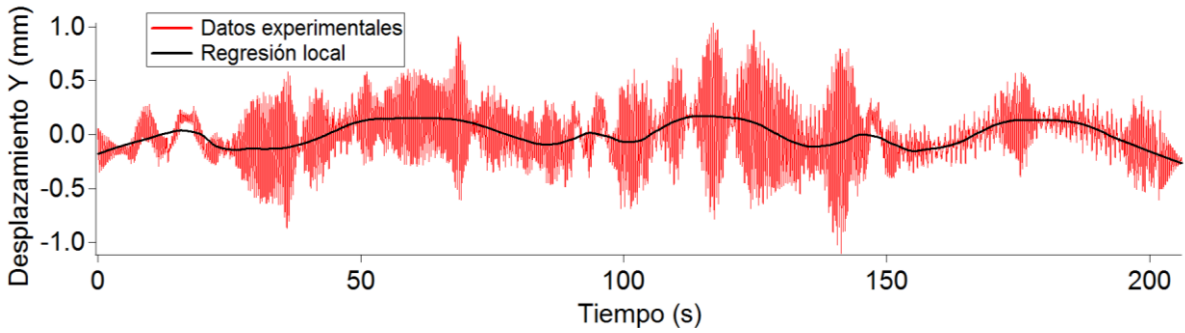
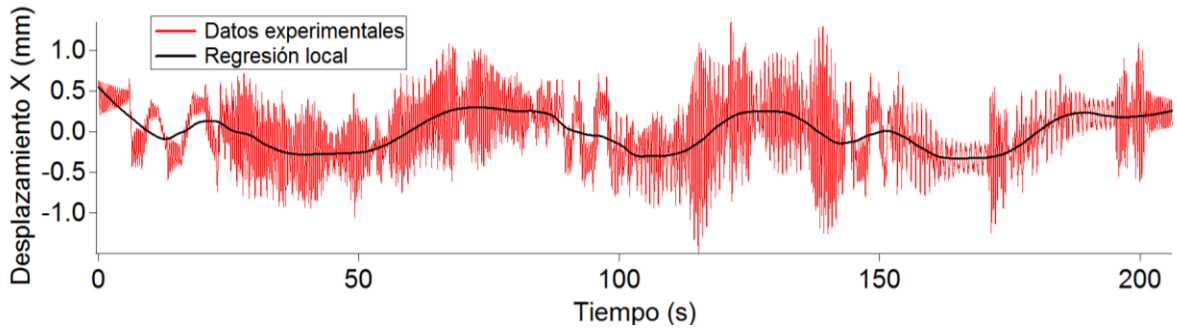


- Altura Z=250 mm; Mecanismo de sujeción superior al medio

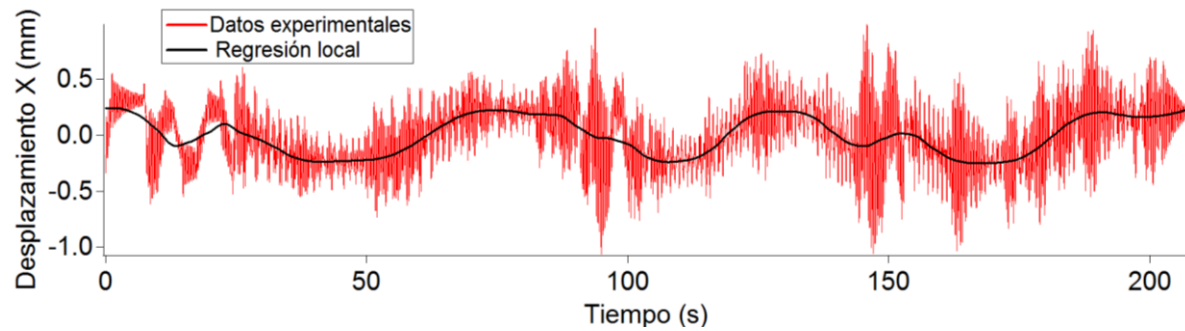


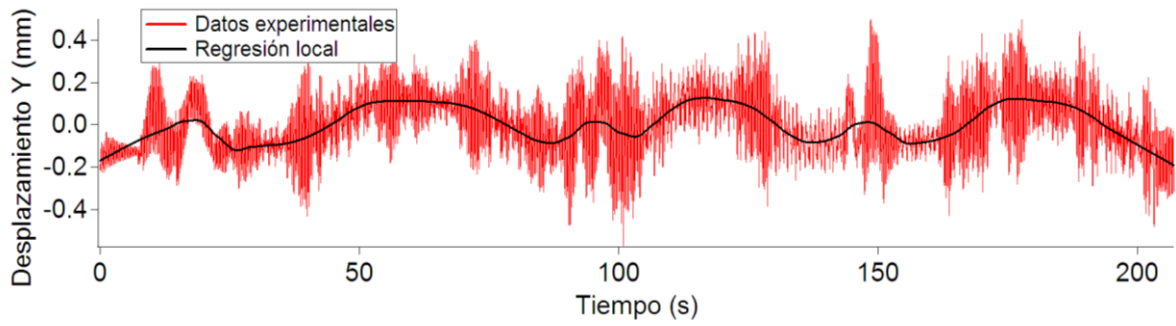


- Altura Z=300 mm; Mecanismo de sujeción superior abajo

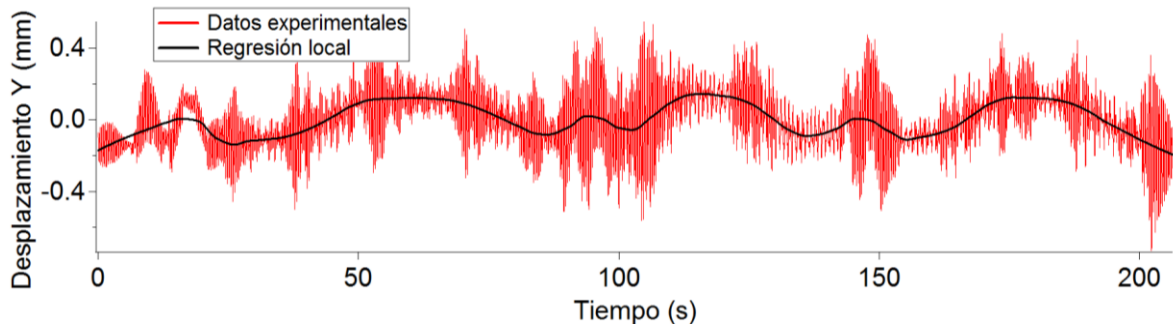
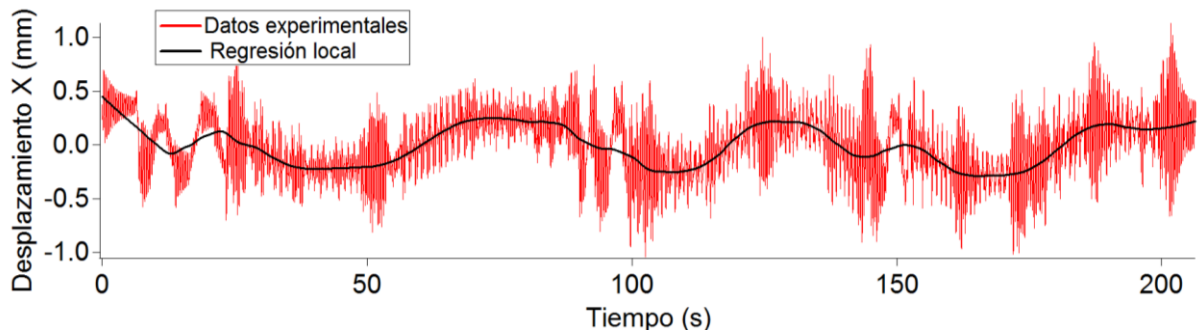


- Altura Z=300 mm; Mecanismo de sujeción superior arriba

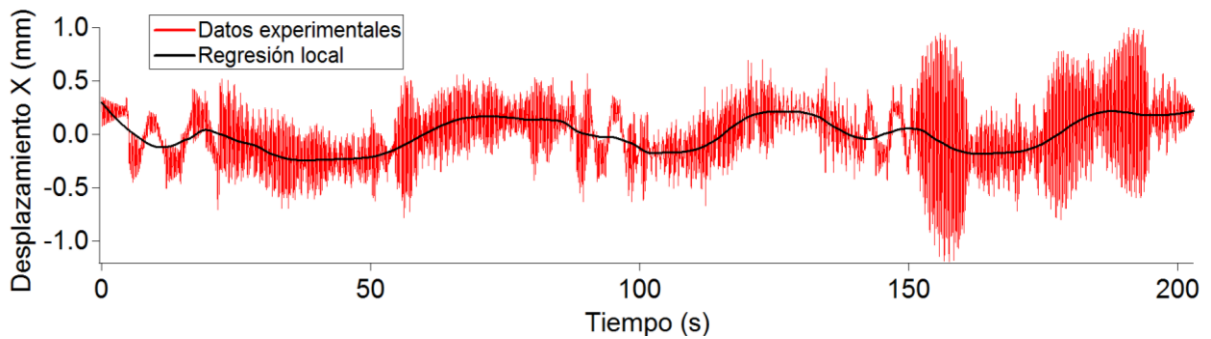


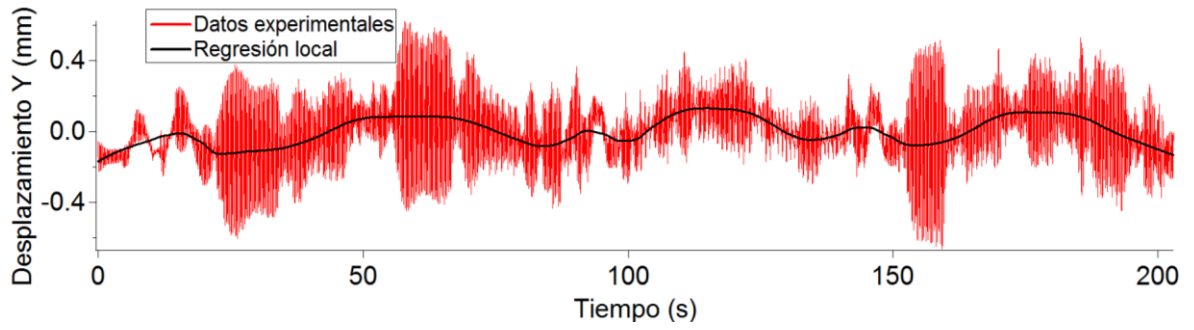


- Altura Z=350 mm; Mecanismo de sujeción superior al medio

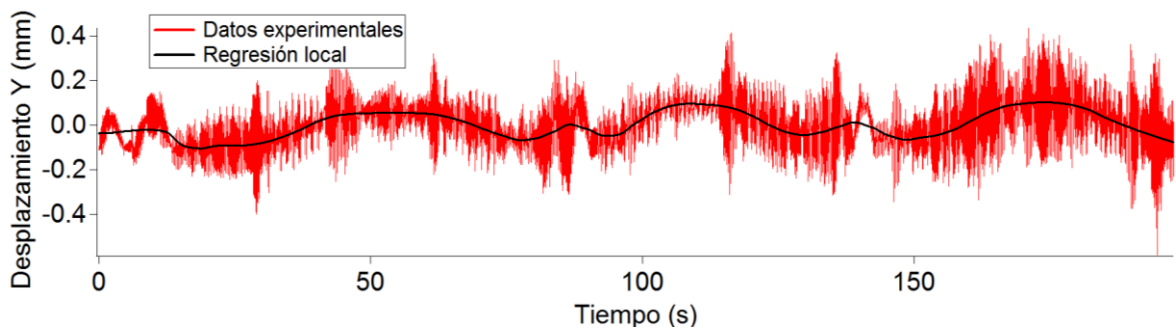
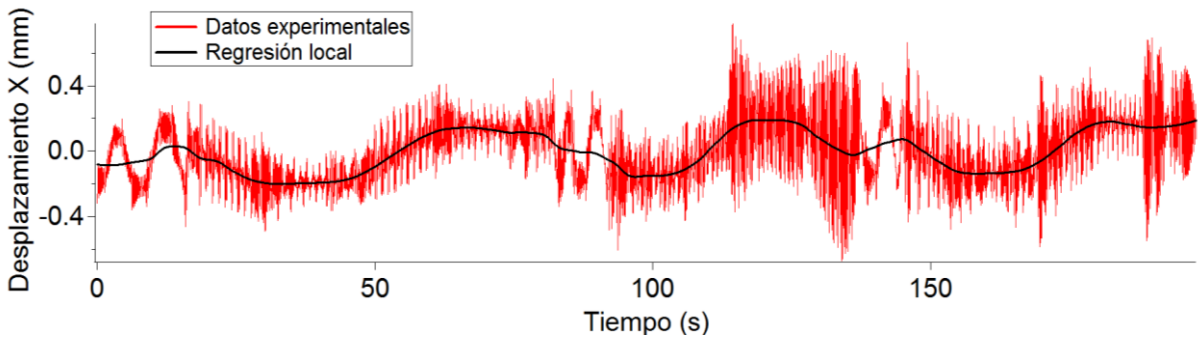


- Altura Z=400 mm; Mecanismo de sujeción superior abajo

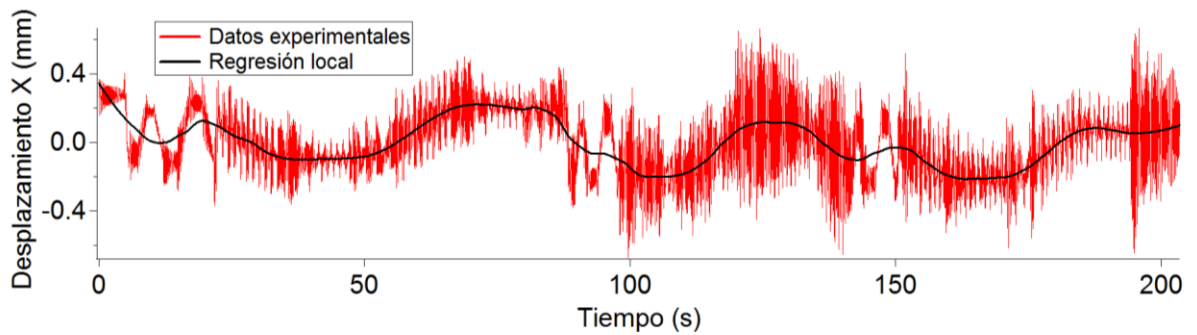


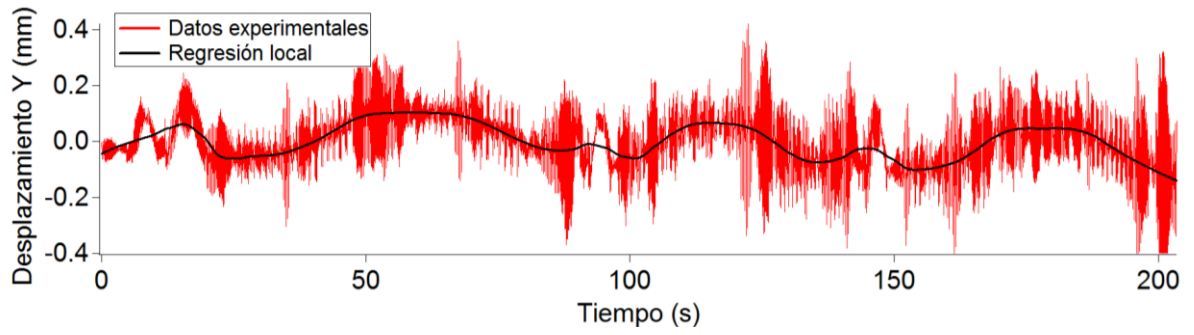


- Altura Z=400 mm; Mecanismo de sujeción superior arriba

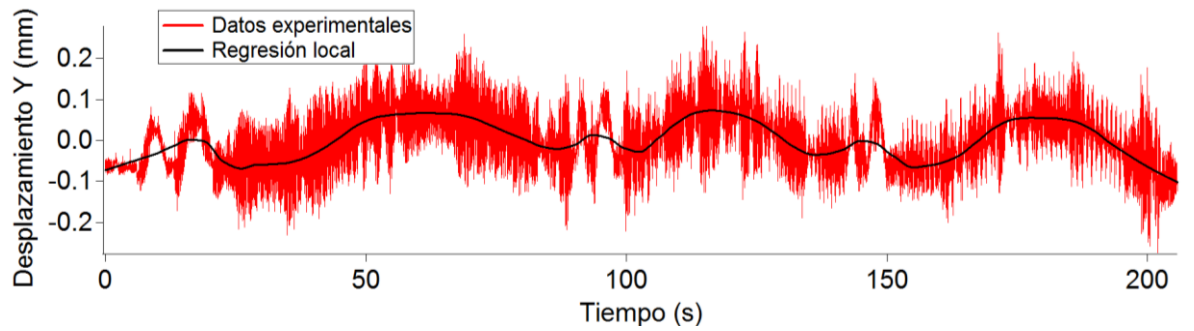
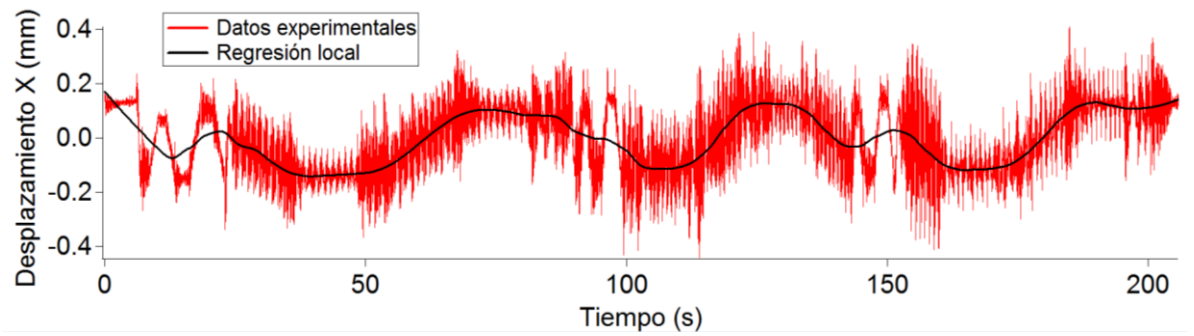


- Altura Z=450 mm; Mecanismo de sujeción superior al medio





- Altura Z=500 mm; Mecanismo de sujeción superior abajo



- Altura Z=500 mm; Mecanismo de sujeción superior arriba

