

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA IMPRESORA 3D DE BAJO COSTO PARA
USO ACADEMICO

JOHAN OSORIO RESTREPO
YURGEN ALBERTO MEJIA BERMUDEZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA

2019

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA IMPRESORA 3D DE BAJO COSTO PARA
USO ACADEMICO

JOHAN ANDRÉS OSORIO RESTREPO
YURGEN ALBERTO MEJIA BERMUDEZ

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

DIRECTOR:
RICARDO ALFONSO JAIMES ROLON
MAGISTER EN INGENIERÍA MECÁNICA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA

2019

AGRADECIMIENTOS

La experiencia que nos brinda el crecimiento personal en una institución universitaria, tal vez, es el recuerdo más gratificante que tenemos muchos de los que tuvimos la oportunidad de vivirla. Los deseos que plasmo en estas letras son poco para el regocijo que experimento, al saber que esa oportunidad me la brindaron mis padres. Todo el amor, la sabiduría y la pasión que han infundido en mis memorias, se ve reflejado en el logro que les otorgo con el cariño que recíprocamente hemos vivido juntos.

El horizonte y la dirección habrían sido totalmente nubados, si el conocimiento que nos brindó el director de proyecto no hubiese estado a nuestro alcance. Todo el saber que ha adquirido a través de los años estuvo siempre en la mejor disposición y humildad para darnos una mano. Deseo que esa misma llama que nos infundió a nosotros continúe viva para los sucesores.

Cuerpo de trabajo, quienes de manera incansable accedieron a colaborar con una idea de horizonte gris, esa fe con la que aportaron sus mejores opiniones y esfuerzos, esa merece mi absoluta admiración.

Compañero de proyecto, pilar desarrollador de los objetivos. Nadie tendría la valentía para soportar toda la carga, solo alguien con espíritu inquebrantable incluso en las vicisitudes y los problemas que conlleva trabajar en equipo.

Por último, la persona que animó mis metas, quién refresco mis intereses y recordó el camino que decidí tomar, aquella mujer que me dio parte de todo el valor que veo en su ser, debo entregarle un lugar importante en esta dedicatoria. El último esfuerzo en el grabado de este documento debe otorgarse a la fuerza que tuvieron tus palabras.

Yurgen Alberto Mejia Bermudez

AGRADECIMIENTOS

A los señores de mantenimiento tecnológico de la universidad por toda la ayuda prestada durante la realización del proyecto

P.D Edward Andrés Meneses, Jeisson Paternina e ingeniero Carlos Cáceres por su colaboración a pesar de no todo se tomaron el proyecto como de suyo.

A mis compañeros y amigos, quienes colaboraron en las diversas etapas del desarrollo de toda esta etapa de trabajo en la universidad y en la formación de mi perfil como persona y profesional.

Johan Andrés Osorio Restrepo

DEDICATORIA

a la mujer que ha hecho de madre y padre a esa mujer que me enseñó que no importa de dónde se viene que tan humilde se sea lo que importa es la voluntad el nunca rendirse y dar la pelea por aquello que nos apasiona y nos proponemos, por luchar cada día a mi lado por luchar todos estos años por mí por ayudarme a crecer y ser el hombre que soy hoy en día porque esto no habría sido posible de realizar sin esa mujer de acero que la vida puso a mi lado mi gran compañera de equipo este título es más de ella que mío yo hice lo fácil a ella sí que le toco lo difícil gracias enserio por el esfuerzo de toda una vida dedicada solo a mi como no amar a Martha Gladys Restrepo mi compañera de luchas.

A la señora Luz Mantilla que gracias a su apoyo y dedicación hizo posible para mi escalar este peldaño en mi vida a ella y a la fundación jóvenes con calidad de vida por acompañarme y ayudarme desde el primer día que inicie este camino llamado universidad.

Johan Andrés Osorio Restrepo

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	18
1 JUSTIFICACIÓN	20
2 OBJETIVOS	22
2.1 OBJETIVO GENERAL	22
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	22
3 ESTADO DEL ARTE	23
3.1 IMPRESORAS 3D POR ESTEREOLITOGRAFÍA (SLA).....	23
3.2 IMPRESORAS 3D DE SINTERIZACIÓN SELECTIVA POR LÁSER (SLS)	24
3.3 IMPRESORAS 3D POR INYECCIÓN	24
3.4 IMPRESIÓN POR DEPOSICIÓN DE MATERIAL FUNDIDO (FDM)	25
3.5 MATERIALES DE IMPRESIÓN POR DEPOSICIÓN PLA Y ABS.	27
3.5.1 ABS (Acrilonitrilo butadieno estireno).....	27
3.5.2 PLA (ácido poliláctico).....	27
3.6 MÓDULOS DE CONTROL.....	27
3.6.1 G-code.....	28
3.6.2 Arduino.	28
3.6.3 Motores paso a paso.....	28
3.6.4 Cama caliente de impresión..	29
4 JUSTIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN	30
4.1 DISEÑO CONCEPTUAL	30
4.1.1 Despliegue de la función de calidad (QFD)	30
4.1.1.1 Requerimientos del consumidor	30

4.1.1.2 Requerimientos del diseñador	30
4.1.2 Matriz de calidad. El resultado obtenido de los requerimientos arroja la siguiente matriz de calidad	31
4.2 PONDERACIÓN DE LOS RESULTADOS PARA LA SELECCIÓN DE LA SOLUCIÓN.....	31
5 PLANTEAMIENTO DE ALTERNATIVAS	33
5.1 ALTERNATIVA 1	33
5.2 ALTERNATIVA 2	34
5.3 ALTERNATIVA 3	35
5.4 EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS.....	35
6 FASE DISEÑO EN DETALLE	37
6.1 DISEÑO MECÁNICO DE LA ESTRUCTURA.....	38
6.1.1 Determinación de cargas en el eje Y (cama).....	38
6.1.2 Determinación de cargas en el eje X (extrusor).	40
6.1.3 Determinación de cargas en el eje Z (doble motor).....	42
6.1.4 Conjunto estructural en perfilera..	46
6.1.5 Diseño sistema de transmisión de movimiento por poleas y correas.	49
6.1.5.1 Determinación de torque en el eje Y (cama)..	49
6.1.5.2 Determinación de torque en el eje X (extrusor)	52
6.1.5.3 Poleas y Correas.....	54
6.1.5.4 Diseño del deslizador del eje Y (Cama).	59
6.1.5.5 Cojinetes.	63
6.1.5.6 Tornillo de potencia en el eje Z.	64
6.1.5.7 Condición de autobloqueo en el tornillo de potencia.	67
6.1.5.8 Husillos.....	67
6.1.5.9 Tuerca para husillo.	68
6.1.5.10 Soporte para tuerca.....	69
6.1.6 Construcción y ensamblaje de los carros de la impresora..	70

6.2	DISEÑO DE COMPONENTES ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS	72
6.2.1	Tarjetas de control.....	73
6.2.1.1	Tarjeta de interpretación del código G.....	73
6.2.1.2	Control electrónico en la estructura y amplificación de señal.	75
6.2.1.3	Actuadores.	76
6.2.1.4	Drivers.	77
6.2.1.5	Sensores de posición.	81
6.3	MÓDULO DE PROGRAMACIÓN	82
6.3.1	Control de los actuadores.....	82
6.3.2	Control e interpretación de la impresión.	84
6.3.2.1	Modelado.....	84
6.3.2.2	Firmware..	86
6.3.2.3	Rebanado y traducción a G-code.....	87
6.3.2.4	Interfaz.....	89
7	VALIDACIÓN.....	90
7.1	MEDICIÓN DE TORQUES EN MOTORES PaP	90
7.1.1	Medición del torque de régimen.	91
7.1.2	Medición del torque de retención..	91
7.1.3	Factor de seguridad en solicitud de torque para cada motor.....	92
7.1.3.1	Motores en X y Y.....	92
7.1.3.2	Motores en eje Z.	93
7.2	COMPROBACIÓN DE LA MÁQUINA POR MEDIO DE IMPRESIONES....	93
8	COSTOS	98
8.1	COSTOS DIRECTOS.....	98
8.1.1	Materia prima.	98
8.1.2	Elementos seleccionados.....	99
8.1.3	Costos de maquinado.....	101
8.2	COSTO TOTAL DIRECTO	101

9 CONCLUSIONES.....	102
10 RECOMENDACIONES	104
BIBLIOGRAFÍA	105
ANEXOS.....	109

LISTA DE TABLAS

	Pág.
TABLA 1. PONDERACIÓN DE LOS REQUERIMIENTOS.	32
TABLA 2. SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS.	36
TABLA 3. MEDIDAS DE COMPONENTES DE LA CAMA DE LA IMPRESORA.	38
TABLA 4. PESO APROXIMADO SOPORTADO EN EL EJE Y.	39
TABLA 5. ELEMENTOS Y ESPECIFICACIONES DEL CARRO DEL EJE X.	40
TABLA 6. PESO APROXIMADO SOPORTADO EN EL EJE X.	42
TABLA 7. ELEMENTOS DEL EJE Z (DOBLE MOTOR).	43
TABLA 8. PESO APROXIMADO DE LAS CARGAS DEL EJE Z.	45
TABLA 9. FACTORES DE SEGURIDAD RESULTANTES DE ANÁLISIS DE CARGA ESTÁTICA. ...	48
TABLA 10. COEFICIENTE DE FRICCIÓN DE ALGUNOS MATERIALES.	50
TABLA 11. COEFICIENTE DE FRICCIÓN DEL ACETAL.	53
TABLA 12. CARACTERÍSTICAS DE LA CORREA PARA EJE DE EXTRUSOR Y CAMA.	55
TABLA 13. CARACTERÍSTICAS DE LA POLEA CONECTADA A LOS MOTORES X E Y.	56
TABLA 14. CARACTERÍSTICAS DEL COJINETE.	63
TABLA 15. CARACTERÍSTICAS DE UN TORNILLO ROSCA ACME.	64
TABLA 16. COEFICIENTES DINÁMICOS RECOMENDADOS DE ROZAMIENTO.	65
TABLA 17. MEDIDAS DE LOS HUSILLOS EN EL EJE Z.	68
TABLA 18. CARACTERÍSTICAS DRIVER A4988.	78
TABLA 19. TABLA DE RESOLUCIÓN DE MICRO PASOS.	79
TABLA 20. RESULTADOS PRUEBAS DE TORQUE EN MOTORES PAP.	92
TABLA 21. COSTOS DE MATERIA PRIMA.	98
TABLA 22. COSTO DE COMPONENTES DE LA IMPRESORA.	99
TABLA 24. COSTOS DIRECTOS.	101

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
ILUSTRACIÓN 1. ESTEREOLITOGRAFÍA.....	23
ILUSTRACIÓN 2. SINTERIZADO.	24
ILUSTRACIÓN 3. IMPRESIÓN POR INYECCIÓN.	25
ILUSTRACIÓN 4. ESQUEMA DE IMPRESORA 3D.	26
ILUSTRACIÓN 5. IMPRESORA ELABORANDO UNA IMPRESIÓN 3D.	26
ILUSTRACIÓN 6. FIGURAS ELABORADAS EN PLA.	27
ILUSTRACIÓN 7. SISTEMA DE CONTROL ARDUINO.	28
ILUSTRACIÓN 8. MOTORES PASO A PASO.....	29
ILUSTRACIÓN 9. MATRIZ DE CALIDAD.....	31
ILUSTRACIÓN 10. IMPRESORA 3D POLAR.....	34
ILUSTRACIÓN 11. IMPRESORA 3D CARTESIANA.	34
ILUSTRACIÓN 12. IMPRESORA 3D CARTESIANA PORTABLE.	35
ILUSTRACIÓN 13. DIAGRAMA DE FLUJO PROCESO DE DISEÑO EN DETALLE.	37
ILUSTRACIÓN 14. PERFIL ESTRELLA.....	46
ILUSTRACIÓN 15. ESTRUCTURA DE LA IMPRESORA.	47
ILUSTRACIÓN 16. POSICIONAMIENTO DE CARGAS EN LA ESTRUCTURA PARA ANÁLISIS DE FACTOR DE SEGURIDAD.	47
ILUSTRACIÓN 17. DISTRIBUCIÓN DE FACTORES DE SEGURIDAD.	48
ILUSTRACIÓN 18. EJE Y O CAMA DE EXTRUSIÓN DE LA IMPRESORA.	49
ILUSTRACIÓN 19. DIAGRAMA DE CUERPO LIBRE DE LA CAMA DE LA IMPRESORA.....	50
ILUSTRACIÓN 20. EJE X O BRAZO DEL EXTRUSOR DE LA IMPRESORA.....	52
ILUSTRACIÓN 21. DIAGRAMA DE CUERPO LIBRE DEL BRAZO DE LA IMPRESORA.....	52
ILUSTRACIÓN 22. CORREA PARA EJE X E Y.	54
ILUSTRACIÓN 23. ESQUEMA DE LA POLEA CONECTADA A LOS MOTORES X E Y.....	56
ILUSTRACIÓN 24. POLEA CONDUCTIDA DEL EJE Y (CAMA).....	57
ILUSTRACIÓN 25. POLEA CONDUCTIDA EN EL EJE X (EXTRUSOR).....	58
ILUSTRACIÓN 26. TENSOR DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN DEL EXTRUSOR.	58
ILUSTRACIÓN 27. PLATAFORMA DESLIZANTE DEL EJE Y (CAMA).....	59
ILUSTRACIÓN 28. DEFLEXIÓN EN UNA VIGA CON MDSOLIDS.....	62

ILUSTRACIÓN 29. COJINETE DE DESLIZAMIENTO SCS.....	63
ILUSTRACIÓN 30. HUSILLOS DEL EJE Z.....	68
ILUSTRACIÓN 31. TUERCA T8 PARA HUSILLO.	69
ILUSTRACIÓN 32. SOPORTE PARA TUERCA.	69
ILUSTRACIÓN 33. CARROS DE MOVIMIENTO EN LOS EJES.	70
ILUSTRACIÓN 34. PRIMER MODELO RUEDA.	71
ILUSTRACIÓN 35. RUEDA FINAL DE LA IMPRESORA.....	72
ILUSTRACIÓN 36. EJECUCIÓN SECUENCIAL DE UNA IMPRESIÓN.....	73
ILUSTRACIÓN 37. ARDUINO MEGA.	73
ILUSTRACIÓN 38. DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE LOS PINES DEL ARDUINO MEGA.	74
ILUSTRACIÓN 39. SHIELD RAMPS v1.4.....	75
ILUSTRACIÓN 40. PUERTOS DE CONEXIÓN EN LA SHIELD RAMPS v1.4.	76
ILUSTRACIÓN 41. MOTORES PAP Y ESQUEMA.	77
ILUSTRACIÓN 42. DRIVERS A4988.	78
ILUSTRACIÓN 43. ESQUEMA DE CONEXIÓN DRIVER-MOTOR PAP.	80
ILUSTRACIÓN 44. FINAL DE CARRERA Y CONEXIÓN INTERNA.	81
ILUSTRACIÓN 45. CONEXIÓN ELECTRÓNICA DEL FINAL DE CARRERA.....	82
ILUSTRACIÓN 46. INTERFAZ DE PRONTERFACE.	83
ILUSTRACIÓN 47. SECUENCIA DE PASOS PARA IMPRESIÓN.	84
ILUSTRACIÓN 48. INTERFAZ SOLIDWORKS.	85
ILUSTRACIÓN 49. LÓGICA DEL SOFTWARE	85
ILUSTRACIÓN 50. CÓDIGO MARLIN EN INTERFAZ DE ARDUINO MEGA.	86
ILUSTRACIÓN 51. INTERFAZ DE CURA ULTIMAKER.....	87
ILUSTRACIÓN 52. SEGUIMIENTO GRÁFICO PRUEBAS DE TORQUE.....	91
ILUSTRACIÓN 53. PRIMEROS MODELOS DE PRUEBA EN IMPRESIÓN.	94
ILUSTRACIÓN 54. SEGUNDOS MODELOS DE PRUEBAS EN IMPRESIÓN.	94
ILUSTRACIÓN 55. TERCEROS MODELOS DE PRUEBAS EN IMPRESIÓN.	95
ILUSTRACIÓN 56. MONTAJE DE PIEZAS DE PRUEBA NO. 4.	95
ILUSTRACIÓN 57. RESULTADO DE LA CUARTA PRUEBA DE IMPRESIÓN.....	96
ILUSTRACIÓN 58. MONTAJE PRUEBA FINAL DE IMPRESIÓN.....	96
ILUSTRACIÓN 59. MODELO FINAL IMPRESO.	97

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Propiedades típicas del filamento PLA.....	109
Anexo B. Ficha técnica motor Nema 17.....	110
Anexo C. Balance de fuerzas para estudio de carga estático por medio de elementos finitos.	111
Anexo D. Resultados del análisis estático de carga por medio de elementos finitos.	112
Anexo E. Plano detallado de la polea transmisora.....	114
Anexo F. Tabla de propiedades de algunos materiales de ingeniería.....	115
Anexo G. Curva elástica y pendiente de la viga en MDSolids.....	116
Anexo H. Ficha técnica para distintas configuraciones de cojinetes	117
Anexo I. Diagrama esquemático de Arduino Mega.	118
Anexo J. Ficha técnica del Arduino Mega.	119
Anexo K. Ficha técnica de Shield Ramps v1.4.....	120
Anexo 12. Ficha técnica del Driver A4988. (Anexo L)	121
Anexo M. Planos de la impresora.....	124

RESUMEN

TITULO: DISEÑO Y CONSTRUCCION DE IMPRESORA 3D DE BAJO COSTO
PARA USO ACADEMICO

AUTOR: YURGEN ALBERTO MEJIA Y JOHAN ANDRES OSORIO RESTREPO

PALABRA CLAVE: IMPRESIÓN 3D, MANUFACTURA ADITIVA, DEPOSICION
FUNDIDA.

DESCRIPCION:

La posibilidad de imprimir objetos sólidos tridimensionales es algo largamente esperado no sólo por aquellos poco diestros para el uso del cincel y el martillo, sino que es una tecnología buscada durante años por diversos fabricantes e investigadores que intentaban implementar un método que permita la construcción de los más variados objetos como implantes médicos, piezas de arquitectura y demás elementos en forma sencilla y barata y más cuando se busca que la academia este unida con ligada este tipo de tecnologías como una gran herramienta de uso para los estudiantes en el área del diseño y de la ciencia de los materiales . La impresión 3D es una tecnología que pasó de ser algo futurista a una realidad en el país, permite crear prácticamente cualquier objeto con resinas, plásticos y metal. Esta tecnología está cada vez más arraigada al área de la industria textil, manufacturera y medicina teniendo resultados muy notorios En este Trabajo de Grado se diseñó y construyó una impresora 3D de bajo costo con el fin de utilizarla en los proyectos de Diseño de los estudiantes de Ingeniería Mecánica y que muchos estudiantes puedan reproducir de manera fácil y accesible este modelo de impresora 3d sin tener que recurrir a lugares de prototipado rápido costosos o incluso hacer la adquisición de una costosa maquina como esta .

¹ * Trabajo de grado

^{**} Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenieria Mecanica.
Director: Ricardo Alfonso Jaimes Rolon, Ingeniero Mecanico

ABSTRAC

TITLE: DESIGN AND CONSTRUCTION OF LOW COST 3D PRINTER
FOR ACADEMIC USE

AUTHOR: YURGEN ALBERTO MEJIA AND JOHAN ANDRES OSORIO
RESTREPO

KEY WORD: 3D PRINTING, MANUFACTURING ADDITIVE, DEPOSITION
FUNDIDA.

DESCRIPTION:

The possibility of printing three-dimensional solid objects is something that is not expected or handled or even used to use the chisel and the hammer, but it is also used to improve the use. more varied objects such as medical implants, pieces of architecture and other elements in a simple and cheap way and more when looking at the academy is linked with this type of technology as a great tool for use in the area of design and science of the materials. 3D printing is a technology that has gone from being something futuristic to a reality in the country, which allows you to create any object with resins, plastics and metal. This technology is increasingly rooted in the area of the textile industry, manufacturing and medicine having very well-known results. In this Degree Work, a low cost 3D printer was designed and built in order to use it in the projects of Student Design. of mechanical engineering and that many students can reproduce in an easy and accessible way in this 3d printer model without having to resort to expensive rapid prototyping places or even make the acquisition of a costly machine like this.

¹ * Trabajo de grado

^{**} Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica.
Director: Ricardo Alfonso Jaimes Rolon, Ingeniero Mecánico

INTRODUCCIÓN

La impresión 3D es una tecnología que pasó de ser algo futurista a una realidad en el país, permite crear prácticamente cualquier objeto con resinas, plásticos y metal. Esta tecnología está cada vez más arraigada al área de la industria textil, manufacturera y medicina teniendo resultados muy notorios. En el área de la salud, las empresas del país han empezado a emplear esta tecnología como herramienta para crear implantes a la medida del paciente, es una práctica muy común por ejemplo en la odontología. Otra de las industrias es la automotriz, algunas empresas cuentan con impresoras con el único propósito de colaborar con el departamento de ingeniería, ayudar a reducir costos en caso de que deban diseñar o comprobar piezas antes de proceder a ensamblarlas.

La necesidad de llevar los diseños a la realidad de una forma rápida y económica se ve reflejada en la implementación de tecnologías de prototipado rápido como lo son las impresoras 3D teniendo en cuenta que su uso en el área de manufactura es cada vez más frecuente, ya sea para la fabricación de piezas de maquinaria, obtención de prótesis para el área de medicina o el hecho de que se pueda replicar gran variedad de diseños con tan solo hacer un clic.

Sin embargo, el elevado costo de las impresoras 3D ya sea por su valor, sumado a los costos de importación de otros países, su manejo de software y la dificultad de conseguir repuestos al sufrir una avería hace que no sea factible para muchos tener al alcance inmediato esta tecnología, es así como surge la necesidad de poder adquirir estas impresoras de otra manera.

Actualmente la escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander solo cuenta con una impresora 3D la cual es muy demandada y no cubre todas las solicitudes realizadas.

Con el propósito de promover la implementación por parte de los estudiantes del diseño por medio de la impresión 3D y brindar una herramienta de uso institucional al estudiantado, se propone el diseño y construcción de una impresora 3D con materiales que sean de fácil obtención y bajo costo.

1 JUSTIFICACIÓN

Con el fin de contribuir con la formación técnica y profesional de la escuela de ingeniería mecánica de la universidad industrial de Santander, el objetivo de este proyecto se hace teniendo en cuenta que una de las múltiples áreas en desarrollo está ligada al prototipo rápido que corresponde a la implementación de las impresoras 3D, ésta crea modelos tridimensionales como prototipos o productos terminados. Se desea realizar la investigación, diseño y construcción de un sistema de impresión por deposición de material fundido.

La tecnología de impresión 3D se basa en el uso de diferentes procesos como lo son: sintonización selectiva por láser, impresión por inyección, laminado de objetos, inyección de aglutinamiento, fusión láser y deposición de material fundido, entre otros.

La técnica de modelado por deposición de material fundido (MDF) es uno de los modelos más versátiles usados para el modelo de prototipos y producción a pequeña escala. Diferentes artículos de investigación dan por hecho que es una de las mejores técnicas para la producción a pequeña escala en cuanto a eficiencia, teniendo en cuenta el tamaño de las piezas a desarrollar en comparación con el tamaño de la máquina y los costos de materia prima entre otras ventajas.

Los principales factores que influyen para llevar a cabo este proyecto es el notable crecimiento de esta tecnología en las áreas de ingeniería en el país, además el desarrollo del presente trabajo tiene en cuenta la facilidad de acceso a tecnologías locales utilizando como sistema de control un software de uso totalmente libre, evitando el pago de cuantiosas sumas de dinero por la implementación de uno con licencia, materia prima e implementos para la construcción del sistema; también se tiene en cuenta que la construcción de un prototipo de esta naturaleza, permite

evaluar la apropiación de tecnología, el desarrollo de este tipo de sistemas con tecnología local y la técnica de prototipado utilizada.

Otro factor primordial del presente trabajo es incrementar tanto el desarrollo de la formación integral del estudiante, como brindar herramientas académicas al docente que faciliten la observación de modelos por medio de la impresión, teniendo la opción de implementar la impresora 3D como un método de acercamiento a los fenómenos, máquinas o funciones de elementos explicados de manera teórica en las aulas de clase, obteniendo una herramienta que incrementará de manera fuerte el aprendizaje de los estudiantes de la escuela de ingeniería mecánica.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Cumplir con la misión de la escuela de ingeniería mecánica de la Universidad Industrial de Santander, que se enfoca en el desarrollo y la transferencia de tecnología, por medio del diseño y construcción de una impresora 3D.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Diseñar y construir una impresora 3D con un volumen de impresión de 200x200x200 [mm^3], que consta de los siguientes subsistemas:

Mecánico:

- Estructura y sistema de movimiento.
- Mecanismos de transmisión.
- Cabezal de extrusión.
- Base de deposición de material.

Sistema informático:

- Sistema de control de lazo abierto para manejar los motores paso a paso.
- Software libre como Cura, Makerware, DTIN, freecad el cual interpreta la geometría de la pieza a fabricar, convirtiéndola en código-G para ser interpretado por la tarjeta de control y proceder a generar el movimiento en el mecanismo de posicionamiento.

Sistema electrónico:

- Tarjetas electrónicas de plataforma libre.
- Controlador de motor paso a paso.
- Sensores de posición y temperatura.

Facilidad de operación

- Construir un manual como guía práctica para el uso de la impresora 3D.

3 ESTADO DEL ARTE

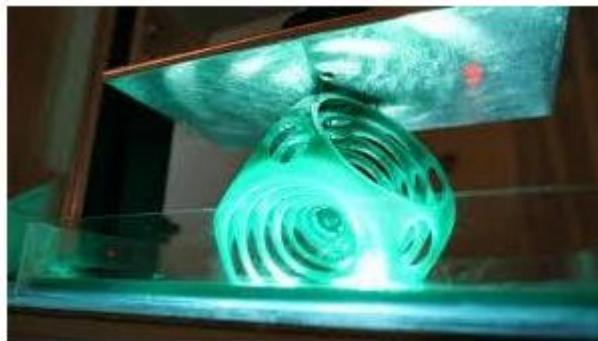
Es muy común escuchar los términos de prototipo rápido e impresión 3D, pero también es cierto que estos sistemas se componen de variadas formas y métodos de impresión formadas por ciertos componentes los cuales no son tan comunes para las personas. En el desarrollo del proyecto se tratará de explicar a detalle cada uno de estos métodos de impresión.

3.1 IMPRESORAS 3D POR ESTEREOLITOGRAFÍA (SLA)

Sus siglas provienen del inglés Selective Laser Sintering (SLS), esta tecnología se basa en el uso de un láser para poder darle forma a sus piezas o figuras a producir. Consiste en usar una resina líquida y la luz ultravioleta para darle forma a la resina y así conformar el modelo que se quiere.

Funciona capa a capa y cuenta con una base que se va sumergiendo o saliendo bañado en una resina foto curable “que se seca por el uso de luz”, una vez se solidifica parte de la resina la plataforma va moviendo el modelado para continuar con el proceso de solidificación.

Ilustración 1. Estereolitografía.



Fuente: <http://martincndequintas1.blogspot.com.co/2016/11/tipos-de-impresoras-3d-segun-su.html>

3.2 IMPRESORAS 3D DE SINTERIZACIÓN SELECTIVA POR LÁSER (SLS)

Tecnología nacida en los años 80, es la herramienta de impresión 3D más antigua de la que se tenga memoria, este método de impresión cuenta con la ventaja de permitir el uso de variedad de materiales “los materiales usados son en polvo”.

Estos materiales pueden ser diversos poliestirenos, cerámicos, cristal, nylon y materiales metálicos. Un láser cumple con la función de fundir el polvo para dar forma a la pieza, a esto se le llama sinterizado.

Ilustración 2. Sinterizado.



Fuente: <http://martincndequintas1.blogspot.com.co/2016/11/tipos-de-impresoras-3d-segun-su.html>

3.3 IMPRESORAS 3D POR INYECCIÓN

Este es el sistema de impresión 3D más parecido a una impresora habitual (de tinta en folio), estas en vez de cargarse con tinta se hace con polvos de diferentes materiales o materiales líquidos. Se puede incluso para producir piezas hechas de material comestible, producen capa a capa sobre una base la pieza que se quiere fabricar.

Ilustración 3. Impresión por inyección.



Fuente: <http://martincndequintas1.blogspot.com.co/2016/11/tipos-de-impresoras-3d-segun-su.html>

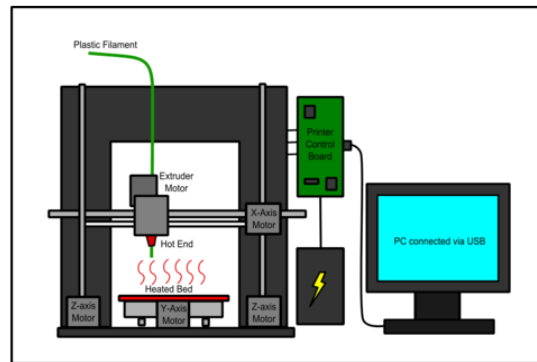
3.4 IMPRESIÓN POR DEPOSICIÓN DE MATERIAL FUNDIDO (FDM)

También conocida por FFF (*Fused Filament Fabrication*, término registrado por Stratasys), la técnica aditiva del modelado por deposición fundida es una técnica que consiste en depositar polímero fundido sobre una base plana capa a capa, como si fueran rodajas transversales de una fruta cortada en partes iguales. Esta tecnología le da más consistencia a la pieza a formar cuanto mayor sea la finura de las capas. Cabe aclarar que el proceso es más demorado, pero tiene mayor calidad.

El material usado para ser fundido y depositado poco a poco, inicialmente se encuentra en estado sólido almacenado en rollos y es expulsado por la boquilla en minúsculos hilos que se van solidificando conforme van tomando la forma de cada capa.

Se trata de la técnica más común en cuanto a impresoras 3D de escritorio y usuarios domésticos se refiere. Aunque los resultados pueden ser muy buenos, no suelen ser comparables con los que ofrecen las impresoras 3D por SLA, por ejemplo. La gran ventaja de esta tecnología de impresión es que se ha hecho más asequible en cuanto a precio se trata.

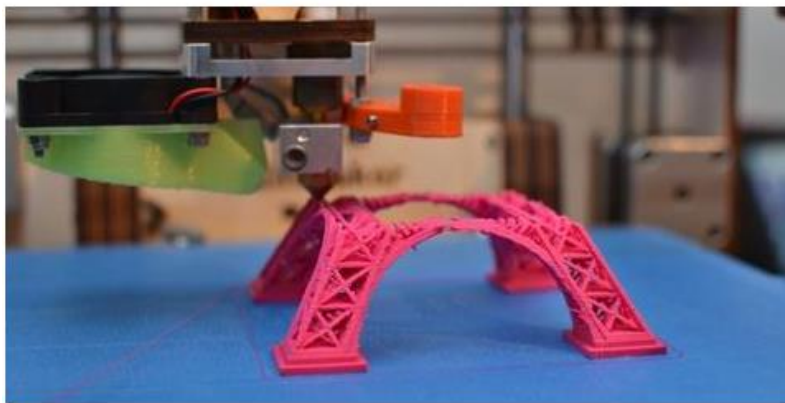
Ilustración 4. Esquema de impresora 3D.



Fuente: <http://martincndequintas1.blogspot.com.co/2016/11/tipos-de-impresoras-3d-segun-su.html>

Un gráfico muestra como luce una impresión en proceso, se puede observar el extrusor y la boquilla por donde sale el filamento derretido.

Ilustración 5. Impresora elaborando una impresión 3D.



Fuente: <http://martincndequintas1.blogspot.com.co/2016/11/tipos-de-impresoras-3d-segun-su.html>

3.5 MATERIALES DE IMPRESIÓN POR DEPOSICIÓN PLA Y ABS.

3.5.1 ABS (Acrilonitrilo butadieno estireno). Es un plástico muy resistente al impacto en comparación con otros termoplásticos como el PLA, es un termoplástico amorfo con gran tenacidad, dureza y rigidez.

3.5.2 PLA (ácido poliláctico). Termoplástico biodegradable de almidón no tiene la misma resistencia que el ABS, pero igualmente es muy recomendado debido a sus propiedades físicas y mecánicas incluyendo su bajo precio.

Ilustración 6. Figuras elaboradas en PLA.



Fuente: <https://www.3dnatives.com/es/>

3.6 MÓDULOS DE CONTROL

Los movimientos y comandos que debe usar una máquina de prototipado rápido, deben estar previstos y conducidos por mediadores que faciliten las tareas y la interpretación de las órdenes. Estos sistemas se componen principalmente de elementos electrónicos sencillos y códigos de tipo libre, que contienen interfaces muy sencillas de interpretar y usar. Algunos de estos elementos se nombran a continuación.

3.6.1 G-code. Es un lenguaje de programación usado o el más común en la impresión 3D ya queda la orden de posicionamiento a una impresora por deposición y controla su temperatura.

3.6.2 Arduino. Es un software consistente en un entorno de desarrollo de fácil uso y de gran manejo académico que es a fin a nuestro propósito a cumplir en este proyecto que implementa el lenguaje de programación de arduino y el bootloader ejecutado en la placa. La principal característica del software de programación y del lenguaje de programación es su sencillez y facilidad de uso.

Ilustración 7. Sistema de control Arduino.



Fuente: <https://aprendiendoarduino.wordpress.com/2017/03/29/que-es-arduino-4/>

3.6.3 Motores paso a paso. El motor paso a paso conocido también como motor de pasos, es un dispositivo electromecánico que convierte una serie de impulsos eléctricos en desplazamientos angulares discretos, lo que significa que es capaz de girar una cantidad de grados (pasos) dependiendo de sus entradas de control. Puede ser manejado por medio de impulsos provenientes de una fuente digital. El motor cuenta con mucha precisión y repetitividad en cuanto al posicionamiento.

Ilustración 8. Motores paso a paso.



Fuente: Wikipedia, la enciclopedia libre. Motor paso a paso.
https://es.wikipedia.org/wiki/Motor_paso_a_paso

3.6.4 Cama caliente de impresión. Es un elemento imprescindible si se quiere utilizar variados tipos de plásticos para realizar la impresión, consiste en una plataforma que nos permite mantener sujeta la base de la figura que se quiere reproducir, calentada para mantener la base más firme.

4 JUSTIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN

La educación en su constante evolución necesita encontrar formas de conectar el intelecto del estudiante con los conocimientos que éste necesita aprender. Tener un acercamiento a los elementos donde se presentan los fenómenos que se nombran académicamente en los salones de clase de una institución, tendrían mucha más trascendencia en el desarrollo de las capacidades del estudiante, si este pudiera ser real y palpable. La ambición del proyecto es realizar un prototipo de impresora 3D, de fácil construcción con material existente en el mercado inmediato, para prototipado de piezas que converjan al conocimiento del estudiante.

4.1 DISEÑO CONCEPTUAL

El proyecto que se desea realizar consta de las partes y funciones más adecuadas para el diseño y construcción de la impresora 3D con el fin de ser usada en la academia.

4.1.1 Despliegue de la función de calidad (QFD)

4.1.1.1 Requerimientos del consumidor

- Facilidad en el montaje
- Continuidad de trabajo
- Localización de elementos
- Fácil mantenimiento
- Portabilidad del equipo
- Sencilla gestión de datos
- Económico
- Interfaz de control sencilla
- Volumen de impresión
- Buena presentación

4.1.1.2 Requerimientos del diseñador

- Facilidad de transporte
- Almacenamiento
- Guía de uso
- Soporte de usuario
- Herramientas de búsqueda
- Multiplicidad de impresiones
- Buena resolución
- Esquema de revisiones
- Disponibilidad inmediata
- Abierto a modificaciones

- Interfaz humano-máquina
- Prototipado rápido
- Usuarios múltiples
- Control de accesorios
- Personalización
- Notificación de condiciones
- Ciclo de vida elevado
- Costos
- Memorias
- Buena estructura

4.1.2 Matriz de calidad. El resultado obtenido de los requerimientos arroja la siguiente matriz de calidad.

Ilustración 9. Matriz de calidad.

Requerimientos del cliente			Criterios de diseño																				
			valor	Facilidad de transporte		Almacenamiento		Guía de uso		Soporte de usuario		Herramientas de búsqueda		Multiplicidad de impresiones		Buena resolución		Esquema de revisiones		Disponibilidad inmediata		Abierto a modificaciones	
Facilidad del montaje			4	2	8	5	20	9	36	5	20	8	32	2	8	3	12	3	12	9	36	2	8
Continuidad de trabajo			5	0	0	0	0	0	0	3	15	4	20	6	30	7	35	3	15	1	5	0	0
Localización de elementos			3	7	0	4	12	6	18	2	6	7	21	0	0	0	0	0	0	5	15	4	12
Fácil mantenimiento			1	0	0	1	1	4	4	1	1	0	0	0	0	7	7	9	9	0	0	5	5
Portabilidad del equipo			9	10	90	7	63	1	9	0	0	0	0	3	27	6	54	0	0	9	81	5	45
Sencilla gestión de datos			6	0	0	0	0	1	6	6	36	9	54	7	42	4	24	3	18	4	24	7	42
Económico			10	3	30	0	0	5	50	1	10	0	0	9	90	8	80	2	20	0	0	4	40
Interfaz de control sencilla			7	0	0	0	0	0	0	4	28	6	42	1	7	0	0	3	21	7	49	6	42
Volumen de impresión			8	8	64	6	48	0	0	0	0	0	0	4	32	5	40	3	24	6	48	3	24
Buena presentación			2	1	2	1	2	1	2	0	0	0	0	0	0	9	18	9	18	2	4	2	4
Total:					194		146		125		116		169		236		270		137		262		222
Porcentaje de Incidencia					5,30635		4		3,419		3,173		4,62253829		6,4551422		7,38512		3,7473		7,1663		6,0722
Requerimientos del cliente			Criterios de diseño																				
			valor	Interfaz hum-máq		Prototipado rápido		Usuarios múltiples		Control de accesorios		Personalización		Notificación de condiciones		Ciclo de vida elevado		Costos		Memorias		Buena estructura	
Facilidad del montaje			4	1	4	6	24	9	36	3	12	2	8	8	32	3	12	4	16	0	0	9	36
Continuidad de trabajo			5	4	20	2	10	1	5	0	0	0	0	7	35	9	45	1	5	5	25	5	25
Localización de elementos			3	0	0	5	15	3	9	5	15	2	6	5	15	0	0	0	0	0	0	4	12
Fácil mantenimiento			1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	7	9	9	7	7	0	0	5	5
Portabilidad del equipo			9	0	0	9	81	5	45	0	0	3	27	2	18	0	0	2	18	0	0	9	81
Sencilla gestión de datos			6	9	54	7	42	6	36	2	12	3	18	6	36	3	18	3	18	8	48	0	0
Económico			10	0	0	2	20	0	0	3	30	0	0	0	0	4	40	9	90	2	20	4	40
Interfaz de control sencilla			7	9	63	7	49	6	42	2	14	3	21	4	28	3	21	3	21	0	0	0	0
Volumen de impresión			8	0	0	2	16	0	0	0	0	0	0	4	32	6	48	6	48	0	0	5	40
Buena presentación			2	0	0	1	2	1	2	0	0	7	14	9	18	9	18	8	16	9	18	3	6
Total:					141		259		175		83		94		221		211		239		111		245
Porcentaje de Incidencia					3,85667		7,1		4,7867		2,27		2,5711597		6,0448578		5,7713		6,5372		3,03611		6,701313

4.2 PONDERACIÓN DE LOS RESULTADOS PARA LA SELECCIÓN DE LA SOLUCIÓN.

Señalando de los requerimientos de mayor solicitud, se plantea la siguiente tabla de ponderación.

Tabla 1. Ponderación de los requerimientos.

Requerimiento	Puntuación	Porcentaje
Facilidad de transporte	194	5,31%
Almacenamiento	146	4%
Guía de uso	125	3,4%
Soporte de usuario	116	3,17%
Herramientas de búsqueda	169	4,62%
Multiplicidad de impresiones	236	6,46%
Buena resolución	270	7,39%
Esquema de revisiones	137	3,74%
Disponibilidad inmediata	262	7,17%
Abierto a modificaciones	222	6,07%
Interfaz humano máquina	141	3,86%
Prototipado rápido	259	7,1%
Usuarios múltiples	175	4,79%
Control de accesorios	83	2,27%
Personalización	94	2,57%
Notificación de condiciones	221	6,04%
Ciclo de vida elevado	211	5,77%
Costos	239	6,54%
Memorias	111	3,04%
Buena estructura	245	6,7%
Total	3656	100%

5 PLANTEAMIENTO DE ALTERNATIVAS

El funcionamiento general de la impresora 3D se enfocará al uso de esta herramienta, como vínculo pedagógico con fenómenos existentes en situaciones reales con las explicaciones por parte del cuerpo docente hacia los alumnos en las aulas de clase. El fin es el de conectar el conocimiento que muchas veces en los estudiantes es incierto, porque no se conoce realmente la forma de las piezas donde estos se presentan. También podrá emplearse para generar las piezas que se diseñen en los cursos con manejo de CAD, para llevar el proceso de diseño de manera más eficiente y correcta o como se conoce en la academia. Con base en lo anterior, se procederá a plantear unas alternativas que conjuguen todas las características nombradas y posteriormente se hará selección de aquella que sea óptima para realizar las funciones.

5.1 ALTERNATIVA 1

Impresora 3D polar, ofrece la versatilidad de un volumen de impresión un poco mayor, con las características de una estructura metálica rígida capaz de evitar vibraciones en el funcionamiento. Una de las grandes ventajas de este tipo de impresora es que usa tan solo dos motores paso a paso ahorrando espacio, volumen y peso.

Usa coordenadas polares en vez de cartesianas describiendo trayectorias circulares, cuenta con una cama de impresión giratoria, así como la cabeza de impresión es giratoria también. El extrusor se mueve de arriba abajo y otra de sus grandes ventajas es que tienen un gran volumen de impresión en espacios reducidos.

Ilustración 10. Impresora 3D polar.

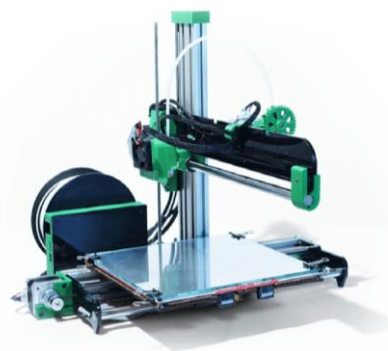


Fuente: <https://www.3dnatives.com/es/>

5.2 ALTERNATIVA 2

Impresora 3D cartesiana, es una de las más usadas en el mercado, esta impresora usa un sistema de coordenadas cartesianas usadas para lograr el correcto posicionamiento del extrusor y corregir algún error en el movimiento del cabezal de extrusión con la finalidad de facilitar el montaje. La cama de este tipo de impresora se mueve solo en la dirección del eje Y. esta impresora necesita además 3 motores paso a paso uno por cada eje. Tiene como desventaja una resolución baja en piezas de geometría circular o revolución.

Ilustración 11. Impresora 3D cartesiana.

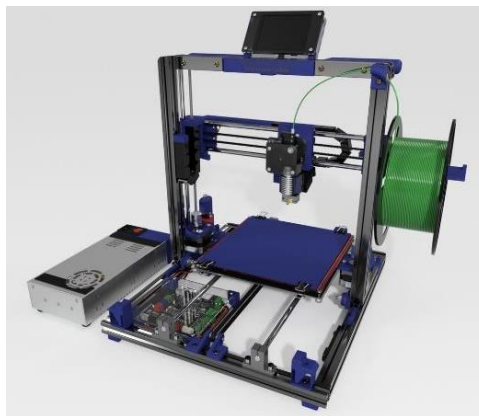


Fuente: https://en.wikipedia.org/wiki/RepRap_Ormerod

5.3 ALTERNATIVA 3

Impresora 3D cartesiana portable, cabe recalcar que tiene las mismas características de una impresora 3D cartesiana convencional, tiene el volumen de impresión óptimo para las tareas que debe realizar, una estructura metálica como soporte, estabilidad para el movimiento en la impresión del extrusor y capacidad de ser desmontable para transporte fácil y rápido.

Ilustración 12. Impresora 3D cartesiana portable.



Fuente: <https://www.instructables.com/workshop/>

5.4 EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS

Con base en disposiciones y configuraciones de impresoras mostradas, se hará una pequeña selección de las alternativas. Esto mostrará los parámetros que se consideran más importantes a la hora de aplicar el sistema y teniéndolos en cuenta se elegirá aquella de mejores prestaciones

Tabla 2. Selección de alternativas.

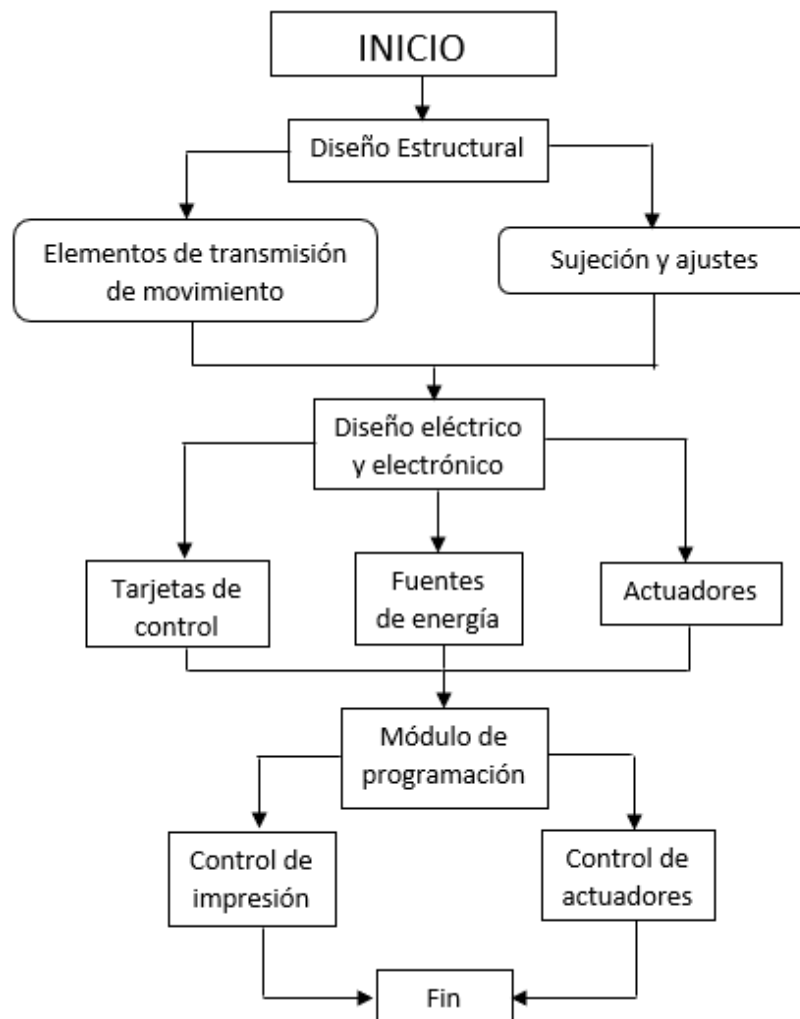
Parámetro de diseño	%	Alternativa 1 (Polar)		Alternativa 2 (Cartesiana)		Alternativa 3 (Cart. Port.)	
		Calif.	Pond.	Calif.	Pond.	Calif.	Pond.
Buena resolución	15,59	7	109,13	7	109,13	7	109,13
Disponibilidad inmediata	15,13	3	45,39	3	45,39	7	105,91
Prototipado rápido	14,98	7	104,86	7	104,86	8	119,84
Buena estructura	14,14	6	84,84	6	84,84	6	84,84
Costos	13,79	4	55,16	4	55,16	5	68,95
Multiplicidad de imp.	13,63	7	95,41	5	68,15	5	68,15
Notificación de cond.	12,74	4	50,96	4	50,96	4	50,96
TOTAL	100		545,75		518,49		607,78

Se puede concluir de la tabla anterior que la alternativa 3, es la alternativa que cumple con los requerimientos seleccionados como parámetros importantes dentro del proyecto.

6 FASE DISEÑO EN DETALLE

A partir de la selección de la mejor alternativa, se conoce el modelo óptimo en el cual se basará la construcción de la impresora que se desea para este proyecto. En este momento se inicia un proceso de diseño secuencial de los módulos que se necesitan construir de manera conectada dentro de la impresora, para determinar en su totalidad todo el sistema, descrito en el siguiente diagrama:

Ilustración 13. Diagrama de flujo proceso de diseño en detalle.



6.1 DISEÑO MECÁNICO DE LA ESTRUCTURA.

En este apartado se analizará cada subsistema de transmisión de movimiento para la impresora en cada uno de los ejes, así como la selección de algunos elementos de sujeción que se eligieron para la perfilería. Partiendo del conjunto estructural en perfilería de estrella, se analiza cada subsistema crítico e importante en cuanto al diseño, con sus análisis matemáticos pertinentes.

6.1.1 Determinación de cargas en el eje Y (cama). En el diseño se posicionó sobre el sistema de transmisión del eje Y la cama, que consta de dos placas cuadradas de acrílico una conectada a la otra con tornillos de sujeción y un sistema de calibración por medio de resortes en cada punta del cuadrilátero; que a su vez se conectan a dos varillas por medio de cuatro cojinetes de deslizamiento con su respectiva tornillería. A partir de este conocimiento se calcula el peso que debe moverse en el eje por medio de la transmisión.

Se enlistan los elementos de peso significativo y algunos cálculos adjuntos, para determinar la característica que se desea.

Tabla 3. Medidas de componentes de la cama de la impresora.

Componente	Longitud (mm)	Ancho (mm)	Espesor (mm)
Tablero de acrílico superior	220	220	0.35
Tablero de acrílico inferior	220	220	0.35
Elemento impreso	100	100	100

Para calcular el peso del elemento impreso, se proponen unas medidas regulares en los tamaños de impresión y la propiedad de densidad del material de impresión, que para el caso es PLA donde la densidad es $\rho_{PLA} = 1250 \text{ kg/m}^3$ extraída del Anexo A, propiedades típicas del filamento PLA.

$$V_{PLA} = L * A * e \quad (\text{Ec. 6.1})$$

$$V_{PLA} = 100 * 100 * 100 = 1000000 \text{ mm}^3$$

$$m_{PLA} = V_{PLA} * \rho_{PLA} \quad (\text{Ec. 6.2})$$

$$m_{PLA} = 1,25 \text{ kg}$$

$$W_{PLA} = m_{PLA} * g \quad (\text{Ec. 6.3})$$

$$W_{PLA} = 12,25 \text{ N}$$

A su vez, para el tablero de acrílico se tiene un valor de densidad¹ de $\rho_{ACR} = 1190 \text{ kg/m}^3$, siguiendo el mismo procedimiento anterior.

$$V_{ACR} = 220 * 220 * 0.35 = 16940 \text{ mm}^3$$

$$m_{ACR} = 0,202 \text{ kg}$$

$$W_{ACR} = 0,198 \text{ N}$$

Tabla 4. Peso aproximado soportado en el eje Y.

Elemento	Peso [N]	Cantidad	Peso Total [N]
Tabla de acrílico inferior	0,198	1	0,198
Tabla de acrílico superior	0,198	1	0,198
Modelo impreso	12,25	1	12,25
		Total	12,646

¹ Ficha técnica Polimetacrilato, IDEPLAS, <http://www.ideplas.com/lamina-pmma.pdf>

Se calcula un peso total de 12,646 N, para efectos de la tornillería, resortes, cojinetes de soporte, cables, se propone aumentar el peso total a 16 N y usar este valor para cálculos siguientes.

6.1.2 Determinación de cargas en el eje X (extrusor).

La carga que debe moverse en el eje X por el motor es bastante pequeña, solo consta del carro con sus componentes de ajuste y el extrusor, que no tiene el motor ajustado a él, por tanto, la carga del susodicho no es muy representativa. Se plantean de la siguiente forma, los elementos presentes en el carro.

Tabla 5. Elementos y especificaciones del carro del eje X.

Elemento	Especificaciones
Lámina de aluminio	Densidad ² de $\rho_{AL} = 2698 \text{ kg/m}^3$, Largo = 8cm, Ancho = 10cm, Espesor = 3mm
Extrusor (sin motor)	MK8 con peso ³ de $m_{mot-ext} = 275g$ teniendo en cuenta que es peso con motor incluido.
Montaje de llanta sobre el eje	Componentes individuales con peso poco representativo para el caso estudiado.

Para calcular el peso de la placa de aluminio, se procede de manera similar al apartado anterior, conociendo todos los datos que están consignados en la tabla 5.

$$V_{ALU} = 100 * 80 * 3 = 24000 \text{ mm}^3$$

$$m_{ALU} = V_{ALU} * \rho_{ALU} = 0,0647 \text{ kg}$$

$$W_{ALU} = m_{ALU} * g$$

² Propiedades del Aluminio, WIKIPEDIA, <https://es.wikipedia.org/wiki/Aluminio>

³ Características extrusor MK8, <https://www.vistronica.com/#>

$$W_{ALU} = 0,635 \text{ N}$$

Para el extrusor se sigue de la siguiente forma, el peso de un ensamblaje motor-extrusor⁴ MK8 con motor Nema 17 es de aproximadamente $W_{MOT-EXT} = 275g$, siguiendo las características de una ficha técnica de un motor Nema 17 mostrada en el anexo B, se puede notar que su peso oscila entre 200 g y 350 g. En el diseño de esta impresora, se separó el extrusor del motor que impulsa el filamento, por facilidad de montaje, por tanto, la aportación al peso del carro solo del extrusor es poco significativa. Como criterio se propone otorgar al extrusor el 40% del peso total del ensamblaje motor-extrusor, es decir:

$$m_{EXT} = 0,4 * m_{MOT-EXT}$$

$$m_{EXT} = 110 \text{ g}$$

$$W_{EXT} = 1,08 \text{ N}$$

El ensamblaje de la llanta sobre el eje, que en este caso es un tornillo de 7 [mm] de diámetro y longitud de 70 [mm] de aluminio, se completa con algunos otros componentes de dimensiones aún más pequeñas que estas, por tanto, los pesos son poco significativos. Para no despreciar la aportación de cada componente se calculará aproximadamente el peso de este tornillo y se dará un criterio con base en este peso, que sería el del elemento más grande de todo el ensamblaje.

$$V_{TOR} = \frac{\pi}{4} * D_{TOR}^2 * h_{TOR} = \frac{\pi}{4} * (0,007)^2 * 0,07 = 2,69 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$m_{TOR} = 7,27 \times 10^{-3} \text{ kg}$$

$$W_{TOR} = 0,071 \text{ N}$$

Como se observa, el peso individual de un solo tornillo no llega a aportar ni una décima de la unidad de peso, queda demostrado que es relativamente pequeño en

⁴ Características extrusor MK8, <https://www.vistronica.com/#>

comparación al resto del carro, por tanto, al ser 4 tornillos ensamblados de la misma manera, se obtiene de un total de $W_{TOR-T} = 0,284 \text{ N}$. Conociendo el valor del peso de los tornillos, se propone aumentar el valor del peso del total de los ejes a $W_{EJES} = 2 \text{ N}$, para efectos del peso de los demás elementos ensamblados a estos.

Tabla 6. Peso aproximado soportado en el eje X.

Elemento	Peso [N]	Cantidad	Peso Total [N]
Lámina de aluminio	0,635	1	0,635
Extrusor (sin motor)	1,08	1	1,08
Montaje de ejes	0,5	4	2
		Total	3,715

6.1.3 Determinación de cargas en el eje Z (doble motor). Quizá sea el eje donde se deba tener más precaución al calcular las cargas, pues levanta el peso además del carro del eje X, todos los componentes de ese brazo, que para el estudio ya representan cargas bastante elevadas. Se enlista nuevamente cada parte y se analiza su aportación como elemento a las cargas del sistema doble motor y, posteriormente analizar algún criterio de seguridad en cuanto al peso total determinado.

Tabla 7. Elementos del eje Z (doble motor).

Elemento	Descripción
Carro derecho eje Z	Dos placas de aluminio Largo = 8 cm, Ancho= 10 cm, espesor = 3 mm y tornillería.
Carro izquierdo del eje Z	Dos placas de aluminio, una de ellas igual a las del anterior recuadro, la otra difiere en largo = 15 cm, tornillería y un motor ajustado.
Perfil de aluminio	Perfil estrella de 3.5x3.5 cm y 50 cm de largo con una masa ⁵ de $m_{PERFIL} = 0,649 \text{ kg/m}$.
Husillos	Varillas trapezoidales de D = 8 mm, L = 50 cm y masa ⁶ de $m_{VARILLA} = 164 \text{ g}$.
Carro del extrusor	Carro analizado en el apartado anterior, se conocen sus características.
Motores	Motores PaP Nema 17 con masa ⁷ de $m_{MOTOR} = 350 \text{ g}$.
Otros	Componentes varios de pesos no significativos: polea loca, poleas de motores, tensor, correa, tornillería, acoples, soportes husillo-carro.

Para iniciar con el carro izquierdo del eje Z, se procede de manera similar a los cálculos pasados, conociendo el valor de densidad del material y teniendo las medidas del elemento.

⁵ Características perfil estrella de aluminio, <https://www.vistronica.com/#>

⁶ Características varilla roscada trapezoidal, <https://www.vistronica.com/#>

⁷ Características motores Nema 17, <https://www.vistronica.com/#>

$$V_{Placa-Grande} = 150 * 100 * 3 = 45000 \text{ mm}^3$$

$$m_{Placa-Grande} = V_{Placa-Grande} * \rho_{ALUMINIO} = 0,12141 \text{ kg}$$

$$W_{Placa-Grande} = m_{Placa-Grande} * g$$

$$W_{Placa-Grande} = 1,19 \text{ N}$$

Calculando de la misma manera para la placa pequeña del carro, se tiene que:

$$V_{Placa-Peq} = 100 * 80 * 3 = 24000 \text{ mm}^3$$

$$m_{Placa-Peq} = 0,0647 \text{ kg}$$

$$W_{Placa-Peq} = 0,635 \text{ N}$$

Se sabe de las especificaciones que este carro tiene un motor ensamblado y del anexo B se tiene que normalmente tienen una masa de 340 g. Para determinar en su totalidad, el motor tiene una polea ajustada al eje, soporte para ajustar el husillo, la placa grande tiene el tensor del sistema de transmisión y cuenta con toda la tornillería de ajuste para los ejes donde se montan las llantas.

$$W_{Carro-Izq} = W_{Placa-Grande} + W_{Placa-Peq} + W_{Motor}$$

Faltaría adicionar un valor aparentemente desconocido que es el de los componentes (W_{otros}), pero la tornillería de los carros toda es la misma y esta se calculó en un apartado anterior, donde el valor del peso del tornillo fue $W_{TOR} = 0,071 \text{ N}$ y se asumió un valor con respecto a esa referencia. Para el caso se propone aumentar el valor total del peso en 2 N, para efectos de estos componentes.

$$W_{Carro-Izq} = [1,19 + 0,635 + (0,35 * 9,81)] + 2$$

$$W_{Carro-Izq-TOTAL} = 7,2385 \text{ N}$$

Para el carro derecho del eje Z, se tienen dos placas idénticas de las cuales ya se calculó el peso, porque son iguales a la placa pequeña del carro izquierdo, entonces se sigue que $W_{Placa-Peq} = W_{Placas-Derecha} = 0,635 \text{ N}$. No contiene más que componentes de peso bajo como es, soporte para ajuste de husillo y tornillería considerada en el ensamblaje de los ejes de las ruedas, se ha dicho anteriormente que se aumentan 2 N como aportaciones de los componentes al valor de peso calculado, por tanto:

$$W_{Carro-Derecha} = [0,635 + 0,635] + 2$$

$$W_{Carro-Derecha} = 3,27 \text{ N}$$

Para los elementos faltantes el cálculo es muy sencillo, pues se conoce la masa de cada uno mostrada en la tabla 7, por tanto, se procede a calcular cada uno y discriminar cada valor de peso en una forma más fácil de visualizar.

$$W = m * g$$

$$W_{Perf-Alu} = m_{Perf-Alu} * g = (0,649 * 0,5) * 9,81 = 3,183 \text{ N}$$

$$W_{Husillo} = m_{Husillo} * g = 0,164 * 9,81 = 1,609 \text{ N}$$

$$W_{Motor} = m_{Motor} * g = 0,35 * 9,81 = 3,434 \text{ N}$$

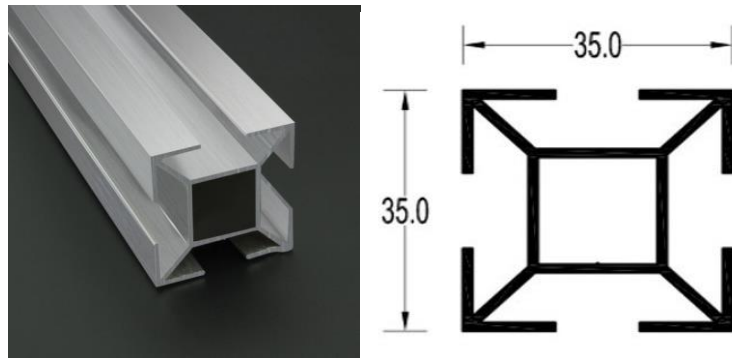
Tabla 8. Peso aproximado de las cargas del eje Z.

Elemento	Peso [N]	Cantidad	Peso Total [N]
Carro derecho	3,27	1	3,27
Carro izquierdo	7,2585	1	7,2585
Perfil de aluminio	3,183 (centrado)	1	3,183
Husillos	1,609	2	3,218
Carro del extrusor	3,715	1	3,715
Motor	3,434	2	6,868

Se tienen los efectos de cada elemento para considerar en el eje Z, discriminados quedan pendientes para posterior uso. Imperativo tener en cuenta que algunos elementos, por ejemplo, el perfil de aluminio tiene una carga distribuida y debe tratarse como tal para no perder confiabilidad en los cálculos realizados.

6.1.4 Conjunto estructural en perfilería. El perfil ranurado en estrella tiene como característica un peso relativamente bajo, ofreciendo unas ranuras que son importantes para el ensamble de las llantas a través de las cuales se movilizarán los carros de los ejes XYZ, también hay mucha disponibilidad en el mercado de esta perfilería, siendo la decisión óptima para el soporte estructural de la impresora.

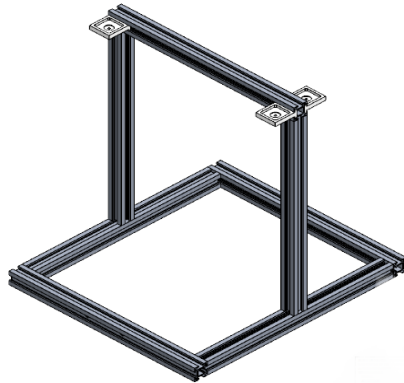
Ilustración 14. Perfil estrella.



Fuente: <https://www.vistronica.com/#>

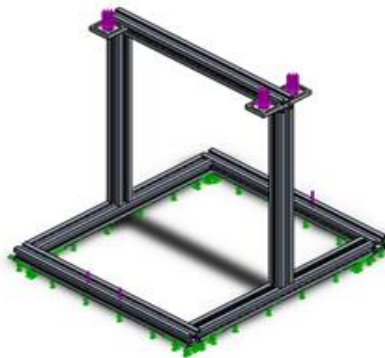
Con base en la perfilería de aluminio seleccionada, se muestra el planteamiento de la estructura de la impresora en la siguiente figura. Se debe tener en cuenta que, sobre esta configuración estructural, quedarán ajustados todos los sistemas de transmisión de movimiento, así como soportes, motores, etc. Entonces debe adjuntarse un estudio de factores de seguridad en la estructura, en las zonas que se considerarán críticas.

Ilustración 15. Estructura de la impresora.



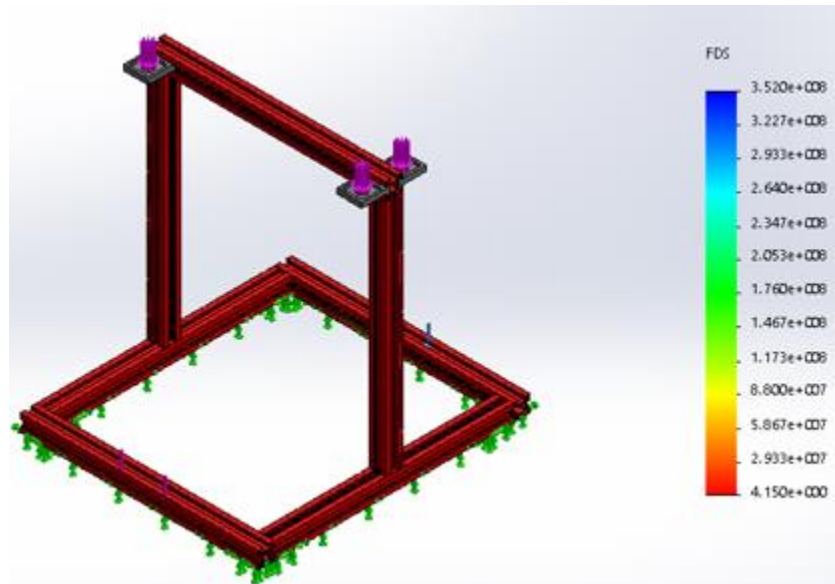
Conociendo la distribución del sistema estructural, se posicionan las cargas en los lugares donde están haciendo acción sobre el conjunto con ayuda de un análisis de las leyes de newton sencillo consignado en el anexo C, teniendo en cuenta los valores que son fácilmente calculables con los datos consignados en las tablas de pesos anteriores y con ayuda del software SOLIDWORKS, se realiza un estudio de cargas estáticas, en busca del factor de seguridad mínimo encontrado en todo el sistema. La estructura determinada para análisis gráficamente quedaría de la siguiente forma.

Ilustración 16. Posicionamiento de cargas en la estructura para análisis de factor de seguridad.



Se aclara que los puntos de fijación para el estudio son las flechas verdes, y las cargas son las flechas en púrpura. A partir de esta configuración se calcula la distribución de factores de seguridad y se obtiene lo siguiente:

Ilustración 17. Distribución de factores de seguridad.



Para determinar claramente el funcionamiento de los perfiles en la estructura, se analizan los datos consignados en la siguiente tabla arrojados en el estudio de cargas:

Tabla 9. Factores de seguridad resultantes de análisis de carga estática.

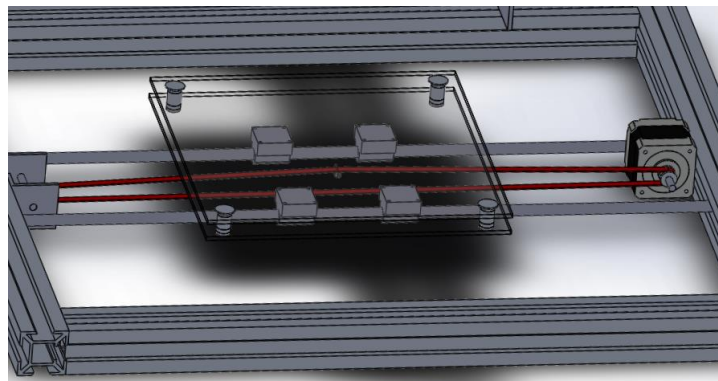
Nombre	Min.	Max.
Factor de seguridad	4.15 (nodo 44447)	3.52×10^8 (nodo 6788)

Conociendo el mallado de la estructura (ver anexo D), el nodo 44447 donde se encuentra el valor mínimo de factor de seguridad, justifica claramente que la selección de los materiales y las cargas que soporta es óptima, pues un valor de 4.15 muestra un rango de trabajo bastante alto para fallas, evitando excesivos gastos en material.

6.1.5 Diseño sistema de transmisión de movimiento por poleas y correas. En los ejes X e Y se plantea el movimiento por medio de un sistema de correas y poleas, por tanto, se desea conocer la magnitud de la carga que debe mover el motor por medio de un análisis estático. Se determina a través de este análisis y algunas consideraciones de los elementos implicados, un valor que se compara con la carga que se determinó para el motor en las pruebas de torque.

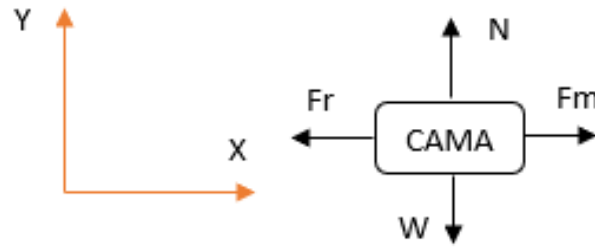
6.1.5.1 Determinación de torque en el eje Y (cama). Según el gráfico mostrado a continuación, cada elemento que está en la cama representa un peso que debe ser tenido en cuenta para calcular los efectos estáticos sobre este subsistema; usando el peso calculado del eje Y en apartados anteriores.

Ilustración 18. Eje Y o cama de extrusión de la impresora.



Se plantea un diagrama de cuerpo libre (DCL) donde se muestran las fuerzas que intervienen:

Ilustración 19. Diagrama de cuerpo libre de la cama de la impresora.



Fuente: Autor.

Para determinar la fuerza de fricción, se requiere del conocimiento del coeficiente de rozamiento pues la mesa está apoyada sobre cuatro cojinetes lineales de bolas, entonces se extrae de la siguiente tabla, donde se muestran varios valores del coeficiente para distintos materiales.

Tabla 10. Coeficiente de fricción de algunos materiales.

Materiales en contacto	μ_e	μ_d
Acero - Acero	0,15	0,09
Acero - Teflón	0,04	0,04
Acero - Latón	0,5	0,4

Fuente: <http://elfisicoloco.blogspot.com/2014/05/calcular-el-coeficiente-de-rozamiento.html>

Analizando el DCL, según la segunda ley de Newton, se tiene lo siguiente:

$$\Sigma F_x = m * a \quad (\text{Ec. 6.4})$$

$$Fm - Fr = m * a$$

$$Fm = \mu * N + m * a$$

Ya que la mesa tendrá movimientos intermitentes, cada vez que el motor deba moverla, existirá en cada arranque la inercia total de la mesa. Entonces la fuerza de

fricción actuará de manera crítica en el diseño con el coeficiente estático entre los cojinetes lineales de bolas de acero y las barras de acero donde se soporta la mesa. También se dice que los efectos de la aceleración para un motor de pasos son despreciables, entonces como criterio, se propone reemplazar los efectos de la aceleración por el peso del elemento.

$$Fm = 0,15 N + W_c$$

La forma de determinar la fuerza que se requiere para mover la mesa es realizando otro balance de fuerzas, pero en el eje restante de análisis.

$$\Sigma F_y = 0 \quad (\text{Ec. 6.5})$$

$$N - W_c = 0$$

$$N = 16 N$$

Se resuelve el sistema con el valor de la fuerza normal y procedemos a calcular el torque que requiere el motor para mover la mesa, teniendo en cuenta algunas consideraciones importantes.

$$Fm = 18,4 N$$

- El peso de la correa y poleas es despreciable en comparación al sistema
- No hay pérdidas por deslizamiento entre banda y poleas
- La inercia de las poleas es mínima
- El motor paso a paso no requiere aceleración para llegar a la velocidad nominal (Inercia constante)

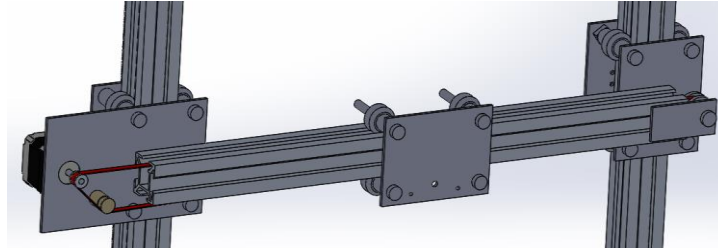
Teniendo en cuenta el diámetro de la polea (D_{pc}) donde reposa la correa de la cama y la fuerza determinada, se realiza el cálculo del torque.

$$T = F_m * \frac{D_{pc}}{2} \quad (\text{Ec. 6.6})$$

$$Tc = 0,2208 N.m$$

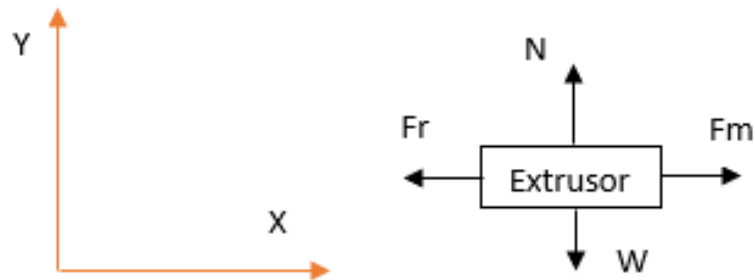
6.1.5.2 Determinación de torque en el eje X (extrusor). Siguiendo la misma secuencia de los cálculos anteriores, se propone de nuevo un diagrama de cuerpo libre, pero ahora para el brazo en X, donde se encuentra el extrusor.

Ilustración 20. Eje X o brazo del extrusor de la impresora.



Se propone el diagrama de cuerpo libre (DCL) que muestra las fuerzas que intervienen en este caso.

Ilustración 21. Diagrama de cuerpo libre del brazo de la impresora.



En este caso el coeficiente de rozamiento cambia un poco en su valor, pues las superficies en contacto son diferentes, ya que son las llantas del carro del extrusor y el perfil de aluminio. Entonces hay que determinar un valor diferente para este cálculo con las mismas consideraciones de inercia y movimiento realizadas anteriormente.

Tabla 11. Coeficiente de fricción del acetal.

Materiales en contacto	μ_e	μ_d
Acetal - Aluminio	0,3	0,18

Fuente: <http://www.plasticbages.com/caracteristicasacetal.html>

Una buena aproximación para nuestro cálculo es tomar el coeficiente de fricción del acetal sobre el aluminio, debido a que las ruedas están fabricadas en este material. Despreciando los efectos de la aceleración, asumiendo el peso del elemento en vez de ello y teniendo como consecuencia de las leyes de newton lo siguiente.

$$\Sigma F_x = m * a$$

$$Fm - Fr = m * a$$

$$Fm = 0,3 N + W_{ext}$$

Resolviendo para el eje restante el balance de ecuaciones que se solicita.

$$\Sigma F_y = 0$$

$$N - W_{ext} = 0$$

$$N = 3,715 N$$

Resolviendo el sistema y dando el valor para la fuerza del motor en el eje del extrusor:

$$Fm = 4,8295 N$$

Teniendo las mismas consideraciones del apartado anterior se calcula el torque esta vez para el eje X donde se encuentra el extrusor, también recordando el diámetro de la polea de este brazo (D_{pe}) y la fuerza hallada para la correa.

$$T = F_m * \frac{D_{pc}}{2}$$

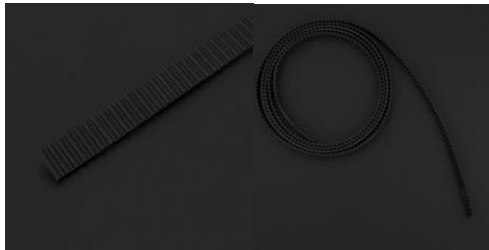
$$Te = 0,058314 \text{ N.m}$$

6.1.5.3 Poleas y Correas. La selección de las poleas se realiza de la mano con la correa seleccionada para el sistema, se muestran gráficos y consideraciones a continuación.

- **Correas**

Al momento de seleccionar la correa se tuvo en cuenta la longitud que se maneja en cada eje donde se implementa una, la robustez del movimiento que debe transmitir y la tensión que debe mantener la correa, así como un poco la estética de la impresora.

Ilustración 22. Correa para eje X e Y.



Fuente: <https://www.vistronica.com/#>

De la correa se tienen las siguientes características:

Tabla 12. Características de la correa para eje de extrusor y cama.

Tipo	GT2
Longitud	1 [m] ó 2 [m]
Color	Negro
Ancho	6 [mm]
Paso	2 [mm]
Material	Fibra de caucho reforzado

Fuente: https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-461236731-correa-de-distribucion-gt2-6mm-para-impresora-3d-x1m-cnc-_JM?quantity=1

Se observan dos valores para la longitud de la correa en la tabla anterior y esto tiene un porqué:

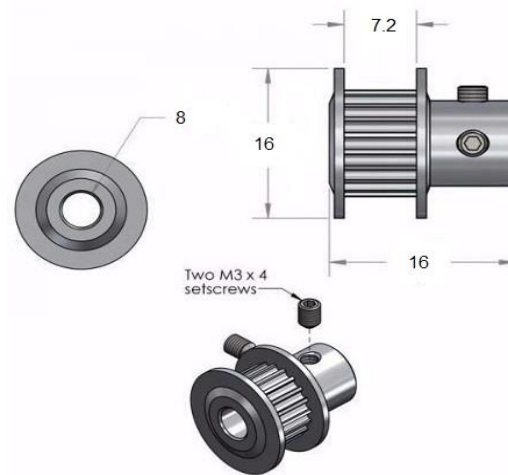
- Para la correa del eje Y, es decir la cama de la impresora, se tiene una longitud aproximada de la correa de unos 90 [cm] para conectar la cama con las poleas del sistema y poder transmitir el movimiento, entonces una correa de 1 [m], es suficiente para la solicitud de longitud del eje.
- Para la correa del eje X, es decir el brazo del extrusor, se instaló un tensor que tiene como función evitar que la correa roce con el perfil y baje la capacidad de la impresora o interfiera con el movimiento normal del carro de extrusión. Por tanto, la longitud de la correa aumenta alrededor de 130 [cm], solicitando una longitud mayor en el eje; evidenciando la necesidad de usar una correa de 2[m] suficiente para suplir la necesidad de una mayor longitud.

Se aclara que la capacidad de estas correas es para más volumen de trabajo del que representa esta impresora, entonces se encuentra un sobredimensionamiento, pero se debe netamente a que es la correa estándar y de mínimas capacidades en el mercado.

- **Poleas**

Para los ejes X e Y se implementó en el caso de la conexión al motor la misma polea, mostrando sus características en los siguientes gráficos.

Ilustración 23. Esquema de la polea conectada a los motores X e Y.



Fuente: <https://www.vistronica.com/#>

Se requiere conocer algunas características importantes del elemento en cuestión y se presentan de la siguiente forma.

Tabla 13. Características de la polea conectada a los motores X e Y.

Tipo	Engranaje GT2
Material	Aluminio
Dientes	20
Diámetro del agujero	8 [mm]
Paso entre dientes	2 [mm]
Dimensiones	16x16 [mm]

Fuente: <https://www.vistronica.com/#>

Ahora se tratarán las diferencias en los sistemas de transmisión de cada eje, teniendo en cuenta que la disparidad está en la polea conducida y un agregado más para el eje del extrusor, que es donde se encuentra el tensor.

- **Polea conducida del Y (cama)**

Se usó una polea igual a la mostrada en la figura 22, atravesando con un eje por el centro y ajustando en sus dos extremos.

Ilustración 24. Polea conducida del eje Y (cama).



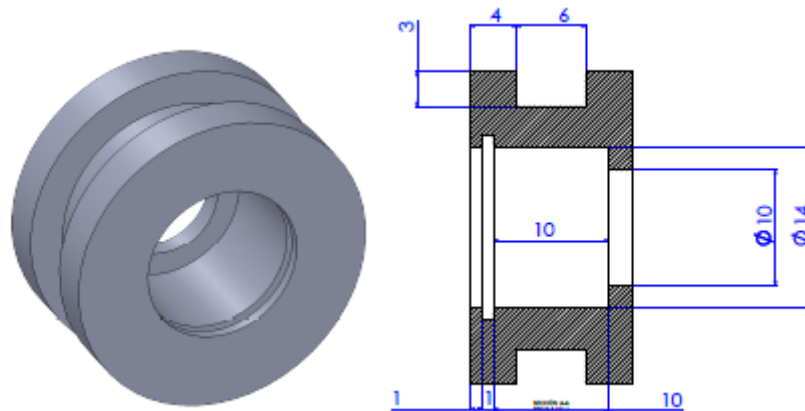
Fuente: <https://www.vistronica.com/#>

Esta polea se encuentra al otro extremo del recorrido del sistema, donde el eje al que se ajusta dicho elemento está libre para girar permitiendo la transmisión por la correa.

- **Polea conducida del eje X (extrusor)**

Se trata de una polea loca, diseñada para requerimientos de la máquina. Tiene un diámetro de 27 [mm] y ancho de 14 [mm]. Con un diseño acanalado para conducir la correa de 6 [mm] de ancho y una altura del canal de 3 [mm]. Tiene un diseño interior en forma de hombro con diámetro de 14 [mm] para poner un rodamiento que será la forma de conducción de esta polea, agregando también una ranura de 1 [mm] para chaveta que evite la salida del rodamiento de su lugar. (ver anexo E)

Ilustración 25. Polea conducida en el eje X (extrusor).

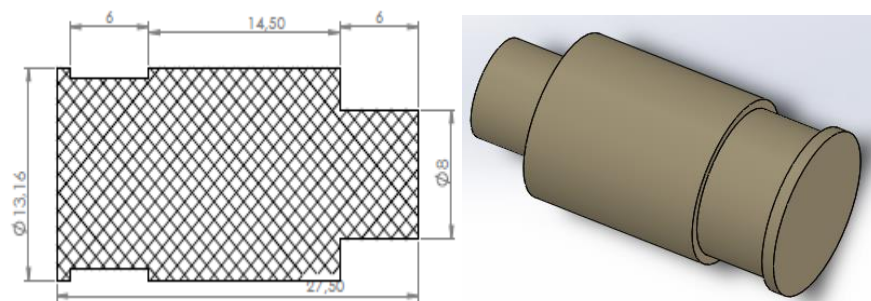


Los rodamientos se adicionan dentro de la polea, para asegurar el movimiento fluido y eficiente para el cual se diseñó dicho elemento,

- **Tensor del eje X (extrusor)**

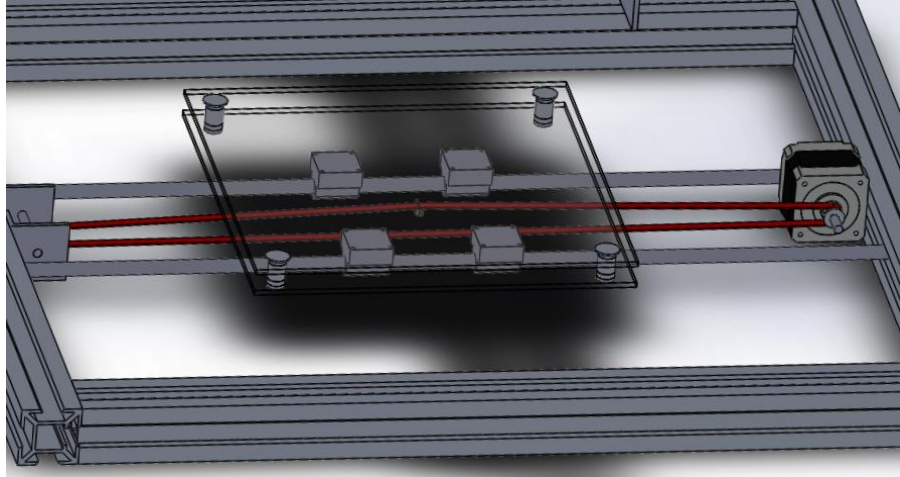
La función de este elemento en el sistema de poleas del extrusor es evitar que la correa roce con el perfil de aluminio, e interfiera con el movimiento normal del sistema, es un elemento de fácil fabricación y está hecho en acetal. Contiene el mismo espesor de la polea de conducción y la polea loca, para fácil ensamblaje y movimiento del sistema.

Ilustración 26. Tensor del sistema de transmisión del extrusor.



6.1.5.4 Diseño del deslizador del eje Y (Cama). Consta de los elementos que sostienen el material impreso, una plataforma que desliza sobre dos ejes de acero de 8 [mm] de diámetro y 500 [mm] de longitud, por medio de cojinetes de deslizamiento sujetos a la tabla de acrílico inferior.

Ilustración 27. Plataforma deslizante del eje Y (cama).



Fuente: Autor.

Para esta configuración, se define una relación, llamada relación de soporte que se define como la longitud del deslizador sobre el diámetro efectivo del cojinete.

$$BR = \frac{L_e}{D_e} \quad (\text{Ec. 6.7})$$

BR = Relación de soporte [-]

L_e = Longitud del deslizador [cm]

D_e = Diámetro efectivo del cojinete [cm]

El criterio de diseño para su buen funcionamiento es que esta relación debe ser igual o mayor a 1.5⁸, cualquier valor por encima de 1.5 es aceptado y válido cuanto

⁸ Robert Norton, An Introduction to the Synthesis and Analysis of Mechanisms and Machines, p 58.

mayor sea. La longitud del deslizador se dice que es todo el espacio por donde puede moverse la plataforma donde hace contacto el deslizador con la guía estacionaria y el diámetro efectivo es la distancia más larga entre las guías fijas. Se tiene que la longitud del deslizador es 45 [cm] y el diámetro efectivo es 5 [cm] entonces:

$$BR = \frac{45 [cm]}{5 [cm]} = 9$$

Donde se verifica el correcto dimensionamiento del deslizador. Otra condición, es analizar el diámetro de los cojinetes, para lo cual se tiene lo siguiente:⁹

$$\frac{Le}{Dc} > 6 \quad (\text{Ec. 6.8})$$

Sabiendo que D_c es el diámetro del cojinete, se analiza la relación:

$$\frac{45 [cm]}{0.8 [cm]} = 56,25 > 6$$

Con lo cual se garantiza que la selección de las guías y los cojinetes es la apropiada, con el diámetro de 8 [mm] se procede a analizar el desplazamiento de las guías debido al peso total de la cama. Conociendo el peso calculado anteriormente extraído de la tabla 4, la carga de 16 [N] dividida para cuatro apoyos que son los cojinetes quedaría en 4 [N]. El factor de diseño predominante en este elemento es la deflexión, se realizarán cálculos para obtener una precisión de máquina moderada. En la búsqueda de distintas teorías se encuentra en el libro de Mott¹⁰, que, en una viga sometida a flexión, el rango de deflexión debe estar entre 0,00001 a 0,00005 *in/in* de longitud de la viga, sabiendo que la longitud de las vigas de la cama, es decir las guías del deslizador son de 450 [mm], entonces:

⁹ McCauley C, Machinery's Handbook, p.2155.

¹⁰ Robert L Mott, Diseño de Elementos de Máquina, p.777

$$y_d = 0,00005 \text{ [in/in]} * \frac{25,4 \text{ [mm]}}{1 \text{ [in]}} * 450 \text{ [mm]}$$

$$y_d = 0,5715 \text{ [mm]}$$

Donde y_d es la deflexión máxima para en vigas en máquinas de precisión moderada, con base en este criterio se hallará la deflexión máxima en las vigas y_{dmax} , para comparar y determinar si es criterio de selección de las guías es correcto, para determinar dicho valor se tiene la siguiente ecuación de vigas:

$$y_{dmax} = \frac{-F_y L^3}{48EI_y} \quad (\text{Ec.6.9})$$

Definiendo cada término de la ecuación:

$$F_y = \text{Fuerza actuante sobre la guía} = 4 \text{ [N]}$$

$$E = \text{Módulo de elasticidad de la guía} = 207 \text{ GPa, ver anexo F.}$$

$$I_y = \text{Momento de inercia generado en el eje Y de la guía} = \frac{\pi * D_{guía}^4}{64}$$

$$L = \text{Longitud total del deslizador} = 450 \text{ [mm]}$$

En primera instancia se calculará el momento de inercia del eje, pues se necesita para hacer el cálculo de la deflexión:

$$I_y = \frac{\pi * D_{guía}^4}{64} \quad (\text{Ec. 6.10})$$

$$I_y = \frac{\pi * (8/1000)^4}{64}$$

$$I_y = 2,011 \times 10^{-10} \text{ [m}^4\text{]}$$

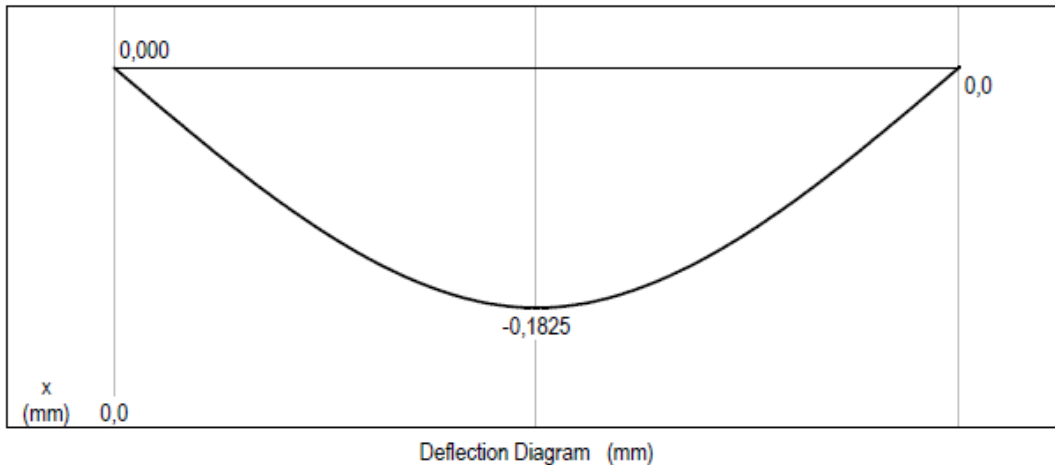
En orden secuencial se calcula la deflexión máxima en la viga:

$$y_{dmax} = \frac{-(4) * (0,45)^3}{48 * (207 \times 10^9) * (2,011 \times 10^{-10})}$$

$$y_{dmax} = -1,824 \times 10^{-5} [m] = -0,1824 [mm]$$

El resultado se ve consistente en cuanto a magnitudes corresponde y se procede a verificar con soporte del software MDSolids, analizando la deflexión máxima que tiene la guía en el centro.

Ilustración 28. Deflexión en una viga con MDSolids.



Como se puede observar en los diagramas de pendientes y deflexión realizados con el software (ver anexo G), está comprobado el resultado de la deflexión, así como el dibujo de la curva elástica. Con base en el criterio propuesto anteriormente se tiene que:

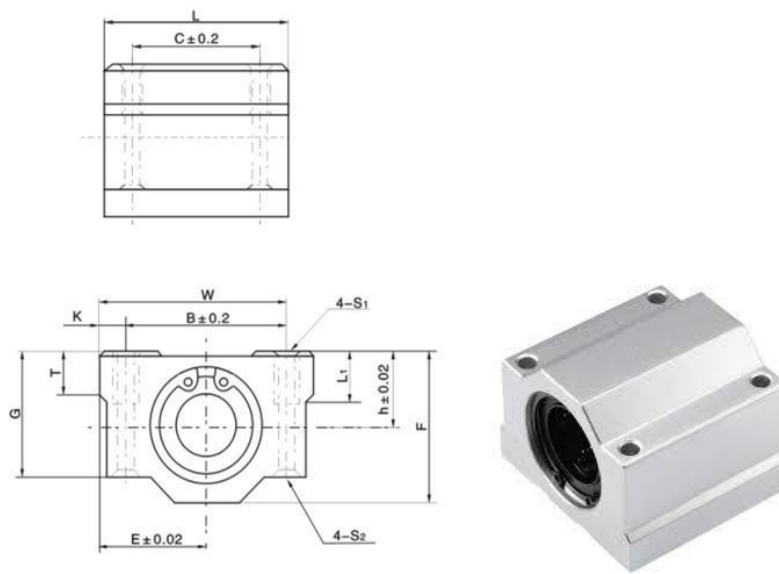
$$y_{dmax} < y_d$$

$$0,1825 [mm] < 0,5715 [mm]$$

Obteniendo una máquina de precisión moderada, así queda comprobado que la selección del diámetro de 8 [mm] es satisfactoria. Análisis de falla en viga, no aplican una minuciosidad, pues las cargas soportadas son bajas, por tanto, el factor de diseño principal es la deflexión.

6.1.5.5 Cojinetes. Las guías deben hacer contacto deslizante con algún objeto que permita el movimiento sobre estas de todo el conjunto de la cama, este elemento se denomina cojinete de deslizamiento y fue escogido con base en las guías de 8 [mm] de diámetro seleccionadas. Se muestran características a continuación.

Ilustración 29. Cojinete de deslizamiento SCS.



Se muestran las medidas principales enunciadas para este cojinete en especial.

Tabla 14. Características del cojinete.

Dimensión	Unidades [mm]
W+K	39
L	30
G	18
D	8

Son algunas de las medidas que se tienen del elemento, se encuentran en la ficha técnica de compra del cojinete (ver anexo H). Se elige el cojinete por su ligereza y por el diámetro interno de 8 [mm] solicitado, para poder realizar el ajuste entre las guías y estos elementos. Además, se resalta que están configurados cuatro de estos elementos de manera equidistante, conectados por medio de tornillería a la tabla de acrílico inferior permitiendo el movimiento.

6.1.5.6 Tornillo de potencia en el eje Z. Para finalizar la sección del diseño mecánico, se solicita conocer el correcto dimensionamiento de cargas en el husillo, por donde se realiza el movimiento del eje Z. Este cálculo se realizará con base en el peso calculado en el anexo 3, donde se usa un balance de fuerzas para posicionar las cargas sobre la línea de acción donde está el husillo. Sabiendo que el husillo en cuestión cuenta con un diámetro de 8 [mm], se procede con los datos de la siguiente tabla:

Tabla 15. Características de un tornillo rosca ACME.

Tamaño nominal	Hilos por pulgada (Ne)	Altura básica del diente (h)	Diámetro mayor (do)	Ángulo de hélice (α)
5/16 [in]	14	0,03571	0,3125	4°42'

Fuente: Fatiga y Fisura Progresiva, Ing. Alfredo Parada.

El diámetro de 5/16 [in] es la medida más cercana a 8 [mm], el cual se desea seleccionar para utilizar en la impresora. Por tanto, se calcula con base al valor propuesto en la tabla que es más conservativo y si los elementos funcionan para este diámetro lógicamente también funcionarán para el otro.

La ecuación¹¹ que describe el torque para un tornillo de potencia en subida y bajada, tiene las siguientes formas:

$$T_S = \frac{d_m * W_z}{2} \left(\frac{f_s + \cos\theta * \tan\alpha}{\cos\theta - f_s * \tan\alpha} \right) \quad \text{En subida} \quad (\text{Ec. 6.11})$$

¹¹ Alfredo Parada Corrales, Fatiga y Fisura Progresiva, Tornillos de potencia, p.6.

$$Tb = \frac{d_m * W_z}{2} \left(\frac{f_s - \cos\theta * \tan\alpha}{\cos\theta + f_s * \tan\alpha} \right) \text{ En bajada}$$

Lo primero para señalar, es que las ecuaciones de subida y bajada son similares, cambian entre sí, los signos del numerador y denominador. Para tener en cuenta de las ecuaciones:

f_s = coeficiente de fricción entre tornillo y tuerca

θ = Ángulo de filete en este caso para roscas ACME = $14^\circ 30' = 14,5^\circ$

α = Ángulo de hélice = $4^\circ 42' = 4,7^\circ$

d_m = Diámetro medio del tornillo

W_z = carga soportada en el tornillo del eje Z = 15,7505 [N]

Para definir el coeficiente de fricción, se usa la siguiente tabla¹² y consideración.

Tabla 16. Coeficientes dinámicos recomendados de rozamiento.

Material Tornillos\Tuercas	ACERO	LATÓN	BRONCE	FUNDICIÓN
ACERO (Seco)	0,15-0,25	0,15-0,23	0,15-0,19	0,15-0,25
ACERO (Lubricado)	0,1-0,17	0,1-0,16	0,07-0,15	0,08-0,17
BRONCE (Lubricado)	0,15-0,19	0,04-0,6	-	0,06-0,09

Fuente: Fatiga y Fisura Progresiva, Ing. Alfredo Parada.

Recomienda que, para coeficientes estáticos, se determine la siguiente relación, en especial para sistemas que estarán en movimiento:

$$f_{static} = 1,33 * f_{dynamic} \quad (\text{Ec. 6.12})$$

¹² Alfredo Parada Corrales, Fatiga y Fisura progresiva, Tornillos de potencia, p.8.

Se toma de la tabla el valor 0,15 coeficiente de rozamiento dinámico entre acero lubricado y bronce, sabiendo que la tuerca es de bronce¹³, entonces:

$$f_{static} = 1,33 * 0,15 = 0,1995$$

Para determinar el diámetro medio, se tiene la siguiente ecuación¹⁴:

$$d_m = d_o - h \quad (\text{Ec. 6.13})$$

Sabiendo que los valores de d_o y h están definidos en la tabla 15, entonces:

$$d_m = 0,3125 \text{ [in]} - 0,03571 \text{ [in]} = 0,27679 \text{ [in]}$$

Por tanto, se procede a realizar el cálculo de torques en el tornillo:

$$T_s = \frac{0,27679 \text{ [in]} * 25,4 \frac{\text{[mm]}}{\text{[in]}} * 15,7505 \text{ [N]}}{2} \left(\frac{0,1995 + \cos(14,5) * \tan(4,7)}{\cos(14,5) - 0,1995 * \tan(4,7)} \right)$$

$$T_s = 16,236 \text{ [N.mm]}$$

$$T_b = \frac{0,27679 \text{ [in]} * 25,4 \frac{\text{[mm]}}{\text{[in]}} * 15,7505 \text{ [N]}}{2} \left(\frac{0,1995 - \cos(14,5) * \tan(4,7)}{\cos(14,5) + 0,1995 * \tan(4,7)} \right)$$

$$T_b = 6,743 \text{ [N.mm]}$$

Estos torques quedan pendientes para uso posterior en validación, aunque un punto de vista visible es que son realmente bajos a comparación de los que en la ficha técnica de un motor Nema 17 se pueden observar, entonces como premisa puede advertirse de un posible acierto en la selección de los motores en este eje. Como última instancia se recuerda que usan dos tornillos de potencia en el eje Z, pero el

¹³ Características tuerca para varilla trapezoidal, <https://www.vistronica.com/#>

¹⁴ Alfredo Parada Corrales, Fatiga y Fisura progresiva, Tornillos de potencia, p.13

otro es exactamente igual a este con una carga más baja, por tanto, si las condiciones de diseño cumplen para este, también cumplirán en el otro.

6.1.5.7 Condición de autobloqueo en el tornillo de potencia. Se puede considerar auto bloqueante un tornillo de potencia, si al soltarlo de la carga, evita descender por la guía. El extrusor debe mantenerse en su posición vertical quieto, para evitar daños en el modelo impreso, por tanto, es muy importante asegurar esta condición para el tornillo del eje Z. Se considera la siguiente ecuación como condición de autobloqueo:

$$\frac{f_s}{\cos\theta} > \tan\alpha \quad (\text{Ec. 6.14})$$

Desarrollando la ecuación se tiene lo siguiente:

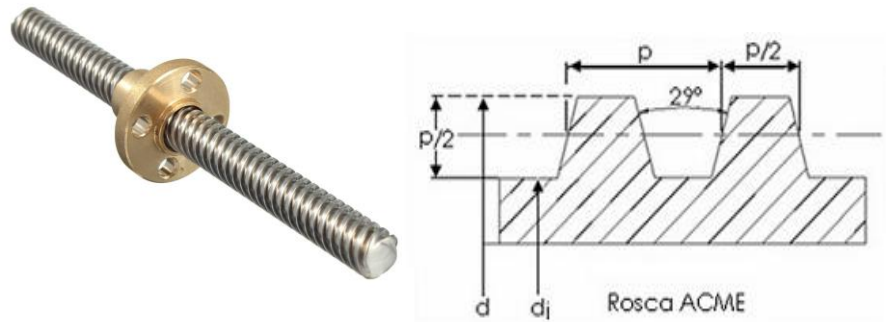
$$\frac{0,1995}{\cos(14,5)} > \tan(4,7)$$

$$0,206 > 0,082$$

Observando que la ecuación se cumple, entonces este tornillo supe la condición de autobloqueo, la cual es importante para el diseño del sistema de movimiento del eje Z.

6.1.5.8 Husillos. Tornillos de 500 [mm] de longitud y 8 [mm] de diámetro, usados en este caso para transformar el movimiento circular de los motores posicionados en la parte superior de la estructura de la impresora, en el movimiento lineal del brazo del extrusor, así como parte estructural para soportar el peso del mismo brazo.

Ilustración 30. Husillos del eje Z.



Fuente: <https://ingemecanica.com>

Se muestran las medidas importantes del tornillo en cuestión, valores consignados en la siguiente tabla.

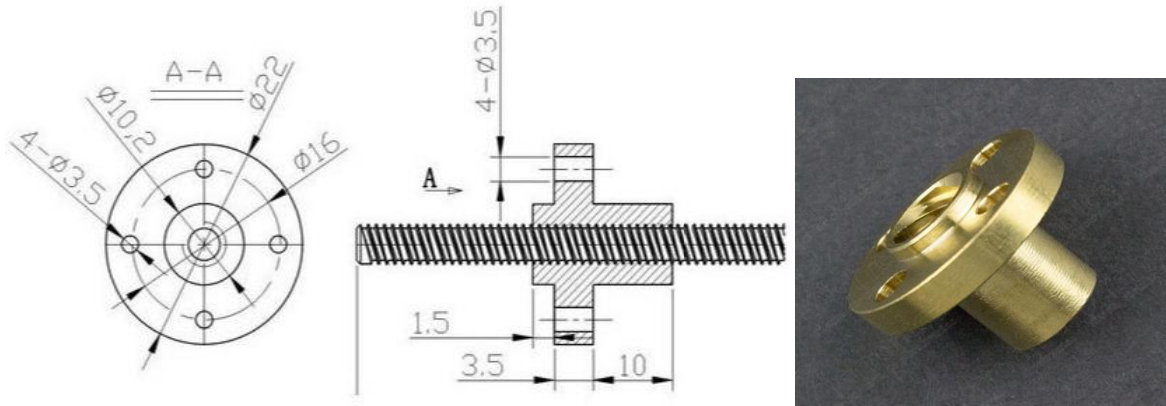
Tabla 17. Medidas de los husillos en el eje Z.

Característica	Dimensión [mm]
Paso	2 [mm]
Longitud	500 [mm]
Diámetro	8 [mm]

Fuente: <https://www.vistronica.com/#>

6.1.5.9 Tuerca para husillo. La tuerca es fabricada en bronce, tiene diámetro interno de 8 [mm], una brida para sujetar a un soporte con agujeros para el ajuste, la brida tiene un diámetro de 22 [mm], y tiene una longitud de 15 [mm]. Es necesario hacer la descripción de este elemento, ya que, por medio de él, se produce la transformación de movimiento circular en movimiento lineal.

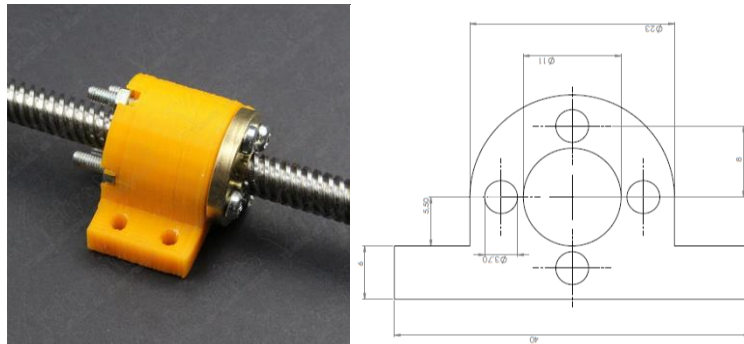
Ilustración 31. Tuerca T8 para husillo.



Fuente: <https://www.vistronica.com/#>

6.1.5.10 Soporte para tuerca. Componente fabricado en una impresora 3D, con material PLA. Es resistente para máquinas CNC que soportan bajas cantidades de torque. Tiene alta durabilidad y algunas imperfecciones normales en impresión 3D, pero no afectan su uso y rendimiento. Se usa esta pieza para sujetar una superficie (en este caso el carro del eje Z) a la tuerca del husillo que convierte el movimiento circular a lineal.

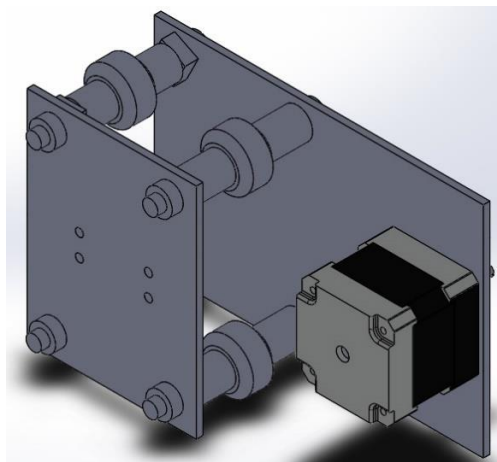
Ilustración 32. Soporte para tuerca.



Fuente: <https://www.vistronica.com/#>

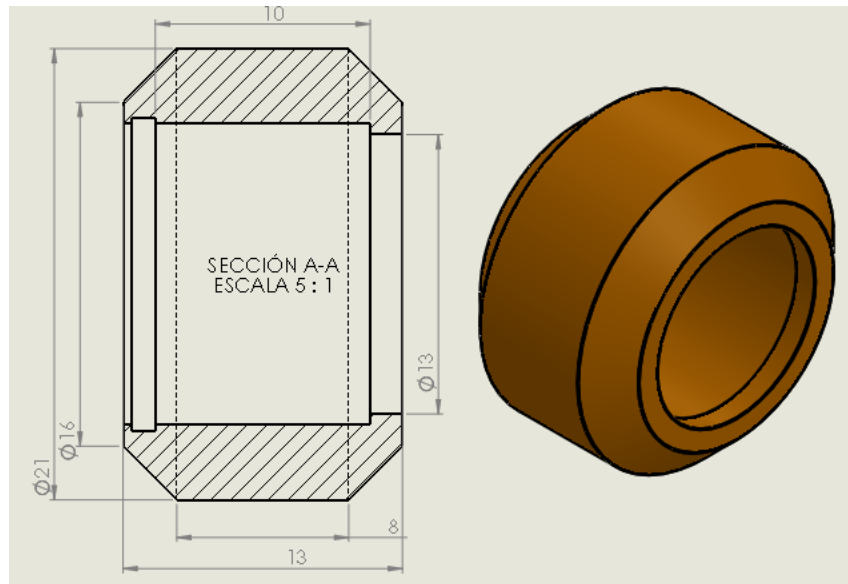
6.1.6 Construcción y ensamblaje de los carros de la impresora. Una última instancia en el diseño en detalle de toda la parte mecánica, son los carros que se mueven a través de los ejes. Estos carros están regidos netamente por la fabricación de las ruedas, pues de ellas dependen las medidas en general del elemento. A través de prueba y error, se determinó cuáles son las medidas óptimas de diseño para aplicar en esta impresora y se pudo traducir en un plano estas consignas.

Ilustración 33. Carros de movimiento en los ejes.



Se logra construir carros similares a estos, gracias a la fabricación de la rueda correcta. Es importante tener en cuenta que la fabricación de las llantas se repitió en varias ocasiones pues hubo varios fallos antes de llegar al resultado que se tiene. En un primer intentó se definió una llanta con las siguientes medidas.

Ilustración 34. Primer modelo rueda.

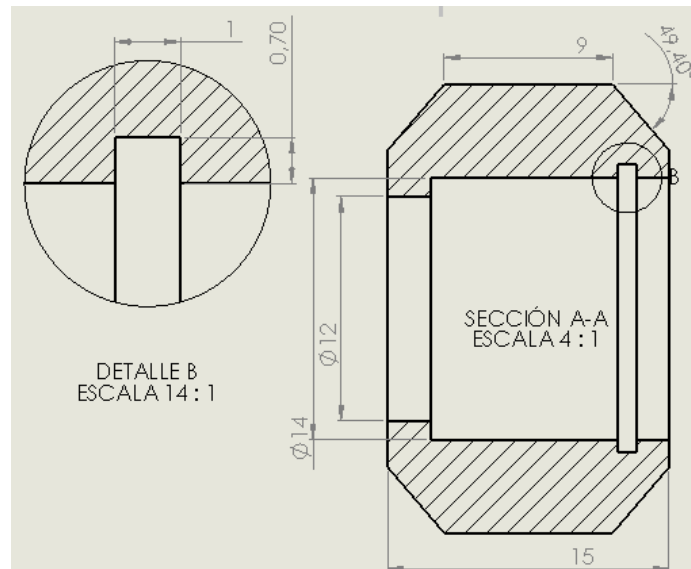


En este modelo se tuvieron tres problemas:

- Problemas de desalineación de los ejes del mismo carro.
- Problemas de atascamiento en el movimiento del eje.
- Desgaste prematuro de las llantas.

Se plantearon nuevos diseños muy similares a este, pero haciendo la rueda un poco más grande: En varios intentos con fallaron ligeros aspectos con respecto a holguras, al bisel, al agujero interno para el rodamiento; arrojando al final el diseño que acertó el resultado que se requería y se sigue de la siguiente manera.

Ilustración 35. Rueda final de la impresora.



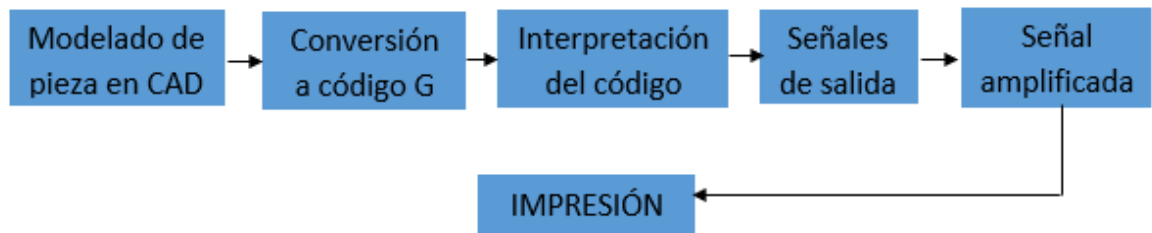
Lo importante de este último diseño es que los problemas mencionados anteriormente se eliminan o reducen en un gran porcentaje, por ejemplo, el desgaste de la rueda es casi imperceptible y tiene un movimiento mucho más fluido en funcionamiento. Finalmente, a partir de este elemento se tienen medidas importantes para concebir los demás elementos como placas, tornillería, bujes, etc. Para observar el resultado de los componentes revisar el anexo M de planos de la impresora.

6.2 DISEÑO DE COMPONENTES ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS

En la construcción de la impresora 3D, los componentes eléctricos y electrónicos, es decir los que realizarán el control, son parte sumamente importante para tener en cuenta. Como premisa, se debe aclarar que este diseño se basa netamente en selección de los mejores componentes en la impresora, se tendrán en cuenta varios factores que tienen que ver con precio, accesibilidad en el mercado y muy importante sencillez tanto para conexiones como para ejecución de los programas.

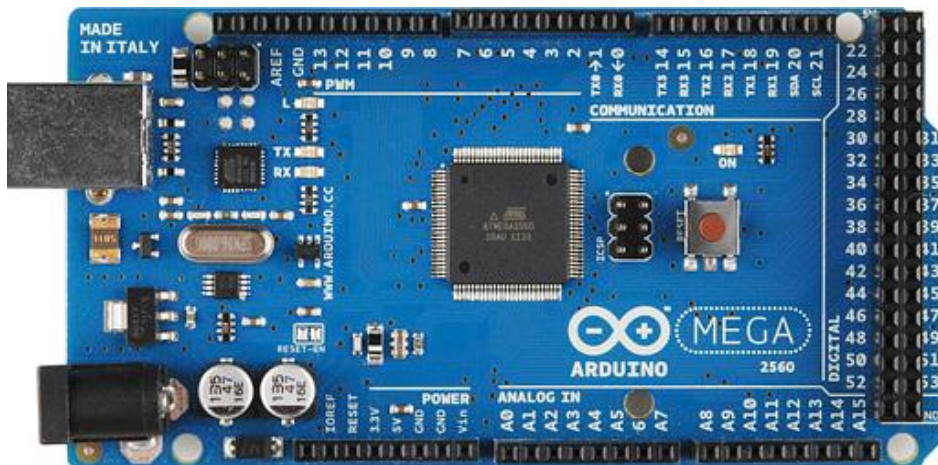
6.2.1 Tarjetas de control. Dentro del control de todos los elementos, en hardware como en software, se tienen dos tarjetas que son imprescindibles para la ejecución correcta de las tareas de la impresora. Haciendo un seguimiento a la ejecución, como se muestra en el gráfico 33, se describirán los elementos y la tarea que deben realizar, para el funcionamiento total de la máquina.

Ilustración 36. Ejecución secuencial de una impresión.



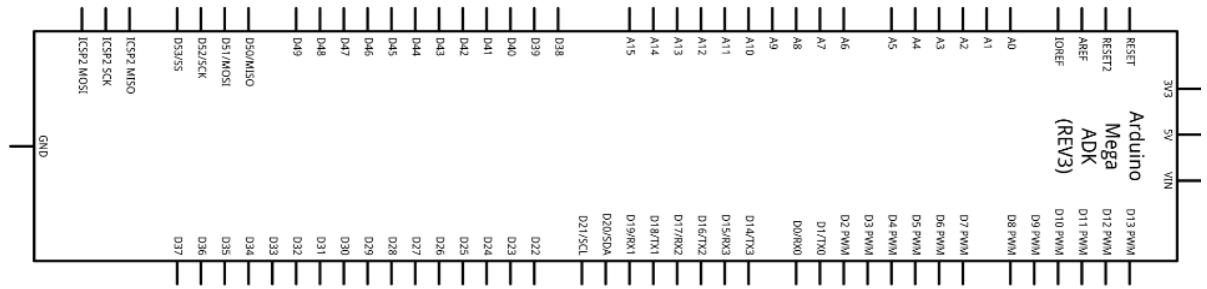
6.2.1.1 Tarjeta de interpretación del código G. En este apartado se implementa una tarjeta Arduino Mega con un firmware instalado a ella llamado MARLIN, por medio de esto la tarjeta toma el código, lo interpreta y envía señales de salida de 5 [V]. Es decir, la tarjeta se encarga del control de la impresión de la máquina con subsistemas siguientes (ver anexo J).

Ilustración 37. Arduino Mega.



De esta manera la tarjeta no es tan sencilla de comprender en cuanto a sus entrada y salidas, así que se plantea un gráfico esquemático que se pretende describir, siguiendo la secuencia de los pines que tenga dicha imagen.

Ilustración 38. Diagrama esquemático de los pines del Arduino Mega.



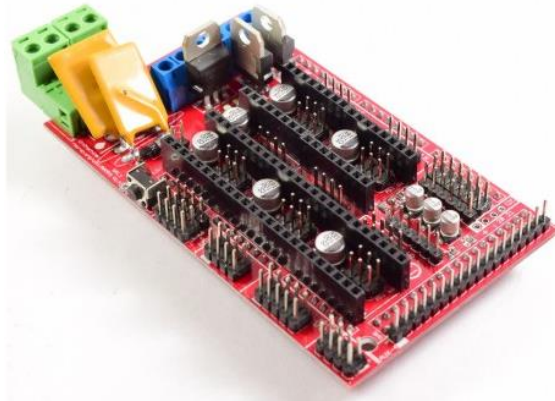
Fuente: <http://arduino.cl/arduino-mega-2560/>

Del gráfico se tiene que la tarjeta cuenta con 16 pines analógicos, 28 pines digitales, 12 pines digitales para control PWM, pines normales de entrada de tensión (5 [V]), pines de referencia, pines de reset, conexiones a tierra, etc. Una de las principales razones por las cuales se usa este Arduino es la versatilidad y cantidad óptima de pines para conexión que posee, pues se deben conectar varios sistemas a las tarjetas, así como otra tarjeta que controla los componentes electrónicos dentro del hardware instalado en la estructura. Para mejor visualización de los pines ver anexo 9.

6.2.1.2 Control de elementos electrónicos en la estructura y amplificación de señal. Para la implementación de este control, se utiliza una Shield Ramps v1.4, es una tarjeta construida específicamente para control de impresoras 3D. Es una Shield para Arduino Mega, contiene un diseño modular que permite conectar cuatro motores PaP, drivers para control de estos y el control electrónico de un extrusor. Debido a su tipo de diseño, permite futuras expansiones después de montado, tiene fácil desmontaje y reemplazos de piezas que ya tenga conectadas (ver anexo K).

Para tener en cuenta, el Arduino Mega emite señales de salida de 5 [V], sabiendo que los elementos electrónicos trabajan con tensiones de 12 [V], la Shield Ramps v1.4, soluciona el problema, pues amplifica la señal que recibe hasta los 12 [V] nombrados.

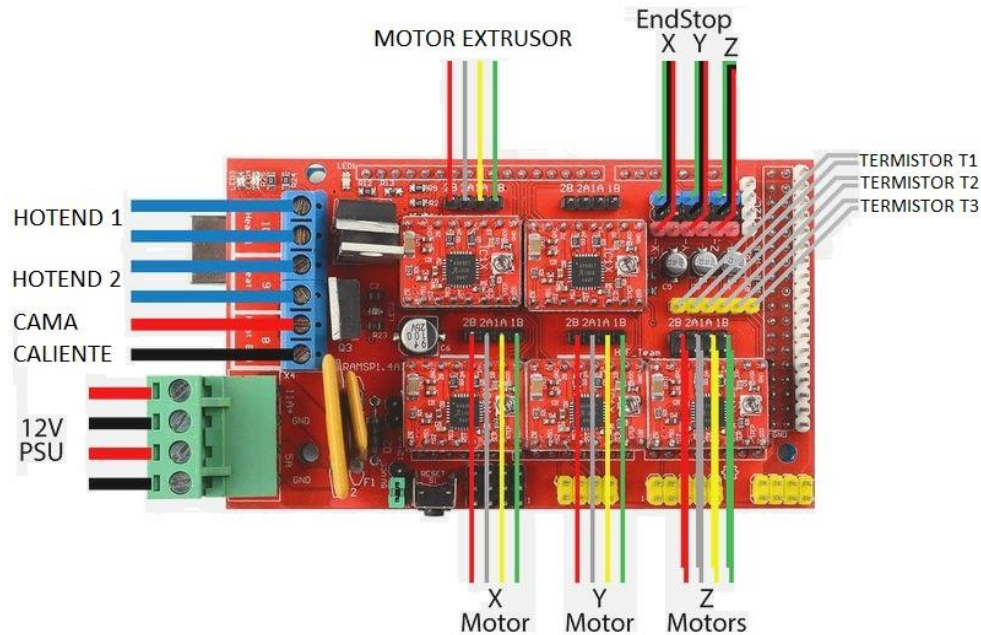
Ilustración 39. Shield Ramps v1.4.



Fuente: <https://naylampmechatronics.com/>

En un gráfico acercado se denotan todo el punto de conexión de la tarjeta Shield, nombrados y señalados dentro de la misma.

Ilustración 40. Puertos de conexión en la Shield Ramps v1.4.

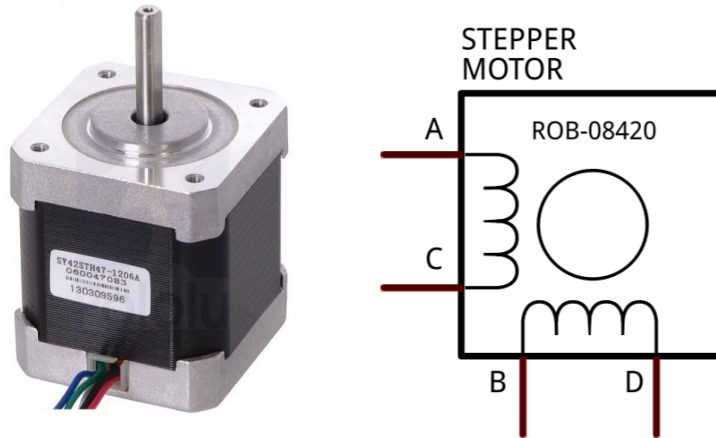


Fuente: <https://infinetronica.com/>

Contiene cinco conexiones para drivers usados en el control de los actuadores. Posee conexión para un motor en el eje X, un motor en el eje Y y dos posibles motores en el eje Z conectados al mismo puerto. También posee seis pines para finales de carrera, puerto adicional para el motor de extrusión, puerto para extrusor (Hotend), cinco pines para drivers y los pines de entrada de voltaje.

6.2.1.3 Actuadores. El movimiento de los componentes dentro de la impresora, lo otorgarán motores paso a paso, seleccionados por su versatilidad en cuanto a la precisión en el accionamiento. Para este montaje se usaron motores de referencia Nema 17. Para saber más acerca de las características de estos motores, se recomienda observar el anexo B. Se ejemplifica el motor y sus componentes en el gráfico.

Ilustración 41. Motores PaP y esquema.

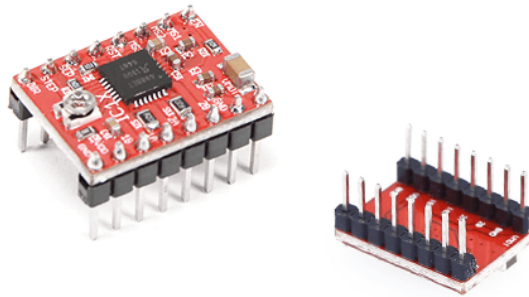


En el esquema se puede notar que los motores PaP, tienen dos embobinados, esto significa que son motores bipolares. La corriente puede fluir en dos direcciones y para controlar esto, se aplica un control bidireccional o bipolar.

Se debe tener en cuenta que estos motores generalmente tienen un voltaje nominal muy bajo (orden de 3 [V] a 5 [V]) y sabiendo que para cambiar de pasos más rápido en un motor se debe subir la tensión, entonces se debe regular este valor de alguna manera, por tanto, se sigue en la selección los drivers para controlar los actuadores.

6.2.1.4 Drivers. Es un componente electrónico que controla el motor, enviando una señal eléctrica en forma de tensión con la potencia adecuada (amplificada), moviendo el actuador a cierta cantidad de pasos. Los pasos pueden definirse para la aplicación que se desea, según una configuración determinada de la que se hablará posteriormente. Para esta aplicación se eligen los drivers de referencia A4988, de fácil adquisición en el mercado, mediana calidad, pero suficiente para suplir las tareas que se solicitan (Ver anexo L).

Ilustración 42. Drivers A4988.



Fuente: <https://www.luisllamas.es/>

Secuencialmente se muestra una tabla con las características disponibles del driver para realizar el control.

Tabla 18. Características Driver A4988.

Nombre	A4988
Fabricante	Allegro MicroSystems, LLC
Voltaje de operación	8 - 35 [V]
Modos disponibles de micropaso	Full Step, 1/2, 1/4, 1/8, 1/16
Máxima corriente de salida por bobina	2 [A] de pico, 1.4 [A] RMS
Resistencia de salida de los FETs	0.32 a 0.45 [Ω] según °C
Auto Apagado por temperatura	Sí, a 165 [°C]
Protección contra exceso de corriente	Para >2.1 [A] por bobina
Protección contra cortocircuito	Si

Fuente: Datasheet Driver A4988

Ya se conocen las características necesarias para hacer la calibración de tensión en el driver. En primera instancia es imperativo conocer la configuración de micro pasos que se usará en el driver, pues de esta configuración depende la resistencia

utilizada en la calibración del valor de corriente. Con la siguiente tabla se conocen las posibles combinaciones de resistencias para definir los pasos.

Tabla 19. Tabla de resolución de micro pasos.

MS1	MS2	MS3	RESOLUCIÓN	EXCITACIÓN
L	L	L	Full Step	2 Phase
H	L	L	Half Step	1-2 Phase
L	H	L	Quarter Step	W1-2 Phase
H	H	L	Eighth Step	2W1-2 Phase
H	H	H	Sixteenth Step	4W1-2 Phase

Fuente: Datasheet Driver A4988

La configuración que se desea para la impresora es la máxima resolución de micropasos, por tanto, se deben usar las tres resistencias (MS1, MS2, MS3), así como el modo de excitación debe ser 4W1-2 Fases. Conociendo este dato, se sabe que la resistencia que se debe manejar según el anexo 12, debe ser de 0.1 [Ω] y teniendo en cuenta que el motor es un Nema 17 entonces.

$$I_{TripMax} = \frac{V_{ref}}{8 * R_s} \quad (\text{Ec. 6.15})$$

Ecuación para realizar la calibración y definiendo cada valor se tiene que:

$I_{TripMax}$ = Corriente máxima en el driver

V_{ref} = Tensión de referencia en el driver

R_s = Resistencia de referencia en el driver = 0.1 [Ω]

Los voltajes y corrientes de un motor PaP Nema 17, según la ficha técnica (ver anexo 2) son del orden de $V_{nm} = 2,8$ [V] & $I_{nm} = 1,68$ [A] por tanto para calcular el consumo de potencia del motor.

$$Pot = V_n * I_n \quad (\text{Ec. 6.16})$$

$$Pot = 2,8 * 1,68 = 4,48 [W]$$

Conociendo que, por ley de la energía, el consumo de potencia debe mantenerse en todo el sistema y que la fuente debe entregar al driver $V_f = 12 [V]$, entonces.

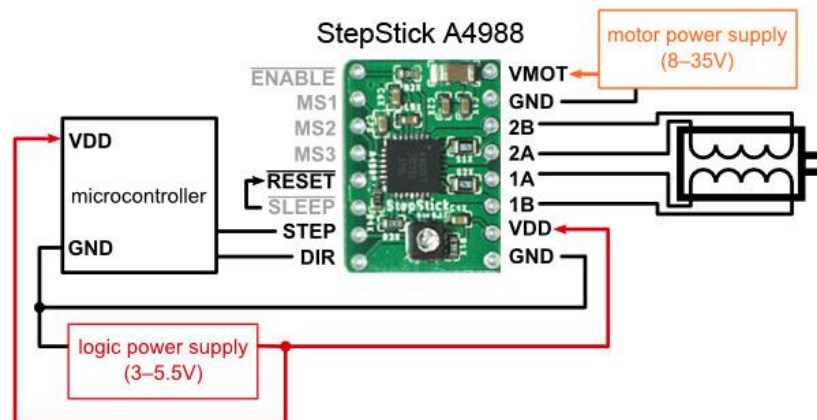
$$I_f = \frac{Pot}{V_f} = \frac{4,48}{12} = 0,3733 [A]$$

Como última instancia, el valor $I_f = I_{TripMax}$ pues debe circular a través del driver, la misma corriente que se origina en la fuente, entonces aplicando la ecuación de calibración.

$$V_{ref} = 0,3733 * 8 * 0.1 = 0,29866 [V]$$

Se determinó cual es el valor que debe ajustarse en el potenciómetro de cada driver, para que el motor tenga los pasos deseados con la suavidad y capacidad de resolución requerida. Para determinar en totalidad la configuración de los drivers, se propone un esquema de conexión de este componente junto a los actuadores.

Ilustración 43. Esquema de conexión Driver-Motor PaP.



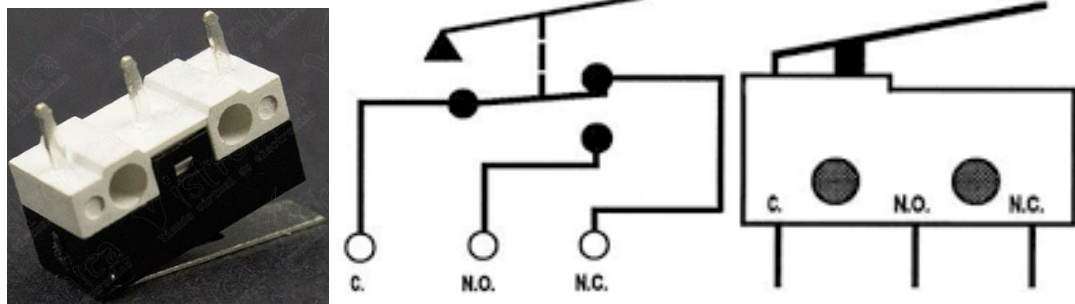
Fuente: <http://dinastiatecnologica.com/>

Siguiendo el esquema anterior, la conexión del motor al driver es bastante sencilla. Como recomendación se propone conectar primero el driver antes del motor y calibrar con su potenciómetro el voltaje de referencia calculado; posteriormente

conectar el motor y así se evitar tanto descalibraciones como interferencias por tensiones mal posicionadas. Es importante observar del diagrama que la salida de tensión que puede otorgar el driver es importante con respecto a su entrada, una amplificación de 35 [V] es significativa en comparación de la entrada de 5 [V].

6.2.1.5 Sensores de posición. La limitación del movimiento de los carros en sus ejes debe tenerse en cuenta para no producir errores al momento de la fabricación. Para ello se aplican finales de carrera, tres elementos para instalar uno en cada eje de transmisión de movimiento. Es importante enviar una señal de control al microcontrolador, cada vez que el carro del eje que sea se acerque al límite que se propuso, función que se realiza mediante este dispositivo electromecánico.

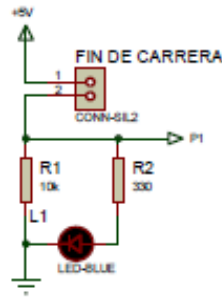
Ilustración 44. Final de carrera y conexión interna.



Fuente: <https://www.vistronica.com/>

Electrónicamente se aplicará un control on-off, enviando pulsos al microcontrolador en cada ocasión que el carro llegue al límite donde se encuentra el pulsador. la conexión quedaría así.

Ilustración 45. Conexión electrónica del final de carrera.



Fuente: Diseño, Construcción y Programación de una máquina CNC para prototipado rápido, Galo Maldonado.

6.3 MÓDULO DE PROGRAMACIÓN

Siguiendo la secuencia de diseño, este apartado muestra los programas, ajustes y calibraciones que deben hacerse basado en software con dos principales aspectos. Existe el control de los motores que son los que darán movimiento como tal a la impresora y la traducción del diseño que se desee imprimir como modelo.

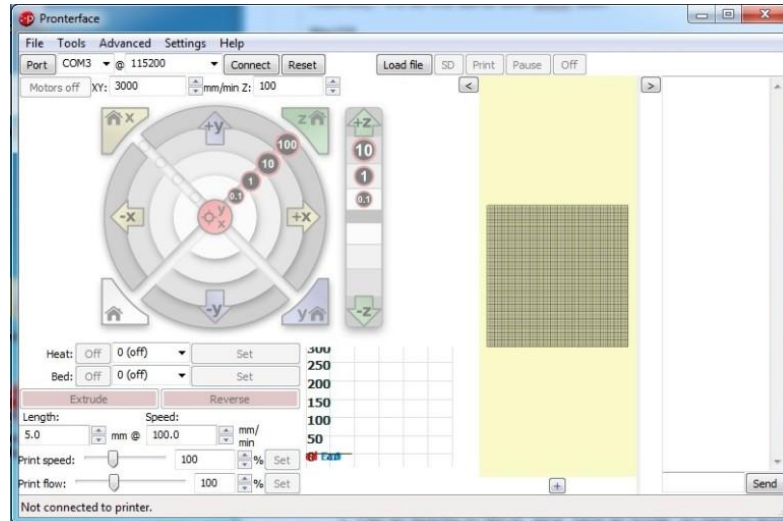
Esta traducción tiene mediadores que se nombran en orden secuencial y qué función desempeñan para lograr la interpretación en modelo a escala que debe desarrollar la máquina.

6.3.1 Control de los actuadores. En la selección y descripción de los drivers, se habla acerca de la calibración de la tensión que debe tener el driver para entregar al motor, esta calibración además de realizarse por medio del potenciómetro del elemento debe sostenerse en un software que permita regular el número de pasos y la velocidad adecuada según el sistema de transmisión.

Pronterface es un software empaquetado de un conjunto de aplicaciones de G-code. Se elige este programa por ser una plataforma de código abierto y por la facilidad de interpretación en la interfaz para el usuario.

Es imperativo reconocer que el control del actuador se hará con la tarjeta controladora principal, pero antes de pasar al reconocimiento de cada elemento en el cerebro del control, hay que determinar el funcionamiento correcto de los componentes electrónicos.

Ilustración 46. Interfaz de Pronterface.



Una vez terminada la estructura de la impresora, por medio de este software se realizarán varias funciones descritas así:

- **Calibración de motores:** Velocidades y resolución solicitada.
- **Calibración de Hotend:** Realizando un control PID las variables de calentamiento se determinan por medio del programa, obteniendo las constantes del control para mantener la temperatura del filamento en condiciones óptimas de derretimiento.
- **Calibración de extrusión:** Velocidad adecuada para expulsión del filamento desde el motor de extrusión.
- **Finales de carrera:** Controlar el funcionamiento de los finales de carrera.

Se debe tener en cuenta, estas acciones se realizan individualmente para determinar en su totalidad todos los valores que posteriormente serán ingresados

en el firmware, pues una vez toda la electrónica es conectada a la tarjeta Shield, debe tenerse certeza de los datos de control en cada elemento para una buena interpretación del código G por medio de la tarjeta controladora.

6.3.2 Control e interpretación de la impresión. Para realizar el control de impresión se deben en cuenta algunos tópicos que se describen de la siguiente forma:

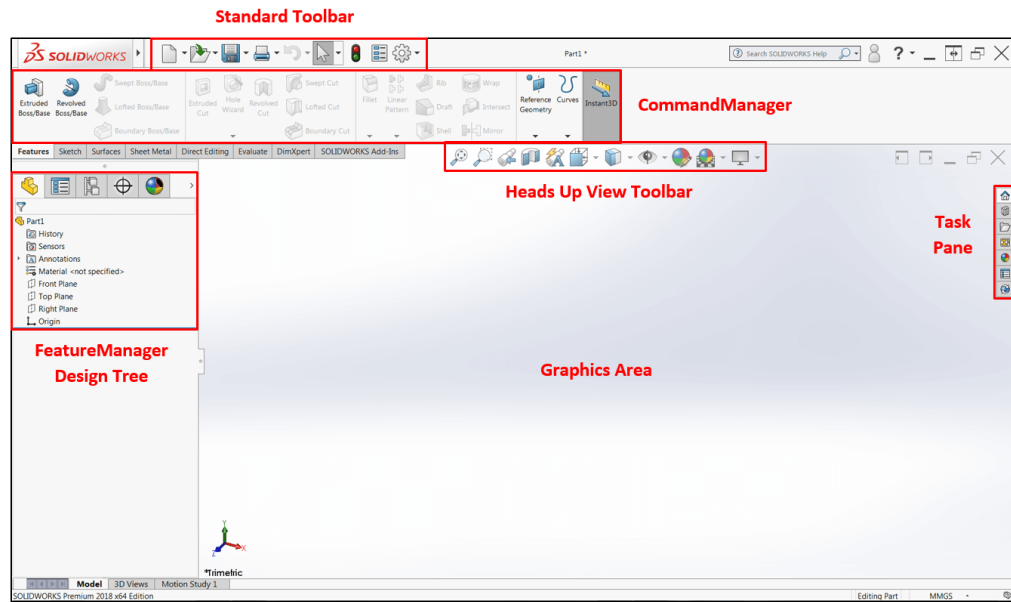
Ilustración 47. Secuencia de pasos para impresión.



Para ello se determinará el software usado para modelado, la base de datos y órdenes de control en el firmware, el software que realiza la configuración y partición de capas en el modelo para calcular trayectorias, velocidad y cantidades de material en el extrusor y por última instancia el “Host” que es la interfaz gráfica que facilite la conexión a la impresora por medio de puerto USB y visualización de los modelos.

6.3.2.1 Modelado. Para realizar las piezas, se usa el software de modelado en 3D SOLIDWORKS, en primera instancia por la facilidad que tiene la escuela de ingeniería mecánica en otorgar licencias de estudiante para el uso del programa. Tiene interfaz sencilla para modelar y permite transferir los archivos a formato stl, formato de mucha utilidad a en softwares subsiguientes.

Ilustración 48. Interfaz SOLIDWORKS.



Fuente: <https://hawkridgesys.com/>

El modelado en este software tiene una lógica bastante sencilla, se basa principalmente en la interacción que pueda tener el usuario con la máquina, la buena transferencia de información del software y por último el modelo grabado en el formato correcto.

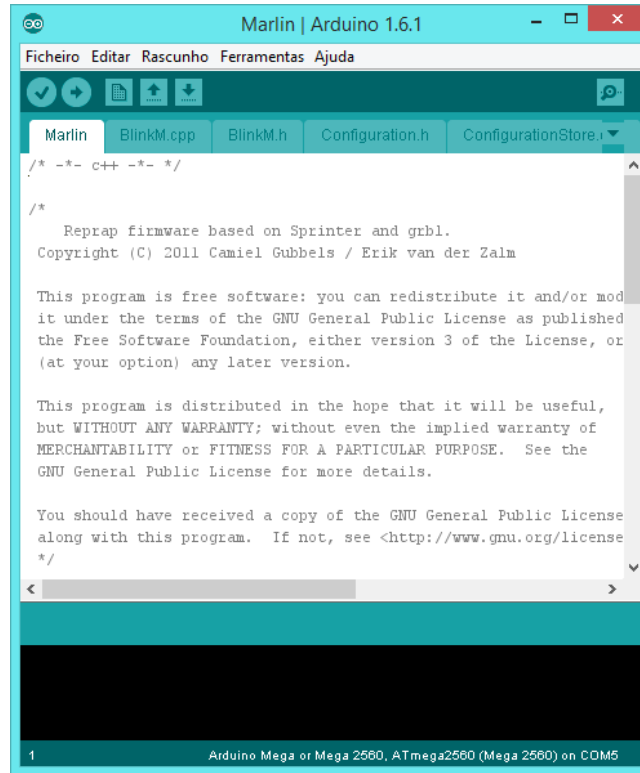
Ilustración 49. Lógica del software



Para señalar una última instancia, el formato stl que tiene la base de datos de SOLIDWORKS, permite guardar las trayectorias de las piezas, elemento importante al momento de usar el G-code.

6.3.2.2 Firmware. En este caso se usará un programa llamado MARLIN que debe instalarse en la tarjeta controladora Arduino Mega y sirve para controlar todas las tareas que debe realizar la impresora, con base en el G-code que recibe por el puerto de serie o por medio de una tarjeta SD.

Ilustración 50. Código MARLIN en interfaz de Arduino Mega.



Fuente: https://reprap.org/wiki/Prusa_i3_Rework_Firmware

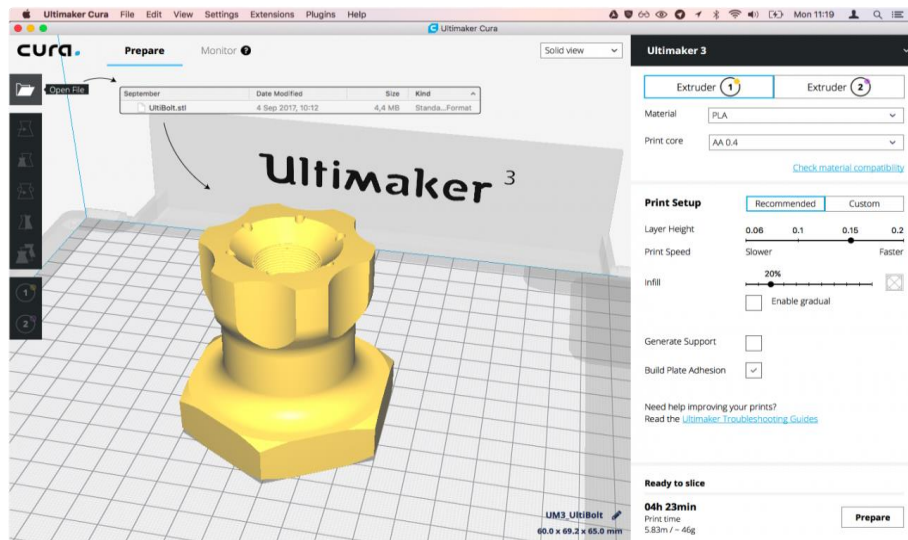
La función de MARLIN es traducir el G-code línea a línea, para dar los pulsos necesarios que deben realizar los motores en la reproducción de la pieza. Al estar instalado en la memoria interna del microcontrolador (Arduino Mega), MARLIN como tiene instalada toda la lógica necesaria para realizar las tareas de la impresión, puede funcionar sin estar conectada a un ordenador.

6.3.2.3 Rebanado y traducción a G-code. El formato stl es un formato que no permite definir cantidad de material, color o textura, pero sí puede definir las trayectorias de la pieza. Definidas estas trayectorias se debe definir un modo de impresión con respecto a las variables que no se definen por medio del formato stl.

Para definir este modo de impresión se usará el software CURA ULTIMAKER, software de uso libre, totalmente gratuito y de interfaz amigable con el usuario. Discretiza el objeto en capas horizontales con ancho de capa definidos y así valorando constantes por capa como tiempo de impresión, cantidad de material, etc. Luego de seccionar y definir cada capa, el mismo software programa las trayectorias que definirán todo el contorno de la pieza, a su vez tiempos de extrusión, tiempos de enfriamiento, teniendo en cuenta que la solidez y resolución de las capas se rigen por un factor interno de densidad.

Todas estas funciones son realizadas y consignadas en un formato de código G, que ingresa en el firmware de la tarjeta controladora y así se realizan todas las funciones de impresión detalladas.

Ilustración 51. Interfaz de CURA ULTIMAKER.



Se sigue una secuencia de parámetros para obtener la impresión 3D en óptimas condiciones:

- **Configuración de impresora:**
 - Tipo de firmware.
 - Número de extrusores, diámetro de boquillas.
 - Tamaño y desplazamiento de la plataforma de impresión en sus respectivos ejes.
- **Configuración del filamento:**
 - Diámetro de filamento.
 - Factor de proporcionalidad: Compensación del plástico al fundirse, para el caso del PLA es de 1.
 - Temperatura de la cama.
 - Temperatura del extrusor.
- **Configuración de impresión:**
 - Altura de la capa.
 - Espesor de las paredes, número de shells.
 - Grosor de capas superior e inferior.
 - Porcentaje de relleno (Factor de densidad).
 - Patrón de relleno.
 - Velocidad de impresión
 - Bordes, soportes de pieza.

Con todos los parámetros nombrados en la lista, los pasos de impresión quedan especificados y en total definición para realizar una pieza deseada.

6.3.2.4 Interfaz. En última instancia para la interacción con las funciones de la impresora, se requiere un mediador que permita observar las funciones y órdenes que se determinen en la impresión. CURA ULTIMAKER tiene su propia interfaz y la posibilidad de cambiar a la interfaz de Pronterface que está incluida dentro de la base de datos de CURA. Para el caso se usará la versión de Pronterface incluida en CURA, por facilidad de uso para el usuario.

7 VALIDACIÓN

Reunirá toda la información probatoria de los elementos en funcionamiento, valores nominales de algunos componentes para poder comparar con los requerimientos del sistema calculados. También se mostrarán los resultados del proceso de impresión con base en la secuencia del módulo de programación, teniendo en cuenta todas las calibraciones y valores analizados.

7.1 MEDICIÓN DE TORQUES EN MOTORES PaP

Se seleccionan cinco motores paso a paso, para implementar en todos los ejes de movimiento y en el motor que necesita el extrusor para impulsar el filamento hacia el extremo de la boquilla.

En cuanto a la capacidad de los motores, se necesita conocer cuánto torque puede entregar cada uno y cuál es el torque de retención. Para ello se investigó con respecto a pruebas físicas e instrumentos o formas de medición de esta característica en los motores.

Dentro de las investigaciones, se concreta la prueba que se realizará y esta se describe a continuación:

- Cada motor tiene un eje visible, al cual se le ajustará una polea de un diámetro definido.
- A la polea, se amarra una cuerda de una longitud prudente, para permitir enrollar y desenrollar con libertad la polea.
- Al extremo de la cuerda se ajustará una base en forma de recipiente que pueda contener material.
- En el contenedor se pondrán unas masas de peso definido qué, harán el peso medible, para calcular el torque de los motores.
- Cada motor, debe fijarse a una base que permita la salida del eje donde está ajustada la polea y que no admita el movimiento o vibración de este.

- Luego de conocer todos los materiales y la instalación se debe proceder a hacer mediciones con ayuda de Pronterface que controla los motores.

El gráfico muestra el montaje realizado para la prueba y la sujeción que se aplicó al motor para evitar movimientos que entorpezcan la medición.

Ilustración 52. Seguimiento gráfico pruebas de torque.



7.1.1 Medición del torque de régimen. Posicionamos masas sobre el recipiente y se procede a accionar el motor, comprobando que, con tres señales sucesivas de avance, el motor no pierda pasos, es decir, que no se deslice la polea. El límite se encuentra en el momento en que un peso definido haga deslizar la polea. En este punto se debe disminuir peso hasta que se encuentre el punto exacto donde ya no exista deslizamiento y entonces allí, se encuentra el torque de régimen en el motor.

7.1.2 Medición del torque de retención. Se encuentra cuando el motor está encendido pero detenido, allí se adicionan masas al recipiente hasta que el motor deslice sin accionar ninguna señal de control de avance.

Se propone realizar varias mediciones con el peso que hipotéticamente haga deslizar el motor. En ambas pruebas (retención y régimen), realizar comprobaciones con valores cercanos (por encima y por debajo), para descubrir un valor más exacto y con más certeza, con respecto al valor que se descubre inicialmente.

Posterior a todas las mediciones en cada motor, se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 20. Resultados pruebas de torque en motores PaP.

MOTOR	TORQUE DE RÉGIMEN	TORQUE DE RETENCIÓN
Eje Z	0,235[N.m]	0,456 [N.m]
Eje X	0,247 [N.m]	0,324 [N.m]
Eje Y	0,314 [N.m]	0, 397 [N.m]
Extrusor	0,238 [N.m]	0,307 [N.m]

7.1.3 Factor de seguridad en solicitud de torque para cada motor. Con base en las pruebas de torque realizadas, se plantea una comparación del valor nominal del motor con respecto al valor calculado en la sección 6. Sabiendo la solicitud de torque para cada eje, entonces se sigue de la siguiente forma.

7.1.3.1 Motores en X y Y. La comparación para estos dos ejes debe realizarse con respecto al torque de régimen, ya que estos ejes siempre estarán en movimiento realizando las trayectorias planteadas por el programa en la capa que se trabaje. Conociendo el valor de torque de régimen consignado en la tabla 20 y sabiendo que el valor de torque en cada eje es: $T_x = 0,058314 [N.m]$ y $T_y = 0,2208 [N.m]$, entonces:

$$N_s = \frac{T_N}{T_R} \quad (\text{Ec. 6.17})$$

Aclarando que:

$N_s = \text{Factor de seguridad en servicio.}$

$T_N = \text{Torque nominal, valor consignado en la tabla 20.}$

T_R = Torque requerido en cada eje, valor calculado.

Siguiendo con la lógica la comparación se determina:

$$N_{sx} = \frac{0,247 [N.m]}{0,058314 [N.m]} = 4,23$$

$$N_{sy} = \frac{0,314 [N.m]}{0,2208 [N.m]} = 1,422$$

En cualquiera de ambos casos, el factor de seguridad es >1 , por tanto, queda asegurado, tanto el buen funcionamiento del motor supliendo cargas como la buena selección de este en la fase de diseño en detalle.

7.1.3.2 Motores en eje Z. El factor de servicio se determina de la misma forma, pero con la diferencia que el torque nominal, debe ser el torque de retención, pues el eje Z solo se mueve para cambiar de capa y debe mantener el brazo en posición estática mientras los demás ejes dibujan las trayectorias. Sabiendo que el torque en este eje es $T_z = 0,016236 [N.m]$, se sigue de la siguiente forma:

$$N_{sz} = \frac{0,456 [N.m]}{0,016236 [N.m]} = 28,08$$

Nuevamente el factor de seguridad es >1 , con lo cual queda comprobado totalmente la selección de los motores en todos los ejes. Observando que el factor es bastante alto, evidenciando un posible sobredimensionamiento, estos motores son los más baratos y de más fácil acceso en el mercado, entonces son la opción óptima para esta aplicación.

7.2 COMPROBACIÓN DE LA MÁQUINA POR MEDIO DE IMPRESIONES

Siguiendo el proceso de construcción de la impresora, el último paso para verificar la fase de diseño en detalle es comprobar si lo construido está cercano a lo que se diseña. La secuencia de impresión que sigue, luego de guardar las trayectorias en G-code con todos los parámetros de impresión, es enviar los comandos de impresión para fabricar las piezas en la plataforma de la impresora.

Se inicia con piezas de geometría sencilla y dimensiones pequeñas, probando con el software Repetier Host. Presenta problemas de corrimiento en las piezas pues se descalibran los sistemas de movimiento a medida que avanza el proceso de impresión a partir de las pruebas piloto.

Una prueba piloto de impresión fue un modelo de circunferencia, después de impreso arroja la siguiente forma.

Ilustración 53. Primeros modelos de prueba en impresión.



La pieza falla debido a que la corriente en el controlador quedó mal ajustada, no está puesta en el valor que se calculó y la cantidad de material tiene un pequeño fallo de calibración en el balance de entrada y salida del extrusor. La pieza siguiente para pruebas tiene las siguientes características.

Ilustración 54. Segundos modelos de pruebas en impresión.



Tienen mejor resolución, pero aún se ve un error en cuanto al corrimiento de la pieza, pues la primera debería ser una circunferencia y la segunda debería tener todas las curvaturas iguales. El error en esta ocasión se basa en la limitación de los

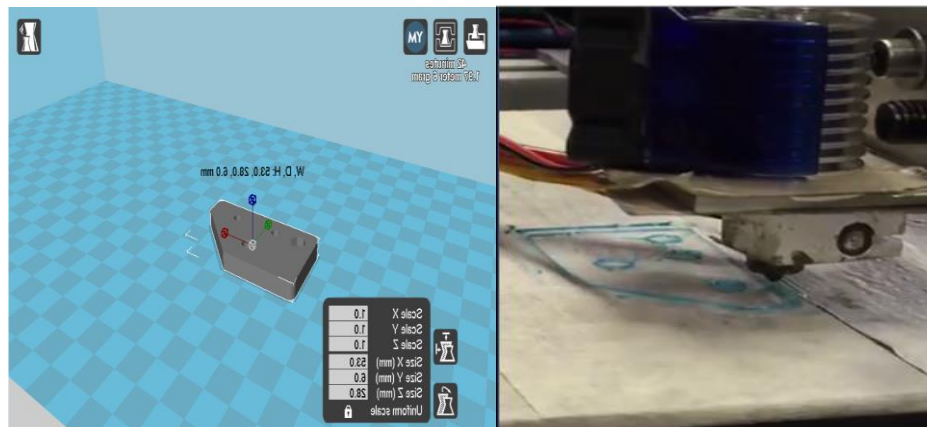
ejes, tenía un pequeño desfase en la trayectoria. A partir de este momento se prueba cambiando de software a CURA ULTIMAKER y realizando de nuevo piezas sencillas. Arroja los siguientes resultados.

Ilustración 55. Terceros modelos de pruebas en impresión.



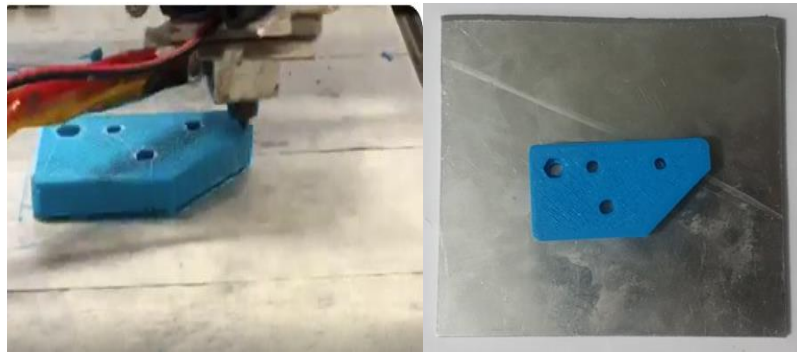
Puede observarse que las piezas están totalmente definidas y la falta de material en el primer modelo fue debido a que el PLA se terminó en la impresión entonces debió interrumpirse. En esta parte se hizo una pieza un poco más grande y de mayor cantidad de relleno, para poder visualizar la adherencia capa a capa a medida que iba creciendo el tiempo de impresión. Se visualiza el montaje en cura.

Ilustración 56. Montaje de piezas de prueba No. 4.



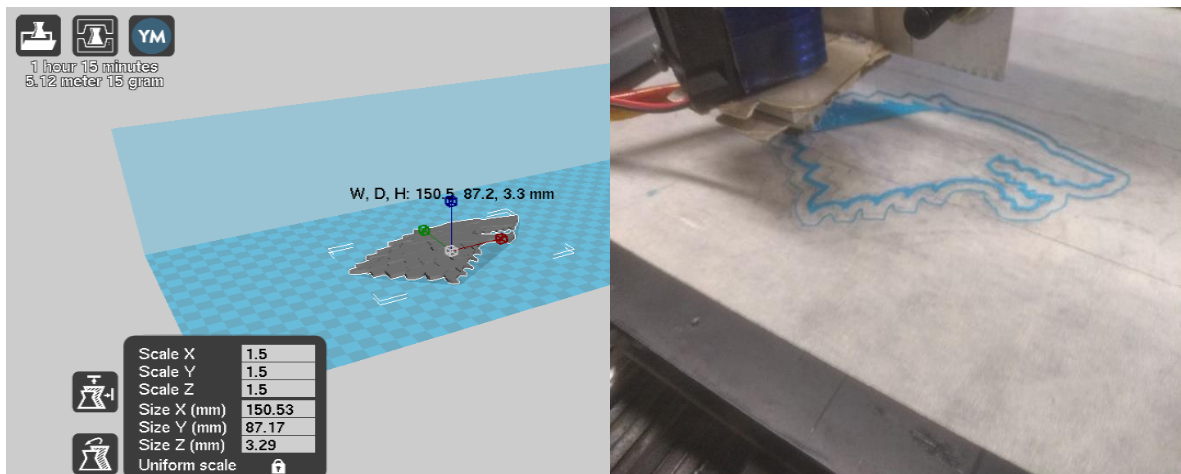
Para verificar los parámetros propuesto, la impresión realizada fue la siguiente.

Ilustración 57. Resultado de la cuarta prueba de impresión.



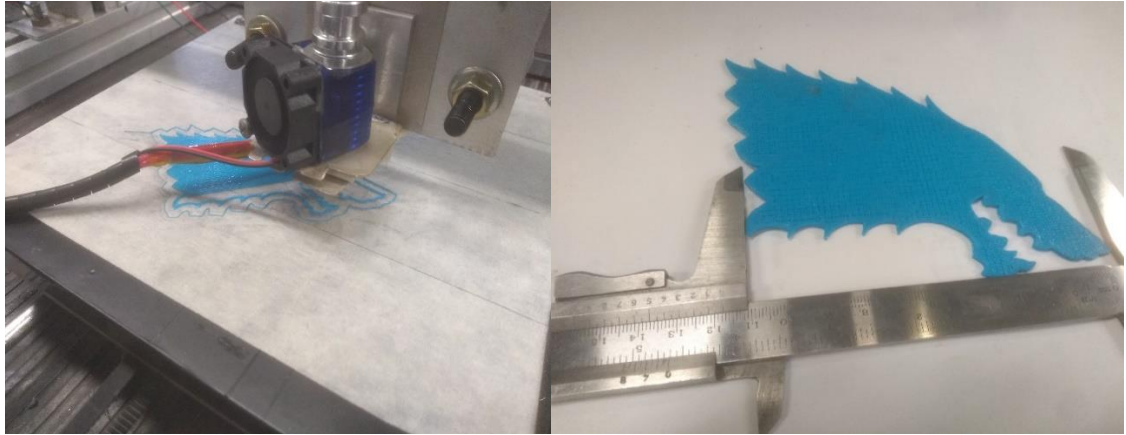
La resolución es muy buena y el parámetro de adherencia es óptimo pues es un sólido completo, sin cortes, ni contornos incompletos, ni contornos sueltos y es rígido. Para terminar, se propone una pieza de dimensiones mayores, con geometría más diversa y compleja, con el mallado de mayor resolución dentro de CURA ULTIMAKER (mallado lineal) y un factor de relleno de 50%. Se muestra el montaje en el gráfico.

Ilustración 58. Montaje prueba final de impresión.



Tomando las medidas con las cuales fue diseñada la pieza y con las resultantes después de la impresión, se verifica que el modelo al finalizar tiene la rigidez, densidad, resolución y proporción que se parametrizó.

Ilustración 59. Modelo final impreso.



Con esta verificación, la máquina diseñada está en funcionamiento de las características con las cuales fue construida, constatando todo lo consignado en el documento.

8 COSTOS

El objetivo es determinar el costo total de realización de la máquina, teniendo en cuenta sus costos directos e indirectos.

8.1 COSTOS DIRECTOS

En este apartado consideramos:

- Costo de la materia prima para la construcción de la máquina
- Costos de elementos adquiridos
- Costos de maquinado

8.1.1 Materia prima. Se discriminan en la siguiente tabla los costos de la materia prima usada.

Tabla 21. Costos de materia prima.

Cantidad	Elemento	Valor unitario [\$]	Valor total [\$]
1	Eje de duralon	15.000	15.000
3	Lámina de aluminio 30x30 [cm]	21.600	64.800
1	Eje de aluminio 12 [cm] y 50 [cm]	5.000	5.000
3	Eje de hierro 50 [cm] y 8 [cm]	3.000	9.000
1	Angulo aluminio 1 [m]	7.000	7.000
		Total	100.800

8.1.2 Elementos seleccionados. De manera siguiente se consigna en esta tabla, los valores de todos los componentes que se han adquirido para implementar en los sistemas de la impresora.

Tabla 22. Costo de componentes de la impresora.

cantidad	Elemento	Valor unitario [\$]	Precio total [\$]
4	Rodamientos lineales	7.000	28.000
26	Bujes	1.500	39.000
4	Perfil estrella de aluminio 1 [m]	13.500	54.000
4	Motores paso a paso	16.300	65.200
3	Correas 1 [m]	5.000	15.000
3	Poleas dentadas GT20	4.000	12.000
2	Acoples flexibles	4.000	8.000
2	husillos	13.000	26.000

Tabla 22. (Continuación).

1	Shield 1.4, Arduino Mega, Drivers	70.000	70.000
#	Tornillería	20.000	15.000
3	Finales de carrera	3.000	9.000
12	Anillos de retención	500	6.000
1	Extrusor Bowden indirecto con ventilador (boquilla con termistor)	17.000	17.000
1	Mecanismo de extrusión, Motorreductor	14.800	14.800
1	Tubo de teflón	2.500	2.500
4	Resortes para la cama de extrusión	500	.2000
-	Cables para realizar conexiones	5.000	5.000
1	Fuente ATX 750	20.000	20.000
1	Otros	10.000	10.000
		Total	418.500

8.1.3 Costos de maquinado. Este apartado es sumamente importante, porque los elementos fabricados se realizaron por los autores o por personal de planta física de la universidad.

La pieza más costosa de fabricar, debido a las horas de trabajo que implica como la pericia del operario, es la rueda de los carros.

Lo que se recomienda en este caso es fabricar un molde de inyección de plástico y replicar una gran cantidad de piezas. De esta forma el costo no es representado en el número de piezas, sino en el molde de la rueda que se avalúa en el mercado aproximadamente en 150000 [\$].

8.2 COSTO TOTAL DIRECTO

Se plantea los valores totales, arrojando la sumatoria de todos los costos de implementos de la construcción.

Tabla 23. Costos directos.

Costo	Valor [\$]
Materia prima	100.800
Componentes de impresora	418.500
Total	519.300

La inversión podría variar dependiendo del nicho de mercado al que se tenga acceso y los proveedores de materiales. Una visión comercial con respecto a esta máquina tendría cabida basada en la inversión que se realiza con respecto al diseño entregado, es bueno el resultado, pero se debe tener en cuenta que aún no se analiza el mantenimiento que debe aplicarse.

9 CONCLUSIONES

- Se llevó a cabo un proceso recopilatorio con respecto a FDM, que apunta a la comprobación de esta técnica como herramienta eficiente dentro del campo de fabricación de piezas, debido a que, el proceso de impresión es muy rápido y permite modificar parámetros de manera sencilla, para construir piezas con acabados superficiales y propiedades físicas muy buenas.
- Se implementaron de manera óptima sistemas de posicionamiento cartesianos, que cumplieron a cabalidad los fines de transmisión de movimiento para los ejes X, Y y Z.
- Se comprobó la funcionalidad de la impresora, fabricando piezas para otra máquina de la misma índole, donde se reemplazaron fragmentos dañados por figuras impresas y así se solucionó la situación, evitando perder dinero y tiempo en fabricar las piezas por medio de otras técnicas.
- Se logró adecuar un extrusor, para que respondiera a dos tipos de filamentos usados (ABS y PLA), usando un mecanismo de extrusión indirecta.
- Cumplió el objetivo de conectar por medio de un firmware en la tarjeta controladora, el proceso de modelado hasta el proceso de impresión de la máquina, usando los softwares SolidWorks y CURA ULTIMAKER.
- El diseño de una máquina de prototipado rápido, consta de módulos de diseño muy amplios y hay que prestar minuciosa atención a las decisiones que se tomen con respecto a los materiales que se van a usar.
- Una mala decisión puede conllevar gastos excesivos en componentes que no deberían suponer un valor monetario representativo en el proyecto.
- La construcción estructural de una máquina de este tipo debe estar siempre de la mano con las herramientas necesarias o puede ser muy complejo resolver los problemas que tienen que ver con la transformación de las materias primas.

- Los proveedores de los componentes eléctricos, electrónicos y estructurales deben ser confiables y mostrar la mejor calidad en los productos, para evitar avances lentos del proyecto y sobrecostos en construcción.
- No se requiere gran pericia en la resolución de los procesos de fabricación, pero no debe abandonarse el hecho de que se establecieron medidas en el diseño, pues los atascos en la impresora suponen un gran retroceso en la evolución del proyecto.
- Debido a que las ruedas tienen un porcentaje muy alto de los costos del proyecto, pues deben maquinarse con un operario capacitado y supone una cantidad de tiempo muy alta. Se propone utilizar métodos alternos para replicar las ruedas.
- Los softwares libres son un gran punto a favor para el prototipado rápido, solo deben realizarse unos pequeños ajustes a los códigos, reconocer bien el funcionamiento global del mismo y son una herramienta muy fuerte, que no cuesta nada al usuario que desea conocer estas máquinas.
- La importancia de aplicar componentes de las mismas características se ve reflejada en las pruebas realizadas a los motores, las réplicas en las características facilitan desmontaje, montajes, reparaciones y pruebas, ahorrando tiempos valiosos para el avance del proyecto.
- De manera justificada en costos, se ve que, consiguiendo una forma económica de realizar llantas para la máquina, el coste de esta en relación con su funcionalidad es realmente bajo. Entonces constituye un acierto para el acercamiento de toda la comunidad académica al modelamiento por deposición de material fundido.

10 RECOMENDACIONES

- Se recomienda adecuar un sensor de proximidad capacitivo, para la cama de la impresora, ya que si ocurre una mala nivelación podría desgastarse la boquilla al chocar con la cama en el momento de nivelar para la impresión.
- Posibles trabajos futuros de con la impresora están relacionados con un sistema de monitoreo remoto, que nos permita controlar la impresora o verificar su rendimiento mientras estamos lejos de esta.
- Es importante adaptar un mecanismo que permita realizar cambio del sistema de extrusión entre indirecto y directo, debido a que la impresora cuenta solo con el sistema de extrusión indirecto, en algunos casos sufre demasiado atascamiento si los parámetros de impresión no están bien codificados.
- Es necesario nunca poner velocidades muy exageradas en el eje Z, ya que este es el subsistema que más peso resiste. Al momento de hacer el homing (llevar todos los subsistemas de transmisión al cero de referencia en posición, es decir a buscar los finales de carrera) esto lo hace a velocidades algo grandes para agilizar el proceso; si se agregan velocidades muy grandes hay un riesgo alto de atascar el sistema.
- Se recomienda probar y adaptar la impresora a otros programas de subdivisión de capas como lo es ULTIMAKER CURA, debido a que la versión que estamos usando actualmente es antigua y carece de muchas funciones como soportes para mantener piezas fijas, limitando la impresión del elemento.

BIBLIOGRAFÍA

ABSOLEN, LEON E. (5 de diciembre de 2012). Revista de investigacion desarrollo e innovacion. Recuperado el 15 de agosto de 2018, de https://revistas.uptc.edu.co/revistas/index.php/investigacion_uitama/article/view/2135

Cartesiana, Polar y Brazo robótico. Obtenido de Tipos de impresoras 3D.

CHRISTOPHE R, MUÑOZ H, HERNANDEZ Á. Manufactura Aditiva. Real y Reflexión. 2017;43:97.

CLUA ARIZMENDI. (1 de enero de 1998). interempresas. Recuperado el 22 de agosto de 2018

cómo ajustarlo para una impresión sin problemas. obtenido de qué es el flow de impresión 3d y cómo ajustarlo para una impresión sin problemas.

CRISTIAN M, JOSÉ P. Construcción De Un Modelo De Fundición Mediante La Utilización De Tecnología De Impresión 3D. 2016;100. Available from: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/4676/1/85T00388.pdf>

DÍAZ T. Tecnologías de Fabricación Digital Aditiva, ventajas para la construcción de modelos, prototipos y series cortas en el proceso de diseño de productos Additive Digital Manufacturing Technologies, advantages for the construction of models and prototypes. 2016;12(18):118–43. Available from: <http://dx.doi.org/10.18566/iconofac.v12n18.a07>

FDM: Delta, Cartesiana, Polar y Brazo robótico: filament2print. (29 de 11 de 2017). Qué es el flow de impresión 3d.

GALINA D, GARCIA P, SOUZA G, MAZIERO R. Prueba abs confeccionados con diferentes parámetros de extrusión vía impresión 3d revista iberoamericana de polímeros parámetros de extrusión vía impresión 3d presenten propiedades especiales para atender a la demanda de nuevas condiciones , cubriendo pro. 2016;(January).

GONZALES LOPEZ, E. (5 de septiembre de 2017). STATIC BOARD. Recuperado el 14 de julio, de <https://www.staticboards.es/blog/ovm20lite/>
https://filament2print.com/es/blog/33_Que-es-el-flow-de-impresi%C3%B3n-3d.html
<https://www.3dnatives.com/es/tipos-impresoras-3d-fdm-190620172/>

JESUS MATURANE. (20 de 02 de 2014). xataka. Obtenido de xataka: <https://www.xataka.com/perifericos/estas-son-las-tecnologias-de-impresion-3d-que-hay-sobre-la-mesa-y-lo-que-puedes-esperar-de-ellas>

JOHN DIAMOND. (18 de 03 de 2018). Instructables. Obtenido de Instructables: <http://www.instructables.com/id/Bergen-Makerspace-Transportable-3D-Printer/>

LEON & TORRES. (10 de 2013). researchgate. Obtenido de researchgate: https://www.researchgate.net/publication/323667923_diseno_de_un_prototipo_de_impresora_3d_que_aplica_la_tecnica_de_prototipado_rapido_modelado_por_dep osicion_fundida.

LEON JERSON. Diseño de un prototipo de impresora 3D. 2013;(October 2013):206. Leon-Medina Jerson, Xavier Torres, Diaz Edwin. T-be. desarrollo de una herramienta extrusora de polímero utilizada en una impresora 3d fdm.pdf. 2016;(January).

MALDONADO TORO. Diseño, construcción y programación de una máquina de control numérico aplicada al prototipado rápido de modelado por deposición fundida

de material para el laboratorio de mecatrónica de la universidad internacional del ecuador. 2012;1–222.

MAXWELL J. (20-30 de diciembre de 2015). ASTM Internacional. Recuperado el 14 de juliode2018,dehttps://www.astm.org/SNEWS/SPANISH/SPND15/maxwell_spnd15.htm

MAXWELL J. (20-30 de diciembre de 2015). ASTM INTERNACIONAL. Recuperado el14dejuliodede2018, de
https://www.astm.org/SNEWS/SPANISH/SPND15/maxwell_spnd15.html

ORQUIN SERRANO, AGUADO SAGAHIN, BERENGUER SANCHEZ G, PETROVIC V. Experiencia de montaje y operación de una impresora 3D en el aula. Model Sci Educ Learn. 2017;10(2):107.

ORTEGA A. Investigación de las Capacidades de la Tecnología de Manufactura Aditiva FDM, Tesis de Maestría. 2014.

Página web de Thingiverse: <http://www.thingiverse.com/> [10/06/2.012].

Página web del árbol genealógico del Proyecto Clone Wars dentro de la web del mismo: <http://asrob.uc3m.es/images/d/d0/2012-06-02-clone-wars-genealogy.png> [07/06/2.012].

Página web del esquema de conexiones utilizando Ramps 1.3 dentro de la web del Proyecto Reprap: <http://reprap.org/wiki/File:Rampswire13.svg> [30/05/2.012]

ROMERO C, VACA G. “Construcción De Una Impresora 3D, Para La Elaboración De Objetos Plasticos Utilizando El Método De Modelado Por Deposición Fundida

(MDF).”2008;1–247.Availablefrom:
<http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/3804>

SAGRADO M. (18 de julio de 2014). teknilife. Recuperado el 2 de agosto de 2018.

SORIANO, BLAYA & ISLÁN. (11 de 2016). researchgate. Obtenido de researchgate:
https://www.researchgate.net/publication/310607246_ETSIDIRap_Impresora_3D_portatil_de_codigo_abierto

Tipos de impresoras 3D FDM: Delta, 3Dnatives. (19 de 06 de 2017).
VICTOR VENTURA. (3 de 12 de 2014). Polaridad. Obtenido de Polaridad :
<https://polaridad.es/que-es-g-code/>

ANEXOS

Anexo A. Propiedades típicas del filamento PLA.



PLA filamento: ficha técnica

PROPIEDAD	VALOR	UNIDADES	MÉTODO DE TESTEO
Propiedades generales			
Densidad	1,24	g/cm ³	ASTM D792
Propiedades mecánicas			
Módulo elástico en flexión	3600	MPa	ISO 178
Resistencia a la flexión	108	MPa	ISO 178
Dureza Sh D	85	Sh D	ASTM D2240
Propiedades térmicas			
Temperatura de flexión bajo carga	56	°C	ISO 75/2B
Temperatura de fusión	145-160	°C	ASTM D3418
Temperatura de transición vítrea	56-64	°C	ASTM D3418

Además de las propiedades descritas, hemos realizado los ensayos de tracción tanto de probetas inyectadas como de probetas impresas con nuestro PLA, para conocer las propiedades mecánicas de la pieza impresa final. En la siguiente tabla se recogen estos resultados:

Propiedades mecánicas	Probetas inyectadas	Probetas impresas ^a	Probetas impresas ^b	Unidades	Método de testeo
Resistencia a la rotura en tracción	52	50	39	MPa	ISO 527
Deformación a rotura en tracción	5	9	4	%	ISO 527
Módulo elástico en tracción	1320	1230	1120	MPa	ISO 527

^a Estrado en dirección paralela a las capas.

^b Estrado en dirección perpendicular a las capas

Anexo B. Ficha técnica motor Nema 17.

Notes and Warnings

Installation, configuration and maintenance must be carried out by qualified technicians only. You must have detailed information to be able to carry out this work.

- Unexpected dangers may be encountered when working with this product!
- Incorrect use may destroy this product and connected components!

For more information, go to www.imshome.com

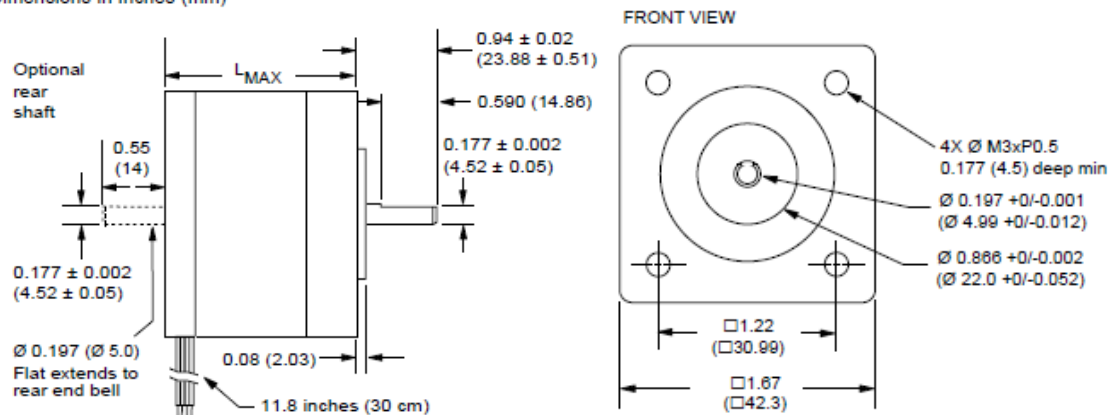
Specifications

1.5 Amp motors		Single length	Double length	Triple length
Part number		M-1713-1.5 • (1)	M-1715-1.5 • (1)	M-1719-1.5 • (1)
Holding torque	oz-in	32	60	75
	N-cm	23	42	53
Detent torque	oz-in	1.7	2.1	3.5
	N-cm	1.2	1.5	2.5
Rotor inertia	oz-in-sec ²	0.000538	0.0008037	0.0011562
	kg-cm ²	0.038	0.057	0.082
Weight	oz	7.4	8.1	12.7
	grams	210	230	360
Phase current	amps	1.5	1.5	1.5
Phase resistance	ohms	1.3	2.1	2.0
Phase inductance	mH	2.1	5.0	3.85

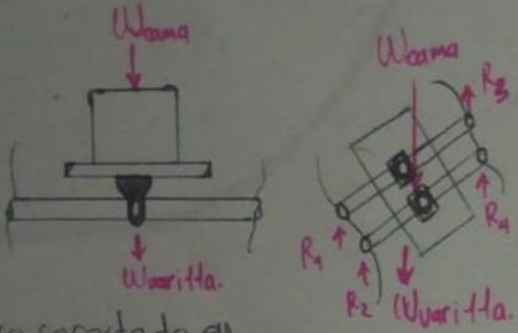
(1) Indicate S for single-shaft or D for double-shaft. Example M-1713-1.5S

Mechanical Specifications

Dimensions in inches (mm)



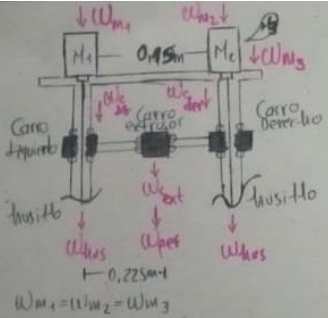
Anexo C. Balance de fuerzas para estudio de carga estático por medio de elementos finitos.



$+\uparrow \Sigma F = 0;$
 $-(W_{camo} + R_1 + R_2 + R_3 + R_4 - W_{varilla}) = 0.$

Simetría en el montaje,
 entonces cada reacción
 soporta el mismo
 peso.
 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$
 $R_1 = \frac{W_{varilla} + W_{camo}}{4}$
 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 4,16 \text{ N}$

Peso soportado en
 dos varillas con
 dos puntos de anclaje
 cada una.



$\Sigma M_2 = 0;$
 $-(W_{M1}(0,45) + F_{R1}(0,45) - W_{c12}(0,45) - W_{hus}(0,45) - W_{cext}(0,225) - W_{per}(0,225)) = 0$

$F_{R1} = W_{M1} + W_{c12} + W_{hus} + \frac{W_{cext} + W_{per}}{2}$

$\uparrow F_y = 0;$
 $-(W_{M1} - W_{M2} - W_{M3} + F_{R1} + F_{R2} - W_{cext} - W_{per} - W_{c12} - W_{cder} - W_{hus} - W_{hus1} - W_{hus2} - W_{hus3}) = 0$

$F_{R2} = 3W_{M1} + W_{cext} + W_{per} + W_{c12} + W_{cder} + 2W_{hus} - F_{R1}$

$F_{R2} = 2W_{M1} + W_{hus} + W_{cder} + \frac{W_{cext} + W_{per}}{2}$

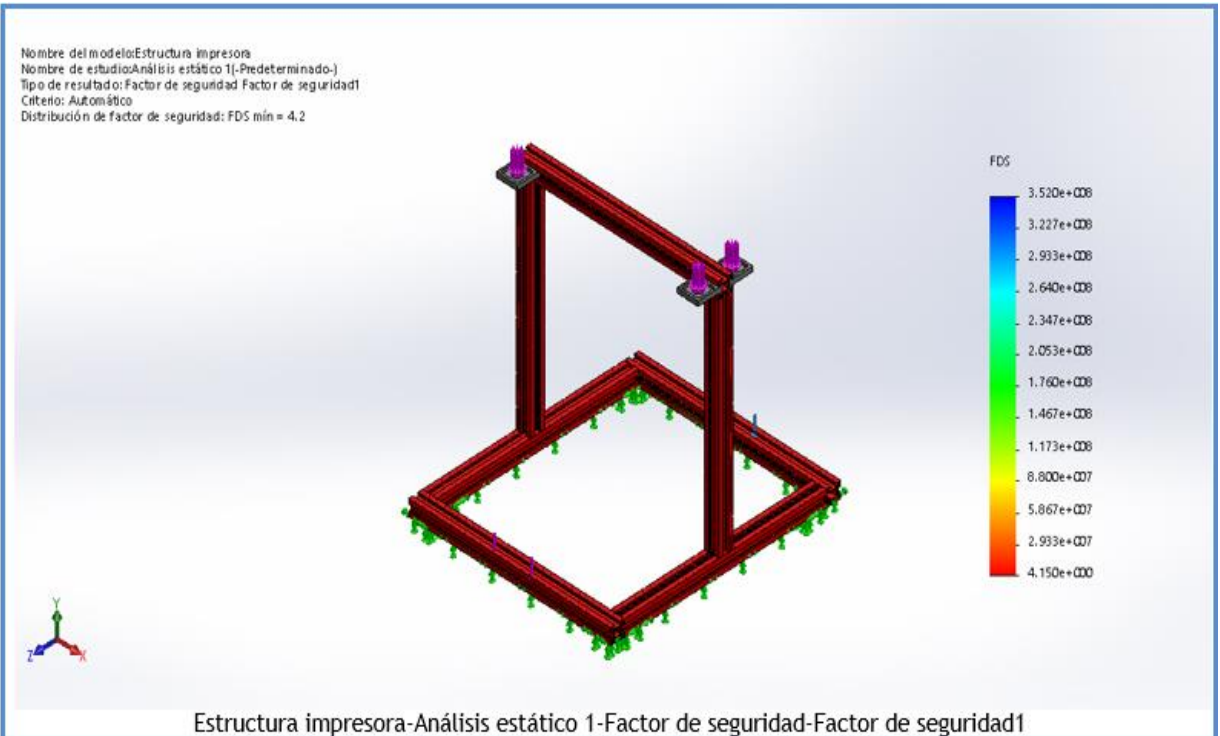
$F_{R2} = 15,1955 \text{ N}$

$F_{R1} = 15,7505 \text{ N}$

Nota: En el punto 2 hay
 dos motores que fard
 efectos de cálculo en
 este plano quedan sumados,
 pero en el estudio de
 cargas se separan.

Anexo D. Resultados del análisis estático de carga por medio de elementos finitos.

Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Factor de seguridad1	Automático	4.150e+000 Nodo: 44447	3.520e+008 Nodo: 6788



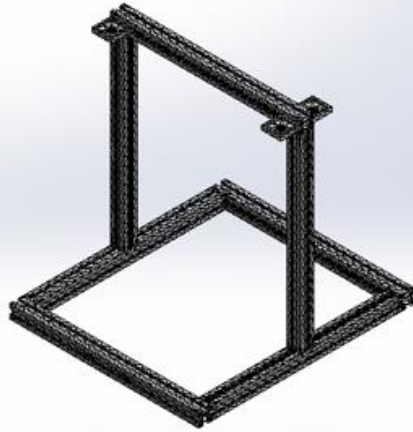
Información de malla

Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado:	Malla estándar
Transición automática:	Desactivar
Incluir bucles automáticos de malla:	Desactivar
Puntos jacobianos	4 Puntos
Tamaño de elementos	22.2846 mm
Tolerancia	1.11423 mm
Trazado de calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden
Regenerar la malla de piezas fallidas con malla incompatible	Desactivar

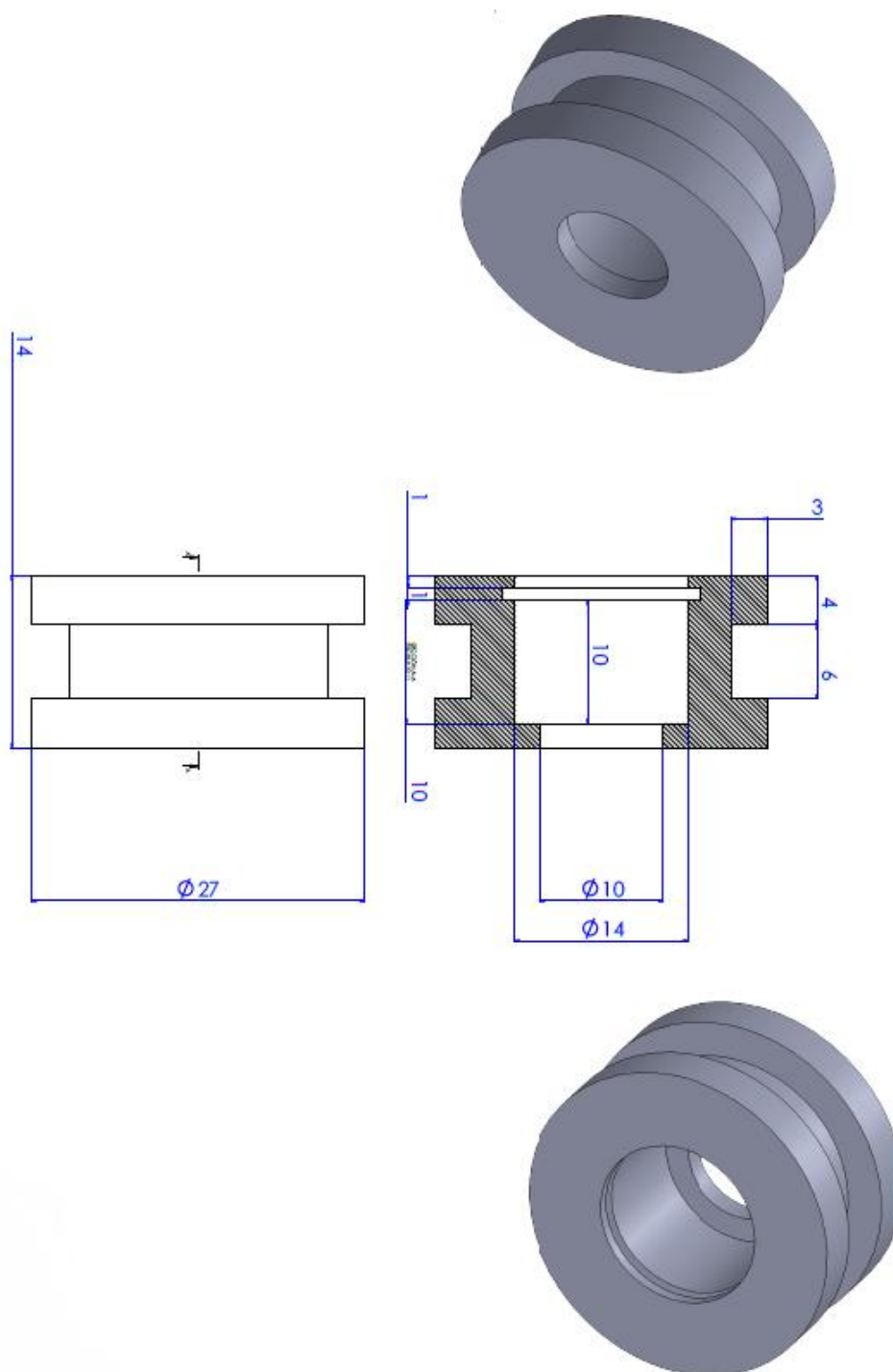
Información de malla - Detalles

Número total de nodos	52817
Número total de elementos	27243
Cociente máximo de aspecto	49.598
% de elementos cuyo cociente de aspecto es < 3	2.99
% de elementos cuyo cociente de aspecto es > 10	41.1
% de elementos distorsionados (Jacobiana)	0
Tiempo para completar la malla (hh; mm;ss):	00:00:19
Nombre de computadora:	

Nombre del modelo: Estructura impresora
Nombre de estudio: Análisis estático 1 [-Predeterminado-]
Tipo de malla: Malla sólida



Anexo E. Plano detallado de la polea transmisora.



Anexo F. Tabla de propiedades de algunos materiales de ingeniería.

Propiedades Físicas de Materiales de Ingeniería

Módulo de Elasticidad (E), Módulo de Rigidez (G), Coeficiente de Poisson (v), Peso Específico (γ)...

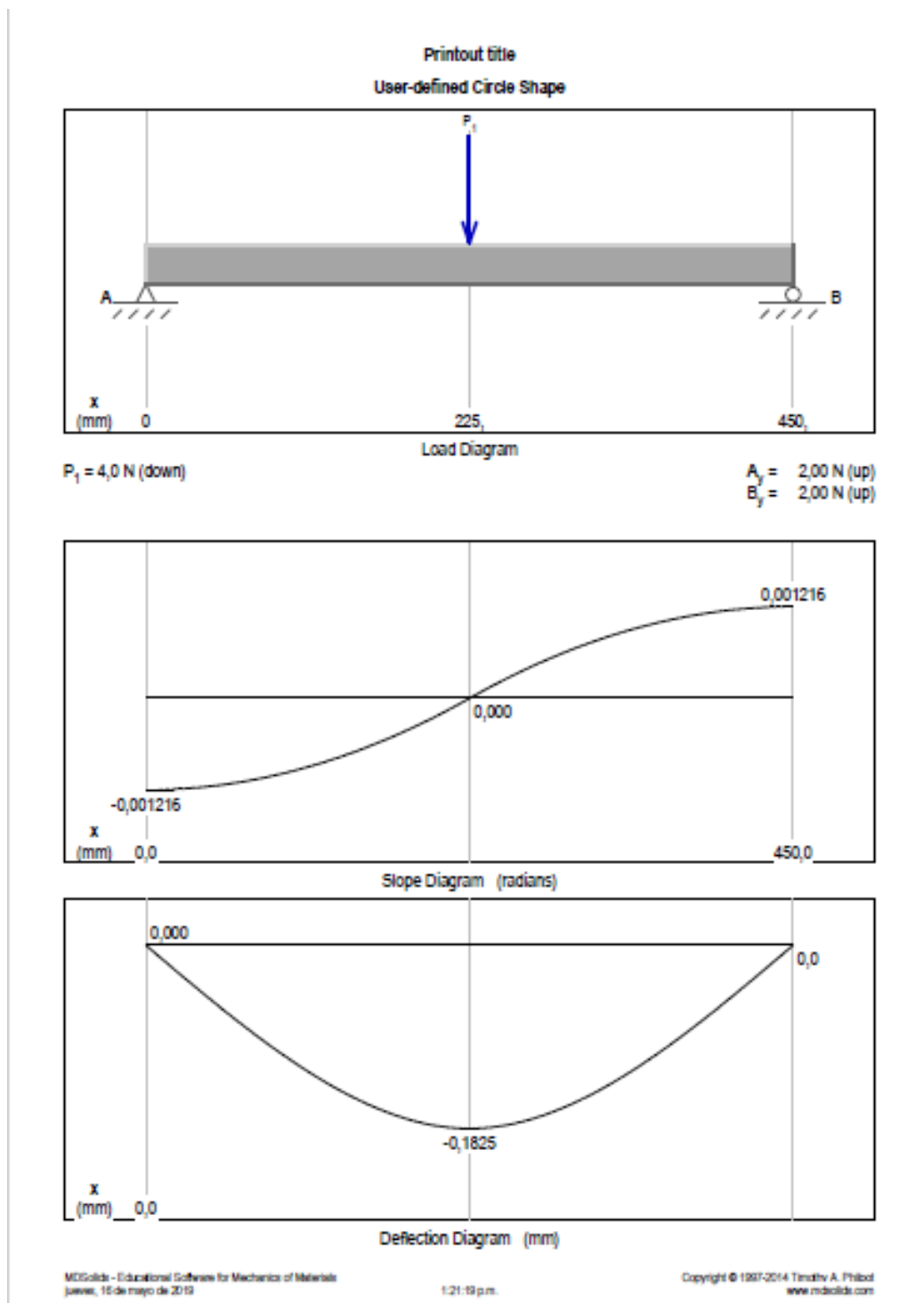
TABLA 1 Propiedades físicas de algunos materiales de ingeniería

Datos provenientes de varias fuentes. * Estas propiedades son esencialmente similares para todas las aleaciones del material específico

Material	Módulo de elasticidad E		Módulo de rigidez G		Razón de Poisson v	Peso específico γ	Densidad de masa ρ	Gravedad específica
	Mpsi	GPa	Mpsi	GPa		lb/in ³	Mg/m ³	
Aleación de aluminio	10.4	71.7	3.9	26.8	0.34	0.10	2.8	2.8
Cobre al berilio	18.5	127.6	7.2	49.4	0.29	0.30	8.3	8.3
Latón, bronce	16.0	110.3	6.0	41.5	0.33	0.31	8.6	8.6
Cobre	17.5	120.7	6.5	44.7	0.35	0.32	8.9	8.9
Hierro fundido gris	15.0	103.4	5.9	40.4	0.28	0.26	7.2	7.2
Hierro fundido dúctil	24.5	168.9	9.4	65.0	0.30	0.25	6.9	6.9
Hierro fundido maleable	25.0	172.4	9.6	66.3	0.30	0.26	7.3	7.3
Aleaciones de magnesio	6.5	44.8	2.4	16.8	0.33	0.07	1.8	1.8
Aleaciones de níquel	30.0	206.8	11.5	79.6	0.30	0.30	8.3	8.3
Acero al carbono	30.0	206.8	11.7	80.8	0.28	0.28	7.8	7.8
Aleaciones de acero	30.0	206.8	11.7	80.8	0.28	0.28	7.8	7.8
Acero inoxidable	27.5	189.6	10.7	74.1	0.28	0.28	7.8	7.8
Aleaciones de titanio	16.5	113.8	6.2	42.4	0.34	0.16	4.4	4.4
Aleaciones de zinc	12.0	82.7	4.5	31.1	0.33	0.24	6.6	6.6

* Properties of Some Metals and Alloys, International Nickel Co., N.Y., Metals Handbook, American Society for Metals, Materials Park, Ohio.

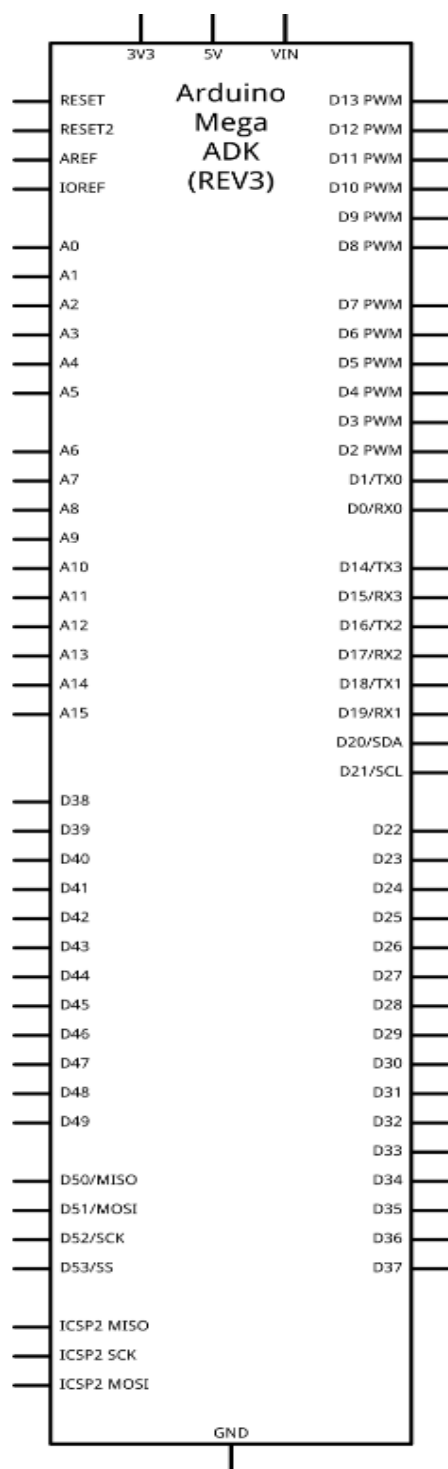
Anexo G. Curva elástica y pendiente de la viga en MDSolids.



Anexo H. Ficha técnica para distintas configuraciones de cojinetes de deslizamiento SCS.

Unit Designation	Dimensions (mm)													Slide bush			Weight (kg/m)
	T	h	E	W	L	F	G	B	C	K	S ₁	S ₂	L ₁	Designation	Basic load rating		
															Dynamic C _B	Static C _{0B}	
SCS 6UU	6	9	15	30	25	18	15	20	15	5	M4	3.4	8	LM 6UU	206	265	34
SCS 8UU	6	11	17	34	30	22	18	24	18	5	M4	3.4	8	LM 8UU	274	392	52
SCS 10UU	8	13	20	40	35	26	21	28	21	6	M5	4.3	12	LM 10UU	372	549	92
SCS 12UU	8	15	21	42	36	28	24	30.5	26	5.75	M5	4.3	12	LM 12UU	510	784	102
SCS 13UU	8	15	22	44	39	30	24.5	33	26	5.5	M5	4.3	12	LM13UU	510	784	120
SCS 16UU	9	19	25	50	44	38.5	32.5	36	34	7	M5	4.3	12	LM 16UU	774	1180	200
SCS 20UU	11	21	27	54	50	41	35	40	40	7	M6	5.2	12	LM 20UU	882	1370	255
SCS 25UU	12	26	38	76	67	51.5	42	54	50	11	M8	7	18	LM 25UU	980	1570	600
SCS 30UU	15	30	39	78	72	59.5	49	58	58	10	M8	7	18	LM 30UU	1570	2740	735
SCS 35UU	18	34	45	90	80	68	54	70	60	10	M8	7	18	LM 35UU	1670	3140	1100
SCS 40UU	20	40	51	102	90	78	62	80	60	11	M10	8.7	25	LM 40UU	2160	4020	1590
SCS 50UU	25	52	61	122	110	102	80	100	80	11	M10	8.7	25	LM 50UU	3820	7940	3340
SCS 60UU	30	58	66	132	122	114	94	108	90	12	M10	10.7	25	LM 60UU	4700	10000	4270
SCS 8LUU	6	11	17	34	58	22	18	24	42	5	M4	3.4	8	LM 8LUU	274	392	0.1
SCS 10LUU	8	13	20	40	68	26	21	28	456	6	M5	4.3	12	LM 10LUU	372	549	0.18
SCS 12LUU	8	15	21	42	70	28	24	30.5	50	5.75	M5	4.3	12	LM 12LUU	510	784	0.20
SCS 13LUU	8	15	22	44	75	30	24.5	33	50	5.5	M5	4.3	12	Lm13LUU	510	784	0.23
SCS 16LUU	9	19	25	50	85	38.5	32.5	36	60	7	M5	4.3	12	LM 16LUU	774	1180	0.39
SCS 20LUU	11	21	27	54	96	41	35	40	70	7	M6	5.2	12	LM 20LUU	882	1370	0.49
SCS 25LUU	12	26	38	76	130	51.5	42	54	100	11	M8	7	18	LM 25LUU	980	1570	1.165
SCS 30LUU	15	30	39	78	140	59.5	49	58	110	10	M8	7	18	LM 30LUU	1570	2740	1.43
SCS 35LUU	18	34	45	90	155	68	54	70	120	10	M8	7	18	LM 35LUU	1670	3140	2.13
SCS 40LUU	20	40	51	102	175	78	62	80	140	11	M10	8.7	25	LM 40LUU	2160	4020	3.09
SCS 50LUU	25	52	61	122	215	102	80	100	160	11	M10	8.7	25	LM 50LUU	3820	7940	6.53
SCS 60LUU	30	58	66	132	240	114	94	108	180	12	M12	10.7	25	LM 60LUU	4700	10000	9.29

Anexo I. Diagrama esquemático de Arduino Mega.

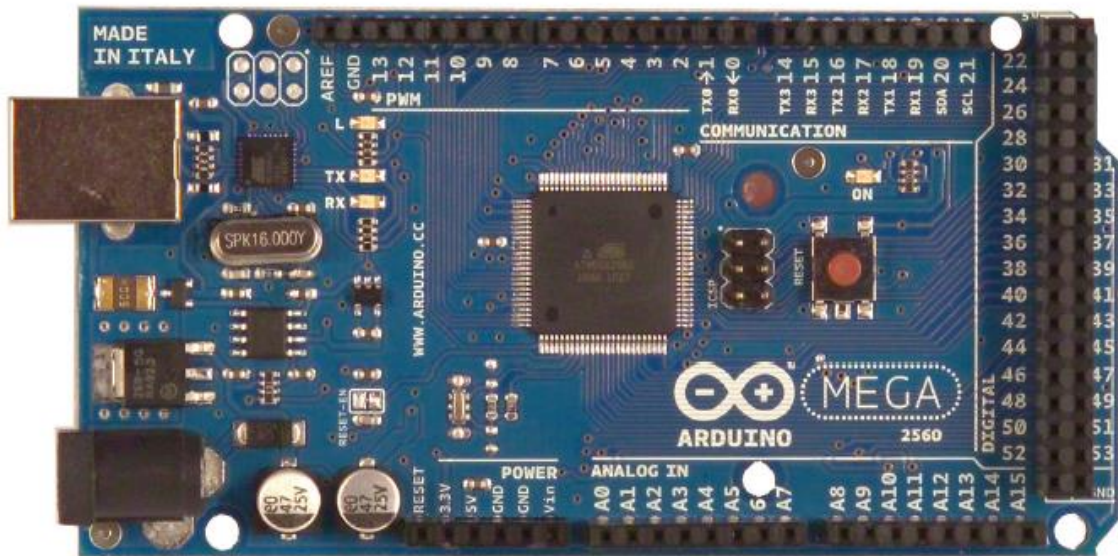


Anexo J. Ficha técnica del Arduino Mega.

Summary

Microcontroller	ATmega2560
Operating Voltage	5V
Input Voltage (recommended)	7-12V
Input Voltage (limits)	6-20V
Digital I/O Pins	54 (of which 14 provide PWM output)
Analog Input Pins	16
DC Current per I/O Pin	40 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	256 KB of which 8 KB used by bootloader
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Clock Speed	16 MHz

Arduino Mega 2560 Datasheet



Getting to know RAMPS 1.4

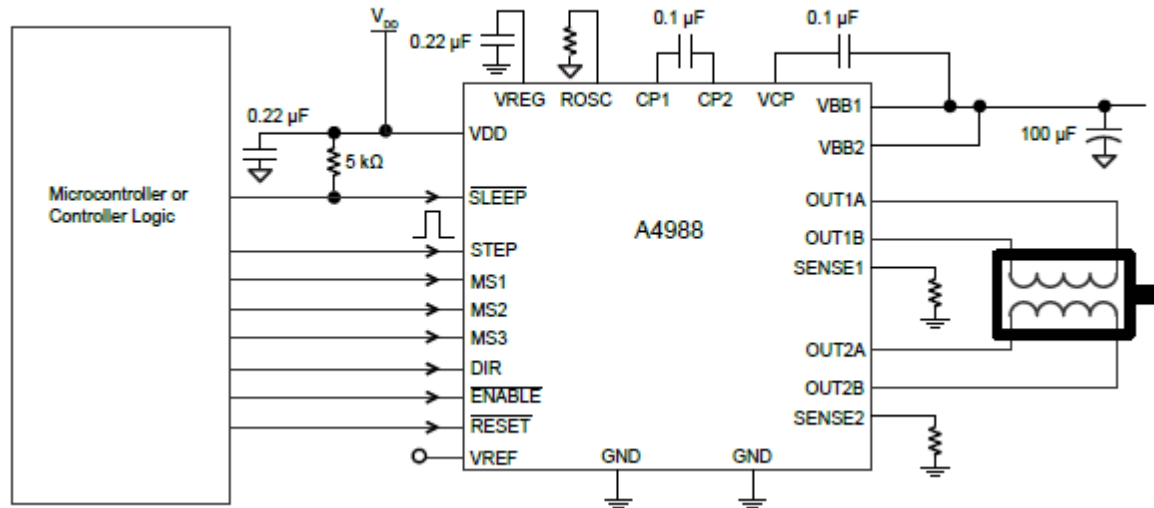
RAMPS 1.4 (Reprap Arduino MEGA Pololu Shield) GPL v3
reprap.org/wiki/RAMPS1.4

Reversing input power, and inserting stepper drivers incorrectly will destroy electronics.



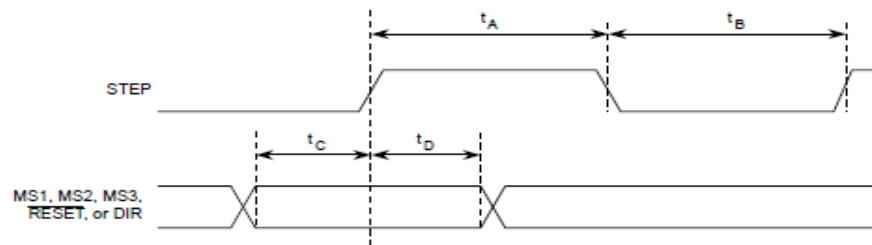
Anexo 1. Ficha técnica del Driver A4988. (Anexo L)

Typical Application Diagram



Absolute Maximum Ratings

Characteristic	Symbol	Notes	Rating	Units
Load Supply Voltage	V_{BB}		35	V
Output Current	I_{OUT}		±2	A
Logic Input Voltage	V_{IN}		-0.3 to 5.5	V
Logic Supply Voltage	V_{DD}		-0.3 to 5.5	V
Motor Outputs Voltage			-2.0 to 37	V
Sense Voltage	V_{SENSE}		-0.5 to 0.5	V
Reference Voltage	V_{REF}		5.5	V
Operating Ambient Temperature	T_A	Range S	-20 to 85	°C
Maximum Junction	$T_J(max)$		150	°C
Storage Temperature	T_{stg}		-55 to 150	°C



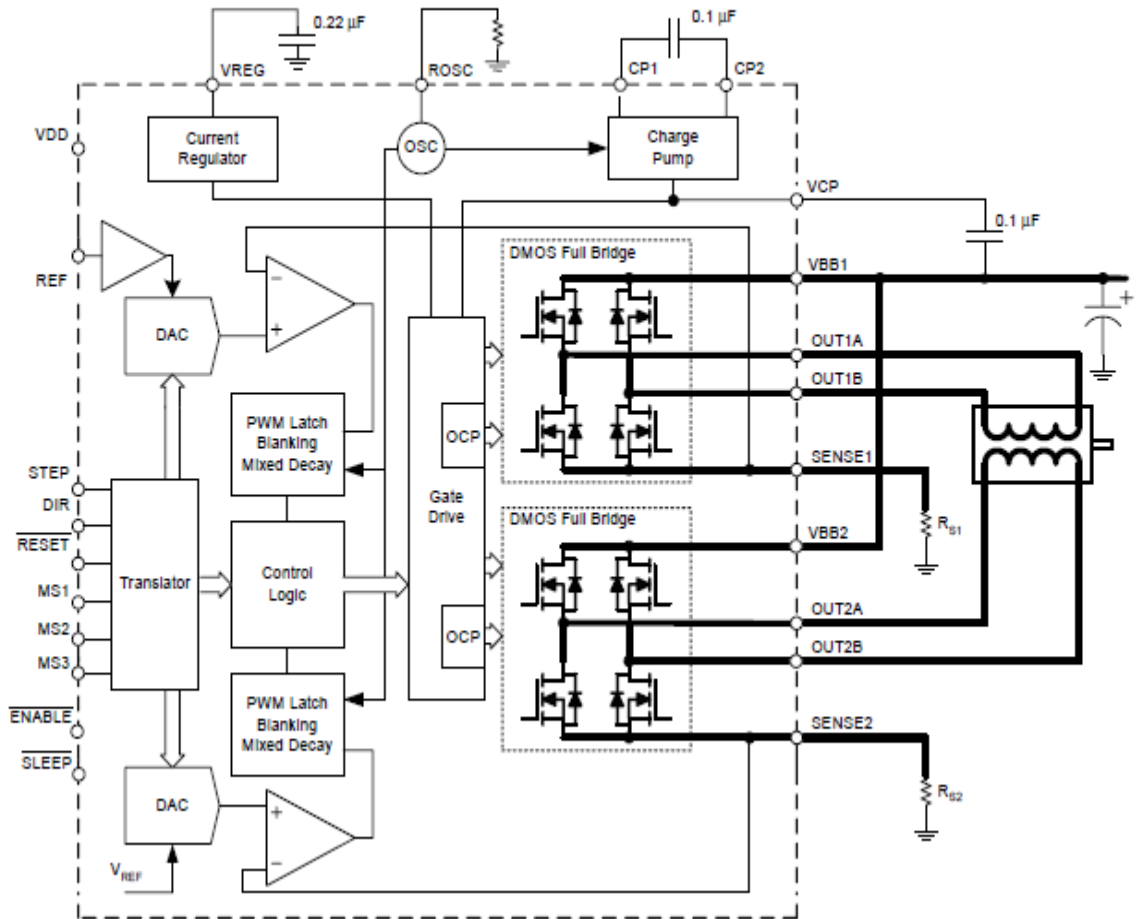
Time Duration	Symbol	Typ.	Unit
STEP minimum, HIGH pulse width	t_A	1	µs
STEP minimum, LOW pulse width	t_B	1	µs
Setup time, input change to STEP	t_C	200	ns
Hold time, input change to STEP	t_D	200	ns

Figure 1: Logic Interface Timing Diagram

Table 1: Microstepping Resolution Truth Table

MS1	MS2	MS3	Microstep Resolution	Excitation Mode
L	L	L	Full Step	2 Phase
H	L	L	Half Step	1-2 Phase
L	H	L	Quarter Step	W1-2 Phase
H	H	L	Eighth Step	2W1-2 Phase
H	H	H	Sixteenth Step	4W1-2 Phase

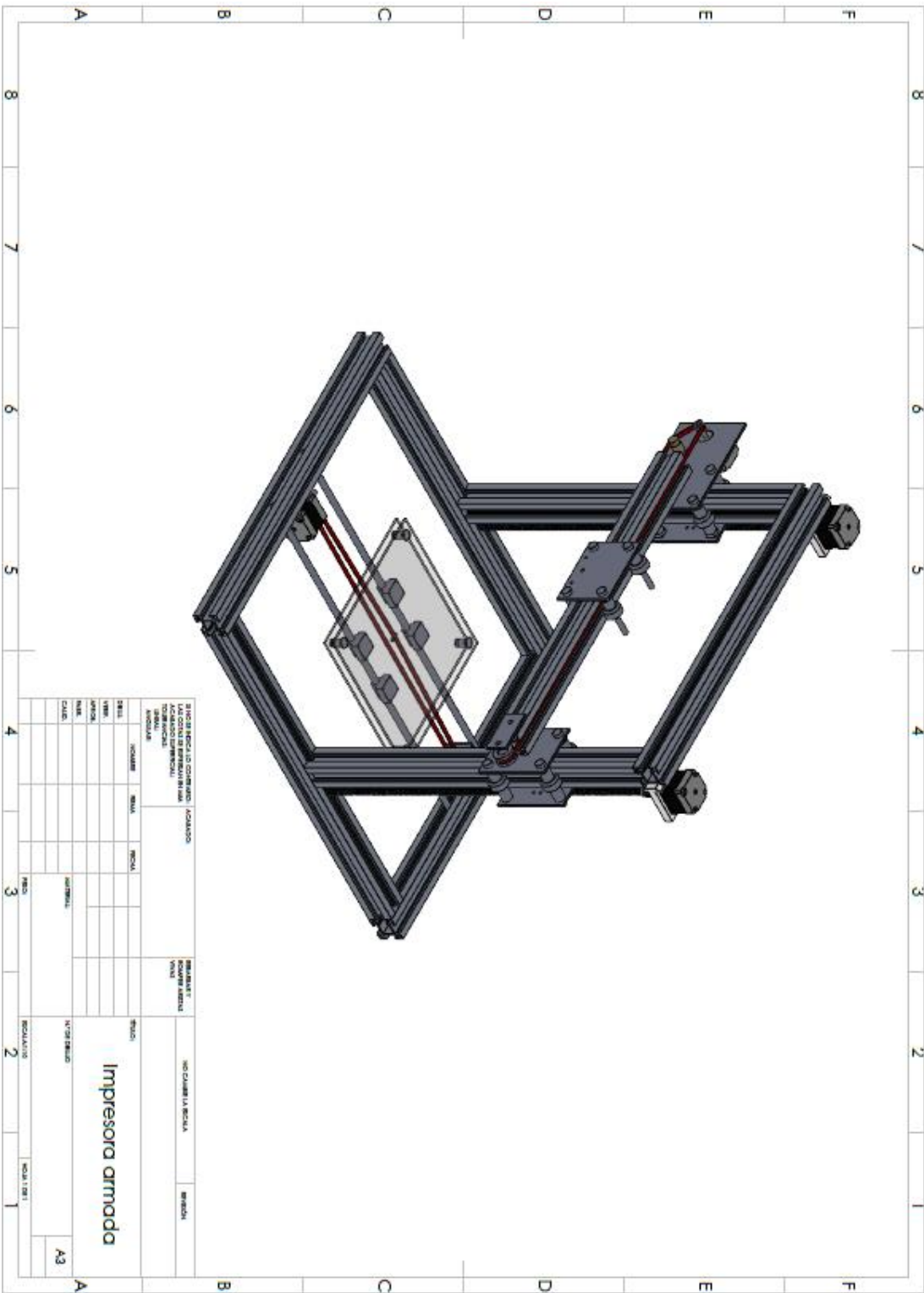
Functional Block Diagram

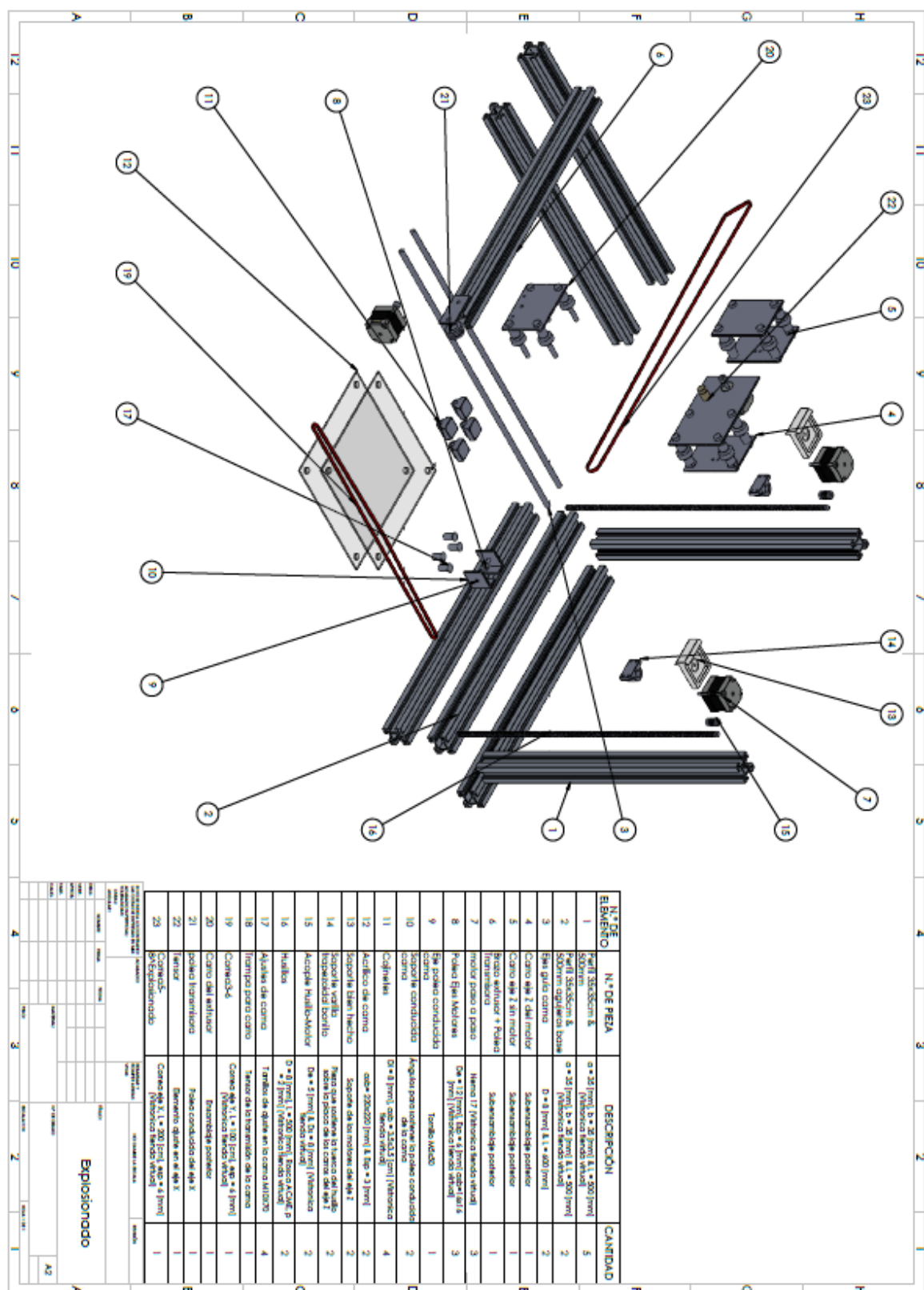


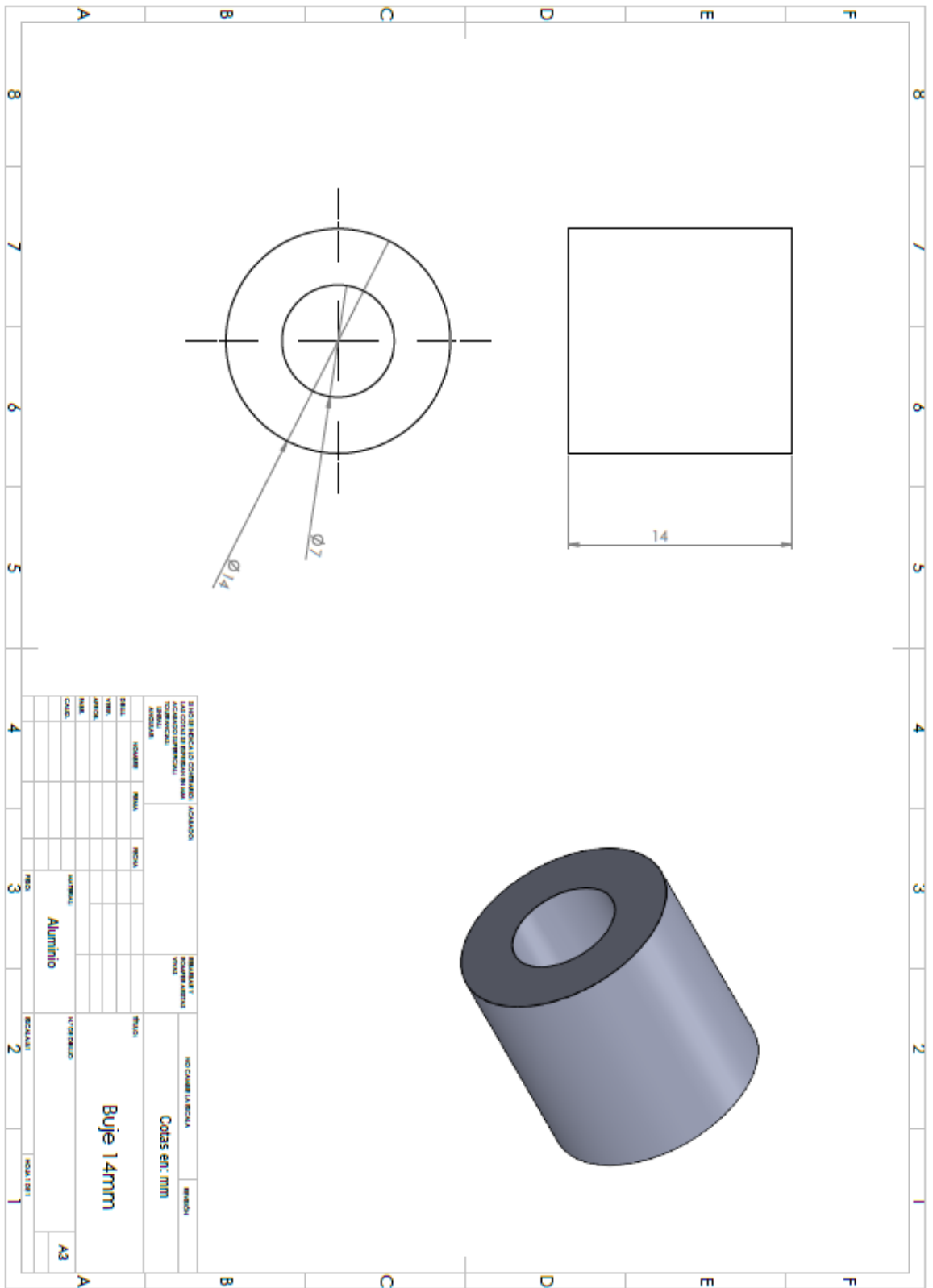
ELECTRICAL CHARACTERISTICS¹ at $T_A = 25^\circ\text{C}$, $V_{BB} = 35\text{ V}$ (unless otherwise noted)

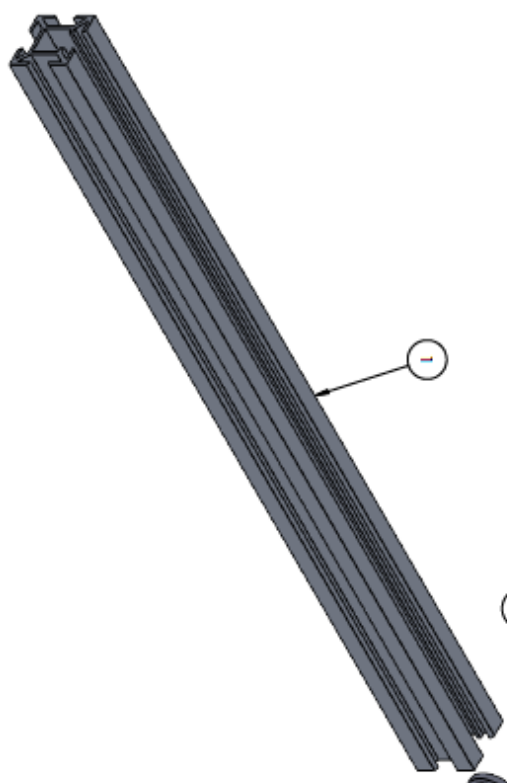
Characteristics	Symbol	Test Conditions	Min.	Typ. ²	Max.	Units
Output Drivers						
Load Supply Voltage Range	V _{BB}	Operating	8	–	35	V
Logic Supply Voltage Range	V _{DD}	Operating	3.0	–	5.5	V
Output On Resistance	R _{DS(ON)}	Source Driver, I _{OUT} = –1.5 A	–	320	430	mΩ
		Sink Driver, I _{OUT} = 1.5 A	–	320	430	mΩ
Body Diode Forward Voltage	V _F	Source Diode, I _F = –1.5 A	–	–	1.2	V
		Sink Diode, I _F = 1.5 A	–	–	1.2	V
Motor Supply Current	I _{BB}	f _{PWM} < 50 kHz	–	–	4	mA
		Operating, outputs disabled	–	–	2	mA
Logic Supply Current	I _{DD}	f _{PWM} < 50 kHz	–	–	8	mA
		Outputs off	–	–	5	mA
Control Logic						
Logic Input Voltage	V _{IN(1)}		V _{DD} ×0.7	–	–	V
	V _{IN(0)}		–	–	V _{DD} ×0.3	V
Logic Input Current	I _{IN(1)}	V _{IN} = V _{DD} ×0.7	–20	<1.0	20	μA
	I _{IN(0)}	V _{IN} = V _{DD} ×0.3	–20	<1.0	20	μA
Microstep Select	R _{MS1}	MS1 pin	–	100	–	kΩ
	R _{MS2}	MS2 pin	–	50	–	kΩ
	R _{MS3}	MS3 pin	–	100	–	kΩ
Logic Input Hysteresis	V _{HYS(IN)}	As a % of V _{DD}	5	11	19	%
Blank Time	t _{BLANK}		0.7	1	1.3	μs
Fixed Off-Time	t _{OFF}	OSC = V _{DD} or GND	20	30	40	μs
		R _{OSC} = 25 kΩ	23	30	37	μs
Reference Input Voltage Range	V _{REF}		0	–	4	V
Reference Input Current	I _{REF}		–3	0	3	μA
Current Trip-Level Error ³	err ₁	V _{REF} = 2 V, %I _{TRIPMAX} = 38.27%	–	–	±15	%
		V _{REF} = 2 V, %I _{TRIPMAX} = 70.71%	–	–	±5	%
		V _{REF} = 2 V, %I _{TRIPMAX} = 100.00%	–	–	±5	%
Crossover Dead Time	t _{DT}		100	475	800	ns
Protection						
Overcurrent Protection Threshold ⁴	I _{OCPST}		2.1	–	–	A
Thermal Shutdown Temperature	T _{TSD}		–	165	–	°C
Thermal Shutdown Hysteresis	T _{TSDHYS}		–	15	–	°C
VDD Undervoltage Lockout	V _{DDUVLO}	V _{DD} rising	2.7	2.8	2.9	V
VDD Undervoltage Hysteresis	V _{DDUVLOHYS}		–	90	–	mV

Anexo M. Planos de la impresora.









N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	Refili 35x35cm & 500mm	L = 500 [mm], arb = 35x35 [mm]	1
2	Placa + polea transmisor	Placa para ajuste del transmisor	1
3	Rodamiento	Di = 7 [mm], De = 14 [mm] & Esp=0.5 [mm]	2
4	polea transmisor	Polea conducida del eje X	1
5	Eje polea transmisor	Tornillo M7x200	1
6	Tornillo placa polea transmisor	Tornillo M6x10	1
7	Arandela Ajuste Polea	De = 12 [mm], Di = 6 [mm] & Esp=2 [mm]	1
8	Tuerca Polea Transmisor	Di = 6 [mm], Esp = 3 [mm]	1

[illegible]

