



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y
MECÁNICA**

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO MECATRÓNICO**

**TEMA: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE
IMPRESORA 3D DE CINCO EJES PARA EL AHORRO DE
MATERIAL Y MEJORAMIENTO DE LA RESISTENCIA
MECÁNICA EN PIEZAS FABRICADAS MEDIANTE EL MÉTODO
DE DEPOSICIÓN DE MATERIAL FUNDIDO EN LA
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE EXTENSIÓN
LATACUNGA**

**AUTORES: CHRISTIAN VINICIO FONSECA LASCANO
PABLO DANIEL MIRANDA TACO**

DIRECTOR: ING. ANDRÉS GORDÓN

LATACUNGA

2018



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación “**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE IMPRESORA 3D DE CINCO EJES PARA EL AHORRO DE MATERIAL Y MEJORAMIENTO DE LA RESISTENCIA MECÁNICA EN PIEZAS FABRICADAS MEDIANTE EL MÉTODO DE DEPOSICIÓN DE MATERIAL FUNDIDO EN LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE EXTENSIÓN LATACUNGA**”, realizado por los señores **CHRISTIAN VINICIO FONSECA LASCANO** y **PABLO DANIEL MIRANDA TACO**, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, por lo tanto me permito acreditarlos y autorizar a los señores **CHRISTIAN VINICIO FONSECA LASCANO** y **PABLO DANIEL MIRANDA TACO** para que lo sustenten públicamente.

Latacunga, 06 de marzo de 2018

Una firma manuscrita en tinta azul que dice 'ANDRÉS GORDÓN GARCÉS'.

ING. ANDRÉS MARCELO GORDÓN GARCÉS
DIRECTOR



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, **CHRISTIAN VINICIO FONSECA LASCANO** y **PABLO DANIEL MIRANDA TACO**, con cédulas de ciudadanía N^o 050332605-0 y 160056792-7, declaramos que este trabajo de titulación “**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE IMPRESORA 3D DE CINCO EJES PARA EL AHORRO DE MATERIAL Y MEJORAMIENTO DE LA RESISTENCIA MECÁNICA EN PIEZAS FABRICADAS MEDIANTE EL MÉTODO DE DEPOSICIÓN DE MATERIAL FUNDIDO EN LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE EXTENSIÓN LATACUNGA**”, ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaramos que este trabajo es de nuestra autoría, en virtud de ello nos declaramos responsables del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Latacunga, 06 de marzo de 2018.

Christian Vinicio Fonseca Lascano
C.C.: 050332605-0

Pablo Daniel Miranda Taco
C.C.: 160056792-7



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

AUTORIZACIÓN

Nosotros, **CHRISTIAN VINICIO FONSECA LASCANO** y **PABLO DANIEL MIRANDA TACO** autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE, publicar en el repositorio de la institución el presente trabajo de titulación “**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE IMPRESORA 3D DE CINCO EJES PARA EL AHORRO DE MATERIAL Y MEJORAMIENTO DE LA RESISTENCIA MECÁNICA EN PIEZAS FABRICADAS MEDIANTE EL MÉTODO DE DEPOSICIÓN DE MATERIAL FUNDIDO EN LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE EXTENSIÓN LATACUNGA**”, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra autoría y responsabilidad.

Latacunga, 06 de marzo de 2018

Una firma manuscrita en tinta azul que parece decir 'Christian'.

Christian Vinicio Fonseca Lascano
C.C.: 050332605-0

Una firma manuscrita en tinta azul que parece decir 'Pablo'.

Pablo Daniel Miranda Taco
C.C.: 160056792-7

DEDICATORIA

El presente proyecto de investigación está dedicado especialmente a mi madre Carmen, quien ha velado por mi bienestar desde el primer instante de mi existencia, ha forjado en mí un espíritu de libertad y ha sido de quién he obtenido inspiración para la superación personal.

Lo dedico también a mi familia y personas más allegadas por darme su apoyo, así mismo como a mis profesores que me han inculcado la necesidad hacia la búsqueda del conocimiento.

Christian.

Este proyecto de investigación lo dedico a mis padres Eloy y Silvia, que, con su amor, su esfuerzo, su paciencia y su apoyo incondicional, me impulsaron a realizar mis sueños.

A mi hermana María Fernanda y mis sobrinos, por siempre estar en mis momentos más difíciles apoyándome y alegrándome la vida.

A mi familia y amigos por darme su apoyo incondicional para seguir siempre adelante y lograr mis objetivos.

También a mis profesores que supieron transmitir sus enseñanzas y valores como personas y como profesionales. Gracias totales.

Pablo.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mi madre, quien con todo su esfuerzo y cumpliendo cada día con una de las más arduas tareas en el campo laboral, nunca ha desistido por mí y me ha apoyado en cada aspecto de mi vida, especialmente fomentándome a la educación e impartíendome el gusto hacia el aprendizaje y demás gratas enseñanzas hacia la contribución de un mundo mejor.

Les agradezco a mis amigos y personas especiales que me han apoyado durante toda la etapa universitaria, me han sabido brindar una mano ante los momentos difíciles y han sabido compartir cada entusiasmo en los momentos de regocijo.

Christian.

Agradezco de todo corazón a mis padres; Eloy y Silvia, y a mi hermana María Fernanda, por estar conmigo en los momentos más difíciles, por siempre brindarme su amor, su tiempo, sus enseñanzas, esté donde esté, una parte de ustedes siempre estará conmigo.

Agradezco al Ing. Andrés Gordón por su ayuda, tiempo y conocimientos para lograr este proyecto.

Agradezco también a todas las personas que me he encontrado en este largo camino por experiencia con el que día a día fui aprendiendo y creciendo como persona, en donde sea que se encuentren, les agradezco infinitamente.

Pablo

ÍNDICE DE CONTENIDO

CARÁTULA	i
CERTIFICACIÓN	ii
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	iii
AUTORIZACIÓN	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vi
ÍNDICE DE CONTENIDO	vii
ÍNDICE DE TABLAS	xiii
ÍNDICE DE FIGURAS	xv
RESUMEN	xxi
ABSTRACT	xxii

CAPÍTULO I

FUNDAMENTOS TEÓRICOS	1
1.1 Introducción	1
1.2 Generalidades	1
1.3 Definición del problema	2
1.4 Objetivos	3
1.4.1 Objetivo general	3
1.4.2 Objetivos específicos	3
1.5 Justificación e importancia	4
1.6 Alcances y limitaciones	5
1.7 Antecedentes de la impresión 3D	6
1.7.1 Introducción al Prototipado Rápido	6

1.7.2	Introducción al prototipado “Open source”	6
1.7.3	Breves rasgos de una impresora 3D	7
1.8	Prototipado rápido	7
1.8.1	Principio de operación en el Prototipado Rápido	8
1.8.2	Tecnologías de Prototipado Rápido	8
1.8.3	Modelado por deposición de material fundido (FDM)	10
1.9	Impresoras 3d	12
1.9.1	Impresoras 3D profesionales	12
1.9.2	Impresoras 3D de código abierto	14
1.9.3	El Proyecto RepRap	15
1.9.4	Modelos RepRap	16
1.9.5	Problemas en impresoras 3D de código abierto	17
1.9.6	Solución al problema de material de apoyo en impresora 3D.....	19
1.9.7	Solución al problema de resistencia mecánica en impresora 3D	20
1.10	Características mecánicas y electrónicas.....	20
1.10.1	Estructuras más empleadas para impresoras 3D	20
1.10.2	Materia prima para la impresión tridimensional	22
1.10.3	Hardware principal en impresoras 3D.....	23
1.11	Software de impresión 3D.....	26
1.11.1	Modelado CAD	26
1.11.2	Software CAM	27
1.11.3	Código de máquina.....	28
1.11.4	Firmware de impresión 3D.....	28
1.12	Estado del arte	31
1.12.1	Maquinaria DMG MORI.....	31

1.12.2	Centro autónomo de producción de ADD+PROCESS	32
1.12.3	Impresora 3D Enomoto	32
1.12.4	Máquina multiproceso 5AXISMAKER	33
1.13	Ventajas del uso de cinco ejes en la impresión 3D	34
1.14	Aplicabilidad de impresoras 3D de cinco ejes	35
1.14.1	Aplicaciones concernientes a la mejora en la resistencia mecánica.....	35
1.14.2	Aplicaciones concernientes al ahorro de material de deposición.....	36

CAPÍTULO II

	DISEÑO Y SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS.....	38
2.1	Introducción	38
2.2	Características generales de selección.....	38
2.2.1	Técnica de Prototipado Rápido que fundamenta la investigación	38
2.2.2	Distribución y licencias para hardware y software aplicado	39
2.3	Requisitos funcionales y de diseño general.....	39
2.4	Selección de la disposición del sistema de guiado	40
2.4.1	Configuración de la disposición del sistema de cinco ejes.	40
2.4.2	Selección de la disposición del sistema de guiado base.....	42
2.5	Selección de impresora 3D base.....	43
2.5.1	Subsistemas dentro de impresoras 3D.....	43
2.5.2	Parámetros para aplicar en rediseño de impresora 3D base	44
2.5.3	Detalles de impresoras 3D opcionales para el modelo base.....	46
2.5.4	Parámetros a considerar en ámbito mecánico del modelo base	48
2.5.5	Parámetros a considerar en el ámbito electrónico de modelo base	49
2.5.6	Parámetros a considerar en el ámbito de control de modelo base.....	51

2.5.7	Criterio final de selección de modelo de impresora 3D base	52
2.6	Subsistemas dentro del modelo base seleccionado	54
2.6.1	Subsistemas para ser conservados	54
2.6.2	Subsistemas para ser modificados	56
2.7	Rediseño para subsistemas a ser modificados	63
2.7.1	Plataforma base y cama de deposición de material (sistema rotativo).....	63
2.7.2	Cabezal del sistema de extrusión	101
2.7.3	Sistema eléctrico y electrónico del prototipo con cinco ejes	112
2.7.4	Arquitectura y procesos de control para el sistema de cinco ejes	121

CAPÍTULO III

IMPLEMENTACIÓN Y CALIBRACIÓN DEL SISTEMA GENERAL ..136

3.1	Introducción	136
3.2	Implementación del sistema mecánico.....	136
3.2.1	Implementación de elementos del sistema de extrusión	137
3.2.2	Implementación de elementos del montaje del eje X.....	139
3.2.3	Implementación de elementos del montaje del eje Y.....	140
3.2.4	Implementación de elementos de la cama de deposición de material.....	142
3.2.5	Montaje del mecanismo del eje Z	145
3.3	Implementación del sistema electrónico	147
3.3.1	Montaje de la caja electrónica y enrutamiento de cables	147
3.3.2	Implementación de los motores PaP y los finales de carrera	149
3.3.3	Conexión del sensor de proximidad infrarrojo.....	150
3.3.4	Implementación y conexión del Hot End.....	150
3.3.5	Alimentación del sistema eléctrico-electrónico	151

3.3.6	Montaje final del prototipo de impresión 3D de cinco ejes	151
3.4	Calibración del sistema basculante	152
3.5	Calibración del sistema general de impresión.....	153
3.5.1	Punto central de referencia.....	153
3.5.2	Punto desplazado para X en sentido positivo.....	154
3.5.3	Punto desplazado para X en sentido negativo	154
3.5.4	Punto desplazado para Y en sentido positivo.....	154
3.5.5	Punto desplazado para Y en sentido negativo	155
3.6	Calibración del sistema giratorio.....	155
3.7	Ejecución del control principal de impresión.....	156
3.7.1	Configuración de archivo principal CONFIG.G	156
3.7.2	Configuración del posicionamiento HOME.....	158
3.7.3	Preparación de impresión 3D de cinco ejes	159

CAPÍTULO IV

PRUEBAS DE LA IMPRESORA 3D DE CINCO EJES162

4.1	Introducción	162
4.2	Pruebas de ortogonalidad de los ejes.....	162
4.3	Pruebas de desplazamientos de ejes rotativos	163
4.4	Prueba para el estudio de ahorro de material soporte en impresión 3D.....	164
4.4.1	Prueba de ahorro de material mediante impresión de cinco ejes	164
4.4.2	Análisis de la prueba de impresión para ahorro de material	166
4.5	Prueba para estudio de mejora de resistencia mecánica en impresión 3D	168
4.5.1	Prueba de resistencia mecánica para impresiones 3D de cinco ejes	169
4.5.2	Análisis de prueba de impresión para estudio de resistencia mecánica	170

4.6	Análisis técnico-económico	172
4.7	Validación de la hipótesis	173

CAPÍTULO V

	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	177
5.1	CONCLUSIONES	177
5.2	RECOMENDACIONES	179
5.3	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	181

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Especificaciones técnicas de las impresoras 3D industriales tratadas	14
Tabla 2. Especificaciones técnicas de impresoras 3D RepRap tratadas	17
Tabla 3. Softwares de modelado 3D	27
Tabla 4. Softwares CAM para rebanado o corte	28
Tabla 5. 3-ejes VS. 5-caras.....	35
Tabla 6. Características de estructuras de soporte para impresoras 3D.	48
Tabla 7. Principales tarjetas electrónicas utilizadas en proyecto RepRap	49
Tabla 8. Ponderaciones para selección de alternativas (Norma ISO10004)	53
Tabla 9. Selección de alternativa de modelo base de impresora 3D.....	53
Tabla 10. Modelos de mesas rotativas CNC para impresión 3D y mecanizado	57
Tabla 11. Comparativa entre motores PaP y de corriente continua	65
Tabla 12. Selección de alternativa de tipo de motores para rediseño	65
Tabla 13. Ventajas y desventajas del mecanismo Sin fin - corona	67
Tabla 14. Ventajas y desventajas del mecanismo de poleas con correa	68
Tabla 15. Ventajas y desventajas de engranaje planetario para motor NEMA.....	69
Tabla 16. Selección de la alternativa de mecanismo de movimiento giratorio.....	69
Tabla 17. Comparación de sistemas cinemáticos.....	71
Tabla 18. Selección de alternativa de mecanismo cinemático en eje Y.....	72
Tabla 19. Modelamiento CAD para piezas del sistema giratorio basculante.....	74
Tabla 20. Modelamiento CAD de plataforma base y estructura móvil de Y	76
Tabla 21. Fuerza de arranque y fricción de rodamientos lineales	86
Tabla 22. Factor de diseño para materiales dúctiles.....	90
Tabla 23. Fórmulas para esfuerzo de diseño	99
Tabla 24. Características de modelos de Hot End de simple montaje	102
Tabla 25. Selección de alternativa de modelo de Hot End.....	103
Tabla 26. Modelamiento de piezas para sistema de extrusión	106
Tabla 27. Ventajas y desventajas de los Finales de carrera	113
Tabla 28. Selección de alternativa de tipo de sensor de proximidad	114
Tabla 29. Componentes de cuerpo y engrane del extrusor	138
Tabla 30. Componentes de montaje de Hot End y su soporte.....	139

Tabla 31. Componentes de montaje del eje X.....	140
Tabla 32. Componentes del montaje de la plataforma base.....	141
Tabla 33. Componentes de montaje del motor del eje Z.....	142
Tabla 34. Componentes de montaje del sistema basculante del eje A.....	143
Tabla 35. Componentes del montaje de sistema giratorio del eje C.....	144
Tabla 36. Componentes de montaje del motor y montaje inferior del eje Z.....	146
Tabla 37. Componentes del soporte de esquina del eje Z.....	146
Tabla 38. Componentes de montaje corredizo y tornillo del eje Z.....	147
Tabla 39. Componentes de montaje del sistema eléctrico-electrónico.....	148
Tabla 40. Configuración del perfil de impresión para pruebas con cinco ejes.....	165
Tabla 41. Comparación entre consumo de recursos para cada caso de impresión.....	166
Tabla 42. Fuerza de fallo por fractura en piezas de prueba de resistencia mecánica....	170
Tabla 43. Costos de materiales de construcción.....	172
Tabla 44. Cantidad de material utilizado en impresión y carga de falla por fractura ...	174
Tabla 45. Resultados de frecuencias observadas.....	174
Tabla 46. Resultado de frecuencias esperadas.....	175
Tabla 47. Resultado de Chi Cuadrado para validación de hipótesis.....	176

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Pasos generales en el proceso de Prototipado Rápido.....	8
Figura 2. Clasificación de las principales tecnologías de Prototipado Rápido	9
Figura 3. Esquema del proceso de modelado por deposición de material fundido.....	11
Figura 4. Modelos de reconocidas impresoras 3D profesionales.....	13
Figura 5. Mercado principal de fabricantes de impresoras 3D	15
Figura 6. Modelos de impresoras 3D populares dentro de RepRap	16
Figura 7. Uso de material de apoyo en pieza impresa.	17
Figura 8. Impresión 3D de voladizo sin los debidos apoyos ni refrigeración.....	18
Figura 9. Piezas impresas en 3D más resistentes	19
Figura 10. Ejes cartesianos interpolados y eje rotativo sincronizado	21
Figura 11. Impresora 3D robot delta.....	21
Figura 12. impresora 3D de estructura polar.....	22
Figura 13. Carretes de material para impresoras 3D.....	23
Figura 14. Impresora 3D utilizando extrusión Bowden.....	24
Figura 15. Motor Paso a Paso	25
Figura 16. Sensor de final de carrera	26
Figura 17. Integración de tecnología fabricada por DMG MORI.....	32
Figura 18. Máquina de fabricación aditiva y mecanizado ADD+PROCESS	32
Figura 19. Impresora 3D Enomoto de 5 ejes	33
Figura 20. Impresora 3D "5axismaker"	34
Figura 21. Centro de mecanizado de cinco ejes.....	34
Figura 22. Impresión 3D en la industria de la aviación	36
Figura 23. Puente en Ámsterdam mediante impresión 3D	36
Figura 24. Arte real con el lápiz LIX de impresión 3D	37
Figura 25. Configuración de disposición de ejes de una máquina-herramienta	41
Figura 26. Disposición de 5 ejes, mesa con soporte giratorio	42
Figura 27. Tarjeta Duet 0.8.5 junto con expansión Duex4	50
Figura 28. Diagrama de bloques del modo SCOPE.....	51
Figura 29. Diagrama de bloques del modo STANDARD	52
Figura 30. Impresora Ormerod 2 como modelo base de investigación	54

Figura 31. Vista de estructura de soporte en voladizo de Ormerod 2.....	54
Figura 32. Estructura base para ser conservada.....	55
Figura 33. Mecanismo transmisor de movimiento.....	56
Figura 34. Cama de geometría circular adoptada por impresoras 3D polares.....	56
Figura 35. Problema con choque del sistema rotativo y Hot End.....	59
Figura 36. Ejemplo de conexión de tarjeta Duet 0.8.5 con Duex4.....	61
Figura 37. Representación de volumen de trabajo rediseñado para PLA.....	63
Figura 38. Masa de pieza impresa de dimensiones límite.....	63
Figura 39. Ejemplo de sistema giratorio basculante (carro de eje Y).....	64
Figura 40. Ejemplo de origen de coordenadas para sistema de guiado rotativo.....	64
Figura 41. Diversidad de motores estándar NEMA.....	66
Figura 42. Diseño CAD de mecanismo tornillo sin fin – corona.....	66
Figura 43. Representación del mecanismo de poleas con correa.....	67
Figura 44. Representación de caja con engranaje planetario para motor NEMA.....	69
Figura 45. Rediseño de plataforma base con la adición de perfil de aluminio.....	70
Figura 46. Perfil estructural de aluminio 20x40 I-T slot 5.....	71
Figura 47. Poleas y correa dentadas tipo GT2.....	73
Figura 48. Diseño CAD de Cama de deposición giratoria basculante.....	77
Figura 49. Modelo CAD de carro móvil de Y acoplado a plataforma base.....	78
Figura 50. Rediseño de cama de deposición anterior Vs. actual.....	78
Figura 51. Masa aproximada de bandeja de impresión, su soporte y acople.....	79
Figura 52. Distancia excéntrica de la carga máxima para eje C.....	80
Figura 53. Curva característica: 17HS19-1684S-PG19 a potencia nominal.....	82
Figura 54. Masa aproximada de los elementos que voltea el eje A.....	83
Figura 55. Distancia excéntrica de la carga para el eje A.....	83
Figura 56. Motores para sistema giratorio basculante del prototipo.....	85
Figura 57. Masa aproximada de plataforma móvil del eje Y.....	85
Figura 58. Esquema modelo para el sistema del eje Y.....	85
Figura 59. Curva torque VS. velocidad de NEMA 17 a variadas condiciones.....	89
Figura 60. Cama rotativa acoplada a la plataforma base.....	89
Figura 61. Diagrama de cuerpo libre de la varilla del eje Y.....	92

Figura 62. Diagramas de fuerza cortante y momento flector para eje Y	93
Figura 63. Análisis de Von Misses para la varilla del eje Y	96
Figura 64. Análisis de deflexión máxima de la varilla del eje Y	97
Figura 65. Factor de seguridad determinado para diseño del sistema sobre el eje Y	97
Figura 66. Diagrama de momento flector máximo para nuevas condiciones de eje Y... ..	99
Figura 67. Análisis de Von Misses para la varilla del eje Y con carga extrema.....	100
Figura 68. Análisis de deflexión máxima con carga extrema en Y	101
Figura 69. Análisis de factor de diseño con carga máxima sobre eje Y	101
Figura 70. Estructura de Hot End E3D V6 metálico.....	103
Figura 71. Especificación dimensional y funcional para rediseño del carro de X.....	104
Figura 72. Comparación de rediseño de cabezal de extrusión.....	105
Figura 73. Modelamiento de montaje de sistema de extrusión rediseñado	105
Figura 74. Estructura móvil, HotEnd y su soporte en el eje X	107
Figura 75. Diagrama de cuerpo libre de la varilla del eje X	108
Figura 76. Diagramas de fuerza cortante y momento flector para eje X	109
Figura 77. Análisis de Von Misses para la varilla del eje X.....	111
Figura 78. Análisis de deflexión máxima de la varilla del eje X.....	111
Figura 79. Factor de seguridad determinado para diseño de sistema sobre el eje X	112
Figura 80. Sensor infrarrojo "Mini IR Sensor"	114
Figura 81. Fuente de tensión S-250-12 para el sistema electrónico	115
Figura 82. Configuración de la electrónica para adaptación de cinco ejes	116
Figura 83. Ensamblaje de diseño CAD mecánico y electrónico del prototipo	118
Figura 84. Modelo Ormerod 2 con capacidad de hasta 3 mecanismos extrusores	119
Figura 85. Primera versión de la disposición del carro del eje X	119
Figura 86. Rodamientos radiales a ambos lados del carro del eje X	120
Figura 87. Diseño de piezas para mayor seguridad estructural.....	120
Figura 88. Ensamble final del diseño CAD del prototipo.....	121
Figura 89. Arquitectura de control del prototipo de impresión 3D de cinco ejes.....	121
Figura 90. Programación para 5 ejes con vectores de herramienta.....	122
Figura 91. Comando M584 para reconocimiento de Gcode de 5 ejes	123
Figura 92. Posible conexión para la comunicación con la Interfaz web de control.....	123

Figura 93. Configuración de controladores para ejes adicionales	124
Figura 94. Configuración de controladores para los ejes X, Y, Z, U, V.....	125
Figura 95. Monitoreo de variables físicas dentro del sistema de impresión.....	125
Figura 96. Interfaz de software Slicer CURA.....	129
Figura 97. Diagrama de flujo para control manual de proceso de impresión	130
Figura 98. Estructura de pieza para prueba de ahorro de material.....	130
Figura 99. Representación de impresión de base de pieza prueba.....	131
Figura 100. Representación de impresión de pieza suspendida para prueba.....	132
Figura 101. Representación proceso de impresión en piezas suspendidas de prueba...	132
Figura 102. Representación final de pieza de prueba para ahorro de material	133
Figura 103. Pieza de prueba para imprimirse en una máquina convencional.....	133
Figura 104. Representación de geometrías para mayor ahorro de material.....	133
Figura 105. Representación de pieza de prueba para resistencia mecánica.....	134
Figura 106. Representación de impresión en el aumento de resistencia mecánica.....	134
Figura 107. Diagrama de flujo para control automático de impresión	135
Figura 108. Herramientas para montaje del prototipo de impresión de cinco ejes.....	136
Figura 109. Elementos de todo el sistema de extrusión de material	137
Figura 110. Montaje del cuerpo extrusor	137
Figura 111. Montaje del Hot End y su soporte	138
Figura 112. Montaje y elementos del eje X	139
Figura 113. Montaje y elementos del sistema de guiado de Y (plataforma base)	140
Figura 114. Montaje de la estructura soporte de la plataforma móvil Y	142
Figura 115. Cama de deposición de material gítoria basculante	143
Figura 116. Componentes del sistema basculante del eje A.....	143
Figura 117. Componentes del sistema giratorio del eje C	144
Figura 118. Montaje y componentes del mecanismo del eje Z.....	145
Figura 119. Montaje del motor del eje Z	145
Figura 120. Soporte de esquina del eje Z.....	146
Figura 121. Montaje corredizo del eje Z.....	147
Figura 122. Montaje de la caja electrónica y enrutamiento de cables	148
Figura 123. Conexión de motores PaP y Finales de carrera en Duet.....	149

Figura 124. Fácil conexión y desconexión para motores PaP y finales de carrera	149
Figura 125. Conexión y pines de motores PaP para ejes rotativos	150
Figura 126. Conexión del sensor de proximidad infrarrojo	150
Figura 127. Conexión y montaje del el Hot End	150
Figura 128. Diagrama de conexión de la fuente hacia las tarjetas	151
Figura 129. Interruptor termomagnético para energización de caja electrónica.....	151
Figura 130. Montaje final del prototipo de impresión 3D de cinco ejes.....	152
Figura 131. Nivelación de bandeja de impresión para los movimientos basculantes...	152
Figura 132. Calibración de ejes rotativos con perpendicularidad entre ellos	153
Figura 133. Ubicación del punto central de referencia para calibración	153
Figura 134. Ubicación del punto de referencia desplazado para X positivo.....	154
Figura 135. Ubicación de punto de referencia desplazado para X negativo.....	154
Figura 136. Ubicación de punto de referencia desplazado para Y positivo.....	155
Figura 137. Ubicación de punto de referencia desplazado para Y negativo.....	155
Figura 138. Configuración para el nuevo prototipo de impresora en Cura.....	159
Figura 139. Opción de carga de archivo Gcode para ejecución de impresión.....	161
Figura 140. Pieza de prueba para ortogonalidad de los ejes	162
Figura 141. Ortogonalidad entre ejes cartesianos	163
Figura 142. Movimiento basculante satisfactorio del eje A.....	163
Figura 143. Pruebas de ejecución del movimiento de ejes	164
Figura 144. Caso 1 y 2 de prueba para ahorro de material	165
Figura 145. Caso 3 de prueba para ahorro de material	166
Figura 146. Caso 4 de prueba para ahorro de material	166
Figura 147. Pieza de prueba que sustenta el ahorro de material con el uso de 5 ejes...	167
Figura 148. Comparación entre cantidad de material de soporte para cada caso	168
Figura 149. Pesaje de las piezas de prueba para el ahorro de material	168
Figura 150. Viga para prueba de mejora en resistencia mecánica	169
Figura 151. Geometría similar de referencia entre pieza con recubrimiento y sin él ...	169
Figura 152. Verificación de posicionamiento para prueba de resistencia	170
Figura 153. Campo de ensayo experimental para pieza de prueba.....	171
Figura 154. Piezas de prueba después de los ensayos de rotura	171

Figura 155. Precio para impresora 3D de cinco ejes 5axismaker 5xm400.....	173
Figura 156. Valores críticos para rechazar una hipótesis alternativa.....	176

RESUMEN

Actualmente en el campo de los procesos de manufactura sustractiva asistida mediante control numérico computacional (CNC), resulta de gran eficiencia el uso de maquinaria que incorpora un sistema de cinco ejes en su estructura; tres ejes cartesianos y dos rotativos. Por otra parte se toman en cuenta ciertos inconvenientes que surgen dentro de la impresión 3D mediante Modelado por Deposición Fundida (FDM); uno de ellos es la extrusión de material de apoyo, en donde al final de la operación de impresión existe desperdicio obligatorio de dicho material, además implica el tedioso “post-procesado” de las piezas fabricadas al tener que retirar las estructuras de soporte e inclusive llegar a utilizar operaciones de pulido, en donde se puede propiciar la alteración de las dimensiones del modelo original. Con el propósito de solucionar este desperfecto, se desarrolla el presente trabajo de investigación, al crear un prototipo de maquinaria que combina la tecnología de cinco ejes con la impresión tridimensional, en donde también se promueve de forma adicional el mejoramiento de la resistencia mecánica de las piezas fabricadas al tener la capacidad de fusionar variadas disposiciones u orientaciones respecto a la extrusión del filamento plástico y crear nuevas propuestas de revestimiento en el producto final.

PALABRAS CLAVE:

- **MÁQUINAS CNC**
- **IMPRESIÓN 3D**
- **MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA (FDM)**
- **IMPRESIÓN 3D - RESISTENCIA MECÁNICA**

ABSTRACT

Nowadays in the field of the subtractive manufacturing processes which is assisted by a computational control, the use of machinery that integrates five axes in its structure results of great efficiency; three Cartesian and two rotary axes. On the other hand, some inconveniences that occur within the 3D printing through Fused Deposition Modeling (FDM) are taken into account. One of these inconveniences is the extrusion of the support material that at the end of the printing operation there is always waste of this material. Also, the tedious “post-processing” of the manufactured product has to be done; the supporting structures are needed to take off and even the use of polishing operations may be necessary. By doing that dimensional changes from the original model can also arouse. With the goal of addressing this problem, this research work is developed. The creation of a prototype machinery where the five-axis technology is merged with the 3D printing and also the improvement of the mechanical strength of the manufactured parts is promoted as an extra by being able to combine varied directions in the plastic filament extrusion and to create new coating proposals in the final product.

KEYWORDS:

- **CNC MACHINE**
- **3D PRINTING**
- **FUSED DEPOSITION MODELING (FDM)**
- **3D PRINTING - MECHANICAL STRENGTH**

CAPÍTULO I

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

1.1 Introducción

En el primer capítulo se detallan las características fundamentales que conciernen al planteamiento, objetividad, delimitación, factibilidad, entre otros aspectos principales del desarrollo general de la investigación. Se desglosan varios términos conceptuales referidos al prototipado rápido, al campo de la impresión tridimensional y su desempeño en nuestro entorno; así también se establece una revisión de los modelos de impresoras 3D y trabajos que se han venido haciendo mediante aplicación multieje en maquinaria guiada por control numérico computacional.

Se describe una breve orientación a los procesos de optimización de recursos dentro de la técnica de modelado por deposición de material fundido, junto a ciertos aspectos que hacen referencia a la arquitectura, software y control electrónico de nuevas propuestas en máquinas de fabricación aditiva.

1.2 Generalidades

Tras el auge de la fabricación de elementos mediante la impresión tridimensional, surgen a la par variadas propuestas para la mejora de aquel proceso. Es así que, con la implementación de una mayor cantidad de ejes de guiado mecánico, se planea lograr que nuevos sistemas mecatrónicos de impresión 3D sean más eficientes; debido a que mecanismos similares de adición de ejes pueden estar estrechamente relacionados con la optimización de deposición de material termoplástico o en la generación de piezas más resistentes a la tensión mecánica, deflexión o torsión que se les aplique, como se observa en los apartados 1.9.6 y 1.9.7.

Dentro de una impresora 3D, que se rija mediante la técnica de prototipado rápido FDM (Modelamiento por deposición de material fundido) o FFF (Fabricación por filamento fundido), existe un amplio campo de investigación, en donde, inquiriendo en modificaciones de la disposición habitual de su estructura, se puede alcanzar un gran beneficio, otorgando más GDL (grados de libertad) al prototipo, al usar desplazamientos angulares y/o rotacionales, que se sumen a los tres GDL que ya posee un sistema de robot cartesiano propio de la mayoría de impresoras 3D.

Un sistema de cinco ejes implementado para impresoras tridimensionales, es un tipo de tecnología que aún no se desarrolla completamente en el Ecuador. Pero se ha palpado que el mercado para la comercialización de maquinaria CNC de cinco ejes o más, ha evolucionado considerablemente en el campo de la manufactura, por su evidente optimización de procesos.

1.3 Definición del problema

En el Ecuador la impresión 3D es una tecnología que llegó hace pocos años, sin embargo, esta tecnología relativamente nueva para el país lleva en el mercado mundial desde mediados de los 80's con la creación del primer método de impresión, la Estereolitografía. En los años siguientes surgieron otros métodos de impresión 3D, entre ellos, el modelado por deposición fundida o FDM, por sus siglas en inglés, dicho método ha sido el más difundido debido a su versatilidad y bajo costo en la manufactura. (Stratasys, 2017)

Dentro de la mayoría de impresoras 3D que aplican el método de deposición de material fundido, se pueden notar ciertas debilidades como se detalla en el apartado 1.9.5 y que pueden estar relacionadas con la resistencia de las piezas fabricadas, la correcta utilización del material de apoyo, la precisión de impresión, etc. Sólo como ejemplo, la precisión se puede mejorar, disminuyendo la altura de la capa de impresión o utilizando una boquilla de diámetro más pequeño, sin embargo, el problema no se suple del todo. (Kalpakjian & Schmid, 2008)

De forma más concerniente al tema, el uso de material de apoyo actualmente se ha convertido en una necesidad imprescindible para en el proceso de impresión 3D

convencional, dado que la tecnología FDM usa material que al estar fundido se encuentra en un estado casi líquido de alta densidad, misma que necesita una estructura en la cual apoyarse hasta que se solidifique completamente, lo que hace que se generen gastos adicionales obligatorios, así como a veces también la implementación de un extrusor exclusivo para el filamento del material de apoyo.

En lo que concierne a otras desventajas frente al proceso de impresión 3D FDM convencional, es bastante lógico que, según como la evolución en la aplicabilidad del prototipado rápido avanza, mayores requerimientos en las capacidades físicas de las piezas fabricadas van apareciendo. Una de las más importantes, por no decir una imprescindible, es la resistencia mecánica del producto, que cada vez recibe mayores exigencias debido a las cargas mecánicas a las cuales se encuentra sometido según el campo de acción.

Con estos antecedentes vemos la necesidad de mejorar las tecnologías que actualmente ofrece el mercado a fin de, mediante las modificaciones necesarias, corregir ciertas debilidades presentes en modelos actuales de impresoras 3D de código abierto. Con las modificaciones dentro del sistema, es elocuente poder pretender una mayor eficiencia en el desempeño de la máquina que a la vez sea capaz de imprimir piezas de mayor calidad con menores gastos.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Diseñar e implementar un prototipo de impresora tridimensional de cinco ejes que aporte al ahorro de material y al mejoramiento de la resistencia mecánica en piezas fabricadas mediante el método de deposición de material fundido, en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE extensión Latacunga.

1.4.2 Objetivos específicos

- Indagar sobre distintos trabajos de investigación acerca de modelos de impresoras 3D que hayan implementado mejoras en hardware y software dentro del prototipado FDM, para la correcta modificación en la disposición de componentes.

- Plantear la mejor propuesta para la adaptación del mecanismo de sistema de guiado dinámico de cinco ejes en una impresora 3D base, para que su trabajo sea sinérgico, asimilando a la vez las limitaciones técnicas que se puedan presentar.
- Realizar la selección de alternativas y el rediseño estructural, en aspectos como la perfilería, rodamientos, correas, piezas de acoplamiento y transporte, actuadores, sensores, controladores, etc, para la adecuada funcionalidad del prototipo.
- Construir el prototipo basado en la mejor selección del modelo base de impresora 3D, junto con el nuevo mecanismo de guiado dinámico, para que el sistema en general sea pertinentemente adaptado con las modificaciones presentadas.
- Implementar los cambios adecuados dentro de la arquitectura del sistema de control, aplicando el firmware correspondiente para la interpretación programática de códigos de máquina generados con la nueva configuración de cinco ejes.
- Calibrar al prototipo de impresora 3D de cinco ejes, en búsqueda de irregularidades estructurales y para la corrección de errores en el escalamiento espacial de la pieza final fabricada.
- Verificar la optimización del nuevo proceso de impresión 3D, optando por ensayos mecánicos sobre la pieza fabricada y también mediante prácticas comparativas de ahorro de material, para la identificación de los niveles de mejora propuestos.

1.5 Justificación e importancia

Esta investigación está orientada fundamentalmente en el análisis del proceso de impresión tridimensional mediante la técnica de deposición de material fundido. Después de encontrar debilidades del proceso, se pretende, mediante modificaciones estructurales mecánicas y de control electrónico, optimizar dicha técnica de prototipado, con el fin de mejorar el desempeño de la máquina y la calidad del producto final, que en este caso es la pieza impresa.

El desarrollo del proyecto permitirá contribuir al estudio de propuestas para la implementación de nuevos sistemas mecatrónicos dentro de un prototipo de máquina de impresión tridimensional, para que las piezas fabricadas sean de mejores características físicas y el proceso se realice con menor gasto de material. De esta manera, contribuir al

campo de la manufactura de productos en donde se requiera de mayor resistencia mecánica.

Este estudio está orientado a la modificación de una impresora 3D “Open Source”, ya que suele ser de fácil adquisición o fabricación. El uso de esta tecnología innovadora permite al usuario modelar y modificar prototipos de manera rápida, fácil y económica, ya que debido al gran coste que tienen las impresoras industriales, éstas no son accesibles, además que dichas impresoras de código abierto, tienen la capacidad de ser auto replicables con el fin de que, en su momento se puedan seguir añadiendo mejoras.

1.6 Alcances y limitaciones

Como se tiene entendido, dentro de una máquina CNC su herramienta o mesa de trabajo están provistas de movilidad a lo largo de los 3 ejes convencionales (x, y, z), sin embargo, se da también la incidencia de las máquinas multieje en el campo de la manufactura, que han sido construidas con el propósito de realizar desplazamientos rotacionales alrededor de un eje convencional o de varios a la vez.

Para el caso, la inserción y adaptación de nuevos ejes al sistema habitual CNC, denota una optimización en varios aspectos técnicos. Por lo cual, el presente proyecto hace referencia a este aprovechamiento de mejora estructural, basada específicamente en el rediseño de una impresora tridimensional que aplique el método FDM.

Entonces, la impresora tridimensional tendrá un sistema dinámico de cinco ejes, que aproveche su disposición para:

- Ahorrar material al momento de fabricar determinada pieza con detalles que estén suspendidos en el aire, ya que ésta no estará obligada a adicionar apoyos respectivos de impresión.
- Mejorar la resistencia mecánica de la pieza impresa, debido a la deposición del material que se realizará mediante desplazamientos lineales, angulares o rotacionales, modificando el estilo común de orientación en el prototipado por capas de la tecnología FDM.

También en base a la mayor factibilidad de construcción e implementación de software de control; el sistema móvil adaptado se basará en la configuración de la mesa de trabajo o cama de deposición de material (configuración mesa/mesa) sin que el cabezal de impresión sufra mayores cambios.

Es concerniente recalcar que el proyecto al ser un prototipo en estudio, no dará cabida para una impresión de todo tipo de geometrías 3D, ya que una pieza con las características adquiridas de su fabricación en cinco ejes, independientemente de su modelamiento CAD, no tendrá la capacidad suficiente para ser traducida o interpretada por un software “Slicer” que genere el denominado “G-code” del elemento, ya que no existen aún programas de código libre como tal. Más de estas definiciones se ven en el apartado 1.11.

1.7 Antecedentes de la impresión 3D

1.7.1 Introducción al Prototipado Rápido

El surgimiento oficial de la tecnología de prototipado rápido llegó a mediados de la década de los 80, como un método rápido y de bajo costo para crear prototipos de productos industriales. En 1986 Charles Hull inventó y registró las patentes de una máquina de estereolitografía. Posteriormente Hull se convertiría en el cofundador de 3D Systems Corporation, una empresa a nivel mundial que perdura hasta el día de hoy.

A pesar de ser el primero, no fue el único en registrar su patente en aquellos años, en 1989 Carl Deckard patentó el primer proceso de prototipado rápido basado en sinterizado láser selectivo (SLS). Ese mismo año Scott Crump, cofundador de Stratasys Inc. presentó una patente para el proceso de modelado por deposición fundida (FDM), esta tecnología es una de las más populares hoy en día adoptada por la impresión 3D, y ha sido difundida aún más por el proyecto RepRap que implementa dicha tecnología en máquinas de código abierto. (All3DP, 2016)

1.7.2 Introducción al prototipado “Open source”

La fabricación de máquinas de prototipado rápido Open Source (código abierto), ha dado cabida a la creación de empresas dedicadas a fabricar impresoras 3D de bajo costo, basadas en el proyecto RepRap, como lo son “Bits from Bytes” en Bristol, “Fab@home”

y “Makerbot” Industries LLCC en Nueva York. Las impresoras de bajo costo tienen como objetivo principal, el que cada persona pueda tener su máquina y fabricar sus modelos 3D desde el escritorio de su casa.

Se espera que, en el futuro miles de impresoras 3D personales y de gama alta destinadas a la manufactura aditiva, sean esparcidas en todo el mundo para producir objetos en tres dimensiones. Para el 2012, la Agencia de Proyectos de Investigación Avanzada de los Estados Unidos tiene planeado implementar 1000 máquinas de prototipado rápido en escuelas secundarias en los Estados Unidos como parte de su programa de Experimentación y Enriquecimiento Manufacturero. (Wallich, 2011)

1.7.3 Breves rasgos de una impresora 3D

Una impresora 3D o máquina de fabricación aditiva es una máquina capaz de producir objetos y piezas de distintos materiales. Su cualidad principal es que, en lugar de retirar material de un bloque o emplear un molde, fabrica las piezas aportando material directamente sobre lo que va a ser el modelo final. Esto aporta una mayor flexibilidad a la hora de fabricar geometrías complejas y abarata los costes indirectos relacionados con moldes y herramientas. Su principio de operación general se describe en la Figura 1.

Existen numerosas tecnologías, que varían tanto en los materiales que usan como en el proceso que emplean para construir las piezas. Por ejemplo, pueden depositar plástico fundido con un cabezal o sintetizar un fotopolímero con ayuda de un haz láser. Gran parte de estas tecnologías se describen en el apartado 1.8.2. (Romero Sánchez, 2014)

1.8 Prototipado rápido

El prototipado rápido es un proceso en el cual se fabrican modelos de piezas 3D en base a la utilización de coordenadas matemáticas procesadas previamente por un software de tipo CAD/CAM, en donde se establece la forma geométrica y dimensional del producto, que luego puede ser escalado en el proceso de fabricación rápida.

En el proceso de prototipado rápido se utilizan materiales como plásticos, metales o cerámica, los mismos que mediante la unión aditiva conforman los prototipos deseados.

Caso contrario de otros sistemas de manufactura en donde se desbasta el material para llegar a la pieza resultante.

Resulta bastante beneficioso hacer uso del prototipado rápido, ya que se puede suprimir el uso de moldes en donde se inyecta el material u otros procesos de extrusión que implican mayores gastos; denotando que en el prototipado rápido se llegan a alcanzar similares propiedades físicas de la pieza fabricada, que en procesos aditivos de material como en el de inyección de plástico mediante moldes. (Maldonado Toro, 2012)

1.8.1 Principio de operación en el Prototipado Rápido

Ante los diversos sistemas que existen en los procesos de prototipado rápido, se puede observar una semejanza entre ellos gracias a su principio de operación, basado en la estructura que se presenta a continuación en la Figura 1.

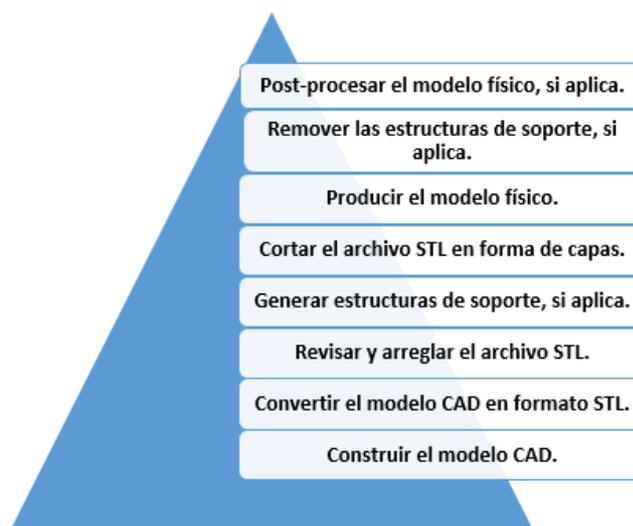


Figura 1. Pasos generales en el proceso de Prototipado Rápido.

Fuente: (Liou, 2007)

1.8.2 Tecnologías de Prototipado Rápido

Las tecnologías de prototipado rápido pueden agruparse en varias clasificaciones, pero preponderantemente las encontramos en dos grandes grupos; siendo estos los de operación sustractiva y los de aditiva, que representan procesos en donde se quita o se añade material respectivamente, para llegar a la fabricación de la pieza requerida. Esta gran clasificación se ve resumida en la Figura 2.

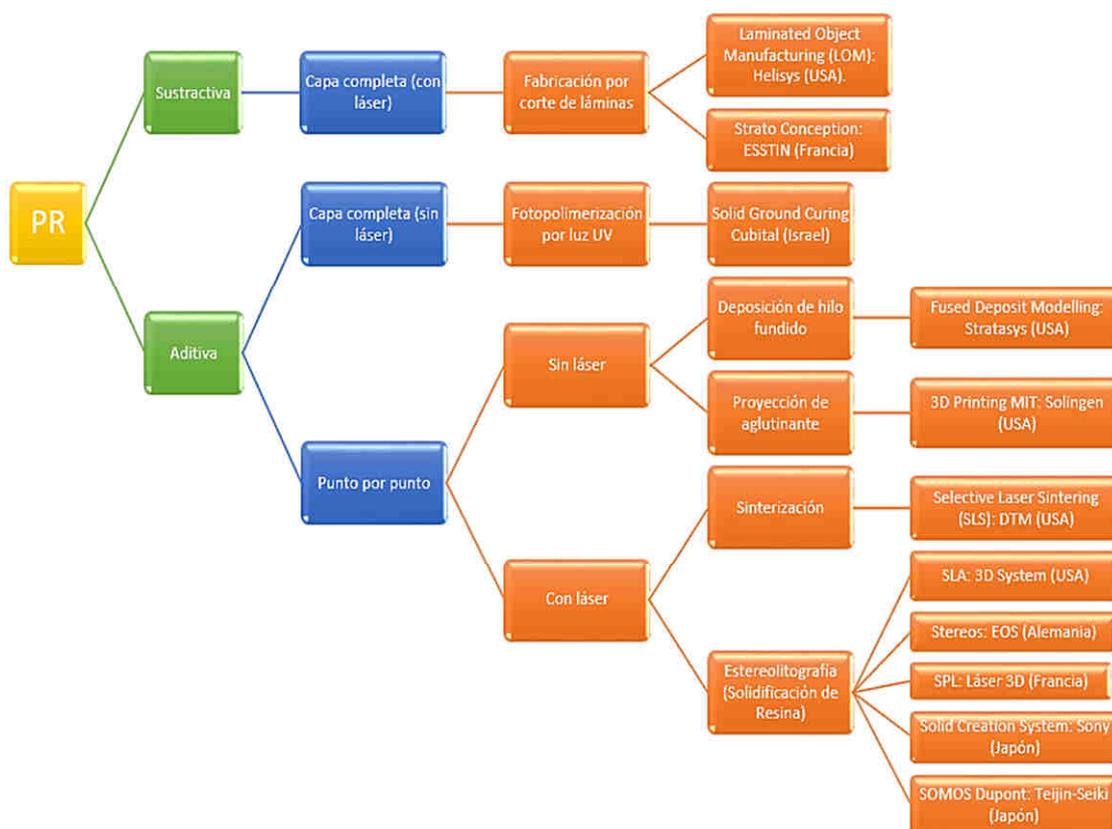


Figura 2. Clasificación de las principales tecnologías de Prototipado Rápido

Fuente: (Kalpakjian & Schmid, 2008)

Para una breve, pero mejor descripción acerca del prototipado rápido como proceso general de donde se desprenden varias tecnologías de manufactura mundial, resulta importante conocer la definición de las que más guardan una estrecha relación con la tecnología que rige esta investigación. Es así que según (Alonso Rodríguez, 2015) las tecnologías de prototipado rápido que construyen las formas sólidas a partir de la superposición de capas horizontales más difundidas en la actualidad son:

- **Estereolitografía (SLA):** Emplea un láser UV que se proyecta sobre un baño de resina fotosensible líquida para polimerizarla. También la podemos encontrar con la denominación de STL.
- **Fotopolimerización por luz UV (SGC):** Al igual que en la estereolitografía, esta tecnología se basa en la solidificación de un fotopolímero o resina fotosensible. En la fotopolimerización, sin embargo, se irradia con una lámpara de UV de gran potencia todos los puntos de la sección simultáneamente.

- **Deposición de hilo fundido (FDM):** Una boquilla que se mueve en el plano XY horizontal deposita un hilo de material a 1°C por debajo de su punto de fusión. Este hilo se solidifica inmediatamente sobre la capa precedente.
- **Sinterización selectiva láser (SLS):** Se deposita una capa de polvo, de unas décimas de mm, en una cuba que se ha calentado a una temperatura ligeramente inferior al punto de fusión del polvo. Seguidamente un láser CO2 sinteriza el polvo en los puntos seleccionados.
- **Fabricación por corte y laminado (LOM):** Una hoja de papel encolado se posiciona automáticamente sobre una plataforma y se prensa con un rodillo caliente que la adhiere a la hoja precedente.
- **Proyección aglutinante (DSPC):** Esta tecnología trabaja mediante la deposición de material en polvo en capas y la ligazón selectiva del mismo mediante la impresión de "chorro de tinta" de un material aglutinante.

1.8.3 Modelado por deposición de material fundido (FDM)

La tecnología de prototipado rápido usada para el proceso de impresión tridimensional en esta investigación, la cual ofrece los beneficios y las garantías requeridas para el cumplimiento de los objetivos pertinentes, como se verá posteriormente, es la de modelado por deposición de material fundido o simplemente para términos de licencia libre, se la llama Fabricación de Filamento Fundido (FFF).

En el proceso de modelado por deposición fundido (FDM, Fuel Deposition Modelling), una cabeza extrusora de material termoplástico o cera, controlada por un robot colgado en un puente, se mueve en dos direcciones principales sobre una mesa. La mesa se mueve para la dirección restante, formando así las tres dimensiones. El material extruido sale por un pequeño orificio de un dado calentado.

La capa inicial se deposita sobre una base, extruyendo el filamento a velocidad adecuada mientras la cabeza del extrusor sigue una trayectoria predeterminada. Cuando se termina la primera capa, la mesa o el cabezal se mueven un nivel para que se puedan sobreponer las capas siguientes. Una representación gráfica del mecanismo que se utiliza dentro del proceso FDM se ve reflejado en la Figura 3.

Las capas que deposita una máquina FDM se determinan por el diámetro del dado extrusor; en forma característica, varían entre 0.50 y 0.10 mm. Este espesor representa la mejor tolerancia alcanzable en dirección vertical. En el plano XY, la precisión dimensional puede ser tan fina como 0.025 mm siempre que el filamento pueda extruirse y formar el detalle determinado. (Kalpakjian & Schmid, 2008)

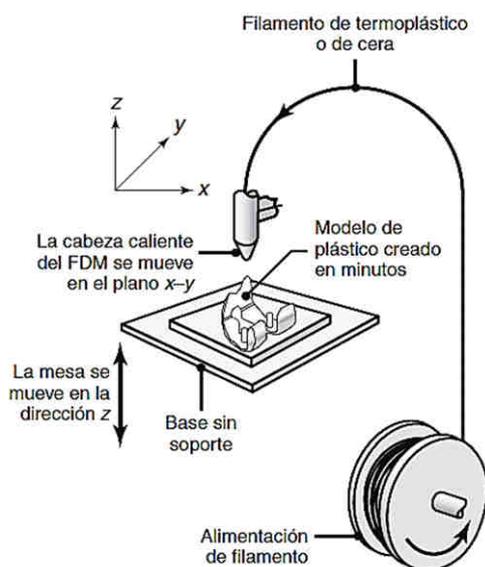


Figura 3. Esquema del proceso de modelado por deposición de material fundido.

Fuente: (Kalpakjian & Schmid, 2008)

a. Beneficios FDM

FDM es un proceso de impresión 3D limpio, fácil de usar y bueno para la oficina. Las piezas de termoplástico pueden resistir la exposición al calor, químicos, entornos húmedos o secos y tensión mecánica. Los materiales de soporte solubles hacen posible producir geometrías complejas y cavidades que hubiera sido difícil construir con los métodos de fabricación tradicionales.

FDM construye modelos de conceptos, prototipos funcionales y piezas de uso final en termoplásticos estándar, de grado de ingeniería y alto rendimiento. Es la única tecnología de impresión 3D profesional que usa termoplásticos de grado de producción, así es que las piezas no tienen rival en fortaleza mecánica, térmica y química. (Stratasys, s.f.)

b. Objeto de estudio FDM

Las impresoras 3D que ejecutan la tecnología por deposición fundida (FDM), fabrican los objetos capa a capa, por medio de un inyector que funde y extruye el filamento según las coordenadas del objeto a imprimir.

La tecnología por deposición fundida (FDM), en algunos objetos requiere el uso de dos materiales para llevar a cabo el trabajo de impresión: material de impresión, que corresponde al objeto terminado, y el material de soporte, que actúa como estructura de la pieza a imprimir. El extrusor transmite el filamento de plástico a la boquilla de impresión, esta se mueve en dos ejes X, Y, y a su vez va depositando el material sobre la plataforma de impresión, el eje Z se desliza hacia abajo cada vez que va a empezar la siguiente capa de impresión. (Romero Barreno & Vaca Morales, 2015)

c. Debilidades FDM

Un examen cuidadoso de una pieza moldeada por deposición de fundido indica que existe una superficie escalonada en los planos exteriores oblicuos. Si esta rugosidad de la superficie es indeseable, se puede usar una herramienta caliente para alisarla, o se puede aplicar un recubrimiento, que con frecuencia es una cera para pulir.

Aunque algunas máquinas de FDM se pueden conseguir desde 30000 dólares, otras llegan a costar hasta 150000 dólares. La principal diferencia entre ellas es el tamaño máximo de las partes que pueden producir. (Kalpakjian & Schmid, 2008)

1.9 Impresoras 3d

Dentro del mundo de la impresión 3D se distinguen dos principales corrientes, las impresoras profesionales y las de código abierto, las primeras son usadas por industrias para probar los prototipos de los productos que se encuentran en diseño, por otro lado, las de código abierto cumplen una función similar, pero a una escala mucho menor por lo que no son factibles para usarlas a nivel industrial.

1.9.1 Impresoras 3D profesionales

Dentro de la muy amplia gama de impresoras 3D profesionales disponibles en el mercado mundial, vamos a citar unas pocas, cabe destacar que dichas impresoras varían

en su precio dependiendo de varios factores, como el acabado, la precisión y el volumen de impresión, por tanto, mientras más grande sea una impresora 3D, mayor será su costo.

En la Figura 4 se pueden observar tres modelos reconocidos de impresoras 3D comerciales de carácter industrial y de la misma forma en la Tabla 1 se puede apreciar la descripción y comparación de las principales especificaciones técnicas dispuestas para cada impresora 3D industrial tratada en el presente apartado.

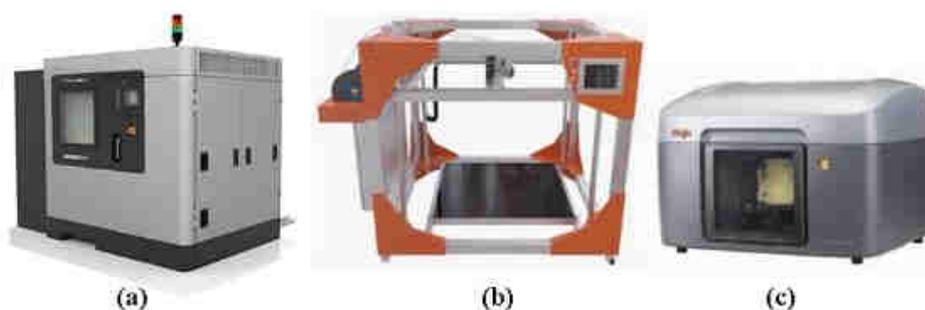


Figura 4. Modelos de reconocidas impresoras 3D profesionales

a) Fortus 900mc b) BigRep ONE c) Mojo

Fuente: (Stratasys, 2017) (BigRep, 2016) (IMPRIMALIA 3D, 2016)

a. Fortus 900mc

La Fortus 900mc es una de las más grandes y potentes del mercado, de la mano de Stratasys Inc. esta impresora 3D ofrece resistencia, durabilidad y una alta fiabilidad. El precio de la máquina se encuentra rodeando los \$400000 (Ver Figura 4).

b. BigRep ONE

La BigRep ONE v3 de la marca alemana BigRep GmbH (Ver Figura 4) es una de las impresoras de mayor volumen de trabajo ya que fue creada para prototipado a gran escala, a pesar de esto, es una de las más rápidas si consideramos dicho volumen, su precio en el mercado es de alrededor de \$40000.

c. Mojo

Mojo es una de las impresoras 3D más asequibles concebidas por Stratasys Inc., es rápida y puede imprimir modelos en nueve colores, es compacta y potente (Ver Figura 4). Su precio en el mercado ronda los \$10000.

Tabla 1.**Especificaciones técnicas de las impresoras 3D industriales tratadas**

	Fortus 900mc	BigRep ONE	3D Mojo
Volumen de impresión (mm³)	914x609x914	1005x1005x1005	127x127x127
Resolución de capas (micrones)	178 – 330	150 - 400 400 – 900	178
Extrusor	Dos cabezales de extrusión	Dos cabezales de extrusión	Un sólo cabezal
Métodos de fabricación	FDM – FFF	FDM - FFF	FDM - FFF
Materiales imprimibles	ABS, Termoplásticos de Stratasys	BigRep PLA, BigRep Pro HT, BigRep PETG	ABS plus
Materiales de soporte	ST-130	BigRep PVA	Soluble SR-30
Peso aproximado	2869 kg	500 kg	27 kg
Tamaño (mm)	2772x1683x2027	1850x250x1725	630x450x530
Potencia	230 VAC (three phase) 50/60Hz, Current 40A	208 V - 240 V 16A 50/60 Hz	100-127 VCA, 6 A, 60 Hz o 220-240 VCA, 2,5A, 50 Hz
Certificados de seguridad	Homologación CE	Homologación CE	CE/TUV/KCC/RoHS/WEEE

Fuente: (IMPRIMALIA 3D, 2016) (BigRep, 2016) (Stratasys, 2017)

1.9.2 Impresoras 3D de código abierto

Como pudimos apreciar anteriormente las impresoras profesionales tienen características únicas, sin embargo, su precio es bastante elevado, debido a esto surgieron las impresoras 3D “Open source”. Dichas impresoras usan software libre y facilidad ante fabricación o cualquier modificación de hardware, con el fin de ser más económicas que las profesionales y que no se degrade el principio de operación. Con trabajo basado en estos ideales se ha estructurado el proyecto RepRap.

1.9.3 El Proyecto RepRap

El proyecto RepRap (Replicating Rapid-prototyper) fue concebido por el Dr. Adrian Bowyer, profesor de la universidad de Bath en Reino Unido, quien propuso sus conocimientos de prototipado rápido junto con la técnica de modelado por deposición fundida para crear la primera máquina auto replicable de bajo costo. El objetivo del proyecto RepRap es hacer uso del software libre y de código abierto para que cualquier otro investigador pueda modificar, mejorar y contribuir a al desarrollo de esta tecnología.

Dada esta característica del uso de código abierto y software libre, es fácil encontrar en internet los diferentes modelos CAD concebidos por el proyecto RepRap, estos son descargables e imprimibles. Gracias a esto el proyecto ha sido difundido a nivel mundial teniendo una gran acogida, la cual se puede distinguir en la Figura 5, en donde se representa la aceptación popular de compañías de impresión 3D. (Vera García, 2012)

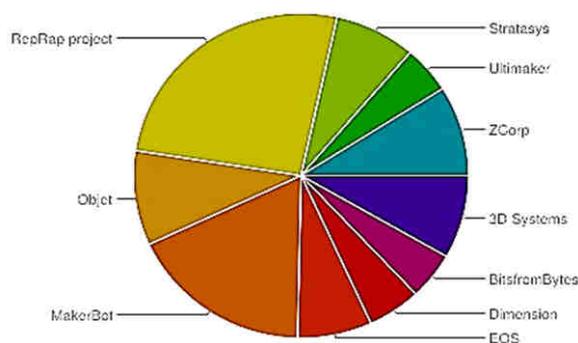


Figura 5. Mercado principal de fabricantes de impresoras 3D

Fuente: (RepRap, 2016)

El primer modelo dentro del proyecto RepRap fue la impresora 3D Darwin, la que fue concebida en 2007, a partir de esta han surgido muchas modificaciones, como lo es el modelo Mendel, lanzado en 2009, seguida en años posteriores de la Prusa Mendel, Prusa i3, P3Steel, entre otras.

Al contar con licencia GNU GPL, el proyecto permite copiar, estudiar, distribuir y mejorar sus diseños y código fuente. Debido a esto muchas otras impresoras 3D que no pertenecen al proyecto se han visto beneficiadas con las contribuciones de diferentes desarrolladores, entre ellas se tiene la PrinterBot y la Ultimaker, mismas que también son libres. (Valero, 2015)

1.9.4 Modelos RepRap

Como se ha mencionado la licencia de código abierto GNU GPL permite hacer modificaciones en el código fuente de la máquina, debido a esto existe una gran variedad de modelos en el proyecto, aquí se citan tres de los más famosos dentro de RepRap (Ver Figura 6). En la Tabla 2 se muestran las principales características de los modelos citados.

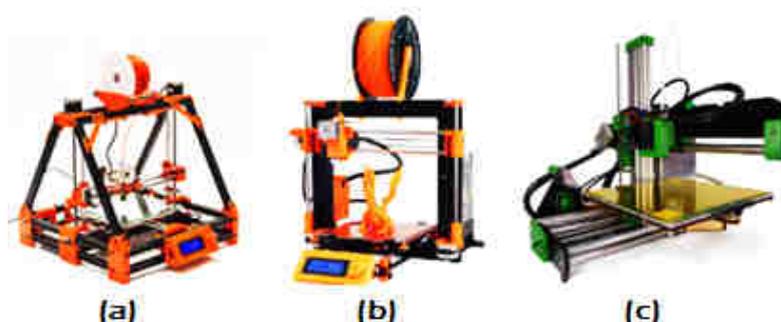


Figura 6. Modelos de impresoras 3D populares dentro de RepRap

a) Mendel b) Prusa I3 c) Ormerod 2

Fuente: (ReprapBarcelona, 2013) (RepRap, 2015) (RepRapPro, 2017)

a. Mendel

La impresora 3D Mendel es una de las primeras en aparecer, es compacta, lo suficiente para caber en la mesa de escritorio, pero capaz de imprimir objetos de gran volumen. La impresora está construida con partes que se pueden adquirir localmente o mediante internet y partes que son fácilmente imprimibles (Ver Figura 6). (López, 2012)

b. Prusa I3

La Prusa I3 es un diseño nuevo de impresora 3D que incorpora mejoras aprendidas a partir de diseños anteriores Prusa, así como mejoras de otros diseños modernos. Su estructura consiste en un eje Y hecho con varillas roscadas similar a la Mendel, y un marco vertical para los ejes X y Z (Ver Figura 6).

c. Ormerod 2

La impresora 3D Ormerod 2 es derivada de código abierto del proyecto RepRap, es versátil, de bajo costo y de fácil ensamblaje. Su modelo cartesiano varía un poco del resto de modelos del proyecto por su disposición en voladizo (Ver Figura 6).

Tabla 2.

Especificaciones técnicas de impresoras 3D RepRap tratadas

	Mendel	Prusa i3	Ormerod2
Costo (USD)	520	300-1000	500 - 700
Tamaño (mm)	500x400x360	420x420x380	500x460x410
Peso	7 aprox	6.5 aprox	6.5 aprox
Controlador electrónico	RAMPS 1.4	RAMPS o Sanginololu	Duet, cualquier versión
Volumen de impresión (mm³)	210x190x140	200x200x200	200x200x190
Materiales soportados	PLA, HDPE, ABS y más. Usa filamentos de \varnothing 3 mm.	PLA, ABS, PET, HIPS, Flex PP, Ninjaflex, Nylon, etc.	PLA, ABS. Termoplástico de 1,75 mm de diámetro
Motores	5xNema17 Stepper	5xNema17 Stepper	4xNema17 Stepper
Altura de capa (mm)	0.0125mm	Desde 50 micras	0.1 mm - 0.5mm

Fuente: (RepRap, 2015) (RepRap, 2015) (RepRapPro, 2017)

1.9.5 Problemas en impresoras 3D de código abierto

Las impresoras 3D FDM no pueden fabricar estructuras en otra disposición como voladizos extremos, ya que sería incompatible durante la construcción. Si estos no se pueden evitar, se puede solucionar con una **estructura de soporte** extra fina que se puede añadir en el objeto, que puede ser cortado después de que el proceso de impresión 3D termine. En la Figura 7 se puede visualizar el uso de la estructura de soporte implementada en una pieza impresa.



Figura 7. Uso de material de apoyo en pieza impresa.

Fuente: (Dominguez Sánchez, 2015)

Gran cantidad de softwares de tipo “Slicer” o de corte, que se describen mejor en el apartado 1.11.2, pueden crear automáticamente tal estructura de soporte. La mayoría de las impresoras 3D manejan generalmente voladizos de hasta 45° sin ajustes especiales.

El modelo 3D debe ser girado con el fin de reducir al mínimo las partes con una saliente (antes de usar software de corte), y un ventilador puede ser orientado a la pieza durante la impresión, para enfriar el filamento tan pronto como sea que sale de la boquilla, antes de que tenga la oportunidad de caer y arruinar la impresión. En la Figura 8 se refleja la ausencia tanto de material de apoyo como de adecuada ventilación, frente a la repercusión que se tiene de acuerdo a cuanta elongación tenga la pieza impresa.

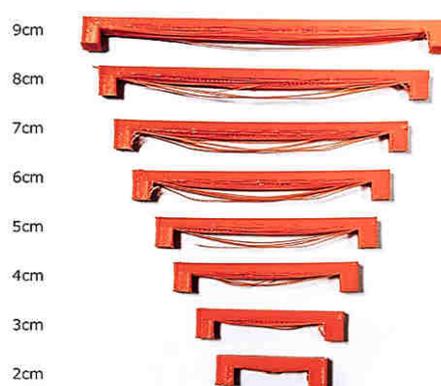


Figura 8. Impresión 3D de voladizo sin los debidos apoyos ni refrigeración

Fuente: (Ikaslab, 2015)

Por último, si bien es cierto que el uso de material de apoyo se puede activar gracias al software de corte, si es necesario, pero esto puede causar una gran molestia, debido a que el proceso utiliza más plástico, tarda más en imprimir y el usuario tiene que limpiar el material de apoyo con una cuchilla después. (Moreno Gerena, 2014)

En otro aspecto que es de la **resistencia mecánica** de la pieza impresa, es cierto que la flexibilidad del proceso en general presenta muchas soluciones, pero éstas aparecen sobre todo a nivel de impresoras profesionales, que es en donde al material inicial se le pueden añadir cargas que ayudan a tener una mejor resistencia.

En las impresoras 3D no profesionales ese tipo de refuerzo no se puede conseguir, quedando limitadas a la resistencia del ABS y del PLA. Aunque se puede aumentar su

rigidez al aumentar el grosor de las paredes, evitando ángulos rectos y sobre todo orientando a la pieza correctamente (al depositar el material verticalmente capa a capa, la resistencia sobre el eje vertical de una pieza siempre será menor que sobre el eje horizontal, como se puede observar en la Figura 9), en muchas ocasiones se verá que se sigue teniendo un prototipo funcional, pero no una pieza real. (Dominguez Sánchez, 2015)

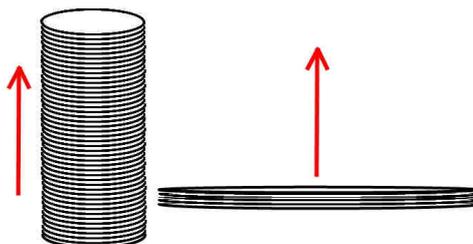


Figura 9. Piezas impresas en 3D más resistentes

Fuente: (ENTRESD, 2017)

1.9.6 Solución al problema de material de apoyo en impresora 3D

Como se pudo constatar anteriormente, un problema de alto rango de prioridad de una máquina de deposición de material termoplástico actual, es la manera en la cual se produce el deslizamiento vertical de dicho material que constituye a una estructura en voladizo. Como se mencionó, se utiliza otra estructura denominada “de apoyo”, que estabiliza a toda la pieza para que la misma no se desmorone por la gravedad.

Ahora, como se puede apreciar esta técnica es válida, pero así mismo existe mayor uso de material de fabricación, mayor tiempo que utiliza la máquina en el proceso de impresión y, sobre todo, el molesto post-procesado para quitar el material en exceso, que inclusive a la larga puede causar más falencias en las geometrías de la pieza final.

Ante todo esto, existe la posibilidad de utilizar distintos mecanismos dentro de la impresora tridimensional, para brindar movilidad al cabezal o a la mesa de trabajo, de tal manera que se vaya depositando correctamente el material a favor de la fuerza de gravedad, es decir, que el laminado de impresión de la pieza se coloque en una orientación tal, que la máquina sea la que rote, buscando una mejor posición para la pieza fabricada, descartando el molesto uso de material de apoyo.

1.9.7 Solución al problema de resistencia mecánica en impresora 3D

Como se ha podido analizar en la Figura 9, la orientación en la cual se encuentre el eje de expulsión de material va a ser de fundamental ayuda para que una pieza sea más difícil de destruir ante algún factor externo, ya que la superficie afectada por aquella fuerza destructiva va a estar escalonada o no, de acuerdo a la dirección en la que las capas de impresión hayan sido fabricadas.

Dicho de otra forma, las láminas superpuestas de impresión son más fáciles de desmoronar si se imprime desde un solo ángulo de incidencia. Es por aquello que surge la idea de controlar la orientación en la cual se van depositando las capas de impresión, haciendo que éstas sean entrecruzadas por sí mismas para evitar el efecto de escalonamiento regular. Esto se puede conseguir otorgando más ejes a la máquina.

Las láminas prácticamente están siendo tejidas entre sí, provocando un mayor “agarre” entre las mismas y promoviendo a la entrega de mayor resistencia mecánica en la pieza impresa, independientemente de que en esta se haya modificado el grosor de capa externa o se hayan añadido chaflanes en vez de ángulos rectos en la disposición geométrica.

1.10 Características mecánicas y electrónicas

1.10.1 Estructuras más empleadas para impresoras 3D

a. Impresoras 3D de estructura robot cartesiano

En (Eivar, 2009) se menciona que, en un robot cartesiano, ya sea este de tipo bóveda, pórtico o en voladizo; sus primeras tres articulaciones son del tipo prismático, proporcionando un espacio de trabajo en forma cúbica.

En un robot cartesiano hay tres ejes ortogonales, situados a lo largo de los ejes x, y, z de un sistema de coordenadas cartesianas como se aprecia en la Figura 10. Las posiciones de las articulaciones son por lo tanto idénticas a las coordenadas de la posición del efector final, haciendo que este robot sea de los más sencillos de controlar. En la actualidad es la estructura más utilizada para el diseño de impresoras 3D, por su versatilidad para alcanzar los diferentes puntos en el espacio.

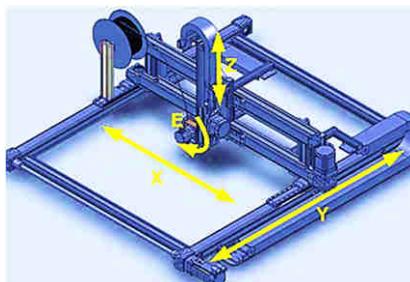


Figura 10. Ejes cartesianos interpolados y eje rotativo sincronizado

Fuente: (Interempresas.net, 2014)

b. Impresoras 3D de estructura robot delta.

Como se menciona en (Movytech, 2013), el término "robot delta" se refiere a un diseño que utiliza un conjunto de tres brazos metálicos que se deslizan a lo largo de 3 columnas y confluyen en el efector final, que en el caso de las impresoras 3D es el extrusor.

Para controlar el movimiento de lo que será la impresión, tal como se observa en la Figura 11, se debe mantener la orientación plana de la terminal de agarre. En otras palabras, la impresora puede mantener el movimiento de arriba hacia abajo con tres brazos, de esta forma se puede posicionar al cabezal de extrusión en el espacio 3D, a diferencia de un tradicional X, Y. Para que el sistema de control de eje Z, esté diseñado para usarse sin motor y esté vinculado a un solo eje.

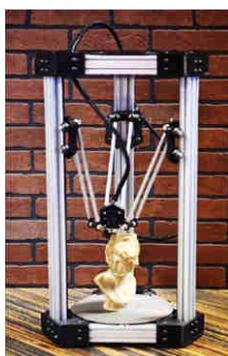


Figura 11. Impresora 3D robot delta

Fuente: (Movytech, 2013)

c. Impresoras 3D de estructura polar Theta

Una impresora 3D polar presenta un funcionamiento similar al de un tocadiscos antiguo como se dice en (Menetray, 2013) y así los objetos se imprimen en un plato giratorio.

Cada extrusor puede estar en el extremo de un brazo que gira. El plato giratorio se denomina eje Θ ("theta") y el brazo oscilante se llama eje R.

Introducir cuatro extrusores en un modelo cartesiano haría que no sólo la impresora consumiese mucha energía, sino que la impresión de cada pieza se ralentizase. En (HWlibre, 2014) se menciona que dicho problema se ha solucionado gracias al uso de coordenadas polares. Por un lado, el plato giratorio dónde se sitúa "la cama caliente", es lo que se conoce como la coordenada Theta, que da el nombre a la impresora y una coordenada R que se materializa gracias a un brazo oscilante. A continuación, en la Figura 12 se puede observar un modelo de impresora 3D polar de la marca POLAR 3D.

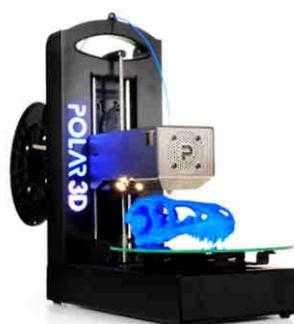


Figura 12. impresora 3D de estructura polar

Fuente: (POLAR3D, 2017)

1.10.2 Materia prima para la impresión tridimensional

Según se dice en (Bejarano, 2013), la materia prima más utilizada para hacer funcionar a las impresoras 3D son los plásticos ABS (acrilonitrilo butadieno estireno) y los PLA (ácido poliláctico), llamados termoplásticos por su capacidad para fundirse a altas temperaturas. Dicha característica es imprescindible para la impresión en tres dimensiones, ya que el material debe ser expulsado a través de una boquilla en forma de filamento. Al contacto con el aire se produce un enfriamiento repentino que convierte al plástico en estado sólido. En la Figura 13 se puede visualizar como es la presentación de venta para el filamento de PLA y ABS.



Figura 13. Carretes de material para impresoras 3D

Fuente: (REPLICANT 3D, 2016)

1.10.3 Hardware principal en impresoras 3D

a. Componentes imprimibles y no imprimibles

Para construir una impresora de características generales, se necesita de dos tipos de componentes. Por un lado, se encuentran los que se denominan imprimibles y por otro lado los no imprimibles.

Los imprimibles, son las piezas que sostienen y forman a la estructura de la impresora. Se los denomina imprimibles porque pueden adquirirse fabricándolos con otra impresora 3D. Aun así, existe la posibilidad de conseguirlas comprándolas a diversos proveedores, o si se cuenta con los medios adecuados, mecanizarlas haciéndolas, incluso, con otros materiales que no sean de plástico.

Los no imprimibles, los cuales se detallarán posteriormente en el análisis de alternativas del capítulo 2, son todo tipo de varillas, tornillos, tuercas, arandelas, clemas, componentes electrónicos, actuadores (motores), sensores (finales de carrera), etc., que se requiere para el montaje de la máquina. (Illescas, 2012)

b. Extrusor de material termoplástico

Es una parte mecánica que lleva asociada un motor paso a paso. Es el encargado de extruir el filamento dentro del “Hot End” o extremo caliente y este último es en donde se funde el filamento plástico para ser expulsado controladamente. En la Figura 14 se pueden observar los elementos descritos y su disposición en una impresora 3D.

Se puede distinguir entre dos tipos de extrusión:

- **Extrusión directa:** El Hot End está empotrado en el propio extrusor. El filamento de plástico por tanto recorre muy poco espacio entre el extrusor y el Hot End. Esto

permite un control muy preciso sobre el plástico extruido que se traducirá en una buena calidad de la pieza final. En la extrusión directa, el extrusor está colocado en la impresora sobre una parte mecánica llamada carro, que se desplaza al menos en un eje (en el X) o incluso en dos (X e Y).

- **Extrusión con cable “Bowden”:** En este tipo de extrusión, el extrusor está alejado del Hot End; suele estar colocado sobre la estructura de la impresora, inmóvil. Así el filamento irá guiado, desde el extrusor hasta el Hot End por un tubo hueco de un material inextensible, llamado Bowden. Es exactamente el mismo mecanismo que usan las bicicletas para llevar los cables de acero de los frenos (en este caso desde el manillar hasta las zapatas). (Rodríguez García, 2014)

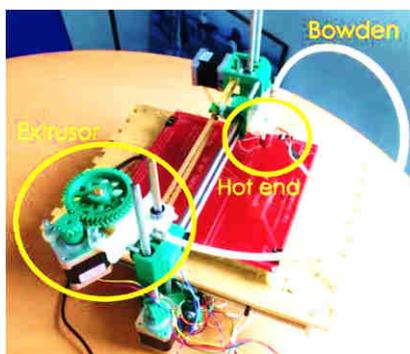


Figura 14. Impresora 3D utilizando extrusión Bowden

Fuente: (Rodríguez García, 2014)

c. Tarjeta controladora y drivers de motores PaP

Uno de los componentes fundamentales o de mayor importancia en una impresora 3D es la tarjeta de control, ya que como su propio nombre indica, es la encargada del control de la impresora. Recibe los comandos de los movimientos a través de un puerto USB. Un microcontrolador los interpreta y genera las señales necesarias para mover los motores, calentar el Hot End y leer la señal de los sensores. En definitiva, es el “cerebro” de la impresora 3D.

En ella pueden existir componentes electrónicos de potencia y de control, dependiendo si se facilita tener las dos etapas en la misma placa. Así mismo para el control de los motores paso a paso se necesita de drivers que limiten la corriente de acuerdo a lo

requerido y estos de la misma forma pueden estar dentro o fuera de la placa electrónica principal.

Existe una gran variedad de tarjetas de control (open hardware) disponibles para impresoras 3D. Todas ellas tienen una estructura parecida y contienen componentes muy similares. Aun así, es posible diferenciar unas placas de otras atendiendo a los variados criterios de diseño de la impresora tridimensional y sus requerimientos. (Rodríguez García, 2014, pág. 72)

d. Motores PaP

Los motores paso a paso (Figura 15) son ideales para la construcción de mecanismos en donde se requieren movimientos muy precisos. La característica principal de estos motores es el hecho de poder moverlos un paso a la vez por cada pulso que se le aplique. Este paso puede variar desde 90° hasta pequeños movimientos de tan solo 1.8° , es decir, que se necesitarán 4 pasos en el primer caso (90°) y 200 para el segundo caso (1.8°), para completar un giro completo de 360° .

Estos motores poseen la habilidad de poder quedar enclavados en una posición o bien totalmente libres. Si una o más de sus bobinas están energizadas, el motor estará enclavado en la posición correspondiente y por el contrario quedará completamente libre si no circula corriente por ninguna de sus bobinas.

El Principio de funcionamiento de estos motores es básico, estos motores están constituidos normalmente por un rotor sobre el que van aplicados distintos imanes permanentes y por un cierto número de bobinas excitadoras en su estator. Las bobinas son parte del estator y el rotor es un imán permanente. Toda la conmutación (o excitación de las bobinas) debe ser externamente manejada por un controlador. (Mecafenix, 2017)



Figura 15. Motor Paso a Paso

Fuente: (Mecafenix, 2017)

e. Finales de carrera

Dentro de los componentes electrónicos, se encuentra el final de carrera o sensor de contacto (también conocido como "interruptor de límite") o "limitswitch", son dispositivos eléctricos, neumáticos o mecánicos situados al final del recorrido de un elemento móvil, como por ejemplo dentro de la trayectoria de una cinta transportadora, con el objetivo de enviar señales que puedan modificar el estado de un circuito.



Figura 16. Sensor de final de carrera

Fuente: (Paletos de la Electrónica, 2015)

En la Figura 16 se observa la estructura externa de un sensor de final de carrera, que es algo simple, en cambio su estructura interna puede contener interruptores normalmente abiertos (NA o NO en inglés), normalmente cerrados (NC) o conmutadores, dependiendo de la operación que cumplan al ser accionados, de ahí la gran variedad de finales de carrera que existen en el mercado. Los finales de carrera están fabricados en diferentes materiales tales como metal, plástico o fibra de vidrio. (Vera García, 2012)

1.11 Software de impresión 3D

1.11.1 Modelado CAD

Para poder imprimir un objeto, necesitamos primero tener un modelo virtual del mismo, para esto existen varias alternativas de software CAD, mediante sus herramientas podemos modelar casi cualquier figura que podamos imaginar. Existen varias alternativas de software, la decisión sobre cuál utilizar depende del grado de complejidad de la pieza, la complejidad de interacción del programa e incluso de la propia experiencia del usuario.

Los diferentes programas en el mercado varían en cuanto a su precio desde aquellos que son de código abierto o gratuitos, hasta programas pagados cuyo precio suele ser bastante elevado dependiendo de la potencia de modelado y de las herramientas que posea. Como

lo dice (Horvath & Cameron, 2015) “En su mayor parte, los programas de código abierto ofrecen una extensa documentación disponible para su descarga gratuita. Los programas de software propietarios suelen ofrecer capacitación o tienen ayuda disponible.”

Una de las características que deben tener estos programas es la capacidad de exportar el archivo a formato STL. La Tabla 3 muestra una lista de los softwares más conocidos para modelamiento 3D.

Tabla 3.

Softwares de modelado 3D

Nombre	Costo/Licencia	Interface	Dificultad	URL
Autodesk Inventor	Pagada Niveles	GUI	Alta	latinoamerica.autodesk.com
SolidWorks	Pagada	GUI	Alta	www.solidworks.es
Blender	Open Source	GUI	Alta	www.blender.org
SketchUp	Libre(limitada) Pagada (V Pro)	GUI	Media	www.sketchup.com
FreeCAD	Open Source	GUI	Media	www.freecadweb.org
ThinkerCAD	Libre(limitada) Pagado(Niveles)	Web	Baja	www.tinkercad.com
OpenSCAD	Open Source	Text	Baja*	www.openscad.org

*Requiere aprender el lenguaje y funciones de librería

Fuente: (Bell & Cameron, 2014)

1.11.2 Software CAM

Dado que la impresora 3D no puede tomar un modelo 3D realizado en alguno de los programas de la Tabla 3 (Softwares de modelado 3D) e imprimirlo, es necesario el uso de un software que traduzca el modelo 3D al lenguaje de máquina, en este caso el controlador que la impresora posea. Para esto, existen softwares CAM para la generación de códigos G el cual determinará el funcionamiento de la impresora.

Estos programas son conocidos comúnmente como “Slicer”, debido a que separan el modelo CAD 3D en múltiples capas 2D, es importante que dicho software tenga presente las características físicas de la impresora a ser usada, así como también la geometría del

objeto 3D. En la Tabla 4 se resumen algunos de los softwares más usados para impresión 3D. (Horvath & Cameron, 2015)

Tabla 4.

Softwares CAM para rebanado o corte

Software	Nivel	Precio	Sistemas operativos	URL
Cura	Principiante	Gratis	PC, Mac, Linux	https://ultimaker.com/en/products/cura-software
CraftWare	Principiante	Gratis	PC, Mac	https://craftunique.com/craftware
Netfabb Basic	Avanzado	Gratis	PC, Mac, Linux	http://www.autodesk.com/products/netfabb/overview
Repetier	Avanzado	Gratis	PC, Mac, Linux	https://www.repetier.com/
Simplify3D	Profesional	\$149	PC, Mac, Linux	https://www.simplify3d.com
Slic3r	Profesional	Gratis	PC, Mac, Linux	http://slic3r.org

Fuente: (All3DP, 2016)

1.11.3 Código de máquina

El funcionamiento dinámico de una máquina de control numérico computarizado (CNC), está reflejado en el proceso de traducción entendible por la máquina, de un lenguaje llamado código de máquina o lenguaje G-code, el cual transformado, representa el diseño CAD del usuario. El presente lenguaje forma la base de la comunicación con las máquinas CNC.

El lenguaje G-code está basado en un sistema de coordenadas mediante un formato específico. Este código le informa a la máquina a donde debe mover la herramienta (cabezal de impresión) y el trabajo a realizar en cada punto que recorre. Originalmente y en su forma más general, el código es escrito como N (número de una secuencia, 001 - 100+), G (funciones preparatorias), eje X, eje Y, eje Z, entre otros ejes, F (velocidad de avance) y M (funciones variadas). (Airaldi, Antúnez, & Lamath, 2015)

1.11.4 Firmware de impresión 3D

Al hablar del firmware de una máquina de impresión 3D, nos referimos a un programa informático que está compuesto de un conjunto de instrucciones y que se encuentra

estructurado mediante una lógica de bajo nivel, la misma que es procesada para ejecutar comandos hacia un sensor o actuador dentro de la impresora 3D. Es por esto que se considera al firmware como un nexo entre el hardware y el software.

El firmware se manifiesta como parte de la electrónica, pero está desarrollado en un lenguaje de programación y se presenta como un grupo de instrucciones que se graban dentro de una memoria no volátil como ROM (Read Only Memory, memoria de sólo lectura), EPROM (Erasable Programmable ROM, ROM programable borrable) o memoria flash, estableciéndose como la lógica de más bajo nivel de un dispositivo, capaz de controlar los circuitos electrónicos. (Guías Prácticas.COM, 2017)

Para el desarrollo de las líneas de comandos que serán procesados dentro de la tarjeta controladora, es elocuente que se utilice la ventaja del software basado en código abierto para poder ser modificado sin demasiadas restricciones. A continuación, se enlista las versiones más populares de firmware dentro del proyecto RepRap, que corresponden al desarrollo de código abierto:

- Sprinter
- Teacup
- DC42
- SJFW
- Marlin
- Aprinter
- Redeem
- Smoothie
- GRBL
- Sailfish
- Repetier

Cada tipo de firmware está estructurado con diversos comandos y funciones programáticas y esto representa una amplia gama de características de funcionalidad para su respectiva disposición de elementos mecánicos y electrónicos dentro de la impresión tridimensional.

a. Marlin

Este código se implementa en lenguaje C++ y su objetivo va más allá de la realización del control de los movimientos. Implementa también la comunicación con la máquina, el control de temperatura del extrusor y de la heated bed (superficie de impresión), manejo de un display, etc.

b. Sprinter

Está escrito mayormente en lenguaje C++, pero posee un porcentaje importante en C. Al igual que Marlin realiza el manejo general de la máquina.

c. Teacup

Al igual que en los casos anteriores apunta al manejo general de la máquina. Su implementación se llevó a cabo en lenguaje C que se enfoca en la eficiencia, flexibilidad y de código limpio.

d. Replicator G

Es un firmware realizado a partir de Sprinter cuya versión 0.91 se lanzó el 30/12/2013. Se implementa parcialmente en C++ y C. Efectúa varias de las mismas características que los anteriormente mencionados. (REP RAP, 2017)

e. DC42

Este firmware, aplicado especialmente para ser interpretado dentro de tarjetas electrónicas de tipo Duet, utilizadas en impresoras 3D Ormerod, conjuga un sin número de características adecuadas para la fiable funcionalidad de la impresión tridimensional y sobre todo para aprovechar la flexibilidad en la implementación de dispositivos o periféricos de entrada y salida.

Es así que gracias a comandos dedicados al desarrollo de nuevas características de impresión y a las propiedades de la tarjeta Duet, se pueden controlar varios motores a pasos simultáneamente. Se tiene la capacidad de añadir múltiples drivers para un solo eje, así mismo la facilidad de conjugar el trabajo de varios sensores térmicos y también controlar el porcentaje de corriente nominal para la carga de filamento.

Dentro del software de interfaz web el firmware DC42 es compatible con las mejoras de la funcionalidad y su rapidez, de modo que cuando se instala el firmware de la tarjeta Duet, se instala también la última variante de la interfaz web. (David Crocker's Solutions blog, 2014)

1.12 Estado del arte

En Ecuador para los años 90's dentro de las industrias, sólo se contaba con maquinaria de tecnología sustractiva de máximo tres ejes; calidad de los sistemas que a partir de aquellos años fue evolucionando en razón de los beneficios que se han venido estudiando, hasta llegar a implementar sistemas CNC de mayor cantidad de ejes, especialmente de cinco.

Las impresoras 3D de extrusión tradicionales se han limitado a sus 3 ejes; X, Y y Z, lo cual limita también las geometrías de fabricación, así mismo resulta imposible la producción de piezas sin la utilización de material de soporte. Ciertos equipos de fabricación de 5 ejes se han combinado con la tecnología de impresión 3D. De esta forma, la combinación de la precisión de un sistema de mecanizado industrial junto con herramientas de 5 ejes, controlados por ordenador con tecnología de impresión 3D basada en extrusión, crea nuevas posibilidades de fabricación de aditivos.

1.12.1 Maquinaria DMG MORI

Alrededor del mundo se tienen varios modelos de maquinaria que aplican la tecnología aditiva y sobre todo que han sido adaptados mediante el sistema de cinco ejes para mayor eficiencia en el trabajo. Es el caso de DMG MORI, que ofrece al mercado dos máquinas híbridas realmente innovadoras: la Lasertec 65 3D y la Lasertec 4300 3D, las mismas que utilizan el intercambio de herramientas para la variación de funciones entre la deposición del material y el desbastado del mismo para mejores acabados.

La fabricación aditiva y la impresión 3D son una realidad que revoluciona procesos en múltiples campos y sectores de actividad. El claro ejemplo es la integración de deposición de láser y fresado de cinco ejes, como se ve en la Figura 17. El mecanizado de piezas obtenidas por procesos de adición en la misma máquina, es una tecnología emergente. (Interempresas, 2016)



**Figura 17. Integración de tecnología fabricada por DMG MORI
Soldadura de deposición láser y fresado de 5 ejes.**

Fuente: (Interempresas, 2016)

1.12.2 Centro autónomo de producción de ADD+PROCESS

IBARMIA ha decidido sumarse a esta tendencia, incorporando la adición por láser cladding a sus máquinas multiproceso de 5 ejes, dando luz a la familia ADD+PROCESS. En estas máquinas, una vez obtenida la geometría bruta por adición, las piezas son mecanizadas en la misma máquina. De este modo la máquina se convierte en un centro autónomo de producción, en el que desde nada se obtiene la pieza terminada, como se puede divisar en la Figura 18. (IBARMIA, 2010)



Figura 18. Máquina de fabricación aditiva y mecanizado ADD+PROCESS

Fuente: (IBARMIA, 2010)

1.12.3 Impresora 3D Enomoto

Por otro lado, Enomoto Kogyo está colaborando con la Universidad Shizuoka de Arte y Cultura y el desarrollador de software C & G Systems para construir la primera impresora híbrida 3D de 5 ejes de Japón. La impresora es capaz de realizar continuamente acciones de impresión en 3D, así como de fresado utilizando la tecnología de control industrial existente de 5 ejes.

Las impresoras convencionales [3D] son principalmente impresoras de laminación planas, pero esta máquina es capaz no sólo de laminación planar, sino también de laminación de 5 ejes. Normalmente, la subcotización no se puede realizar con el tipo de control de 3 ejes NC, pero con 5 ejes se añaden las funciones de inclinación y rotación. En otras palabras, el control se implementa para los ejes X, Y, Z, inclinación y rotación, y como resultado, podemos imprimir formas muy complejas, explicó el director del departamento de desarrollo de Enomoto; Kawamura Takehire.

La impresora 3D Enomoto de 5 ejes es especialmente adecuada para la fabricación y prototipado de prótesis y dispositivos de asistencia, implantes médicos y componentes de aeronaves o automóviles. Hasta ahora no ha habido indicación del costo final; sin embargo, se espera que esté disponible para su compra alrededor de 2017 una vez que la compañía haya evaluado muestras impresas y verificado la tecnología. (Grunewald, 2016)



Figura 19. Impresora 3D Enomoto de 5 ejes

Fuente: (Grunewald, 2016)

1.12.4 Máquina multiproceso 5AXISMAKER

También resulta preponderante tomar en cuenta a una empresa con sede en Londres denominada 5Axiswork, la cual espera cambiar las falencias de impresoras 3D convencionales con su nueva máquina de 5 ejes, llamada 5AXISMAKER. La máquina que es capaz de utilizar varios accesorios diferentes, incluye un extrusor de impresora 3D, un molino CNC, un cortador de alambre, una boquilla para chorro de agua y las extensiones adicionales que se agregarán posteriormente.

Hemos visto máquinas de fabricación de propósito múltiple antes, pero este modelo con 5 ejes, ofrece versatilidad sin precedentes en comparación con las plataformas de 3 ejes comunes en el mercado de hoy en día.

"Para mí parecer, por el momento, el aspecto más débil de las impresoras 3D de extrusión (FDM) es el acabado superficial que se obtiene", dijo un representante de la compañía 5Axiswork. Independientemente de la forma que imprima, siempre está estriada horizontalmente, y no importa cuán bien uno puede hacer el escalonamiento, creo que será obvia la causa sólo por la naturaleza del sistema de deposición de filamentos. Una impresora de 5 ejes, en mi opinión, podría terminar una impresión colocando una textura o un patrón sobre la superficie del modelo. Podría ser posible utilizar la estética del filamento para crear realmente algunos efectos superficiales bastante buenos. (Krassenstein, 2014)

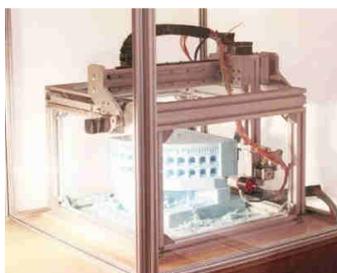


Figura 20. Impresora 3D "5axismaker"

Fuente: (Krassenstein, 2014)

1.13 Ventajas del uso de cinco ejes en la impresión 3D

Hace unos 20 años, las empresas se preguntaban por qué deberían cambiar de molinos manuales a CNC. El escenario para invertir en tecnología de mecanizado de 5 ejes es similar. Aquellos que no cambiaron a CNC finalmente se quedaron atrás. Con cualquier negocio, invertir en la última tecnología es un requisito para mantenerse en la cima y competir de manera efectiva.



Figura 21. Centro de mecanizado de cinco ejes

Fuente: (5AXIS.ORG, 2017)

Para este caso se hace referencia principalmente al beneficio que han tenido los centros de mecanizado (Figura 21), fresadoras y tornos al adoptar un sistema de 5 ejes. Al parecer hay confusión debido al término mecanizado de "5 ejes". Las empresas piensan que no necesitan de maquinaria que aplique este sistema, pero incluso si no tienen un trabajo simultáneo de 5 ejes, como con impulsores o turbinas, las piezas que estén produciendo en sus máquinas de 3 ejes serán más rentables y de mayor rendimiento cuando utilicen el mecanizado a 5 caras, como se verifica en la Tabla 5. (5AXIS.ORG, 2017)

Tabla 5.

3-ejes VS. 5-caras

Piezas en centro de mecanizado de 3 ejes	Piezas en centro de mecanizado de 5 ejes
Configuraciones múltiples para cada cara de la pieza	Reducción del tiempo de configuración.
Incremento del tiempo de configuración	Incremento de exactitud
Decremento de exactitud	Expansión de la capacidad de venta para un trabajo futuro

Fuente: (5AXIS.ORG, 2017)

1.14 Aplicabilidad de impresoras 3D de cinco ejes

1.14.1 Aplicaciones concernientes a la mejora en la resistencia mecánica

Se considera que la revolución de la impresión 3D nos ha beneficiado cuantiosamente, sin embargo, el auge de este tipo de tecnología acarrea también consigo una serie de necesidades que hacen que el campo del modelado y la fabricación 3D adquiera mayores propuestas de desarrollo en sus características técnicas; una es el mejoramiento de la resistencia en las piezas impresas.

La aplicabilidad de la impresión 3D es demasiada amplia, pero se conoce muy bien que se centra bastante en la creación de piezas que adquieren un alto nivel de resistencia mecánica; es el caso de las prótesis para tratamientos en la sustitución de órganos humanos, que de forma obvia requieren ser particularmente resistentes a la fractura.

Muchas piezas, por ejemplo, en la aviación, como se observa en la Figura 22, pueden ser impresas, siempre y cuando se considere que sean resistentes ante la concentración de

esfuerzos que se puedan sufrir en el efecto. Juguetes, esculturas y hasta joyas son creadas en la impresión 3D, que básicamente presentan la necesidad de constituir un elemento compacto y resistente para su aplicación frente al usuario.



Figura 22. Impresión 3D en la industria de la aviación

Fuente: (Mundo Empresarial, 2016)

Otros casos surgen en la fabricación de piezas de ingeniería, en donde la resistencia mecánica es uno de los parámetros fundamentales para la construcción de maquinaria, sin embargo, éstos no necesariamente tienen que ser fabricados de materiales ferrosos. Entonces ¿cuán fundamental puede ser que en la impresión de piezas 3D se tenga como garantía su resistencia mecánica?

1.14.2 Aplicaciones concernientes al ahorro de material de deposición

Como se conoce, la aplicabilidad de la impresión 3D tiene una mira muy ambiciosa a desarrollarse en lo que concierne a la fabricación de componentes relativamente grandes, es el caso de la construcción de casas o de puentes peatonales, como se ve en la Figura 23.



Figura 23. Puente en Ámsterdam mediante impresión 3D

Fuente: (CNET, 2015)

Ante lo descrito es evidente que se reflejaría una necesidad de descartar tanto material de impresión en el proceso de construcción, principalmente por el costo económico que aquello implicaría y también por el “post-procesado” para limpieza de material en exceso.

Llevando todo esto a un nivel más micro, pero que no deja de ser preponderante, está la cantidad de deposición de material con la cual se fabrican piezas con la disposición de elementos en voladizo, que según el mecanismo convencional de las impresoras 3D, ha estado optando por imprimirlos paralelamente con estructuras adicionales de apoyos que soporten a estos elementos y así el material no se derrame por la gravedad, pero esto implica mayor gasto del mismo.

La construcción, como por ejemplo de componentes de muebles, maquetas, esculturas, puede ser llevado al campo de la impresión 3D, sin la necesidad de que se estén fabricando apoyos paralelos para la disposición en voladizo que éstos presenten. Bastaría con voltear a la pieza y seguir imprimiendo a favor de la gravedad. Una iniciativa para optar por esta capacidad de impresión se encuentra en los garabatos tridimensionales generados mediante el proyecto “Lix 3D pen” como se ve en la Figura 24, sin embargo, se pierde demasiada precisión por efectos de factores humanos.

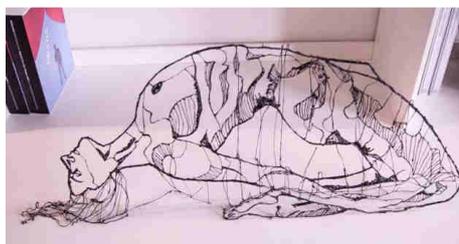


Figura 24. Arte real con el lápiz LIX de impresión 3D

Fuente: (REPLICA-T, 2017)

Todo esto se manifiesta en que proporcional al tamaño de las piezas impresas que se encuentran con elementos suspendidos en el aire, será el gasto innecesario de material en sus apoyos. Sin tomar en cuenta el tiempo que llevará quitar este exceso de material o el que se tomará en imprimirlo en sí. Por lo cual ¿Resulta preponderante el ahorro de material depositado en la impresión 3D?

CAPÍTULO II

DISEÑO Y SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS

2.1 Introducción

En el presente capítulo se analizan los factores que inciden en el criterio de diseño mecatrónico del prototipo, se toma en cuenta la base del desarrollo de la investigación en la selección del modelo de impresora 3D apropiado que debe ser reestructurado, para cumplir con la modificación de las nuevas características de funcionamiento. Se establecen las consideraciones para modelar, adaptar, implementar o conservar ciertos mecanismos de movimiento, en función de los requerimientos, alcances y limitaciones.

Se realiza un análisis preliminar de las opciones más propicias para los lineamientos técnicos de rediseño de la máquina, así como para la determinación de los subsistemas a modificarse y a conservarse, la validación para la estructura mecánica, para la disposición electrónica y para el conjunto de instrucciones de control que propicien a que todo funcione acertadamente de forma simultánea.

2.2 Características generales de selección

2.2.1 Técnica de Prototipado Rápido que fundamenta la investigación

Para iniciar, como se ha mencionado en las generalidades del proyecto y en el apartado 1.3, los modelos de maquinaria más accesibles dentro del mercado mundial actual y en centros de investigación para impresoras 3D, se basan en la técnica FDM, o lo que es similar, en la fabricación de filamento fundido; esto debido a su simple, pero versátil mecanismo de impresión, acompañado de los beneficios del soporte de código abierto, que brindan la factibilidad de adaptación o modificación de nuevos sistemas dentro del diseño de una impresora 3D.

Por lo tanto, para esta investigación se va a profundizar en el prototipado rápido basado en la técnica FDM o FFF, ya que de esta forma se podrán sustentar los alcances principales que se han venido visualizando y que se han planteado para el proyecto.

2.2.2 Distribución y licencias para hardware y software aplicado

Gracias a la amplia gama de características que nos regala el popular proyecto RepRap con su licencia tipo GPL (General Public License) y mediante su vasta gama de modelos desarrollados de impresoras 3D, se tiene una guía inmediata en la cual basarse; ya que aparte de utilizar una versión libre para los productos en hardware y software, se pueden hallar modelos que son destinados para la modificación y la mejora mecánica, electrónica y programática de sus componentes, en función de lo que el usuario requiera; lo cual también sustenta nuestro objetivo y satisface los requerimientos generales.

Nos resta como punto principal y basándonos en esta marca de certificación de propiedad abierta, realizar la selección de cuál de estos modelos dentro del proyecto RepRap es el más propicio para ser armado con relativa facilidad y posea la capacidad de ser modificado en su estructura de sistema de guiado, como se lo verá en el apartado 2.5.7.

2.3 Requisitos funcionales y de diseño general

El principal menester que surge en el diseño constructivo del prototipo físico de este proyecto, se encuentra determinado por el nivel de dificultad con el cual se le pueden adaptar ciertos elementos mecánicos al sistema de guiado de un modelo de impresora 3D que se seleccione previamente, es decir, cuan factible resulta montar y desmontar la estructura de esta máquina base, añadir o modificar la disposición de sus rieles o ejes y aditamentos correspondientes, para hacerla funcionar en conjunto con los nuevos cambios.

Por ende, se busca seleccionar un modelo de impresora 3D que posea un bastidor estructuralmente dispuesto de forma simple, que no deba sufrir mayores reajustes de diseño si se modifica una parte de dicha estructura y también se busca la disponibilidad de una fácil adaptación del sistema de control para un funcionamiento coordinado de cada subsistema. Los requisitos de selección de alternativas principales para el modelo base de impresora 3D se especifican en función de los siguientes parámetros (Navarrete & Chancusi, 2014):

- **Tipo de alimentación eléctrica:** 110 V AC
- **Tamaño de la máquina:** El tamaño de la impresora 3D base no es un parámetro implícito en el desarrollo de los objetivos, sin embargo, resulta elocuente relacionar estas dimensiones con un entorno casero o de oficina, ya que debe formar parte de un prototipo simple, mas no de características industriales. El tamaño ideal de una impresora 3D de oficina está alrededor de los 500x500x700 mm^3 , según rangos analizados.
- **Volumen de impresión:** El volumen de impresión no es de gran preponderancia de acuerdo a los objetivos y limitaciones, pues se manifiesta para este caso el análisis de resistencia mecánica de la pieza fabricada, mas no la dimensión que ésta deba poseer. Sin embargo, se toman las estimaciones de una máquina de ambiente de oficina con un aproximado de 200x200x200 mm^3 , según rangos analizados.
- **Material de extrusión:** El material de extrusión debe ser de filamentos de plástico ABS o PLA estandarizados y definidos por el modelo de impresora 3D que se seleccione previamente, pero en función de términos comerciales se tiene que un filamento comúnmente puede poseer 1.75mm de diámetro, para una impresión 3D de precisión regular.
- **Temperatura de trabajo:** La temperatura de trabajo viene establecida en función de las características del fundidor y del material de impresión que se seleccione, para este caso se puede especificar una temperatura alrededor de los 210°C, según el rango analizado de Hot Ends (calentadores) comerciales para PLA.
- **Estructura mecánica:** Estructura de fácil ensamblaje y que sea resistente a las vibraciones.
- **Tipo de software:** El software no debe ser privativo, es decir, debe poseer la marca de certificación de propiedad abierta y ser distribuido para cualquier usuario.

2.4 Selección de la disposición del sistema de guiado

2.4.1 Configuración de la disposición del sistema de cinco ejes.

Al llamar al presente prototipo como una impresora 3D de cinco ejes, se quiere decir que aparte de los tres ejes convencionales (X, Y, Z), se le añaden dos más, que tendrían

que ser en este caso rotacionales y/o basculantes, como se los puede divisar en la mayoría de maquinaria CNC de fabricación sustractiva. Como se describe en (SANDVIK AB, 2000) los ejes añadidos realizan una rotación alrededor de cada eje lineal respectivo y a estos se les denomina (A, B, C), tal como se puede distinguir en la Figura 25 y Figura 26.

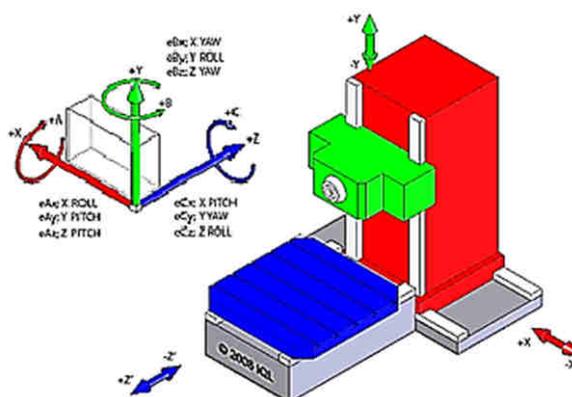


Figura 25. Configuración de disposición de ejes de una máquina-herramienta

Fuente: (Metalmecánica, 2010)

Inicialmente, dentro de las modificaciones más básicas a ser implementadas en el sistema de guiado multieje del prototipo de la impresora 3D, se tienen tres tipos de configuraciones más generales como lo ha descrito (Apro, 2008), estas configuraciones multieje se basan en la movilidad del cabezal de la impresora o de la mesa de trabajo, llamada en este caso, la cama de deposición del material. Estos tres tipos de configuraciones son los siguientes:

- Mesa/mesa
- Cabezal/mesa
- Cabezal/cabezal

Cuando se utiliza la configuración **cabezal/mesa**, además de que la mesa sea giratoria, se dispondrá del cabezal con un movimiento basculante, el mismo que en el caso de las impresoras 3D FDM, provocaría que el material pueda ser derramado o salpicado sobre el mismo Hot End o parte del bastidor, durante la ejecución del movimiento basculante. No existe documentación que sustente esta afirmación, pero existen desplazamientos más seguros para el caso. Así mismo adaptar un motor en el cabezal implica mayor rediseño.

Para la configuración **cabezal/cabezal**, se restringe de cualquier movimiento a la mesa de trabajo, provocando que el cabezal realice todos los movimientos, en este caso movimientos rotacionales y basculantes aparte de los lineales, ocasionando que se produzca similar problemática que en el anterior caso, pero con mayor magnitud.

Por lo tanto, como solución dentro de la configuración en la disposición del mecanismo giratorio basculante se tiene el sistema **mesa/mesa**, en donde por supuesto, la mesa es la que realiza todos los movimientos rotativos pertinentes, independientemente del movimiento que se pueda generar con el cabezal de la máquina.

Para este prototipo de impresora tridimensional de cinco ejes se decide entonces que se aplique el mecanismo de MESA/MESA, en donde se realizarán desplazamientos alrededor del eje Z (eje C) y alrededor del eje X (eje A), como se ve en la Figura 26.

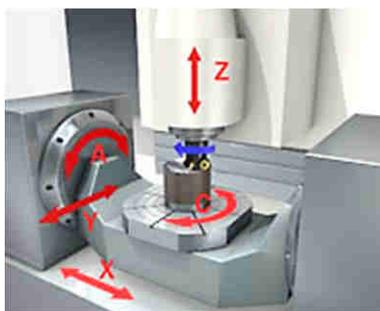


Figura 26. Disposición de 5 ejes, mesa con soporte giratorio

Fuente: (SANDVIK AB, 2000)

2.4.2 Selección de la disposición del sistema de guiado base

Las impresoras tridimensionales que aplican el método de prototipado FDM se dividen predominantemente en dos tipos de acuerdo a la configuración de sus ejes (apartado 1.10.1), ya sea esta de tipo Delta o de tipo Cartesiana, aunque existen también las de tipo Polar, que de hecho es una parte hacia donde apunta el proyecto, por lo cual este sistema debe ser adoptado, sin embargo, debe estar combinado con cualquiera de los dos anteriores también, para que sumados, junten los cinco grados de libertad que se han planteado.

Las **impresoras cartesianas** disponen de un movimiento relativamente simple de su herramienta y de su cama de deposición de material, ya que utilizan 3 ejes independientes para el efecto.

Las **impresoras de tipo Delta** utilizan una composición de movimientos en el sistema de guiado para el desplazamiento de la herramienta, sus rieles son verticales ante una disposición triangular de la estructura que baja y sube, transportando al cabezal de extrusión.

Tomado en cuenta las dos opciones citadas para la configuración dinámica que tendrá el mecanismo del prototipo, se puede observar que, en el caso de las impresoras cartesianas; controlar el tipo de movimiento de los ejes resulta más fácil ya que el desplazamiento se da de forma independiente. Todo lo contrario se puede percibir dentro de impresoras de tipo Delta, que describen un movimiento coordinado mucho más complejo de su sistema de guiado, lo cual implica mayor dificultad en el modelamiento matemático de la arquitectura del software de control ante las debidas modificaciones.

Entonces, aunque las impresoras de tipo Delta en la actualidad están siendo bastante utilizadas, gracias a su rápida capacidad de impresión, lo que mayormente satisface para este caso, es la capacidad que podría tener una impresora 3D para ser modificada, tanto en su software de control como en la distribución de elementos mecánicos, en donde la simplicidad de la disposición de dichos componentes sea evidente. Por tal caso se ha tomado en cuenta para el desarrollo de este proyecto una impresora 3D de configuración CARTESIANA.

2.5 Selección de impresora 3D base

En este apartado se trata de perfilar de una forma más específica las características que necesita la impresora 3D base, la misma que dicha de otras palabras, es la que se manifiesta como la máquina más propicia de donde partirá la investigación para la debida readecuación, en búsqueda de la adaptación del sistema de impresión de cinco ejes. Este análisis resulta más crítico, si se da una caracterización por etapas de trabajo que convergen en pequeñas divisiones estructurales, a las cuales se les denomina subsistemas.

2.5.1 Subsistemas dentro de impresoras 3D

Se puede apreciar una distribución de elementos que conforma la arquitectura de una impresora 3D, en la cual se presenta una coordinación sinérgica del ámbito electrónico, mecánico y programático para el correcto desempeño de la máquina, cada ámbito dispone

de una subclasificación de acuerdo a las características de trabajo, a estos se les llama subsistemas de funcionamiento.

Se ha generado la clasificación de subsistemas dentro de una impresora 3D, haciendo una síntesis de zonas de trabajo, como se han estudiado en proyectos de investigación en los que también se realizan modificaciones y mejoras en impresoras 3D como lo es en (Navarrete & Chancusi, 2014) y (Carabalí & Coral, 2016). Los subsistemas son los siguientes:

- Bastidor y sistema de guiado cartesiano
- Mecanismos de transmisión de movimiento
- Cabezal de extrusión (extrusor y Hot End)
- Plataforma base y cama de deposición (sistema giratorio basculante)
- Sistema electrónico
- Sistema de control (firmware y software en general)

2.5.2 Parámetros para aplicar en rediseño de impresora 3D base

Para establecer el modelo a utilizar de una impresora tridimensional, lo más indicado es analizar de dónde parte la necesidad y para qué se utilizará la máquina. Entonces cabe recalcar que el prototipo de la impresora 3D de cinco ejes, surge de la necesidad de suplir ciertas deficiencias en la fabricación de piezas impresas mediante el método cartesiano convencional, el cual, por su distribución uniforme de material en su deposición, tiende a adquirir zonas de menor resistencia mecánica, como se constata en el apartado 1.9.5.

Entonces, la adición de una disposición rotacional del sistema de guiado dentro de la máquina, como el que se utiliza en impresoras 3D polares, proporcionará un mejor mecanismo para evitar la superposición uniforme de material plástico, aportando también al ahorro de material al fabricar la pieza, usando movimientos multiaxiales y así dejando automáticamente redundante el uso de material de apoyo; como se analiza en los apartados 1.9.6 y 1.9.7.

Consecuentemente se ha propuesto que, para el mejor desempeño y aprovechamiento de recursos estructurales que tienen actualmente las impresoras 3D polares o los sistemas

CNC de mesa giratoria basculante, se podrían implementar modificaciones en el sistema de guiado convencional cartesiano, de tal forma que con una máquina multieje se puedan satisfacer las necesidades anteriormente descritas.

Las modificaciones de rediseño se basan en los parámetros descritos en este apartado, discutidos previamente con el tutor del proyecto y que conjuntamente con los requisitos de selección de alternativas principales para el modelo base de impresora 3D, se pretende implementar el correcto prototipo.

- **Bastidor y sistema de guiado:** El bastidor de la impresora 3D debe ser fácil de desmontar, debe ser fácil de rediseñar y capaz de ser adaptable a pesar de modificaciones estructurales. El sistema de guiado puede funcionar mediante ejes o rieles.
- **Mecanismos de transmisión de movimiento:** Los mecanismos de transmisión pueden conservarse como en la mayoría de sistemas de impresión, es decir, como polea-correa dentada y tornillo-tuerca. Sin embargo, para los nuevos sistemas giratorios hay que considerar un mecanismo de transmisión en donde se reduzca la longitud de arco por paso del motor.
- **Cabezal de extrusión:** La disposición de movimiento del cabezal de extrusión o del Hot End, va a mantenerse según la configuración de impresora a seleccionar como base. El sistema de extrusión puede conservarse de acuerdo al modelo de impresora 3D o puede ser adaptado de acuerdo a su disponibilidad en el mercado.
- **Plataforma base y cama de deposición:** La plataforma base debe ser fácilmente desmontable y a la vez mantener el equilibrio de la máquina y su resistencia en los apoyos. La cama de deposición debe ser fácil de ser sustituida o rediseñada en función de los nuevos parámetros de dinamismo rotacional.
- **Sistema eléctrico-electrónico:** El sistema eléctrico-electrónico debe ser adaptable para el soporte de todos los periféricos que se establezcan según el modelo de impresora 3D y también para los que se añadan conforme a las necesidades. Soporte para motores a pasos para cinco ejes más un extrusor, sensores de posición o finales de carrera, sensores de temperatura y calentador térmico. Ingreso de códigos G y visualización de interfaz web.

- **Sistema de control:** Sistema de impresión 3D adaptable para la configuración del reconocimiento de cinco ejes y con disponibilidad para la adición de nuevos dispositivos como sensores o actuadores.

Entonces el rediseño para la funcionalidad general que se pretende implementar al prototipo de impresora 3D de cinco ejes, que se describe aquí por estar estrechamente relacionado con la selección del modelo base de impresora 3D cartesiana, va a estar encaminado por los siguientes parámetros:

- Conservar la transmisión de movimiento lineal para el sistema de ejes cartesianos, según se estructure el diseño.
- Transmitir movimiento rotacional y/o angular mediante el mecanismo a implementarse (mesa giratoria basculante), según se estructure el diseño.
- Conservar la transmisión de potencia del mecanismo que permite el movimiento lineal del filamento de impresión que saldrá por el extrusor, y a la vez se mantendrá la regulación de la temperatura en el fundidor para que el material sea expulsado por el Hot End con las condiciones necesarias estipuladas en la técnica FDM.
- Permitir la lectura de memorias micro SD para la inserción del programa en códigos G del modelo digital a imprimirse, esto bajo software intérprete de instrucciones para los nuevos movimientos basados en cinco ejes.
- Controlar el sistema completo de impresión 3D de cinco ejes, de tal manera que el mecanismo aporte al ahorro de material y al mejoramiento de la resistencia mecánica de la pieza fabricada.

Conocidos los requisitos para selección del modelo de impresora 3D base y la orientación de los parámetros de rediseño del sistema de impresión final, se procede con la descripción de las alternativas de selección, haciendo un análisis en los campos principales; la electrónica, la mecánica y el control de la máquina.

2.5.3 Detalles de impresoras 3D opcionales para el modelo base

Se toma como propuestas para el análisis definitivo de la impresora 3D base, a los modelos del proyecto RepRap más sobresalientes y de mejores características en cuanto a buen trabajo y popularidad, con una arquitectura variada entre los mismos, pero apegados

todos a los requerimientos de diseño del proyecto, que se han detallado en el apartado 2.3, de tal manera que se logren sustentar los más relevantes criterios de selección acorde a los lineamientos de los requisitos de selección de alternativas principales para el modelo base de impresora 3D.

Estos modelos de impresoras 3D, que se examinan principalmente como opciones propensas para el rediseño hacia nuevos sistemas de optimización, se encuentran teóricamente mejor descritos en el apartado 1.9.4, y de esa información se realiza una síntesis de características técnicas para conjuntamente con los parámetros de los apartados 2.5.4-5-6 definir el criterio de selección.

a. Análisis de la alternativa impresora 3D Mendel

- Aunque es una de las impresoras 3D más populares, está entre las primeras en aparecer y por ende requiere de mayores actualizaciones.
- El precio estimado para conseguirla es de \$520. Su tamaño y peso es moderado y su estructura resulta ser medianamente fácil de modificar.
- Puede caber en la mesa de un escritorio por su compacidad y sus partes pueden ser fabricadas con facilidad.

b. Análisis de la alternativa impresora 3D Prusa I3

- Es un modelo relativamente nuevo de impresora 3D, por lo tanto, lleva adaptada muchas mejoras. Su eje Z es reforzado con varillas roscadas a los dos lados, similar al modelo Mendel, esto es bueno para la estabilidad de la estructura, sin embargo, la hace más difícil de ser desmontable y modificable.
- Sus piezas plásticas pueden ser fabricadas con otra impresora y el costo total de la máquina se encuentra rodeando los \$800.
- Tiene muy buena precisión y su tamaño y peso es de regulares características.

c. Análisis de alternativa impresora 3D Ormerod 2

- Es versátil y sobre todo de fácil ensamblaje, debido a su modelo cartesiano que varía un poco de los demás modelos RepRap ya que adopta la estructura tipo voladizo.

- Su costo está entre los 500 y 700 dólares, o una fabricación válida de sus piezas plásticas desde otra impresora.
- Su tamaño es compacto y su peso es relativamente menor a los anteriores modelos por poseer menor cantidad de elementos de ensamblaje

2.5.4 Parámetros a considerar en ámbito mecánico del modelo base

Tabla 6.

Características de estructuras de soporte para impresoras 3D.

Tipo de bastidor	Ventajas	Desventajas
Estructura cerrada	Volumen de trabajo cerrado; ayuda a la insonorización y al aislamiento térmico. Previene de cualquier factor externo que pueda afectar a la impresión 3D.	Mayores costes de fabricación y modificación. Mayor dificultad a la hora de mantener a la base de forma totalmente horizontal. Eje Z debe ser más robusto.
Estructura en pórtico único	Menor uso de material en su construcción, implica menores costes. El eje Y mueve la base y los ejes X y Z el extrusor, que es lo que se busca en esta investigación.	Volumen de trabajo abierto, la insonorización y el aislamiento térmico no son posibles. La capacidad de ser modificable es medianamente concebible.
Estructura en voladizo	Puede ser desmontable o modificable con mayor facilidad. Requiere de menor material para su construcción por lo tanto abarata costos.	No trabaja bajo un ambiente controlado. Se puede generar vibración tras no poseer más soportes fijos con la estructura vertical.

Fuente: (Armada Pita, 2015)

Mediante la anterior descripción, expuesta en la Tabla 6, se puede asimilar en primer lugar que el tipo de bastidor con estructura cerrada queda totalmente descartado por la dificultad que posee éste de ser modificado y por la misma manera poseer mayor cantidad de elementos para su construcción.

Por otro lado, se encuentran las estructuras más simples, que son la de pórtico único representada por la impresora 3D Prusa I3 y también se expone a una de mayor simpleza aún, que es la de bastidor en voladizo representada por la impresora 3D Ormerod 2. Como se puede observar en la Tabla 6, ésta última requiere de una menor cantidad de elementos y material para ser construida y completamente de mayor facilidad para ser ensamblada en relación de todas las anteriores opciones.

2.5.5 Parámetros a considerar en el ámbito electrónico de modelo base

Tabla 7.

Principales tarjetas electrónicas utilizadas en proyecto RepRap

Placa	SAV-MKI	Sanguinololu	RAMPS	RAMBO	RUMBA	DUET 0.8.5
Extrusor	1	1	2	2	3	2
Ventilador	3	3	6	3	2	2
EndStop	4	3	3	6	6	3
Sensor °C	2	2	6	4	4	4
CPU	8bits AT90USB 1286	8bits ATmega644P	Arduino ATmega 2560	ATmega2 560/32u2	ATmega2 560/16u2	Atmel SAM3X8E
Velocidad (MHz)	16	16	16	16	16	84

Fuente: (Armada Pita, 2015, pág. 40)

Entonces según la capacidad de soporte de dispositivos que tiene cada tarjeta electrónica en función de los requerimientos del proyecto de investigación y gracias a la información que se expone en (Romero Sánchez, 2014), se puede realizar un análisis de la cantidad de drivers disponibles para motores dentro de las principales tarjetas controladoras RepRap que han sido nombradas en la Tabla 7.

- **RAMPS:** Placa de expansión para Arduino Mega basada en los drivers Pololu A4988. Puede controlar hasta 5 drivers y 3 sistemas térmicos independientes. Adicionalmente posee muchos pines de expansión que pueden ser usados para incorporar funciones adicionales.

- **Sanguinololu:** Se trata de una electrónica similar a la RAMPS aunque basada en la placa base Sanguino, un clon de Arduino. Es capaz de mover 4 drivers.
- **GEN 7:** Este modelo de electrónica no es comercial pero sus esquemas de montaje se encuentran en internet bajo licencias libres. Está diseñada para controlar 4 drivers, aunque su diseño puede ser modificado para controlar más.
- **SAV MKI:** Se trata de un modelo similar a la Gen 7, aunque diseñado en España. Los esquemas de montaje se encuentran disponibles y su diseño original sólo admite 4 drivers.
- **RUMBA:** Se trata de un modelo que puede albergar hasta 6 drivers incorporados en la misma placa y hasta 3 sensores de final de carrera, acompañados de los debidos calentadores y termistores propicios para ser usados en una impresora 3D actual.
- **DUET 0.8.5:** Es una placa electrónica propicia para impresoras 3D y sistemas CNC, en donde se encuentran incorporados los drivers de motores Pap. Esta tarjeta puede controlar hasta 4 drivers, pero gracias a su expansión llamada Duex4 se pueden añadir 4 drivers más, con sus respectivos sensores de final de carrera.

Se ha podido observar en la Tabla 7 y en el enlistado un recuento de complementos y elementos de funcionamiento para cada una de las tarjetas más populares utilizadas dentro del proyecto RepRap.



Figura 27. Tarjeta Duet 0.8.5 junto con expansión Duex4

Fuente: (RepRap, 2017)

Dentro del análisis se debe tomar en cuenta que la tarjeta RAMPS es mayormente usada dentro de la máquina Prusa I3, la tarjeta RUMBA o la GEN7 dentro de la impresora 3D Mendel, o la tarjeta electrónica DUET 0.8.5 (Figura 27) dentro de la máquina Ormerod 2. Siendo esta última la que más drivers para motores PaP posee y que brinda la mejor aplicabilidad para el proyecto. Este aspecto definitivamente es considerado y se lo analiza en la selección de alternativa de tarjeta de control electrónico en el apartado 2.5.7.

2.5.6 Parámetros a considerar en el ámbito de control de modelo base

El prototipo que se realiza está orientado a la integración de equipos electrónicos y mecánicos, los mismos que deben tener una estrecha relación para que funcionen coordinadamente, esta relación es de tipo programática, la cual representa una estructura mediante comandos de control que inducen a que cada proceso sea efectuado en el debido momento.

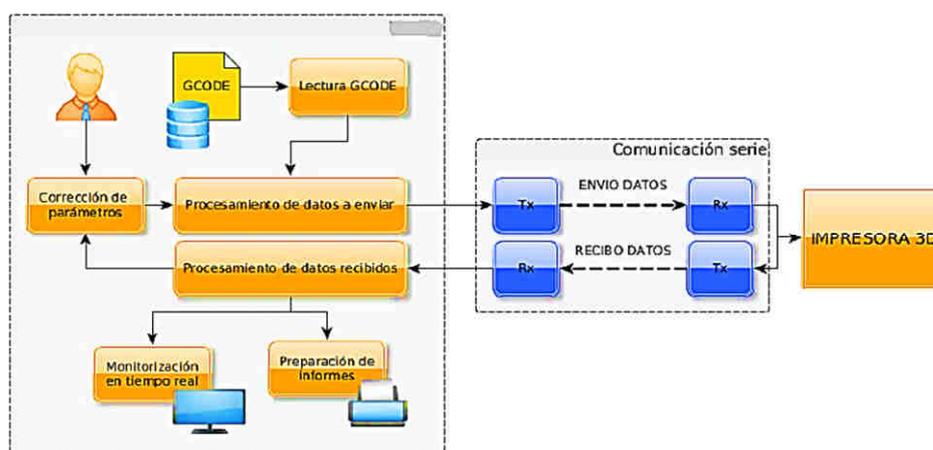


Figura 28. Diagrama de bloques del modo SCOPE

Fuente: (Romero Sánchez, 2014, pág. 21)

Existe una cantidad de operaciones estipuladas para la fabricación de una pieza mediante la técnica FDM, tal como se identifican en la Figura 1, pero así como se puede divisar por simple percepción varios pasos para llegar a dicho objetivo, existen otros procesos que no se vislumbran fácilmente, ya que se encuentran de forma interna en la arquitectura de control de la máquina; específicamente como instrucciones para la comunicación entre dispositivos y para la generación de operaciones en la impresión 3D.

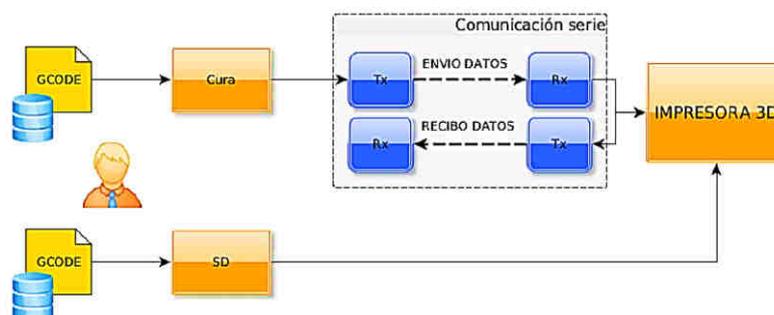


Figura 29. Diagrama de bloques del modo STANDARD

Fuente: (Romero Sánchez, 2014, pág. 22)

Como se ha podido observar en la Figura 28 y Figura 29, existen generalmente dos modos para la configuración del sistema de control de una impresora 3D, el modo STANDARD que es usualmente utilizado para impresoras dentro del mercado y el modo SCOPE, que tiene relación con parámetros más avanzados de control como se explica en (Romero Sánchez, 2014).

Para el presente proyecto, el modo de control al que se debe pretender, debe ser aplicado con la mayor sencillez posible y en donde se registre un monitoreo básico de los parámetros inmiscuidos en el proceso de impresión tridimensional.

Es por ende que el modelo de control STANDARD es el más adecuado y el que mayormente se encuentra en las impresoras 3D convencionales para que sirva de base, en donde el usuario deba cargar el archivo de instrucciones de códigos G de cinco ejes, ya sea mediante una tarjeta micro SD o desde una interfaz web mediante comunicación serie, para que la máquina pueda interpretar las operaciones. El archivo de códigos G de cinco ejes debe ser estructurado mediante el análisis manual o de un software especial.

2.5.7 Criterio final de selección de modelo de impresora 3D base

Para un mejor criterio de selección de alternativas, donde no sólo se requiere del sentido lógico de esta investigación, se adoptará la técnica de la normativa ISO 10004, estructurada en un análisis porcentual de cinco niveles para hallar la respuesta definitiva a un cuestionamiento de varias opciones. Cada nivel posee un significado conjuntamente con la escala de ponderación, como se puede visualizar en la Tabla 8. (Cifuentes, Izurieta, & Faria, 2013)

Tabla 8.**Ponderaciones para selección de alternativas (Norma ISO10004)**

PUNTUACIÓN	% ÓPTIMO	INTERPRETACIÓN
0	< 35	Insatisfactorio
1	36 – 50	Poco satisfactorio
2	51 – 75	Medianamente satisfactorio
3	76 – 90	Satisfactorio
4	91 - 100	Muy satisfactorio

Fuente: (Cifuentes, Izurieta, & Faria, 2013)

Entonces, para la selección definitiva del modelo base de impresora 3D de donde se partirá el análisis de rediseño para este proyecto, se han tomado varios parámetros esenciales para que el modelo a elegir sea el más apto del caso.

Tabla 9.**Selección de alternativa de modelo base de impresora 3D**

Criterios de selección	Mendel	Prusa I3	Ormerod 2
Características generales	2	3	3
Ámbito mecánico	2	3	4
Ámbito electrónico	3	3	4
Ámbito de control	3	3	3
TOTAL	10	12	14

Los modelos base se han planteado en función de impresoras 3D de renombre y de fácil adquisición. Posteriormente se ha realizado un recuento de características en el ámbito mecánico, eléctrico y de control; en donde el modelo más propicio y por ende el seleccionado ha sido la máquina ORMEROD 2 (Figura 30 y Anexo A-1), ya que ha sobresalido satisfactoriamente dentro del análisis de todos los requerimientos de este proyecto, como se verifica en la Tabla 9.

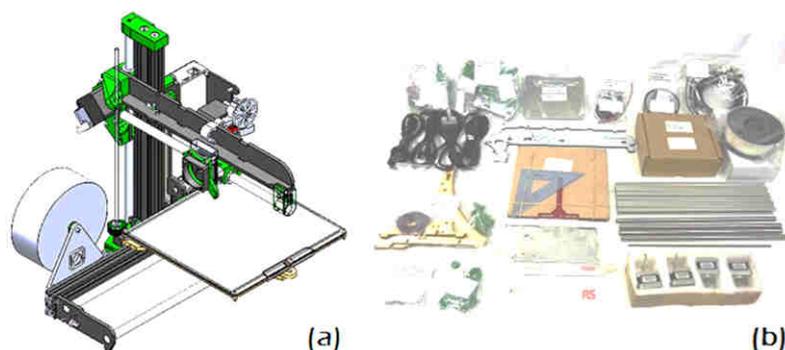


Figura 30. Impresora Ormerod 2 como modelo base de investigación
a) Modelo CAD de impresora 3D Ormerod 2 b) Elementos originales de Ormerod 2
fabricados por RS Components

Fuente: (RS Components, 2017)

2.6 Subsistemas dentro del modelo base seleccionado

2.6.1 Subsistemas para ser conservados

a. Estructura de soporte o bastidor de la impresora 3D

Tal como se ha podido observar en la Tabla 6, gracias a la sencillez relativa de ensamblaje que brinda una estructura en voladizo, además de que puede estar compuesta de una menor cantidad de elementos, en función de los modelos más comunes de robot cartesiano, se cree conveniente que la disposición de la estructura debe conservarse lo más apegada que se pueda al modelo original, el mismo que se visualiza en la Figura 31, con su descripción de elementos.

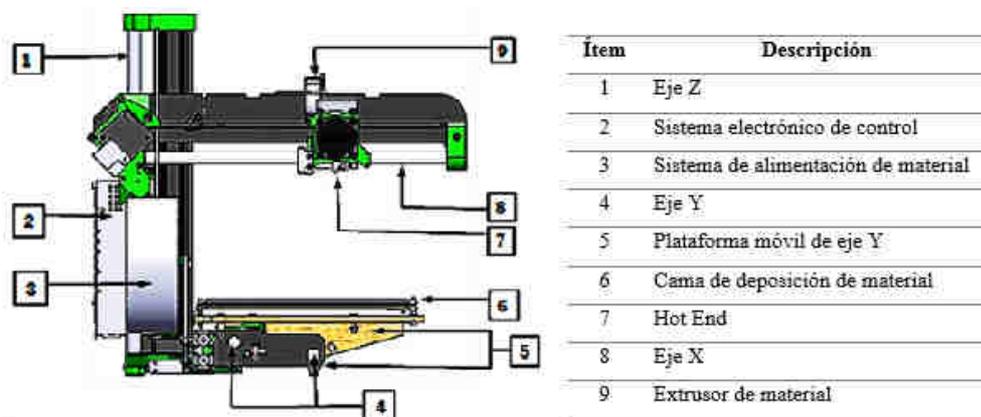


Figura 31. Vista de estructura de soporte en voladizo de Ormerod 2

La disposición de la estructura original se conserva por sus mencionados beneficios y dentro de ella los elementos que la componen no deben sufrir mayores cambios, a excepción del sistema de guiado para los ejes de trabajo giratorio basculante.

Se ha intentado acceder a la gran mayoría de componentes y dispositivos dentro el mercado nacional, desde luego tratando de concordar con el presente diseño base estipulado, originario de “RS Components” en Reino Unido (Ver Figura 30), ya que este ha sido testeado y aprobado dentro del proyecto RepRap por profesionales en la temática.



Figura 32. Estructura base para ser conservada

a) Montaje motor Z b) Montaje inferior Z c) Soporte lateral X d) Montaje corredizo Z e) Parte de montaje X f) Soporte esquina Z

Fuente: (RepRapPro, 2017)

Se visualiza en la Figura 32 cada uno de los componentes ya sean impresos o no impresos que pertenecen a la estructura del modelo base y que se han conservado en el modelo para rediseño debido a su poca influencia dentro del nuevo sistema adaptado de ejes rotativos.

b. Mecanismos de transmisión de movimiento

De forma similar que en la estructura del bastidor del modelo base, varias piezas impresas y componentes electromecánicos se conservan también para el sistema de transmisión de movimiento dentro del mecanismo del eje X, del eje Z y para el mecanismo extrusor de material plástico. Los elementos se pueden distinguir en la Figura 33.

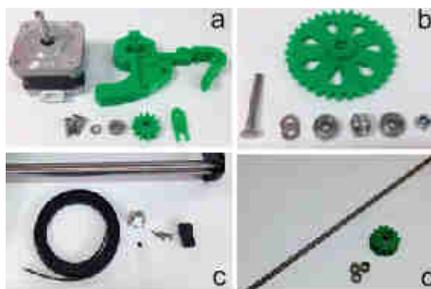


Figura 33. Mecanismo transmisor de movimiento

a) Cuerpo extrusor b) Engrane extrusor c) Correa dentada X d) Tornillo-avance Z

Fuente: (RepRapPro, 2017)

Todos los elementos aquí expuestos, son mejor descritos dentro del capítulo de implementación y calibración del sistema general (Capítulo III).

2.6.2 Subsistemas para ser modificados

a. Cama de deposición de material giratoria basculante, plataforma base y cabezal de extrusión

Como se expone en el apartado 2.4.1, el prototipo para impresión 3D que utiliza cinco ejes queda definido con una disposición de sistemas acoplados, principalmente se tiene por un lado el sistema base que es la estructura y mecanismo de un robot cartesiano y por otro se encuentra el sistema giratorio basculante basado en el principio de una impresora polar y/o el mecanismo que usualmente han venido aplicando los sistemas CNC de cinco ejes en sus mesas de trabajo como se distinguen en la Tabla 10.



Figura 34. Cama de geometría circular adoptada por impresoras 3D polares

Fuente: (RepRap, 2016)

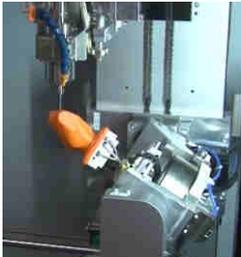
La geometría más propicia para el dinamismo giratorio de la bandeja de deposición de material es la circular, al igual que se encuentran estructuradas las impresoras 3D polares,

como se visualiza en la Figura 34. De este modo como es lógico, el volumen de trabajo de la impresora base cartesiana cambia de un volumen prismático a uno cilíndrico y su análisis se presenta en el apartado 2.6.2c.

El mecanismo de robot cartesiano viene ya diseñado y totalmente estructurado en el modelo base de impresora 3D Ormerod 2 que ha sido seleccionado por sus capacidades acertadas hacia el proyecto. El mecanismo que debe ser acoplado es la cama de deposición de material, la misma que contiene los dos ejes adicionales. Se opta por realizar un recuento de la maquinaria del estado del arte (apartado 1.12) y de mesas de trabajo rotativas en maquinaria CNC, para la selección del modelo a ser adaptado.

Tabla 10.

Modelos de mesas rotativas CNC para impresión 3D y mecanizado

Ítem	Nombre	Imagen
1	Mesa de trabajo de sistema híbrido de manufactura DMG MORI	
2	Mesa de trabajo giratoria inclinada de impresora 3D Enomoto	
3	Mesa giratoria basculante de ULTRASONIC 10 de DMG MORI	

CONTINÚA 

4	Mesa rotativa basculante de doble apoyo de dos ejes TR110	
5	Mesa rotativa basculante de simple apoyo TRT160	
6	Mesa rotativa inclinable BAS-V series	

Fuente: (Interempresas, 2016) (Horsey, 2016) (DMG MORI, s.f.) (Haas Automation Inc, 2013) (LCM, s.f.)

Los modelos de mesas de trabajo rotativas que se han podido analizar en la Tabla 10, sirven de referente para el modelamiento CAD y el diseño estructural físico de la cama de deposición de material del prototipo de impresora 3D de cinco ejes. De estos aspectos se logra destacar lo siguiente:

- El sistema debe ser lo más compacto posible, de longitud reducida y con el menor número de elementos, como en el ítem 6 de la Tabla 10, ya que toda la estructura debe ser transportada constantemente por el eje Y, lo cual provoca concentración de esfuerzos sobre dicho eje.
- Para que el sistema giratorio e inclinable sea montado correctamente sobre la plataforma y sobre el eje Y de la impresora base 3D Ormerod 2, éste debe poseer doble soporte como en el ítem 4 de la Tabla 10, contrario a los ítems 3 y 5, ya que es beneficioso poseer mayor cantidad de puntos de apoyo para el transporte del sistema, para refuerzo y mejor equilibrio del mismo.
- Se debe promover el rediseño de la menor cantidad de subsistemas implicados en la adaptación del nuevo mecanismo, entonces es menester que dicho mecanismo posea un movimiento basculante alrededor del eje X y no alrededor del eje Y, ya que si se hace lo último, visto en el ítem 5 de la Tabla 10, se exigiría también el

rediseño del brazo en voladizo del modelo base Ormerod 2, ya que debería aumentar su elongación para transportar al Hot End hasta la bandeja de impresión cuando esta esté totalmente inclinada.

- Se debe diseñar el sistema para el movimiento giratorio alrededor del eje Z (eje C) y para el movimiento basculante alrededor del eje X (eje A), de tal manera que el montaje de la estructura tenga el mecanismo generador y transmisor de movimiento para cada nuevo eje. Estos deben poseer una salida de movimiento controlado y de similar resolución que la preestablecida en el modelo base. Una sinergia de lo expuesto se encuentra en el ítem 2 de la Tabla 10.
- Con todas las nuevas modificaciones y la adición de elementos constitutivos del sistema giratorio basculante, resulta preciso estructurar a la plataforma base y a las guías de movimiento basculante de una forma robusta, como se ve en el ítem 1 de la Tabla 10.

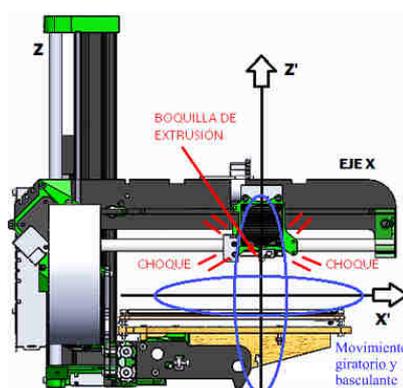


Figura 35. Problema con choque del sistema rotativo y Hot End

Por otro lado, el cabezal de extrusión, que es el elemento que engloba al extrusor y al Hot End, en un inicio se lo pretendía conservar en su diseño y disposición original, propio del modelo Ormerod 2. Sin embargo, por la asimilación del rediseño general, se toma en cuenta por simple observación, que la boquilla de extrusión del Hot End debería ser bajada unos cuantos centímetros más hacia la bandeja de impresión, para que los desplazamientos de los nuevos ejes rotativos no choquen con el brazo del eje x, como se puede divisar en la Figura 35.

Los desplazamientos basculantes del eje A, incorporados dentro del sistema de cama de deposición giratoria, al accionarse ocasionan que la bandeja de deposición de material choque contra la varilla lisa y el Hot End del montaje del eje X, si este se encuentra en la zona más baja de impresión (origen de coordenadas), obligando al rediseño de dicho montaje, de tal forma que se extienda hacia abajo el carruaje del eje X, el mismo que debería transportar un Hot End más liviano para compensar el peso adicionado.

b. Sistema de control electrónico

Tanto el subsistema de control, como el de la circuitería electrónica deben ser acoplados a la nueva funcionalidad del prototipo de impresora 3D de cinco ejes. Estos parámetros modificables tienen su fundamento al igual que los anteriores subsistemas, en el modelo base Ormerod 2. Es por tanto que se pretende hacer uso del mismo firmware controlador denominado DC42 del cual se trata de mejor manera en el apartado 1.11.4, aplicando su última versión para aprovechar todos los beneficios que son ideales para el rediseño y del cual se trata en el apartado 2.7.4.

Así mismo, se pretende hacer uso de la placa electrónica Duet 0.8.5 (Anexo A-2), como ya se nombró en el apartado 2.5.5, se puede asimilar que para el proyecto de impresora 3D de cinco ejes resulta fundamental tener la capacidad de control para un número relativamente amplio de motores PaP, en este caso se requiere de los tres drivers principales, los dos drivers adicionales, un driver para el sistema de extrusión y otro de resguardo para términos de funcionamiento general.

Resulta elocuente entonces aplicar el rediseño mediante la tarjeta denominada DUET 0.8.5, la cual no ha sido analizada mediante un proceso minucioso de selección, ya que originalmente viene adaptada de manera común en el modelo base. Esta tarjeta controladora posee la capacidad de habilitar hasta ocho drivers independientes para motores PaP, además de sus características propicias para activar un sensor de presencia por cada driver de motor y los dispositivos térmicos, de enfriamiento y de recepción de datos que sustentan la necesidad del proyecto de forma satisfactoria. Un ejemplo de conexión y de la cantidad de drivers para motores en la tarjeta DUET 0.8.5 se visualiza en la Figura 36.

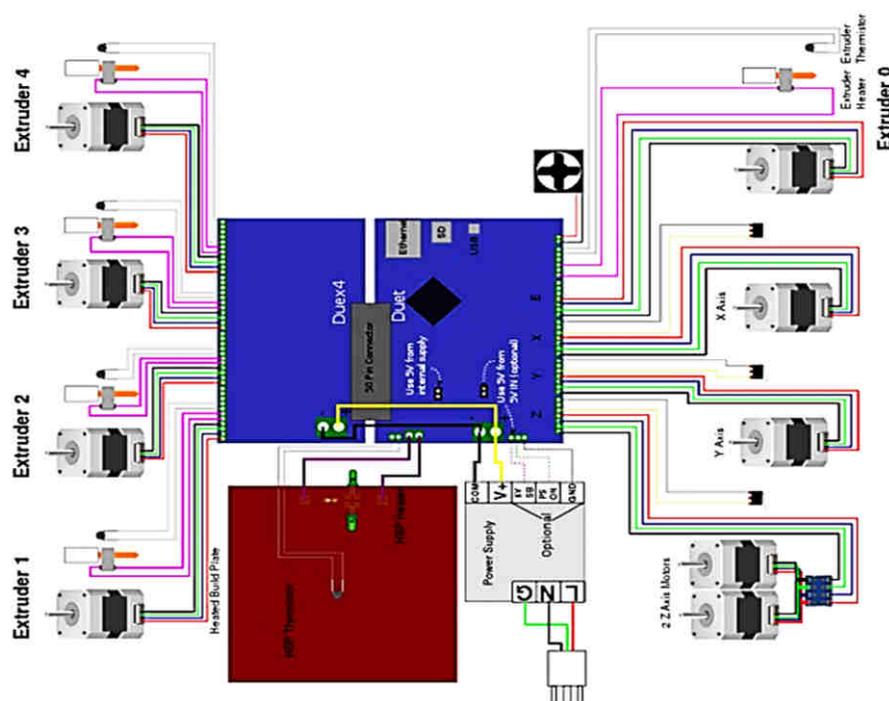


Figura 36. Ejemplo de conexión de tarjeta Duet 0.8.5 con Duex4

Fuente: (RepRap, 2017)

c. Definición de volumen de trabajo para el sistema de cinco ejes

El volumen de trabajo inicial, a la par que varios subsistemas en la impresora 3D base, ha tenido que ser modificado espacial y geoméricamente como se ha explicado en el apartado 2.6.2a. El rediseño para la superficie y consecuentemente para el volumen de impresión viene fijado por la capacidad de espacio que requiera tener la pieza o piezas a ser fabricadas. Estas piezas, independientemente de su forma, deben tener una dimensión coherente para ser estudiadas posteriormente en el análisis de sus características mecánicas.

Las piezas que se pretenden fabricar tienen que ser de dimensiones iguales o menores a las de una probeta común con la cual se pueda realizar ensayos de resistencia mecánica, para determinar ya sea la dureza o las variaciones de deformación en función del esfuerzo mediante tensión o compresión. Para el ensayo mecánico se requiere conocer las características de la maquinaria que realice este trabajo o la normativa que rija las especificaciones de una probeta adecuada para ser analizada.

La máquina universal de ensayos tiene bastante similitud con una prensa, al punto que también funciona bajo principios hidráulicos, cuenta con facultades para someter materiales a distintos ensayos como son el de tracción y compresión, midiendo así las propiedades mecánicas del elemento. Para lograr esto, la máquina cuenta con un sistema de aplicación de cargas controladas sobre el elemento (probeta con dimensiones establecidas), arrojando de forma gráfica la deformación que sufre el material con la aplicación de las cargas, hasta el momento de su ruptura. (C. Metrology, 2016)

Las geometrías de las “probetas” que se desean fabricar mediante el prototipo de impresora 3D de cinco ejes, en las cuales se verifica el objetivo principal del proyecto, se encuentran regidas mediante la normativa ASTM D638, que se basa en las geometrías de probetas plásticas rígidas y semirrígidas para los ensayos mecánicos de tracción y compresión en una máquina universal. Estas geometrías no sobrepasan la altura de 170mm, ni el diámetro de 20mm. (ASTM Norma, 2004)

Es entonces que, por los términos tratados, el volumen de trabajo de rediseño, calculado por la ecuación (1), queda definido mediante estos límites de seguridad, indistintamente si luego se tenga la necesidad de realizar pruebas mecánicas con “probetas” de menores dimensiones o diferentes geometrías como se dijo desde un principio. La bandeja de impresión circular queda definida con un radio permisible de impresión de 60mm y la altura desde la bandeja hasta la parte más superior donde se pueda ubicar la boquilla del Hot End es de 170mm.

$$V_T = \pi * r^2 * h \quad (1)$$

En donde:

- V_T : Volumen de trabajo
- r: Radio permisible de la bandeja circular de impresión
- h: Altura máxima de impresión

$$V = \pi * 60^2 * 170 = 1922654.70mm^3$$

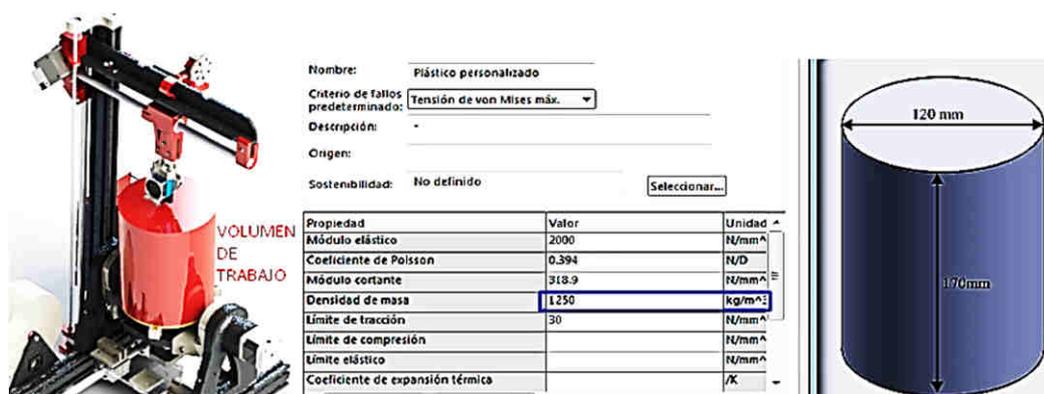


Figura 37. Representación de volumen de trabajo rediseñado para PLA

El volumen de trabajo para el prototipo de impresora 3D de cinco ejes (Ver Figura 37) queda definido mediante 1922.65 cm cúbicos. Para lo cual, buscando facilidades en el análisis del rediseño, se procede a interactuar con un software de diseño CAD, en donde se implementa el tipo de material para la pieza de impresión (Ver Figura 37) tomando en cuenta las dimensiones límite y una densidad de masa promedio del PLA, como se describe en (PrintaLot, 2017) para el método de ensayo ASTM D792, en donde la densidad de masa es de 1250 kg/m³, por lo tanto la masa que tendrá una pieza fabricada con sus parámetros más críticos será de 2.4 Kg, como se aprecia en la Figura 38.

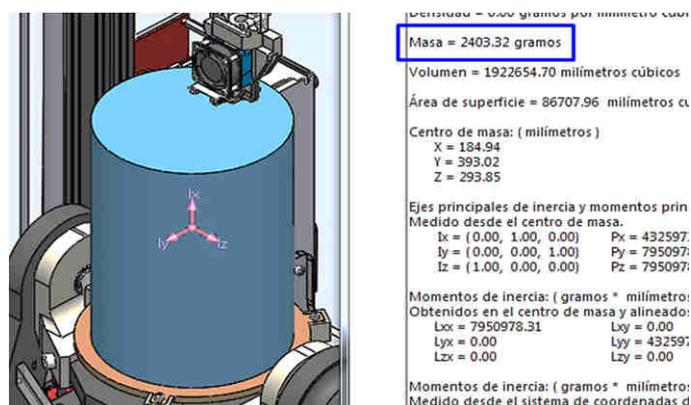


Figura 38. Masa de pieza impresa de dimensiones límite

2.7 Rediseño para subsistemas a ser modificados

2.7.1 Plataforma base y cama de deposición de material (sistema rotativo)

Una vez establecida la disposición del sistema de guiado, en este caso la configuración mesa/mesa, analizada en el apartado 2.4.1, la cama de deposición será la que forme parte

ahora del sistema giratorio basculante, sumando dos ejes a la disposición general que posee el robot cartesiano del modelo base. Un ejemplo bastante tentativo para la adaptación de este sistema se presenta en la Figura 39, en donde se establecerán los parámetros de rediseño de la máquina para que todo funcione de forma unificada.

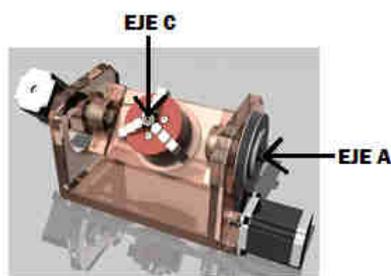


Figura 39. Ejemplo de sistema giratorio basculante (carro de eje Y)

Fuente: (GRAB CAD, 2014)

Así como en maquinaria convencional CNC, el sistema mecánico gracias a la configuración que se le dé, debe pasar al inicio del proceso de prototipado, tanto por una configuración “HOME” para los ejes involucrados, como también por un ORIGEN de coordenadas. La disposición de HOME debe ser calibrada aplicando sensores de presencia que delimiten la trayectoria de cada eje, mientras que el ORIGEN del sistema para maquinaria multieje generalmente se aplica en donde se crucen dichos ejes a la vez, como se ve en la Figura 40. (Hovin, 2014)

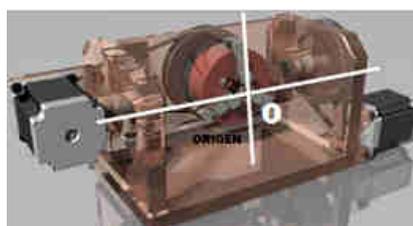


Figura 40. Ejemplo de origen de coordenadas para sistema de guiado rotativo

Fuente: (GRAB CAD, 2014)

a. Tipo de motor para dinamismo de los subsistemas rediseñados (ejes A, C, Y)

Para determinar el dispositivo que genere el movimiento de los ejes planteados para diseño y readecuación (ejes A, C e Y) se realiza una comparativa entre los principales componentes en el mercado que realizan este trabajo, el mismo que se ha visto plasmado

en las impresoras 3D más populares. En la Tabla 11 se establecen las ventajas y desventajas entre aplicar motores PaP o motores de corriente continua para este proyecto, posteriormente en laPara la selección de alternativas del tipo de motor que se debe usar en el rediseño del prototipo, se parte del concepto de control de giro del actuador, pues es menester dentro de la impresión 3D que se tenga un monitoreo total de las fracciones de revolución y la velocidad constituida por el motor.

Tabla 12 se refleja la respectiva selección de la alternativa adecuada.

Tabla 11.

Comparativa entre motores PaP y de corriente continua

Características	Paso a paso	De corriente continua
Necesidad de Encoder	No	Sí
Calentamiento	Mayor	Menor
Volumen respecto a potencia	Mayor	Menor
Velocidad variable	Sí	Sí
Desgaste	No	Sí

Fuente: (De la Peña García & Cañete Vela, 2014)

Para la selección de alternativas del tipo de motor que se debe usar en el rediseño del prototipo, se parte del concepto de control de giro del actuador, pues es menester dentro de la impresión 3D que se tenga un monitoreo total de las fracciones de revolución y la velocidad constituida por el motor.

Tabla 12.

Selección de alternativa de tipo de motores para rediseño

Criterios de selección	Paso a paso	De corriente continua
Características generales	4	3
Necesidad de aditamentos	3	2
Funcionamiento-desempeño	4	3
Desgaste	4	2
TOTAL	15	10

Gracias a los beneficios que brindan los motores a pasos y debido a que estos han garantizado la correcta funcionalidad del modelo base de impresora 3D, los cuales son de la asociación NEMA como para la mayoría de impresoras RepRap, se ha decidido conservarlos para que sean los componentes generadores de movimiento en este proyecto.



Figura 41. Diversidad de motores estándar NEMA

Fuente: (PBC LINEAR, 2014)

b. Mecanismo transmisor de rotación para eje A y eje C

De los siguientes mecanismos descritos, se selecciona uno que determine la correcta transmisión de movimiento giratorio y basculante para los ejes C y A respectivamente.

Opción 1: Mecanismo tornillo sin fin-corona

El tornillo sin fin-corona (Figura 42) es un mecanismo de transmisión circular compuesto por dos elementos: el tornillo (sin fin), que actúa como elemento de entrada (o motriz) y la rueda dentada, que actúa como elemento de salida (o conducido) y que algunos autores llaman corona. La rosca del tornillo engrana con los dientes de la rueda de modo que los ejes de transmisión de ambos son perpendiculares entre sí.

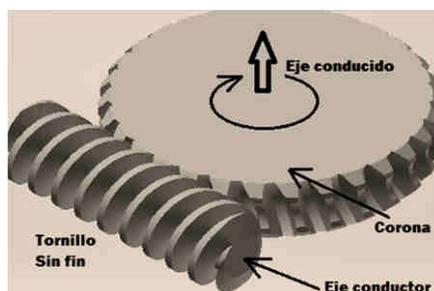


Figura 42. Diseño CAD de mecanismo tornillo sin fin – corona

El funcionamiento es muy simple: por cada vuelta del tornillo, el engrane gira un solo diente o lo que es lo mismo, para que la rueda dé una vuelta completa, es necesario que el tornillo gire tantas veces como dientes tiene el engrane. Se puede deducir de todo ello que el sistema posee una relación de transmisión muy baja, o lo que es lo mismo, es un excelente reductor de velocidad y, por lo tanto, posee elevada ganancia mecánica. En la Tabla 13 se pueden apreciar sus ventajas y desventajas. (Los operadores mecánicos, 2015)

Tabla 13.

Ventajas y desventajas del mecanismo Sin fin - corona

Ventajas del mecanismo	Desventajas del mecanismo
Son compactos o de diseño modular	No pueden llegar a ser de gran tamaño
Soportan altas temperaturas	Difícil fabricación para pequeños tamaños
Fácil hermeticidad y versatilidad	Mayores requerimientos de potencia
Poseen soportes y apoyos simples	Volumen de material bajo

Fuente: (Los operadores mecánicos, 2015)

Opción 2: Mecanismo de banda y poleas simple

El sistema de poleas con correa más simple (Figura 43) consiste en dos poleas situadas a cierta distancia, que giran a la vez por efecto del rozamiento de una correa con ambas poleas. Las correas suelen ser cintas de cuero flexibles y resistentes. Es este un sistema de transmisión circular puesto que ambas poleas poseen movimiento circular. Se aprecian las debidas ventajas y desventajas del mecanismo en la Tabla 14.

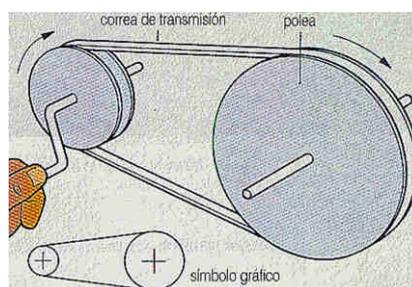


Figura 43. Representación del mecanismo de poleas con correa

Fuente: (Aprendamos tecnología, 2008)

En base a esta definición distinguimos claramente los siguientes elementos:

- **La polea motriz:** También llamada polea conductora, es la polea ajustada al eje que tiene movimiento propio, causado por un motor o manivela.
- **Polea conducida:** Es la polea ajustada al eje que se tiene que mover. Así, por ejemplo: en una lavadora este eje será aquel que se ajusta al tambor.
- **La correa de transmisión:** Es una cinta o tira cerrada de cuero, caucho u otro material flexible que permite la transmisión del movimiento entre ambas poleas. La correa debe mantenerse lo suficientemente tensa pues, de otro modo, no cumpliría su cometido satisfactoriamente. (Aprendamos tecnología, 2008)

Tabla 14.

Ventajas y desventajas del mecanismo de poleas con correa

Ventajas del mecanismo	Desventajas del mecanismo
Posibilidad de transmitir un movimiento circular entre dos ejes situados a grandes distancias entre sí.	La primera de las ventajas puede ser una desventaja, es decir, este mecanismo ocupa demasiado espacio.
Funcionamiento suave y silencioso con diseño sencillo y costo de fabricación bajo.	La correa puede patinar si la velocidad es muy alta con lo cual no se garantiza una transmisión efectiva.
Si el mecanismo se atasca la correa puede desprenderse y, de este modo, se para. Este efecto contribuye a la seguridad probada de muchas máquinas.	La potencia que se puede transmitir es limitada.

Fuente: (Aprendamos tecnología, 2008)

Opción 3: Mecanismo caja reductora de engranaje planetario para motor NEMA

Es una caja de cambios con un sistema de engranaje planetario listos para ser acoplados a los motores a pasos NEMA mediante tornillos (Figura 44), es un sistema de disposición epicicloide, reductor de velocidad y multiplicador de torque. Se encuentra disponible para una gran gama de motores NEMA que ayuda a la regulación de la relación de transmisión de movimiento requerida. Las ventajas y desventajas del mecanismo se encuentran expresadas en la Tabla 15.

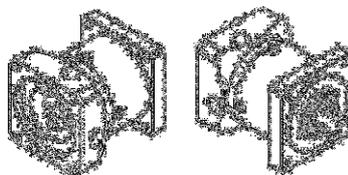


Figura 44. Representación de caja con engranaje planetario para motor NEMA

Fuente: (AliExpress, 2013)

La aplicabilidad del mecanismo de caja con engranaje planetario como motorreductor paso a paso, puede ser utilizada en áreas tales como control de transmisión industrial, máquinas de envasado en polvo, lectores de CD-ROM, máquinas de bobina, máquinas de impresión 3D, máquinas de corte, máquinas de grabado, impresoras 2D, plotters, robótica y otros productos relacionados. (AliExpress, 2013)

Tabla 15.

Ventajas y desventajas de engranaje planetario para motor NEMA

Ventajas del mecanismo	Desventajas del mecanismo
Trabaja con bajo ruido y posee características de una larga vida útil.	En un momento dado se requerirá de lubricación y/o mantenimiento.
Velocidad de salida ajustable.	Sistema interno mecánico complejo.
Alta precisión de paso angular.	

Fuente: (AliExpress, 2013)

Se toma en cuenta la ventaja de cada opción, la primera es el mecanismo Sin fin-corona, la segunda Poleas con correa y la tercera opción es la caja reductora con para NEMA.

Tabla 16.

Selección de la alternativa de mecanismo de movimiento giratorio

Criterios de selección	Opción 1	Opción 2	Opción 3
Tamaño y compacidad	3	2	4
Precisión	3	3	4
Seguridad-funcionamiento	3	3	3
Adaptabilidad y peso	4	4	4
Acceso al producto	2	4	3
TOTAL	15	16	18

Se ha seleccionado el mecanismo de caja reductora con engranaje planetario para motores NEMA como se expresa en la Tabla 16, debido principalmente a que es un gran beneficio poder utilizar un sistema que no ocupe mucho espacio, que sea de gran precisión y que se acople fácilmente a los componentes generadores de movimiento, qué mejor que sea el propio motorreductor de una amplia gama de motores NEMA, que se observan en el Anexo A-3, el que realice el trabajo.

c. Perfil de aluminio 20x40 T-slot 5 para plataforma base

Por otro lado, la plataforma base en donde se soporta el peso de cada subsistema de toda la estructura, ha sido rediseñada para que posea mejor estabilidad, al añadir otro perfil estructural de aluminio al costado derecho como se puede observar en la Figura 45. Este perfil de aluminio no ha pasado por un análisis de selección debido a que es el mismo que utiliza la impresora base Ormerod 2 para fijar su bastidor, entonces sólo se realiza una readecuación de la misma, brindando mayor robustez a la estructura, como se analiza en el apartado 2.7.1e.

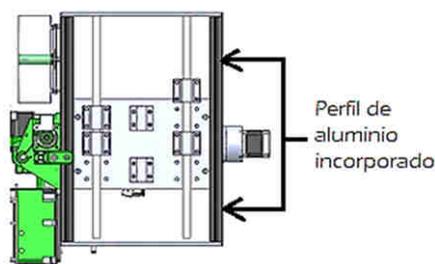


Figura 45. Rediseño de plataforma base con la adición de perfil de aluminio

El perfil 20×40 T-Slot es un perfil de aluminio extruido de 20×40 mm de sección y de ranura (slot) 5mm (Figura 46), ideal para proyectos de CNC, impresoras 3D o como perfil auxiliar de V-Slot en las partes en que no sea necesario el sistema de guiado lineal. El agujero central de la sección puede ser mecanizado para rosca de M5. Características más detalladas del perfil se exponen a continuación: (MakerShopBCN, 2014)

- Perfil de aluminio extruido 20×40 mm, 6 ranuras de ancho 5mm (2 por cada lado de 40 mm y 1 por cada lado de 20 mm)

- Profundidad de la ranura: 6,35mm.
- Aluminio anodizado
- Núcleo de 4,3 mm para rosca de M5.

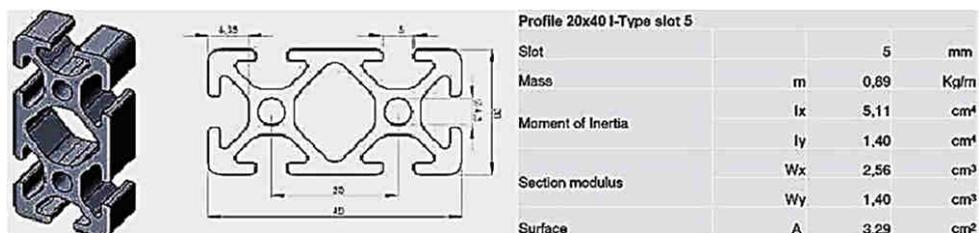


Figura 46. Datos de perfil estructural de aluminio 20x40 I-T slot 5

Fuente: (MakerShopBCN, 2014)

La plataforma base cuenta con dos perfiles estructurales de aluminio a cada lado, los mismos que se encuentran anodizados con un revestimiento para brindar garantía en la precisión, resistencia al rayado y la corrosión. Estos dos perfiles de aluminio son debidamente sujetos entre sí mediante láminas de acrílico de 6mm de grosor, limitando de forma concreta el paralelismo entre los perfiles y fijando la geometría rectangular para doble soporte como se ve en la Figura 45.

d. Elementos para sistema cinemático del carro del eje Y

Tabla 17.

Comparación de sistemas cinemáticos

MODELO	VENTAJAS	INCOVENIENTES	PESO	COSTE	IMAGEN
Barra lisa y rodamiento (Opción 1)	Barato, simple, relativamente fácil de montar, uso de piezas imprimibles.	Requiere aumento de espacio.	Ligero	Barato.	
Rieles perfilados (Opción 2)	Mayor precisión, menor fricción, mejores propiedades estructurales.	Complejo de fabricar de manera autónoma, más caro.	Pesado	Caro.	

Fuente: (Bobo García, 2013)

Para el sistema giratorio basculante, que independientemente de sus movimientos rotativos, funciona también como una plataforma móvil que se desplaza longitudinalmente sobre el eje Y, (carro del eje Y) necesita de un mecanismo cinemático que puede utilizar la forma más de básica de varillas lisas acompañadas de rodamientos lineales o rieles perfilados para la guía de desplazamiento. La Tabla 17 y Tabla 18 exponen la selección del mecanismo adecuado a ser implementado.

Tabla 18.

Selección de alternativa de mecanismo cinemático en eje Y

Criterios de selección	Opción 1	Opción 2
Ventajas generales	4	3
Solución a inconvenientes	3	4
Peso	3	4
Coste	3	4
TOTAL	13	15

Se ha tomado en cuenta la selección del mecanismo cinemático más apropiado para el eje Y, que en este caso ha sido analizado de acuerdo a la capacidad de acoplamiento con el modelo base y los beneficios que se han podido percibir en su trabajo. Tal como se ha utilizado para el eje X, el uso de barras o varillas lisas con rodamientos lineales resulta ser el mecanismo más conveniente, ya que, en razón de rieles perfilados, la opción 1 ofrece similar principio de tracción para el transporte, es más barato y liviano.

Dentro del mercado nacional resulta de mayor facilidad la adquisición de varillas lisas de acero inoxidable 316L (Anexo A-4) en lo que concierne a ejes de transmisión, estas pueden encontrarse de 8, 10 y 12mm de diámetro, siendo este último el más solicitado para maquinaria CNC y coincide particularmente con el diámetro de varillas que utiliza la impresora Ormerod 2 en su modelo original.

Para el diseño, como se visualiza en la Figura 45, se colocan las varillas lisas de acero inoxidable dentro de la estructura rectangular de la plataforma base, paralelamente a los perfiles de aluminio, de esta forma se estructuran las guías para el recorrido del carro del

eje Y, dicho de otra forma, es todo el sistema giratorio basculante que se moviliza por aquel eje. Los rodamientos lineales comunes son los LM_UU y SC_UU (Anexo A-5).

e. Elementos para sistema de transmisión de movimiento del eje Y

Para la transmisión de movimiento tanto para el eje X como para el Y se decide conservar el uso del sistema de poleas y correa dentadas (Figura 47), ya que han sido de gran rendimiento dentro del modelo de impresora 3D base, además que permiten el uso de poleas de diámetro pequeño transmitiendo una alta potencia. Se presenta mejor adaptación de las poleas con el mínimo deslizamiento.

Otro motivo para la prevalencia de selección de este tipo de sistema es que garantiza una relación de transmisión constante entre los ejes y facilita el mantenimiento de la impresora por parte del usuario, ya que no necesitan lubricación y el tensado no es tan exigente. (De la Peña García & Cañete Vela, 2014)

Los elementos que se han encontrado con mayor facilidad dentro del mercado nacional para el sistema de transmisión de movimiento poleas y correa dentada son los siguientes:

- Correa GT2 (6mm de anchura, 2mm de paso, fabricado en neopreno y fibra de vidrio)
- Poleas GT2 (20 dientes, 2 mm de paso, 7 mm de ancho de correa, 12.73mm diámetro exterior, 5 mm ancho de eje, fabricado en aluminio) (3DSmart, 2015)



Figura 47. Poleas y correa dentadas tipo GT2

Fuente: (3DSmart, 2015)

f. Modelamiento CAD para plataforma base y sistema giratorio basculante

Las geometrías de la estructura del sistema giratorio basculante se han basado en el volumen de trabajo seleccionado (apartado 2.6.2c) y en el espacio disponible estructurado

por el modelo base, para que este nuevo diseño sea lo más reducido y liviano que se pueda, dando paso a un criterio dimensional propio, pero fundamentado en el apartado 2.6.2a, que presenta aspectos destacables para el mecanismo de mesa giratoria basculante y platos divisores CNC para cinco ejes, sistemas comunes que aplican una configuración mesa/mesa, en donde el resultado completo se puede observar en la Figura 48 y Figura 49.

Así mismo se toma en cuenta que para las piezas acopladoras y soportes de los motores PaP del sistema rediseñado, se debe conservar una cierta geometría para que dichos dispositivos encajen cara con cara y puedan ser atornillados debidamente. Aquí rinde efecto positivo la elección de motores bajo normativa NEMA (Anexo A-3), para este caso los NEMA 17, motores PaP que han sido desarrollados mayoritariamente para el trabajo dentro de las impresoras 3D RepRap, en donde de antemano se conoce una geometría normalizada de estos elementos para el diseño general de la estructura.

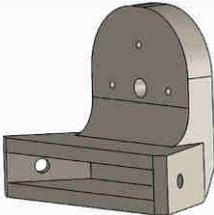
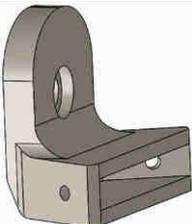
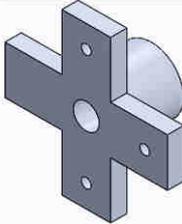
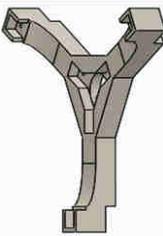
A continuación, en la Tabla 19, se expone el modelamiento CAD de las piezas que componen la nueva estructura de la cama de deposición de material, específicamente el sistema de guiado giratorio basculante, la bandeja de impresión y sus acoples, junto con demás aditamentos necesarios.

Tabla 19.

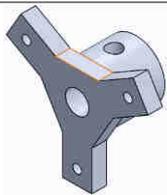
Modelamiento CAD para piezas del sistema giratorio basculante

Nombre	Representación gráfica	Descripción	Cantidad
Soporte lateral derecho		Pieza imprimible en donde se acopla el motor para el eje A y que junto con el soporte lateral izquierdo sostienen a la bandeja de impresión y al sistema giratorio del eje C.	1

CONTINÚA 

Soporte lateral izquierdo		Pieza imprimible en donde se inserta el eje A y que junto con el soporte lateral derecho sostienen a la bandeja de impresión y al sistema giratorio del eje C.	1
Sujetador derecho de la cama de deposición		Pieza imprimible que sirve como soporte del sujetador central de la cama de deposición de material desde el lado derecho.	1
Sujetador izquierdo de la cama de deposición		Pieza imprimible que sirve como soporte del sujetador central de la cama de deposición de material desde el lado izquierdo.	1
Acople de aluminio del eje A		Pieza mecanizable en aluminio que acopla el eje del motor A con el sujetador derecho de la cama de deposición.	1
Sujetador central de la cama de deposición		Pieza imprimible en donde se acopla el motor del eje C y sirve como sujetador central de la bandeja de impresión.	1
Soporte de la bandeja de impresión		Pieza imprimible de estilo trípode que ayuda al soporte y estabilidad de la bandeja de impresión.	1

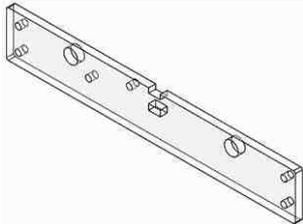
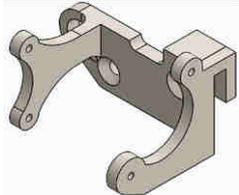
CONTINÚA 

Acople de aluminio del eje C		Pieza mecanizable en aluminio que acopla el eje del motor C con el soporte de la bandeja de impresión.	1
Bandeja de impresión de madera		Pieza de madera MDF para cortar con láser, que realiza las funciones de bandeja en donde se deposita el material de impresión	1

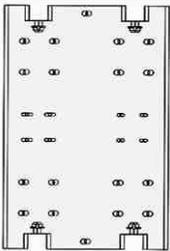
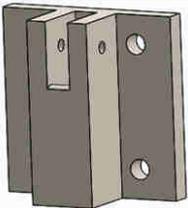
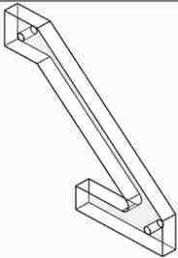
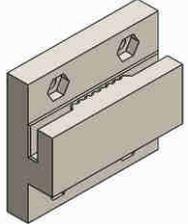
A continuación, en la Tabla 20, se expone el modelamiento CAD de las piezas que componen la nueva estructura de la plataforma base junto con la estructura soporte del carro del eje Y y sus aditamentos necesarios.

Tabla 20.

Modelamiento CAD de plataforma base y estructura móvil de Y

Nombre	Representación gráfica	Descripción	Cantidad
Soporte lateral del perfil de aluminio		Pieza de acrílico para cortarse con láser, que sirve de soporte y delimitador de movimiento de los perfiles de aluminio de la base	2
Soporte de motor del eje Y		Pieza imprimible que sirve de soporte y posicionamiento adecuado para el motor del eje Y	2

CONTINÚA 

Placa base del carro del eje Y		Pieza de acrílico para cortar con láser que sirve de base para que se asiente todo el carro del eje Y	1
Unión de la base		Pieza imprimible que sirve para sujetar al rodamiento lineal con la placa base y a la vez unirla con el soporte angular.	4
Soporte angular		Pieza de acrílico para cortar con láser que sirve de apoyo para los soportes laterales de la cama de deposición, por su geometría angular	4
Sujetador de la correa dentada		Pieza imprimible que sujeta a la placa base con la correa dentada para que se pueda desplazar el carro del eje Y	2

En la Figura 48 se puede observar el modelamiento CAD del ensamble de la cama de deposición rediseñada como el sistema de guiado rotativo basculante para los ejes A y C.

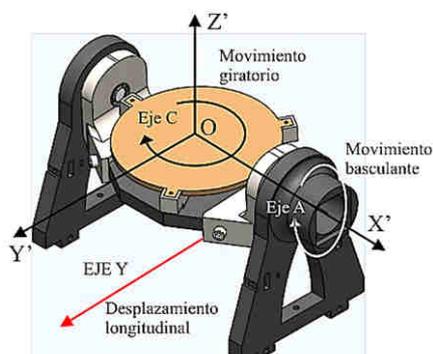


Figura 48. Diseño CAD de Cama de deposición giratoria basculante

En la Figura 49 se puede observar el modelamiento CAD del ensamble de la estructura móvil que se desplaza sobre las varillas lisas del eje Y, las mismas que se encuentran acopladas a la plataforma base.

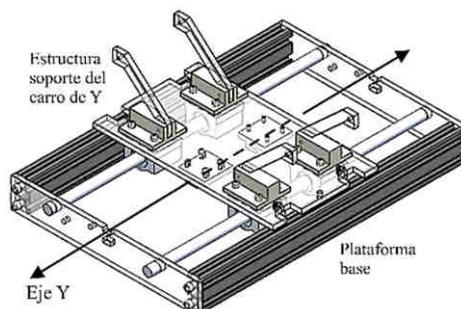


Figura 49. Modelo CAD de carro móvil de Y acoplado a plataforma base

En la Figura 50 se puede comparar desde una misma perspectiva la modificación que se ha venido haciendo con la plataforma base junto con la cama de deposición giratoria basculante, rediseño en el cual se ha reducido el volumen de trabajo, pero se ha incrementado mejoras de sistemas dinámicos, además de una mayor estabilidad para la estructura general del prototipo.

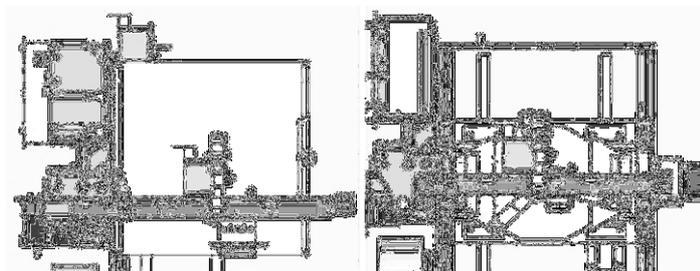


Figura 50. Rediseño de cama de deposición anterior Vs. actual

g. Selección de componentes para el sistema giratorio basculante

El estudio para la selección de componentes que generen y transmitan el movimiento hacia el sistema de los ejes rotativos A y C, se fundamenta en el análisis de un sistema bastante similar basado en una mesa posicionadora de dos ejes. (Arias Granda & Toapanta Lascano, 2013)

Cálculos para selección de motor del eje C

Para calcular la fuerza necesaria en el funcionamiento del eje de rotación de la cama de deposición del material (eje C), se analiza la máxima carga y la velocidad máxima del sistema, tomando en cuenta que la mayor carga que puede afectar a este eje es la considerada por el peso de la pieza fabricada en condiciones extremas cuando se aplica todo el volumen de trabajo (Figura 38) y más la adición del peso de la bandeja de impresión, su soporte y acople hacia el eje del motor, para estos últimos se puede observar en la Figura 51 la masa determinada por software de aproximadamente 0.14Kg.

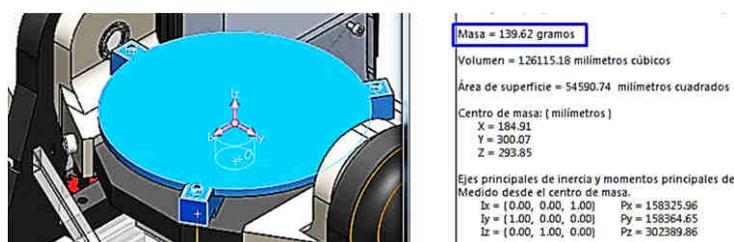


Figura 51. Masa aproximada de bandeja de impresión, su soporte y acople

En lo que respecta a la determinación de la velocidad angular máxima del sistema, se toman criterios de selección basados en experiencia de personal conocedor de impresión 3D y uso de motores a pasos. Como se dice en (Dima3D, 2015), no es necesaria gran velocidad de rotación en los motores, ya que al convertirla en movimiento lineal se requiere de baja velocidad, sin exceder los 200 mm/s.

Por lo tanto, ocupando la ecuación (2)

$$V_t = \omega_M * r_m \quad (2)$$

Donde:

- V_t : Velocidad lineal máxima del sistema (mm/s)
- ω_M : Velocidad máxima radial del sistema (rpm)
- r_m : Radio del eje de un motor NEMA 17= 2.5mm

$$\omega_M = \frac{200 \text{ mm/s}}{2.5 \text{ mm}} = 80 \frac{\text{rad}}{\text{s}} * \frac{1 \text{ rev}}{2\pi \text{ rad}} * \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} = 763.94 \text{ rpm}$$

Entonces calculando el torque de rotación con la ecuación (3), se tiene:

$$T_c = W * x \quad (3)$$

$$T_c = (m_p + m_b) * g * x$$

Donde:

- T_c : Torque de rotación del eje C (Nm)
- W: Capacidad máxima de carga que afecta al eje C (N)
- m_p : Masa de la pieza fabricada a condiciones de geometría extrema= 2.4Kg
- m_b : Masa de bandeja de impresión, su soporte y acople= 0.14Kg
- g: Gravedad= 9.81m/s²
- x: Distancia excéntrica expresada en la Figura 52= 0.06m

$$T_c = (2.54 \text{ Kg}) * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 0.06 \text{ m} = 1.5 \text{ Nm}$$

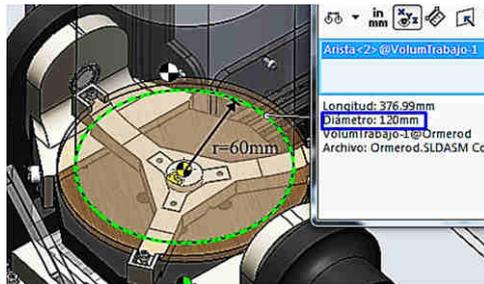


Figura 52. Distancia excéntrica de la carga máxima para eje C

Para la determinación del diseño del mecanismo giratorio basculante resulta fundamental la selección de los motores que se deben aplicar, también lo son sus cajas reductoras para la mejor precisión en el proceso de impresión 3D. Tal es el caso de los motores NEMA 17 que en la mayoría de casos vienen establecidos por un ángulo de paso de 1.8° (Anexo A-6), que a pesar de que la placa electrónica usada entrega un micropaso x16, 0.1125°/paso sigue siendo un desplazamiento con poca resolución de acuerdo a las impresoras 3D convencionales del proyecto RepRap.

Por lo tanto, se desea implementar un sistema de transmisión en donde se podrá aumentar la resolución de paso y el torque del motor para llegar a las condiciones estipuladas, reduciendo la velocidad que como se dijo, es factible. Se inicia realizando el

análisis con una relación de 20:1 para la accesibilidad, para alcanzar $0.006^\circ/\text{paso}$. Posteriormente se verificará la validez.

Para efectos del caso extremo que se pueda requerir, se aplica la velocidad máxima del sistema y se calcula la relación con la ecuación (4).

$$\omega_1 = \frac{\omega_M}{i_1} \quad (4)$$

Donde:

- i_1 : Relación de la velocidad del reductor
- ω_1 : RPM a la salida del reductor

$$\omega_1 = \frac{763.94 \text{ rpm}}{20} = 38.20 \text{ rpm}$$

El torque a la salida del reductor viene expresado por la ecuación (5).

$$\frac{\omega_M}{\omega_1} = \frac{T_1}{T_M} \quad (5)$$

Donde:

- T_1 : Torque a la salida del reductor
- T_M : Torque del motor, que en este caso es el torque requerido para el eje C

$$T_1 = T_c * \frac{\omega_M}{\omega_1} = 1.5 \text{ Nm} * \frac{763.94 \text{ rpm}}{38.20 \text{ rpm}} = 30 \text{ Nm}$$

Como se puede observar al implementar un sistema común de caja reductora de velocidad, el torque puede ser incrementado considerablemente, hasta satisfacer los requerimientos para inclusive el torque de aceleración y desaceleración que pueda ocasionar los movimientos dentro del sistema.

Hecho este análisis se procede a seleccionar el motor NEMA 17 del modelo 17HS19-1684S-PG19 (Anexo A-6) que como se observa, posee su propia caja reductora de engranaje planetario, característica tal que se seleccionó en el apartado 2.7.1b, es de fácil adquisición y posee la relación de 19:1, es decir, con una resolución de 0.0059° de ángulo

de paso mediante la tarjeta electrónica. Posee el torque adecuado para mover el sistema del eje C como se observa en la Figura 53. (Stepperonline, 2005)

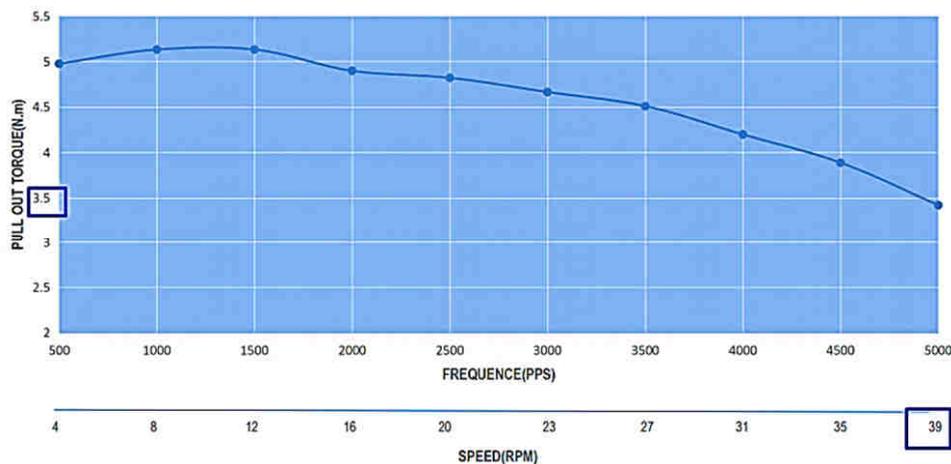


Figura 53. Curva característica: 17HS19-1684S-PG19 a potencia nominal

Fuente: (Stepperonline, 2005)

En la curva de características del componente seleccionado con caja reductora, se verifican los valores del torque entregado en función de la velocidad máxima del dispositivo. Y como se ha descrito, la velocidad máxima para el sistema de impresión 3D bajo sistemas de engranajes 20:1 es de 38,20 rpm que para este caso refleja un torque máximo del motor, que puede llegar a alcanzar los 3.5 Nm, cifra que es mucho mayor al torque requerido para el movimiento del sistema, por lo tanto, la selección es satisfactoria.

Cálculos para selección de motor de eje A

Definida ya la disposición y el mecanismo dinámico de la estructura de la bandeja de impresión, su soporte, su motor, caja de transmisión y acople que la hacen girar, (todo junto llamado cama de deposición del material) entonces resulta elocuente dar paso al diseño del eje de volteo o eje basculante como se lo ha venido llamando al eje A.

Para calcular la fuerza necesaria en el funcionamiento del eje basculante, nuevamente se analiza la máxima carga y la velocidad máxima del sistema, tomando en cuenta que la mayor carga que puede afectar a este eje es la considerada por el peso de la pieza fabricada en condiciones extremas cuando se aplica todo el volumen de trabajo (Figura 38), más la adición del peso de todo el conjunto de elementos del eje C y los soportes que voltean a

dichos elementos, para lo cual se puede observar en la Figura 51 la masa determinada por software para todo el sistema que es volteado con aproximadamente 0.64Kg.

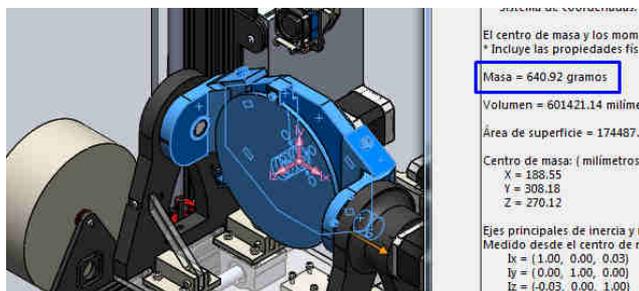


Figura 54. Masa aproximada de los elementos que voltea el eje A

Así mismo gracias al anexo A-6 que expone las características técnicas del motor y la caja de transmisión seleccionados para el eje C, se sabe que la masa de este sistema viene estipulada por 0.6Kg, que conjuntamente con la distancia del centro de gravedad al centro del eje (Figura 55), se puede calcular el torque de la cama de deposición de material basándose en la ecuación (3).

$$T_{A1} = (0.64 + 0.6) Kg * 9.81 \frac{m}{s^2} * 0.0919 m = 1.12 Nm$$

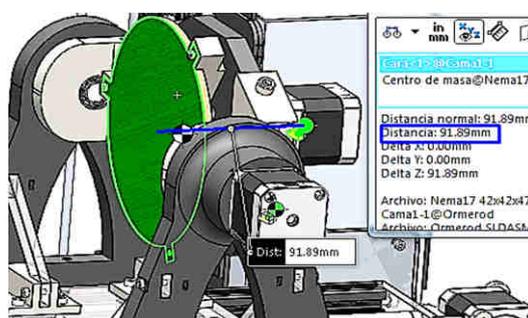


Figura 55. Distancia excéntrica de la carga para el eje A

De la misma forma que para el cálculo del torque de la cama de deposición de material, se debe encontrar el torque de rotación para la pieza impresa en sus condiciones extremas, sabiendo que su masa es de aproximadamente 2,4Kg como se lo ha venido utilizando durante todo este análisis. Y la distancia baricéntrica para el cálculo viene establecida por el valor entre el eje A y la mitad de la altura de la pieza impresa máxima (0.085m), que es en donde se encuentra haciendo efecto el centro de masa. Utilizando la ecuación (3):

$$T_{A2} = (2.4 \text{ Kg}) * 9.81 \frac{m}{s^2} * 0.085 \text{ m} = 2 \text{ Nm}$$

Entonces el torque de volteo viene dado por la ecuación (6):

$$T_A = T_{A1} + T_{A2} \quad (6)$$

Donde:

- T_A : Torque de volteo del eje A
- T_{A1} : Torque de volteo de la cama de deposición de material
- T_{A2} : Torque de volteo de pieza impresa en condiciones extremas

$$T_A = 1.12 \text{ Nm} + 2 \text{ Nm} = 3.12 \text{ Nm}$$

Para este caso es conocida la velocidad angular máxima que se puede producir en el sistema, tal como se ha citado en el diseño del eje C. Y de la misma forma se requiere de una mayor resolución para el ángulo de paso al cual se produzca el volteo de la cama de deposición de material, por ende, se compara las condiciones del sistema utilizando el mismo motor y caja de transmisión 17HS19-1684S-PG19 (Anexo A-6) para $0.0059^\circ/\text{paso}$ por la relación dada de 19:1.

El modelo de motor Pap aplicado posee el torque de rotación adecuado para mover a todo el sistema del eje A, ya sea aplicado también el máximo peso de una pieza impresa para condiciones extremas. Y como se observa en la curva de características de la Figura 53, a la máxima velocidad del sistema, el motor con su caja de transmisión puede seguir entregando un torque de 3.5 Nm que es mayor al torque requerido de 3.1 Nm, por lo tanto, el dispositivo seleccionado es seguro de ser aplicado.

En la Figura 56 se puede apreciar el ensamble del diseño CAD de la cama de deposición de material giratoria basculante con la implementación de los motores PaP que brindan el par adecuado al sistema con sus cajas de transmisión de movimiento respectivas. Posteriormente, teniendo este sistema definido se puede proceder a realizar el análisis de esfuerzos para los principales elementos en donde recae la carga máxima, que son las varillas lisas de transmisión.

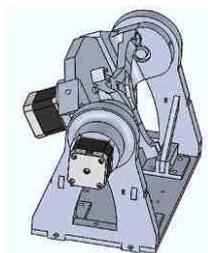


Figura 56. Motores para sistema giratorio basculante del prototipo

h. Selección de motores para transporte de carro del eje Y

Para la verificación de selección del motor a pasos NEMA 17 que tenga la capacidad de brindar el torque adecuado para mover a toda la plataforma móvil del eje Y, que se visualiza en la Figura 57, de la cual se ha obtenido su masa previamente con una balanza y se ha verificado aquel valor aproximadamente con un software de diseño CAD (Figura 57), se obtiene como dato la masa de 2.36Kg para el respectivo cálculo.

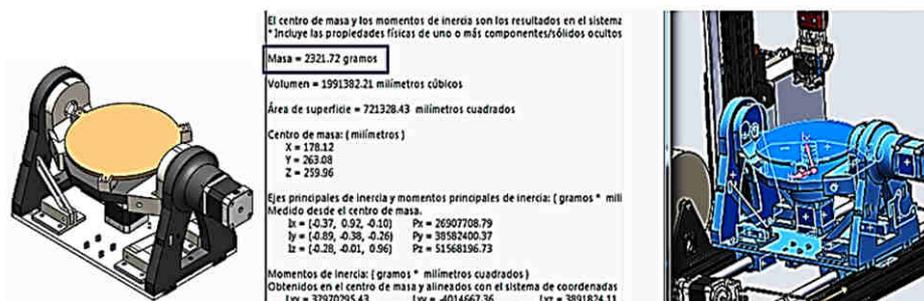


Figura 57. Masa aproximada de plataforma móvil del eje Y

Entonces se utilizan las ecuaciones extraídas del sistema de la Figura 58 para realizar el análisis del torque entregado por el motor PaP NEMA KL17H248-15-4A (Anexo A-7) por su entera disponibilidad en el mercado nacional, para posteriormente ser comparado con los estándares adecuados de la Figura 59, verificando que los parámetros calculados no excedan a las condiciones reales.

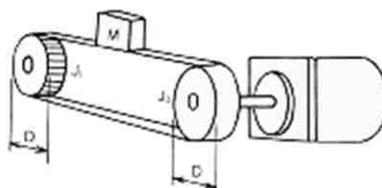


Figura 58. Esquema modelo para el sistema del eje Y

Fuente: (De la Peña García & Cañete Vela, 2014)

$$T_{motor} = (T_i + T_L) * f \quad (7)$$

$$T_i = I_n * \left(\frac{W}{t}\right) * \pi * \theta * K \quad (8)$$

$$T_L = R_{polea}(m * a + F_f) \quad (9)$$

Donde:

- Tmotor: Par total proporcionado por el motor (N*m)
- Ti: Par de inercia del motor (N*m)
- TL: Par del motor debido a la carga (N*m)
- f: Factor de seguridad. En este caso de 1.4 para obtener un margen del 40%
- Ff: Fuerza de fricción entre los rodamientos y las guías (N) (Tabla 21)
- K: Constante = 97.73
- In: Inercia del rotor= 76g*cm²
- w/t: Aceleración angular (pasos/s²)
- Θ: Ángulo de paso= 1.8°, con el micropasox16= 0.113°
- p: Paso de la correa dentada= 2mm
- z: Número de dientes de la polea= 20
- m: Masa de la plataforma móvil del eje Y= 2.36Kg
- a: Fuerza gravitatoria aplicada sobre el eje Y= 9.81m/s²

Tabla 21.

Fuerza de arranque y fricción de rodamientos lineales

Eje d (mm)	Fuerza de arranque Aprox. (N)	Fuerza de fricción Aprox. (N)
12	1.5	0.8
14	1.8	0.9
16	2	1
20	3	1.5

Fuente: (De la Peña García & Cañete Vela, 2014)

Tal como se expone en el apartado 2.7.1e, el diámetro externo de las poleas dentadas utilizadas es de 12.7mm, es decir un radio de 6.73mm como se verifica en la ecuación (10). El número de dientes es 20 y el paso es de 2mm.

Entonces:

$$R_{polea} = p * \frac{z}{2\pi} = 2 \text{ mm} * \frac{20}{2\pi} = 6.37 \text{ mm} \quad (10)$$

Para hacer uso de las ecuaciones (8) y (9), se necesita previamente realizar el cálculo de la velocidad a la que se desplaza toda la plataforma a lo largo del eje Y, expresada en mm/s y rpms, que se determina con las ecuaciones (11) y (12) respectivamente, ecuaciones desarrolladas de mejor manera en (DUET3D, 2016).

$$v_y = \frac{4(z * V)}{P_r * \pi * H * I} \quad (11)$$

$$RPM = \frac{2 * V}{P_r * \pi * H * I} \quad (12)$$

Donde:

- v_y : Velocidad a la que se desplaza la plataforma del eje Y en mm/s
- V: Voltaje de suministro al controlador= 12V
- Pr: Pasos por revolución del motor= 200*16= 3200pasos/rev
- H: Inductancia del motor= 4.8mH
- I: Corriente nominal del motor= 2A

$$v_y = \frac{4(20 * 12 \text{ V})}{3200 \frac{\text{pasos}}{\text{rev}} * \pi * 4.8 \text{ mH} * 1.5 \text{ A}} = 13.26 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$$

$$RPM = \frac{2 * 12 \text{ V}}{3200 \frac{\text{pasos}}{\text{rev}} * \pi * 4.8 \text{ mH} * 1.5 \text{ A}} = 0.332 \frac{\text{rev}}{\text{s}} * \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} = 19.9 \text{ rpm}$$

Entonces obtenida la velocidad a la cual el motor va a empezar a perder torque, se realiza el análisis para la obtención del tiempo que transcurrirá en el eje Y para que esto suceda, asumiendo que el desplazamiento límite que tendrá que realizar el carro está restringido por el volumen de trabajo aplicado, de tal forma que en el caso extremo de que el eje A esté accionado a 90°, es decir la bandeja esté suspendida verticalmente, se tendrá un desplazamiento máximo de 170mm, que es la altura dentro del volumen de trabajo. Por ende, mediante la ecuación (13):

$$v_y = \frac{\Delta_y}{t} \quad (13)$$

Donde:

- Δ_y : Desplazamiento máximo de la plataforma móvil del eje Y
- t: Tiempo en el cual la plataforma Y cumple con la velocidad límite

$$t = \frac{\Delta_y}{v_y} = \frac{170 \text{ mm}}{13.26 \frac{\text{mm}}{\text{s}}} = 12.82 \text{ s}$$

Es decir, que para la determinación de la aceleración angular del sistema se tiene una velocidad de la plataforma móvil de 0.332 rev/s, sabiendo que los pasos por revolución son de 3200, se tiene la velocidad angular de 1062.4 pasos/s, la misma que es ejecutada en el espacio límite durante 12.82s, por ende, se tiene 82.87 pasos/s² de aceleración angular del sistema.

A continuación, con los datos analizados y con el planteamiento de la ecuación (7) se realiza el cálculo para las características del motor NEMA 17 estudiado en este caso. Aparte de la masa de todo el conjunto de la cama de deposición de material, también se aplica sobre el sistema la masa de una pieza impresa en sus condiciones más extremas como se ve en la Figura 38.

$$T_{motor} = \left(R_{polea} (m * a + F_f) + I_n \left(\frac{W}{t} \right) * \pi * \theta * K \right) f$$

$$T_{motor} = (6.37((2.36 + 2.4) * 9.81 + 4 * 0.8) + 76(82.87) * \pi * 0.113 * 97.73)1.4$$

$$T_{motor} = 0.0306 \text{ Nm}$$

Gracias al torque que se ha podido calcular y al parámetro de velocidad 19.9 rpms que se debe alcanzar según los datos planteados, se puede determinar que el motor NEMA 17 de modelo KL17H248-15-4A (Anexo A-7) sugerido para el estudio, puede generar el torque necesario para desplazar al sistema giratorio basculante junto con el carro del eje Y sin ningún problema y como se puede observar en la Figura 59, las condiciones establecidas matemáticamente cumplen con las especificaciones requeridas, ya que la

relación establecida se sitúa por debajo de la curva de 12 V DC, que es el valor de la alimentación preestablecida.

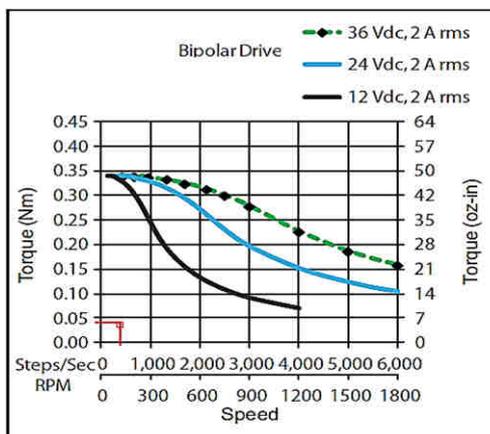


Figura 59. Curva torque VS. velocidad de NEMA 17 a variadas condiciones

Fuente: (PBC LINEAR, 2014)

i. Cálculos para esfuerzos por deflexión en el eje Y

Para determinar que el conjunto de subsistemas rediseñados basados en la cama de deposición de material giratoria basculante y de toda la estructura del carro que se traslada por el eje Y, no fallen por sobreesfuerzos debido a la deflexión excesiva del eje principal afectado, resulta necesario realizar un análisis estático de las condiciones críticas a las que puede estar sometido el sistema.

Como se tiene definido, el material que ha sido seleccionado para las varillas lisas que componen el eje Y ha sido acero inoxidable, al igual que las varillas que han estructurado los demás ejes del sistema de robot cartesiano del modelo base de impresora 3D.

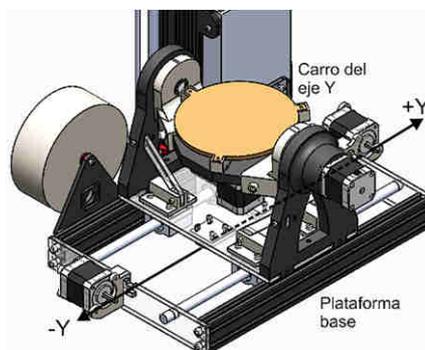


Figura 60. Cama rotativa acoplada a la plataforma base

Para el análisis respectivo se procede a calcular las dimensiones ideales del sistema de guiado (varillas lisas del eje Y) y también calcular los esfuerzos reales que someten a los elementos de la máquina, para finalmente compararlos con los esfuerzos de diseño que se establecen en tablas y de esta forma garantizar el correcto rediseño del sistema. (Mott, 2006)

Al emplear en el diseño de la estructura materiales dúctiles (acero inoxidable), se requiere hacer uso de la tabla de factores de diseño para materiales de dichas características (Tabla 22), tomando en cuenta el tipo de carga a la que se encuentra sometida la estructura y el sistema de guiado.

Tabla 22.

Factor de diseño para materiales dúctiles

Materiales Dúctiles	
Descripción	Factor de Diseño
Diseño de estructuras bajo cargas estáticas	1.25 – 2.0
Diseño de elementos de máquinas bajo cargas dinámicas	2.0 – 2.5
Diseño de estructuras estáticas bajo cargas dinámicas	2.5 – 4.0

Fuente: (Mott, 2006)

A continuación, se determina mediante la ecuación (14) el esfuerzo en donde se utiliza un factor de diseño de valor 3 establecido por la Tabla 22, debido a que la estructura que se analiza es estática (plataforma base) y las cargas que son aplicadas en los ejes son dinámicas debido al movimiento variante que puede realizar el carro del eje Y y a la masa que debe ir aumentando paulatinamente por la pieza impresa.

$$\sigma_d = \frac{S_y}{N} \quad (14)$$

Donde:

- S_y : Resistencia a la cedencia de acero inoxidable: 276 MPa (Anexo A-4)
- σ_d : Esfuerzo de diseño

- $N = 3$

$$\sigma_d = \frac{276 \text{ MPa}}{3}$$

$$\sigma_d = 92 \text{ MPa}$$

Para el cálculo de las dimensiones que debe tener el sistema de guiado del eje Y, se toma en cuenta la masa de la estructura que se soporta, en este caso la masa de toda la cama de deposición de material giratoria basculante (2.36Kg) que ejerce una carga concentrada normal directa, tal como se observa en la Figura 51. Para determinar el peso total que se aplica a las varillas lisas del eje Y se utiliza la ecuación (15).

$$W = m_{cgb} * g \quad (15)$$

Donde:

- W: Fuerza que actúa en el eje Y (Peso)
- m_{cgb} : Masa total de la cama giratoria basculante
- g: Fuerza de gravedad

$$W = (2.36 \text{ Kg}) * (9.81 \frac{m}{s^2})$$

$$W = 23.15 \text{ N}$$

Entonces el peso total que se encuentra ejerciendo la estructura sobre el sistema de guiado del eje Y es de 23.15N y la fuerza se encuentra distribuida para las dos varillas lisas, por lo tanto, cada una se ve afectada por 11.58N equitativamente. A la vez las varillas lisas tienen una elongación de 350mm equivalente a 0.35m, debido a la disposición de la estructura del modelo base Ormerod 2; conservándose el largo, pero aumentándose el ancho de la plataforma base, debido a que el nuevo sistema giratorio basculante requiere de mayor espacio en anchura más no en el largo de la plataforma en donde se asienta.

Para efectos de diseño se representa a la distribución de fuerzas y reacciones en la varilla lisa, como un diagrama de cuerpo libre basado en una viga simplemente apoyada que se encuentra soportando una carga perpendicular al eje Y, ubicada justo en la mitad del largo de la varilla que es en donde actúa la condición más extrema de esfuerzo, como se ha representado en la Figura 61. Para determinar la solución de los valores de las fuerzas

concurrentes en el sistema se procede a realizar la ley de la sumatoria de fuerzas y momentos para un cuerpo en equilibrio.

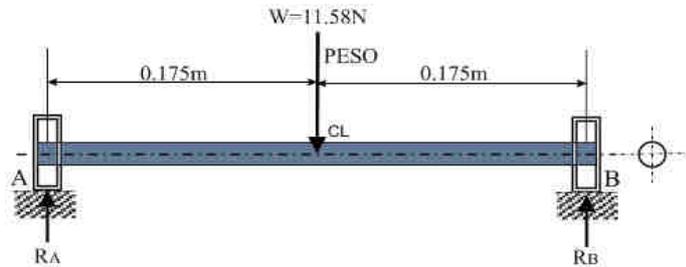


Figura 61. Diagrama de cuerpo libre de la varilla del eje Y

Sumatoria de fuerzas en Y y sumatoria de momentos en el punto A

$$\begin{aligned}\sum F_y &= 0 \\ +R_A - W + R_B &= 0 \\ R_A + R_B &= 11.58 \text{ N}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sum M_A &= 0 \\ -W(0.175 \text{ m}) + R_B(0.35 \text{ m}) &= 0 \\ =-(11.58 \text{ N})(0.175 \text{ m}) + R_B(0.35 \text{ m}) &= 0 \\ R_B &= 5.79 \text{ N} \\ R_A &= 5.79 \text{ N}\end{aligned}$$

Para efectos de cálculo también se considera que el momento flector máximo es generado en la mitad de la viga denominada en este caso AB y se procede a determinar el valor mediante la ecuación (16).

$$M_{max} = \frac{W * L}{4} \quad (16)$$

Donde:

- M_{max} : Momento flector máximo
- L: Longitud del eje

$$M_{max} = \frac{(11.58 \text{ N}) * (0.35 \text{ m})}{4}$$

$$M_{max} = 1.013 \text{ Nm}$$

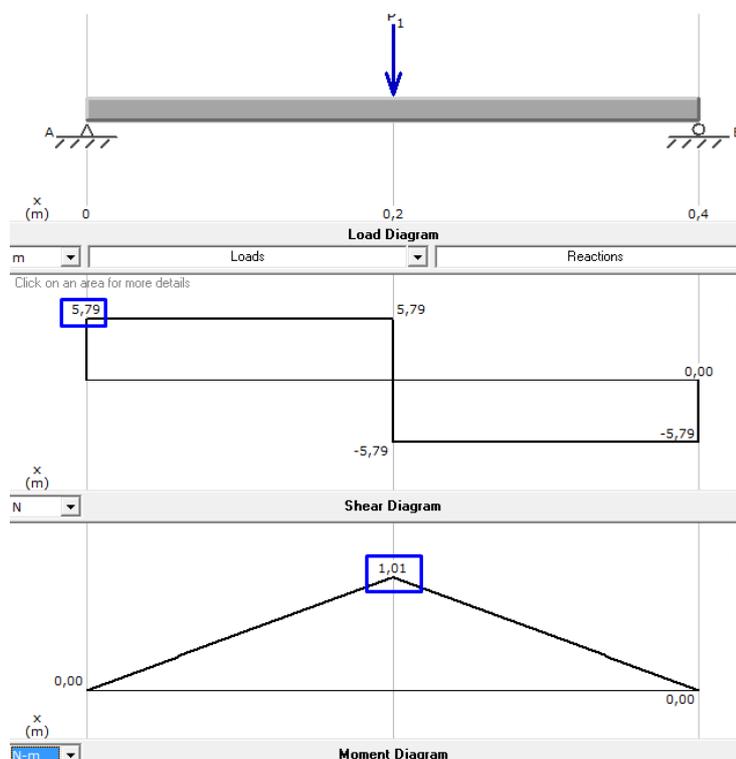


Figura 62. Diagramas de fuerza cortante y momento flector para eje Y

Para verificar los valores que se han expuesto mediante cálculos, se utiliza la potencialidad del programa MDSolids, el cual determina de forma automática los diagramas de análisis de fuerza cortante y de momento flector, los cuales se expresan en la Figura 62.

Posteriormente se procede a calcular el diámetro mínimo requerido para la flecha o eje, que en este caso es la varilla lisa con sección transversal circular como se observa en la Figura 61. Este proceso se lleva a cabo en función de la ecuación (17) en la cual se determina el esfuerzo máximo de un elemento y la ecuación (18) que determina el módulo de sección.

$$\sigma_{max} = \frac{M}{S} \quad (17)$$

$$S = \frac{\pi * D^3}{32} \quad (18)$$

Donde:

- D: Diámetro mínimo requerido para la varilla lisa
- M: Momento flector máximo
- Sy: Resistencia a la fluencia del acero inoxidable= 273MPa (Anexo A-4)
- N: Factor de seguridad= 3

De esta manera si de la ecuación (18) se despeja la variable que determina el diámetro mínimo requerido para la varilla lisa, se tiene:

$$D = \sqrt[3]{\frac{32 * M * N}{\pi * S_y}} \quad (19)$$

$$D = \sqrt[3]{\frac{32(1.013 \text{ N.m})(3)}{\pi(276 \text{ MPa})}}$$

$$D = 0.004823 \text{ m}$$

$$D \geq 4.82 \text{ mm}$$

Entonces, se ha determinado que el diámetro requerido que debe tener cada varilla lisa para el eje Y es de mínimo 4.82mm, pero se puede optar obviamente por utilizar uno de mayor magnitud, sin que se obtengan resultados negativos siempre y cuando no se alteren las condiciones de servicio del elemento. Es por ende que por la facilidad de acceso hacia el mercado nacional para conseguir varillas de 12mm de diámetro, se opta por implementar estas dimensiones hacia el rediseño del eje Y del prototipo.

Como punto restante queda el cálculo para determinar la deformación máxima por la deflexión que pueda sufrir la varilla lisa, que como se ha visto desde un inicio, se la ha considerado como una viga de sección circular en la cual se efectúa una carga simple central. Mediante la ecuación (20) se determina la deflexión máxima para el eje Y.

$$y_{max} = -\frac{F_y * L^3}{192 * E * I_y} \quad (20)$$

Donde:

- y_{max} : Deflexión máxima para el eje
- F_y : Fuerza máxima ejercida en cada eje, $W=11.58N$
- L : Longitud del eje= 0.35m
- E : Módulo de elasticidad del acero= 200GPa
- I_y : Momento de inercia de la sección circular de la varilla lisa

$$I_y = \frac{\pi * D^4}{64} \quad (21)$$

$$I_y = \frac{\pi(0.012 \text{ m})^4}{64}$$

$$I_y = 1.02 \times 10^{-9} \text{ m}^4$$

$$y_{max_y} = -\frac{(11.58N)(0.35m)^3}{192(200GPa)(1.02 \times 10^{-9} \text{ m}^4)}$$

$$y_{max_y} = -1.26 \times 10^{-5} \text{ m}$$

$$y_{max_y} = -1.26 \times 10^{-2} \text{ mm}$$

La deflexión que se produce a máxima carga estática sobre las varillas lisas del eje Y es de carácter mínimo, sin embargo, se realiza el análisis para la comparación de un diseño óptimo aplicando la ecuación (22) que determina el esfuerzo máximo producido en cada varilla lisa, en este caso ingresando el dato del diámetro seleccionado de 12mm.

$$\sigma_{max} = \frac{32 * M}{\pi * D^3} \quad (22)$$

Donde:

- M = Momento flector máximo
- D = Diámetro de la varilla lisa

$$\sigma_{max} = \frac{32 * (1.013 Nm)}{\pi * (0.012 m)^3}$$

$$\sigma_{max} = 5.97 MPa$$

Como parámetro esencial de diseño y como se ha establecido desde un inicio, el esfuerzo máximo real que ha sido calculado debe ser siempre menor al esfuerzo de diseño. Por ende:

$$\sigma_d \geq \sigma_{max}$$

$$92 MPa \geq 5.97 MPa$$

Esto demuestra finalmente que las varillas lisas adaptadas como sistema de guiado para el eje Y, se encuentran totalmente seguras ante los esfuerzos que puedan causarse por las cargas estáticas de la estructura del carro del eje Y, de todo el sistema de la cama giratoria basculante e inclusive de piezas que sean fabricadas encima de la cama.

Con la ayuda del software de diseño CAD y su potencialidad en el método de análisis por elementos finitos, se procede a corroborar el diseño seguro del sistema de guiado, estudiado en este caso para la varilla lisa del eje Y.

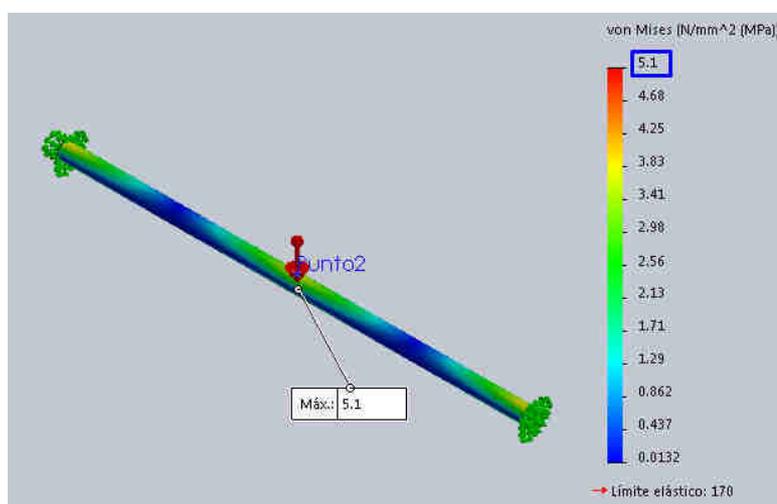


Figura 63. Análisis de Von Misses para la varilla del eje Y

Como se puede observar en la Figura 63, el máximo esfuerzo calculado de 5.9MPa es similar al esfuerzo determinado mediante software, brindando las garantías de diseño.

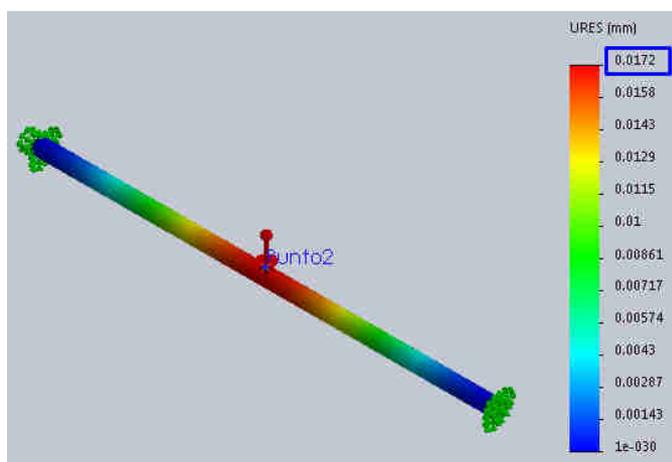


Figura 64. Análisis de deflexión máxima de la varilla del eje Y

Como se puede observar en la Figura 64, siendo 0.0126 mm el valor de la deflexión máxima calcula, se interpreta un valor bastante similar determinado mediante software.

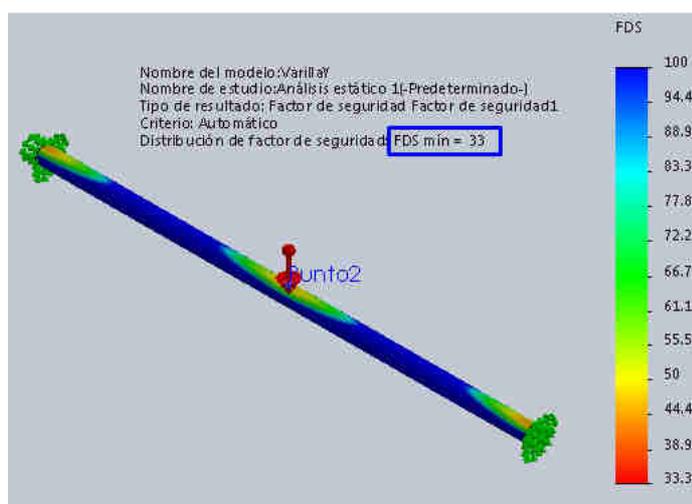


Figura 65. Factor de seguridad determinado para diseño del sistema sobre el eje Y

Se ha podido comprobar mediante la Figura 65, que el factor de diseño es mayor al establecido, por lo cual se garantiza el modelo general del sistema de la cama giratoria basculante, brindando la efectiva seguridad ante fallos como la deflexión de los ejes.

Sin embargo, ante todo lo establecido, se debe realizar un diseño más robusto, tomando en cuenta que el carro del eje Y, conjuntamente con los movimientos oscilatorios que se produzcan por el accionamiento de los ejes giratorios basculantes y por el incremento paulatino de material de impresión sobre la cama de deposición, puede afectar de cierto

modo a las varillas lisas con cargas de naturaleza repetitiva. Por ende, se pretende incorporar estos parámetros externos al diseño.

La carga neta que afecta a las varillas lisas del eje Y (ecuación (23)) se ve establecida por el caso extremo de sumar la masa de la estructura de la cama giratoria basculante más la masa de la pieza fabricada en PLA en toda la capacidad de trabajo que disponga la máquina, sabiendo que con dicha pieza se puede producir un movimiento basculante generado por el eje A. Entonces se suma la masa de la estructura vista en la Figura 38, conjuntamente con la del campo de trabajo total que se verifica en la Figura 38.

$$F_{NETA} = \frac{W + F_1}{2} \quad (23)$$

Donde:

- W: Peso de toda la estructura de la cama giratoria basculante= 23.15N
- F1: Peso ejercido por pieza fabricada en todo el volumen de trabajo

$$F_{NETA} = \frac{23.15 \text{ N} + (2.4 * 9.81) \text{ N}}{2}$$

$$F_{NETA} = 23.35 \text{ N}$$

Por lo tanto, la fuerza que se ejerce para cada varilla lisa en este caso, es equivalente a 23.35N. Y de la misma forma se procede con los pasos estructurados en el diseño para cargas estáticas, en donde se determinan las reacciones que mantienen al sistema en equilibrio, se determina el momento flector máximo y todo esto puede ser aplicado brevemente en el software MDSolids (Figura 66) para continuar con la determinación del esfuerzo máximo con las nuevas condiciones dadas.

Datos:

- M: Momento flector máximo para la nueva condición= 2.04Nm
- D: Diámetro de la varilla lisa= 0.012m

$$\sigma_{max} = \frac{32 * (2.04 \text{ Nm})}{\pi * (0.012 \text{ m})^3}$$

$$\sigma_{max} = 12.03 \text{ MPa}$$

$$y_{max,y} = -\frac{(23.35N)(0.35m)^3}{192(200GPa)(1.02 \times 10^{-9}m^4)} = -2.56 \times 10^{-2} mm$$

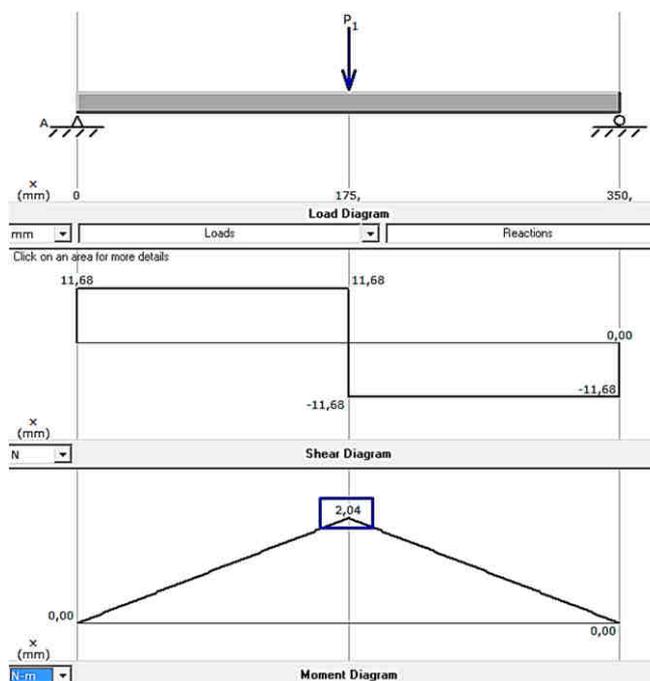


Figura 66. Diagrama de momento flector máximo para nuevas condiciones de eje Y

Debido a que en este caso se realiza un análisis para cargas dinámicas que pueden ser repetitivas sobre el sistema, se debe hacer uso de la Tabla 23, que representa la nueva condición para el esfuerzo de diseño referencial.

Tabla 23.

Fórmulas para esfuerzo de diseño

Forma de Carga	Materiales Dúctiles	Materiales Frágiles
Cargas estáticas	$\sigma_d = S_y/8$	$\sigma_d = S_u/6$
Cargas repetidas	$\sigma_d = S_u/8$	$\sigma_d = S_u/10$
Impacto o Choque	$\sigma_d = S_u/12$	$\sigma_d = S_u/15$

Fuente: (Mott, 2006)

Entonces se utiliza la ecuación que determina el esfuerzo de diseño para materiales dúctiles, como lo es el acero inoxidable, y también para análisis de cargas repetitivas en este caso.

$$\sigma_d = \frac{S_u}{8} \quad (24)$$

Donde:

- S_u : Resistencia máxima de acero inoxidable: 758 MPa (Anexo A-4)

$$\sigma_d = \frac{758 \text{ MPa}}{8}$$

$$\sigma_d = 94.75 \text{ MPa}$$

Finalmente, como se ha mencionado al inicio de este apartado, para poder satisfacer las necesidades de diseño adecuado, siempre el esfuerzo de diseño se toma como referencia y debe ser mayor al esfuerzo máximo real calculado con las condiciones para el caso, de esta manera el sistema se considera seguro para su debida construcción e implementación.

$$\sigma_d \geq \sigma_{max}$$

$$94.75 \text{ MPa} \geq 12.03 \text{ MPa}$$

Nuevamente con la ayuda del software de diseño CAD, se procede a corroborar el diseño seguro del sistema de guiado, estudiado en este caso para la varilla lisa del eje Y, para este nuevo análisis incrementando el peso máximo de una pieza impresa sobre el sistema giratorio basculante.

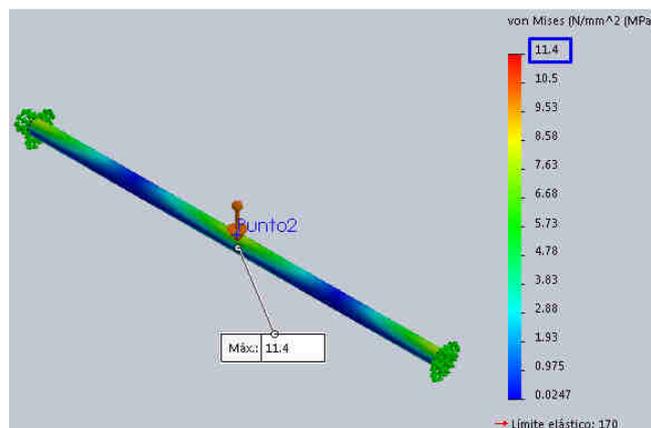


Figura 67. Análisis de Von Mises para la varilla del eje Y con carga extrema

Como se puede observar en la Figura 67, el máximo esfuerzo calculado de 12.03MPa es similar al esfuerzo determinado mediante software, brindando las garantías de diseño.

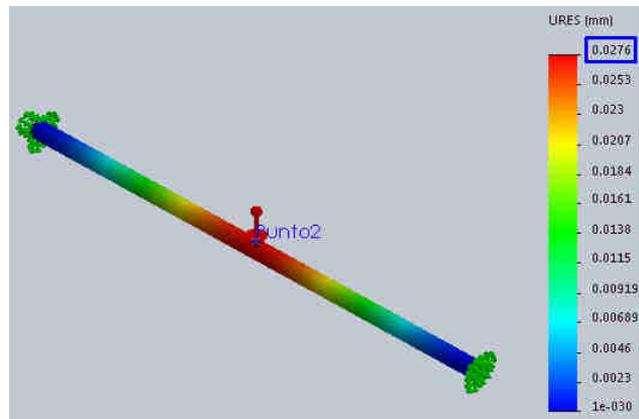


Figura 68. Análisis de deflexión máxima con carga extrema en Y

Como se puede observar en la Figura 68, siendo 0.0256 mm el valor de la deflexión máxima calcula, se interpreta un valor bastante similar determinado mediante software.

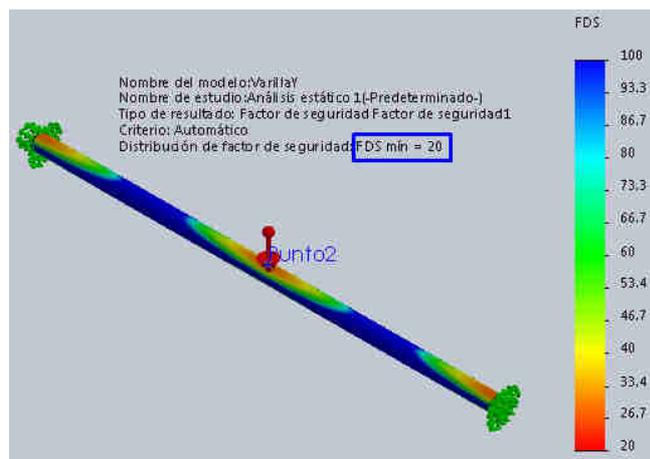


Figura 69. Análisis de factor de diseño con carga máxima sobre eje Y

Se ha podido comprobar mediante la Figura 69, que el factor de diseño es mayor al establecido, por lo cual se garantiza el modelo general del sistema de la cama giratoria basculante más la pieza impresa de condiciones extremas, brindando la efectiva seguridad ante fallos como la deflexión en las varillas lisas del eje Y.

2.7.2 Cabezal del sistema de extrusión

En razón de los planteamientos de rediseño del sistema de extrusión se sabe que al readecuar un soporte más grande para que sostenga al Hot End y lo lleve hasta la mesa de trabajo, se incrementará material en la construcción de nuevos elementos, ya sean estos

imprimibles o no imprimibles, en donde se incrementará peso que recaerá directamente sobre el montaje del eje X, el mismo que es de una estructura en voladizo como se ha podido observar en el modelo base Ormerod 2, en la Figura 31.

a. Carro del eje X y Hot End

Tabla 24

Características de modelos de Hot End de simple montaje

MODELO	CARACTERÍSTICAS	IMAGEN
Budas Nozzle	Refrigerado: Aletas Nozzle: Intercambiable Fabricante: español-Fairy Nozzle Versión: 1.4 Popularidad: Alta	
E3D	Refrigerado: Aletas Nozzle: Intercambiable Fabricante: 3DE Versión: V6 Popularidad: Alta	
J-head MKIV	Refrigerado: No Nozzle: Fijo Fabricante: China Versión: 4.0 Popularidad: Media	
Simple	Refrigerado: No Nozzle: Fijo Fabricante: China Versión: N/A Popularidad: Media	

Fuente: (Romero Sánchez, 2014)

Para que las fuerzas aplicadas sobre el eje X no hagan que la estructura falle por sobreesfuerzos, se plantea la posibilidad de reestructurar a la pieza soporte que transporta al Hot End, la misma que es llamada “Carro del eje X”. Para que el peso adicionado no

afecte a la estructura, se equilibra extrayendo material no incidente en la funcionalidad del prototipo de impresión 3D de cinco ejes, por ende, se decide también cambiar el modelo de Hot End por uno más simple pero efectivo y con un sistema de enfriamiento más liviano. En la Tabla 24 y Tabla 25 se realiza la selección del nuevo Hot End.

Tabla 25.

Selección de alternativa de modelo de Hot End

Criterios de selección	Budas	E3D V6	MKIV	Simple
Refrigeración	3	3	0	0
Intercambiabilidad	4	4	2	2
Estructura	3	4	2	1
Actualizaciones	3	3	2	1
Calidad	4	4	3	2
TOTAL	17	18	9	6

Se ha seleccionado al Hot End denominado E3D V6 metálico, debido a que aparte de ser utilizado popularmente, es efectivo y de simple montaje, puede ser intercambiable por repuestos, ya sean estos del disipador, del bloque calefactor, del elemento calefactor, del sensor de temperatura y de su sistema de enfriamiento, que por cierto, éste último es bastante liviano a la vez. Más características de este elemento se encuentran en el anexo A-8 y una representación de su estructura se visualiza en la Figura 70.

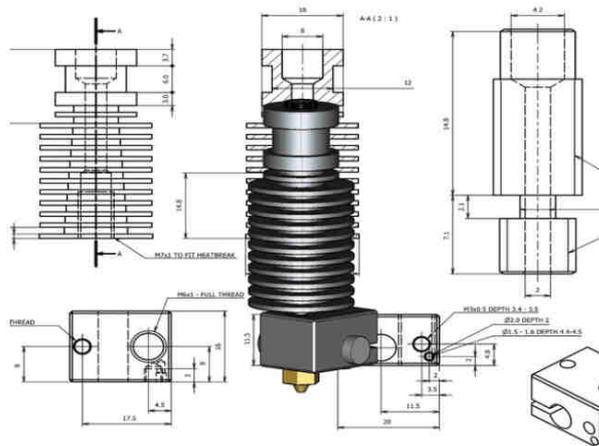


Figura 70. Estructura de Hot End E3D V6 metálico

Fuente: (Armada Pita, 2015)

El nuevo cabezal de extrusión se ha modelado en función de la adaptación del Hot End E3D V6 metálico seleccionado, para que el carro del eje X sea soporte de dicho Hot End y tenga la longitud para que la boquilla alcance al origen de coordenadas del sistema giratorio basculante que se ve en la Figura 40.

Para el caso, como en la superficie circular de trabajo (bandeja de impresión) el radio total es de 70mm, se ha diseñado a toda la estructura soporte del HotEnd con una elongación de 80mm desde el eje X hacia abajo para que no interceda ni llegue a chocar directamente con la bandeja de impresión al momento de accionarse el eje A a 70° , justo en el origen de coordenadas al inicio de una impresión, como se verifica en la Figura 71.

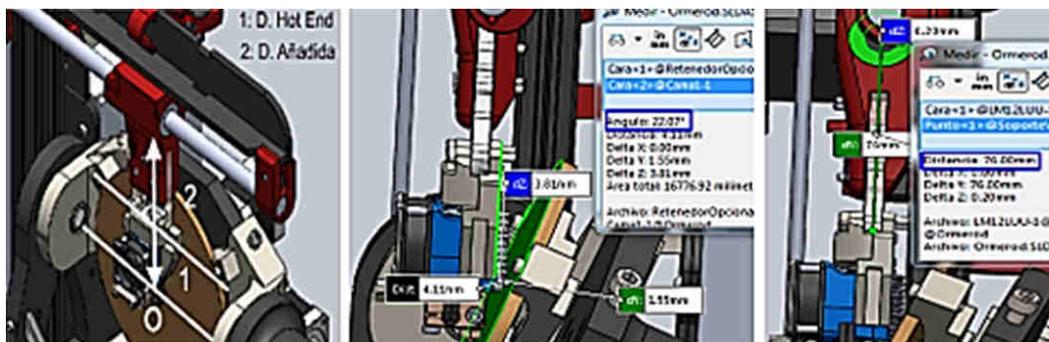


Figura 71. Especificación dimensional y funcional para rediseño del carro de X

b. Mecanismo extrusor y mecanismo transmisor de movimiento del carro X

Existen otras variantes que deben ser consideradas dentro del cabezal de extrusión del material, como por ejemplo si el extrusor debe ser modificado para que vaya directamente acoplado al Hot End o si por el contrario puede ir separado de forma independiente (de tipo Bowden como es el modelo original de Ormerod 2), también se analiza si se debe modificar su mecanismo de extrusión de material mediante motor NEMA 17, ya sea esto con un engranaje de tipo reductor o si se lo puede realizar con tracción de forma directa. (Armada Pita, 2015)

Para el caso se conserva el aspecto de mecanismo de extrusión definido en el modelo base, ya que no afecta ni en incremento de peso, ni en efectos colaterales de funcionalidad del prototipo, quedando el extrusor con las mismas configuraciones de la impresora Ormerod 2, que en esta situación representa un tipo Bowden, por donde se desliza el

material termoplástico y gracias a un sistema de engranaje reductor para mejor control de la cantidad de material extruido. Toda la teoría aplicada se expone en el apartado 1.10.3.

De la misma forma en lo que concierne al mecanismo de transmisión de movimiento para el soporte del Hot End, el cual se basa en el sistema de correa y poleas dentadas accionadas mediante un motor NEMA 17, se lo considera estable dentro del dinamismo de la máquina, sin que afecte al rediseño de la misma, ya que ha venido garantizando la tracción necesaria y la debida precisión de desplazamiento dentro del modelo base original.

En resumen, para este apartado se toma en cuenta la misma disposición del mecanismo de extrusión y el mismo sistema de transmisión de movimiento del carro del eje X, que son propios del modelo base, pero que resulta necesario ingresarlos al estudio de rediseño ya que son parte del conjunto del cabezal de extrusión, el cual ha debido ser analizado para remodelación parcial. En la Figura 72 se distingue el trabajo de modificación.

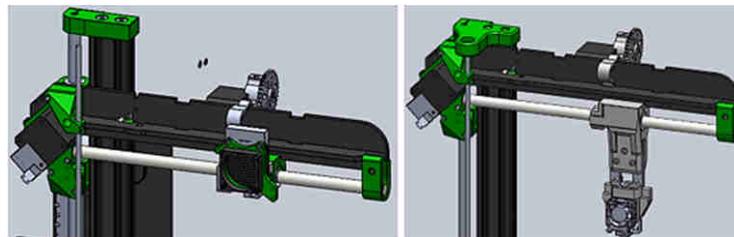


Figura 72. Comparación de rediseño de cabezal de extrusión

c. Modelamiento CAD para rediseño de sistema de extrusión

El diseño para el soporte del Hot End (Ver Figura 73), se basa en transmitir estabilidad hacia la boquilla de extrusión para que la deposición de material sea uniforme y se evite movimientos basculantes o demás movimientos extraños por parte de la estructura.

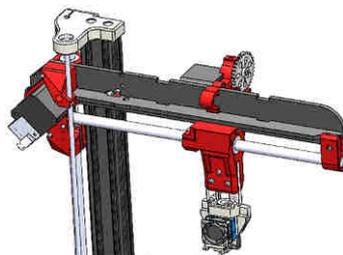
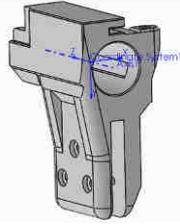
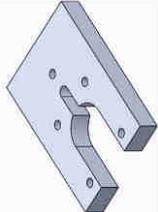
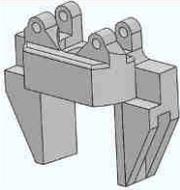


Figura 73. Modelamiento de montaje de sistema de extrusión rediseñado

En la Tabla 26 se expone el modelamiento CAD de las piezas que componen la nueva estructura del cabezal de extrusión, específicamente del carro del eje X, soporte del Hot End, junto con demás aditamentos necesarios.

Tabla 26.

Modelamiento de piezas para sistema de extrusión

Nombre	Representación gráfica	Descripción	Cantidad
Carro de eje X		Pieza imprimible que sostiene a toda la estructura del HotEnd y es el carro móvil del eje X.	1
Placa soporte		Pieza de acrílico para cortar con láser, que baja aún más al HotEnd, pero al ser de acrílico abarata costos.	1
Sujetador de HotEnd		Pieza imprimible que sirve como abrazadera para el HotEnd y lo sujeta con la placa soporte.	1
Soporte de sensor infrarrojo		Pieza imprimible que sirve para sujetar al sensor infrarrojo de proximidad.	1

d. Cálculos para esfuerzos por deflexión en el eje X

El conjunto de elementos que han sido rediseñados basados en el cabezal de extrusión, específicamente en el nuevo soporte del HotEnd (Figura 73), deben ser estrictos a no fallar por sobreesfuerzos debido deflexión excesiva en el eje principal afectado, en este caso el eje X, de donde se suspende el soporte del HotEnd, por ende, resulta necesario realizar un análisis estático de las condiciones críticas a las que puede estar sometido el sistema.

Como se ha dicho en el análisis de esfuerzos por deflexión del eje Y, el material que ha sido seleccionado para las varillas lisas que componen el rediseño ha sido acero inoxidable 316L, al igual que las varillas que han estructurado los demás ejes del sistema de robot cartesiano del modelo base de impresora 3D.

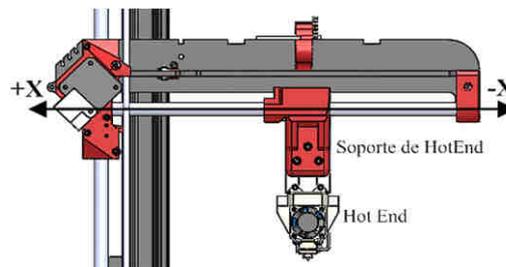


Figura 74. Estructura móvil, HotEnd y su soporte en el eje X

De igual forma, para el análisis respectivo se procede a calcular las dimensiones ideales del sistema de guiado (varilla lisa del eje X) y también calcular los esfuerzos reales que someten a los elementos de la máquina, para finalmente compararlos con los esfuerzos de diseño que se establecen en tablas y de esta forma garantizar el correcto rediseño del sistema.

Se utiliza de la misma manera la Tabla 22 para materiales dúctiles, en donde se aprecian los valores recomendados para el factor de diseño aplicado a diferentes condiciones, en este caso para el diseño de estructuras bajo cargas estáticas, ya que en el eje X la magnitud de la carga no varía con respecto al tiempo, es decir, al factor de diseño se le puede asignar el valor de 2. (Mott, 2006)

A continuación, se determina mediante la ecuación (14) el esfuerzo de diseño, en donde como se ha explicado, el factor de diseño es igual a 2 y la resistencia a la cedencia del acero inoxidable es igual a 276MPa (Anexo A-4).

$$\sigma_d = \frac{276 \text{ MPa}}{2}$$

$$\sigma_d = 138 \text{ MPa}$$

Para el cálculo de las dimensiones que debe tener el sistema de guiado del eje X, se toma en cuenta la masa de la estructura que se soporta suspendida de dicho eje X, en este caso es la sumatoria de la masa del Hot End junto con la de todos los elementos que se

encuentran estructurando el soporte del Hot End. Todo este sistema ha sido medido desde una balanza, obteniendo el valor de la masa total de 0.233Kg. Se determina entonces el peso total que se aplica a la varilla lisa del eje X mediante la ecuación (15) y se representa un diagrama de cuerpo libre en la Figura 75.

$$W = (0.233 \text{ Kg}) * (9.81 \frac{m}{s^2})$$

$$W = 2.29 \text{ N}$$

La varilla lisa del eje X tiene una elongación de 350mm equivalente a 0.35m, debido a la disposición de la estructura del modelo base Ormerod 2; la fuerza aplicada de 2.29N recae directamente sobre la varilla y se analiza la condición en la que más esfuerzo se genera por deflexión para una viga simplemente apoyada, que es colocando a la carga en el centro del eje como se observa en la Figura 75 y se procede a realizar la sumatoria de fuerzas y de momentos.

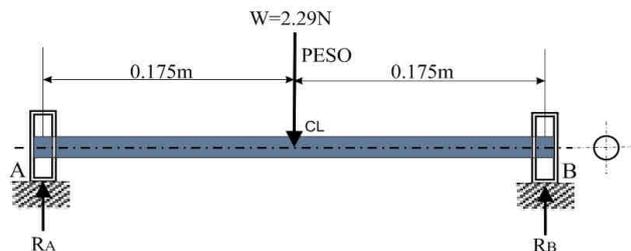


Figura 75. Diagrama de cuerpo libre de la varilla del eje X

$$\sum F_y = 0$$

$$+R_A - W + R_B = 0$$

$$R_A + R_B = 2.29 \text{ N}$$

$$\sum M_A = 0$$

$$-W(0.175 \text{ m}) + R_B(0.35 \text{ m}) = 0$$

$$-(2.29 \text{ N})(0.175 \text{ m}) + R_B(0.35 \text{ m}) = 0$$

$$R_B = 1.145 \text{ N}$$

$$R_A = 1.145 \text{ N}$$

Para efectos de cálculo también se considera que el momento flector máximo es generado en la mitad de la viga denominada en este caso AB y se procede a determinar el valor mediante la ecuación (16).

$$M_{max} = \frac{(2.29 \text{ N}) * (0.35 \text{ m})}{4}$$

$$M_{max} = 0.2 \text{ Nm}$$

Se verifican los valores que se han expuesto mediante cálculos, utilizando MDSolids, como se ve expresado en la Figura 76.

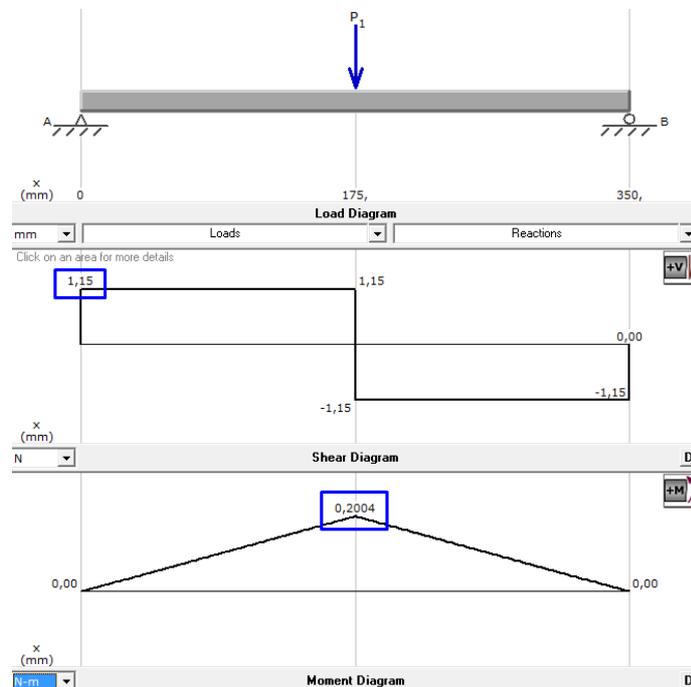


Figura 76. Diagramas de fuerza cortante y momento flector para eje X

Posteriormente se procede a calcular el diámetro mínimo requerido para la flecha o eje. Se despeja el valor del diámetro de la ecuación (18) la cual sirve para determinar el módulo de sección.

$$D = \sqrt[3]{\frac{32(0.2 \text{ N.m})(2)}{\pi(276 \text{ MPa})}}$$

$$D = 0.002453 \text{ m}$$

$$D \geq 2.45 \text{ mm}$$

Entonces, se ha determinado que el diámetro requerido que debe tener cada varilla lisa para el eje X es de mínimo 2.45mm, pero se puede optar obviamente por utilizar uno de mayor magnitud, sin que se obtengan resultados negativos siempre y cuando no se alteren las condiciones de servicio del elemento. Es por ende que por la facilidad de acceso hacia el mercado nacional para conseguir varillas de 12mm de diámetro, se opta por implementar estas hacia el rediseño del eje X del prototipo.

Como punto restante queda el cálculo para determinar la deformación máxima por la deflexión que pueda sufrir la varilla lisa, que como se ha visto desde un inicio, se la ha considerado como una viga de sección circular en la cual se efectúa una carga simple central. Mediante la ecuación (20) se determina la deflexión máxima para el eje X.

$$I_y = \frac{\pi(0.012 \text{ m})^4}{64}$$

$$I_y = 1.02 \times 10^{-9} \text{ m}^4$$

$$y_{max_y} = -\frac{(2.29 \text{ N})(0.35 \text{ m})^3}{192(200 \text{ GPa})(1.02 \times 10^{-9} \text{ m}^4)}$$

$$y_{max_y} = -0.25 \times 10^{-5} \text{ m}$$

$$y_{max_y} = -0.25 \times 10^{-2} \text{ mm}$$

La deflexión que se produce a máxima carga estática sobre la varilla lisa del eje Y es de carácter mínimo, sin embargo, se realiza el análisis para la comparación de un diseño óptimo aplicando la ecuación (22) que determina el esfuerzo máximo producido en cada varilla lisa, en este caso ingresando el dato del diámetro seleccionado de 12mm.

$$\sigma_{max} = \frac{32 * (0.2 \text{ Nm})}{\pi * (0.012 \text{ m})^3}$$

$$\sigma_{max} = 1.17 \text{ MPa}$$

Como parámetro esencial de diseño y como se ha establecido desde un inicio, el esfuerzo máximo real que ha sido calculado debe ser siempre menor al esfuerzo de diseño. Por ende:

$$\sigma_d \geq \sigma_{max}$$

$$92 \text{ MPa} \geq 1.17 \text{ MPa}$$

Esto demuestra finalmente que la varilla lisa como sistema de guiado para el eje X, continúa totalmente segura ante los esfuerzos que puedan causarse por las cargas de la estructura del carro del eje X que se desplaza suspendido llevando al Hot End.

Con la ayuda del software de diseño CAD y su potencialidad en el método de análisis por elementos finitos, para este caso se procede también a corroborar el diseño seguro del sistema de guiado, estudiando esta vez la varilla lisa del eje X.

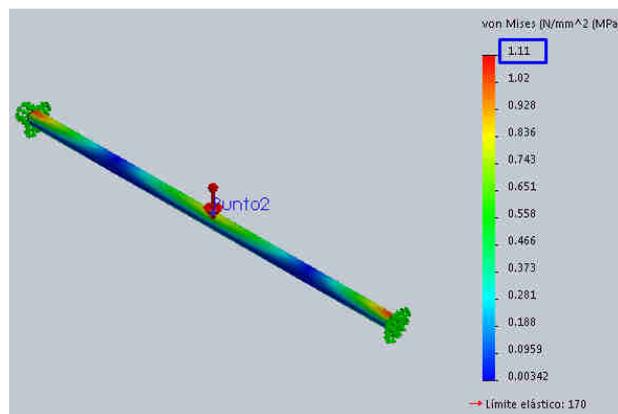


Figura 77. Análisis de Von Misses para la varilla del eje X

Como se puede observar en la Figura 77, el máximo esfuerzo calculado de 1.17MPa es similar al esfuerzo determinado mediante software, brindando las garantías de diseño.

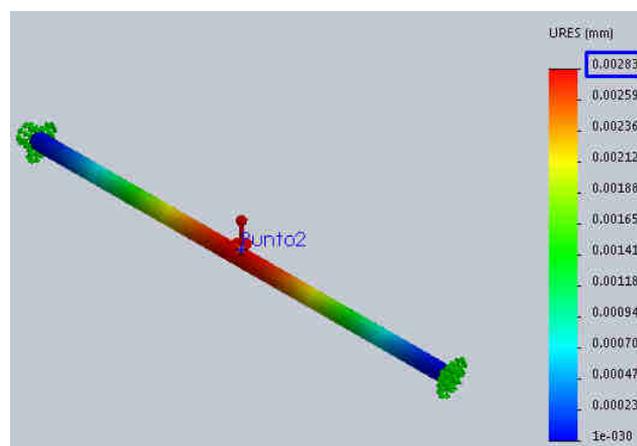


Figura 78. Análisis de deflexión máxima de la varilla del eje X

Como se puede observar en la Figura 78, siendo 0.0025 mm el valor de la deflexión máxima calcula, se interpreta un valor bastante similar determinado mediante software.

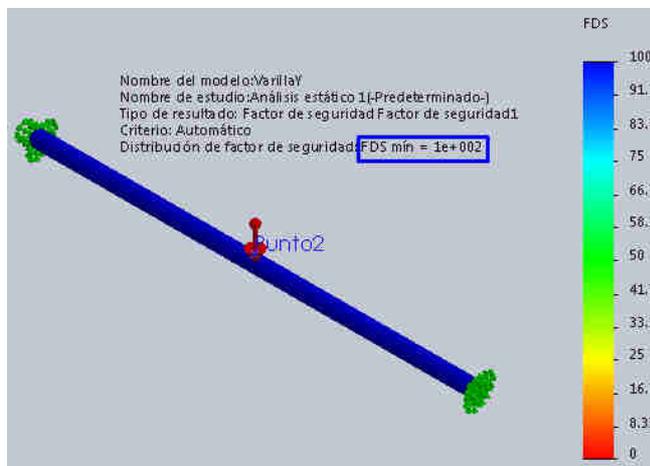


Figura 79. Factor de seguridad determinado para diseño de sistema sobre el eje X

Se ha podido comprobar mediante la Figura 79, que el factor de diseño es mayor al establecido, por lo cual se garantiza el modelo general del sistema de extrusión, brindando la efectiva seguridad ante fallos como la deflexión del eje.

2.7.3 Sistema eléctrico y electrónico del prototipo con cinco ejes

a. Tarjeta electrónica de control

Como se ha podido apreciar en la Tabla 7, las características de las tarjetas electrónicas de control expuestas nos brindan varias facilidades para poder establecer un sistema de impresión 3D básico, pero la cantidad de pines para periféricos de entrada y salida que requiere el prototipo de cinco ejes, lo tiene la tarjeta electrónica Duet 0.8.5, que con su particular expansión Duex4, brinda un soporte de adición de hasta cuatro motores y cuatro sensores de presencia al sistema, aparte de los cuatro que ya posee.

La tarjeta electrónica Duet 0.8.5 es propia del modelo base Ormerod 2, por lo cual se complementan directamente entre sí para ser adaptados en este proyecto, además de que esta tarjeta fue específicamente diseñada para ser compatible con software de código abierto. Es ideal para esta investigación ya que posee incorporación de drivers A4892 en la misma placa, con micropaso 1/16 para control de motores PaP, posee comunicación

Ethernet para el control mediante interfaz web y además dispone de ranura para la inserción de tarjeta MicroSD para la lectura de códigos G. (RepRap, 2017)

b. Determinación del sensor de presencia

Como se ha descrito en el apartado 2.7.1, por normas de seguridad de maquinaria CNC y para poder orientar al prototipo espacialmente se requiere de la incorporación de sensores de presencia al sistema rediseñado. De este modo la impresión 3D es mejor calibrada para una mayor calidad del producto, ya que se conoce de antemano el entorno de impresión en el que se fabrica la pieza. Se tienen principalmente en el mercado los sensores electrónicos y los denominados finales de carrera (electromecánicos).

Opción 1: Final de carrera

Las características del sensor final de carrera (Figura 16) se describen de mejor manera en el apartado 1.10.3e, para lo cual en este caso sólo se realiza una descripción de ventajas y desventajas basadas en la teoría y prueba de dichos dispositivos.

Tabla 27.

Ventajas y desventajas de los Finales de carrera

Ventajas	Desventajas
Facilidad de instalación	Velocidad de detención
Robustez del sistema	Posibilidad de rebotes en el contacto
Insensible a estados transitorios	Fuerza de actuación
Trabaja a tensiones altas	
Inmune a la electricidad estática	

Fuente: (Romero Barreno & Vaca Morales, 2015)

Opción 2: Sensor infrarrojo de proximidad de Ormerod 2.

El sensor de proximidad modulado de la impresora 3D Ormerod 2 “Mini IR sensor” (Ver Figura 80) consta de un emisor y un detector de infrarrojos con el cableado de cuatro hilos para conectarlo a la tarjeta controladora Duet 0.8.5.

Funciona haciendo rebotar la luz infrarroja de alguna superficie. La intensidad del reflejo da la distancia en la cual la superficie se encuentra respecto al dispositivo. En un rango de unos pocos milímetros, tiene una precisión de aproximadamente 10 micras.



Figura 80. Sensor infrarrojo "Mini IR Sensor"

Fuente: (RepRap, 2017)

El detector también recogerá cualquier otra radiación infrarroja en el entorno, por lo que el dispositivo ante estos factores puede funcionar de manera errónea, sin embargo, la lectura con el emisor apagado se resta de la lectura con el emisor encendido para eliminar la interferencia ambiental de IR.

Selección de sensor de proximidad para el sistema rediseñado

Tabla 28.

Selección de alternativa de tipo de sensor de proximidad

Criterios de selección	Opción 1	Opción 2
Características generales	3	2
Manipulación	4	3
Disponibilidad	4	2
Facilidad programación	3	2
TOTAL	14	9

Se ha seleccionado el sensor electromecánico (final de carrera) para que limite los movimientos del nuevo sistema basculante y los desplazamientos del carro del eje X y Y, debido a su fácil manipulación, su gran disponibilidad en el mercado nacional y la fácil adaptación a la programación de control, como se constata en la Tabla 28.

Para la debida distancia entre la boquilla y la bandeja de impresión se conserva la disposición del sensor infrarrojo de proximidad por su efectividad en este caso y porque ya se encuentra declarado en la configuración de control del firmware. Es decir que, para el posicionamiento de la máquina se utilizan los sensores de los dos tipos.

c. Alimentación del sistema eléctrico-electrónico

Para la determinación del dispositivo electrónico que entregue la potencia adecuada al sistema de impresión general, se toma en cuenta la fuente de alimentación electrónica denominada S-250-12, que ya se ha venido utilizando en la impresora 3D de modelo base Ormerod 2 y también en otros sistemas de impresión como la popular Prusa I3.

Resulta muy satisfactorio el uso de la fuente de voltaje S-250-12 ya que se trata de una fuente conmutada que entrega sólo la corriente necesaria a la carga, que a propósito sus 20A son suficientes para la alimentación de los siete motores PaP y de la misma forma se satisface al sistema con la alimentación de 12V, como se lo ha visto para la energización debida de la placa electrónica y en la selección de condiciones de los dispositivos.



Figura 81. Fuente de tensión S-250-12 para el sistema electrónico

d. Conexión del sistema eléctrico-electrónico

Dadas las consideraciones iniciales del prototipo de impresora 3D de cinco ejes, el sistema necesita de un total de siete motores PaP que conjugan su funcionalidad entre sí, existe uno para la extrusión del filamento de PLA que sale derretido por la boquilla del HotEnd, dos para la correcta manipulación del sistema de guiado cartesiano (movimientos lineales de X y Z), dos para la disposición giratoria y basculante de la cama de deposición de material y finalmente dos para transportar todo el conjunto del sistema giratorio basculante a través del eje Y.

La conexión estipulada de la alimentación al sistema, de los motores PaP, del calentador de material, del sistema refrigerante y los respectivos sensores ya sean de temperatura y de presencia, se encuentra especificada en la Figura 82.

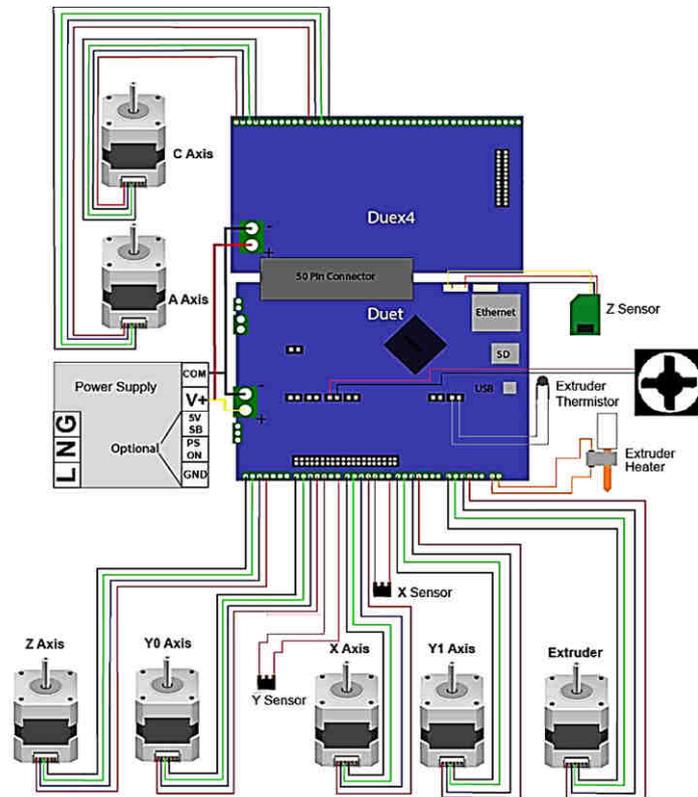


Figura 82. Configuración de la electrónica para adaptación de cinco ejes

Fuente: (RepRap, 2017)

- Los motores son de configuración bipolar y se conectan a las salidas de sus respectivos drivers implementados dentro de la tarjeta Duet 0.8.5. La señal de dichos controladores envía los pulsos para que cada motor se mueva a la posición indicada mediante micropasos de 1/16 para los ejes cartesianos y de 1/304 para los ejes rotativos, como se ha establecido en el apartado 2.7.4d.
- Los finales de carrera se encuentran con una señal en bajo, hasta que se establece la posición Home de cada eje, los interruptores son accionados y sus estados lógicos cambian a alto, señales que son interpretadas por las entradas digitales de la tarjeta de control Duet.

- El sensor infrarrojo de proximidad envía una señal análoga que determina los valores de la distancia entre la boquilla y la superficie de la bandeja de impresión, para que, dada la altura adecuada, el desplazamiento del eje Z sea calibrado con precisión.
- La bandeja de deposición de material no ha sido diseñada con conexión eléctrica de calentadores debido al dinamismo del sistema giratorio del eje C, que provocaría enredos en el cableado del sistema. Para casos de investigación no es necesaria la “cama caliente” y este tema puede ser estudiado para proyectos posteriores dentro del prototipo.
- Las señales eléctricas que recibe el Hot End están definidas por el modelo E3D V6 y el control automático PID que viene configurado en el firmware seleccionado, los parámetros físicos dentro del Hot End son monitoreados y controlados desde la interfaz web. El consumo de corriente que circula por el fundidor debe ser considerado, por lo cual se aplica la ecuación (25) para hallar su valor, sabiendo que se trata de una resistencia cerámica de 40W.

$$P_F = I_R * V \quad (25)$$

Donde:

- P_F : Potencia eléctrica del fundidor= 40W
- I_R : Corriente que circula por la resistencia del fundidor (A)
- V : Voltaje suministrado al sistema= 12V

$$I_R = \frac{P_F}{V} = \frac{40 \text{ W}}{12 \text{ V}} = 3.33 \text{ A}$$

- La alimentación del sistema general está abastecida por la potencia que entrega la fuente electrónica seleccionada (250W), la cual suministra el voltaje requerido para las tarjetas de control (12V), así mismo lo hace para el consumo de energía de cada dispositivo, como se puede constatar con las ecuaciones (26) y (27) en donde por el mayor consumo se analiza principalmente la alimentación de los motores y el fundidor, sabiendo que los que están incluidos en el modelo base Ormerod 2 son de tipo JK42HS34-1334A.

$$I_T < I_F \quad (26)$$

$$I_T = I_R + I_X + I_Z + I_E + I_A + I_C + 2 * I_y \quad (27)$$

Donde:

- I_T : Corriente total consumida por los motores
- I_F : Corriente que suministra la fuente de alimentación= 20A
- I_X : Corriente consumida por el motor del eje X= 1.33A
- I_Z : Corriente consumida por el motor del eje Z= 1.33A
- I_E : Corriente consumida por el motor del mecanismo extrusor= 1.33A
- I_Y : Corriente consumida por el motor del eje Y= 1.5A
- I_A : Corriente consumida por el motor del eje A= 1.68A
- I_C : Corriente consumida por el motor del eje C= 1.68A

$$I_T = (3.33A) + 3 * (1.33A) + 2 * (1.68A) + 2 * (1.5A) = 13.68 A$$

$$13.68 A < 20 A$$

Determinadas las características estructurales físicas del prototipo de impresora tridimensional de cinco ejes, es posible el ensamblaje total en el diseño CAD (Figura 83) y pruebas correspondientes dentro de la arquitectura de control.



Figura 83 Ensamblaje de diseño CAD mecánico y electrónico del prototipo

e. Mejoras estructurales de seguridad ante fallas mecánicas

En primer lugar cabe recalcar que no fue necesario el análisis estático de la estructura en voladizo del modelo rediseñado, ya que aunque se ha incrementado peso dentro del carro del eje X, no existe incidencia hacia un fallo de la estructura debido a que el modelo base tiene la capacidad de mantener suspendidos en el bastidor en voladizo hasta tres extrusores (Figura 84), por lo cual la estructura puede soportar hasta aproximadamente tres veces el peso que con el rediseño se está entregando al sistema de guiado del eje X y es por esto que no se analizan las fuerzas que se transmiten hacia los demás componentes.

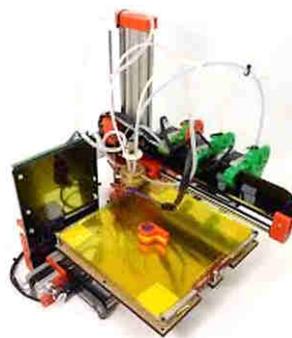


Figura 84. Modelo Ormerod 2 con capacidad de hasta 3 mecanismos extrusores

Fuente: (RepRapPro, 2015)

Desde una primera instancia se determina que el carro del eje X (el cual sostiene el al Hot End) posee todas las facilidades del caso para poder transportarse uniformemente de forma lineal por la varilla lisa, sin embargo, hay que considerar que la pieza ha sido modificada en incremento de su longitud y a la vez el mecanismo que utiliza es la de un rodamiento lineal y un rodamiento radial para estabilizarse al estar suspendida del eje X, como se observa en la Figura 85.

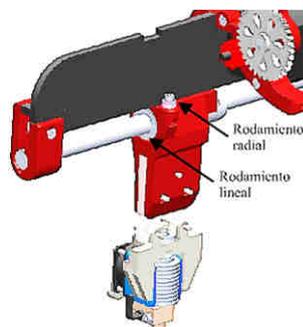


Figura 85. Primera versión de la disposición del carro del eje X

Lo que se ha ideado para mayor seguridad es implementar un sistema de guiado con rodamientos radiales no sólo a un lado, sino a los dos, como se muestra en la Figura 86, para mayor estabilidad en el recorrido del carro del eje X, ya que la linealidad de este recorrido influye mucho en el correcto desplazamiento de la boquilla de impresión.

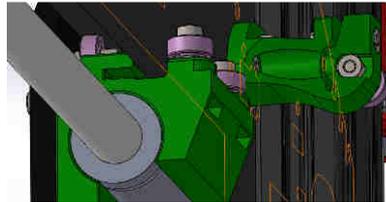


Figura 86. Rodamientos radiales a ambos lados del carro del eje X

También se implementa un mejor agarre de todo el montaje del eje X hacia la columna principal (Ver Figura 87), que en este caso implica una mayor adherencia del bastidor en voladizo hacia la estructura para el correcto desplazamiento de la boquilla de impresión linealmente en función del eje Z.

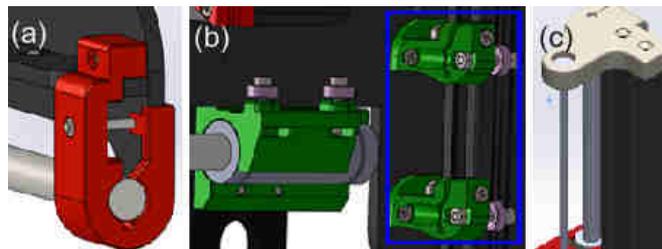


Figura 87. Diseño de piezas para mayor seguridad estructural

a) Soporte lateral derecho de X. b) Piezas corredizas para desplazamiento de montaje X a través de Z. c) Soporte superior del eje Z

Resulta práctico también reforzar a las piezas impresas que sostienen y centran a los elementos de transmisión, como es el caso de la varilla lisa del eje X y también de la varilla roscada del eje Z, tal como se distingue en la Figura 87.

Por lo tanto, el diseño CAD final del ensamblaje del prototipo de impresora tridimensional de cinco ejes después de la implementación de mejoras estructurales queda definido como se puede apreciar en la Figura 88.



Figura 88. Ensamble final del diseño CAD del prototipo

2.7.4 Arquitectura y procesos de control para el sistema de cinco ejes

El sistema de control se encuentra regido por el programa principal denominado Firmware, ubicado en la memoria flash del microcontrolador de la tarjeta Duet. Es el que interpreta cada acción que se disponga mediante los programas Gcode ubicados en la tarjeta microSD de datos y también mediante los comandos Gcode externos que se envíen manualmente desde la interfaz web. Las señales eléctricas llegan acondicionadas para cada dispositivo y gracias a los sensores se habilita una retroalimentación de control.

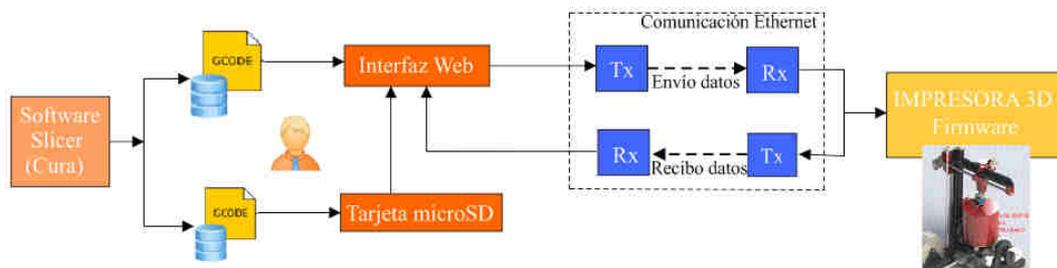


Figura 89. Arquitectura de control del prototipo de impresión 3D de cinco ejes

a. GCODE: Archivos en lenguaje de máquina

La arquitectura de control para el estudio del sistema de guiado general, está basado en el nuevo conjunto de instrucciones Gcode de cinco ejes (estructurado manualmente y con software externo), que es interpretado por el firmware de control de la máquina, generando así el propio envío de señales eléctricas hacia los motores, para que estos se activen con la cantidad de pasos necesarios para cumplir el trabajo.

El Gcode de cinco ejes aparte de establecer el control para el mecanismo ordinario del robot cartesiano, ordenará también la rotación de los dos ejes adicionales. Esta estructura programática viene representada de acuerdo al formato ISO como (X, Y, Z, A, B, C), en donde A, B, C son los ejes que rotan alrededor de X, Y, Z respectivamente. O también se puede representar como (X, Y, Z, I, J, K) de manera que X, Y, Z sean los valores de los desplazamientos lineales e I, J, K sean los valores del vector de la herramienta, como se visualiza en la Figura 91. El firmware debería interpretar los movimientos multiaxiales para llegar a la posición adecuada. (Cope, 2013)

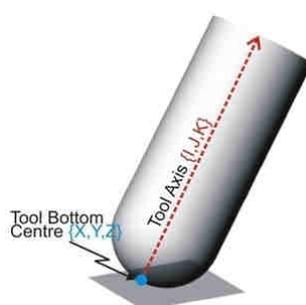


Figura 90. Programación para 5 ejes con vectores de herramienta

Fuente: (Cope, 2013)

b. Firmware de control

El Firmware de impresión 3D que se utiliza es el denominado DC42, del cual se habla con mayor profundidad en el apartado 1.11.4. La configuración de una de las últimas versiones de release binario del RepRapfirmaware DC42 es la 1.17 para la placa electrónica Duet 0.8.5, versión actualizada con la cual el trabajo de adaptación de nuevos motores se facilita, pues la estructura del archivo principal “platform.h” declara abiertos los puertos de la tarjeta de expansión para la incorporación de los nuevos drivers de motores PaP y de igual forma viene incorporada la interpretación para el nuevo formato de archivos Gcode de cinco ejes.

En la Figura 91 se muestra la potencialidad del Firmware de control seleccionado para establecer comunicación con una mayor cantidad de drivers de motores PaP de los que comúnmente se acostumbra a utilizar en un sistema de impresión 3D cartesiano.

Support	FiveD	Teacup	Sprinter	Marlin	Repetier	Smoothie	RepRapFirmware	Machinekit	MakerBot	grbl	Redeem	MK4duo
	No	No	No	No	No	No	1.14 and later	No	No	???	???	No

Parameters

Xnnn Driver number(s) for X motor(s)

Ynnn Driver number(s) for Y motor(s)

Znnn Driver number(s) for Z motor(s)

U, V, W, A, B, Cnnn Driver number(s) for additional axes U, V, W, A, B and C (UVW RepRapFirmware 1.16 and later; ABC RepRapFirmware 1.19 and later)

Ennn Driver number(s) for E motor(s)

Pnnn Number of visible axes, defaults to the total number of axes configured.

Figura 91. Comando M584 para reconocimiento de Gcode de 5 ejes

Fuente: (RepRap, 2018)

c. Interfaz Web de control y monitoreo

El servidor web (Duet Web Control - DWC) es la opción principal de comunicación para la mayoría de los usuarios y es un activo importante del Firmware de RepRap. La conexión a través de Ethernet permite la comunicación con el servidor web para controlar la impresora 3D. La instalación de un puente de Wi-Fi de Ethernet (Figura 92) permitirá la conexión con cualquier dispositivo que tenga un navegador web. (RepRap, 2016)

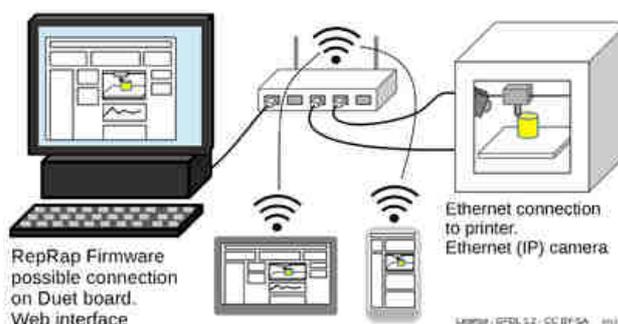


Figura 92. Posible conexión para la comunicación con la Interfaz web de control

Fuente: (RepRap, 2016)

La interfaz web de control beneficia en gran medida a la comunicación de procesos dentro de una impresión 3D, brinda el accionamiento de dispositivos y el monitoreo de los parámetros físicos existentes, en sí posee las siguientes características: (DUET3D, s.f.)

- Control total de la impresora conectada a Duet Electronics.
- Carga, edita y guarda las configuraciones de la impresora.
- Carga e instala actualizaciones de firmware.
- Carga, inicia y monitorea las impresiones.

- Controla la impresora conectada a través de una GUI y mediante el ingreso directo de Gcode a través de la consola.
- Errores y alertas que se muestran como ventanas emergentes y en la consola.
- Visualización giratoria 3D del mapa de altura de la cama.
- Sube, agrega y edita archivos de Macro para automatizar tareas comunes.
- Interfaz de una cámara web IP.
- Diseño adaptable que funciona en pantallas grandes, medianas y pequeñas (por ejemplo, PC, tablet, teléfono).

Como se ha podido apreciar, gracias a la interfaz gráfica de usuario se pueden controlar todos los mecanismos dentro del sistema de impresión 3D. El principal que se encuentra en estudio también puede ser adaptado, el cual es el control de los sistemas de guiado, que de forma predeterminada se estructuran para impresoras cartesianas.

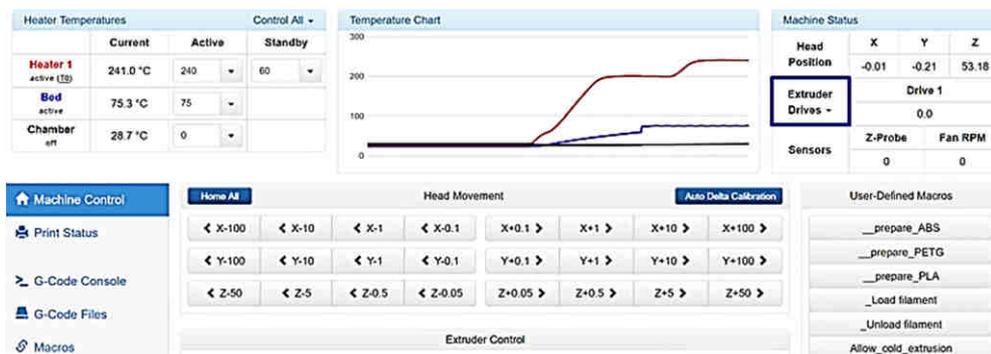


Figura 93. Configuración de controladores para ejes adicionales

Fuente: (RepRap, 2016)

Por la comunicación existente con el firmware y por la versión actualizada del producto, se puede establecer un mayor número de controladores (Figura 93), o como se puede observar en la Figura 94 en donde la configuración viene dada para los ejes adicionales U, V, W (A, B, C), de los cuales se utilizan solamente dos: U y V.



Figura 94. Configuración de controladores para los ejes X, Y, Z, U, V

Así mismo dentro de la interfaz de usuario se puede hacer uso de las herramientas de monitoreo para los parámetros físicos, como el desplazamiento de los ejes o el estado del Hot End, en donde se permite un control automático PID de la temperatura del calentador según los requerimientos de impresión del usuario (Figura 95), por ende, no ha sido necesario estructurar o diseñar un software de control para aquel propósito.

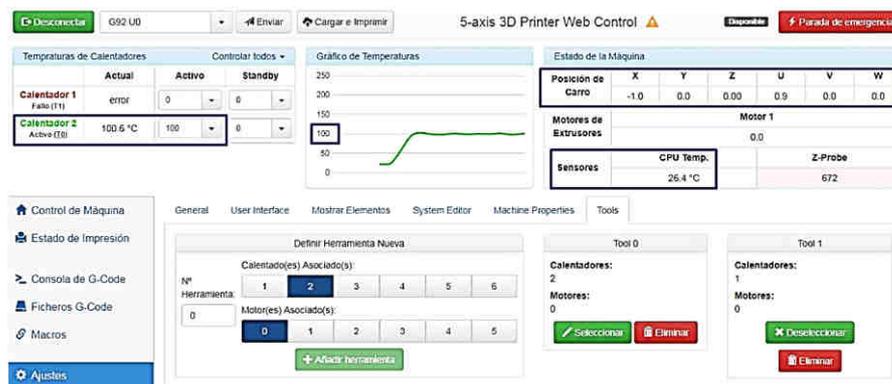


Figura 95. Monitoreo de variables físicas dentro del sistema de impresión

d. Control de los motores PaP

Para controlar el desplazamiento y velocidad de los motores se envían pulsos (desplazamiento) a diferentes frecuencias (velocidad) a la tarjeta de micropasos. Los pulsos se envían mediante señales PWM a frecuencias que varían dependiendo de la velocidad requerida. Para determinar las frecuencias de operación del motor de acuerdo a su velocidad, se realiza la operación siguiente: (Navarrete & Chancusi, 2014)

$$f = \omega * P_{REV} \quad (28)$$

Donde:

- f : Frecuencia de trabajo del motor a condiciones deseadas (Hz)

- ω : Velocidad angular deseada para operar motor (rps)
- P_{REV} : Número de pasos que requiere el motor para dar una vuelta (pasos/rev)

Como se ha venido observando para la selección de motores PaP, estos vienen diseñados para trabajar a una cierta resolución, la cual representa los pasos por revolución en el sistema de impresión. La resolución ocupada para todos los motores en este proyecto es de 1.8° . Por lo tanto, gracias a la ecuación (29):

$$P_{REV} = \frac{360^\circ}{1.8^\circ} = 200 \quad (29)$$

Esto quiere decir que los motores operan a 200° trabajando a paso completo, sin embargo, este al ser un parámetro bastante grande (baja resolución) en lo que respecta a impresión tridimensional, se opta por utilizar mecanismos de control en donde se reduzca el paso de los motores, es la condición que propone la tarjeta Duet al generar un micropaso y las cajas de transmisión de los motores de los ejes A y C (U y V) al reducir el paso entregado. Como se puede apreciar en las ecuaciones (30) y (31).

$$P_{REV-XYZE} = \frac{360^\circ}{1.8^\circ/16} = 3200 \quad (30)$$

$$P_{REV-AC} = \frac{360^\circ}{1.8^\circ/(16 * 19)} = 60800 \quad (31)$$

Entonces gracias a las ecuaciones se determina el parámetro de control de los motores PaP, denominados pasos por milímetro, que como su nombre lo indica, son los valores de los pasos que necesita generar un motor para que el sistema de guiado se mueva un milímetro, o un grado en el caso de los ejes rotativos.

Pasos por milímetro para control de los motores de los ejes X-Y

$$P_{mm} = \frac{P_{REV} * Micropaso}{p_c * n} \quad (32)$$

Donde:

- P_{mm} : Pasos por milímetro
- P_{REV} : Pasos por revolución= 200

- *Micropaso*: Micropaso del driver o del mecanismo de transmisión= 16
- p_c : Paso de la correa= 2 (Apartado 2.7.1e)
- n : Número de dientes de la polea= 20 (Apartado 2.7.1e)

$$P_{mm} = \frac{200 * 16}{2 * 20} = 80 \frac{pasos}{mm}$$

Pasos por milímetro para control de motor del eje Z

$$P_{mm} = \frac{P_{REV} * Micropaso}{p_t} \quad (33)$$

Donde:

- p_t : Paso de la varilla roscada= 0.8mm

$$P_{mm} = \frac{200 * 16}{0.8} = 80 \frac{pasos}{mm}$$

Pasos por milímetro para control del motor del mecanismo extrusor

$$P_{mm} = \frac{P_{REV} * Micropaso}{D_E} \quad (34)$$

Donde:

- D_E : Diámetro efectivo del engranaje= 10.5mm

$$P_{mm} = \frac{200 * 16}{10.5 * \pi} = 97 \frac{pasos}{mm}$$

Pasos por grado para control de los motores de los ejes A-C

$$P_{mm} = \frac{P_{REV} * Micropaso * 1 rev}{360^\circ} \quad (35)$$

$$P_{mm} = \frac{200 * 16 * 19 * 1 rev}{360^\circ} = 168.89 \frac{pasos}{grado}$$

Determinados los valores de los pasos por milímetro que deben ser aplicados para cada motor, estos deben ser ingresados en la configuración del archivo Gcode de control general de la impresión, como se explica en el apartado 2.7.4e.

e. Configuración de los archivos de control Gcode

Como se ha expuesto, la estructura de control del prototipo de impresora tridimensional de cinco ejes está fundamentada en la comunicación entre un firmware base instalado en el sistema con archivos en lenguaje C/C++ que no son modificados y un conjunto de archivos en lenguaje G (Gcode) que se modifican constantemente de acuerdo a cada pieza que se fabrique.

El conjunto de archivos Gcode comprende entre ellos: un archivo con los parámetros principales de configuración de la máquina llamado “config.g”, otros secundarios que sirven como macros de operaciones como por ejemplo los “home.g” para configuración de los sensores de presencia y finalmente el archivo generado por el software Slicer que contiene los Gcode de impresión 3D para determinada pieza, por ejemplo “probeta.g”.

La configuración de los archivos que contienen los Gcode de control para fijar las características de una impresión 3D de cinco ejes basadas en el nuevo prototipo, se encuentra expresada en la ejecución principal del control de impresión en el apartado 3.7.

f. Gestor de impresión 3D

Cabe recalcar que como se ha establecido en el apartado 1.6, una limitación de gran consideración para este proyecto es la ausencia de software libre de tipo Slicer que procese y genere los comandos Gcode de cinco ejes para ejecutar procesos en maquinaria CNC que trabaje con manufactura aditiva de materiales, es decir, en nuestro medio no se tiene acceso a un generador de código con la configuración de los ejes rotativos para ser ejecutado directamente en una impresora 3D.

Por lo cual es menester hacer uso de otro método de aplicación programática para obtener las instrucciones en el formato deseado y así conseguir activar los ejes rotativos, que, combinados con los ejes cartesianos y la deposición de material, se logrará fabricar una pieza “probeta”.

Surge entonces la idea de aprovechar el software Slicer para ejes cartesianos “CURA”, el cual al procesar una pieza digital diseñada en software CAD, genera los cortes o el laminado paralelo del modelo, compilando uno o varios programas de comandos Gcode

para ejes rectangulares, mismos que pueden ser adaptados o fusionados entre sí mediante una configuración manual o de software estructurado que utilice ejes rotativos, ocasionando que el producto sea una pieza fabricada con comandos de cinco ejes.

Cura es un software “Slicer” para procesar los archivos de diseño en 3D y hacer el “slicing”, es decir, generar cada capa que será fabricada por la máquina, de forma que se obtiene un archivo GCode que será transmitido a la impresora 3D. Cura ha sido desarrollado por Ultimaker y es gratuito y de código abierto.

Cura ofrece la posibilidad de configurarlo para adaptarse a impresoras de diferentes modelos. Dispone de opciones avanzadas para el control del relleno y las velocidades de movimiento, impresión y retracción, así como de un modo para usuarios nuevos. (IMPRIMALIA3D, s.f.)

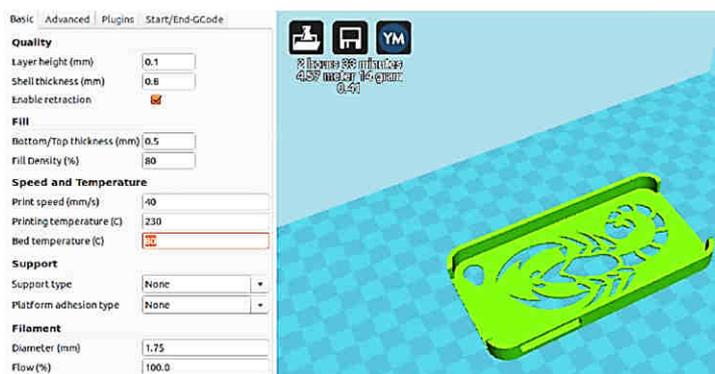


Figura 96. Interfaz de software Slicer CURA

Fuente: (Navarrete & Chancusi, 2014)

g. Acondicionamiento de control manual de impresión 3D de 5 ejes

Mediante un análisis dentro del estudio para el control de procesos del prototipo, se plantea el diseño de una configuración para el programa GCODE de impresión, en donde se encuentran los datos de la impresión 3D de cinco ejes para determinada pieza. La configuración está basada en la fusión de comandos de desplazamientos X-Y-Z con comandos de rotación U-V mediante operaciones manuales del usuario, dichas operaciones se pueden distinguir en el flujograma de la Figura 97.

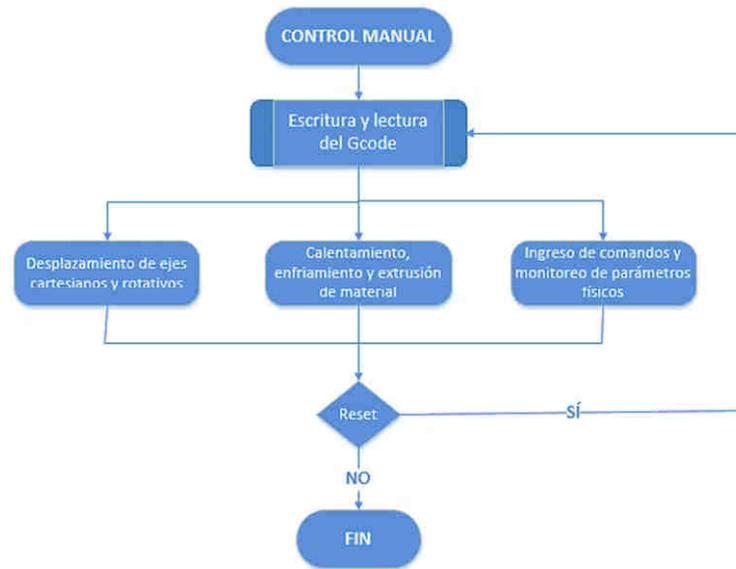


Figura 97. Diagrama de flujo para control manual de proceso de impresión

Control para prueba de impresión manual para ahorro de material

Para la fabricación de una pieza impresa con código de cinco ejes, se plantea el diseño de una barra de sección transversal cuadrada en donde sus caras externas poseen una estructura saliente con disposición en voladizo y sobre la parte superior que sufre el mayor acoplamiento de las piezas se coloca un revestimiento para un mejor acabado, como se puede representar en la Figura 98.

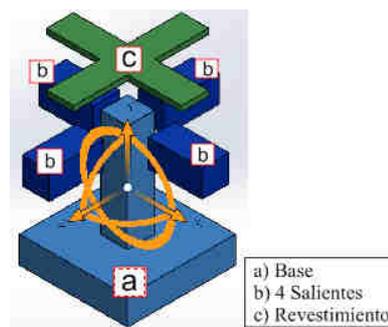


Figura 98. Estructura de pieza para prueba de ahorro de material

Como se ha establecido, la estructura para el programa de impresión de cinco ejes está desarrollada por la fusión de otros programas en tres ejes, estos últimos han sido generados mediante el software Slicer Cura. Para la pieza general que determina el ahorro de material

dentro de la impresión 3D de cinco ejes se utiliza la asociación de tres subestructuras (Figura 98) acopladas entre sí mediante operaciones manuales de rotación en la máquina.

Las tres subestructuras son procesadas individualmente por el software Cura para la generación de su respectivo Gcode de impresión. Primero se establece la configuración según los nuevos parámetros de la máquina (Figura 138) y se analizan los datos para la configuración del perfil de impresión. Todo esto se puede apreciar detalladamente en la ejecución principal del control de impresión en el apartado 3.7.

Entonces se establece el enlace entre software CAD y CAM el cual se ha expuesto de mejor manera en el apartado 1.11. Consiste en importar el modelo CAD de cada subestructura de la pieza resultante hacia el software CAM que genera los códigos G, para posteriormente imprimir al objeto con los parámetros descritos para la configuración del perfil, la representación digital se observa en la Figura 99.

Para efectos prácticos, se debe inicializar a la máquina en su posición HOME y posteriormente a su posición de ORIGEN para el inicio de la impresión correspondiente, es decir que la bandeja de impresión debe estar en 0° , para de esta forma ejecutar los comandos de impresión de la subestructura (a) de la Figura 98, todo esto se lo realiza mediante comandos Gcode tanto manuales como también generados por el software Cura.

- G28 X Y Z V: Desplazamiento de los ejes a HOME
- G92 X0 Y0 Z0 V0: Restaurar posición para origen de coordenadas

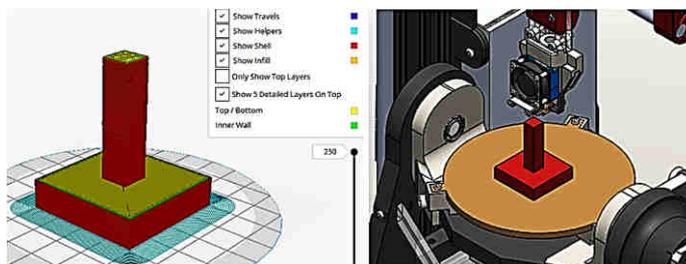


Figura 99. Representación de impresión de base de pieza prueba.

Para continuar con la fusión de la siguiente subestructura, se realiza la activación del eje A de movimiento basculante a 90° , tomando las respectivas precauciones para evitar choques con la bandeja de impresión y es concerniente establecer un nuevo

posicionamiento para el ORIGEN, tomando en cuenta en este caso un CERO PIEZA 1, establecido por geometrías planteadas por el usuario, éstas serán el origen de coordenadas para la nueva impresión. Así mismo en el software Cura se configura deshabilitada la adhesión de la pieza a la bandeja de impresión, como se ve en la Figura 100.

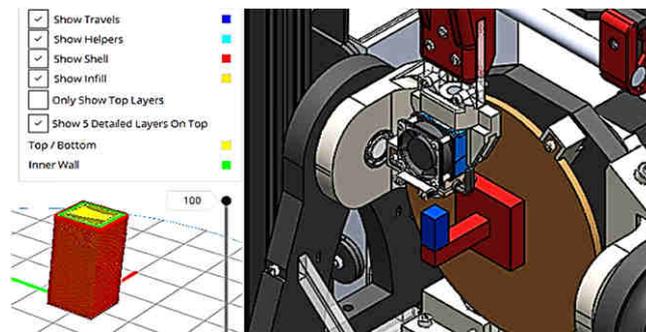


Figura 100. Representación de impresión de pieza suspendida para prueba

De la misma forma que se ha realizado la impresión para la primera subestructura suspendida, con los mismos comandos se procede a realizar las operaciones para las tres caras restantes de la barra base, tomando en cuenta que se ejecuta 90° para el eje C, por tres veces paulatinamente para ir generando los CERO PIEZA 2, 3 y 4, en relaciones geométricas que el usuario disponga, para que la impresión sea satisfactoria como se representa en la Figura 101.

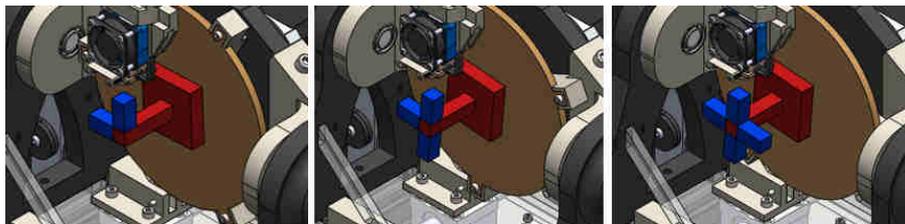


Figura 101. Representación proceso de impresión en piezas suspendidas de prueba

Finalmente, para la impresión de esta pieza prueba, se regresa la bandeja a 0° mediante la ejecución del eje A y se toma un CERO PIEZA 5 para la impresión de revestimiento.

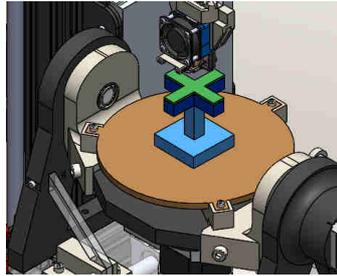


Figura 102. Representación final de pieza de prueba para ahorro de material

Como se puede apreciar en la Figura 102, la representación del control para la impresión de la pieza de prueba para ahorro de material queda establecida mediante la ejecución de los ejes cartesianos y de los ejes rotativos, verificando que esta pieza para imprimirse en una máquina convencional de tres ejes, siempre va a requerir de material de apoyo, sea cual sea la disposición en a la que se le coloque, como se puede constatar en la Figura 103.

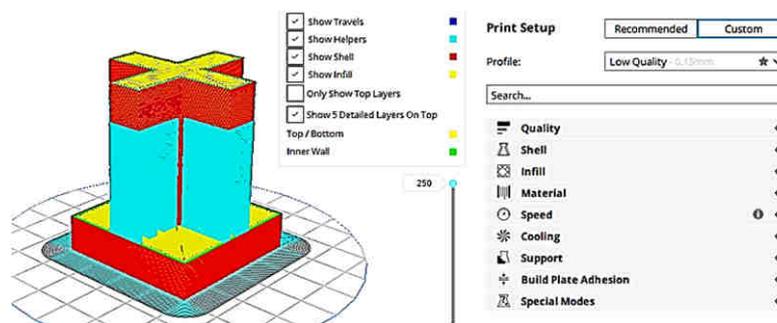


Figura 103. Pieza de prueba para imprimirse en una máquina convencional

Adicionalmente en este modelo de impresión resulta factible seguir incrementando geometrías que en una máquina convencional exigirían el uso de una mayor cantidad de material de apoyo, pero que de todas maneras con el prototipo de impresora 3D de cinco ejes esto resultaría innecesario, como se puede observar en la Figura 104. En el Capítulo IV de pruebas se describe el beneficio de utilizar este tipo de geometrías.

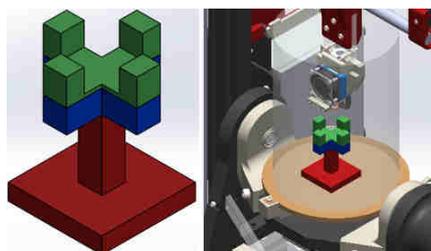


Figura 104. Representación de geometrías para mayor ahorro de material

Control para prueba de impresión manual para resistencia mecánica

Para la fabricación de una pieza impresa con código de cinco ejes, en el estudio del mejoramiento de la resistencia mecánica basado en un mejor entramado del filamento de material depositado, se plantea el diseño de una barra de sección transversal cuadrada en donde se aporta una estructura de revestimiento de material en las cuatro caras de la pieza base (Figura 105). El revestimiento es generado con una diferente orientación de filamento en razón del filamento impreso que estructura la pieza base.

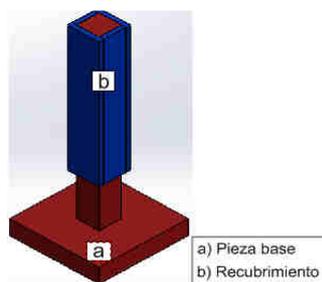


Figura 105. Representación de pieza de prueba para resistencia mecánica

La consecución de las operaciones en el acondicionamiento de generación de Gcode de cinco ejes en el caso de esta prueba, es estrictamente similar a la que se ha seguido en la representación de la fabricación manual de la pieza de prueba para ahorro de material. Se imprime la base en primer lugar, se activa el eje A a 90° , se localiza el CERO PIEZA 1 y se imprime el primer recubrimiento, así se aportan los demás recubrimientos activando el eje C 90° paulatinamente para los CERO PIEZA 2, 3 y 4, como se ve en la Figura 106.

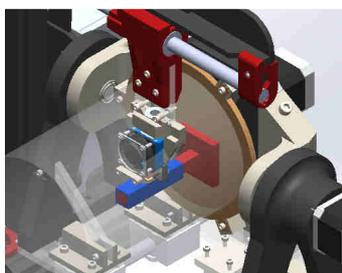


Figura 106. Representación de impresión en el aumento de resistencia mecánica

h. Acondicionamiento de control automático de impresión 3D de 5 ejes

Para el control automático del prototipo de impresión 3D de cinco ejes se toman las consideraciones citadas en las operaciones manuales del anterior apartado.

En este caso, los pasos para el control en la impresión de la pieza de prueba son optimizados a una sola operación principal, que es la ejecución de un único archivo Gcode compilado previamente de los archivos generados en el control manual. En la Figura 107 se representa el proceso para el control automático que sigue el prototipo.



Figura 107. Diagrama de flujo para control automático de impresión

Como se observa en la Figura 107, el complemento principal para la ejecución automática de las operaciones es la lectura del archivo de Gcode de funcionamiento general, el mismo que ha sido la fusión de los archivos Gcode creados mediante el software CURA y mediante la compilación de los mismos en un solo archivo de control de impresión, el mismo que es mejor detallado en el apartado 3.7c; preparación para la prueba de impresión con cinco ejes.

Para el montaje de los elementos de cada subsistema ha sido necesario el uso de herramientas que faciliten las maniobras de sujeción, corte, pulido, medición y calibración, las cuales se pueden observar en la Figura 108.

3.2.1 Implementación de elementos del sistema de extrusión

El sistema de extrusión o cabezal de extrusión se encuentra conformado por el mecanismo extrusor y el montaje del Hot End con su respectivo soporte hacia el eje X, mismo que permite desplazamiento libre sobre ese eje. Todos los elementos del montaje del Hot End y su soporte se pueden ver en la Figura 109.



Figura 109. Elementos de todo el sistema de extrusión de material

a. Mecanismo extrusor

El mecanismo extrusor como su nombre lo dice, mediante un sistema de transmisión de movimiento (engranaje) extruye o desliza el filamento de PLA hacia la siguiente etapa de extrusión que es el Hot End y lo hace por un tubo denominado Bowden que sirve de guía.



Figura 110. Montaje del cuerpo extrusor

El montaje del mecanismo extrusor se puede ver en la Figura 110 y sus componentes se enlistan en la Tabla 29.

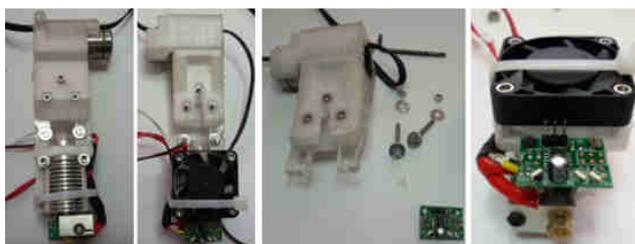
Tabla 29.**Componentes de cuerpo y engrane del extrusor**

Componente	Cantidad	Tipo
Motor NEMA 17	1	Hardware
Bloque de accionamiento de extrusora	1	Impreso
Engranaje pequeño del extrusor	1	Impreso
Rodamiento 623 (Diámetro 10mm)	1	Sujeción
Arandela M3	1	Sujeción
Tornillo avellanado M3x15mm	3	Sujeción
Engrane grande extrusor	1	Impreso
Rueda Hobbed	1	Hardware
Arandela M3	2	Sujeción
Tuerca M3	1	Sujeción
Perno hexagonal M3x25mm	1	Sujeción
Rodamiento MR93ZZ (9mm de diámetro)	2	Hardware

Fuente: (RepRapPro, 2017)

b. Montaje de Hot End y su soporte (Carro del eje X)

El mecanismo calentador de material se encuentra en el Hot End gracias a la bóveda de fundición que es calentada mediante una resistencia eléctrica y controlada por un termistor, para que el material fundido a temperatura adecuada salga por una boquilla.

**Figura 111. Montaje del Hot End y su soporte**

Todo este montaje se encuentra suspendido del eje X, pero estabilizado con un soporte impreso como se puede observar en la Figura 111, mientras que también se distinguen estos mecanismos por separado, sus elementos se encuentran descritos en la Tabla 30.

Tabla 30.**Componentes de montaje de Hot End y su soporte**

Componente	Cantidad	Tipo
Carro de eje X	1	Impreso
Sujetador de Hot End	1	Impreso
Soporte de sensor infrarrojo	1	Impreso
Placa soporte de acrílico	1	Corte láser
Hot End E3D V6 metálico	1	Hardware
Sensor infrarrojo de proximidad	1	Electrónica
Rodamiento lineal LM12UU	1	Hardware
Tornillo de cabeza Allen M3x25mm	5	Sujetador
Tuerca M3	5	Sujetador
Arandela M3	3	Sujetador
Correa y poleas dentadas Gt2	1	Hardware

3.2.2 Implementación de elementos del montaje del eje X

El montaje del eje X (Figura 112) está constituido de una guía (varilla lisa) por donde se desliza el carro X mediante el mecanismo de poleas con correa dentada, las poleas se encuentran sujetas a soportes laterales que han sido impresos.

**Figura 112. Montaje y elementos del eje X**

Así mismo la estructura que estabiliza al eje X consta de dos placas de acrílico que embonan entre sí para soportar al mecanismo extrusor encima suyo. Los elementos se pueden ver en la Figura 112 y son descritos en la Tabla 31.

Tabla 31.**Componentes de montaje del eje X**

Componente	Cantidad	Tipo
Soporte de referencia del eje X	1	Impreso
Rodamiento 623 (diámetro 10 mm)	1	Hardware
Tornillo avellanado M3x25mm	1	Sujetador
Tuerca M3	1	Sujetador
Soporte del eje X	1	Ensamblaje
Motor Nema 17 del eje X	1	Ensamblaje
Soporte del motor del eje X	1	Impreso
Placa de acrílico del eje X	1	Cortado con láser
Soporte de acrílico del eje X	1	Cortado con láser
Varilla lisa 12x350mm	1	Hardware
Rodamiento lineal LM12UU	2	Hardware
Tornillo de cabeza Allen M3x25mm	4	Sujetador
Tuerca M3	2	Sujetador
Arandela M3	2	Sujetador

Fuente: (RepRapPro, 2017)

3.2.3 Implementación de elementos del montaje del eje Y

El montaje del eje Y constituye a dos elementos fundamentales en el rediseño de todo el prototipo, el uno es el sistema estático al que se le ha venido denominando plataforma base y el otro es la estructura móvil denominada soporte del carro Y.

a. Montaje de la plataforma base

Figura 113. Montaje y elementos del sistema de guiado de Y (plataforma base)

El montaje del sistema de guiado Y, conformado por dos ejes guías (varillas lisas) y dos extrusiones de aluminio fijados a los soportes laterales de acrílico, es la estructura considerada como la plataforma base, la cual estabiliza a todo el bastidor de la impresora 3D de 5 ejes y es la guía por donde se desplaza el carro del eje Y mediante correa y poleas dentadas. En la Figura 113 se puede distinguir el montaje de la plataforma base, así mismo como sus componentes y la descripción de ellos en la Tabla 32.

Tabla 32.

Componentes del montaje de la plataforma base

Componente	Cantidad	Tipo
Soporte lateral del perfil de aluminio	2	Corte láser
Soporte de motor del eje Y	2	Impreso
Motor paso a paso Nema 17	2	Hardware
Varilla lisa acero 12x350mm	2	Hardware
Perfil de aluminio T-slot 5	2	Hardware
Correa y poleas dentadas Gt2	1	Hardware
Tornillo de cabeza Allen M3x25mm	8	Sujetador
Arandela M3	2	Sujetador
Tuerca M3	2	Sujetador
Tornillo de cabeza Allen M5x20mm	8	Sujetador
Tornillo avellanado M5x15mm	2	Sujetador
T-tuerca M4	7	Sujetador

b. Estructura soporte de la plataforma móvil del eje Y

La estructura que se puede ver en la Figura 114 es la que brinda soporte y transporte a la plataforma móvil del eje Y, que es precisamente todo el sistema giratorio basculante, se encuentra acoplado por cuatro rodamientos lineales encajados dos en cada guía, para brindar la capacidad de desplazamiento a una estructura de acrílico que sirve como sujetador y estabilizador de todo el carro Y.

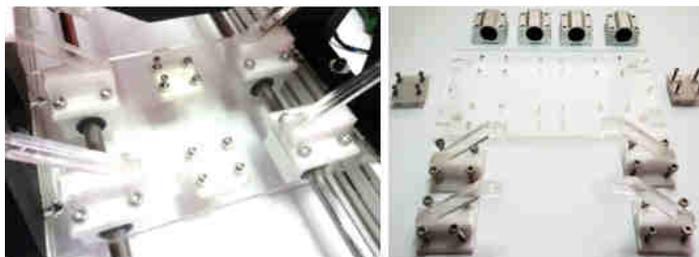


Figura 114. Montaje de la estructura soporte de la plataforma móvil Y

En la Figura 114 se pueden apreciar los elementos de la estructura soporte de la plataforma móvil y en la Tabla 33 su respectiva descripción.

Tabla 33.

Componentes de montaje del motor del eje Z

Componente	Cantidad	Tipo
Unión de la base	4	Impreso
Sujetador de la correa dentada	2	Impreso
Placa base del carro del eje Y	1	Corte láser
Soporte angular	4	Corte láser
Rodamiento lineal SC12UU	4	Hardware
Tornillo de cabeza Allen M4x16mm	16	Sujetador
Tornillo de cabeza Allen M3x16mm	8	Sujetador
Tornillo de cabeza Allen M3x20mm	4	Sujetador
Arandela M4	8	Sujetador

3.2.4 Implementación de elementos de la cama de deposición de material

La cama de deposición de material PLA es el sistema giratorio basculante, está compuesto de varias piezas impresas que brindan una disposición efectiva para dos motores PaP con sus respectivas cajas reductoras que determinan el giro y volteo de la bandeja de impresión, brindando de esta forma los ejes requeridos para el prototipo de rediseño.



Figura 115. Cama de deposición de material giratoria basculante

En la Figura 115 se puede apreciar el montaje del sistema principal de rediseño, se trata de la cama de deposición de material giratoria basculante, que también se desplaza como plataforma móvil sobre el eje Y.

a. Montaje del sistema basculante del eje A



Figura 116. Componentes del sistema basculante del eje A

En la Figura 116 se disponen los componentes del sistema de guiado del eje A y en la Tabla 34 la descripción de los mismos.

Tabla 34.

Componentes de montaje del sistema basculante del eje A

Componente	Cantidad	Tipo
Soporte lateral derecho	1	Impreso
Soporte lateral izquierdo	1	Impreso
Sujetador derecho de la cama	1	Impreso
Sujetador izquierdo de la cama	1	Impreso
Acople de aluminio de eje A	1	Mecanizado
Motor paso a paso Nema 17	1	Hardware
Caja de transmisión motor Nema 17	1	Hardware

CONTINÚA 

Rodamiento radial 12x21mm	3	Hardware
Tornillo de cabeza Allen M3x20mm	8	Sujetador
Tornillo de cabeza Allen M3x16mm	3	Sujetador
Tuerca M3	4	Sujetador
Tornillo avellanado M3x20mm	4	Sujetador
Tornillo de cabeza Allen M5x20mm	2	Sujetador
Tuerca M5	2	Sujetador
Arandela M5	2	Sujetador
Tornillo de cabeza Allen M6x20mm	4	Sujetador

b. Montaje del sistema giratorio del eje C



Figura 117. Componentes del sistema giratorio del eje C

En la Figura 117 se disponen los componentes del sistema giratorio perteneciente al eje C y en la Tabla 35 la descripción de los mismos.

Tabla 35.

Componentes del montaje de sistema giratorio del eje C

Componente	Cantidad	Tipo
Sujetador central de la cama	1	Impreso
Soporte de la bandeja de impresión	1	Impreso
Bandeja de impresión de MDF	1	Corte láser
Acople de aluminio del eje C	1	Mecanizado
Motor paso a paso Nema 17	1	Hardware
Caja de transmisión de motor Nema 17	1	Hardware
Tornillo de cabeza Allen M3x16mm	10	Sujetador
Tornillo de cabeza Allen M3x25mm	4	Sujetador

3.2.5 Montaje del mecanismo del eje Z

Con el sistema de guiado del eje Z, el mecanismo de tornillo de potencia y la columna principal de la máquina, queda definida la estructura total mecánica del nuevo prototipo de impresión tridimensional de cinco ejes.



Figura 118. Montaje y componentes del mecanismo del eje Z

El montaje del eje Z se encuentra empotrado a la plataforma base mediante el “montaje inferior” y el “soporte de esquina”. La estructura del sistema de guiado del eje Z brinda también soporte al montaje del eje X, como se puede observar en la Figura 118. Los componentes del montaje del eje Z se encuentran dispuestos en la Figura 118 y una descripción de los subensamblajes desde la Tabla 36 hasta la Tabla 38.

a. Montaje del motor del eje Z



Figura 119. Montaje del motor del eje Z

El montaje del motor del eje Z es el que posee un sistema de engranes que brinda la transmisión de movimiento hacia la varilla roscada y traslada linealmente hacia arriba y hacia abajo a todo el sistema de guiado del eje X, haciendo que la boquilla de impresión se desplace en función de las coordenadas Z.

Tabla 36.**Componentes de montaje del motor y montaje inferior del eje Z**

Componente	Cantidad	Tipo
Abrazadera del motor Z	1	Impreso
Motor paso a paso Nema 17	1	Hardware
Tornillo de cabeza Allen M3x10mm	1	Sujetador
Arandela M3	1	Sujetador
Cojinete 623 (diámetro 10 mm)	1	Hardware
Tornillo avellanado M3x15mm	3	Sujetador
Tornillo avellanado M4x15mm	3	Sujetador
T-tuerca M4	3	Sujetador
Montaje inferior del eje Z	1	Impreso
Tornillo avellanado M4x15mm	3	Sujetador
T-tuerca M4	3	Sujetador

Fuente: (RepRapPro, 2017)

b. Soporte de esquina del eje Z**Figura 120. Componentes de soporte de esquina del eje Z**

El soporte de esquina para el eje Z equilibra a la columna principal y junta a todo el bastidor de la impresora con la plataforma base. Es un punto de apoyo esencial.

Tabla 37.**Componentes del soporte de esquina del eje Z**

Componente	Cantidad	Tipo
Soporte de esquina del eje Z	1	Impreso
Tornillo avellanado M4x15mm	2	Sujetador
T-tuerca M4	2	Sujetador

Fuente: (RepRapPro, 2017)

c. Montaje corredizo de Z



Figura 121. Montaje corredizo del eje Z

El montaje corredizo del eje Z es el que promueve una sujeción bastante segura de los componentes del sistema de guiado del eje X hacia la columna principal y sirve de riel para los desplazamientos de la boquilla de impresión en función del eje Z.

Tabla 38.

Componentes de montaje corredizo y tornillo del eje Z

Componente	Cantidad	Tipo
Montaje corredizo de Z	1	Impreso
Cojinete 623 (diámetro 10 mm)	2	Hardware
Tornillo de cabeza Allen M3x20mm	1	Sujetador
Tornillo de cabeza Allen M3x15mm	2	Sujetador
Tornillo avellanado M3x20mm	1	Sujetador
Tornillo avellanado M3x15mm	1	Sujetador
Tuerca M3	5	Sujetador
Arandela M3	9	Sujetador
Accionamiento de engranajes Z	1	Impreso
Varilla roscada M5	1	Hardware
Tuerca M5 BZP	3	Sujetador

Fuente: (RepRapPro, 2017)

3.3 Implementación del sistema electrónico

3.3.1 Montaje de la caja electrónica y enrutamiento de cables

La caja electrónica del prototipo de impresora tridimensional de cinco ejes contiene los elementos principales que acondicionan y accionan el control de todos los subsistemas.

Los principales elementos dentro de este montaje son la tarjeta electrónica Duet 0.8.5 y su expansión Duex 4, que conforman el cerebro de operaciones de la máquina.

La cubierta de la caja electrónica está estructurada de placas de acrílico que son empernadas entre sí con las condiciones de aislamiento debidas, cada tarjeta debe ser ubicada en el espacio preciso según las ranuras modeladas, para que el enrutamiento de cada cable sea el adecuado. En la Figura 122 se dispone la estructura de montaje para la electrónica principal de control. Así mismo en la Tabla 39 se describen los componentes de todo el conjunto eléctrico-electrónico.

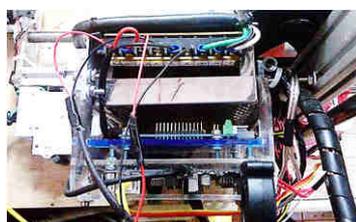


Figura 122. Montaje de la caja electrónica y enrutamiento de cables

Tabla 39.

Componentes de montaje del sistema eléctrico-electrónico

Componente	Cantidad	Tipo
Placas de acrílico de la cubierta	5	Corte láser
Tarjeta Duet 0.8.5 + Duex4	1	Electrónica
Fuente de alimentación S-250 12	1	Electrónica
Cable de poder 20A	1	Eléctrica
Interruptor termomagnético bipolar	1	Eléctrica
Cable blindado	1	Electrónica
Conectores 4 pines con espadines	13	Electrónica
Conectores 3 pines con espadines	5	Electrónica
Final de carrera	2	Electrónica
Ventilador 12V DC	1	Electrónica
Tornillo avellanado M3x15mm	1	Sujetador
Tuerca M3	5	Sujetador
Arandela M3	9	Sujetador

Fuente: (RepRapPro, 2017)

El diagrama de cableado general para todo el sistema de impresión se encuentra estructurado en la Figura 82, en donde se visualiza la distribución de los dispositivos electrónicos con la cual se puede proceder a la conexión de cada elemento.

3.3.2 Implementación de los motores PaP y los finales de carrera

Como se ha nombrado en el diseño electrónico, para completar las funciones del prototipo de impresión 3D de cinco ejes es necesaria la implementación de siete motores PaP que se conectan en una determinada configuración dentro de la tarjeta de control. En la Figura 123 se visualiza la configuración establecida de la tarjeta Duet para la conexión de los motores PaP, los dos finales de carrera X-Y y la disposición que se ha planteado para el funcionamiento de los ejes cartesianos y el mecanismo de extrusión.

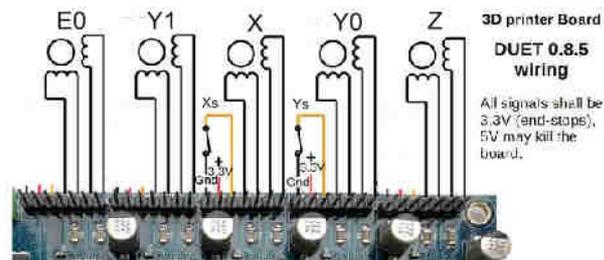


Figura 123. Conexión de motores PaP y Finales de carrera en Duet

Cada bornera y cada pin de conexión mantienen el orden y el fácil enrutamiento de cableado gracias al modelo de ranuras aplicado en la caja electrónica, como se puede apreciar en la para la salida de señales de los drivers hacia los motores PaP.



Figura 124. Fácil conexión y desconexión para motores PaP y finales de carrera

La conexión para los dos motores PaP que conjuntamente con sus cajas de transmisión respectivas accionan a los ejes rotativos, tienen similar conexión que los motores de los

ejes cartesianos, con la diferencia de que estos nuevos son conectados en la tarjeta de expansión Duex 4, como se aprecia en la Figura 125.

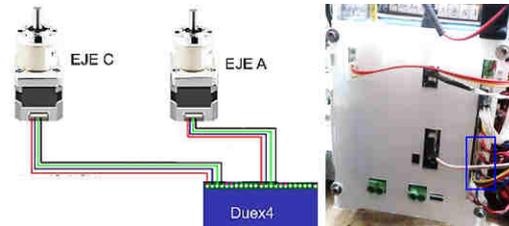


Figura 125. Conexión y pines de motores PaP para ejes rotativos

3.3.3 Conexión del sensor de proximidad infrarrojo

El sensor de proximidad no es más que una PCB con elementos que disparan una luz infrarroja para determinar la distancia entre las superficies, es por esto que se debe colocar a dichos elementos (parte negra) como el extremo inferior de la placa. El otro extremo está empernado a la “pieza soporte del sensor”, que es una pieza impresa que sobresale del soporte del ventilador del Hot End, para que puedan ingresar dos pernos M2.5x5mm. El diagrama de conexión se describe en la Figura 126.

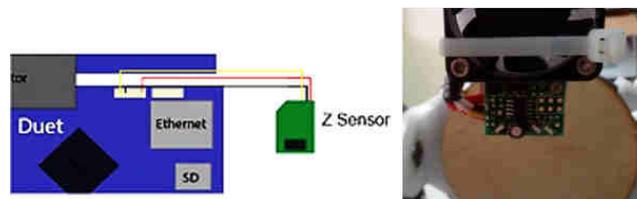


Figura 126. Conexión del sensor de proximidad infrarrojo

3.3.4 Implementación y conexión del Hot End

El Hot End comprende al sensor térmico, al resistor calentador y al ventilador, en lo que respecta a la conexión eléctrica, y estos elementos han sido dispuestos tal como se observa en la Figura 127.

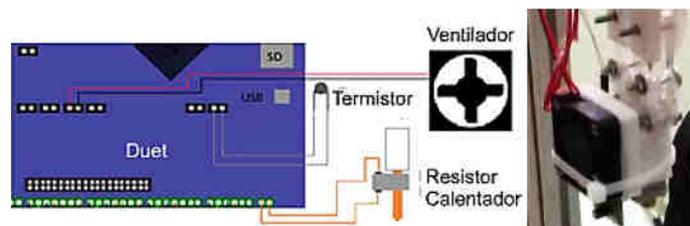


Figura 127. Conexión y montaje del el Hot End

El montaje del Hot End se sujeta mediante pernos a la placa soporte de acrílico y esta al carro del eje X como se observa en la Figura 127.

3.3.5 Alimentación del sistema eléctrico-electrónico

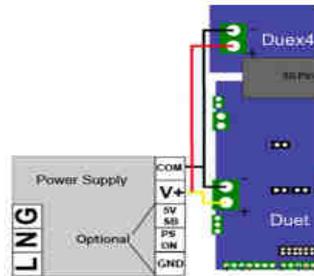


Figura 128. Diagrama de conexión de la fuente hacia las tarjetas

La entrega de potencia eléctrica está definida por la fuente de alimentación S-250 que suministra los 12V hacia las tarjetas de control, en donde se puentean los pines de entrada de tensión de cada tarjeta, y se fija claramente su polaridad como se puede observar en la Figura 128. La energización hacia la fuente puede habilitarse o deshabilitarse mediante un interruptor termomagnético bipolar como se observa en la Figura 129.

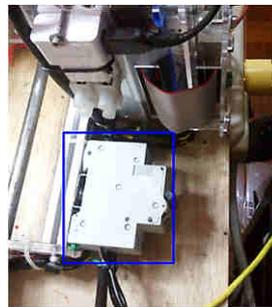


Figura 129. Interruptor termomagnético para energización de caja electrónica

3.3.6 Montaje final del prototipo de impresión 3D de cinco ejes

La Figura 130 representa al ensamble total de cada subsistema dentro del prototipo de la impresora tridimensional de cinco ejes, se visualiza la disposición de los ejes cartesianos junto con la sinergia de los ejes rotativos, sus dispositivos de accionamiento y los mecanismos de transmisión de movimiento, todo regido mediante el sistema de control electrónico.

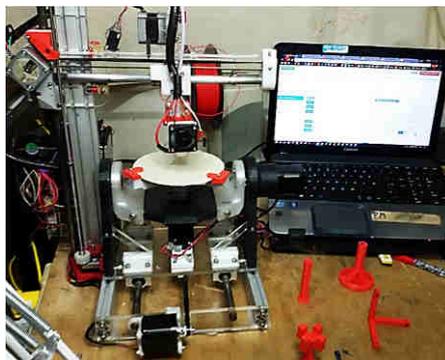


Figura 130. Montaje final del prototipo de impresión 3D de cinco ejes

3.4 Calibración del sistema basculante

Para esperar una correcta geometría en la pieza final fabricada se debe en primer lugar verificar que la estructura mecánica de todo el sistema se encuentre muy bien calibrado y esto implica a que los ejes cartesianos permanezcan perpendiculares entre sí y que la estructura en donde se disponen los ejes rotativos se encuentre correctamente nivelada. Para lo cual se han establecido técnicas manuales de calibración con un inclinómetro.

Para la cama de deposición giratoria basculante se verifica que los ejes de los motores A y C, al igual que los acoples de los mismos tengan perpendicularidad entre sí, para lo cual se verifica que el inclinómetro muestre una correcta nivelación de la bandeja de impresión en orientación a los movimientos basculantes del eje A (recuadro rojo) como se puede apreciar en la Figura 131. Esto se lo hace variando el ajuste entre los pernos de la bandeja y los muelles retenedores de debajo de la estructura (recuadro azul).



Figura 131. Nivelación de bandeja de impresión para los movimientos basculantes

Como se visualiza en la Figura 131, la cama de deposición que representa la superficie de impresión se encuentra encerrada (0°) para posteriormente gracias al control manual del desplazamiento de los ejes mediante la interfaz web, proceder a activar el movimiento

basculante del eje A hasta su límite (90°) y se verifica la perpendicularidad existente en el sistema (Figura 132).



Figura 132. Calibración de ejes rotativos con perpendicularidad entre ellos

3.5 Calibración del sistema general de impresión

Para corroborar los resultados de calibración del apartado 3.4 y la disposición correcta de los ejes cartesianos se procede a aplicar la técnica de verificación de distancia existente entre la boquilla y la bandeja de impresión (prueba Z), tomando como referencia cinco puntos equidistantes entre sí, uno en el centro y cuatro a los extremos de la superficie de trabajo, de tal modo que se siguen los procesos descritos a continuación, en los cuales se puede operar al sistema manualmente o con ayuda del sensor de proximidad infrarrojo.

3.5.1 Punto central de referencia

Se inicia desde la ubicación central de la bandeja circular de impresión, logrando que la boquilla se desplace hasta topar la superficie de trabajo X-Y, como se puede apreciar en la Figura 133.



Figura 133. Ubicación del punto central de referencia para calibración

Ubicada la boquilla de impresión en el punto central de la superficie de trabajo, se controla el desplazamiento de dicha boquilla, haciendo que se desplace 1mm en dirección del eje Z positivo.

3.5.2 Punto desplazado para X en sentido positivo

Una vez que la boquilla se encuentra a una altura de un milímetro de la bandeja de impresión, el carro del eje X es desplazado en dirección positiva 60mm hasta que la boquilla se ubique justo encima del nuevo punto de calibración, si se baja la boquilla un milímetro, ésta debe quedar nuevamente al ras de la superficie de impresión como se ve en la Figura 134.



Figura 134. Ubicación del punto de referencia desplazado para X positivo

3.5.3 Punto desplazado para X en sentido negativo

De la misma forma se procede a levantar a la boquilla en sentido de Z positivo 1mm y se produce el recorrido nuevamente, pero esta vez en sentido negativo del eje X, desplazando al carro X 120mm hasta que la boquilla se posicione justo encima del punto referencial. Si la boquilla desciende 1mm, esta debe topar exactamente la superficie de impresión, como se muestra en la Figura 135.



Figura 135. Ubicación de punto de referencia desplazado para X negativo

3.5.4 Punto desplazado para Y en sentido positivo

Esta vez se levanta la boquilla 1mm en el sentido positivo de Z y se la desplaza hasta encima del punto central de referencia, para posteriormente ejecutar el movimiento del carro del eje Y, de tal manera que la boquilla pueda posicionarse encima del punto de referencia para Y en el sentido positivo. Si la boquilla desciende justo 1mm, esta debe quedar al ras de la superficie de impresión, como se distingue en la Figura 136.

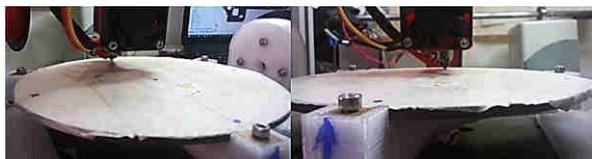


Figura 136. Ubicación de punto de referencia desplazado para Y positivo

3.5.5 Punto desplazado para Y en sentido negativo

Finalmente, se levanta la boquilla 1mm para el sentido positivo del eje Z y se ejecuta el desplazamiento del carro del eje Y de modo que la boquilla tome la disposición de Y en sentido negativo, se mueva 120mm y se posicione justo encima del punto de referencia. Si la boquilla desciende 1mm, esta debe topar exactamente la superficie de impresión, tal como se aprecia en la Figura 137. De esta forma la calibración de la máquina queda definida mediante parámetros seguros, para las posteriores pruebas de impresión.



Figura 137. Ubicación de punto de referencia desplazado para Y negativo

3.6 Calibración del sistema giratorio

Una vez que se ha establecido la perpendicularidad existente entre el eje A y el C, así mismo como la nivelación de la superficie de impresión con respecto a los ejes lineales, se procede a la calibración definitiva del eje C con respecto al sistema general. Se rota la bandeja de impresión verificando que al enviar un desplazamiento de 360° un punto externo del plato parta de una posición y llegue a la misma.

Así mismo, se traslada a la boquilla del Hot End hacia dicho punto externo, haciendo que casi roce con la superficie de impresión, se generan otros 360° y la boquilla debe conservarse al mismo nivel con respecto a la bandeja de impresión durante todo el trayecto de rotación.

3.7 Ejecución del control principal de impresión

3.7.1 Configuración de archivo principal CONFIG.G

El presente archivo debe ser configurado en función de los parámetros de control de impresoras 3D basadas en el firmware RepRap, de tal forma que los comandos puedan establecer regímenes de trabajo adecuados y así se consiga habilitar cada característica de funcionamiento dentro de los equipos electrónicos, como se detalla a continuación.

Para las preferencias generales, se debe trabajar en milímetros con coordenadas absolutas, excepto para el mecanismo extrusor que lo hace con relativas, se debe establecer límites dimensionales dentro del área y volumen de trabajo.

- M111 S0
- G21
- G90
- M83
- M555 P1
- M208 X-60 Y-60 Z0 U0 V0 W0 S1
- M208 X60 Y60 Z150 U100 V360 W1 S0

Para el control mediante la interfaz web se procede a asignar la dirección MAC, dirección IP, puerta de enlace y máscara de red de la conexión a la que se está vinculando la impresora 3D de cinco ejes.

- M540 P0xBE: 0xEF: 0xDE: 0xAD: 0xFE: 0xED
- M552 P192.168.1.14
- M554 P192.168.1.1
- M553 P255.255.255.0

Para la configuración de los sensores de presencia se debe establecer sus estados iniciales, la disposición para ser activados y se debe ajustar los parámetros principales que estén relacionados con los finales de carrera y el sensor de proximidad infrarrojo.

- M574 Z0 S1

- M574 X1 Y1 S1
- M574 U0 V0 W1 S1
- M558 P1 X0 Y0 U0 V0 W0 Z1 F120 H3 T6000
- G31 P538 Z5

Para la configuración de los drivers de motores PaP, se deben establecer los pines de activación, los pasos por milímetro de cada eje, la limitación de corriente para cada motor, las aceleraciones y velocidades máximas y mínimas desarrolladas en el apartado 2.7.1g,

- M584 X0 Y1: 3 Z2 E4 U6 V7 W8
- M92 X80 Y80 Z4000 U170.695187 V170.695187
- M906 X600 Y800 Z700 U1300 V1300 W800 E400
- M201 X200 Y200 Z20 U800 V800 W1000 E400
- M203 X1800 Y1800 Z70 U1200 V1200 W4000 E1800
- M566 X600 Y600 Z40 U600 V600 W500 E120

Para la configuración de la herramienta se asignan el número de definición de herramienta y las temperaturas de funcionamiento y espera, se establecen los pasos por milímetro del mecanismo extrusor y la altura umbral para el sensor de proximidad infrarrojo.

- M563 P1 D1 H2
- G10 P1 S0 R0
- M92 E420
- M558 P1
- G31 Z0.8 P800

Para la configuración del calentador se debe establecer la temperatura máxima ocupada para el PLA, en este caso deshabilitar el calentador de la cama caliente es esencial, configurar los parámetros del termistor y los pines de activación.

- M143 H1 S260
- M140 H-1
- M305 P1 R4700 H0 L0

Para configurar el sistema de refrigeración se asigna el número que define la herramienta ventilador y los parámetros de accionamiento del mismo, como la inversión de señal PWM y la activación del control termostático.

- M106 P0 S0 I0 F500 H-1
- M106 P1 S1 I0 F500 H T45

3.7.2 Configuración del posicionamiento HOME

Los finales de carrera están configurados dentro del firmware con un control ON/OFF, de tal manera que la tarjeta electrónica interpreta el 1 o 0 lógico cuando el sensor está presionado o no, respectivamente. Es así como el sistema general reconoce que tiene ubicados a sus ejes en la posición HOME.

A continuación, se describen los principales comandos dentro de los archivos Gcode secundarios ubicados en la tarjeta microSD y que son llamados cuando se realiza el envío a Home de cada Eje, antes y al final de una impresión.

Para la configuración se toma como ejemplo el enceramiento para el eje X y el eje A, en donde las asignaciones en el programa config.g habilitan a los finales de carrera y si estos cambian de estado, automáticamente el sistema comprende que se ha llegado a la posición home de determinado eje. Para esto se desplaza a cada eje una longitud mayor a la total establecida, por ende, siempre tendrá que accionarse el final de carrera y si este cambia de estado lógico, se procede a la ejecución de la próxima línea de instrucciones.

- G91
- G1 X-240 F1600 S1
- G1 X4 F600
- G1 X-10 S1
- G1 U-10 F170 S1
- G1 Z-4 F200
- G90

3.7.3 Preparación de impresión 3D de cinco ejes

Para la manipulación del control principal del prototipo de impresión 3D de cinco ejes, se debe optar por la ejecución de comandos Gcode en forma manual o bajo la utilización del software externo generador de Gcode de cinco ejes para determinadas geometrías. Sea cual fuere el caso, se debe hacer uso de un software Slicer para impresoras 3D cartesianas, que inicien con la base de impresión en tres ejes, para luego aplicar los movimientos rotativos.

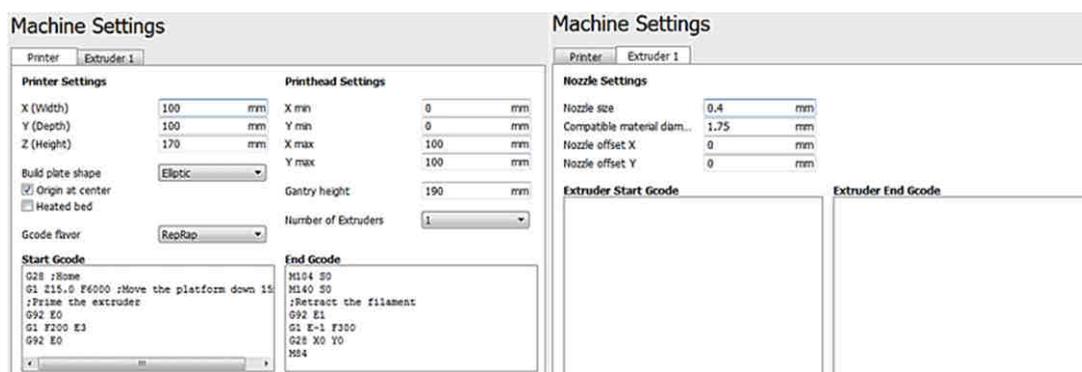


Figura 138. Configuración para el nuevo prototipo de impresora en Cura

El software Slicer adoptado para este proyecto es el denominado CURA, por los beneficios explicados en el apartado 2.7.4f y por ende es necesario conocer las configuraciones concernientes para implementar dicho software dentro del proyecto. Como se ha establecido en el apartado 2.7.4g, se toma en cuenta la configuración según los nuevos parámetros de máquina (Figura 138) y se analizan los datos para la disposición del perfil de impresión, valores descritos en el Capítulo VI de pruebas.

Para la configuración del perfil de impresión se deben establecer parámetros para que la geometría de la pieza fabricada sea lo más similar al diseño del modelo CAD. Entre ellos se encuentran aspectos que tienen que ver con la resolución y la calidad intrínseca del producto, características que no están dentro de los requerimientos de este proyecto, pero que son importantes para tomar en cuenta en el momento de fabricación FDM.

- Layer height (mm): Espesor de las capas que definen calidad del producto.

- Wall thickness (mm) y Top/Bottom thickness (mm): Espesores de las paredes más externas, que deben ser múltiplos con el ancho de la boquilla y el espesor de las capas respectivamente.
- Enable retraction: Activar la retracción del material cuando la boquilla pase por un espacio en el que no se necesite extrusión.
- Infill density (%): Establecer relleno máximo dentro de la pieza para posteriores comparaciones en pruebas de resistencia mecánica.
- Print speed (mm/s) y Travel speed (mm/s): Velocidad de impresión y de movimiento de los ejes. Deben ser menores a los valores calculados por efectos de prueba.
- Enable print cooling y Disable generate support. Activar sistema refrigerante y para este caso desactivar la generación de los apoyos del material, el cual es el objetivo.
- Build plate adhesion type; brim y Width brim (mm). Adhesión a la plataforma con una malla de determinada anchura alrededor de la pieza principal.

Una vez configurado el software Slicer CURA, se establece el enlace entre este software de tipo CAM y el software de diseño CAD, en donde simplemente se requiere de la importación del modelo digital de la pieza base de impresión de 3 ejes para la respectiva generación del Gcode en un archivo de extensión TXT, que luego es llamado desde la interfaz web de control para la respectiva impresión de dicha pieza.

Ahora para la generación del Gcode de movimientos rotativos, el propio usuario puede implementar los comandos de ejecución del eje A o del C, de acuerdo a los grados que se requiera para que se continúe con la impresión después de tener una pieza base de 3 ejes, como se ha explicado en el apartado 2.7.4g.

- Por lo tanto, si la impresión tridimensional de prueba para cinco ejes es de carácter manual, se deben seguir los pasos de control descritos en el apartado 2.7.4g, obviamente si el prototipo de impresión ya ha sido configurado debidamente como se ha tratado de forma previa en este apartado.

- Si la impresión tridimensional de prueba para cinco ejes es de carácter automático, se genera el Gcode de la pieza cilíndrica base tal como se especifica en el apartado 2.7.4h, seguido del Gcode generado por los demás accionamientos rotativos, de tal forma que los comandos se encuentren dispuestos en un mismo archivo de extensión .TXT, para que finalmente se realice la llamada de este archivo desde la interfaz web de control, como se distingue en la Figura 139, y se proceda a la operación automática de impresión.

The screenshot displays the '5-axis 3D Printer Web Control' interface. At the top, there are buttons for 'Desconectar', 'Enviar G-Code...', 'Enviar', and 'Cargar e Imprimir' (highlighted with a red box). To the right, there are 'Disponible' and 'Parada de emergencia' buttons. Below these are several panels: 'Temperaturas de Calentadores' with a 'Gráfico de Temperaturas' area, 'Estado de la Máquina' with a table of axis positions (X, Y, Z, U, V, W) and sensor readings (CPU Temp. at 25.2 °C, Z-Probe at 673), and a 'General' settings panel. The 'General' panel includes 'Información de Software' (Firmware Name: RepRapFirmware for Duet, Firmware Electronics: Duet 0.85, Firmware Version: 1.17RC2 (2016-12-18), Web Interface Version: 1.16), 'Communication' (with 'Conectar Automáticamente' checked, update interval of 250 ms, and 10 retries), and 'Reconnect Preferences' (with 10s delay on firmware update and 20s delay on stop).

Figura 139. Opción de carga de archivo Gcode para ejecución de impresión

CAPÍTULO IV

PRUEBAS DE LA IMPRESORA 3D DE CINCO EJES

4.1 Introducción

El presente capítulo abarca una descripción breve acerca del estado de funcionamiento del prototipo de impresión, en donde prevalecen parámetros dentro de la observación del comportamiento dinámico y estático de mecanismos principales del rediseño mecatrónico perteneciente al sistema general.

Se describe especialmente el desarrollo en la práctica de impresión 3D para cinco ejes, basada en la fabricación de piezas mediante modelos previamente estructurados con los cuales resulte de mejor viabilidad la verificación del comportamiento en la mejora de la resistencia mecánica y en el ahorro de material.

4.2 Pruebas de ortogonalidad de los ejes

Previamente a la prueba de impresión de las piezas en donde se ejecutan movimientos producidos por los ejes rotativos, se debe realizar una comprobación de la ortogonalidad existente entre los ejes cartesianos, para de esta manera sustentar la correcta calibración del sistema dinámico implementada en este caso para los ejes lineales.



Figura 140. Pieza de prueba para ortogonalidad de los ejes

En la Figura 140, se puede observar la prueba de impresión de una pieza que utiliza la técnica de compensación de ortogonalidad, que se describe en el manual de operaciones en el Anexo D. La pieza determina si existe la debida perpendicularidad entre cada eje cartesiano (X-Y, Y-Z, X-Z) y se lo demuestra con el ajuste de una escuadra que se adapta perfectamente a la geometría de la pieza prueba como se distingue en la Figura 141.



Figura 141. Ortogonalidad entre ejes cartesianos

a) X-Y b) Y-Z c) X-Z

4.3 Pruebas de desplazamientos de ejes rotativos

Como se ha realizado en la calibración de los ejes rotativos, el nivel de la superficie de impresión debe quedar exactamente perpendicular a la nueva posición de la superficie cuando se activa 90° el eje basculante A. Como se observa en la Figura 142.



Figura 142. Movimiento basculante satisfactorio del eje A

De forma similar las pruebas de movimiento giratorio por parte del eje C se comprueban colocando una marca en la superficie de impresión y activando 360° para este eje. Obviamente la marca debe regresar al mismo punto de donde partió, tal como se puede observar en la Figura 143. Para una comprobación del sistema general rotativo, se voltea al eje A 90° y con una herramienta puntiaguda de referencia que se proyecte desde el Hot end hacia la superficie de impresión, se hace rotar 360° al eje C, de tal forma que se genere un desplazamiento circular perfecto y la punta de la herramienta siempre esté a la misma distancia con la bandeja de impresión, como se distingue en la Figura 143.

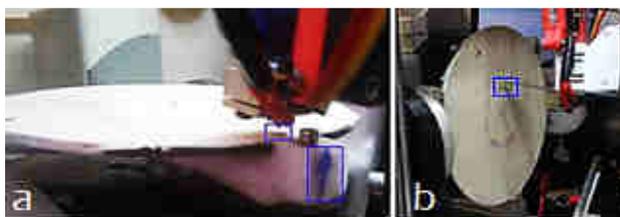


Figura 143. Pruebas de ejecución del movimiento de ejes

a) Del eje giratorio C b) Ambos ejes rotativos

4.4 Prueba para el estudio de ahorro de material soporte en impresión 3D

Como se ha venido explicando en varios apartados, especialmente en el de la proyección hacia alcances y limitaciones del proyecto; las pruebas de impresión 3D que se realizan bajo el uso de maquinaria de cinco ejes requiere de un software Slicer que genere los Gcode de operación, en donde se procese cualquier modelo CAD, sin embargo, esto no ha sido de factible desarrollo, debido a que no existe un programa de código libre generado para tal función, por lo cual para esta prueba se opta por realizar una impresión 3D de cinco ejes para específicas geometrías, como las que se exponen en el presente apartado.

4.4.1 Prueba de ahorro de material mediante impresión de cinco ejes

Para la prueba de impresión en donde se promueva el ahorro de material se diseñó un modelo CAD de una pieza con una geometría que cuenta con varias estructuras en voladizo, para la cual será necesario el uso de algún tipo de soporte en la operación de impresión, sea cual sea el modelo de impresora FDM convencional que se utilice para la fabricación de la pieza prueba.

Entonces hay que tomar en cuenta que la impresora 3D de cinco ejes permitirá fabricar piezas sin que sea necesario el uso de material de apoyo; cabe destacar que la aplicabilidad de este prototipo en la extrusión de material no será igual de óptima para una geometría compleja que requiera de una generación de trayectorias, por ejemplo, curvas. El perfil de impresión para la generación del Gcode en el software Cura se detalla a continuación en la Tabla 40:

Tabla 40.

Configuración del perfil de impresión para pruebas con cinco ejes

Parámetro	Valor	Unidad
Altura de capa	0.14	mm
Altura de capa inicial	0.14	mm
Ancho de línea	0.4	mm
Grosor de pared	0.8	mm
Grosor superior/inferior	1	mm
Densidad de relleno	20	mm
Temperatura	210	°C
Diámetro del material	1.75	mm
Flujo	80	%
Habilitar retracción	Sí	-
Velocidad de impresión	20	mm/s
Velocidad de desplazamiento	20	mm/s
Colocación de soporte	Tocando la placa	
Patrón de soporte	Rejilla	
Densidad del soporte	20	%

A continuación, se muestran 4 casos principales de las diferentes disposiciones de impresión 3D posible para un mismo modelo:

a. Caso 1 y caso 2: Orientación vertical con apoyo y sin apoyo

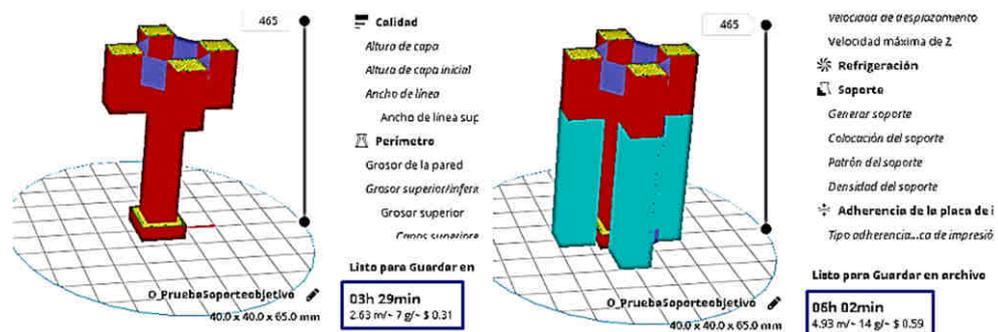


Figura 144. Caso 1 y 2 de prueba para ahorro de material

b. **Caso 3: Orientación horizontal**

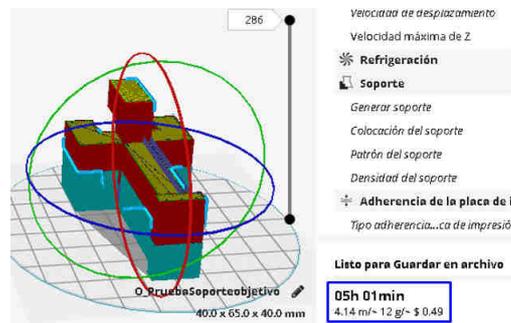


Figura 145. Caso 3 de prueba para ahorro de material

c. **Caso 4: Orientación vertical invertido**

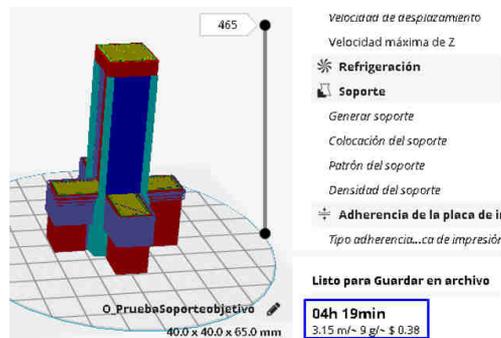


Figura 146. Caso 4 de prueba para ahorro de material

4.4.2 Análisis de la prueba de impresión para ahorro de material

Según el cálculo de material consumido para determinada pieza que se genera mediante el software Slicer; en el primer caso se usaría menor material con respecto a los demás casos, ya que no se genera ningún tipo de soporte. Para los demás casos se probó diferentes orientaciones, con diferentes resultados, los cuales se detallan en la Tabla 41.

Tabla 41.

Comparación entre consumo de recursos para cada caso de impresión

	Filamento usado	Peso de filamento usado	Costo del filamento
Caso1	2.63 m	7gr	\$0.31
Caso2	4.93 m	14 gr	\$0.59
Caso3	4.14 m	12 gr	\$0.49
Caso4	3.15 m	9gr	\$0.38

Los resultados de la tabla muestran que, el caso 1 tiene un gasto de 7gr, le sigue de cerca el caso 4 con 9gr de material usado. Con lo cual se tiene un ahorro de al menos el 22% de material, que es directamente relacionado con la cantidad de soporte que se utiliza.

$$\% \text{ ahorro} = \left(1 - \frac{7gr}{9gr}\right) * 100\%$$

$$\% \text{ ahorro} = 22\%$$

En la Figura 147, se muestra el resultado final de impresión 3D en donde se ha aplicado la tecnología de cinco ejes para la pieza expuesta en el primer caso, en donde se promueve a la mayor cantidad de ahorro de material mediante la exclusión total del uso de aporte de material para los soportes de la pieza. Y se demuestra que la impresión con este sistema innovador resulta factible y con un satisfactorio análisis de resultados.

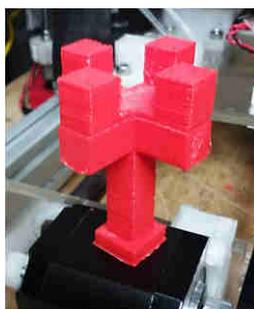


Figura 147. Pieza de prueba que sustenta el ahorro de material con el uso de 5 ejes

De la misma manera como se ha realizado una comparación de ahorro de material mediante software para todas las disposiciones de impresión con esta geometría específica, se demuestra que la pieza fabricada con la impresión tridimensional convencional debería obligatoriamente utilizar material de apoyo, sin embargo para la siguiente prueba se ha realizado una comprobación real del ahorro de material para la misma geometría, pero en una disposición distinta en donde según el software Slicer, se utiliza la menor cantidad de material de apoyo. (Ver Figura 148)

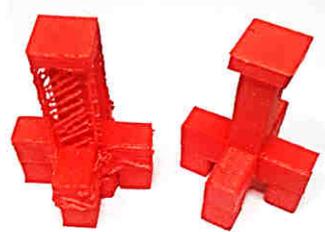


Figura 148. Comparación entre cantidad de material de soporte para cada caso

Entonces se puede corroborar que la prueba ha sido realizada con éxito cuando se comparan los pesos de cada pieza, que ha sido fabricada mediante similares características entre sí y se denota que en referencia la una de la otra existe un claro desperdicio de material para el menor de los casos del nueve por ciento del total del material de la pieza, como se puede apreciar en la Figura 149.

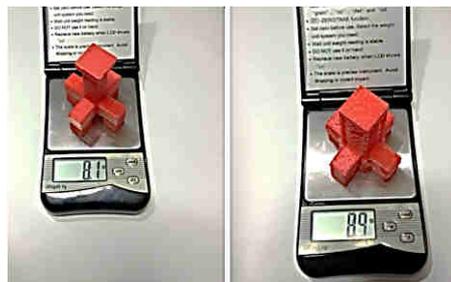


Figura 149. Pesaje de las piezas de prueba para el ahorro de material

$$\% \text{ ahorro} = \left(1 - \frac{8.1gr}{8.9gr}\right) * 100\%$$

$$\% \text{ ahorro} = 9\%$$

4.5 Prueba para estudio de mejora de resistencia mecánica en impresión 3D

Para la presente prueba de impresión 3D con uso de tecnología de cinco ejes, en donde se promueve al mejoramiento de la resistencia mecánica en la pieza fabricada, se tiene una geometría orientada al revestimiento de superficies planas, misma que ha sido representada en una aplicación sencilla de una viga de sección transversal cuadrada (Figura 150), en donde se aporta un revestimiento en sus caras laterales (ver apartado 2.7.4g) para posteriormente proceder a una comparación de una exposición de cargas para un ensayo de deflexión experimental con otra viga de las mismas dimensiones pero que carece del revestimiento.

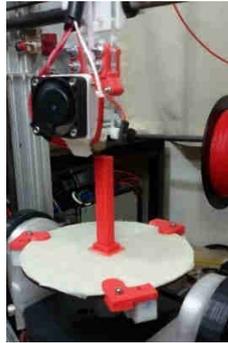


Figura 150. Viga para prueba de mejora en resistencia mecánica

4.5.1 Prueba de resistencia mecánica para impresiones 3D de cinco ejes

Entonces se procede a realizar la fabricación de tres pares de “probetas” con las cuales se analiza un experimento de deflexión de la viga en una disposición en voladizo y se van entregando cargas paulatinamente hasta llegar al punto de fractura. Obviamente si la viga que dispone del revestimiento soporta los mayores esfuerzos, se considera que la dicha disposición de revestimiento sobre sus superficies laterales ha desarrollado un efecto de aumento de resistencia mecánica.

Para iniciar se fabrican las piezas bases de impresión, una con el debido recubrimiento superficial a dos costados de la pieza y la otra con una disposición normal cartesiana, sin el uso de recubrimiento. Las dos piezas de prueba deben estar fabricadas a las mismas condiciones del perfil de impresión, como se describe en la Tabla 40 y de igual forma se debe disponer de similar geometría entre ambas como se muestra en la Figura 151.

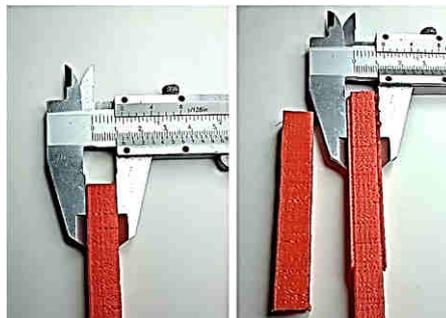


Figura 151. Geometría similar de referencia entre pieza con recubrimiento y sin él

Posteriormente se realiza el ensayo experimental de deflexión en el cual se utiliza un soporte para la viga en un extremo y en el otro se dispone de la entrega de una carga

mecánica que va creciendo paulatinamente hasta que se encuentre el punto de fractura de la pieza. Para que exista luego una referencia de comprobación valedera entre las dos piezas de prueba, es necesario cerciorarse de las dimensiones de la sección en donde se generan los esfuerzos y también la distancia a la que se encuentra el punto de apoyo de cada viga, como se observa en la Figura 152.



Figura 152. Verificación de posicionamiento para prueba de resistencia

4.5.2 Análisis de prueba de impresión para estudio de resistencia mecánica

Entonces se toma en cuenta un análisis del ensayo de deflexión para tres pares de piezas, es decir tres sin recubrimiento y tres que sí lo poseen, para simplemente aplicar un peso sobre la viga impresa y visualizar con una balanza cuál es el valor del peso que se está entregando cuando la estructura ha fallado por fractura. A continuación, en la Tabla 42, se pueden distinguir los valores de los pesos en Newton con los cuales se produjo la fractura de cada pieza de prueba.

Tabla 42.

Fuerza de fallo por fractura en piezas de prueba de resistencia mecánica

Pieza con revestimiento	Fuerza a la que se produce la rotura (N)	Pieza sin revestimiento	Fuerza a la que se produce la rotura (N)
1	61.8	1	18.71
2	50.5	2	16.2
3	56.28	3	15.17
PROMEDIO	56.19		16.69

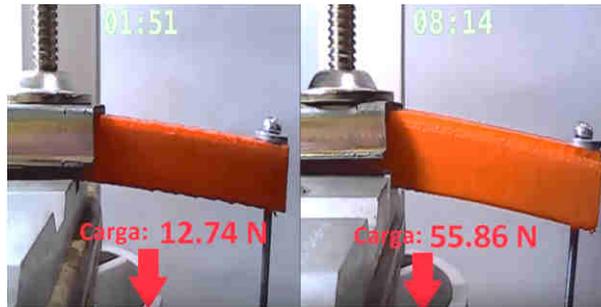


Figura 153. Campo de ensayo experimental para piezas de prueba

En la Figura 153, se puede divisar como la carga realiza el efecto de deflexión previo a la rotura, sin embargo, puede considerarse a este tipo de material de impresión de carácter frágil, por lo cual tiende a causar su rotura antes de generar mayor deflexión. Entonces ante términos promedio de la Tabla 42 que se refiere a las fuerzas aplicadas para alcanzar la rotura de la pieza prueba, se determina una relación cuantitativa para especificar el valor de aumento en la resistencia mecánica de la pieza fabricada.

$$\text{Razón} = \left(\frac{56.19 \text{ N}}{16.69 \text{ N}} \right) = 3.3666$$

$$\text{Razón} = 3.37$$

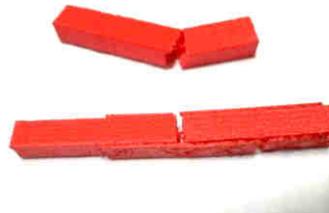


Figura 154. Piezas de prueba después de los ensayos de rotura

La disposición del prototipo bajo cinco ejes en impresión 3D ayuda a que la pieza prueba recubierta sea aproximadamente 3.2 veces más resistente que el primer modelo. El mismo ejemplo está impulsando el uso de cinco ejes en la impresión 3D para el aporte de revestimiento hacia geometrías más complejas en donde al implementar movimientos rotativos se pueden ir cambiando las orientaciones del filamento de la capa de recubrimiento e incursionar en la mejora de la resistencia mecánica para esa determinada geometría impresa.

4.6 Análisis técnico-económico

Para la implementación del prototipo del proyecto de investigación se requiere de materiales de carácter mecánico, electrónico, dispositivos de control y material de producción en general, a la vez resulta de gran beneficio la adquisición de dichos elementos dentro del propio mercado nacional, para evitar el coste de importación. Sin embargo, algunos de los dispositivos resultan necesarios de conseguirlos en el extranjero.

Tabla 43.

Costos de materiales de construcción

Ítem	Descripción	Cant.	P. Unit. (\$)	P. Total (\$)
1	Motores PaP	5	15	105
2	Motor con caja reductora	2	33.88	67.76
3	Tarjeta de control principal	1	129.99	129.99
4	Tarjeta expansión de control	1	59.99	59.99
5	Conjunto "Hot End" y extrusor	1	85.48	85.48
6	Sensores finales de carrera	3	0.80	2.4
7	Material eléctrico/electrónico general	1	23.63	23.63
8	Fuente de alimentación	1	30	30
9	Correa y poleas dentadas	1	43	43
10	Varillas lisas de acero	3	25	75
11	Varilla roscada	1	4	4
12	Rodamientos lineales y radiales	1	93.10	93.10
13	Elementos de sujeción	1	13.10	13.10
14	Perfiles de aluminio	2	63	126
15	Piezas impresas PLA	1	239	239
16	Plancha de acrílico	1	64	64
17	Cilindro de aluminio	1	6.70	6.70
18	Cama de deposición de vidrio	1	3	3
19	Carrete de filamento	2	35	70
20	Herramientas de producción	1	25	25
21	Costos de importación	1	250	250
TOTAL				1516.15

Como se ha podido distinguir en la Tabla 43, el total de gastos invertidos para el desarrollo del prototipo de impresión 3D de cinco ejes es de \$1516.15, un valor bastante económico en función del precio de una impresora profesional que posee la tecnología de cinco ejes, con software privativo y que se encuentra disponible para la venta al público, como lo es la conocida 5axismaker 5xm400, una de las primeras impresoras de cinco ejes en lanzarse al mercado, de la cual se conoce su costo en 5000 libras esterlinas, equivalentes a 6878.80 dólares (Ver Figura 155). Por lo tanto, existe un ahorro económico de hasta 4.5 veces el valor convencional.

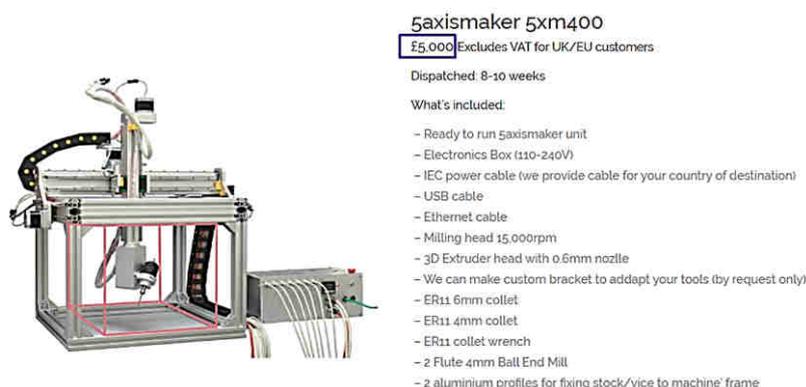


Figura 155. Precio para impresora 3D de cinco ejes 5axismaker 5xm400

Fuente: (5AXISWORKS, 2014)

4.7 Validación de la hipótesis

La hipótesis que se genera dentro del proyecto de investigación viene definida como:

“¿El diseño e implementación de un prototipo de impresora 3d de cinco ejes ayuda al ahorro de material y al mejoramiento de la resistencia mecánica en piezas fabricadas mediante el método de deposición de material fundido en la universidad de las fuerzas armadas ESPE extensión Latacunga?”

En lo que corresponde a la validación de la hipótesis la variable independiente se representa como el prototipo de impresora 3d de cinco ejes y las variables dependientes se relacionan mediante el ahorro de material y la mejora de resistencia mecánica en piezas fabricadas. Se utiliza la técnica de Chi-cuadrado en donde los datos observados que se

tienen para seis modelos de prueba (Como se explican en los apartados 4.4 y 4.5) son los siguientes:

Tabla 44.

Cantidad de material utilizado en impresión y carga de falla por fractura

#Prueba	Con soporte (g)	Sin soporte (g)	Sin refuerzo (N)	Con refuerzo (N)	%Ahorro	%Resistencia
1	8,9	8,1	10,14	48,16	8,1	374,95
2	10	9,132	11,95	50,5	8,68	322,59
3	10,5	9,00	12,74	55,86	14,28	338,46
4	12	10,51	15,17	56,28	12,38	270,99
5	15	12,72	16,2	50,5	15,17	211,72
6	17	14,501	18,71	61,8	14,7	230,30

Como resultado de la hipótesis nula (Ho) e hipótesis alternativa (H1) se tiene:

- Ho (Hipótesis nula): El diseño e implementación de un prototipo de impresora 3D de cinco ejes no ayuda al ahorro de material en piezas fabricadas mediante el método de deposición de material fundido en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.
- H1(Hipótesis alternativa): El diseño e implementación de un prototipo de impresora 3D de cinco ejes ayuda al ahorro de material en piezas fabricadas mediante el método de deposición de material fundido en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

Tabla 45.

Resultados de frecuencias observadas

							PROM
%Ahorro	8,1	8,68	14,28	12,38	15,17	14,7	73,31
%Resist.	374,95	322,59	338,46	270,99	211,72	230,30	1749,03
TOTAL	383,05	331,27	352,74	283,37	226,89	245,00	1822,34

a. Cálculo de las frecuencias esperadas o teóricas

El cálculo de las frecuencias esperadas se determina mediante la ecuación (36), en donde sus valores se expresan en la Tabla 46.

$$f_e = \frac{T_f * T_c}{S_T} \quad (36)$$

Donde:

- f_e : Frecuencia esperada
- T_f : Total de filas de la casilla tomada
- T_c : Total de columnas de la casilla tomada
- S_T : Suma total

Tabla 46.

Resultado de frecuencias esperadas

	PROM.					
%Ahorro	15,41	13,33	14,19	11,40	9,13	9,86
%Resistencia	367,64	317,95	338,55	271,98	217,77	235,15

b. Cálculo del grado de libertad

$$(6 - 1) * (2 - 1) = 5$$

c. Cálculo de Chi Cuadrado

$$X^2 = \sum \frac{(f_o - f_t)^2}{f_t} \quad (37)$$

Donde:

- X^2 : Chi cuadrado para validación de hipótesis
- f_o : Frecuencia esperada
- f_t : Frecuencia teórica

Tabla 47.

Resultado de Chi Cuadrado para validación de hipótesis

%ahorro	3,47	1,62	0,00	0,08	4,00	2,38	
%resistencia	0,15	0,07	0,00	0,00	0,17	0,10	
TOTAL	3,61	1,69	0,00	0,09	4,17	2,48	12,04

Suponiendo un riesgo del 5% o lo que es lo mismo una confianza del 95%, y a la vez el grado de libertad calculado que es 5, según la Figura 156, se puede determinar el valor crítico para rechazar la hipótesis alternativa.

v	0,005	0,01	0,025	0,05	0,95	0,975	0,99	0,995
1	0,00003935	0,000157	0,000982	0,00393	3,841	5,024	6,635	7,879
2	0,010	0,020	0,051	0,103	5,991	7,378	9,210	10,597
3	0,072	0,115	0,216	0,352	7,815	9,348	11,345	12,838
4	0,207	0,297	0,484	0,711	9,488	11,143	13,277	14,860
5	0,412	0,554	0,831	1,145	11,070	12,832	15,086	16,750
6	0,676	0,872	1,237	1,635	12,592	14,449	16,812	18,548
7	0,989	1,239	1,690	2,167	14,067	16,013	18,475	20,278
8	1,344	1,647	2,180	2,733	15,507	17,535	20,090	21,955
9	1,735	2,088	2,700	3,325	16,919	19,023	21,666	23,589
10	2,156	2,558	3,247	3,940	18,307	20,483	23,209	25,188

Figura 156. Valores críticos para rechazar una hipótesis alternativa

Fuente: (EIO-UPC, s.f.)

Por lo tanto, como 12.04 es mayor a 11.070 se puede decir que el prototipo de impresora tridimensional de cinco ejes ayuda al ahorro de material y aumenta la resistencia mecánica para piezas fabricadas en FDM, rechazando de esta forma la hipótesis nula.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- Se indagó acerca de la posible existencia de impresoras 3D comerciales que se puedan tomar como referencia para este proyecto mediante el análisis de su funcionamiento y estructura. Sin embargo, al principio de la investigación se encontró que, en el mercado de la manufactura aditiva, sólo existía una máquina comercial con la capacidad de impresión multiejes, la denominada 5AxisMaker. Después del respectivo análisis de la configuración de disposición de ejes de una máquina-herramienta, se llegó a la conclusión de que emular este tipo de sistema, el mismo que no es de código abierto, llevaría grandes costos de implementación, dado que dicha máquina, también tiene una configuración cabezal/cabezal que complica el rediseño, sin mencionar el impedimento principal, la ausencia de un generador de código que se adapte a la configuración mencionada.
- Por otro lado, se investigó acerca de prototipos industriales que estén implementando manufactura aditiva, en donde cabe destacar la máquina concebida por la empresa ENOMOTO KOGYO Co., Ltd., la cual es un híbrido entre una impresora 3D y un centro de mecanizado de 5 ejes para mejorar el acabado de la pieza fabricada, sin embargo, esta máquina está en fase de desarrollo, aunque se tiene prototipos construidos, no se encontró información útil. A nivel universitario, sólo se pudo encontrar un trabajo de investigación que modifica a una impresora de software libre para la adaptación de dos nuevos ejes, sin embargo, como se mencionó antes, también carece de la capacidad de generación de Gcode que se adapte a su configuración de ejes, limitándose únicamente a la concepción de dos geometrías únicas, dicha máquina denominada “Pentarod” sólo posee la capacidad

de impresión para dichas geometrías, el sistema fue de relativa ayuda, aunque en la investigación tampoco se encontró mayor información que defina al presente trabajo.

- Se plantearon varias alternativas para la selección del mecanismo de guiado dinámico, para lo cual no sólo se analizaron las configuraciones multiejes, sino también la capacidad de adaptar estas configuraciones en un impresora 3D base, teniendo en cuenta limitaciones mecánicas, electrónicas y de control. Para lo cual se encontró como mejor alternativa una configuración de impresora base del tipo cartesiano y una configuración de disposición de ejes mesa/mesa.
- Se realizó un planteamiento de alternativas para la adaptación del mecanismo para los dos ejes adicionales en impresoras Open source RepRap, partiendo principalmente del concepto de configuración de ejes en máquinas herramientas industriales, teniendo muy en cuenta también la capacidad de adaptación del modelo de impresora 3D base, analizando sus beneficios y defectos posibles, en el ámbito electrónico, mecánico y de control, factores a considerar ya que podrían limitar este trabajo tanto para el funcionamiento como para la construcción, implementación y control del prototipo propuesto.
- Se realizó la selección de alternativas para la modificación de la impresora base seleccionada, en este caso, el modelo Ormerod de RepRap, para lo cual se concluyó que se debía utilizar elementos que se acoplaran al modelo original o que, a su vez, sean fácilmente adaptables, esto fue posible gracias a que el modelo base es Open source lo cual facilita también la modificación de cualquiera de sus partes mecánicas.
- Se implementaron los cambios diseñados para el nuevo sistema mecánico, así como también un cambio en el firmware para hacer uso de los ejes adicionales sin resultados favorables, ya que en la versión del firmware existente al principio de esta investigación solo implementaba el uso de 3 ejes (X, Y, Z) para el sistema cartesiano, sin embargo, meses después, en la comunidad RepRap se desarrolló una nueva versión del firmware el cual implementaba 3 ejes más (U, V, W) para el uso de carros adicionales independientes en X, lo cual supuso una ventaja en la

implementación del control. Con el nuevo firmware se realizó los cambios precisos en la programación para tener un mejor control de los ejes adicionales.

- Una vez implementado el nuevo sistema mecánico y el firmware modificado, se procedió a realizar las pruebas de calibración, para lo cual se comprobó la ortogonalidad en los ejes cartesianos, así como también se probó mediante un inclinómetro los movimientos precisos del eje A como del eje C.
- Se verificó de manera experimental el ahorro de material al imprimir la geometría seleccionada con y sin material de soporte, en el cual se logró evidenciar realmente el ahorro de material respecto a lo teorizado en un principio. Además, se realizó un ensayo de deflexión experimental en el cual se comparó la resistencia de dos piezas fabricadas en la misma impresora, en la cual una fue impresa de manera tradicional, mientras que la segunda pieza fue impresa usando los dos ejes adicionales para darle una capa de recubrimiento, como resultado se comprobó que la pieza con revestimiento puede llegar a soportar cargas mayores.

5.2 RECOMENDACIONES

- Para la construcción de este prototipo se debe tomar muy en cuenta las tolerancias necesarias en cortes por láser, mecanizado e impresión 3D, ya que los errores se transmiten hacia la pieza impresa con cinco ejes.
- Se recomienda considerar mejorar la sujeción del eje Z para evitar vibraciones.
- Se recomienda la implementación de un sistema de alimentación de material ya que, si el filamento se tensiona entre el extrusor y el rollo puede afectar la trayectoria del eje X al someter a la estructura a una fuerza externa.
- Se recomienda eliminar el juego en la transmisión del eje Z, ya que el juego presente en los engranes puede afectar el correcto desplazamiento en este eje.
- Para evitar cualquier daño en el manejo o calibración de la máquina se recomienda revisar el manual de operación y mantenimiento, en el que se detalla el manejo de los ejes adicionales para fin de evitar ruptura en la transmisión de engranes.
- A fin de evitar taponamiento en el extrusor, se recomienda tener un correcto perfil de impresión en el software Slicer.

- Para asegurar el correcto funcionamiento se recomienda realizar una prueba de ortogonalidad entre los ejes cartesianos especialmente cuando la máquina es movida de su lugar de trabajo.
- Para evitar sobrecalentamiento en la placa de control, se recomienda tener una adecuada ventilación tanto sobre la placa como para la fuente de alimentación.
- Como se menciona en el apartado 1.6, actualmente no existe un software que genere el código G para el manejo de una impresora 3D de cinco ejes, por lo cual no se puede aprovechar al 100% la funcionalidad de la máquina y debido a esto se recomienda la elaboración de un software Slicer especial para este prototipo.

5.3 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 3DSmart. (2015). *Kit de Transmisión GT2 20 Dientes*. Recuperado el 15 de Enero de 2018, obtenido de 3dsmart.es: <http://www.3dsmart.es/impresora-3d/mecanica/poleas-y-correas/kit-de-transmision-gt2-20-dientes.html>
- 5AXIS.ORG. (2017). *Why should you invest in 5-axis?* Recuperado el 15 de Diciembre de 2017, obtenido de 5-axis.org: <http://www.5-axis.org/index.php/why-5-axis-benefits-of-switching-to-a-5-axis-machine/>
- 5AXISWORKS. (2014). *5axismaker 5xm400*. Recuperado el 20 de Febrero de 2018, obtenido de www.5axismaker.com: <http://www.5axismaker.com/product/5axismaker-5xm400/>
- Airaldi, G., Antúnez, G., & Lamath, N. (2015). Plataforma de posicionamiento modular para impresión 3D, fresado y otras aplicaciones. *Universidad de la República*, 19-20.
- AliExpress. (13 de Julio de 2013). *Planetary Gearbox for nema 34 Gear Stepper Motor*. Recuperado el 15 de Enero de 2018, obtenido de es.aliexpress.com: <https://es.aliexpress.com/item/New-5-1-NEMA34-Planetary-Gearbox-for-86-mm-Gear-Stepper-Motor-50N-m-6944oz-in/32593039218.html>
- All3DP. (25 de Noviembre de 2016). *All About 3D Printing*. Recuperado el 02 de Diciembre de 2017, obtenido de all3dp.com: <https://all3dp.com/es/mejores-programas-software-gratis-impresora-3d/>
- Alonso Rodríguez, J. A. (2015). Propuesta de una metodología para la mejora de la transferencia de información en la documentación gráfica de ingeniería. *Universidad de Vigo*, 58-59.
- Aprendamos tecnología. (28 de Agosto de 2008). *Sistema simple de poleas con correa*. Recuperado el 15 de Enero de 2018, obtenido de aprendemostecnologia.org: <https://aprendemostecnologia.org/2008/08/28/sistema-simple-de-poleas-con-correa/>

- Apro, K. (2008). *Secrets of 5-Axis Machining*. New York: Industrial Press Inc.
- Arias Granda, J. S., & Toapanta Lascano, L. D. (2013). Diseño y construcción de una mesa posicionadora de soldadura en dos ejes para el brazo robótico KUKA KR-5ARC del laboratorio de Robótica Industrial de la ESPE extensión Latacunga. *Universidad de las Fuerzas Armadas "ESPE"*, 44-57.
- Armada Pita, D. (2015). Desarrollo de impresora 3D Open-source. Propuesta e implementación de nuevas dimensiones y mejoras estructurales. *Universidade Da Coruña*, 32.
- ASTM Norma. (2004). Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. *ASTM*.
- Bejarano, P. (2013). *Think big. Llegan nuevos materiales para la impresión 3D*. Recuperado el 01 de Junio de 2017, obtenido de [blogthinkbig.com: http://blogthinkbig.com/gama-materiales-impresion-3d/](http://blogthinkbig.com/gama-materiales-impresion-3d/)
- Bell, C., & Cameron, R. (2014). *Maintaining and troubleshooting your 3D printer*. Apress.
- BigRep. (2016). *THE NEW ONE. The most advanced large scale 3D printing experience*. Recuperado el 05 de Diciembre de 2017, obtenido de [bigrep.com: https://bigrep.com/wp-content/uploads/2016/11/bigrep-one-brochure-ES.pdf](https://bigrep.com/wp-content/uploads/2016/11/bigrep-one-brochure-ES.pdf)
- Bobo García, R. (2013). Diseño de una impresora 3D capaz de crear múltiples objetos simultáneamente. *Universidad Politécnica de Madrid*, 40.
- C. Metrology. (2016). *Universal Test Machine*. Recuperado el 10 de Diciembre de 2017, obtenido de [cmsmetrology.com.mx: https://www.cmsmetrology.com.mx/equipos/fuerza/máquinasuniversales-de-ensayo/](https://www.cmsmetrology.com.mx/equipos/fuerza/máquinasuniversales-de-ensayo/)
- Carabalí, E. L., & Coral, E. S. (2016). Diseño y construcción de una impresora 3D con impresión de soporte en ambiente controlado. *Universidad de las Fuerzas Armadas "ESPE"*, 46.

- Cifuentes, M., Izurieta, A., & Faria, H. (12 de Septiembre de 2013). *Medición de la efectividad del manejo de áreas protegidas*. Recuperado el 09 de Enero de 2018, obtenido de [portals.iucn.org: https://portals.iucn.org/library/efiles/documents/2000-131-Es.pdf](https://portals.iucn.org/library/efiles/documents/2000-131-Es.pdf)
- CNET. (21 de Junio de 2015). *En Ámsterdam crearán un puente usando una impresora 3D*. Recuperado el 05 de Diciembre de 2017, obtenido de [cnet.com: https://www.cnet.com/es/noticias/amsterdam-puente-impresora-3d/](https://www.cnet.com/es/noticias/amsterdam-puente-impresora-3d/)
- Cope, M. (24 de Junio de 2013). *Programación de 5 ejes: ¿Programación con vectores de herramienta?* Recuperado el 15 de Diciembre de 2017, obtenido de [blog.hurco.com: http://blog.hurco.com/blog/bid/309807/5-axis-programming-programming-with-tool-vectors?source=Blog_Email_\[5-Axis%20Programming:%20\]](http://blog.hurco.com/blog/bid/309807/5-axis-programming-programming-with-tool-vectors?source=Blog_Email_[5-Axis%20Programming:%20])
- David Crocker's Solutions blog. (11 de Junio de 2014). *Five Tips for using dc42 Firmware on the RepRapPro Ormerod*. Recuperado el 05 de Diciembre de 2017, obtenido de [miscsolutions.wordpress.com: https://miscsolutions.wordpress.com/2014/06/11/five-tips-for-using-dc42-firmware-on-the-reprapro-ormerod/](https://miscsolutions.wordpress.com/2014/06/11/five-tips-for-using-dc42-firmware-on-the-reprapro-ormerod/)
- De la Peña García, S., & Cañete Vela, I. (2014). Diseño del prototipo de un kit de impresora 3D. *Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona*, 57.
- Dima3D. (05 de Enero de 2015). *Motores paso a paso en impresión 3D (I): Nociones básicas*. Recuperado el 20 de Enero de 2018, obtenido de [dima3d.com: http://www.dima3d.com/motores-paso-a-paso-en-impresion-3d-i-nociones-basicas-2/](http://www.dima3d.com/motores-paso-a-paso-en-impresion-3d-i-nociones-basicas-2/)
- DMG MORI. (s.f.). *Serie ULTRASONIC*. Recuperado el 10 de Enero de 2018, obtenido de [mx.dmgmori.com: https://mx.dmgmori.com/blob/388196/b644e9babb956203a19f45d48790fadb/pu5mx13-ultrasonic-pdf-data.pdf](https://mx.dmgmori.com/blob/388196/b644e9babb956203a19f45d48790fadb/pu5mx13-ultrasonic-pdf-data.pdf)

- Dominguez Sánchez, R. (22 de Junio de 2015). *Impresiones en 3D: 5 claves a tener en cuenta*. Recuperado el 03 de Diciembre de 2017, obtenido de Research Design Solutions: <http://rds077.blogspot.com/2015/06/impresion-3d-5-claves-tener-en-cuenta.html>
- DUET3D. (2016). *Choosing stepper motors*. Recuperado el 20 de Enero de 2018, obtenido de duet3d.com: https://duet3d.com/wiki/Choosing_stepper_motors#Step_angle
- DUET3D. (s.f.). *Duet Web Control*. Recuperado el 08 de Febrero de 2018, obtenido de duet3d.com: https://duet3d.com/wiki/Duet_Web_Control
- EIO-UPC. (s.f.). *Áreas acumuladas de la distribución Chi Cuadrado*. Recuperado el 20 de Febrero de 2018, obtenido de www-eio.upc.edu: <http://www-eio.upc.edu/teaching/estad/MC/taules/Chi2.pdf>
- Eivar, G. (2009). *Diseño de un robot cartesiano para ordenar elementos electrónicos*. Universidad Técnica de Ambato.
- ENTRES.D. (2017). *Piezas impresas en 3D más resistentes*. Recuperado el 03 de Diciembre de 2017, obtenido de entresd.es: <http://entresd.es/blog/piezas-impresas-en-3d-mas-resistentes/>
- GRAB CAD. (28 de Noviembre de 2014). *5th CNC Rotary Axis*. Recuperado el 15 de Diciembre de 2017, obtenido de grabcad.com: <https://grabcad.com/library/5th-cnc-rotary-axis-1>
- Grunewald, S. J. (03 de Mayo de 2016). *Check Out this Awesome 5-Axis 3D Printer and Milling Machine Developed by Japanese Researchers*. Obtenido de 3Dprint: <https://3dprint.com/132475/5-axis-3d-printer-japan/>
- Guías Prácticas.COM. (14 de Abril de 2017). *Firmware*. Recuperado el 05 de Diciembre de 2017, obtenido de [guiaspracticas.com](http://www.guiaspracticas.com): <http://www.guiaspracticas.com/ordenadores-de-sobremesa/firmware>

- Haas Automation Inc. (Febrero de 2013). *Mesas rotativas y divisores indexados*. Recuperado el 10 de Enero de 2018, obtenido de metalia.es: http://www.metalia.es/data/empresas/Haas/pdf/ROTARY_1034.pdf
- Horsey, J. (05 de Mayo de 2016). *New 5-axis Hybrid 3D Printer Could Remove The Need For Supports*. Recuperado el 10 de Enero de 2018, obtenido de geeky-gadgets.com: <https://www.geeky-gadgets.com/new-5-axis-hybrid-3d-printer-05-05-2016/>
- Horvath, J., & Cameron, R. (2015). *3D Printing with MatterControl*. Apress.
- Hovin, M. (2014). *Coordinates systems for 5 axis milling*. Recuperado el 15 de Diciembre de 2017, obtenido de heim.ifi: <http://heim.ifi.uio.no/matsh/inf4500/lec/0.php?s=7&l=14&d=0>
- HWlibre. (2014). *Theta una impresora polar libre*. Recuperado el 01 de Julio de 2017, obtenido de hwlibre.com: <http://www.hwlibre.com/theta-una-impresora-polar-libre/>
- IBARMIA. (15 de Octubre de 2010). *IBARMIA, fabricación aditiva y mecanizado multitarea en una misma máquina*. Obtenido de IBARMIA: <http://www.ibarmia.com/es/actualidad/ibarmia-aditivo-mecanizado-multitarea>
- Ikaslab. (10 de Abril de 2015). *¿Tienes problemas de impresión?* Recuperado el 05 de Diciembre de 2017, obtenido de wiki.ikaslab.org: http://wiki.ikaslab.org/index.php/%C2%BFTienes_problemas_de_impresi%C3%B3n%3F
- Illescas, M. (2012). Construcción de una impresora 3D Open Source. *Universidad Carlos III de Madrid*, 28.
- IMPRIMALIA 3D. (2016). *Fortus 900mc*. Recuperado el 05 de Diciembre de 2017, obtenido de imprimalia3d.com: <http://imprimalia3d.com/services/fortus-900mc>
- IMPRIMALIA 3D. (2016). *Mojo*. Recuperado el 05 de Diciembre de 2017, obtenido de imprimalia3d.com: <http://imprimalia3d.com/services/mojo>

- IMPRIMALIA3D. (s.f.). *CURA*. Recuperado el 08 de Febrero de 2018, obtenido de imprimalia3d.com: <http://imprimalia3d.com/services/cura>
- Interempresas. (05 de Julio de 2016). *Fabricación aditiva de componentes en 3D en calidad de piezas acabadas*. Obtenido de Interempresas: <https://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/159284-Fabricacion-aditiva-de-componentes-en-3D-en-calidad-de-piezas-acabadas.html>
- Interempresas.net. (11 de Marzo de 2014). *Una impresora 3D con parámetros industriales*. Recuperado el 05 de Diciembre de 2017, obtenido de Interempresas.net: <http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/120548-Una-impresora-3D-con-parametros-industriales.html>
- Kalpakjian, S., & Schmid, S. (2008). *Manufactura, ingeniería y tecnología*. México DF: Pearson Prentice Hall.
- Krassenstein, B. (21 de Septiembre de 2014). *5AxisMaker - First Affordable 5-axis 3D Printer & Multi-fabricator Launches On Kickstarter Tomorrow*. Obtenido de 3Dprint: <https://3dprint.com/16074/5axismaker-3d-printer/>
- LCM. (s.f.). *Tavole girevoli cnc con inclinazione manuale*. Recuperado el 10 de Enero de 2018, obtenido de [lcmitalia.it](http://www.lcmitalia.it): <http://www.lcmitalia.it/download/File/BAS-V.pdf>
- Liou, F. W. (2007). *Rapid Prototyping and Engineering Applications*. Virginia: CRC Press.
- López, J. (2012). *Mejoramiento del diseño y ensamblado de una impresora en 3D*. Cuernavaca: Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico.
- Los operadores mecánicos. (04 de Noviembre de 2015). *Tornillo sin fin*. Recuperado el 15 de Enero de 2018, obtenido de recuperaciontecno87.blogspot.com: <http://recuperaciontecno87.blogspot.com/2015/11/tornillo-sin-fin.html>

- MakerShopBCN. (2014). *Perfil aluminio 20x40 T-Slot 5*. Recuperado el 15 de Enero de 2018, obtenido de makershopbcn.com: <https://makershopbcn.com/producto/perfil-aluminio-20x40-t-slot-5>
- Maldonado Toro, G. X. (2012). 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. *Universidad Internacional del Ecuador*, 8.
- Mecafenix. (2017). *Motor paso a paso ¿qué es y cómo funciona?* Recuperado el 06 de Diciembre de 2017, obtenido de ingmecafenix.com: <http://www.ingmecafenix.com/electricidad-industrial/motor-paso-a-paso/>
- Menetray, R. (2013). *Impresora Polar Theta*. Recuperado el 01 de Julio de 2017, de robertmenetray.com: <http://robertmenetray.com/impresora-polar-theta>
- Metalmecánica. (Enero de 2010). *Identificación de errores en el mecanizado*. Recuperado el 10 de Diciembre de 2017, obtenido de metalmecanica.com: <http://www.metalmecanica.com/temas/Identificacion-de-errores-en-el-mecanizado+7074489>
- Moreno Gerena, M. A. (2014). Impresora 3D por extrusión de plástico. *Instituto Tecnológico Metropolitano*, 45.
- Mott, R. (2006). *Diseño de elementos de máquinas*. Dayton: Pearson Educación.
- Movytech. (2013). *Nueva impresora 3D compuesta por 3 brazos robóticos*. Recuperado el 06 de Diciembre de 2017, obtenido de movytech.com: <http://www.movytech.com/2013/01/nueva-impresora-3d-compuesta-por-3.html>
- Mundo Empresarial. (11 de Julio de 2016). *La impresión 3D en la industria de la aviación ya es una realidad*. Obtenido de mundoempresarial.pe: <http://www.mundoempresarial.pe/tecnologia-mundo-empresarial/1174-la-impresion-3d-en-la-industria-de-la-aviacion-ya-es-una-realidad.html>

- Navarrete, P. H., & Chancusi, S. D. (2014). Diseño y construcción de una impresora 3D auto-replicable controlada inalámbricamente para el prototipado de piezas plásticas de bajo costo, mediante software libre. *Universidad de las Fuerzas Armadas "ESPE"*, 21-22.
- Paletos de la Electrónica. (25 de Enero de 2015). *Interruptores Fin de Carrera (I)*. Recuperado el 06 de Diciembre de 2017, obtenido de paletosdelaelectronica.wordpress.com:
<https://paletosdelaelectronica.wordpress.com/2015/01/25/interruptores-fin-de-carrera-i/>
- PBC LINEAR. (2014). *Motores estándar NEMA*. Recuperado el 15 de Diciembre de 2017, obtenido de [pbclinear.com](http://www.pbclinear.com):
<http://www.pbclinear.com/Download/DataSheet/Stepper-Motor-Support-Document.pdf>
- POLAR3D. (2017). *A REVOLUTION IN 3DP*. Recuperado el 05 de Diciembre de 2017, obtenido de about.polar3d.com: <http://about.polar3d.com/printer/>
- PrintaLot. (12 de Febrero de 2017). *Hoja de datos técnicos (Filamento PLA)*. Recuperado el 20 de Enero de 2018, obtenido de [printalot.com.ar](http://www.printalot.com.ar):
<http://www.printalot.com.ar/TDS/TDS-PLA.pdf>
- REP RAP. (12 de Mayo de 2017). *List of Firmware*. Recuperado el 30 de Noviembre de 2017, obtenido de reprap.org: http://reprap.org/wiki/List_of_Firmware
- REPLICANT 3D. (2016). *Materiales para impresoras 3D*. Recuperado el 15 de Diciembre de 2017, obtenido de replicant3d.com:
<http://replicant3d.com/materiales-para-impresoras-3d/>
- REPLICA-T. (20 de Noviembre de 2017). *El lápiz 3D. Creaciones e imaginación*. Recuperado el 05 de Diciembre de 2017, obtenido de replica-t.com: <https://replica-t.com/lapiz-3d-creaciones-e-imaginacion/>

- RepRap. (22 de Octubre de 2015). *Mendel*. Recuperado el 05 de Diciembre de 2017, obtenido de repprap.org: <http://repprap.org/wiki/Mendel>
- RepRap. (02 de Noviembre de 2015). *Prusa i3/es*. Recuperado el 05 de Diciembre de 2017, obtenido de repprap.org: http://repprap.org/wiki/Prusa_i3/es
- RepRap. (08 de Junio de 2016). *Duet Web Control*. Recuperado el 08 de Febrero de 2018, obtenido de repprap.org: http://repprap.org/wiki/Duet_Web_Control
- RepRap. (17 de Junio de 2016). *R 360*. Recuperado el 10 de Enero de 2018, obtenido de repprap.org: http://repprap.org/wiki/R_360
- RepRap. (20 de Enero de 2016). *RepRap/es*. Recuperado el 05 de Diciembre de 2017, obtenido de repprap.org: <http://repprap.org/wiki/RepRap/es>
- RepRap. (24 de Octubre de 2017). *Duet*. Recuperado el 10 de Diciembre de 2017, obtenido de repprap.org: http://repprap.org/wiki/Duet#Specifications_.5B4.5D
- RepRap. (2017). *Modulated Proximity Sensor and Loom*. Recuperado el 20 de Enero de 2018, obtenido de repprapro.com: <https://repprapro.com/shop/components/modulated-proximity-sensor-and-loom/>
- RepRap. (28 de Enero de 2018). *G-code*. Recuperado el 30 de Enero de 2018, obtenido de repprap.org: <http://repprap.org/wiki/G-code>
- RepprapBarcelona. (13 de Mayo de 2013). *Repprap BCN*. Obtenido de repprapbcn.wordpress.com: <https://repprapbcn.wordpress.com/tag/mendel/>
- RepRapPro. (23 de Enero de 2015). *Three colour mixing in Ormerod 2*. Recuperado el 15 de Febrero de 2018, obtenido de repprapro.com: <https://repprapro.com/2015/01/23/now-3d-print-in-1-2-or-more-colours/>
- RepRapPro. (2017). *Ormerod 2 Documentation*. Recuperado el 05 de Diciembre de 2017, obtenido de repprapro.com: <https://repprapro.com/documentation/ormerod-2/>
- Rodríguez García, J. P. (2014). Implementación de triple extrusor sobre impresora 3D de bajo coste. *Universidad Carlos III de Madrid*, 31-23.

- Romero Barreno, C. E., & Vaca Morales, G. O. (2015). Construcción de una impresora 3D, para la elaboración de objetos plásticos utilizando el método de modelado por deposición fundida (MDF). *Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.*, 24-25.
- Romero Sánchez, M. (29 de Julio de 2014). Diseño y construcción de una impresora 3D FDM. *Universidad Pontificia Comillas*, 31.
- RS Components. (2017). *RepRapPro Ormerod 2 Kit*. Recuperado el 15 de Diciembre de 2017, obtenido de uk.rs-online.com: <https://uk.rs-online.com/web/p/3d-printers/8111855/>
- SANDVIK AB. (2000). *Configuración de la máquina-herramienta*. Recuperado el 15 de Diciembre de 2017, obtenido de sandvik.coromant.com: <https://www.sandvik.coromant.com/es-es/knowledge/tooling-systems/machine-type/machining-centers/large/machine-configuration/pages/default.aspx>
- Stepperonline. (2005). *Full Datasheet of Nema 17 Stepper Motor Bipolar L=48mm w/ Gear Ratio 19:1 Planetary Gearbox*. Recuperado el 20 de Enero de 2018, obtenido de omc-stepperonline.com: <https://www.omc-stepperonline.com/download/17HS19-1684S-PG19.pdf>
- Stepperonline. (2005). *Torque curve of Nema 17 Stepper Motor Bipolar L=48mm w/ Gear Ratio 19:1 Planetary Gearbox*. Recuperado el 20 de Enero de 2018, obtenido de omc-stepperonline.com: https://www.omc-stepperonline.com/download/17HS19-1684S-PG19_Torque_Curve.pdf
- Stratasys. (2017). *¿Qué es el prototipado rápido?* Recuperado el 02 de Diciembre de 2017, obtenido de stratasys.com: <http://www.stratasys.com/mx/resources/rapid-prototyping>
- Stratasys. (2017). *Fortus 900mc. Resistencia, durabilidad y escala industriales*. Recuperado el 05 de Diciembre de 2017, obtenido de stratasys.com: <http://www.stratasys.com/es/impresoras-3d/production-series/fortus-900mc>

Stratasys. (2017). *Mojo. De a su pequeña idea un poco de Mojo*. Recuperado el 05 de Diciembre de 2017, obtenido de stratasys.com: <http://www.stratasys.com/mx/impresoras-3d/idea-series/mojo>

Stratasys. (s.f.). *Modelado por deposición fundida (FDM)*. Obtenido de Dedutel: <http://www.dedutel.com/pdf/STRATASYS.pdf>

Vera García, A. (2012). Protocolo de calibración y optimización mecánica de una impresora 3D Open Source. *Universidad Carlos III de Madrid*, 12.

Wallich, P. (2011). Absolutely Fab. *IEEE Spectrum*, 18.

ANEXOS



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

CERTIFICACIÓN

Se certifica que el presente trabajo fue desarrollado por los señores **CHRISTIAN VINICIO FONSECA LASCANO** y **PABLO DANIEL MIRANDA TACO**.

En la ciudad de Latacunga a los 2 días del mes de marzo de 2018.

Ing. Andrés Gordón

DIRECTOR DEL PROYECTO

Ing. Vicente Hallo

DIRECTOR DE CARRERA

Dr. Rodrigo Vaca

SECRETARIO ACADÉMICO

Aprobado por:

