



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

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

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

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

**REDISEÑO DEL PROTOTIPO DE IMPRESORA 3D TIPO
DELTA DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS-
ESPE ENFOCADO A SU COMERCIALIZACIÓN**

AUTOR: RIVADENEIRA CAZAR DIEGO FRANCISCO

DIRECTOR: ING. SEGURA SANUCHO LUIS JAVIER

SANGOLQUÍ

2017



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, "**REDISEÑO DEL PROTOTIPO DE IMPRESORA 3D TIPO DELTA DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE ENFOCADO A SU COMERCIALIZACIÓN**", realizado por el señor **DIEGO FRANCISCO RIVADENEIRA CAZAR**, 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 acreditarlo y autorizar al señor **DIEGO FRANCISCO RIVADENEIRA CAZAR** para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 8 de marzo de 2017

Una firma manuscrita en tinta azul sobre una línea horizontal.

LUIS JAVIER SEGURA SANGUCHO
DIRECTOR



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, **DIEGO FRANCISCO RIVADENEIRA CAZAR**, con cédula de identidad N° **1721486700** declaro que este trabajo de titulación "**REDISEÑO DEL PROTOTIPO DE IMPRESORA 3D TIPO DELTA DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE ENFOCADO A SU COMERCIALIZACIÓN**" 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 declaro que este trabajo es de mi autoría, en virtud de ello me declaro responsable del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Sangolquí, 08 de marzo de 2017

Una firma manuscrita en tinta azul sobre una línea horizontal.

DIEGO FRANCISCO RIVADENEIRA CAZAR

C.C 1721486700



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

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

AUTORIZACIÓN

Yo, **DIEGO FRANCISCO RIVADENEIRA CAZAR**, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la biblioteca Virtual de la institución el presente trabajo de titulación "**REDISEÑO DEL PROTOTIPO DE IMPRESORA 3D TIPO DELTA DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE ENFOCADO A SU COMERCIALIZACIÓN**" cuyo contenido, ideas y criterios son de mi autoría y responsabilidad.

Sangolquí, 08 de marzo de 2017

Una firma manuscrita en tinta azul sobre una línea horizontal.

DIEGO FRANCISCO RIVADENEIRA CAZAR

C.C 1721486700

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a mi madre, Sandra, quien nunca dejó de creer en mí y apoyarme incondicionalmente a pesar de mis caídas. A mi padre, Diego, por regalarme luces de ingenio cada vez que creía que llegaba a un obstáculo insalvable. Y a mis hermanos, Alejandra y Alejandro, por siempre soportar mi humor singular cuando lo único que necesitaba para seguir era reír un poco.

Diego Rivadeneira

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mi madre, Sandra, por otorgarme todos los recursos que poseía, y aún más, para la culminación de este proyecto. Estoy plenamente consciente de que mi temperamento no es nada común y es duro tratar conmigo. Gracias por estar siempre a mi lado a pesar de eso.

A mi prima, María, que supo tener fe en mis semillas donde el mundo solo veía tierra revuelta. Siempre te estaré agradecido.

A toda mi familia, que siempre estuvo pendiente de mi progreso. No los decepcionaré.

Y a mí mismo, para que nunca olvide las lecciones que aprendí con sangre en todo este tiempo. Soy totalmente falible en cada una de mis metas, pero nunca permitiré que me entierren con mi música todavía adentro.

Diego Rivadeneira

ÍNDICE DE CONTENIDO

CARÁTULA	i
CERTIFICACIÓN	ii
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	iii
AUTORIZACIÓN	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vi
ÍNDICE DE CONTENIDO	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
ÍNDICE DE TABLAS	xviii
RESUMEN	xix
ABSTRACT	xx
CAPÍTULO I	1
1.GENERALIDADES	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Objetivos.....	5
1.2.1. Objetivo general	5
1.2.2. Objetivos específicos.....	5
1.3. Justificación e importancia.....	6
1.4. Alcance	6
CAPÍTULO II	10
2.MARCO TEÓRICO	10
2.1. Introducción a la impresión 3D.....	10

2.2. Tecnologías de impresión 3D	11
2.2.1. SLA (StereolithogrAphy)	11
2.2.2. SLS (Selective Laser Sintering)	11
2.2.3. FDM (Fusion Deposition Modeling)	12
2.3. Sistema de locomoción.....	13
2.3.1. Sistema de locomoción cartesiano	13
2.3.2. Sistema de locomoción delta	14
2.3.3. Otros sistemas de locomoción	16
2.4. Sistema de extrusión	17
2.4.1. Extrusor	17
2.4.2. Mantenedor de filamento.....	19
2.4.3. Filamento.....	20
2.4.4. Plataforma de construcción	22
2.4.5. Auto-nivelación de cama	24
2.5. Sistema estructural	24
2.5.1. Rigidez de la estructura y su influencia en la calidad de impresión	25
2.5.2. Impresoras de cámara abierta VS Impresoras de cámara cerrada	26
2.5.3. Aspectos del diseño industrial de una impresora 3D	27
2.6. Sistema de control.....	28
2.6.1. Tarjeta madre.....	28
2.6.2. Software Firmware	29
2.6.3. Software Host	29
CAPÍTULO III	30
3.BENCHMARKING	30
3.1. Introducción al benchmarking.....	30

3.2. Características de comparación de impresoras 3D	30
3.3. Análisis de la competencia	35
3.3.1. Impresoras 3D de la marca SeeMeCNC.....	35
3.3.2. Atom 2.0	37
3.3.3. Serie de impresoras de Quinta Generación de la empresa Makerbot	39
3.3.4. Impresoras 3D de la empresa XYZPrinting.....	41
3.3.5. Serie de impresoras Cube de 3D Systems	43
3.3.6. Serie de impresoras PrintBot de la empresa PrintBot.....	44
3.3.7. Serie de impresoras Ultimaker de la empresa Ultimaker.....	45
3.3.8. Serie de impresoras Lulzbot de la empresa Lulzbot	46
3.3.9. RoVa 3D	47
3.3.10. All in one Zeus	47
3.4. Conclusiones del proceso de benchmarking	51
CAPÍTULO IV	52
4.DISEÑO DEL PRODUCTO	52
4.1. Desarrollo de conceptos.....	52
4.1.1. Conceptos para el sistema de locomoción.....	52
4.1.2. Conceptos para el sistema de extrusión	71
4.1.3. Conceptos para el sistema estructural.....	90
4.1.4. Conceptos para el sistema de control.....	98
4.2. Diseño a nivel de detalle	104
4.2.1. Diseño de detalle global básico	105
4.2.2. Diseño de detalle del sistema de locomoción.....	110
4.2.3. Diseño de detalle del sistema de extrusión.....	114
4.2.4. Diseño de detalle del sistema estructural	123

4.2.5. Diseño de detalle del sistema de ensamblaje	133
4.2.6. Diseño de detalle del sistema de cableado	141
4.2.7. Integración de sistema	142
CAPÍTULO V	146
5.CONSTRUCCIÓN DEL PRODUCTO	146
5.1.Pasos previos a la construcción del prototipo	146
5.1.1. Importación de componentes de proveedores extranjeros	147
5.1.2. Verificación y calibración dimensional de componentes de proveedores extranjeros.....	147
5.1.3. Pruebas para las partes producidas en corte láser	148
5.1.4. Pruebas para las partes producidas en impresión 3D	149
5.1.5. Preparación del lugar de construcción.....	150
5.2.Construcción de un prototipo del mantenedor de filamento.....	150
5.3.Construcción del prototipo total del producto.....	152
CAPÍTULO VI.....	159
6.CALIBRACIÓN DEL FIRMWARE	159
6.1.Comprobación de construcción mecánica correcta.....	159
6.2.Calibración de pasos por milímetros de carros.....	161
6.3.Calibración de pasos por milímetros de extrusores.....	162
6.4.Constantes PID para cama caliente y fusores.	163
6.5.Calibración inicial de altura de impresión.	163
6.6.Calibración de tornillos de torres.	164
6.7.Calibración de impresión plana.....	164
6.8.Corrección de dimensiones de piezas.....	165

CAPÍTULO VII	167
7.PRUEBAS Y RESULTADOS	167
7.1. Funciones de la impresora.	167
7.2. Impresión en PLA a 1 color.	172
7.3. Impresión en PLA a 2 colores.....	174
CAPÍTULO VIII	175
8.ANÁLISIS ECONÓMICO DEL PRODUCTO	175
8.1. Análisis de costos.....	175
8.1.1. Costos fijos.....	175
8.1.2. Costos variables	176
8.2. Cálculo del punto de equilibrio	177
CAPÍTULO IX	179
9.CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	179
9.1. Conclusiones.....	179
9.2. Recomendaciones.....	180
9.3. Trabajos futuros	182
BIBLIOGRAFÍA	183
ANEXOS	186
MANUAL DE CONSTRUCCIÓN	187

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: PRIMER PROTOTIPO IMPRESORA CARTESIANA	2
FIGURA 2: PRIMER PROTOTIPO IMPRESORA CARTESIANA	2
FIGURA 3: PROTOTIPO IMPRESORA D-TOWER TELEAUTOMÁTICA	Error! Marcador no definido.
FIGURA 4: CABEZAL DESARROLLADO TELEAUTOMÁTICA S.A.....	3
FIGURA 5: DELTA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS-ESPE....	4
FIGURA 6: TECNOLOGÍA SLA (ESTEREOLITOGRAFÍA)	11
FIGURA 7: TECNOLOGÍA SLS (SELECTIVE LASER SINTERING)	12
FIGURA 8: TECNOLOGÍA FDM (FUSED DEPOSITION MODELING).....	13
FIGURA 9: SISTEMA DE LOCOMOCIÓN CARTESIANO.....	14
FIGURA 10: FORMAS IMPLEMENTAR LOCOMOCIÓN CARTESIANA.....	14
FIGURA 11: SISTEMA DE LOCOMOCIÓN TIPO DELTA.....	15
FIGURA 12: IMPRESORA MORGAN SISTEMA LOCOMOCIÓN SCARA ...	16
FIGURA 13: IMPRESORA SIMPSON SISTEMA LOCOMOCIÓN DELTA ...	16
FIGURA 14: TERMINAL FRÍO TIPO GREG	17
FIGURA 15: FUSOR E3D V6.....	18
FIGURA 16: MANTENEDOR DE FILAMENTO DE VARILLA SIMPLE	20
FIGURA 17: BOBINA DE FILAMENTO ESTÁNDAR DE 1.75 MM	20
FIGURA 18: RODAMIENTO BOLAS IMPRESO CON SOPORTES HIPS....	22
FIGURA 19: ZAPATOS IMPRESOS EN 3D CON MATERIAL TPE.....	22
FIGURA 20: CAMA CALIENTE PARA IMPRESORA CARTESIANA.....	23
FIGURA 21: SENSOR DE NIVELACIÓN INDUCTIVO	24
FIGURA 22: PROBLEMA WARPING EN IMPRESIÓN 3D CON ABS.....	26
FIGURA 23: CÁMARA CERRADA PARA PREVENCIÓN DE WARPING	27
FIGURA 24: CONTROLADOR, ARDUINO MEGA Y RAMPS1.4.....	29
FIGURA 25: DIFERENTES RESOLUCIONES DE CAPA.....	31
FIGURA 26: IMPRESORA ROSTOCK MAX V2 DE SEEMECNC	36
FIGURA 27: IMPRESORA ORION DELTA DE LA EMPRESA SEEMECNC	37
FIGURA 28: IMPRESORA ATOM 2.0 DE ATOM3DP	37
FIGURA 29: IMPRESORA REPLICATOR MINI DE MAKERBOT.....	39
FIGURA 30: IMPRESORA REPLICATOR DE MAKERBOT	40

FIGURA 31: IMPRESORA Z18 DE LA EMPRESA MAKERBOT	40
FIGURA 32: IMPRESORA DA VINCI JR. DE EMPRESA XYZ PRINTNG....	41
FIGURA 33: IMPRESORA DA VINCI 1.0 DE XYZ PRINTNG.....	41
FIGURA 34: IMPRESORA DA VINCI 1.0 AIO DE XYZ PRINTNG	42
FIGURA 35: IMPRESORA DA VINCI 1.0 PRO DE XYZ PRINTNG.....	42
FIGURA 36: IMPRESORA DA VINCI 2.0 DUO DE XYZ PRINTNG.....	42
FIGURA 37: IMPRESORA CUBE DE 3D SYSTEMS	43
FIGURA 38: IMPRESORA EKOCYCLE DE 3D SYSTEMS.....	43
FIGURA 39: IMPRESORA CUBE PRO TRIO DE 3D SYSTEMS	44
FIGURA 40: IMPRESORA PRINTBOT PLAY DE PRINTBOT.....	44
FIGURA 41: IMPRESORA PRINTBOT SIMPLE DE PRINTBOT	45
FIGURA 42: IMPRESORA PRINTBOT PLUS DE PRINTBOT.....	45
FIGURA 43: IMPRESORAS DE LA EMPRESA ULTIMAKER	46
FIGURA 44: IMPRESORA LULZBOT MINI DE LULZBOT	46
FIGURA 45: IMPRESORA LULZBOT TAZ 5 DE LULZBOT	47
FIGURA 46: IMPRESORA ROVA 3D DE ORD SOLUTIONS.....	47
FIGURA 47: IMPRESORA ALL IN ONE ZEUS DE AIO OBOTICS.....	48
FIGURA 48: GUIADO LINEAL RODAMIENTOS SIMPLES DE BOLAS	53
FIGURA 49: PERFIL DE ALUMINIO T DE LA EMPRESA SEEME CNC	54
FIGURA 50: RODAMIENTO SIMPLE DE BOLAS 608 ZZ.....	54
FIGURA 51: COBERTURA PLÁSTICA RODAMIENTO DE SEEME CNC ...	54
FIGURA 52: SISTEMA DE GUIADO CON RODAMIENTOS LINEALES	56
FIGURA 53: VARILLA LISA DE ACERO INOXIDABLE	57
FIGURA 54: RODAMIENTO LINEAL LM8 UU.....	57
FIGURA 55: LOCOMOCIÓN CON GUÍAS LINEALES	59
FIGURA 56: GUÍA LINEAL PARA IMPRESORAS 3D DE HIWIN.....	59
FIGURA 57: AJUSTE CORREA POR POLEA DE POSICIÓN VARIABLE ...	62
FIGURA 58: RODAMIENTO 624ZZ.....	62
FIGURA 59: AJUSTADOR DE POSICIÓN VARIABLE EN CARRO	63
FIGURA 60: AJUSTADOR DE POSICIÓN VARIABLE EN CARRO	65
FIGURA 61: AJUSTADOR DE POSICIÓN VARIABLE EN CARRO	67
FIGURA 62: CABEZAS ARTICULADAS SKF.....	68

FIGURA 63: UNIÓN DE BOLA MAGNÉTICA	69
FIGURA 64: EXTRUSOR DE GREG	71
FIGURA 65: EXTRUSOR HEATCORE UNIBODY	73
FIGURA 66: EXTRUSOR DDG (DOUBLE DRIVE GEAR)	74
FIGURA 67: SENSOR SWITCH RESISTIVO	77
FIGURA 68: SENSOR CAPACITIVO.....	78
FIGURA 69: SENSOR INDUCTIVO.....	79
FIGURA 70: FUSOR COMPLETO DE METAL (FUSOR ALL METAL).....	81
FIGURA 71: FUSOR DE PTFE	82
FIGURA 72: FUSOR DOBLE E3D CHIMERA	83
FIGURA 73: MANTENEDOR DE FILAMENTO DE VARILLA SIMPLE	85
FIGURA 74: MANTENEDOR RODAMIENTOS TANGENCIALES.....	87
FIGURA 75: MANTENEDOR EJE DE RADIO Y LONGITUD VARIABLE	88
FIGURA 76: ESTRUCTURA TIPO ROSTOCK PARA IMPRESORA DELTA	91
FIGURA 77: ESTRUCTURA TIPO KOSSEL PARA IMPRESORA DELTA...	92
FIGURA 78: IMPRESORA DELTA CÁMARA DE IMPRESIÓN ABIERTA	95
FIGURA 79: IMPRESORA 3D CON CÁMARA DE IMPRESIÓN CERRADA	96
FIGURA 80: CONJUNTO RAMPS 1.4 Y ARDUINO MEGA	98
FIGURA 81: PLACA RAMBO.....	100
FIGURA 82: DISEÑO BÁSICO DEL PRODUCTO	106
FIGURA 83: DIMENSIONES BÁSICAS DEL ROBOT	106
FIGURA 84: CÍRCULO BÁSICO DE ÁREA DE IMPRESIÓN	107
FIGURA 85: TRAZO DE LA CIRCUNFERENCIA EFECTIVA.....	108
FIGURA 86: TRAZO DISTANCIA MÍNIMA A COLUMNAS.....	109
FIGURA 87: TRAZO DE DISTANCIA MÍNIMA A COLUMNAS.....	109
FIGURA 88: PROCESO DE ANÁLISIS DE POSICIONES EXTREMAS.....	110
FIGURA 89: DISPOSICIÓN PERFILES DE ALUMINIO VARILLAS LISAS	110
FIGURA 90: PRIMERA ITERACIÓN CARRO DE LOCOMOCIÓN	111
FIGURA 91: SEGUNDA ITERACIÓN CARRO DE LOCOMOCIÓN.....	111
FIGURA 92: TERCERA ITERACIÓN CARRO DE LOCOMOCIÓN	112
FIGURA 93: CUARTA ITERACIÓN CARRO DE LOCOMOCIÓN.....	112
FIGURA 94: QUINTA ITERACIÓN CARRO LOCOMOCIÓN PROPUESTA	113

FIGURA 95: SEXTA ITERACIÓN CARRO LOCOMOCIÓN PROPUESTA	114
FIGURA 96: PRIMERA ITERACIÓN CABEZAL DE IMPRESIÓN	115
FIGURA 97: SEGUNDA ITERACIÓN CABEZAL DE IMPRESIÓN	115
FIGURA 98: TERCERA ITERACIÓN CABEZAL DE IMPRESIÓN.....	116
FIGURA 99: RE-DIRECCIONADORES AIRE VENTILADORES CAPA	116
FIGURA 100: QUINTA ITERACIÓN CABEZAL DE IMPRESIÓN	117
FIGURA 101: SEXTA ITERACIÓN CABEZAL DE IMPRESIÓN.....	117
FIGURA 102: SÉPTIMA ITERACIÓN CABEZAL DE IMPRESIÓN	117
FIGURA 103: OCTAVA ITERACIÓN CABEZAL DE IMPRESIÓN	118
FIGURA 104: NOVENA ITERACIÓN CABEZAL DE IMPRESIÓN.....	118
FIGURA 105: PRIMERA ITERACIÓN TERMINAL FRÍO	119
FIGURA 106: SEGUNDA ITERACIÓN TERMINAL FRÍO.....	120
FIGURA 107: PRIMERA ITERACIÓN MANTENEDOR DE FILAMENTO..	120
FIGURA 108: SEGUNDA ITERACIÓN MANTENEDOR DE FILAMENTO .	121
FIGURA 109: TERCERA ITERACIÓN MANTENEDOR DE FILAMENTO ..	122
FIGURA 110: CUARTA ITERACIÓN MANTENEDOR DE FILAMENTO	122
FIGURA 111: QUINTA ITERACIÓN MANTENEDOR DE FILAMENTO.....	123
FIGURA 112: PRIMERA ITERACIÓN SISTEMA ESTRUCTURAL.....	123
FIGURA 113: SEGUNDA ITERACIÓN SISTEMA ESTRUCTURAL	124
FIGURA 114: TERCERA ITERACIÓN SISTEMA ESTRUCTURAL.....	124
FIGURA 115: CUARTA ITERACIÓN DEL SISTEMA ESTRUCTURAL	125
FIGURA 116: BOSQUEJO TRIDIMENSIONAL VISTA PRODUCTO	125
FIGURA 117: COBERTORES DE COLUMNAS AGREGADOS	126
FIGURA 118: ESQUINAS ESTRUCTURALES DE MDF	126
FIGURA 119: PROPUESTA DE ESTRUCTURA ROSTOCK	127
FIGURA 120: ACOPLERES ESQUINAS DE ESTRUCTURA ROSTOCK.....	127
FIGURA 121: PRIMERA ITERACIÓN SISTEMA ESTRUCTURAL.....	128
FIGURA 122: CAJA INTERFAZ USUARIO PRIMERA ITERACIÓN.....	128
FIGURA 123: SEGUNDA ITERACIÓN SISTEMA ESTRUCTURAL	129
FIGURA 124: TERCERA ITERACIÓN SISTEMA ESTRUCTURAL.....	129
FIGURA 125: CERRADURA MAGNÉTICA DE CÁMARA INTERNA.....	130
FIGURA 126: POSICIÓN PRELIMINAR TERMINAR FRÍO.....	130

FIGURA 127: CUARTA ITERACIÓN SISTEMA ESTRUCTURAL	131
FIGURA 128: BISAGRA PARA COBERTOR FRONTAL DE ACRÍLICO	131
FIGURA 129: DISTRIBUCIÓN COMPONENTES BOBINA-TERM FRÍO ...	132
FIGURA 130: QUINTA ITERACIÓN DEL SISTEMA ESTRUCTURAL	132
FIGURA 131: DISTRIBUCIÓN COMPONENTES SISTEMA EXTRUSIÓN	133
FIGURA 132: COLOCAR PLACA BASE SOBRE MESA.....	134
FIGURA 133: PLACA VARIOS COMPONENTES SOBRE LA MISMA.....	134
FIGURA 134: BASES DEL SISTEMA LOCOMOCIÓN PRELIMINARES ...	135
FIGURA 135: ACOPLAMIENTO BASES SISTEMA DE LOCOMOCIÓN....	135
FIGURA 136: BASES DE ACOPLAMIENTO DE VARILLAS LISAS	135
FIGURA 137: BASE COMPLETA DEL PRODUCTO	136
FIGURA 138: PERFILES ALUMINIO T Y VARILLAS LISAS ACOPLADAS	136
FIGURA 139: PRIMERA APROXIMACIÓN A TUERCA TIPO T.....	136
FIGURA 140: CARRO DE LOCOMOCIÓN.....	137
FIGURA 141: CONJUNTO ESTRUCTURAL SUPERIOR PRODUCTO	137
FIGURA 142: CARROS DE LOCOMOCIÓN CONJUNTO SUPERIOR.....	138
FIGURA 143: CONJUNTO DE TERMINALES FRÍOS.....	138
FIGURA 144: CONJUNTO DE TERMINALES FRÍOS.....	139
FIGURA 145: CONJUNTO TERMINALES FRÍOS PANELES LATERALES	139
FIGURA 146: CABEZAL DE IMPRESIÓN CAJA DE INTERFAZ.....	140
FIGURA 147: PANEL FRONTAL INSTALADO EN CONJUNTO TOTAL ...	140
FIGURA 148: PANELES LATERALES PEQUEÑOS INSTALADOS	141
FIGURA 149: PRODUCTO ENSAMBLADO	141
FIGURA 150: DISTRIBUCIÓN CABLES DEL PRODUCTO	142
FIGURA 151: PRIMERA ITERACIÓN FUNCIONAL DEL PRODUCTO.....	143
FIGURA 152: COBERTOR DISEÑO INDUSTRIAL BISAGRAS.....	143
FIGURA 153: DETALLE ESTRUCTURAL EN FORMA DE PATAS.....	144
FIGURA 154: INTERFACES LOCOMOCIÓN CON ESTRUCTURA.....	144
FIGURA 155: INTERFACES EXTRUSIÓN CON ESTRUCTURA.....	144
FIGURA 156: ITERACIÓN FINAL DEL ANTES DE CONSTRUCCIÓN.....	145
FIGURA 157: PRUEBAS EN MDF PARA RANURA PERFILES.....	148
FIGURA 158: PRUEBAS EN MDF DE 5.5MM DE GRABADO	149

FIGURA 159: SUJETADOR DE PANELES FINALES	150
FIGURA 160: PRIMERA ITERACIÓN FÍSICA MANTENEDOR.....	151
FIGURA 161: PRIMERA ITERACIÓN MANTENEDOR REPLICATOR	151
FIGURA 162: SEGUNDA ITERACIÓN FÍSICA DEL MANTENEDOR	152
FIGURA 163: BASE DEL PRODUCTO CONSTRUIDA	152
FIGURA 164: BASE DEL SISTEMA DE LOCOMOCIÓN	153
FIGURA 165: TARJETA MADRE INSTALADA.....	153
FIGURA 166: BASE DEL PRODUCTO FINALIZADA.....	154
FIGURA 167: CABLES DE COMPONENTES SALEN POR PERFILES.....	154
FIGURA 168: TIRAS LED RGB FUNCIONANDO.....	155
FIGURA 169: BASE, CARROS LOCOMOCIÓN, BASE INSTALADOS.....	155
FIGURA 170: TERMINALES, PANELES Y CABEZAL INSTALADOS.....	156
FIGURA 171: CABEZAL DE IMPRESIÓN	156
FIGURA 172: PANELES FINALES INSTALADOS	157
FIGURA 173: SISTEMA ILUMINACIÓN DE CÁMARA INTERNA	157
FIGURA 174: PANELES FINALES, INTERFAZ USUARIO INSTALADOS.	158
FIGURA 175: IMPRESORA 3D DIAMOND DELTA V1.0.....	158
FIGURA 176: CURVA DE TEMPERATURA DEL FUSOR 1	167
FIGURA 178: CURVA DE TEMPERATURA DE LA CAMA CALIENTE	168
FIGURA 179: MENÚ PRINCIPAL DE LA INTERFAZ DE USUARIO	169
FIGURA 180: MANTENEDOR DE FILAMENTO IZQUIERDO.....	169
FIGURA 181: MECANISMOS EXTRUSORES INSTALADOS.....	170
FIGURA 182: PRIMERA CAPA NO NIVELADA	171
FIGURA 183: PRIMERA CAPA NIVELADA.....	172
FIGURA 184: EVOLUCIÓN DE LA CALIDAD DE IMPRESIÓN.....	173
FIGURA 185: CALIDAD ACTUAL DE IMPRESIÓN DE 1 COLOR	173
FIGURA 186: CALIDAD ACTUAL DE IMPRESIÓN DE 2 COLORES	174

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1: COMPARACIÓN DE ESPECIFICACIONES DEL PRODUCTO	9
TABLA 2: COMPARACIÓN ESPECIFICACIONES IMPRESORAS DELTA .	38
TABLA 3: COMPARACIÓN ESPECIFICACIONES IMPRESORAS C.-P 1...	49
TABLA 4: COMPARACIÓN ESPECIFICACIONES IMPRESORAS CP. 2....	50
TABLA 5: ESTIMACIÓN CONCEPTO A SISTEMA GUIADO LINEAL.....	55
TABLA 6: ESTIMACIÓN CONCEPTO B SISTEMA GUIADO LINEAL.....	58
TABLA 7: ESTIMACIÓN CONCEPTO C SISTEMA GUIADO LINEAL	60
TABLA 8: SELECCIÓN CONCEPTOS SISTEMA DE GUIADO LINEAL	61
TABLA 9: ESTIMACIÓN CONCEPTO A SISTEMA AJUSTE CORREAS.....	63
TABLA 10: ESTIMACIÓN CONCEPTO B SISTEMA AJUSTE CORREAS...64	
TABLA 11: SELECCIÓN CONCEPTOS AJUSTE DE CORREA	66
TABLA 12: SELECCIÓN CONCEPTOS SISTEMA DE GUIADO LINEAL	70
TABLA 13: ESTIMACIÓN CONCEPTO A SISTEMA DE EXTRUSIÓN	72
TABLA 14: ESTIMACIÓN CONCEPTO B SISTEMA DE EXTRUSIÓN	73
TABLA 15: SELECCIÓN CONCEPTOS SISTEMA DE EXTRUSIÓN.....	76
TABLA 16: MATRIZ SELECCIÓN CONCEPTOS AUTONIVELACIÓN	80
TABLA 17: MATRIZ SELECCIÓN CONCEPTOS FUSOR	84
TABLA 18: COSTOS CONCEPTO A MANTENEDOR DE FILAMENTO	86
TABLA 19: COSTOS CONCEPTO B MANTENEDOR DE FILAMENTO	87
TABLA 20: COSTOS CONCEPTO C MANTENEDOR DE FILAMENTO.....	89
TABLA 21: SELECCIÓN CONCEPTOS MANTENEDOR DE FILAMENTO .	90
TABLA 22: COSTOS CONCEPTO A SISTEMA ESTRUCTURAL.....	91
TABLA 23: COSTOS CONCEPTO B SISTEMA ESTRUCTURAL.....	93
TABLA 24: SELECCIÓN CONCEPTOS MANTENEDOR DE FILAMENTO .	94
TABLA 25: COSTOS CONCEPTO B CÁMARA CERRADA	96
TABLA 26: MATRIZ SELECCIÓN CONCEPTOS CÁMARA CERRADA	97
TABLA 27: MATRIZ SELECCIÓN CONCEPTOS PLACA DE CONTROL..	101
TABLA 28: MATRIZ SELECCIÓN CONCEPTOS PLACA DE CONTROL..	104

RESUMEN

El presente proyecto muestra el rediseño del prototipo de impresora 3D tipo delta de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE enfocado a su comercialización. Por tanto, además de considerar los aspectos concernientes a la ingeniería del producto, se tomó en cuenta el diseño industrial del mismo, optimizando su estética y facilidad de uso. Las especificaciones del producto establecidas en el alcance del proyecto se alcanzaron de forma satisfactoria, algunas de las cuales constituyen una mejora cuantificable en porcentaje con respecto a su valor en el anterior prototipo. Se logró un aumento del volumen de impresión en un 233.76%, una impresión funcional de 2 extrusores, la implementación de luces LED RGB como parte del diseño industrial del producto, un sistema modular para el extrusor mediante uniones de bola magnéticas y conectores eléctricos, el acoplamiento al diseño de una cama caliente para evitar problemas de adherencia de la pieza a la cama y permitir el uso de varios materiales de impresión, una interfaz LCD con conectividad SD para la función de la máquina independiente de un ordenador, la función de auto-calibración de cama mediante un sensor inductivo para facilitar este proceso por software, se implementó un concepto de ajuste de correas mediante un carro de ajuste de manera que ya no se necesita desarmar ningún componente para obtener un ajuste correcto, y todo esto con un sistema de ensamblaje que permite que el producto sea totalmente replicable a gran escala.

PALABRAS CLAVE

- **IMPRESIÓN 3D**
- **IMPRESORA TIPO DELTA**
- **PRODUCTO COMERCIAL**
- **DISEÑO DE PRODUCTO**
- **DISEÑO INDUSTRIAL**

ABSTRACT

This project shows the redesign of the delta 3D printer prototype of the University of the Armed Forces-ESPE focused on its commercialization. Hence, special attention was taken not only in the engineering of the product, but also in the industrial design, optimizing its outer appearance and facility of use. The product specifications established in the scope of the project were satisfactorily achieved, some of which constitute a quantifiable improvement in percentage to its value in the previous prototype. The printing volume was increased by 233.76%, a functional printing with 2 extruders, the implementation of RGB led lights as part of the industrial design of the product, a modular system for the extruder through magnetic ball joints and electric connectors, the coupling of a heated bed to the design with the purpose to avoid problems of adhesion of the piece to the bed and allow the use of multi-materials of printing, an LCD interface with SD connectivity for independent machine functioning (without a computer), auto bed leveling function using an inductive sensor to facilitate this process through software, a belt tensioner concept was implemented through an adjusting car so that any component would be needed to dismantle for obtaining a correct adjustment, and all of these with an assembly system that allows mass replication.

KEYWORDS

- **3D PRINTING**
- **DELTA PRINTER**
- **COMERCIAL PRODUCT**
- **PRODUCT DESIGN**
- **INDUSTRIAL DESIGN**

CAPÍTULO I

1. GENERALIDADES

1.1. Antecedentes

Una nueva industria ha surgido en los últimos años. Al igual que en 1977 Steve Jobs y Stephen Wozniak revolucionaron el mundo de los ordenadores creando la industria de la computación personal (Isaacson, 2011), en 2004 se fundó el proyecto RepRap con el fin de crear una máquina de impresión 3D personal y además auto-replicable. Esto implicaba crear un producto de un precio aproximado de 1000 dólares en una industria en la que la más barata de las impresoras tenía un precio de 80000 dólares (Paniagua, 2013). Sin embargo, no fue hasta 2009 cuando el proyecto pasó a ser totalmente comercial con la creación de MakerBot Industries, actualmente líder en el mercado mundial de impresoras 3D de escritorio. Esto puso a disposición del consumidor promedio la asombrosa tecnología e inició la época en la que vivimos. La época de la manufactura personal.

Todo esto ha permitido el florecimiento de la industria de las impresoras 3D de escritorio. Se puede apreciar este crecimiento en aplicaciones que van desde creación de piezas mecánicas funcionales, pasando por creaciones artísticas como figuras de acción exclusivas, hasta médicas con ejemplos como prótesis robóticas de extremidades humanas. Como cabe esperarse, la llegada y popularización de esta tecnología en Ecuador ha sido todavía más reciente, y no se remonta a más de 4 años, en 2012.

Al ser esta una nueva industria, varios emprendedores han creado empresas para que se posicionen como una solución integral en cuanto al consumidor de tecnología 3D se refiere. Los servicios que juegan un papel indispensable en esta solución integral son el diseño tridimensional, la impresión 3D bajo pedido, el diseño y comercialización de productos con tecnología 3D y el mantenimiento de esos productos.

El mercado ecuatoriano de impresoras 3D de sobremesa presenta una interesante y muy importante oportunidad para el que desee tomarla. Esta es crear una impresora 3D de bajo costo e iguales o mejores características que las producidas en otros países. Los productos con esta tecnología en el país son costosos debido a los cargos que reciben al entrar al mismo y los costos adicionales que se generan por transporte y manejo.

Como estudiante de la prestigiosa Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE, se ha tenido la oportunidad de trabajar en numerosos proyectos de renombre que han dejado en alto el prestigio de la misma. Desde HandEyes, el asistente robótico para no videntes que ganó el capital semilla aportado por el Banco de Ideas, pasando por juguetes de alta tecnología como ExoBro SS, hasta un primer prototipo de la impresora 3D ecuatoriana. El primer prototipo de impresora 3D ecuatoriana se puede apreciar en las figuras 1 y 2.

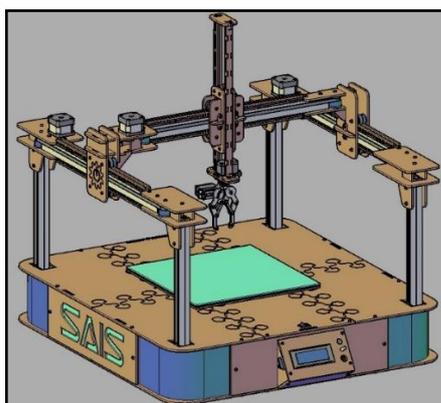
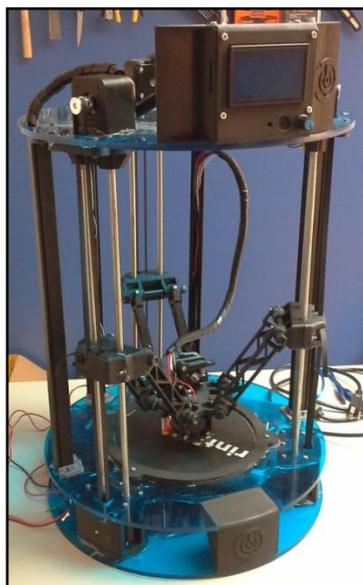


FIGURA 1: PRIMER PROTOTIPO DE IMPRESORA 3D CARTESIANA COMERCIAL DISEÑADA



FIGURA 2: PRIMER PROTOTIPO DE IMPRESORA 3D CARTESIANA COMERCIAL IMPLEMENTADA

También se ha trabajado en el desarrollo de un producto semejante. Esta es la impresora 3D D-Tower que actualmente se sigue desarrollando en la empresa TeleAutomática S.A. como parte de las prácticas pre-profesionales y que se muestra en la figura 3. El aporte principal en el desarrollo de este producto fue el cabezal de impresión que se muestra en la figura 4.



!FINAL DE FÓRMULA INESPERADO Fuente: TeleAutomática S.A.



FIGURA 3: CABEZAL DE IMPRESIÓN DESARROLLADO PARA TELEAUTOMÁTICA S.A.

Fuente: TeleAutomática S.A.

En el pasado se han realizado varios trabajos de titulación asociados al diseño y construcción de una impresora 3D en la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE. El prototipo que se desea mejorar es el realizado por la Ing.

Anita Sempertegui y el Ing. Ricardo Celi en su proyecto de titulación “ESTUDIO, DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN ROBOT DELTA PARA UTILIZARSE EN UNA IMPRESORA 3D”. El producto de este trabajo fue donado a la ESPE y se muestra en la figura 5.



FIGURA 4: IMPRESORA 3D DELTA DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS—ESPE

Fuente: TeleAutomática S.A.

El actual trabajo propone una mejora considerable a los esfuerzos anteriormente realizados. A continuación se listan las mejoras al prototipo actual que posee la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE:

- El producto pretende ser totalmente comercial y no sólo un trabajo de titulación realizado con el fin de obtener el título de ingeniero mecatrónico, por lo tanto, se tomará muy en cuenta los aspectos comerciales en el rediseño del mismo.
- Se seguirá el proceso estándar de desarrollo de productos definido en (Ulrich-Eppinger, 2013) como un aseguramiento de la calidad del producto y de que este podrá ser totalmente competitivo en el mercado.
- Se incorporarán en todas las fases de desarrollo conocimientos de diseño industrial, mercadotecnia y manufactura que se han adquirido en base a

la experiencia antes mencionada, para que el prototipo desarrollado en la tesis no sea sólo un prototipo, sino un producto en sí, totalmente replicable y comercializable.

- Las especificaciones objetivo del producto, que se muestran más adelante, han sido seleccionadas con base en la experiencia de dos años en el uso de esta tecnología para maximizar la probabilidad de éxito del mismo en el mercado. Se muestran más adelante las especificaciones del prototipo actual que posee la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE y las que tendrá el realizado en este trabajo. Posteriormente se muestra una tabla que cuantifica las mejoras en las especificaciones.

Por tanto, se propone en este proyecto diseñar y construir una impresora 3D comercial, totalmente funcional y con un excelente diseño industrial. Además, se pretende lograr un precio accesible al mercado, tanto nacional como latinoamericano. Este proyecto no solo constituirá uno de los primeros productos tecnológicos totalmente diseñados y *comercializados* en el país, dejando un precedente de que si se puede hacer tecnología en Ecuador, si no que aumentará considerablemente el prestigio de nuestra universidad.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Rediseñar el prototipo de impresora 3D tipo delta de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE enfocando el nuevo diseño hacia su comercialización.

1.2.2. Objetivos específicos

- Cumplir con las especificaciones objetivo establecidas en el alcance del proyecto.

- Construir un prototipo totalmente replicable y manufacturable mediante métodos de producción a gran escala.

1.3. Justificación e importancia

Este proyecto contribuirá al prestigio de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE como la precursora de uno de los primeros productos tecnológicos totalmente diseñados, contruidos y vendidos en Ecuador. Por otra parte, contribuirá a la experiencia en el desarrollo de productos y emprendimiento del estudiante que lo realizará. Y por último, pero lo más importante, será un comienzo de un proyecto a largo plazo que contribuirá a la vida de miles de personas que actualmente no tienen acceso a la manufactura personal y cuyos emprendimientos podrían ser potenciados con esta tecnología.

1.4. Alcance

El alcance del proyecto puede ser definido mediante las especificaciones del producto comparadas con las especificaciones logradas en el anterior trabajo. Las mismas están basadas en necesidades del cliente identificadas mediante el uso continuo de esta tecnología por casi 2 años, pero podrían ser modificadas posteriormente en base al análisis de la competencia (benchmarking) y otra vez más adelante en base a las limitaciones que impongan los conceptos desarrollados durante la tesis. A continuación se listan las necesidades del cliente identificadas, para después presentar las especificaciones del cliente (Ulrich-Eppinger, 2013):

Necesidades del cliente:

- Capacidad de imprimir en varios materiales diferentes o iguales de forma simultánea.
- Obtener trabajos que no necesiten ningún proceso de post-producción.
- Poseer una buena resolución de impresión.

- Poseer un gran volumen de impresión.
- El producto no debe ser comercializado en kit, sino, debido a la naturaleza del mercado ecuatoriano, como un producto totalmente ensamblado y listo para su utilización.
- Debe inspirar orgullo en el usuario, tanto en el aspecto visual como en el funcional (Ulrich-Eppinger, 2013).
- Debe ser resistente al polvo.
- Debe tener un precio límite de 2000 dólares.
- Deber poseer la capacidad de imprimir en varios tipos de materiales.
- Debe ser modular para incorporar diferentes tipos de extrusores en un futuro o actualizaciones de hardware de partes como el sistema de alimentación o una cámara para grabar las impresiones y monitorizar las mismas durante el proceso.

A continuación se muestran las actuales especificaciones logradas en el prototipo que posee la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE. Después se muestran las que se desean lograr en el presente proyecto:

Especificaciones del prototipo actual de la ESPE:

- Volumen de impresión: 180 mm de diámetro por 290 mm de altura.
- Resolución de capa: 100 μ m.
- Número de extrusores: 1.
- El acoplamiento del extrusor no permite un sistema modular.
- Precio de venta al público meta: 1600 dólares.
- Conectividad con computador.
- Interfaz LCD.
- Auto-calibración de cama.
- No posee diseño industrial.
- No posee una interfaz fácil de utilizar.
- No posee cama caliente.

A continuación se muestran las especificaciones del cliente que se derivan de las necesidades identificadas anteriormente para este proyecto de titulación. El proceso de traducción de las necesidades del cliente en especificaciones objetivo es subjetivo y depende del equipo de desarrollo o en este caso, el estudiante (Ulrich-Eppinger, 2013). Téngase en cuenta que una misma necesidad del cliente puede ser traducida en una o más especificaciones objetivo. Las mismas reflejan un conjunto de especificaciones que el autor del perfil considera propias de un producto que sería exitoso.

Especificaciones técnicas objetivo:

- Resolución de capa: 100 um.
- Volumen de impresión: 280 mm de diámetro por 400 mm de altura.
- Número de extrusores: 2.
- Se vende totalmente ensamblado.
- Posee luces led RGB para acompañar el estado de la impresora, por ejemplo: en espera, azul, imprimiendo, rojo, detección de atascamiento, amarillo.
- Sistema modular para extrusor.
- Precio de venta al público meta: 2000 dólares.
- Posee cama caliente para imprimir en ABS.
- Conectividad con tarjeta SD.
- Interfaz LCD.
- Auto-calibración de cama.
- Excelente diseño industrial, una variable subjetiva, pero se medirá mediante la apreciación de las personas que vean el prototipo.
- Fácil de usar (interfaz amigable).

Por último, la tabla 1 muestra una comparativa de especificaciones que cuantifica las mejoras que se espera lograr con respecto al prototipo actual

de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE. La tabla 1 utiliza las siguientes abreviaturas:

- Valor Prototipo Actual (VPA)
- Valor Producto Futuro (VPF)
- Porcentaje de Mejora (PM)

TABLA 1:

COMPARACIÓN DE ESPECIFICACIONES DEL PRODUCTO

Métrica	VPA	VPF	PM	Observación
Resolución de capa	100 um	100 um	0%	No es beneficioso económicamente mejorar el valor de esta métrica, aunque se intentará obtener mejoras mediante software de la resolución.
Volumen de impresión	180 mm D X 290 mm H	280 mm D X 400 mm H	233 %	El volumen de impresión se incrementa a más del triple.
Número de extrusores	1	2	No	Se puede imprimir en dos colores o con material de soporte o en materiales diferentes.
Diseño modular	No	Si	No	Permite mejoras a futuro.
Precio meta	1600	2000	-25%	Esto es aceptable teniendo en cuenta la mejoras mencionadas
Cama caliente	No	Si	No	Se puede imprimir en ABS, un material de impresión 3D apto para aplicaciones ingenieriles
Conectividad	PC	PC y SD	No	La impresora puede trabajar sola, sin necesidad de estar conectada al computador
Diseño industrial	No posee	Si posee	No	Es un producto atractivo visualmente y fácil de usar.

Como se puede apreciar en la tabla 1 se propone realizar un rediseño completo del producto con especificaciones significativamente mejores a las anteriormente logradas.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Introducción a la impresión 3D

La impresión 3D es un conjunto de tecnologías cuyo objetivo es crear un objeto tridimensional a partir de un archivo digital. Esto permite que, en cierta medida, la máquina sea auto-replicable, pues puede crear partes de sí misma. Estas tecnologías abarcan varios y diversos campos, por lo que se puede considerar a la impresión 3D un campo multidisciplinario. Las principales tecnologías que se utilizan en este proceso son:

- *CAD (Computer Aided Design)* es cualquier conjunto de herramientas, normalmente software, cuyo objetivo es la creación de objetos tridimensionales digitales (RepRap, 2016).
- *CAM (Computer Aided Manufacturing)* es cualquier conjunto de herramientas, normalmente software, cuyo objetivo es la traducción de estos objetos tridimensionales digitales a un lenguaje estándar que pueda ser comprendido por la electrónica de la máquina que va a manufacturar el objeto (RepRap, 2016).
- *Firmware* es el software que define todos los parámetros de funcionamiento (susceptibles de calibrar por programación) de la impresora 3D. En su forma más básica, este software es el encargado de implementar de forma coherente con la electrónica del producto las instrucciones generadas por el CAM (RepRap, 2016).
- *Tecnología de impresión 3D* es el conjunto de herramientas físicas, comúnmente máquinas de impresión 3D, cuyo objetivo es implementar en el plano físico las instrucciones del firmware, creando de esta manera el objeto que en un principio se diseñó mediante el software CAD. Existen varias tecnologías de impresión 3D, estas se detallan en el apartado a continuación (RepRap, 2016).

2.2. Tecnologías de impresión 3D

A continuación se muestran las principales tecnologías de impresión:

2.2.1. SLA (StereoLithogrAphy)

La tecnología SLA (Estereolitografía en español) consiste de una base que emerge o se sumerge en una cámara que contiene un tipo de resina fotocurable. Simultáneamente, un láser de luz ultravioleta activado por un mecanismo de posicionamiento mediante reflectores activa la curación de la resina, y por lo tanto, la solidifica. (xataca, 2016) Este proceso de impresión se puede apreciar en la figura 6.

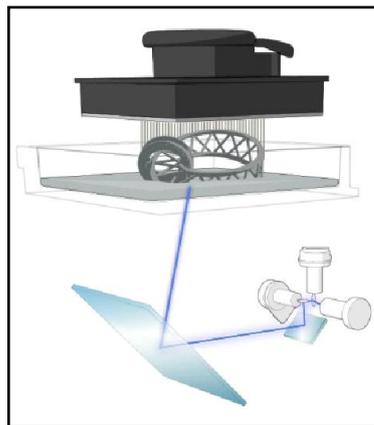


FIGURA 5: TECNOLOGÍA SLA (ESTEREOLITOGRAFÍA)

Fuente: (xataca, 2016)

2.2.2. SLS (Selective Laser Sintering)

La tecnología SLS (Sinterizado Selectivo por Láser en español), al igual que la anterior tecnología, crea el objeto físico capa a capa. Una capa de polvo de material se coloca sobre la base de impresión, mientras que un láser funde cada capa según sea necesario y en puntos específicos, logrando de esta manera sinterizar el objeto capa a capa (xataca, 2016). Por

esta razón, no necesita soportes, lo que hace que no haya desperdicio de material. En la figura 7 se puede apreciar esta tecnología.



FIGURA 6: TECNOLOGÍA SLS (SELECTIVE LASER SINTERING)

Fuente: (xataca, 2016)

2.2.3. FDM (Fusion Deposition Modeling)

La tecnología FDM (Modelado por Deposición Fundente en español), imprime un objeto físico capa a capa mediante la deposición de un hilo de plástico fundido (Wikipedia, 2016). Cada capa se coloca sobre la anterior, por lo que si se desea imprimir objetos que posean partes en voladizo, la impresora tendrá que realizar soportes para aquella parte que se quitarán después de la impresión. Esto conlleva a cierto desperdicio de material en cada impresión.

Puesto que esta tecnología poseía patentes, se creó otra similar denominada FFF (Fused Filament Fabrication) Fabricación por Filamento Fundido en español. Estas son las tecnologías más comunes actualmente en la industria, puesto que fueron popularizadas por grandes proyectos como RepRap. La figura 8 ilustra el proceso de construcción de objetos de esta tecnología.

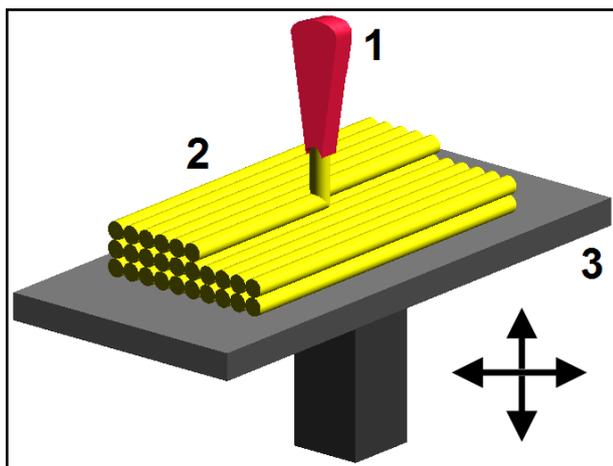


FIGURA 7: TECNOLOGÍA FDM (FUSED DEPOSITION MODELING)

Fuente: (Wikipedia, 2016)

El presente proyecto utilizará esta tecnología como base para el diseño del producto, puesto que fue la utilizada por el prototipo de impresora delta actual de la ESPE.

2.3. Sistema de locomoción

En el contexto de este documento, el sistema de locomoción es el encargado de posicionar el cabezal de impresión en cualquier punto del espacio para que este pueda depositar material. Una característica importante del sistema de locomoción es la disposición de sus ejes principales, que puede tomar tantas formas como tipos de robots existen. A continuación se muestran algunos:

2.3.1. Sistema de locomoción cartesiano

El sistema de locomoción cartesiano que se muestra en la figura 9, como su nombre lo indica, posiciona el cabezal de impresión en los ejes X, Y y Z. Es el tipo de sistema de locomoción más extendido en la industria, sin embargo, se lo ha implementado de varias formas, como se puede apreciar en la figura 10. Posee varias ventajas, de entre las cuales destaca la simplicidad de las ecuaciones de movimiento, por lo que se tiene un menor

requerimiento de poder computacional por parte de la tarjeta madre de la impresora.

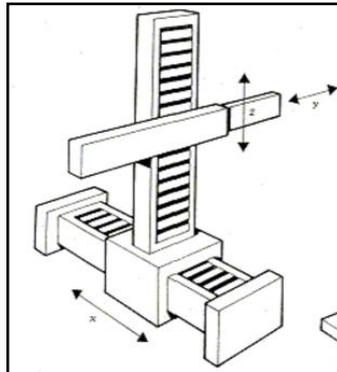


FIGURA 8: SISTEMA DE LOCOMOCIÓN CARTESIANO

Fuente: (DIWO, 2016)



FIGURA 9: DOS FORMAS DE IMPLEMENTAR UN SISTEMA DE LOCOMOCIÓN CARTESIANO

Fuente: (DIWO, 2016)

2.3.2. Sistema de locomoción delta

El sistema de locomoción delta que se muestra en la figura 11 posiciona el cabezal de extrusión mediante 3 pares de brazos diagonales que se unen al mismo mediante uniones articuladas. A su vez, estos brazos se unen a las columnas mediante uniones del mismo tipo (DIWO, 2016). Mediante la variación de altura de los 3 carros que se deslizan en las columnas, el cabezal de impresión puede posicionarse en cualquier punto del espacio de construcción del producto.

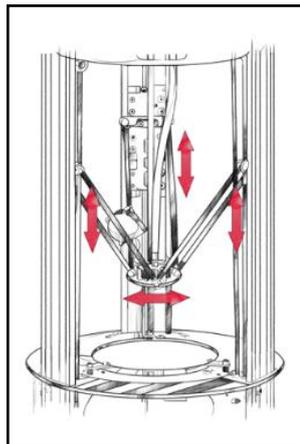


FIGURA 10: SISTEMA DE LOCOMOCIÓN TIPO DELTA

Fuente: (DIWO, 2016)

Este sistema presenta varias ventajas con respecto al sistema cartesiano convencional ampliamente utilizado en el mercado. A continuación se muestran estas ventajas:

- *Mayor velocidad de impresión* que se debe a varias razones, de entre las cuales destacan un menor peso del cabezal de impresión y un efecto sinérgico en la velocidad de posicionamiento en el plano X-Y debido a que para cualquier movimiento en la dirección de los ejes cartesianos se emplean al menos 2 actuadores.
- *Volumen de impresión de fácil escalabilidad* que implica que el volumen de construcción de una impresora delta puede ser escalado modificando pocos elementos de la estructura. Estos elementos son las columnas de deslizamiento, la longitud de las correas, las bases de separación de columnas y por último, el diámetro de la plataforma de impresión.
- *Valor agregado percibido* gracias a que el sistema de locomoción delta es poco común, por lo que es visto como un potencial factor de diferenciación del producto con respecto a la competencia.

Por estas razones, se ha seleccionado el sistema de locomoción delta para el producto que se pretende desarrollar.

2.3.3. Otros sistemas de locomoción

Existen tantos tipos de sistemas de locomoción como tipos de robots existen. Sin embargo, la mayoría de los productos exitosos en cuanto a impresoras 3D se refiere, utilizan un sistema cartesiano o uno delta. Y se ha dicho la mayoría, pues algunas innovaciones utilizan como base el robot tipo SCARA que se muestra en la figura 12 o el robot delta tradicional que se muestra en la figura 13. Si bien estos diseños no se han popularizado en la industria, es interesante evaluarlos ya que si se desarrollaran a futuro, podrían diferenciarse en gran medida de la competencia.



FIGURA 11: LA IMPRESORA 3D MORGAN UTILIZA UN SISTEMA DE LOCOMOCIÓN SCARA

Fuente: (RepRap, RepRap, 2016)



FIGURA 12: LA IMPRESORA 3D SIMPSON UTILIZA UN SISTEMA DE LOCOMOCIÓN DELTA TRADICIONAL

Fuente: (RepRap, RepRap, 2016)

2.4. Sistema de extrusión

Para los fines que competen a este documento, el sistema de extrusión es el conjunto de componentes que trabajan simultáneamente para depositar el material capa a capa en el lugar en el que el sistema de locomoción posicione el cabezal. Los componentes de este sistema son el mecanismo extrusor, el mantenedor de filamento y la bobina de filamento. A continuación se muestra cada uno de estos:

2.4.1. Extrusor

El mecanismo extrusor es el encargado de empujar el hilo de filamento a través de una boquilla que derrite el material hasta la temperatura de fundición para depositarlo en el lugar que corresponda. Consta de dos partes principales: el Cold End (*Terminal frío* de ahora en adelante) que es el encargado de empujar el hilo de filamento y el Hot End (*Fusor* de ahora en adelante) que es el encargado de calentar el material hasta la temperatura de fundición para derretirlo.

El terminal frío es comúnmente implementado mediante un motor a pasos NEMA 17 (Motor fabricado por la Asociación Nacional de Manufactureros Eléctricos en español con un encapsulado de 1.7 pulgadas) acoplado a un mecanismo de reducción con engranes. A su vez, al eje de mayor torque se acopla un mecanismo de ajuste del hilo del filamento mediante muelles. Todo esto se puede apreciar en la figura 14.



FIGURA 13: TERMINAL FRÍO TIPO GREG

Fuente: (RepRap, RepRap, 2016)

Por otro lado, el fusor es constituido normalmente por un componente de metal al que se acopla una resistencia de calentamiento y un termistor (sensor de temperatura) para la monitorización de la temperatura. Mediante la monitorización en tiempo real de la temperatura de este componente mediante el termistor, la cantidad de energía entregada a la resistencia de calentamiento y un apropiado método de control implementado con la electrónica y el software se alcanza cualquier temperatura en el rango posible para el dispositivo. Un fusor E3D V6 de la empresa E3D Online se muestra en la figura 15.

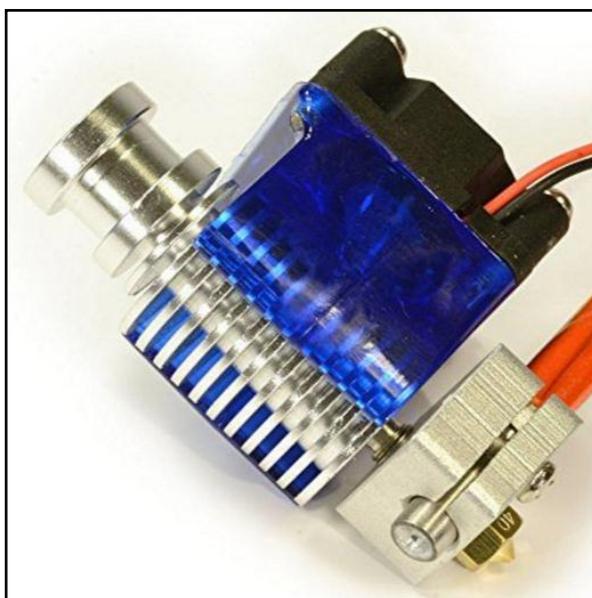


FIGURA 14: FUSOR E3D V6

Fuente: (E3DOnline, 2016)

El fusor es, probablemente, el componente de mayor dificultad de diseño de una impresora 3D debido a que el mismo es de naturaleza multidisciplinaria, y a menudo, sus requerimientos son contradictorios. Por ejemplo, el peso debe ser el menor posible mientras que la capacidad de disipar calor debe ser maximizada. Sin embargo, para perder peso se debe perder capacidad de disipar calor y viceversa.

Para entender mejor cómo, y por qué los extrusores son diseñados como lo son, es necesario presentar un poco de la teoría actual de los termoplásticos a través de las temperaturas características que estos alcanzan en el proceso de extrusión (RepRap, 2016):

- *Temperatura de transición del vidrio Tg (Glass Transition Temperature)*

Antes de alcanzar esta temperatura, un termoplástico presenta una contextura sólida y firme. Sin embargo, una vez se alcanza la Tg el plástico se vuelve viscoso y se expande.

- *Temperatura de fusión Tm (Melting Temperature)*

Si continuamos el aumento de temperatura, llegaremos al punto de fusión, en el que el termoplástico se vuelve líquido y es apto para ser utilizado en la impresión.

- *La fase de transición crítica*

La variación de temperatura entre Tg y Tm es crítica, puesto que el plástico en estado viscoso es sumamente difícil de extruir y retraer mediante el extrusor. Por esta razón, el objetivo es minimizar la zona de transición entre Tg y Tm en el diseño del fusor. Agregado a esto, se debe impedir que el calor generado por la resistencia del fusor se transfiera a otras partes de la máquina, por lo que es normal que la parte superior del fusor tenga la forma de un disipador, además de que a este se encuentre conectado un ventilador.

2.4.2. Mantenedor de filamento

El mantenedor de filamento es el componente encargado de posicionar la bobina de filamento mientras permite el giro de la misma. Tiene especial importancia con respecto al requerimiento de torque del mecanismo extrusor. Por esta razón, debe reducir al mínimo la fricción entre la bobina y el anclaje de la misma a la estructura del producto. La figura 16 muestra a continuación una forma básica de implementar este componente mediante una varilla apoyada en sus extremos (varilla en voladizo).



FIGURA 15: MANTENEDOR DE FILAMENTO DE VARILLA SIMPLE

Fuente: (Thingiverse, 2016)

2.4.3. Filamento

El filamento es la materia prima que utiliza una impresora 3D de tecnología FFF para la fabricación de objetos físicos. Este viene comercialmente en forma de bobinas de hilo de material con diámetros disponibles de 1.75 mm y 3 mm. Sin embargo, el mercado ha empezado a tomar la bobina de diámetro de 1.75 mm como un estándar y en la actualidad, es mucho más extendido que la bobina de 3 mm de diámetro. Una bobina estándar de 1.75 mm se muestra en la figura 17.



FIGURA 16: BOBINA DE FILAMENTO ESTÁNDAR DE 1.75 MM

Fuente: (RepRap, RepRap, 2016)

Existen varios materiales disponibles para imprimir en 3D. Sin embargo, los más utilizados en la actualidad son el PLA (Polyactic Acid o

Ácido Poliláctico en español) y el ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene o Acrilonitrilo Butadieno Estireno en español) (RepRap, 2016). Por otro lado, el número de materiales disponibles para impresión se ha incrementado considerablemente en los últimos años, por lo que a continuación se muestra una lista de los 5 materiales más utilizados en la industria, comenzando por los anteriormente mencionados.

PLA (Polyactic Acid o Ácido Poliláctico en español) es un termoplástico de gran utilidad para la mayoría de las aplicaciones de este mercado. Se deriva del almidón y tiene la ventaja de ser biodegradable. Un uso extendido de este material se ha notado en los moldes de precisión para fundición (ABSPlastic, 2016).

ABS (Aacronitrile Butadiene Styrene o Acrilonitrilo Butadieno Estireno en español) es un material utilizado para aplicaciones de uso diario, es decir, es resistente y no pierde con facilidad sus propiedades en el tiempo. Un problema que se ha observado con este tipo de filamento es su nocividad para el medio ambiente.

PA (PolyAmide o Poliamida en español) comúnmente conocido como Nylon, es un termoplástico utilizado en aplicaciones que soportarán grandes cantidades de esfuerzo.

HIPS (High Impact Polystyrene o Poliestireno de Alto Impacto) es un termoplástico comúnmente utilizado como soporte para objetos que poseen partes en voladizo y al mismo tiempo necesitan un buen acabado superficial o nulo trabajo de post producción. Esto es posible gracias a que el material usa el Limoneno como un solvente que lo diluye en agua después de la impresión, dejando así sólo las partes impresas en el material requerido (matterhackers, 2016). Este proceso de construcción de piezas mediante soportes es de especial interés para este proyecto, puesto que se implementará un diseño de doble extrusor. Se muestra este proceso de producción de piezas en la figura 18.



FIGURA 17: RODAMIENTO DE BOLAS IMPRESO EN ABS CON SOPORTES DE HIPS

Fuente: (matterhackers, 2016)

TPE (Thermoplastic Elastomer o Termoplástico Elastómero en español) es una innovación popularizada en los últimos años cuya principal característica es su elasticidad. Por lo tanto, puede utilizar en aplicaciones tan interesantes como la impresión de llantas para un vehículo, tensores para estabilizar una estructura o impresión de zapatos como se muestra en la figura 19.



FIGURA 18: ZAPATOS IMPRESOS EN 3D CON MATERIAL TPE

Fuente: (matterhackers, 2016)

2.4.4. Plataforma de construcción

La plataforma de construcción es el conjunto de componentes que tienen el propósito de albergar y retener el objeto en construcción que se está imprimiendo. Normalmente consta de un plato bajo y un plato alto. Ambos están acoplados mediante resortes, normalmente en 3 puntos que no pertenezcan a una misma recta, con el objetivo de nivelar el plano de construcción con el plano en el que se desplaza el extrusor.

Por otro lado, el plato alto suele estar hecho de diferentes materiales que tienen el objetivo de satisfacer dos condiciones mutuamente contradictorias:

- La primera capa de material debe pegarse firmemente a la plataforma para que el resto del objeto tenga una base rígida sobre la cual construirse. Si esta condición no se cumple, el objeto se despegará de la plataforma en cualquier momento y la impresión fallará.
- La primera capa no debe pegarse tan fuertemente a la plataforma como para que al usuario le resulte imposible despegar el objeto de la plataforma sin dañar uno o ambos.

Una solución para satisfacer estas condiciones es la incorporación de una *cama caliente* al plato alto. Esta es una resistencia de gran tamaño junto a un sensor de temperatura que permite un control del calor generado para pegar fácilmente la primera capa de impresión a la plataforma. La figura 20 muestra una cama caliente.

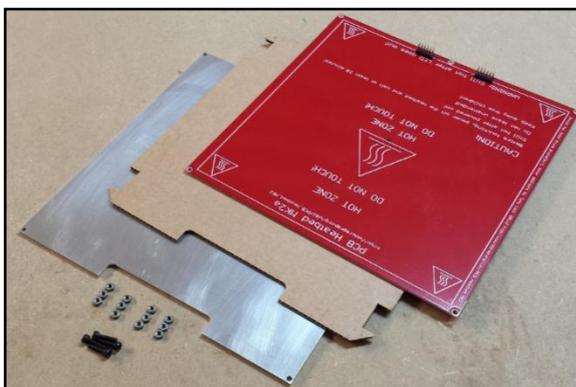


FIGURA 19: CAMA CALIENTE PARA IMPRESORA CARTESIANA

Fuente: (RepRap, RepRap, 2016)

Es necesario recalcar que todas las camas calientes necesitan un aislante térmico de acople con la estructura. Esto es necesario para que el calor generado en la misma no se transfiera de forma dañina a otro componente de la impresora. Por esta razón, es frecuente el uso de una pieza de madera debajo del plato bajo que se acople a su vez con la estructura.

2.4.5. Auto-nivelación de cama

Es posible compensar la falta de paralelismo entre los planos del plato alto y el plano que recorre el extrusor de forma más sofisticada que con 3 muelles. A este proceso se le conoce como auto-nivelación de cama y requiere de un componente especial llamada “z probe” (de ahora en adelante sensor de nivelación).

El método consiste en acoplar al cabezal de impresión cualquier sensor de distancia o que pueda percibir la cama cuando esta esté a una distancia conocida de la boquilla del fusor. De manera que al acercar el cabezal de impresión a la cama, una señal avise a la electrónica la distancia que se ha alcanzado. Esto permite compensar por software cualquier desperfecto pequeño en la construcción de la plataforma de impresión. Un sensor de nivelación se muestra en la figura 21.

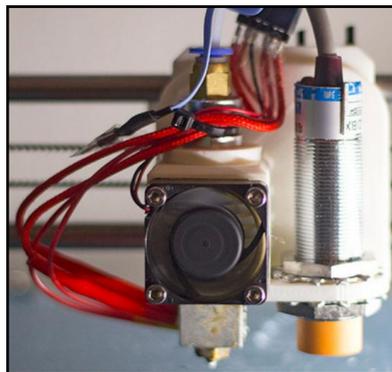


FIGURA 20: SENSOR DE NIVELACIÓN INDUCTIVO

Fuente: (RepRap, RepRap, 2016)

2.5. Sistema estructural

El sistema estructural de una impresora 3D se entiende en este proyecto como todos los componentes que están destinados a contener y posicionar en su lugar a los componentes funcionales del producto. Puesto que se ha dicho que estos componentes también tienen la función de contener al producto en sí, en este sistema están incluidos todas las

consideraciones de diseño industrial. A continuación se detallan los aspectos más relevantes del sistema estructural que serán tomados en cuenta en el proceso de diseño del producto.

2.5.1. Rigidez de la estructura y su influencia en la calidad de impresión

La estructura de una impresora 3D debe resultar lo más rígida posible mientras se cuida no sobredimensionar el peso o el número de componentes de la misma. Esto es deseable ya que la estructura contendrá partes móviles, y puesto que estas partes móviles poseen al menos un mínimo de masa, cuando se alcance grandes velocidades con las mismas (que es lo deseable) se podrían generar vibraciones en el producto que afecten la calidad de impresión.

De esta manera, la calidad del producto se ve afectaba significativamente por una estructura poco rígida generando una calidad pobre en las piezas producidas o bien con un tiempo sub-óptimo de fabricación de las mismas. Esto se da ya que para evitar vibraciones en un sistema estructural poco rígido, se debe reducir la velocidad de movimiento del cabezal de impresión.

La complejidad de diseño analítico de un sistema estructural para un producto como el que se pretende desarrollar es enorme, y sobrepasa los fines prácticos de este proyecto. Sin embargo, un método eficiente consiste en plantear un sistema rígido en base a lineamientos básicos de diseño para después realizar pruebas sobre el mismo. Con los resultados de estas pruebas se mejora incrementalmente el sistema hasta obtener resultado funcionales, para después obtener resultados competitivos en el mercado.

Existen lineamientos que pueden resultar útiles en el diseño de estructuras rígidas, los cuales se muestran a continuación:

- Uso de triángulos en el diseño.
- Normalmente, una estructura suficientemente rígida es producto de componentes rígidos y uniones rígidas entre los mismos.

- Un diseño puramente analítico presenta una complejidad enorme. Por otro lado, un diseño analítico conjugado con la mayor cantidad posible de fases de prueba y error podría dar resultados más eficientes en cuanto a tiempo y recursos.
- Un centro de gravedad bajo ayuda a prevenir vibraciones en la estructura. Esto es fácil de alcanzar mediante el posicionamiento de la mayor cantidad de componentes en la parte más baja de la estructura.

2.5.2. Impresoras de cámara abierta VS Impresoras de cámara cerrada

Un factor diferenciador entre impresoras 3D de calidad y otras enfocadas únicamente al bajo costo es su capacidad para prevenir un problema que la comunidad de makers ha denominado “warping”. Esta es una deformación en el objeto impreso debido a la contracción producida por el enfriamiento de la misma. La figura 22 muestra un ejemplo de warping.



FIGURA 21: PROBLEMA WARPING EN IMPRESIÓN 3D CON ABS

Fuente: (RepRap, RepRap, 2016)

Para prevenir este comportamiento indeseable, los productos enfocados a la calidad incorporan una cámara cerrada para el ambiente de impresión como el que se muestra en la figura 23. El mismo previene las corrientes de aire laterales que influyen en este problema al tiempo que permite calentar y mantener aire caliente dentro de este ambiente de impresión.



FIGURA 22: IMPRESORA 3D DE CÁMARA CERRADA PARA PREVENCIÓN DE WARPING

Fuente: (MakerBot, 2016)

Por tanto, se ha elegido incorporar en el sistema estructural una cámara cerrada para el ambiente de impresión ya que el producto estará enfocado hacia la calidad por sobre la búsqueda del menor precio.

2.5.3. Aspectos del diseño industrial de una impresora 3D

El diseño industrial para un producto de consumo es de vital importancia y puede constituir un fuerte valor agregado o de diferenciación. Constituye cualquier aspecto del diseño que haya sido generado para mejorar la experiencia del usuario en una interacción con la máquina. Esta experiencia normalmente es relacionada con el aspecto visual del producto, pero el diseño industrial abarca desde la sensación que tiene el usuario al tocar la máquina hasta el número de pasos necesarios para alcanzar cualquier función en la interfaz de usuario o qué tan intuitiva es esta.

En el diseño de este producto se tomarán muy en cuenta estos aspectos, pues se consideran elementales en el desarrollo de cualquier creación comercial. A continuación se detallan algunas características de diseño industrial que se pretende implementar en el diseño:

- *Cámara interna iluminada con luces LED RGB* que dotarán de un aspecto sofisticado al producto al tiempo que servirán de indicador rápido de estados de a máquina (principalmente de temperatura).

- *Uniformidad en color* que dotará al producto de calidad visual y expresará rápidamente la calidad que se ha buscado en el diseño.
- *Acceso rápido a la tarjeta madre* que facilitará al usuario realizar cualquier modificación o reparación en la electrónica del producto.
- *Acoplamiento rápido de los cabezales* que facilitará el uso de nuevos módulos como el cabezal de grabado láser o el cabezal de perforación.
- *Conexión y desconexión rápida de elementos* que facilitará la reparación y mantenimiento de la máquina.

2.6. Sistema de control

El sistema de control es el conjunto de componentes físicos y de software que trabajan en conjunto para implementar órdenes en los sistemas mecánicos de la máquina y de esta manera obtener objetos físicos a partir de archivos digitales. Entre los componentes más destacables del sistema de control tenemos:

2.6.1. Tarjeta madre

La tarjeta madre es el componente que contiene la mayor parte de la electrónica del producto y puede ser visto como el cerebro del mismo. La principal función de este componente es la distribución y tratamiento correcto de la energía entregada por la fuente de poder para convertirla en señales de poder y control que activen de forma correcta los sistemas mecánicos de la impresora.

La mayoría de impresoras 3D utilizan Arduino desde la revolución iniciada por el proyecto RepRap. Esto permite una simplicidad significativa del lenguaje de programación de las mismas, además de proveer un estándar sencillo en la industria. Por supuesto también, al ser compatibles con Arduino, poseen todas las ventajas de este potente lenguaje de programación. La figura 24 muestra la tarjeta madre RAMPS-Arduino que es

implementada por Arduino Mega y una tarjeta electrónica específica para impresoras 3D llamada RAMPS 1.4.

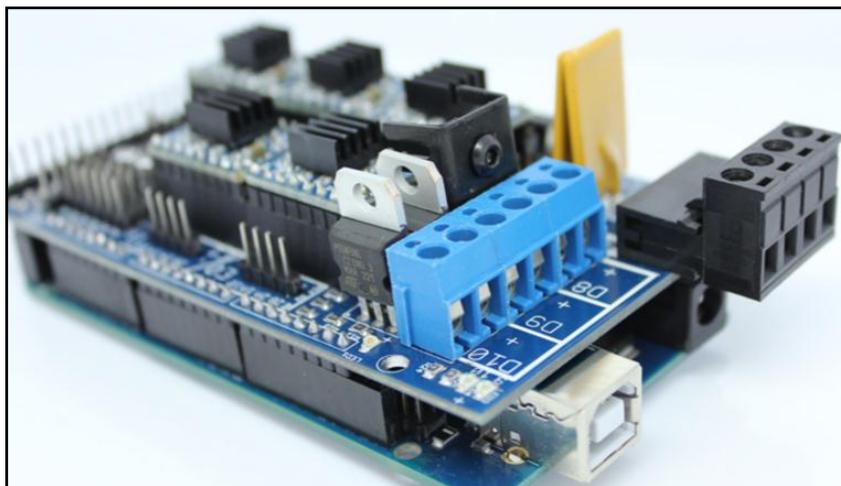


FIGURA 23: CONTROLADOR, ARDUINO MEGA Y RAMPS1.4

Fuente: (RepRap, RepRap, 2016)

2.6.2. Software Firmware

Firmware es el software que define todos los parámetros de funcionamiento (susceptibles de calibrar por programación) de la impresora 3D. En su forma más básica, este software es el encargado de implementar de forma coherente con la electrónica del producto las instrucciones generadas por el CAM.

2.6.3. Software Host

Host es el software encargado de la comunicación entre el software CAM y el firmware. Este programa también monitoriza varias de las variables del producto como las temperaturas y velocidades de movimiento y extrusión para mostrarlas al usuario. Es también en el mismo donde se preparan los archivos digitales para ser impresos por el producto específico que se está utilizando, es decir, viene integrado con parte de un software CAM.

CAPÍTULO III

3. BENCHMARKING

3.1. Introducción al benchmarking

En el contexto de este proyecto, benchmarking es un conjunto de prácticas realizadas para analizar los productos que serán la competencia directa o indirecta de la impresora 3D que se pretende desarrollar. Esto implica en un principio obtener sus especificaciones, pero también se puede necesitar el producto físicamente para realizar medidas sobre el mismo que no son detalladas por el fabricante ya que no son relevantes para el usuario, pero si para el desarrollador (Ulrich-Eppinger, 2013).

Mediante esta práctica, el equipo que desarrolla el producto (en este caso el estudiante) puede estar seguro que se ha analizado todo o buena parte del espectro del mercado. Esto permite que se establezcan especificaciones competitivas con respecto a lo existente, aunque también puede constituir una fuente de ideas para los conceptos del producto que se esté realizando.

Para una impresora 3D se tienen varias especificaciones relevantes que se explican con detalle en el numeral 3.2. Posteriormente las especificaciones exactas de un amplio conjunto de impresoras 3D de la competencia son evaluadas en el numeral 3.3.

3.2. Características de comparación de impresoras 3D

Se explica a continuación un conjunto de características o especificaciones que todas las impresoras 3D poseen. Cada una de estas es un factor determinante en su desempeño como producto competitivo en el mercado.

- *Volumen de impresión*

El volumen de impresión es interpretado como una medida del objeto con mayor tamaño que una impresora 3D puede fabricar. En el caso de las

impresoras con un sistema de locomoción cartesiano (como el que se describe en el numeral 2.3.1) el volumen de impresión viene definido por un hexaedro rectangular. En el caso de las impresoras 3D tipo delta este viene definido por un cilindro.

Como medida de referencia se puede mencionar que un volumen pequeño de impresión en el mercado es 100 x 100 x 100 mm y un volumen grande 300 x 300 x 450 mm.

- *Resolución de capa*

La resolución de capa es una medida de la mayor calidad de impresión que se puede lograr con una impresora 3D determinada. Esta calidad es una función de qué tan pequeña puede ser cada capa de impresión, por lo que también podría interpretarse como una medida de la rugosidad del trabajo que la misma entrega.

Las impresoras del mercado con tecnología FDM tienen una resolución mínima de hasta 20 μm y máxima de hasta 200 μm . La figura 25 ilustra el concepto de resolución de capa. Se puede apreciar que el trabajo de la izquierda presenta una menor calidad en cuanto a rugosidad se refiere mientras que el trabajo de la derecha presenta una mayor resolución y por tanto mayor calidad. Es importante recalcar que la resolución de capa es inversa al tiempo de impresión, es decir, cuanta más resolución de capa deseemos en un trabajo de impresión, mayor será el tiempo de impresión para conseguir la misma.



FIGURA 24: DIFERENTES RESOLUCIONES DE CAPA

Fuente: (Atom3dp, 2016)

- *Plataforma de construcción*

La plataforma de construcción hace referencia, en este contexto, al material del que está hecha la plataforma sobre la cual se imprimirá el objeto. Existen diferentes materiales utilizados, con ventajas y desventajas sobre los otros. A continuación se muestran las plataformas de construcción más comunes:

Vidrio es un material popular para la plataforma de extrusión debido a su bajo costo y baja curvatura. Una gran desventaja de este material es su gran fragilidad y baja resistencia a los choques térmicos, por lo que si se enfría o calienta demasiado rápido puede llegar a quebrarse.

Metal de entre los cuales el más común es el aluminio es otro material popular utilizado para este fin. Se puede calentar uniformemente gracias a su gran capacidad para transferir el calor, además de que puede ser utilizado junto con un sensor inductivo para implementar el proceso de auto-calibración.

Cerámica es otro material popular que puede alcanzar grandes temperaturas y también es un excelente transmisor de calor. Una desventaja es su gran fragilidad y costo, sin embargo, es resistente a los choques térmicos y tiende a calentarse muy rápido.

- *Número de extrusores*

El número de extrusores es un aspecto básico que diferencia una impresora enfocada a la calidad y una enfocada al bajo costo por sobre la calidad de las impresiones. Dos a más extrusores son necesarios en la tecnología FDM para hacer impresiones en múltiples colores o soportes solubles para los voladizos con el fin de ahorrar tiempo de post-producción al usuario.

- *Diseño modular*

Un diseño modular es deseable en muchas clases de productos debido a las ventajas que presenta con respecto a uno que no lo es. A continuación se muestran las ventajas de una arquitectura modular respecto de una arquitectura que no lo es.

Facilidad de ensamblaje y des-ensamblaje de componentes.

Facilidad de incorporación de nuevas innovaciones, lo que facilita el diseño para el desarrollador y ahorra dinero a los usuarios.

Facilidad de reparación de componentes debido a que se puede comprar por separado y cambiar sin grandes inversiones de tiempo.

Se ha elegido incorporar un diseño modular para el cabezal de la máquina. Esto implica diseñar una interfaz de conexión y desconexión rápida tanto mecánica como electrónica para el cabezal de impresión, lo que a futuro permitirá diseñar e implementar otro tipo de cabezales como uno de corte y grabado láser.

- *Cámara caliente (ambiente controlado o cerrado)*

Como se vio en el capítulo anterior, una cámara caliente o cámara cerrada es un componente agregado al sistema estructural que imposibilita cambios de temperatura así como la introducción de corrientes de aire indeseables que generen el problema del warping.

- *Cama caliente*

Este componente tiene la característica de calentarse a cierta temperatura elegida por el usuario durante la impresión y transferir este calor a la plataforma de construcción para lograr una adecuada adherencia de la pieza en impresión. Esto es deseable para evitar el warping en la capa inicial de impresión y prescindir de la necesidad del uso de raft (soportes de material a manera de balsa). En la comparación en tablas de benchmarking que se hará en el capítulo actual, sólo se distingue entre impresoras con y sin cama caliente.

- *Conectividad*

La conectividad se refiere a la cantidad de formas de comunicación que puede tener una impresora 3D con el software Host. A excepción de unos pocos productos enfocados al sector profesional, siempre es necesario al menos un banco de memoria que guarde el G-code (órdenes en lenguaje computacional que entiende y obedece la impresora) para transferirlo a la máquina en tiempo real durante el proceso de construcción del objeto. A continuación se presentan algunas formas de conectividad de las impresoras

3D aunque cabe recalcar que es usual que un mismo producto incorpore varias de estas características.

Cable USB tipo A-B que presenta la desventaja de requerir una computadora en conexión directa con la impresora durante todo el proceso de impresión.

Tarjeta SD que independiza el trabajo de la computadora y el producto gracias a que guarda el G-code del archivo a imprimir y lo suministra a la electrónica.

Conectividad USB stick es similar a la anterior con la diferencia que pueda guardar mucha más información y por lo tanto más archivos.

Conectividad Ethernet presenta la ventaja de poder imprimir archivos vía alámbrica desde diferentes computadoras y así permitir un trabajo en red y la monitorización lejana de producto.

Conectividad WIFI presenta la ventaja de poder imprimir archivos vía internet desde diferentes dispositivos y así permitir un trabajo en red y la monitorización del producto desde cualquier lugar del mundo.

- *Interfaz*

Una interfaz LCD o cualquier tipo de componente que pueda mostrar en tiempo real datos relevantes del proceso que se está llevando a cabo representa un componente de valor agregado para el producto. Por esta razón, varias impresoras incorporan una pantalla LCD desde la cual se pueden apreciar y modificar variables relevantes del producto.

- *En Kit o Ensamblada*

Dependiendo del mercado en el que se mueva una impresora 3D es posible vender el producto en kit, ensamblado, o ambas. Esta decisión debe tomarse basado en las necesidades percibidas de los usuarios. Una impresora vendida ya ensamblada se enfoca a usuarios profesionales que no tienen interés en cómo funciona esta tecnología y una vendida en Kit para armar se enfoca a un campo reducido que se interesa por el funcionamiento de la misma. Naturalmente, una impresora en kit es mucho más económica que una ensamblada ya que en su precio no se consideran costos de ensamblaje, manejo y transporte.

- *Precio de venta*

El precio de venta es otra variable importante a tomar en cuenta en un análisis comparativo de impresoras 3D. Se puede afirmar que por regla general una impresora 3D varía su precio de venta con respecto al número de funciones y valor agregado que presenta. Los precios en este mercado varían en un gran rango, así como la calidad de los productos. Se puede encontrar impresoras chinas con una calidad pobre de 150 dólares u otras profesionales de grandes marcas como 3DSystems por alrededor de 4500 dólares.

- *Componentes de valor agregado*

Muchas impresoras de gama alta incorporan componentes en sus productos que no tienen que ver necesariamente con el proceso de impresión 3D puesto que se ha notado una tendencia del mercado a crear una máquina completa de prototipado. Esta máquina, a través de un módulo, podría ser en un momento dado una impresora 3D y con otro módulo, una máquina de corte láser. Algunos componentes de valor agregado que se ha observado en el mercado se muestran a continuación:

Scanner 3D incorporado

Módulo de corte y grabado láser

Módulo de maquinado

Módulo de impresión en estaño para circuitos impresos

Módulo de uno y dos extrusores

Sistema completo de auto-calibración

3.3. Análisis de la competencia

3.3.1. Impresoras 3D de la marca SeeMeCNC

SeeMeCNC es una empresa norteamericana líder en el mercado de impresoras 3D tipo delta de bajo costo gracias a que fueron pioneras en este mercado. A continuación se muestran los productos más relevantes de esta marca:

- *Rostock MAX V2* es líder en el mercado mundial de impresoras 3D tipo delta debido a sus altas prestaciones y bajo costo. Entre sus características destacables están la estructura manufacturada por corte laser en MDF pintada, el gran volumen de impresión y el ingenioso concepto de deslizamiento de los carros de los brazos. Se vende en Kit o totalmente ensamblada. Se puede apreciar una en la figura 26.



FIGURA 25: IMPRESORA ROSTOCK MAX V2 DE SEEMECNC

Fuente: (SeeMeCNC, 2016)

- *Orion Delta* es otra impresora de la empresa SeeMeCNC. Puede considerarse como una versión “mini” de la Rostock Max V2. También es más comercial puesto que esta sólo se vende ensamblada. Se puede apreciar una en la figura 27.

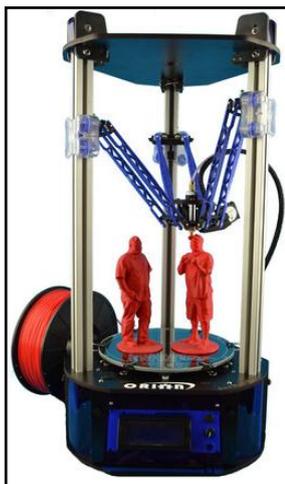


FIGURA 26: IMPRESORA ORION DELTA DE LA EMPRESA SEEMECNC

Fuente: (SeeMeCNC, 2016)

3.3.2. Atom 2.0

Puede ser considerada como una impresora 3D tipo delta de gama alta. Posee un excelente diseño industrial y puede competir fácilmente con impresoras del triple de su precio como la Z18 de MakerBot. Importantes características de esta impresora son el sistema modular y su gran precisión de capa. Se puede apreciar una Atom 2.0 en la figura 28.



FIGURA 27: IMPRESORA ATOM 2.0 DE ATOM3DP

Fuente: (Atom3dp, 2016)

La tabla 2 muestra una comparativa de estas impresoras. Es importante tomar en cuenta que cuando se comparan dos productos, ambos presentan ventajas y desventajas con respecto al otro dependiendo del caso específico de un usuario, por lo que no se puede pensar que se puede establecer una jerarquía catalogando a un producto mejor que otro. Por ejemplo, un usuario que prefiera la calidad al precio elegiría una Atom 2.0 mientras que uno que desee una impresora de bajo costo para comenzar en el mundo de la impresión 3D podría elegir una Rostock Max V2.

TABLA 2:

COMPARACIÓN DE ESPECIFICACIONES DE IMPRESORAS DELTA

Métrica		Rostock Max V2	Orion Delta	Atom 2.0
Volmen de impresión	Diámetro (mm)	280	150	220
	Altura (mm)	375	235	320
Resolución de capa (um)		125	125	50
Plataforma de construcción (material)		Vidrio	Vidrio	Vidrio
Número de extrusores		1	1	1
Diseño modular		No	No	Si
Cámara caliente (ambiente de impresión cerrado)		No	No	Se puede agregar
Cama caliente		Si	Si	Si
Conectividad USB		Si	Si	Si
Conectividad WI-FI		No	No	No
Conectividad Ethernet		No	No	No
Conectividad USB-Stick		No	No	No
Conectividad SD-Card		Si	Si	Si
Interfaz LCD		Si	Si	Si
Se vende en Kit o ensamblada		Ambas	Ensamblada	Kit
Precio de venta en Kit (dólares)		999	No	1699
Precio de venta ensamblada (dólares)		1599	1049	No
Fabricante (empresa)		SeeMeCNC	SeeMeCNC	Atom
Figura		26	27	28

Se realizará también a continuación una revisión de las impresoras cartesianas disponibles en el mercado. Si bien estas no son técnicamente iguales a una impresora delta, satisfacen la misma necesidad, además de ser ampliamente aceptadas por el público y son fabricadas por muchas más

empresas. Por lo que también representan la competencia directa para el producto que se está diseñando en el presente proyecto.

3.3.3. Serie de impresoras de Quinta Generación de la empresa Makerbot

- La Replicator Mini es una impresora 3D de MakerBot. Es la más pequeña de las tres impresoras diseñadas por esta empresa y que forman parte de la serie que sus creadores llaman “Quinta Generación”. Se puede apreciar una MakerBot Replicator Mini en la figura 29.



FIGURA 28: IMPRESORA REPLICATOR MINI DE MAKERBOT

Fuente: (MakerBot, 2016)

- *Replicator* de MakerBot posee excelentes especificaciones para su precio. Esta es la mediana de la línea de impresoras de quinta generación de MakerBot. Es importante recalcar el diseño modular del extrusor, que se compra por separado y se acopla magnéticamente a la impresora. Una MakerBot Replicator se muestra en la figura 30.



FIGURA 29: IMPRESORA REPLICATOR DE MAKERBOT

Fuente: (MakerBot, 2016)

- *MakerBot Z18* es la más grande de la línea de impresoras 3D de escritorio de quinta generación de MakerBot. Puede ser vista como una mini impresora 3D industrial debido a sus grandes prestaciones. Una Z18 se muestra en la figura 31.



FIGURA 30: IMPRESORA Z18 DE LA EMPRESA MAKERBOT

Fuente: (MakerBot, 2016)

3.3.4. Impresoras 3D de la empresa XYZPrinting

- *da Vinci Jr.* es una de las impresoras más competitivas en el mercado debido a su relación entre prestaciones y precio. Puede considerarse como una impresora 3D para el aprendizaje de esta tecnología por parte de los niños. Se muestra una *da Vinci Jr.* en la figura 32.

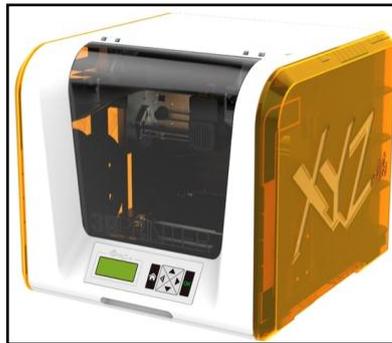


FIGURA 31: IMPRESORA DA VINCI JR. DE LA EMPRESA XYZ PRINTNG

Fuente: (XYZPrinting, 2016)

- *da Vinci 1.0*, *AiO* y *PRO* son 3 impresoras de muy bajo costo de la empresa XYZ Printing y prestaciones competitivas. Se muestran respectivamente en las figuras 33, 34 y 35. Estas impresoras muestran excelentes prestaciones a un precio muy bajo (lo que se puede esperar, ya que son fabricadas en China). Esto ha permitido que rápidamente se posicionen en el mercado mundial convirtiéndose en competidoras de marcas tan grandes como MakerBot y Stratacys.



FIGURA 32: IMPRESORA DA VINCI 1.0 DE XYZ PRINTNG

Fuente: (XYZPrinting, 2016)



FIGURA 33: IMPRESORA DA VINCI 1.0 AIO DE XYZ PRINTNG

Fuente: (XYZPrinting, 2016)



FIGURA 34: IMPRESORA DA VINCI 1.0 PRO DE XYZ PRINTNG

Fuente: (XYZPrinting, 2016)

- *da Vinci 2.0 Duo* incorpora 2 extrusores a un precio sumamente bajo (499 dólares). Es la impresora más competitiva del mercado. Una *da Vinci 2.0 Duo* se muestra en la figura 36.



FIGURA 35: IMPRESORA DA VINCI 2.0 DUO DE XYZ PRINTNG

Fuente: (XYZPrinting, 2016)

3.3.5. Serie de impresoras Cube de 3D Systems

Las impresoras de la serie Cube de 3D Systems son productos que ofrecen grandes prestaciones además de un excelente diseño industrial. Su debilidad radica en el precio, puesto que son mucho más caras, por ejemplo, que los productos de XYZ Printing que en la mayoría de casos las igualan en funcionalidad con un ahorro del 20 al 80% con respecto al costo. Sin embargo, son productos muy superiores, algo que tal vez el mercado no ha sabido valorar. Las figuras 37 a la 39 muestran las impresoras disponibles de esta marca.

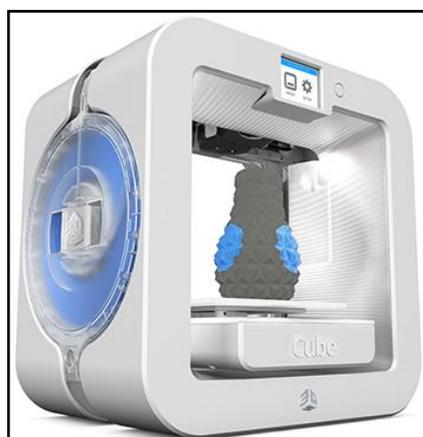


FIGURA 36: IMPRESORA CUBE DE 3D SYSTEMS

Fuente: (3DSYSTEMS, 2016)



FIGURA 37: IMPRESORA EKOCYCLE DE 3D SYSTEMS

Fuente: (3DSYSTEMS, 2016)



FIGURA 38: IMPRESORA CUBE PRO TRIO DE 3D SYSTEMS

Fuente: (3DSystems, 2016)

3.3.6. Serie de impresoras PrintBot de la empresa PrintBot

Las impresoras PrintBot son impresoras de alta resolución y bajo costo. Han sido catalogadas como las impresoras preferidas para el sector educativo debido a su bajo costo y prestaciones competitivas por la revista “Make magazine”. Las figuras 40 a la 41 muestran las 3 impresoras de esta empresa.



FIGURA 39: IMPRESORA PRINTBOT PLAY DE PRINTBOT

Fuente: (PrintBot, 2016)



FIGURA 40: IMPRESORA PRINTBOT SIMPLE DE PRINTBOT

Fuente: (PrintBot, 2016)

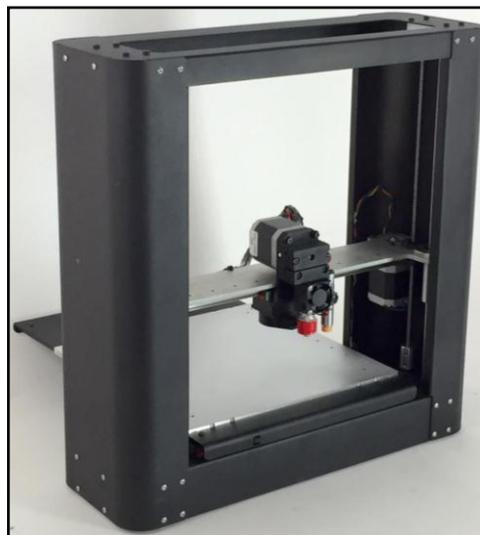


FIGURA 41: IMPRESORA PRINTBOT PLUS DE PRINTBOT

Fuente: (PrintBot, 2016)

3.3.7. Serie de impresoras Ultimaker de la empresa Ultimaker

La serie de impresoras Ultimaker es de altas prestaciones pero igualmente alto precio comparadas con su competencia. Junto a la empresa Makerbot, son consideradas pioneras en este mercado. Las figura 43 muestra los productos de esta empresa.

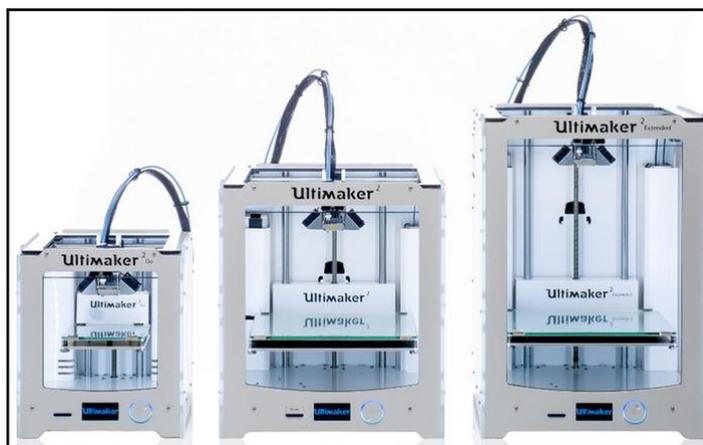


FIGURA 42: IMPRESORAS DE LA EMPRESA ULTIMAKER

Fuente: (Ultimaker, 2016)

3.3.8. Serie de impresoras Lulzbot de la empresa Lulzbot

Las impresoras Lulzbot son un emprendimiento reciente cuya estructura está basada en Prusa. Presentan excelentes características a un precio elevado. Por otra parte, su campaña de marketing ha sido tan bien llevada, y el funcionamiento de las máquinas tan bien cuidado que a día de hoy son líderes del mercado. Las impresoras Lulzbot se muestran en las figuras 44 y 45.



FIGURA 43: IMPRESORA LULZBOT MINI DE LULZBOT

Fuente: (LulzBot, 2016)



FIGURA 44: IMPRESORA LULZBOT TAZ 5 DE LULZBOT

Fuente: (LulzBot, 2016)

3.3.9. RoVa 3D

RoVa 3D es una impresora de alto desempeño desarrollada por la empresa ORD Solutions. Su propuesta de valor más notable es que posee 5 extrusores. Una impresora RoVa 3D se muestra en la figura 46.

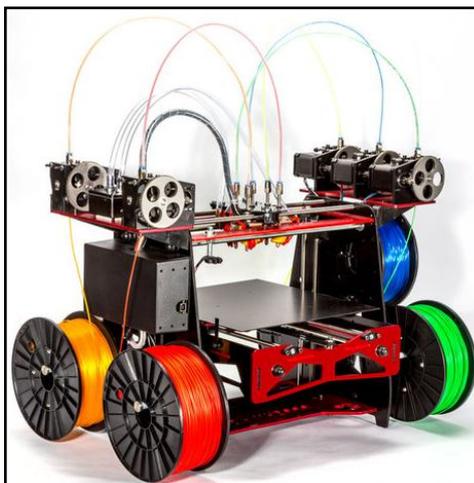


FIGURA 45: IMPRESORA ROVA 3D DE ORD SOLUTIONS

Fuente: (ORDSolutions, 2016)

3.3.10. All in one Zeus

Es una impresora desarrollada por la empresa AiO Robotics. Su característica principal es que posee un Scanner 3D incorporado. Una impresora All in One Zeus se muestra en la figura 47.

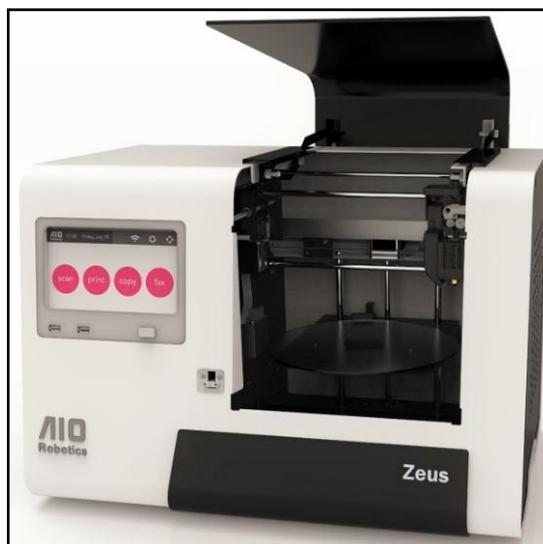


FIGURA 46: IMPRESORA ALL IN ONE ZEUS DE AIO OBOTICS

Fuente: (KickStarter, 2016)

Existe un gran espectro de productos más de la competencia para esta categoría. Sin embargo, se han analizado sólo los más significativos, por lo que a continuación se muestra en la tabla 3 y 4 los valores de las métricas relevantes para las especificaciones indicadas al inicio del capítulo.

TABLA 3:

COMPARACIÓN DE ESPECIFICACIONES DE IMPRESORAS CARTESIANAS-PARTE 1

Métrica	MakerBot Mini	MakerBot Replicator	MakerBot Z18	da Vinci Jr.	da Vinci 1.0	da Vinci 1.0 AiO	da Vinci 1.0 Pro	da Vinci 1.1 Plus	da Vinci 2,0 Duo	Cube	Ekocycle	Cube PRO	
Volmen de impresión	Largo (mm)	100	252	300	150	200	190	200	200	150	152,4	152,4	285,4
	Ancho (mm)	100	199	305	150	200	200	200	200	200	152,4	152,4	230
	Altura (mm)	125	150	457	150	200	200	200	200	200	152,4	152,4	270,4
Resolución de capa (um)	200	100	100	100	100	100	100	100	100	70	200	70	
Plataforma de construcción (material)	Acrílico	Vidrio	PC-ABS	No especificado	No especificado	No especificado	Aluminio	No especificado	No especificado	No especificado	No especificado	No especificado	
Número de extrusores	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	1	
Diseño modular	Si	Si	Si	No	No	No	No	No	No	No	No	No	
Cámara caliente (ambiente controlado o cerrado)	Si	No	Si, el ambiente es controlado	Si	Si	Si	Si	Si	Si	No	No	Si	
Cama caliente	No	No	No	No	Si	Si	Si	Si	Si	Si	No	Si	
Conectividad USB	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	
Conectividad WI-FI	Si	Si	Si	No	No	No	Si	Si	No	No	No	No	
Conectividad Ethernet	No	Si	Si	No	No	No	No	No	No	No	No	No	
Conectividad USB-Stick	No	Si	Si	No	No	No	No	No	No	Si	Si	Si	
Conectividad SD-Card	No	No	No	Si	No	No	No	No	No	No	No	No	
Interfaz LCD	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	
Se vende en Kit o ensamblada	Ensamblada	Ensamblada	Ensamblada	Ensamblada	Ensamblada	Ensamblada	Ensamblada	Ensamblada	Ensamblada	Ensamblada	Ensamblada	Ensamblada	
Precio de venta en Kit (dólares)	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	
Precio de venta ensamblada (dólares)	1375	2899	6499	349	499,95	799,95	699,95	699,95	499	1099	1249	2899	
Fabricante (empresa)	MakerBot	MakerBot	MakerBot	XYZ Printing	XYZ Printing	XYZ Printing	XYZ Printing	XYZ Printing	XYZ Printing	3D Systems	3D Systems	3D Systems	
Componentes de valor agregado	Cámara integrada	Cámara integrada	Cámara integrada	No	No	Sacnner 3D integrado	No	Cámara integrada	Doble extrusor	No	Es amigable con el medio ambiente	No	
Figura	29	30	31	3.2	33	34	35	36	36	37	38	39	

TABLA 4:

COMPARACIÓN DE ESPECIFICACIONES DE IMPRESORAS CARTESIANAS-PARTE 2

Métrica	Cube PRO TRIO	ProJet 1200	PrintBot Play	PrintBot Simple	PrintBot Plus	Ultimaker 2 Go	Ultimaker 2	Ultimaker 2 Extended	LulzBot Mini	LulzBot TAZ 5	RoVa 3D	All in One Zeus	
Volumen de impresión	Largo (mm)	285,4	43	100	150	250	120	223	223	152	298	284	203,2
	Ancho (mm)	230	27	100	150	250	120	223	223	152	275	301	152,4
	Altura (mm)	270,4	150	130	150	265	115	205	305	158	250	191	144,8
Resolución de capa (um)	70	30	50	50	50	40	40	40	50	75	25	80	
Plataforma de construcción (material)	No especificado	No especificado	Aluminio	Aluminio	Aluminio	Vidrio	Vidrio	Vidrio	No especificado	No especificado	Vidrio	No especificado	
Número de extrusores	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	5	1	
Diseño modular	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	
Cámara caliente (ambiente controlado o cerrado)	Si	Si	No	No	No	No	Si	Si	No	No	No	Si	
Cama caliente	Si	No	No	No	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	
Conectividad USB	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	
Conectividad Ethernet	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	
Conectividad SD-Card	No	No	No	No	No	Si	No	No	Si	Si	Si	No	
Interfaz LCD	Si	No	No	No	No	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	
Se vende en Kit o ensamblada	Ensamblada	Ensamblada	Ambas	Ambas	Ambas	Ensamblada	Ensamblada	Ensamblada	Ensamblada	Ensamblada	Ensamblada	Ensamblada	
Precio de venta en Kit (dólares)	No	No	399	599	1199	No	No	No	No	No	No	No	
Precio de venta ensamblada (dólares)	4499	4900	399	599	1199	1306,14	2071,24	2727,04	1250	2200	2200	2499	
Fabricante (empresa)	3D Systems	3D Systems	PrintBot	PrintBot	PrintBot	Ultimaker	Ultimaker	Ultimaker	LulzBot	LulzBot	ORD Solutions	AiO Robotics	
Componentes de valor agregado	No	Ultra definición de la impresión	No	No	No	No	No	No	No	Capacidad para aumentar 1 extrusor	No	Scanner integrado, sistema independiente	
Figura	39	No	40	41	42	43	43	43	44	45	46	47	

3.4. Conclusiones del proceso de benchmarking

- Se puede apreciar en la tabla 3 una diferenciación clara entre productos de una misma empresa principalmente por volúmenes de impresión, estos son pequeño, mediano y grande. Si bien algunas empresas como ORD Solutions y AiO Robotics ofertan un solo producto, el mismo se podría ubicar en la categoría de mediano.
- Desde el punto de vista de las especificaciones del producto mostradas anteriormente, el producto que se desarrollará entraría en la categoría de mediano y alto. Esta observación resulta interesante para establecer un precio de venta apropiado.
- El producto más competitivo del mercado en cuanto a especificaciones es la impresora da Vinci 2.0 Duo de la marca XYZPrinting que incorpora excelentes especificaciones a un precio de 499 dólares. Sin embargo, otros factores determinantes en la competitividad de un producto son el sistema de marketing y ventas, la imagen percibida de la marca y la calidad de los servicios que acompañan al producto.
- Como se puede ver en la mayoría de especificaciones de los productos, el mercado tiende rápidamente a *comoditizarse* por lo que los componentes de valor agregado se vuelven cada vez más imperativos para empresas que deseen ingresar al mercado en este momento.
- No existe todavía un producto con las especificaciones que se proponen anteriormente, por lo que se podría utilizar esto para mostrar una diferenciación y valor agregado al mercado.

CAPÍTULO IV

4. DISEÑO DEL PRODUCTO

4.1. Desarrollo de conceptos

Para el apartado a continuación, en el que se muestra la generación y selección de conceptos, se muestra el proceso solo para los componentes más relevantes del producto en cuanto a la obtención de las especificaciones meta propuestas en el alcance del proyecto. Por ejemplo, la elección entre utilizar guías de riel HIWIN o varillas lisas con rodamiento lineales para el sistema de locomoción tiene un impacto mayor en el éxito comercial del producto que elegir entre una longitud de 10 o 15 milímetros para un perno cualquiera que acople dos piezas del sistema estructural y que no vayan a estar sometidas a un esfuerzo relevante.

Para un producto como el que se está desarrollando se deben tomar miles de estas decisiones (Ulrich-Eppinger, 2013), por lo que usar un proceso formal de generación y selección de conceptos para cada una sale de los fines académicos de este trabajo.

En el siguiente apartado se muestra un proceso de presentación y selección de conceptos para los componentes más relevantes, en términos de éxito comercial, del producto.

4.1.1. Conceptos para el sistema de locomoción

El sistema de locomoción de una impresora 3D tipo delta puede ser dividido en varios subsistemas (se tomará como suposición que se utiliza un sistema de generación de movimiento lineal mediante motores a pasos NEMA 17 y correas, puesto que este es el más extendido y probablemente a futuro un estándar en la industria). Estos son:

- **Sistema de guiado lineal**

Es el encargado de generar a través de componentes mecánicos un movimiento lineal de los carros de locomoción. A su vez, debe impedir el movimiento de los mismos en cualquiera de los otros ejes de movimiento.

Concepto A: Sistema de guiado lineal con rodamientos simples de bolas que se muestra en la figura 48.

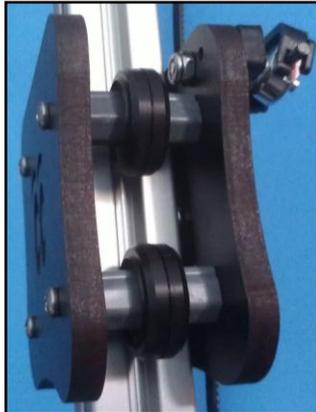


FIGURA 47: GUIADO LINEAL CON RODAMIENTOS SIMPLES DE BOLAS

Fuente: (SeeMe CNC, 2016)

Los componentes necesarios para implementar el concepto son:

- Perfil de aluminio en t para guiado lineal
- Rodamiento simple de bolas
- Cobertura plástica para rodamiento
- Separador normal
- Separador excéntrico
- Estructura del carro
- Conjunto perno-tuerca-arandela

Se ha seleccionado el perfil de aluminio en t que se muestra en la figura 49. Este tiene un costo aproximado de 30 ctv. por pulgada (SeeMe CNC, 2016).

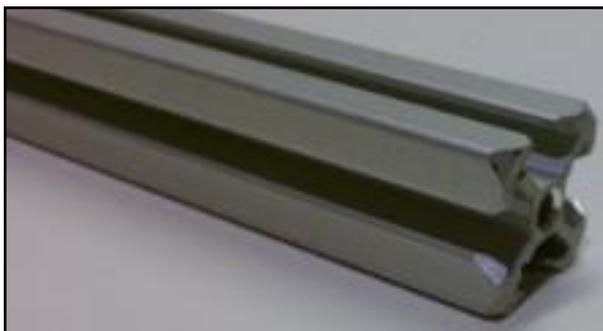


FIGURA 48: PERFIL DE ALUMINIO EN T DE LA EMPRESA SEEME CNC

Fuente: (SeeMe CNC, 2016)

Se ha seleccionado el rodamiento simple de bolas 608zz que tiene un costo de 1.25 dólares. Se muestra uno en la figura 50.



FIGURA 49: RODAMIENTO SIMPLE DE BOLAS 608 ZZ

Fuente: (SeeMe CNC, 2016)

Se ha seleccionado la cobertura plástica que se muestra en la figura 51. Esta parte no puede ser producida mediante impresión 3D debido a sus requerimientos de precisión dimensional y rugosidad. Es proporcionada por la empresa SeeMe CNC.



FIGURA 50: COBERTURA PLÁSTICA RODAMIENTO EMPRESA SEEME CNC

Fuente: (SeeMe CNC, 2016)

Se ha elegido producir el separador normal y el separador excéntrico mediante impresión 3D. Se las estimará con un costo de 1.5 dólares cada una suponiendo que para producirlas se solicita servicio de impresión.

Para la estructura del carro y el conjunto perno-tuerca-arandela se estiman los costos de igual manera en base a la experiencia adquirida en prototipos anteriores. A continuación se muestra en la tabla 5 los costos de componentes del conjunto.

TABLA 5:

ESTIMACIÓN DE COSTOS CONCEPTO A SISTEMA GUIADO LINEAL

Componentes	Precio unitario	Cantidad	Precio total
Perfil de aluminio t-slot 99,06 cm (39")	11,7	1	11,7
Rodamiento 608zz	1,25	4	5
Cobertura rodamiento	1	4	4
Separador normal	1,5	4	6
Separador excéntrico	1,5	4	6
Estructura del carro	5	1	5
Conjunto perno-tuerca-arandela	0,5	1	0,5
Precio de conjunto			38,2

Ventajas del concepto A:

- Bajo costo con respecto a otros conceptos.
- Reducido número de componentes.
- Se puede utilizar la ranura central del perfil para el cableado de componentes y las ranuras laterales como guía y transporte de correas.

Desventajas del concepto A:

- Dos componentes probablemente solo puedan adquirirse de la competencia, a saber, los perfiles de aluminio en t y las coberturas plásticas para los rodamientos. Estos componentes pueden producirse en el país mediante métodos de manufactura convencionales. Sin embargo, cada uno requeriría de una gran inversión inicial aún no justificada puesto

que no se poseen datos para estimar en este momento el volumen de producción o más importante aún, el volumen de venta.

- 3 componentes de proveedores extranjeros (perfil de aluminio en t, rodamiento 608zz y cobertura plástica), lo cual generará costos adicionales de transporte y trámites de aduanas.
- Difícil diseño de detalle debido al problema de asegurar que los rodamientos tengan el ajuste correcto de forma analítica, por lo que el costo de desarrollo aumentaría al requerir mayor experimentación.
- Este concepto ya ha sido utilizado por la empresa SeeMeCNC, lo que restaría diferenciación en el producto.
- Requiere un sistema de poleas con 3 rodamientos en cada riel por lo que aunque hasta este punto podría parecer más barato, puede que más adelante sea más costoso implementarlo.

Concepto B: Sistema de guiado lineal con rodamientos lineales que se muestra en la figura 52.



FIGURA 51: SISTEMA DE GUIADO CON RODAMIENTOS LINEALES

Fuente: (RepRap, RepRap, 2016)

Los componentes necesarios para implementar el concepto son:

- Varilla lisa
- Rodamiento lineal
- Estructura del carro
- Conjunto perno-tuerca-arandela

Se ha seleccionado una varilla lisa de acero inoxidable producida en China de 80 cm de largo cuyo costo unitario es de 16.14 dólares. Se puede apreciar un ejemplar en la figura 53.



FIGURA 52: VARILLA LISA DE ACERO INOXIDABLE

Fuente: (RepRap, RepRap, 2016)

Se ha seleccionado el rodamiento lineal LM8 UU producido en China que tiene un costo de 0.71 dólares. Se puede observar uno en la figura 54.



FIGURA 53: RODAMIENTO LINEAL LM8 UU

Fuente: (RepRap, RepRap, 2016)

Se tomarán las mismas aproximaciones de costo para el carro y el conjunto perno tuerca arandela. La tabla 6 muestra estas aproximaciones. estimación de costos del concepto B para el sistema de guiado lineal

TABLA 6:

ESTIMACIÓN DE COSTOS CONCEPTO B SISTEMA GUIADO LINEAL

Componentes	Precio Unitario	Cantidad	Precio total
Varilla lisa M8	16,14	2	32,28
Rodamiento lineal LM8 UU	0,71	2	1,42
Estructura del carro	5	1	5
Conjunto perno-tuerca-arandela	0,5	1	0,5
Precio del conjunto			39,20

Ventajas del concepto B:

- Bajo costo.
- Reducido número de componentes, menor a los del concepto A.
- Se puede lograr una mejor precisión que en el concepto A debido a que estos componentes fueron diseñados exclusivamente para la aplicación para la que se están utilizando.
- Fácil diseño de detalle e implementación debido a la gran cantidad de información que existe sobre este tipo de sistemas de locomoción lineales.

Desventajas del concepto B:

- Dos componentes de proveedores extranjeros (varillas lisas y rodamientos lineales), lo cual generará costos adicionales de transporte y trámites de aduanas. Específicamente, los rodamientos lineales y las varillas lisas.
- Requiere apoyo estructural adicional, por ejemplo un perfil de aluminio en T para sostener la estructura ya que si se utiliza las propias varillas como apoyo, éstas podrían verse deformadas por el peso propio de la parte superior del producto, lo que ocasionaría problemas en el sistema de locomoción.

Concepto C: Locomoción con guías lineales que se muestra en la figura 55.

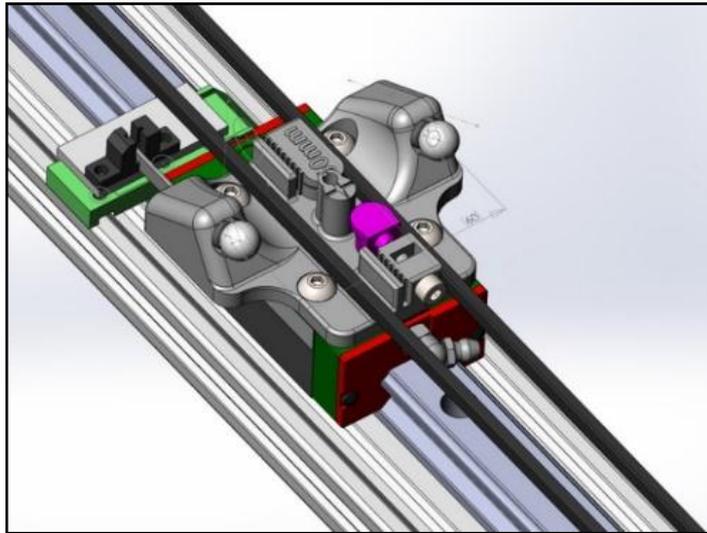


FIGURA 54: LOCOMOCIÓN CON GUÍAS LINEALES

Fuente: (RepRap, RepRap, 2016)

Los componentes necesarios para implementar el concepto son:

- Guía lineal o riel con carro deslizante
- Estructura del carro
- Conjunto perno-tuerca-arandela

Se utilizaría la guía lineal MGN12H de 800 mm de largo con un precio de 108.75 dólares que se muestra en la figura 56.



FIGURA 55: GUÍA LINEAL PARA IMPRESORAS 3D DE LA EMPRESA HIWIN

Fuente: (RepRap, RepRap, 2016)

Se tomarán las mismas aproximaciones de costo para el carro y el conjunto perno tuerca arandela. Estos costos se estiman en la tabla 7.

TABLA 7:

ESTIMACIÓN DE COSTOS CONCEPTO C PARA EL SISTEMA GUIADO LINEAL

Componentes	Precio Unitario	Cantidad	Precio total
Guía lineal HIWIN 800 mm	108,75	1	108,75
Estructura del carro	5	1	5
Conjunto perno-tuerca-arandela	0,5	2	1
Precio del conjunto			114,75

Ventajas del concepto C:

- Reducido número de componentes, menor a los del concepto A y B.
- Se puede lograr una excelente precisión de capa debido a que este componente fue diseñado exclusivamente para la aplicación para la que se están utilizando.
- Fácil diseño de detalle e implementación debido a la gran cantidad de información que existe sobre este tipo de sistemas de locomoción lineales.

Desventajas del concepto C:

- Alto costo.
- 1 componente con proveedor extranjero, lo cual generará costos adicionales de transporte y trámites de aduanas.
- Requiere apoyo estructural adicional, por ejemplo un perfil de aluminio en T para sostener la estructura ya que si se utiliza la riel como apoyo, está podría verse deformada por el peso propio de la parte superior del producto, lo que ocasionaría problemas en el sistema de locomoción e inestabilidad en la estructura.

Selección de concepto:

Para el proceso de selección de conceptos se utilizará la matriz de selección propuesta por Ulrich (Ulrich-Eppinger, 2013). Este es un proceso

estructurado de selección de conceptos que disminuye el factor subjetivo inherente en el desarrollo de cualquier producto.

Para utilizarlo, primero se definen las características clave que debe cumplir un concepto para ser considerado como bueno por el equipo (en este caso, el estudiante). Después, se asigna un valor porcentual a cada característica que expresa su peso a la hora de enfocarlo al cliente. Por último, se evalúa cada característica de cada concepto y de acuerdo a su peso porcentual se pondera cuál es el concepto ganador.

Variables a evaluar en los conceptos del sistema de guiado lineal:

- Costo (30%)
- Tiempo de obtención de componentes (20%)
- Facilidad de manufactura (15%)
- Facilidad de ensamblaje (15%)
- Facilidad de producir a futuro componentes extranjeros en el país (20%)

La tabla 8 muestra la matriz de selección de conceptos para el sistema de guiado lineal.

TABLA 8:

MATRIZ SELECCIÓN DE CONCEPTOS SISTEMA DE GUIADO LINEAL

Criterios de Selección	Peso	Concepto					
		A Sistema de guiado lineal con rodamientos de bolas		B Sistema de guiado lineal con rodamientos lineales (referencia)		C Sistema de guiado lineal con guías lineales	
		Calificación	Evaluación Ponderada	Calificación	Evaluación Ponderada	Calificación	Evaluación Ponderada
Costo	30%	4	1,2	3	0,9	1	0,3
Tiempo de obtención de componentes	20%	3	0,6	3	0,6	3	0,6
Facilidad de manufactura	15%	4	0,6	3	0,45	4	0,6
Facilidad de ensamblaje	15%	1	0,15	3	0,45	5	0,75
Facilidad de producir a futuro componentes extranjeros en el país	20%	1	0,2	3	0,6	1	0,2
			2,75		3		2,45
¿Continuar?			No		Desarrollar		No

Conclusión:

Se ha elegido en base a lo antes expuesto el concepto de guía mediante rodamientos lineales.

- **Sistema de ajuste de correas**

Concepto A: Polea de posición variable que se muestra en la figura 57.

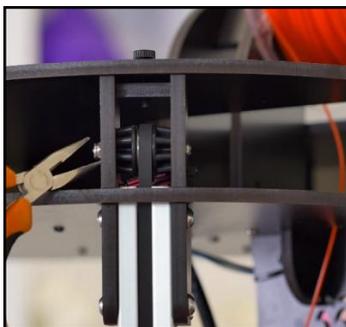


FIGURA 56: AJUSTE DE CORREA POR POLEA DE POSICIÓN VARIABLE

Fuente: (SeeMe CNC, 2016)

Los componentes necesarios para implementar el concepto son:

- Rodamiento simple de bolas
- Base superior con ranura de eje alargada
- Conjunto perno-tuerca-arandela
- Se ha seleccionado el rodamiento simple de bolas 624zz con un precio de 25 centavos. Se puede apreciar uno la figura 58.



FIGURA 57: RODAMIENTO 624ZZ

Fuente: (RepRap, RepRap, 2016)

La tabla 9 muestra la estimación de costos para el concepto A del sistema de ajuste de correas.

TABLA 9:

ESTIMACIÓN CONCEPTO A SISTEMA AJUSTE DE CORREAS

Componentes	Precio Unitario	Cantidad	Precio total
Rodamiento 624zz	0.25	1	0.25
Base superior con ranura de eje alargada	5	1	5
Conjunto perno-tuerca-arandela	0,5	1	0.5
Precio del conjunto			5.75

Ventajas del concepto A:

- Reducido número de componentes.
- Facilidad de ajuste de correa.
- Bajo costo.

Desventajas del concepto A:

- 1 componente con proveedor extranjero (rodamiento 624zz), lo cual generará costos adicionales de transporte y trámites de aduanas.
- Requiere desarmar buena parte de la máquina para ajustar la correa debido al diseño de cámara cerrada que se pretende para el producto.

Concepto B: Ajustador de posición variable en carro que se muestra en la figura 59.

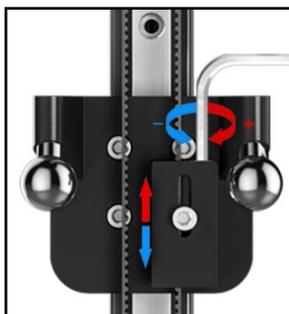


FIGURA 58: AJUSTADOR DE POSICIÓN VARIABLE EN CARRO

Fuente: (Atom3dp, 2016)

Los componentes necesarios para implementar el concepto son:

- Base de ajuste, es la pieza sobre la que se desliza el carro que ajusta la correa.
- Carro de ajuste, es la pieza cuyas ranuras retienen la correa en su lugar.
- Conjunto perno-tuerca-arandela.

La base de ajuste y el carro de ajuste se producirán mediante impresión 3D. En base a pruebas realizadas y la experiencia en uso de esta tecnología se les ha asignado un costo preliminar en la tabla 10.

TABLA 10:

ESTIMACIÓN CONCEPTO A SISTEMA AJUSTE DE CORREAS

Componentes	Precio Unitario	Cantidad	Precio total
Base de ajuste	1.5	1	1.5
Carro de ajuste	0.5	1	0.5
Conjunto perno-tuerca-arandela	0,5	1	0.5
Precio del conjunto			2.5

Ventajas del concepto B:

- Reducido número de componentes.
- Facilidad de ajuste de correa.
- Bajo costo.
- Todos los componentes pueden ser adquiridos en el país.
- No se necesita desarmar nada para acceder a este sistema y ajustar la correa.

Desventajas del concepto B:

Requiere piezas impresas en 3D por lo que en cierta medida el diseño pierde valor agregado si no se logra un aspecto profesional del producto debido a las mismas.

Concepto C: Tensor mediante resorte en correa que se muestra en la figura 60.



FIGURA 59: AJUSTADOR DE POSICIÓN VARIABLE EN CARRO

Fuente: (SeeMe CNC, 2016)

El componente necesario para implementar este concepto es el tensor de correa de metal. Se ha seleccionado el tensor de correa de metal de RepRap con un costo de 11 centavos. Por lo que este concepto se puede implementar en su totalidad con este mismo precio.

Ventajas del concepto C:

- Un solo componente.
- Bajo costo.

Desventajas del concepto C:

- El ajuste de correa es único y dependerá de la deformación del resorte. Por lo que no se garantiza un ajuste óptimo en la correa.
- El diseño final pierde valor estético debido a la implementación de este concepto.
- Para otorgar un mayor ajuste al sistema se debe quitar el tensor de correa y volver a ponerlo. Lo que disminuye la facilidad con la que el usuario puede ajustar la correa.
- Proveedor extranjero.

Selección de concepto:

Variables a evaluar en los conceptos del sistema de ajuste de correa:

- Costo (20%)
- Tiempo de obtención de componentes (10%)
- Facilidad de manufactura (10%)
- Facilidad de ensamblaje (10%)
- Facilidad de uso por el usuario (50%)

La tabla 11 muestra la matriz de selección de conceptos para este componente del producto.

TABLA 11:

MATRIZ SELECCIÓN DE CONCEPTOS SISTEMA DE GUIADO LINEAL

Criterios de Selección	Peso	A Polea de posición variable (referencia)		Concepto B Ajustador de posición variable en carro		C Tensor mediante resorte en correa	
		Calificación	Evaluación Ponderada	Calificación	Evaluación Ponderada	Calificación	Evaluación Ponderada
Costo	20%	3	0,6	4	0,8	5	1
Tiempo de obtención de componentes	10%	3	0,3	5	0,5	3	0,3
Facilidad de manufactura	10%	3	0,3	4	0,4	4	0,4
Facilidad de ensamblaje	10%	3	0,3	2	0,2	4	0,4
Facilidad de uso por el usuario	50%	3	1,5	5	2,5	2	1
			3		4,4		2,1
¿Continuar?			No		Desarrollar		No

Conclusión:

Se ha elegido en base a lo antes expuesto el concepto de ajustador de posición variable en carro.

- **Sistema de unión de rótula**

Concepto A: Uniones universales, una de estas se muestra en la figura 61.



FIGURA 60: AJUSTADOR DE POSICIÓN VARIABLE EN CARRO

Fuente: (SKF, 2016)

Para este concepto de pieza única se ha seleccionado una unión universal de SKF con un costo aproximado de 1,65 dólares. Debido a que se está tratando el análisis columna por columna, y que en cada una de ellas se utilizan 4 juntas universales, el costo de implementar el concepto es de 6,6 dólares.

Ventajas del concepto A:

- 1 solo componente.
- Bajo costo.
- Debido a que se ensambla a los brazos diagonales mediante pernos prisioneros, este sistema puede compensar imperfecciones pequeñas, pero frecuentes, en las longitudes de los brazos, teniendo un impacto positivo en la precisión de la máquina.

Desventajas del concepto A:

- No permite un des-ensamblaje rápido, por lo que un sistema modular es difícil de lograr mediante este concepto.

- Proveedor extranjero.

Concepto B: Cabezas articuladas de SKF, una de estas se muestra en la figura 62.



FIGURA 61: CABEZAS ARTICULADAS SKF

Fuente: (SKF, 2016)

Para este concepto de pieza única se ha seleccionado una cabeza articulada de SKF con un costo aproximado de 1,33 dólares. Debido a que se está tratando el análisis columna por columna, y que en cada una de ellas se utilizan 4 cabezas articuladas, el costo de implementar el concepto es de 5,33 dólares.

Ventajas del concepto B:

- 1 solo componente.
- Bajo costo.
- El agujero interior puede ser M3 o M4 por lo que no habría necesidad de un eje que no sea un perno con estas especificaciones y de la longitud apropiada.

Desventajas del concepto B:

- No permite un des-ensamblaje rápido, por lo que un sistema modular es difícil de lograr mediante este concepto.

- Proveedor extranjero.
- La mayoría de estas cabezas se venden con un acople macho, lo que impone restricciones de precisión muy precisas, y a veces difíciles de cumplir, a las longitudes de los brazos diagonales.

Concepto C: Unión de bola magnética que se muestra en la figura 63.



FIGURA 62: UNIÓN DE BOLA MAGNÉTICA

Fuente: (RepRap, RepRap, 2016)

Se necesitan 2 componentes para implementar este concepto:

- Imán cilíndrico con ranura esférica (dorado en figura 63)
- Esfera de metal con cola roscada.

El proveedor de este tipo de unión las fabrica en conjunto con un costo de 4,17 dólares cada una. Debido a que se está tratando el análisis columna por columna, y que en cada una de ellas se utilizan 4 juntas magnéticas, el costo de implementar el concepto es de 16,68 dólares.

Ventajas del concepto C:

- Permite una precisión dimensional mayor debido a que no hay espacios entre la esfera y el imán. Algo que si da en los anteriores conceptos pues es una propiedad intrínseca de las juntas de ese tipo.
- Permite un ensamblaje y des-ensamblaje rápido. Lo que es compatible con un sistema modular.

Desventajas del concepto C:

- Alto costo.
- Proveedor extranjero.
- La mayoría de estas cabezas se venden con un acople macho, lo que impone restricciones de precisión muy precisas, y a veces difíciles de cumplir, a las longitudes de los brazos diagonales del robot delta.

Selección de concepto:

Variables a evaluar en los conceptos del sistema de unión de rótula:

- Costo (20%)
- Compatible con sistema modular (50%)
- Facilidad de manufactura (10%)
- Facilidad de ensamblaje (10%)
- Facilidad de uso por el usuario (10%)

La tabla 12 muestra la matriz de selección de conceptos para este componente del producto.

TABLA 12:

MATRIZ SELECCIÓN DE CONCEPTOS SISTEMA DE GUIADO LINEAL

Criterios de Selección	Peso	Concepto					
		A Uniones universales		B Cabezas articuladas (referencia)		C Unión de bola magnética	
	Calificación	Evaluación Ponderada	Calificación	Evaluación Ponderada	Calificación	Evaluación Ponderada	
Costo	20%	2	0,4	3	0,6	1	0,1
Compatible con sistema modular	50%	1	0,5	1	0,5	3	1,5
Facilidad de manufactura	10%	5	0,5	3	0,3	2	0,2
Facilidad de ensamblaje	10%	1	0,1	3	0,3	5	0,5
Facilidad de uso por el usuario	10%	1	0,1	3	0,3	5	0,5
			1,6		2		2,8
¿Continuar?			No		No		Desarrollar

Conclusión:

Se ha elegido en base a lo antes expuesto el concepto de unión de bola magnética.

4.1.2. Conceptos para el sistema de extrusión

- **Mecanismo de extrusión**

Concepto A: Extrusor de Greg

El extrusor de Greg es un tipo de extrusor que utiliza piezas primordialmente manufacturadas por impresión 3D. Se muestra un ejemplar en la figura 64.



FIGURA 63: EXTRUSOR DE GREG

Fuente: (RepRap, RepRap, 2016)

Para implementar este concepto, se necesitan los siguientes componentes:

- Componentes por impresión 3D
- Conjunto perno-tuerca-arandela
- Muelles
- Motor NEMA 17

Una estimación aproximada de los costos de implementación de este concepto se muestra en la tabla 13:

TABLA 13:

ESTIMACIÓN CONCEPTO A SISTEMA DE EXTRUSIÓN

Componentes	Precio Unitario	Cantidad	Precio total
Componentes impresos en 3D	12	1	12
Conjunto perno-tuerca-arandela	1,5	1	1,5
Muelle	0,5	2	1
Motor NEMA 17	15	1	15
Precio del conjunto			29,5

Ventajas del concepto A:

- Incrementa el torque del mecanismo gracias al sistema de engrane reductor por impresión 3D que posee de forma más económica que obtener un motor NEMA 17 con una caja de reducción planetaria para implementar la misma función.
- Dependiendo del diseño, este puede adaptarse a varios tipos de filamentos para impresión 3D como NinjaFlex, ABS, incrustaciones de madera e incrustaciones de bronce.
- Bajo costo.

Desventajas del concepto A:

- Cualquier imperfección, que es común que se dé al obtener piezas por impresión 3D para un mecanismo de precisión, podría introducir histéresis en el sistema.
- Aumenta el número de componentes, lo que implica un aumento en el tiempo de ensamblaje de la máquina.

Concepto B: Heatcore unibody

El concepto de HeatCore unibody es similar al extrusor de Greg, con la diferencia que se implementa con menor número de componentes que el

mismo. Sin embargo, esto es posible, en parte gracias a que no posee una etapa de aumento de torque, por lo que en este variable es inferior al concepto A. La figura 65 muestra un ejemplo del mecanismo extrusor tipo Heatcore unibody.



FIGURA 64: EXTRUSOR HEATCORE UNIBODY

Fuente: (RepRap, RepRap, 2016)

Para implementar este concepto, se necesitan los siguientes componentes:

- Kit de extrusor Heatcore unibody manufacturado por fundición en aluminio.
- Motor NEMA 17

Una estimación aproximada de los costos de implementación de este concepto se muestra en la tabla 14:

TABLA 14:

ESTIMACIÓN CONCEPTO B SISTEMA DE EXTRUSIÓN

Componentes	Precio Unitario	Cantidad	Precio total
Kit Heatcore unibody	18	1	18
Motor NEMA 17	15	1	15
Precio del conjunto			33

Ventajas del concepto B:

- Bajo costo, ligeramente superior al concepto A.

- Bajo número de piezas, lo que implica una reducción en el tiempo de ensamblaje del producto.
- Mecanismo manufactura en aluminio fundido, lo que tiene un impacto en la estética del mecanismo y reducción en efecto de la histéresis que ingresa al sistema.

Desventajas del concepto B:

- Reducido torque con respecto al extrusor de Greg. Si en la etapa de experimentación se determina que es necesario aumentar el torque del mecanismo, para mantener el concepto sólo se podría reemplazar los motores normales NEMA 17 por otros más costosos con una caja de engranes planetarios.
- El proveedor del Kit Heatcore unibody es extranjero, por lo que aumenta el tiempo de obtención de componentes y los costos de transporte y manejo.

Concepto C: DDG (Double Drive Gear)

El concepto de DDG (Double Drive Gear) es similar al Heatcore unibody. Sin embargo, implementa una mejora en cuanto al torque debido a la implementación de un sistema de doble engrane extrusor, como el que se muestra en la figura 66.



FIGURA 65: EXTRUSOR DDG (DOUBLE DRIVE GEAR)

Fuente: (RepRap, RepRap, 2016)

Para implementar este concepto, se necesitan los siguientes componentes:

- Kit de extrusor DDG original de BQ
- Motor NEMA 17

Pese a una búsqueda intensa de proveedores del componente en Kit del extrusor DDG, no se pudo localizar a uno. La conclusión fue que este es una innovación relativamente nueva y propia de la gran manufacturera de impresión 3D BQ (DIWO, 2016). Por lo tanto, pese a las ventajas potenciales que implicaría implementar este concepto, ha tenido que ser eliminado debido a que al momento de realización de este documento, es inviable.

Por otro lado, no se descarta que en un futuro se pueda introducir esta innovación en el diseño, por lo que se considera útil presentarlo en este apartado como una mejora a futuro.

Selección de concepto:

Variables a evaluar en los conceptos del mecanismo extrusor:

- Costo (20%)
- Número de componentes extranjeros (10%)
- Facilidad de manufactura (10%)
- Facilidad de ensamblaje (40%)
- Facilidad de uso por el usuario (20%)

La tabla 15 muestra la matriz de selección de conceptos para este componente del producto.

TABLA 15:

MATRIZ SELECCIÓN CONCEPTOS SISTEMA DE EXTRUSIÓN

Criterios de Selección	Concepto				
		A Extrusor de Greg		B Heatcore (referencia)	Unibody
	Peso	Calificación	Evaluación Ponderada	Calificación	Evaluación Ponderada
Costo	20%	4	0,8	3	0,6
Número de componentes extranjeros	10%	4	0,4	3	0,3
Facilidad de manufactura	10%	1	0,1	3	0,3
Facilidad de ensamble	40%	2	0,8	3	1,2
Facilidad de uso por el usuario	20%	1	0,2	3	0,6
			2,3		3
¿Continuar?			No		Desarrollar

- **Conclusión:**

Se ha elegido en base a lo antes expuesto el concepto de extrusor tipo HeatCore Unibody.

- **Nivelación automática**

Concepto A: Sensor switch resistivo

El concepto de sensor de autonivelación mediante switch resistivo es el más simple de los que se muestran en este apartado. Consta de un mecanismo que se mantiene en su posición mediante un muelle conectado a un switch común. La altura del mismo con respecto al nozzle se puede nivelar mediante el perno y el muelle, de manera que cuando se desee nivelar la cama, se debe situar la punta del mecanismo una distancia conocida por debajo del extrusor. Esto permite que cuando el usuario realice la nivelación automática, el cabezal baje hasta que la punta del mecanismo y la cama se topen, activando así el switch, por lo que se puede conocer las desviaciones de posición y curvatura de la cama caliente para posteriormente compensarlas mediante software. La figura 67 muestra un ejemplo de este tipo de sensor.

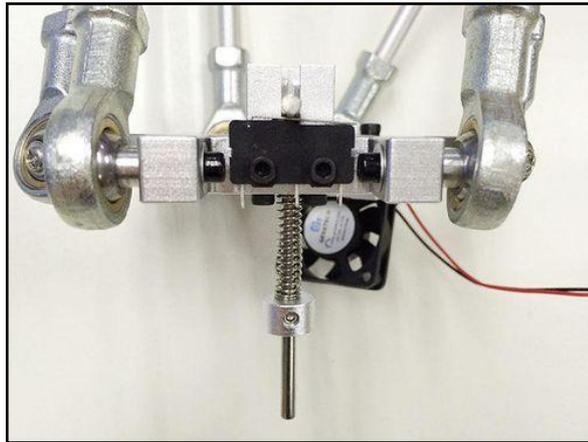


FIGURA 66: SENSOR SWITCH RESISTIVO

Fuente: (RepRap, RepRap, 2016)

Para implementar este concepto, se necesita un switch activado por mecanismo de muelle cuyo costo aproximado es de 4.99 dólares.

Ventajas del concepto A:

- Funcionamiento simple.
- Bajo peso.
- Bajo costo.
- Funciona con cualquier tipo de superficie.

Desventajas del concepto A:

- Al ser un sensor de activación mecánica la precisión del mismo es bastante pobre por lo que para obtener medidas más confiables se debe realizar varias pruebas en el mismo punto. Esto aumenta el tiempo para comenzar cada impresión, por lo que la calidad del producto baja.
- Cada vez que se desee llevar a cabo el proceso de nivelación se debe posicionar correctamente el mecanismo de muelle. Por esta razón, el proceso deja de ser completamente automático y empieza a ser tan solo semi-automático.

Concepto B: Sensor capacitivo

El concepto de sensor de autonivelación mediante un sensor capacitivo es más sofisticado que el anteriormente evaluado puesto que no requiere un posicionamiento de la punta del sensor cada vez que se desee llevar a cabo el proceso de autonivelación. Sino que esta es posicionada idealmente una única vez en toda la vida del producto. Un ejemplar de este tipo de sensor se muestra en la figura 68.

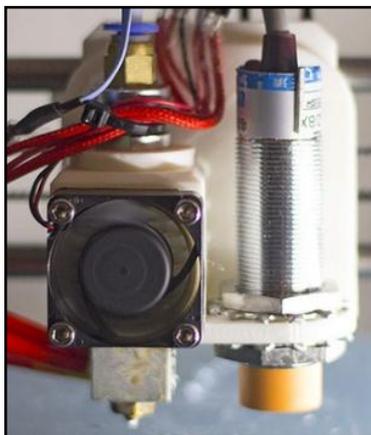


FIGURA 67: SENSOR CAPACITIVO

Fuente: (RepRap, RepRap, 2016)

Para implementar este concepto se necesita el sensor LJC18A3-B-Z/BX que tiene un costo aproximado de 6,74 dólares.

Ventajas del concepto B:

- Funcionamiento simple.
- Bajo costo.
- Funciona con cualquier tipo de superficie.

Desventajas del concepto B:

- Peso considerable, lo que tendrá un impacto negativo final sobre la velocidad de impresión de la máquina.

- Es afectado no solo por la distancia, puesto que otras variables como la humedad y la temperatura pueden influir en las medidas, dando lugar a imprecisiones indeseables.

Concepto C: Sensor inductivo

El concepto de sensor de autonivelación mediante un sensor Inductivo es, aplicando una mirada rápida, el más idóneo para la aplicación que se desea implementar. Un ejemplar de este tipo de sensor se muestra en la figura 69.

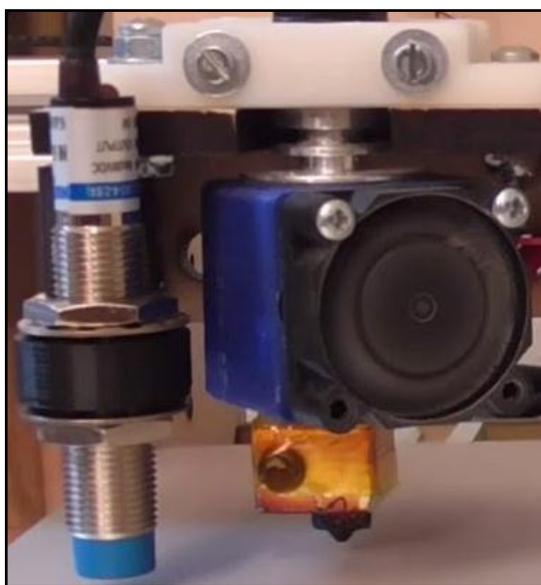


FIGURA 68: SENSOR INDUCTIVO

Fuente: (RepRap, RepRap, 2016)

Para implementar este concepto se necesita el sensor LJ12A3-4-Z/BX que tiene un costo aproximado de 5,92 dólares.

Ventajas del concepto C:

- Funcionamiento simple.
- Bajo costo.
- Es independiente de variables como la temperatura y la humedad.
- Es confiable y preciso en una sola medición. No se necesita repeticiones.

Desventajas del concepto C:

- Peso considerable, lo que tendrá un impacto negativo final sobre la velocidad de impresión de la máquina.
- Para implementar este concepto es obligatorio utilizar una cama caliente de aluminio.

Selección de concepto:

Variables a evaluar en los conceptos del sistema de nivelación automática:

- Costo (25%)
- Precisión y confiabilidad de la medida (50%)
- Facilidad de uso por el usuario (25%)

La tabla 16 muestra la matriz de selección de conceptos para este componente del producto.

TABLA 16:

MATRIZ SELECCIÓN CONCEPTOS AUTONIVELACIÓN

Criterios de Selección	Peso	Concepto					
		A Sensor switch resistivo (referencia)		B Sensor Capacitivo		C Sensor Inductivo	
		Calificación	Evaluación Ponderada	Calificación	Evaluación Ponderada	Calificación	Evaluación Ponderada
Costo	25%	3	0,75	2	0,5	2	0,5
Precisión y confiabilidad de la medida	50%	3	1,5	3	1,5	5	2,5
Facilidad de uso por el usuario	25%	3	0,75	4	1	4	1
			3		3		4
¿Continuar?			No		No		Desarrollar

- **Conclusión:**

Se ha elegido en base a lo antes expuesto el concepto de autonivelación por sensor inductivo.

- **Fusores**

Concepto A: Fusor completo de metal (All Metal)

Un fusor, como el que se muestra en la figura 70, cuyos componentes han sido manufacturados completamente en metal (mayoritariamente aluminio), permite alcanzar temperaturas de fundición altas, por lo que puede ser utilizado con un gran espectro de filamentos. Por esta razón, es el indicado para impresoras en las que se planea una capacidad multi-material como la que se pretende en este proyecto.



FIGURA 69: FUSOR COMPLETO DE METAL (FUSOR ALL METAL)

Fuente: (E3DOnline, 2016)

Para implementar este concepto se necesitan dos fusores E3D V6 de 10,44 dólares cada uno. Por lo que el costo final de implementación de este concepto sería de 20,88 dólares.

Ventajas del concepto A:

- Bajo costo.

- Diseño modular, acepta diferentes tamaños de boquillas.
- Puede alcanzar temperaturas de impresión altas (275 grados centígrados aproximadamente).

Desventajas del concepto A:

- Requiere diseñar una forma de nivelar las 2 boquillas de los dos fusores a la misma altura.
- Peso considerable para un cabezal de impresión 3D delta, por lo que esto tendrá una repercusión final negativa en la velocidad de impresión del producto.

Concepto B: Fusor de PTFE

El fusor de teflón (PTFE) es un fusor de menor peso gracias a que gran parte de su volumen está hecho en teflón. El objetivo de esto es lograr que la punta de metal se mantenga a una temperatura alta para la impresión, mientras que el cuerpo se mantenga a una temperatura baja que mantenga el filamento en estado sólido para poder ser extruido mediante el mecanismo visto anteriormente. Un ejemplo de este tipo de fusor se muestra en la figura 71.



FIGURA 70: FUSOR DE PTFE

Fuente: (RepRap, RepRap, 2016)

Para implementar este concepto se necesitan dos fusores MK V de 14,12 dólares cada uno. Por lo que el costo final de implementación de este concepto sería de 28,24 dólares.

Ventajas del concepto B:

- Bajo peso.
- Pequeño volumen.
- Una consecuencia del bajo peso de los fusores sería una velocidad de impresión mayor.

Desventajas del concepto B:

- Requiere diseñar una forma de nivelar las 2 boquillas de los dos fusores a la misma altura.
- No puede alcanzar temperaturas de impresión suficientemente altas como para permitir un espectro de materiales aceptados similar al que se alcanzaría con un fusor completamente de metal.

Concepto C: Fusor doble

El fusor doble de construcción completa en metal que se muestra en la figura 72 viene integrado con un método para nivelar a la misma altura ambas boquillas, además de todas las ventajas que un cuerpo completo de metal representa y que se han expuesto anteriormente. Por otra parte, disminuye el peso en comparación con dos fusores de metal ya que un único ventilador, en vez de 2, mantiene baja la temperatura del cuerpo de ambos fusores.

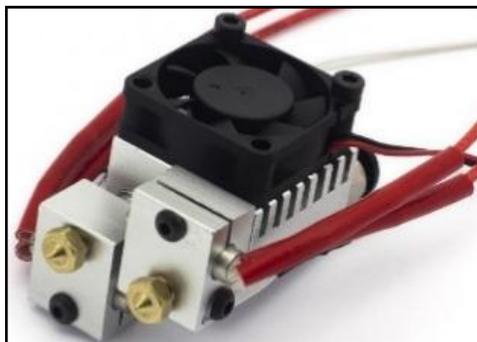


FIGURA 71: FUSOR DOBLE E3D CHIMERA

Fuente: (E3DOnline, 2016)

Para implementar este concepto se necesita un fusor E3D Chimera de 47,99 dólares.

Ventajas del concepto C:

- Bajo peso en comparación con dos extrusores de construcción completa en metal.
- Pequeño volumen.
- Puede alcanzar temperaturas de impresión altas (275 grados centígrados aproximadamente).
- Una consecuencia del bajo peso de los fusores sería una velocidad de impresión mayor.
- Incorpora sistema de nivelación de las boquillas de los extrusores.

Desventajas del concepto C: Alto costo.

Selección de concepto:

Variables a evaluar en los conceptos del sistema de nivelación automática:

- Costo (40%)
- Facilidad de nivelación de boquillas (30%)
- Peso (30%)

La tabla 17 muestra la matriz de selección de conceptos para este componente del producto.

TABLA 17:

MATRIZ SELECCIÓN CONCEPTOS FUSOR

Criterios de Selección	Peso	Concepto					
		A Fusor completo de metal	B Fusor de PTFE (referencia)	C Fusor doble	Evaluación Ponderada	Evaluación Ponderada	Evaluación Ponderada
Costo	40%	4	1,6	3	1,2	1	0,4
Facilidad de nivelación de boquillas	30%	3	0,9	3	0,9	5	1,5
Peso	30%	3	0,9	3	0,9	4	1,2
¿Continuar ?			3,4		3		3,1
			Desarrollar		No		No

Conclusión:

Se ha elegido en base a lo antes expuesto el concepto de fusor completo de metal.

- **Mantenedor de filamento**

Concepto A: Varilla simple

El mantenedor de filamento por varilla simple, como su nombre lo indica, consta de una varilla (tradicionalmente de metal) y de diámetro menor al agujero interno de la bobina de filamento que atraviesa la misma para después ser suspendida en 2 puntos. Es la solución más simple. Un ejemplar de este tipo de mantenedor de filamento se muestra en la figura 73.

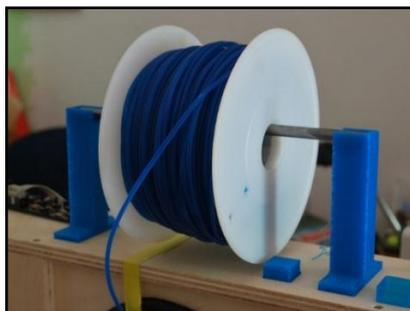


FIGURA 72: MANTENEDOR DE FILAMENTO DE VARILLA SIMPLE

Fuente: (RepRap, RepRap, 2016)

Para implementar este concepto se necesitan los siguientes componentes:

- Varilla de acero.
- Puntos de apoyo para la varilla.
- Conjunto perno-tuerca-arandela.

Una estimación de los costos del concepto se muestra en la tabla 18.

TABLA 18:

COSTOS CONCEPTO A MANTENEDOR DE FILAMENTO

Componentes	Precio Unitario	Cantidad	Precio total
Varilla de acero de 30 cm de largo	2	1	2
Puntos de apoyo manufacturados por corte láser	10	1	10
Conjunto perno-tuerca-arandela	1	1	1
Precio del conjunto			13

Ventajas del concepto A:

- Diseño simple.
- Universal, sirve virtualmente para utilizar cualquier tipo de rollo.

Desventajas del concepto A:

El movimiento del rollo nos es limitado al giro único que debería idealmente poseer alrededor de su eje. Por esta razón, velocidades y aceleraciones altas del extrusor podrían generar movimiento bruscos de la bobina. Teniendo en cuenta que esta pesa alrededor de 1 kg esto podría generar vibraciones indeseadas en la máquina dependiendo de la ubicación del mantenedor de filamento.

Concepto B: Mantenedor mediante rodamientos tangenciales

El mantenedor de filamento mediante rodamientos tangenciales implica un sistema de apoyo de 4 puntos para el filamento. Estos suelen ser rodamientos que facilitan el giro de la bobina mediante la disminución de la fricción de entre los puntos de apoyo y la bobina. Un ejemplar de este tipo de mantenedor de filamento se muestra en la figura 74.



FIGURA 73: MANTENEDOR DE FILAMENTO RODAMIENTOS TANGENCIALES

Fuente: (RepRap, RepRap, 2016)

Para implementar este concepto se necesitan los siguientes componentes:

- Cuerpo de mantenedor por impresión 3D.
- Rodamientos simples de bolas.
- Conjunto perno-tuerca-arandela.

Una estimación de los costos del concepto se muestra en la tabla 19.

TABLA 19:

COSTOS CONCEPTO B MANTENEDOR DE FILAMENTO

Componentes	Precio Unitario	Cantidad	Precio total
Cuerpo de mantenedor por impresión 3D	10	1	10
Rodamiento simple de bolas	0,30	4	1,2
Conjunto perno-tuerca-arandela	1,5	1	1,5
Precio del conjunto			12,7

Ventajas del concepto B:

- Universal, sirve virtualmente para utilizar cualquier tipo de rollo.
- Bajo costo.

- Con un diseño apropiado para la implementación del concepto es posible anular el movimiento del rollo en todos los ejes menos en el indicado para alimentar a la máquina.

Desventajas del concepto B:

- Debe adaptarse a la parte exterior de los rodamientos mantenedores axiales para los bordes de la bobina para asegurarse que el mismo no pueda moverse en el eje axial.
- Alto peso.

Concepto C: Mantenedor de eje de radio y longitud variable

El mantenedor de filamento de eje de radio y longitud variable es un concepto más sofisticado que los anteriormente citados desarrollado por el autor de este documento. Consta de dos mecanismos. Uno permite un radio variable del eje del mantenedor, mientras que el otro permite una longitud variable del mismo. Esto implica que la impresora puede aceptar una variación considerable en las medidas de la bobina que se utilice, lo que significa a su vez mayor versatilidad para el usuario en el uso de la misma. Un ejemplar de este tipo de mantenedor se muestra en la figura 4.1.2I. Como se puede apreciar, las aletas tangenciales activadas por resortes axiales permiten un radio variable del eje, mientras que las aletas axiales activadas por resortes angulares permiten la longitud variable del mecanismo.

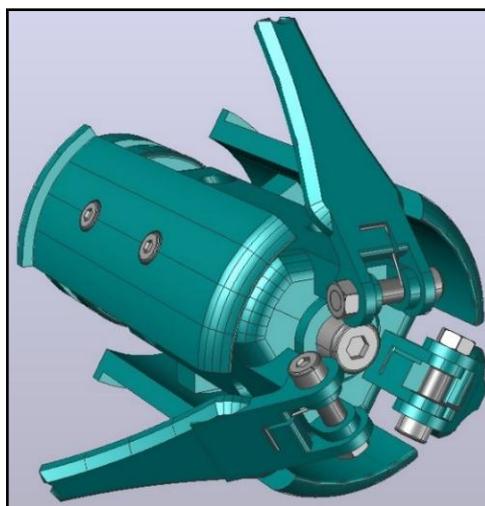


FIGURA 74: MANTENEDOR DE FILAMENTO EJE DE RADIO Y LONGITUD VARIABLE

Para implementar este concepto se necesitan los siguientes componentes:

- Piezas de mantenedor por impresión 3D.
- Rodamientos simples de bolas.
- Resortes axiales.
- Resortes angulares.
- Conjunto perno-tuerca-arandela.

Una estimación de los costos del concepto se muestra en la tabla 20.

TABLA 20:

COSTOS CONCEPTO C MANTENEDOR DE FILAMENTO

Componentes	Precio Unitario	Cantidad	Precio total
Piezas de mantenedor por impresión 3D	15	1	15
Rodamiento simple de bolas	0,30	2	0,6
Resorte axial	0,8	3	2,4
Resorte angular	0,8	3	2,4
Conjunto perno-tuerca-arandela	2,5	1	2,5
Precio del conjunto			22,9

Ventajas del concepto C:

- Universal, sirve virtualmente para utilizar varios tipos de rollo.
- Fija el rollo de la manera más rígida posible debido a los muelles incorporados en los mecanismos.
- Estético, inspira orgullo en el usuario.

Desventajas del concepto C:

- Alto costo.
- Elevado número de piezas, lo que incrementa los costos de ensamblaje y el tiempo de construcción del producto.

Selección de concepto:**Variables a evaluar en los conceptos del sistema de nivelación automática:**

- Costo (25%)
- Universalidad (50%)
- Limitación del movimiento únicamente al eje axial (25%)

La tabla 21 muestra la matriz de selección de conceptos para este componente del producto.

TABLA 21:

MATRIZ SELECCIÓN CONCEPTOS MANTENEDOR DE FILAMENTO

Criterios de Selección	Peso	Concepto					
		A Varilla (referencia)	simple	B Por rodamientos tangenciales	C Eje de radio y longitud variable		
		Calificación	Evaluación Ponderada	Calificación	Evaluación Ponderada	Calificación	Evaluación Ponderada
Costo	25%	3	0,75	3	0,75	2	0,5
Universalidad	50%	3	1,5	3	1,5	4	2
Limitación del movimiento únicamente al eje axial	25%	3	0,75	4	1	5	1,25
			3		3,25		3,75
¿Continuar?			No		No		Desarrollar

Conclusión:

Se ha elegido en base a lo antes expuesto el concepto de mantenedor de filamento de eje de radio y longitud variable.

4.1.3. Conceptos para el sistema estructural

- Estructura del producto

Concepto A: Estructura Rostock

Rostock, es un modelo de impresora 3D tipo delta diseñada por primera vez por Johann C. Rocholl en 2012. Utiliza varillas lisas de acero

para las rieles del sistema de locomoción, además de planchas de madera para las bases inferior y superior del robot. Otras 2 paredes de madera acopladas a los lados sirven de apoyo estructural al conjunto. Este tipo de estructura se muestra en la figura 76.

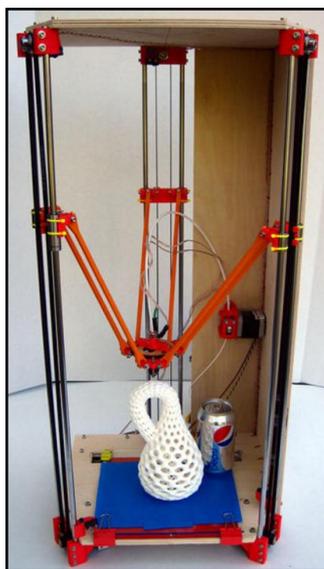


FIGURA 75: ESTRUCTURA TIPO ROSTOCK PARA IMPRESORA DELTA

Fuente: (RepRap, RepRap, 2016)

Para implementar este concepto se necesitan los siguientes componentes:

- Varillas lisas de acero
- Planchas de madera
- Acoplamientos de varillas a bases inferior y superior
- Conjunto perno-tuerca-arandela

Una estimación de los costos del concepto se muestra en la tabla 22.

TABLA 22:

COSTOS CONCEPTO A SISTEMA ESTRUCTURAL

Componentes	Precio Unitario	Cantidad	Precio total
Varillas lisas de acero de 90 cm	20	6	120
Planchas de madera manufacturadas en láser	40	1	40
Acoplamientos	15	1	15
Conjunto perno-tuerca-arandela	5	1	5
Precio del conjunto			180

Ventajas del concepto A:

- Componentes fáciles de adquirir y la mayoría son proveedores nacionales, sólo se deben importar las varillas lisas.
- Fácil construcción.
- Fácil diseño de detalle.
- Se puede acoplar fácilmente una cubierta para el ambiente de impresión gracias a las planchas de madera.

Desventajas del concepto A: Estructura poco rígida.

Concepto B: Estructura Kossel

Kossel, es un modelo de impresora 3D tipo delta diseñada por primera vez por Johann C. Rocholl en 2013. Utiliza perfiles de aluminio en t acoplados en las esquinas por partes de impresión 3D y tuercas especiales tipo t. Un ejemplo de estructura Kossel se puede apreciar en la figura 77.



FIGURA 76: ESTRUCTURA TIPO KOSSSEL PARA IMPRESORA DELTA

Fuente: (RepRap, RepRap, 2016)

Para implementar este concepto se necesitan los siguientes componentes:

- Perfiles de aluminio en t
- Acoplamientos de esquinas impresos en 3D
- Tuercas especiales tipo t (partes impresas en 3D que se adaptan a tuercas convencionales)
- Conjunto perno-tuerca-arandela

Una estimación de los costos del concepto se muestra en la tabla 23.

TABLA 23:

COSTOS CONCEPTO B SISTEMA ESTRUCTURAL

Componentes	Precio Unitario	Cantidad	Precio total
Perfiles de aluminio en t	10/m	8.1m	81
Acoplamientos de esquinas impresos en 3D	5	9	45
Tuerca tipo t	0,7	54	37,8
Conjunto perno-tuerca-arandela	5	1	5
Precio del conjunto			168,8

Ventajas del concepto B:

- Componentes que se pueden producir y adquirir en Ecuador.
- Fácil construcción.
- Fácil diseño de detalle.
- Bajo costo.
- Estructura rígida.

Desventajas del concepto B:

Requiere una inversión inicial fuerte, ya que los perfiles de aluminio en t sólo son producidos en tiras de 100 metros con un costo de aproximadamente 500 dólares.

Selección de concepto:

Variables a evaluar en los conceptos del mecanismo extrusor:

- Costo (25%)
- Facilidad de realización de prototipo funcional (50%)
- Rigidez (25%)

La tabla 24 muestra la matriz de selección de conceptos para este componente del producto.

TABLA 24:

MATRIZ SELECCIÓN CONCEPTOS MANTENEDOR DE FILAMENTO

Criterios de Selección	de	Concepto			
		A Estructura Rostock (referencia)		B Estructura Kossel	
	Peso	Calificación	Evaluación Ponderada	Calificación	Evaluación Ponderada
Costo	25%	3	0,75	4	1
Facilidad de realización de prototipo funcional	50%	3	1,5	1	0,5
Rigidez	25%	3	0,75	4	1
			3		2
¿Continuar?			Desarrollar		No

Conclusión:

Se ha elegido en base a lo antes expuesto el concepto de estructura tipo Rostock.

- **Protección contra corrientes de aire**

Concepto A: Cámara de impresión abierta

Una impresora 3D que posee una cámara de impresión abierta se muestra en la figura 78. Es notable recalcar que a la mayoría de usuarios les gusta ver cómo funciona una impresora en acción y cómo las partes móviles

se mueven dentro del volumen de impresión. Un argumento rápido para sustentar esta idea es la popularidad de las impresoras 3D de cámara abierta pese a que funcionalmente es mejor una de cámara cerrada.



FIGURA 77: IMPRESORA DELTA CON CÁMARA DE IMPRESIÓN ABIERTA

Fuente: (RepRap, RepRap, 2016)

Para implementar este concepto no se necesitan componentes.

Ventajas del concepto A:

- Costo nulo.
- Aspecto de diseño apreciado por el mercado.

Desventajas del concepto A:

- Surgen errores de impresión para piezas de gran tamaño.
- El lugar donde se encuentra la máquina debe permanecer cerrado durante la impresión.

Concepto B: Cámara de impresión cerrada

Una impresora 3D que posee una cámara de impresión cerrada se muestra en la figura 4.1.3d. Esto permite bloquear corrientes de aire indeseables que afectan notablemente la calidad de impresión debido a la

generación de warping. También permite alejar al usuario de partes calientes y móviles, esto es especialmente útil si la impresora se encuentra en un ambiente educativo.

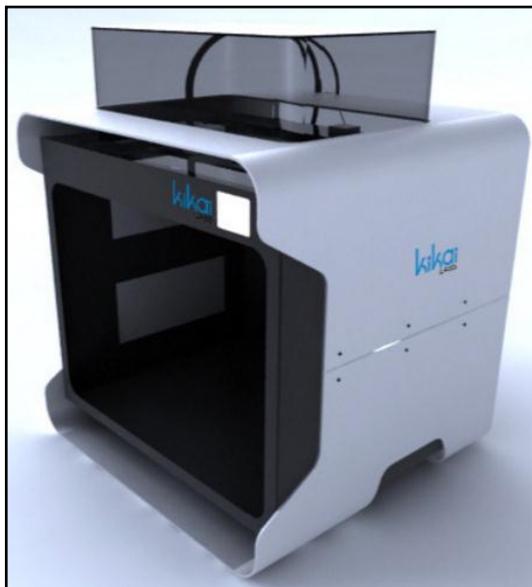


FIGURA 78: IMPRESORA 3D CON CÁMARA DE IMPRESIÓN CERRADA

Fuente: (KikaiLabs, 2016)

Para implementar este concepto se necesitan los siguientes componentes:

- Partes MDF manufacturadas en corte láser
- Partes Acrílico manufacturadas en corte láser
- Conjunto perno-tuerca-arandela

Una estimación de los costos del concepto se muestra en la tabla 25.

TABLA 25:

COSTOS CONCEPTO B CÁMARA CERRADA

Componentes	Precio Unitario	Cantidad	Precio total
MDF	100	1	100
Acrílico	100	1	100
Conjunto perno-tuerca-arandela	10	1	10
Precio del conjunto			210

Ventajas del concepto B:

- Calidad de impresión asegurada, al menos a nivel de hardware.
- Se puede imprimir en ambientes abiertos y con viento, puesto que la cámara de impresión está protegida.
- Si se mantiene un buen diseño industrial, puede resultar en un factor diferenciador y de gran valor agregado para el producto.
- Permite incluso implementar mejoras a futuro en el diseño controlando la temperatura de la cámara de impresión, lo que da un resultado aún mejor.

Desventajas del concepto B: Alto costo

Selección de concepto:

Variables a evaluar en los conceptos del mecanismo extrusor:

- Costo (25%)
- Funcionalidad (50%)
- Impacto visual (25%)

La tabla 26 muestra la matriz de selección de conceptos para este componente del producto.

TABLA 26:

MATRIZ SELECCIÓN CONCEPTOS CÁMARA CERRADA

Criterios de Selección	Concepto A Cámara abierta (referencia)		Concepto B Cámara cerrada		
	Peso	Calificación	Evaluación Ponderada	Calificación	Evaluación Ponderada
Costo	25%	3	0,75	1	0,25
Funcionalidad	50%	3	1,5	5	2,5
Impacto visual	25%	3	0,75	4	1
			3		3,75
¿Continuar?			No		Desarrollar

Conclusión:

Se ha elegido en base a lo antes expuesto el concepto de cámara de impresión cerrada.

4.1.4. Conceptos para el sistema de control

- **Placa de control**

Concepto A: Conjunto RAMPS 1.4 y Arduino Mega

La placa RAMPS (Reprap Arduino Mega Pololu Shield) es una shield compatible con Arduino Mega que integra todas las capacidades para implementar el control de una impresora 3D. Su diseño es completamente abierto y posee un costo muy bajo. Está diseñada de tal manera que se pueden implementar 2 extrusores y mejoras para la máquina implementando servomotores. Un ejemplar de este conjunto se muestra en la figura 80.

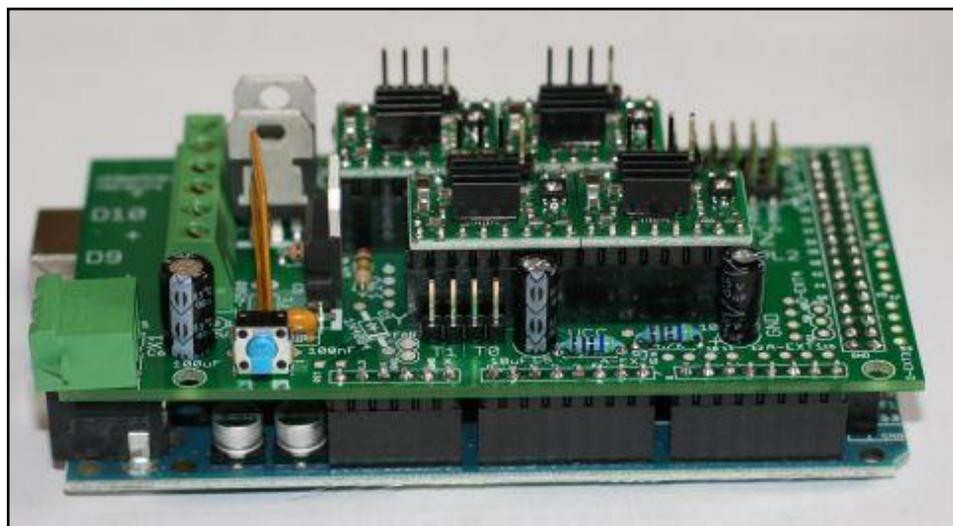


FIGURA 79: CONJUNTO RAMPS 1.4 Y ARDUINO MEGA

Fuente: (RepRap, RepRap, 2016)

Para implementar este concepto se necesita un kit de RAMPS 1.4 y Arduino Mega con un precio de 21,99.

Ventajas del concepto A:

- Modular, se puede cambiar los drivers de los motores si estos se dañan por alguna razón.
- Bajo costo.
- Al ser compatible con Arduino, agrega todos los beneficios de utilizar este lenguaje de programación tan extendido y de hardware de bajo costo.
- Posee fusibles autorearmables que se pueden cambiar fácilmente y que protegen a la placa contra un exceso de corriente.
- Permite la implementación de 2 extrusores.
- Permite integrar otras funciones a la máquina con servomotores o luces RGB para indicar estados de la misma.

Desventajas del concepto A:

- Los conectores con los que viene de serie no son polarizados, por lo que una mala conexión por parte del usuario podría ocasionar un cortocircuito letal para la placa o los elementos que se esté utilizando.
- Las corrientes máximas que admiten los puertos son a veces menores a las necesarias para un funcionamiento óptimo del producto.

Concepto B: Placa RAMBo V1.3

La placa RAMBo (Reprap Arduino Mega compatible Mother Board) se podría definir como una unión de la electrónica de las placas RAMPS 1.4 y Arduino Mega vistas anteriormente. Adicional a esto, la placa implementa mejoras considerables a costo de un precio mucho mayor. Por ejemplo, se puede establecer la corriente apropiada para los motores vía software, además que todos los conectores vienen polarizados para evitar malas conexiones por parte del usuario. Un ejemplar de esta placa se muestra en la figura 81.

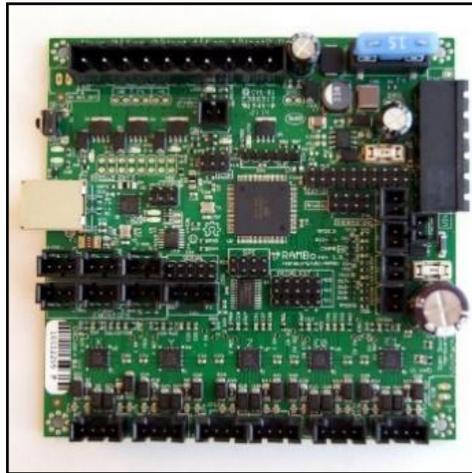


FIGURA 80: PLACA RAMBo

Fuente: (RepRap, RepRap, 2016)

Para implementar este concepto se necesita una placa RAMBo de 79 dólares.

Ventajas del concepto B:

- Al ser compatible con Arduino, agrega todos los beneficios de utilizar este lenguaje de programación tan extendido.
- Posee fusibles que se pueden cambiar fácilmente y que protegen a la placa contra un exceso de corriente y/o voltaje.
- Permite la implementación de 2 extrusores.
- Permite integrar otras funciones a la máquina con servomotores o luces RGB para indicar estados de la misma.
- Posee conectores polarizados para evitar una mala conexión de los elementos de la impresora, protegiendo de esta manera a la placa.

Desventajas del concepto B: Elevado costo

Concepto C: Sanguinololu

La placa Sanguinololu es un desarrollo abierto de Reprap de bajo costo para el control de impresoras 3D y máquinas CNC. Al investigar en las

especificaciones de esta placa se advirtió que sólo posee 4 puertos para motores a pasos, lo que significa que puede implementar 1 solo extrusor. Esto es incompatible con las especificaciones del producto propuestas al inicio de este documento, por lo que este concepto será descartado. A continuación se muestra el proceso de selección de conceptos para la placa de control de la impresora.

Selección de conceptos:

Variables a evaluar en los conceptos de placa de control:

- Costo (30%)
- Protección contra cortocircuitos (35%)
- Protección contra errores humanos, conectores polarizados (35%)

La tabla 27 muestra la matriz de selección de conceptos para este componente del producto.

TABLA 27:

MATRIZ SELECCIÓN CONCEPTOS PLACA DE CONTROL

Criterios de Selección	Concepto A RAMPS 1.4 (Referencia)		Concepto B RAMBo		
	Peso	Calificación	Evaluación Ponderada	Calificación	Evaluación Ponderada
Costo	30%	3	0,9	1	0,3
Protección contra cortocircuitos	35%	3	1,05	3	1,05
Protección contra errores humanos, conectores polarizados	35%	3	1,05	4	1,4
¿Continuar?			3 Desarrollar		2,75 No

Conclusión:

Se ha elegido en base a lo antes expuesto el concepto de placa de control mediante RAMPS 1.4 y Arduino Mega.

- **Firmware y Host**

Concepto A: Marlin

El firmware Marlin es un desarrollo activo hasta Junio del 2014. Se volvió la opción de referencia en muchas impresoras 3D, lo que se puede apreciar incluso hoy en día en la infinidad de video tutoriales dedicados a este software. A continuación se presentan algunas características y ventajas del mismo:

- Mantiene alta la velocidad cuando es posible, alta velocidad en cambios de dirección.
- Protege los elementos interrumpiendo la alimentación en base a la temperatura.
- Soporte total para endstops.
- Soporte para tarjetas SD.
- Soporte para pantallas LCD.
- Almacenamiento y administración en EEPROM.
- Puede trazar arcos.
- Envía señales de activación al software Host.

Ventajas del concepto A: Gran cantidad de información en la web.

Desventajas del concepto A: Se ha dejado de desarrollar el software, por lo que es probable que pronto sus características queden obsoletas.

Concepto B: Repetier

El firmware Repetier es un desarrollo activo hasta marzo del 2015. Es una opción de firmware y host popular en impresoras 3D gracias a su facilidad de uso y buena documentación. Es un software que funciona bastante bien en impresoras de locomoción delta. Por esta razón,

SeeMeCNC lo utiliza en sus impresoras. A continuación se presentan algunas características y ventajas de este firmware:

- Altas velocidades de impresión.
- Suavizador de trayectorias para un mejor acabado.
- Control de la presión del nozzle.
- Soporte para múltiples extrusores (característica experimental).
- Protocolo de comunicación seguro con Host.
- El firmware puede trabajar con cualquier Host, no sólo Repetier Host.
- Monitorización constante de temperatura.
- Control PID para la temperatura de los extrusores.
- Soporte para tarjetas SD.
- Soporte para pantallas LCD.

Ventajas del concepto B:

- Excelentes características en comparación con otros firmwares.
- Apropiado para el uso con impresoras tipo delta.
- Es utilizado por SeeMeCNC para sus impresoras Rostock Max V2, por lo que este firmware podría servir de referencia para diseñar el propio.
- El producto que proporciona Repetier es completo puesto que brinda firmware, host y un servidor como solución integral al control de la máquina.

Desventajas del concepto B:

- Se ha dejado de desarrollar el software, por lo que es probable que pronto sus características queden obsoletas.
- Poca información disponible en comparación con otros softwares como Marlin y Sprinter.

Selección de conceptos:

Variables a evaluar en los conceptos de placa de control:

- Características de valor agregado (40%)

- Información disponible en web (20%)
- Solución de software integral (40%)

La tabla 28 muestra la matriz de selección de conceptos para este componente del producto.

TABLA 28:

MATRIZ SELECCIÓN CONCEPTOS PLACA DE CONTROL

Criterios de Selección	Concepto				
	Peso	A Marlin (Referencia)		B Repetier	
		Calificación	Evaluación Ponderada	Calificación	Evaluación Ponderada
Características de valor agregado	40%	3	1,2	4	1,6
Información disponible en web	20%	3	0,6	2	0,4
Solución de software integral	40%	3	1,2	5	2
			3		4
¿Continuar?			No		Desarrollar

Conclusión:

Se ha elegido en base a lo antes expuesto el concepto de solución integral de software Repetier.

4.2. Diseño a nivel de detalle

Para el proceso de diseño de los sistemas a detalle se siguió un método de iteración y mejora continua (kaizen) hasta obtener un resultado que satisfaga las especificaciones de diseño propuestas al inicio del documento.

Para el diseño de detalle de un producto de complejidad moderada como el que se está desarrollando, se toman cientos, y a veces hasta miles de decisiones que afectan el desempeño del mismo y tienen un impacto

directo sobre el éxito o el fracaso económico del producto (Ulrich-Eppinger, 2013).

Un documento que detalle cada decisión que se ha tomado tendría, con toda seguridad, una extensión mayor a la permitida en el reglamento de la universidad, por lo que a continuación se muestran las decisiones y mejoras más relevantes en texto mientras que se puede apreciar todas en las imágenes que lo acompañan.

4.2.1. Diseño de detalle global básico

Un método eficiente para diseñar un sistema complejo es suponer valores apropiados para una variable, y, a partir de ellos, ajustar e integrar los valores de las variables restantes para que den como resultado un desempeño funcional del producto.

Una vez se ha logrado un desempeño funcional, se puede aplicar un método de mejora continua (kaizen) hasta obtener un diseño competitivo en el mercado. Es por esta razón que se establecen las especificaciones del producto, ya que en esta analogía, serían los valores de algunas variables que se suponen implicarán un éxito económico. A partir de estas variables, se determinan los detalles del diseño que puedan satisfacer a las mismas (si es que los hay).

Una vez explicada esta estrategia en el diseño de productos, se muestra a continuación cómo se implementó:

Sabemos que el volumen de impresión propuesto es de 28 cm de diámetro y 40 cm de altura. A partir de este volumen se puede determinar por métodos de cálculo gráfico las longitudes guía del robot delta logrando así el diseño más básico del producto, el cual se puede apreciar en la figura 82. El mismo consta de un cilindro que representa el volumen de impresión que se desea conseguir. En la base se puede apreciar una cama caliente de 28 cm de diámetro y en la parte superior la aproximación más básica del extrusor doble.

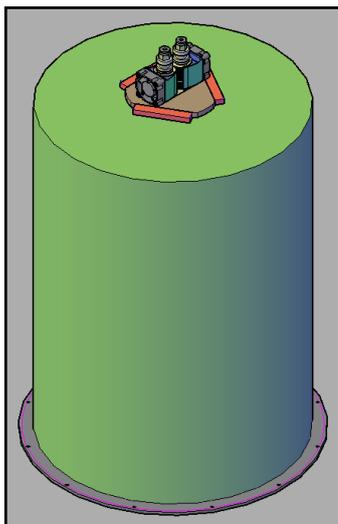


FIGURA 81: DISEÑO BÁSICO DEL PRODUCTO

A partir de este diseño básico, se pueden identificar las dimensiones básicas que el robot delta debe poseer para cumplir con este volumen de impresión propuesto. A través de un método de cálculo gráfico, se encontraron las dimensiones de las columnas y los brazos diagonales del robot delta. A continuación se muestra el resultado en la figura 83.



FIGURA 82: DIMENSIONES BÁSICAS DEL ROBOT

A continuación se muestra el proceso de cálculo que se siguió para hallar las longitudes apropiadas de los brazos diagonales y las columnas del robot delta:

- Se sabe que la separación mínima entre boquillas que se puede lograr con los extrusores de metal E3D V6 elegidos es de 2,35 cm en la dirección del eje x. Por lo que si situamos nuestro sistema de referencia en el centro de la cama caliente, la posición del primer extrusor será (-1,175 ; 0 ; 0) cm mientras que la del segundo extrusor será (1,175 ; 0 ; 0) cm.
- Cada uno de estos extrusores debe poder alcanzar todas las posiciones de un volumen cilíndrico de diámetro 28 cm y altura 40 cm.
- Para comenzar con el cálculo, se muestra el círculo inferior de este volumen cuyo diámetro es 28 cm. Adicionalmente se muestra las posiciones de los centros de los fusores como los centros de los círculos azules en la figura 84. Se muestra en rojo el área de impresión mientras que en azul se muestra la posición de las puntas de los fusores.

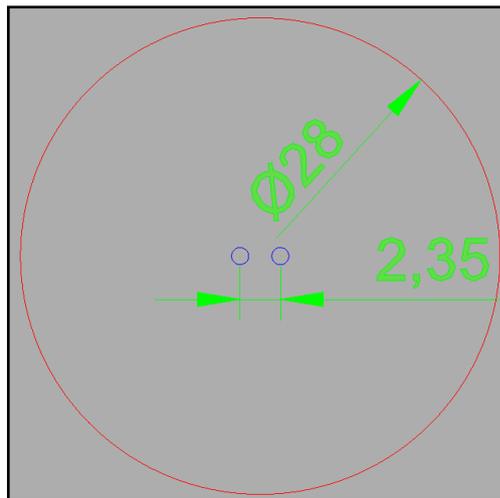


FIGURA 83: CÍRCULO BÁSICO DE ÁREA DE IMPRESIÓN

- Cada uno de estos fusores debe poder posicionarse sobre cualquier punto del área delimitada por este círculo. Debido a que estos centros de los fusores no corresponden con el centro del área que se quiere cubrir, y teniendo en cuenta que un sistema de locomoción tipo delta tiene un volumen de trabajo cilíndrico, y por lo tanto, de área circular, se debe hallar una “circunferencia efectiva” que satisfaga las condiciones antes citadas.
- Esta circunferencia efectiva tiene la propiedad de que si una boquilla estuviera en el centro de la plataforma de extrusión, al poder esta sobre

cualquier punto de la circunferencia mencionada, cualquiera de las dos verdaderas boquillas podría ubicarse en el área de impresión.

- Para encontrar esta circunferencia efectiva, se sigue el siguiente método: Se traza la división entre ambos extrusores, debido a que estos están ubicados en el eje x, el desfase máximo con respecto a la circunferencia original también estará en este eje. Cuando el boquilla central imaginaria está en el extremo izquierdo, como se puede apreciar en la figura 85, la boquilla real derecha necesitaría moverse 1.175 cm a la izquierda para alcanzar la posición máxima izquierda. De esta forma, sabemos que se puede hallar la circunferencia efectiva para los dos extrusores desfasando a la circunferencia real 1.175 cm.

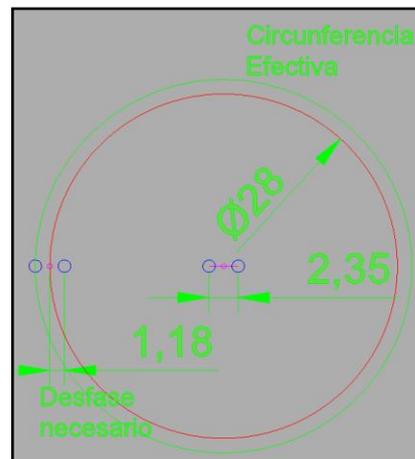


FIGURA 84: TRAZO DE LA CIRCUNFERENCIA EFECTIVA

- Una vez hecho esto, se debe elegir una separación mínima de las columnas con respecto a la circunferencia efectiva. Como se puede alcanzar a vislumbrar desde ya, esta distancia debe ser mayor a la distancia que existe entre el centro del cabezal de impresión y el punto más cercano a cualquier columna. Esta distancia está estimada en base a un diseño muy preliminar del cabezal de impresión en 4,5 cm. Como la distancia elegida al extremo más cercano de la columna que se desea hallar debe ser mayor al anteriormente citado, y teniendo en cuenta modificaciones de diseño que podría darse a futuro, se elegirá 6 cm.

- Una vez hecho esto, se pasa al plano 3D trazando líneas en la dirección del eje z que representan las columnas del robot. Todo esto se muestra en la figura 86.

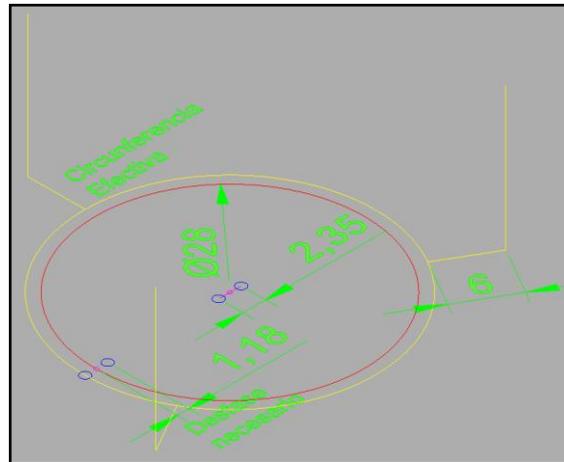


FIGURA 85: TRAZO DISTANCIA MÍNIMA A COLUMNAS

- Para encontrar la distancia mínima que debe tener cada brazo diagonal se tendrá en cuenta la siguiente observación: cuando la boquilla central imaginaria está en el extremo inferior del plano (0, -140, 0) cm, el brazo diagonal de la columna C deberá tener una inclinación mínima de 15 grados para no perder resolución (Puesto que la resolución de un robot delta es variable y decreciente con respecto al centro de impresión). Por lo tanto, se traza una línea en el plano con estas características como se muestra en la figura 87. Se puede apreciar en esta figura que la longitud mínima encontrada fue de 32,97 cm.

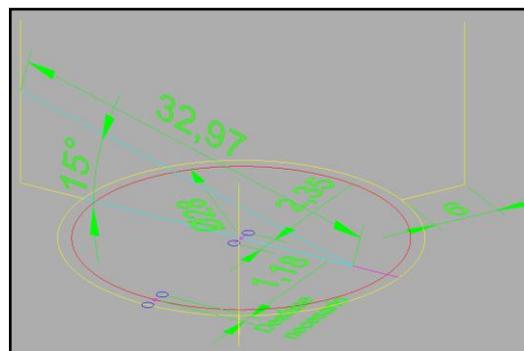


FIGURA 86: TRAZO DE DISTANCIA MÍNIMA A COLUMNAS

- La longitud mínima hallada de los brazos diagonales (32,97 cm), como se verá posteriormente, aumentó a 33,5 cm por motivos de manufactura.

- El proceso para hallar la longitud mínima de las columnas explora un análisis y cálculo gráfico similar al seguido hasta ahora y muestra resumido en la figura 88 por motivos de extensión de este documento.

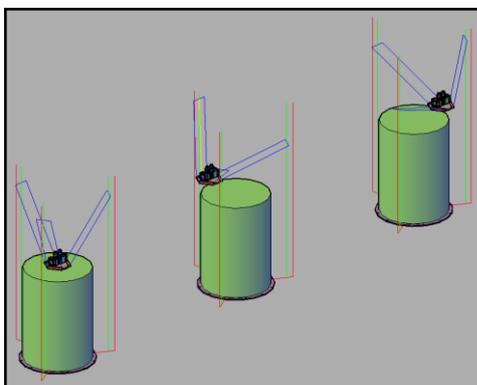


FIGURA 87: PROCESO DE ANÁLISIS DE POSICIONES EXTREMAS

- Se encontró que la longitud mínima requerida para las columnas fue de 75,07 cm para una longitud preliminar elegida de los brazos diagonales de 33 cm.
- Se puede apreciar en este ejemplo que el proceso de diseño conlleva muchas decisiones con información incompleta y es ampliamente iterativo, por lo que conviene llevar un registro de las variables más importantes del producto para referencia al diseñar nuevos productos.

4.2.2. Diseño de detalle del sistema de locomoción

Para diseñar el sistema de locomoción primero se estableció la disposición de las columnas de apoyo estructural (perfiles de aluminio) acompañadas de las varillas lisas de acero inoxidable cromado. Todo esto se puede apreciar en la figura 89.

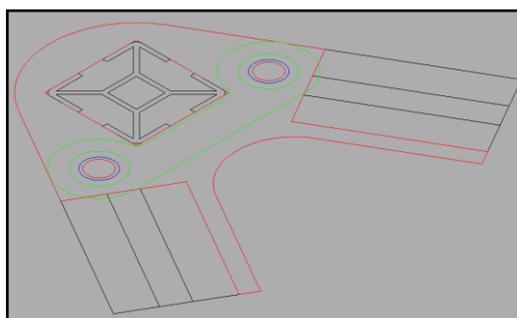


FIGURA 88: DISPOSICIÓN DE PERFILES DE ALUMINIO Y VARILLAS LISAS

Como segundo paso en el proceso de diseño se pasó a un plano tridimensional transformando a sólidos 3D los perfiles y las varillas lisas. Además, se agregó una primera aproximación del carro de locomoción con el uso de dos rodamientos lineales LM8. Esta será la misma que durante pasos siguientes se irá mejorando hasta cumplir con las especificaciones del producto. Todo esto se puede apreciar en la figura 90.

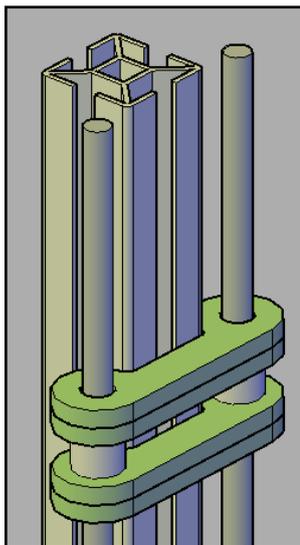


FIGURA 89: PRIMERA ITERACIÓN CARRO DE LOCOMOCIÓN

Como siguiente paso se mejoró el carro del sistema de locomoción agregando un método de ensamblaje para el mismo que utilizará 4 pernos verticales y piezas de MDF de 5,5 mm de grosor manufacturadas por corte láser como se muestra en la figura 91.

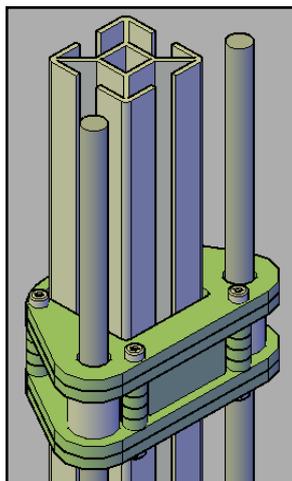


FIGURA 90: SEGUNDA ITERACIÓN CARRO DE LOCOMOCIÓN

Para continuar con el proceso de mejora se simplificó el diseño del carro reduciendo gran parte del volumen de sus piezas a la vez se agregó una primera aproximación del ajustador de correa por carro de posición variable. Para esto se utilizó los canales laterales del perfil de aluminio como guía para las correas. Esta mejora se puede apreciar en la figura 92.

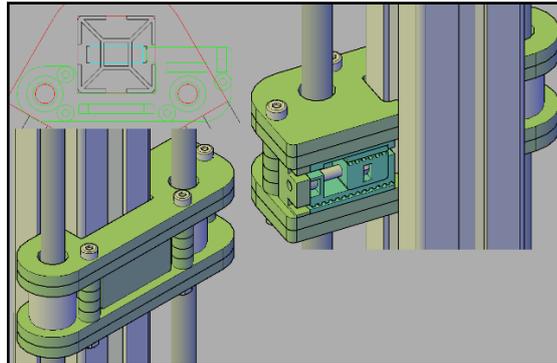


FIGURA 91: TERCERA ITERACIÓN CARRO DE LOCOMOCIÓN

Una cuarta iteración dio lugar al carro de locomoción que se muestra en la figura 93. Este es un diseño mucho más simétrico (y por lo tanto estético). Además, el ajustador de correa por carro de posición variable fue ubicado en la parte frontal del carro, de manera que aún con un producto de cámara cerrada el usuario tenga un acceso fácil y cómodo para ajustar la correa. Se colocó también provisionalmente la correa GT2, el motor NEMA 17 y la polea superior compuesta por un rodamiento 624 zz.

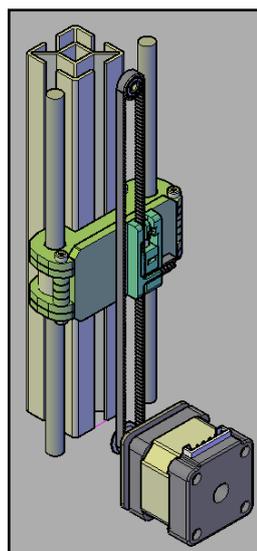


FIGURA 92: CUARTA ITERACIÓN CARRO DE LOCOMOCIÓN

Llegado a este punto se observó que era complejo implementar en este diseño acoples para las uniones de rótula que hacían falta para completar un primer diseño funcional del carro. Por esta razón, y para disminuir al máximo el número de pernos utilizados, se decidió ubicar los mismos de forma lateral con respecto al carro como se muestra en la figura 94. Esto permite que todo el carro se ensamble todavía utilizando 4 pernos pero con los acoples para las rótulas magnéticas ya implementadas. Se agregó al diseño las esferas de acero con punta de perno M3.

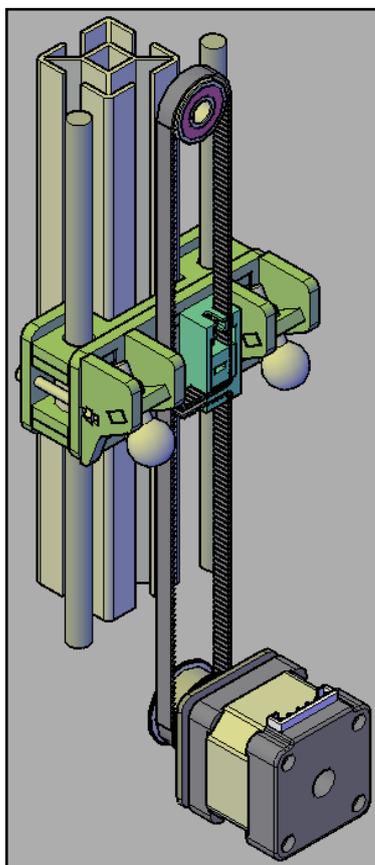


FIGURA 93: QUINTA ITERACIÓN CARRO DE LOCOMOCIÓN PROPUESTA

A partir de este punto se implementó un boceto temprano de los brazos diagonales que completaba de manera ilustrativa el sistema de locomoción propuesto. Esta mejora se puede apreciar en la figura 95. Nótese que las posiciones de la polea superior y el motor son ilustrativas, es decir, para facilidad y rapidez de visualización del concepto, se han colocado mucho más cerca de lo que deberían estar.

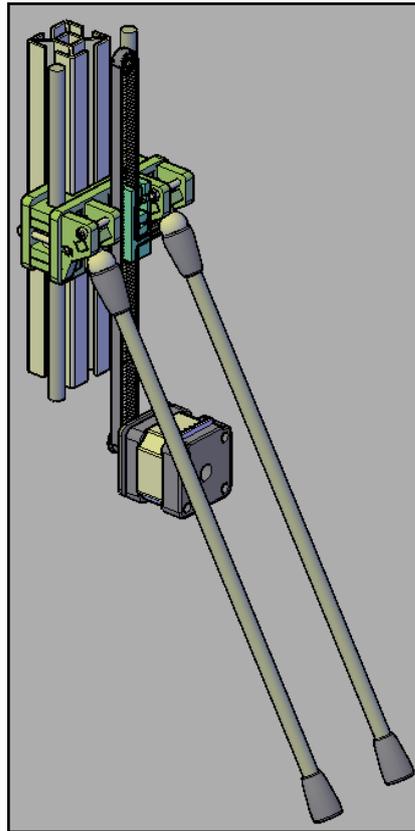


FIGURA 94: SEXTA ITERACIÓN CARRO DE LOCOMOCIÓN PROPUESTA

Posteriormente se notó que debían definirse las bases superior e inferior del sistema de locomoción, pero para hacer esto se debía definir primero los otros sistemas, por lo que estas bases se consideraron como interfaces con el sistema estructural. Por esta razón, su diseño es tratado a profundidad en el apartado de integración de sistemas.

4.2.3. Diseño de detalle del sistema de extrusión

Para comenzar con el diseño del sistema de extrusión, se estableció la longitud mínima que debe haber entre ambos fusores. Puesto que se eligió los extrusores de construcción completa en metal E3D V6, la distancia mínima a la que se pueden ubicar estos es 2.35 cm. Después de esto, se ubicó una base preliminar de conexión con las esferas de acero y, por supuesto, también se ubicó las esferas de acero. Todo esto se puede apreciar en la figura 96.

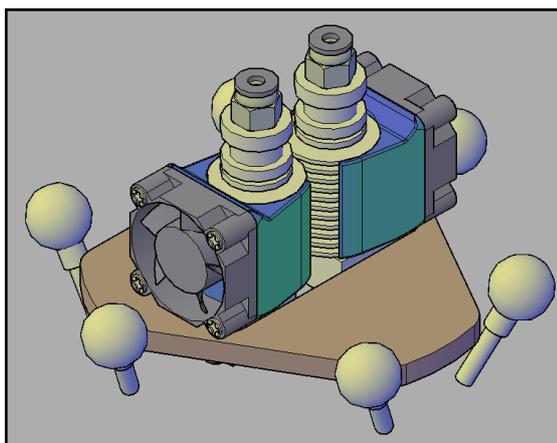


FIGURA 95: PRIMERA ITERACIÓN CABEZAL DE IMPRESIÓN

Como siguiente paso en el proceso de diseño, se agregó un método de acoplamiento de las esferas de acero a la plataforma principal. Todos estos acoplamientos fueron elegidos para producirse en corte láser, preliminarmente en MDF de 4 mm de espesor. La segunda iteración del cabezal de impresión se muestra en la figura 97.

Además de estas mejoras, se han girado los fusores 30 grados, se ha colocado el sensor inductivo en una posición provisional y se han colocado los ventiladores de capa, de manera que siempre haya refrigeración para la capa anterior a la que se está imprimiendo.

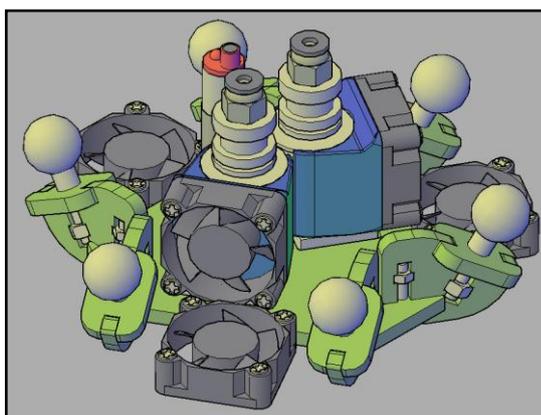


FIGURA 96: SEGUNDA ITERACIÓN CABEZAL DE IMPRESIÓN

Para la tercera iteración de este componente se ha agregado un método de acoplamiento de los fusores a la plataforma principal. Se utilizó para esto 3 pernos M3 x 50 mm tipo estrella como se muestra en la figura 98.

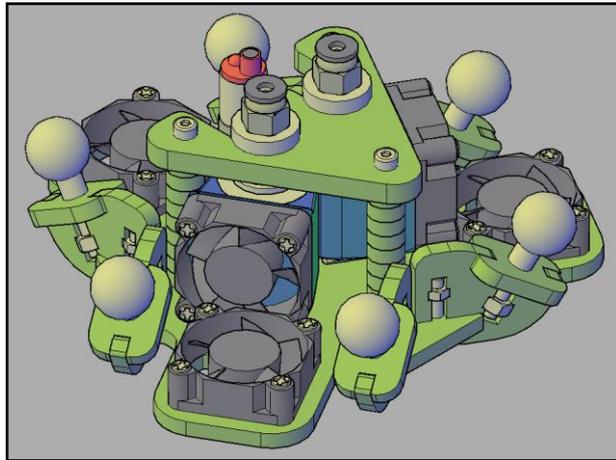


FIGURA 97: TERCERA ITERACIÓN CABEZAL DE IMPRESIÓN

Para la cuarta iteración de este componente se implementaron re-direccionadores del flujo de aire de los ventiladores de capa. Esto se puede apreciar en la figura 4.2.3d.

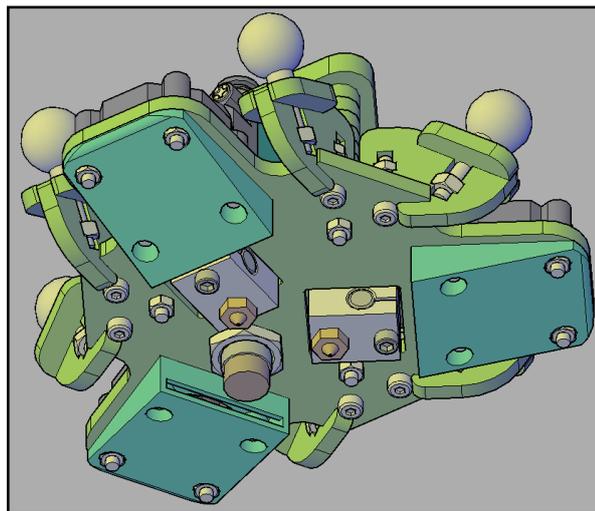


FIGURA 98: RE-DIRECCIONADORES FLUJO DE AIRE VENTILADORES DE CAPA

Un proceso iterativo de mejora continua del diseño del cabezal de impresión logrado en esta última iteración fue necesario a lo largo de todo el proceso de diseño de detalle, puesto que se previó que sería demasiado pesado y el número de componentes demasiado alto. A continuación se muestra las iteraciones que vinieron más adelante:

En la quinta iteración del cabezal de impresión se redujo el peso del mismo a través de la utilización de partes de MDF de 3 mm en vez de las de 4 mm, como se muestra en la figura 100.

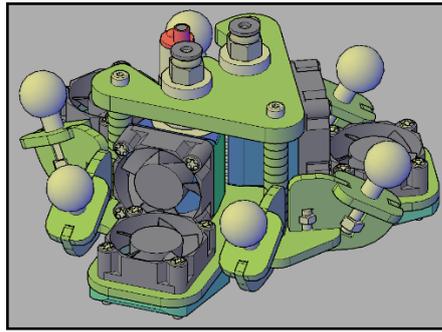


FIGURA 99: QUINTA ITERACIÓN CABEZAL DE IMPRESIÓN

En la sexta iteración, que se muestra en la figura 101, se implementó un sistema de agarre mejorado para los fusores, y a su vez se agregó un agujero guía para el sensor inductivo.

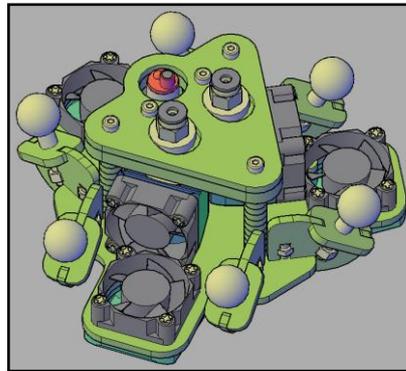


FIGURA 100: SEXTA ITERACIÓN CABEZAL DE IMPRESIÓN

Posteriormente a esto, se observó que la posición provisional elegida para el sensor inductivo obstruía el flujo de aire del ventilador de capa de la columna C, por lo que se lo reubicó en la parte frontal del diseño como se muestra en la figura 102. Además, se agregó una ranura para direccionar los cables del cabezal por la misma.

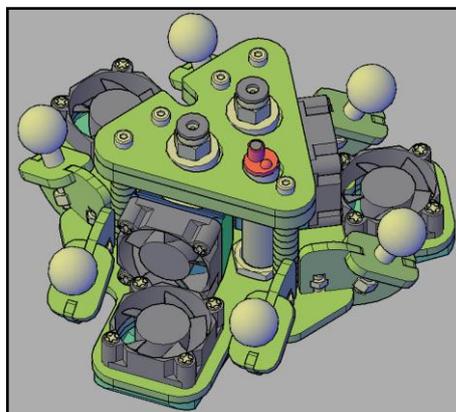


FIGURA 101: SÉPTIMA ITERACIÓN CABEZAL DE IMPRESIÓN

En la octava iteración, se cambió las esferas magnéticas provisionales de 15 mm de diámetro por una más ligeras seleccionadas de 10 mm de diámetro. Estas esferas, de proveedor Chino, se acoplan a imanes de neodimio con ranura esférica por un lado, y un agujero M3 por el otro. Esto se puede apreciar en la figura 103. Además, se reemplazó los ventiladores de capa por unos más delgados de 7 mm de espesor para reducir el peso y partes producidas en MDF se sustituyeron por impresión 3D.

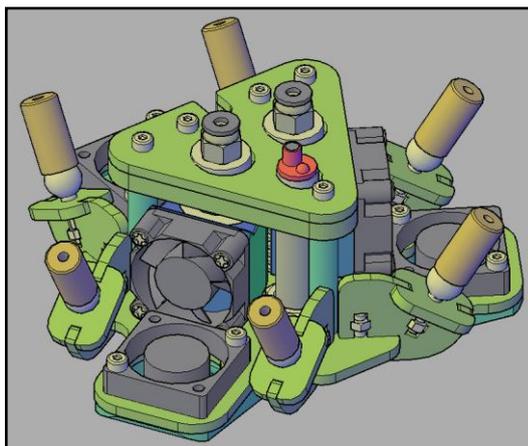


FIGURA 102: OCTAVA ITERACIÓN CABEZAL DE IMPRESIÓN

En la novena y última iteración antes de pasar a la fase de experimentación y pruebas, se redujo el peso del cabezal mediante la implementación de un acoplamiento mejorado para los ventiladores de capa. Ya no tendrán re-direccionadores de flujo de aire, sino que un acoplamiento inclinado los ubica de tal manera que generan un flujo directo hacia la pieza sin interferir con la temperatura alcanzada por la punta del fusor. Todo esto se muestra en la figura 104.

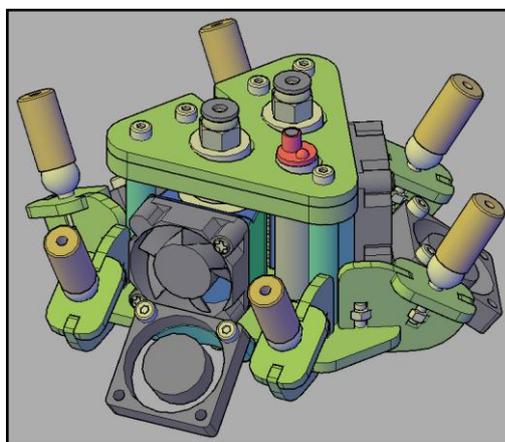


FIGURA 103: NOVENA ITERACIÓN CABEZAL DE IMPRESIÓN

Para continuar con el proceso de diseño del sistema de extrusión, se muestra a continuación el diseño elegido para el terminal frío.

La configuración y ubicación de componentes que se muestra fue elegida mediante iteraciones y análisis del sistema estructural que se verá a continuación. Sin embargo, se muestra primero todos los componentes del sistema de extrusión.

La primera iteración satisfactoria para el desarrollador se muestra en la figura 105. Consta de un acoplamiento producido por corte láser en MDF de 5.5 mm para los dos motores de extrusión y los mecanismos de extrusión. Como se puede ver, se hizo una aproximación conceptual de los mecanismos de extrusión.

Se eligió dos ángulos de inclinación para implementar este componente, ambos están orientados a direccionar correctamente al cable central de transporte de filamento y energía en su retracción y expansión al momento de moverse el cabezal de impresión. El primer ángulo gira los motores 20 grados con respecto al plano XY, mientras que el segundo, gira cada motor 15 grados con respecto a sus ejes en la dirección que los acerque al otro.

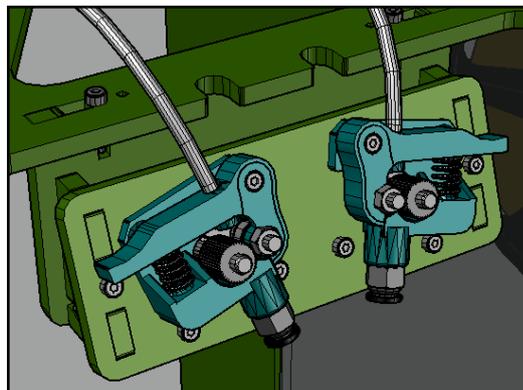


FIGURA 104: PRIMERA ITERACIÓN TERMINAL FRÍO

Para la segunda iteración del terminal frío, se reemplazó los mecanismos de extrusión provisionales por los elegidos de procedencia asiática. El diseño mejorado se muestra en la figura 106. Estos mecanismos tipo Heatcore Unibody son manufacturados por fundición de aluminio. Además, se agregó agujeros a la pieza frontal de MDF para asegurar el cable principal con bridas.

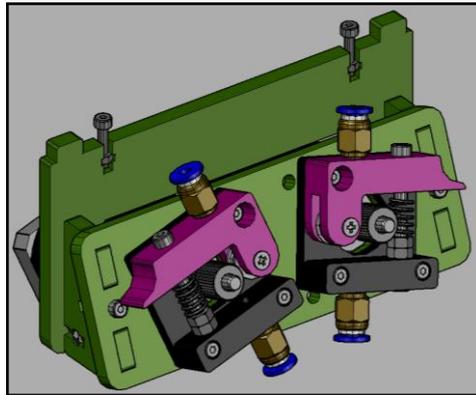


FIGURA 105: SEGUNDA ITERACIÓN TERMINAL FRÍO

Se concluyó después de esta iteración, que la misma era suficiente para comenzar con el proceso de experimentación y pruebas. Además, se observó que era necesaria una fase de experimentación en este punto para comprobar que el torque proporcionado por los motores era suficiente para la aplicación requerida, puesto que las mangueras del mecanismo Bowden introducen fricción e histéresis al sistema.

Para terminar el proceso de diseño del sistema extrusor, se verá el de diseño de detalle del mantenedor de filamento:

Puesto que el concepto ganador resultó ser el mantenedor de filamento de eje de radio y longitud variable, se presenta una primera aproximación del mismo en la figura 107. El diseño consta de dos rodamientos 608 que se acoplan a un perno M6 mediante piezas de impresión 3D y cuyo objetivo es reducir la fricción de los rollos al girar al máximo. También, se han incorporado 2 aletas activadas por resortes axiales para lograr un radio de eje variable y ajustable. Por último, el componente posee un sistema de anclaje al resto de la impresora mediante pernos estrella M3 x 25 mm.

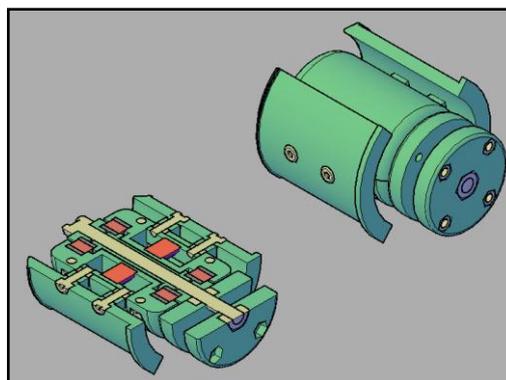


FIGURA 106: PRIMERA ITERACIÓN MANTENEDOR DE FILAMENTO

Puesto que el concepto ganador resultó ser el mantenedor de filamento de eje de radio y longitud variable, se presenta una primera aproximación del mismo en la figura 107. El diseño consta de dos rodamientos 608 que se acoplan a un perno M6 mediante piezas de impresión 3D y cuyo objetivo es reducir la fricción de los rollos al girar al máximo. También, se han incorporado 2 aletas activadas por resortes axiales para lograr un radio de eje variable y ajustable. Por último, el componente posee un sistema de anclaje al resto de la impresora mediante pernos estrella M3 x 25 mm.

Para continuar con el proceso de diseño, la segunda iteración del mantenedor de filamento fue alargada para aceptar una bobina de filamento de la marca eSun 3D de manera estándar. Sin embargo, aunque esta es la bobina de cuyas medidas se tomó referencia, el mantenedor acepta un amplio espectro de bobinas. El resultado de esta modificación se puede apreciar en la figura 108.

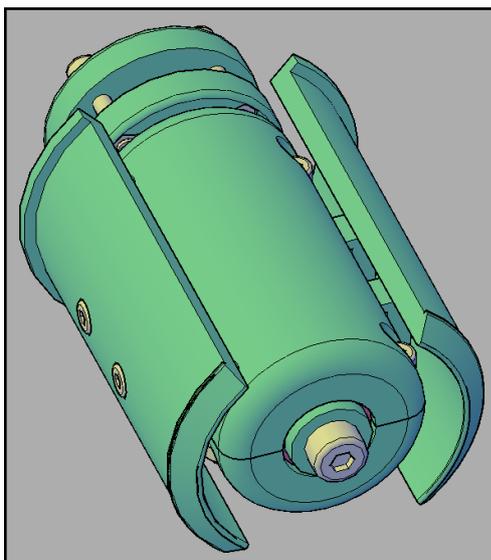


FIGURA 107: SEGUNDA ITERACIÓN MANTENEDOR DE FILAMENTO

Para la tercera iteración del mantenedor de filamento, se decidió cambiar el diseño de dos aletas, a uno de tres aletas como el que se muestra en la figura 109. Esto ayuda a que el rollo obtenga un mejor soporte en cualquier ángulo de giro al cual se encuentre el mismo.

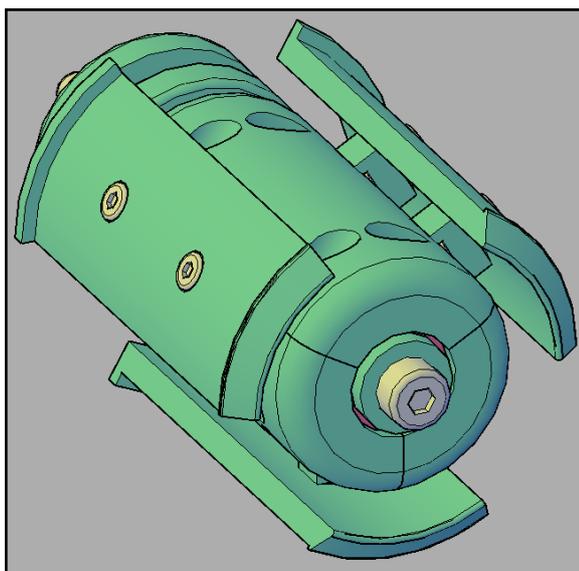


FIGURA 108: TERCERA ITERACIÓN MANTENEDOR DE FILAMENTO

Para la cuarta iteración de este componente se hizo una mejora estética y disminución de peso para todos los componentes. El resultado se muestra en la figura 110.

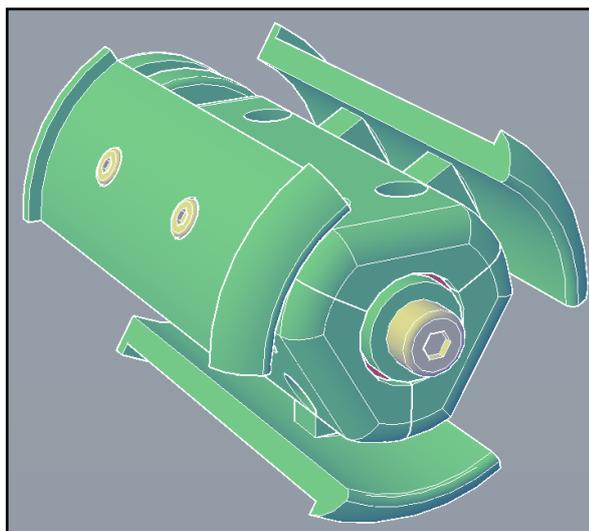


FIGURA 109: CUARTA ITERACIÓN MANTENEDOR DE FILAMENTO

La última iteración antes de la fase de experimentación y pruebas se muestra en la figura 111. Se implementaron las aletas de posicionamiento axial mediante resortes angulares. Esto permite una compensación del eje tanto en radio (aletas tangenciales) como en longitud (aletas axiales).

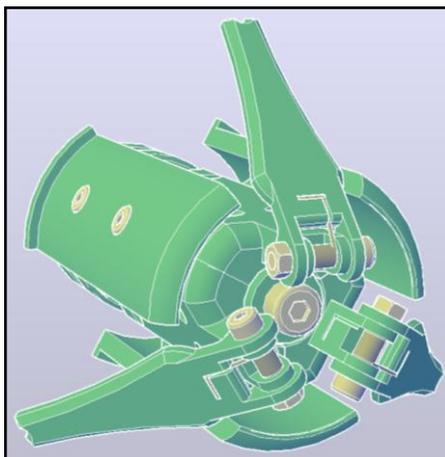


FIGURA 110: QUINTA ITERACIÓN MANTENEDOR DE FILAMENTO

4.2.4. Diseño de detalle del sistema estructural

El diseño estructural considera, a parte de su propio diseño, la integración de los sistemas anteriormente vistos. Por lo tanto, es uno de los más complejos y extensos.

Todo diseño, toma en cuenta y parte, del diseño básico encontrado al inicio del capítulo. Para continuar con el proceso, se estableció una estructura básica formada por perfiles de aluminio en T y con uniones de impresión 3D, similar al modelo Kossel de Reprap (RepRap, 2016). Este diseño preliminar se muestra en la figura 112.

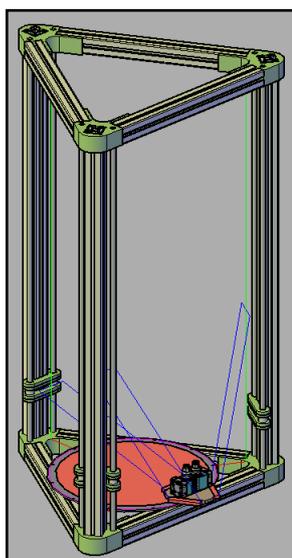


FIGURA 111: PRIMERA ITERACIÓN SISTEMA ESTRUCTURAL

Como siguiente avance en el proceso de diseño, se incorporó el diseño de los carros de locomoción obtenidos anteriormente, también se agregaron preliminarmente las correas GT2, los motores de locomoción y las poleas superiores. Todo esto se puede apreciar en la figura 113.

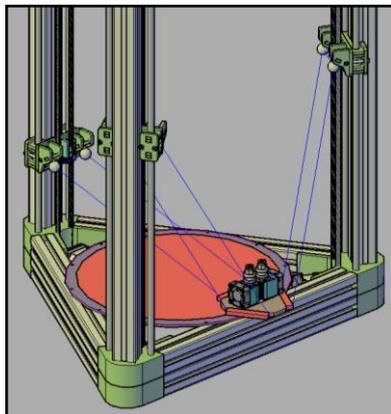


FIGURA 112: SEGUNDA ITERACIÓN SISTEMA ESTRUCTURAL

Continuando con una tercera iteración, y una vez obtenido el diseño del cabezal de impresión y un diseño preliminar de los brazos diagonales, se obtuvo el resultado que se muestra en la figura 114. Adicionalmente, y como primera opción de análisis, se colocó un terminal frío (motor más mecanismo extrusor) en la parte superior de la columna C.

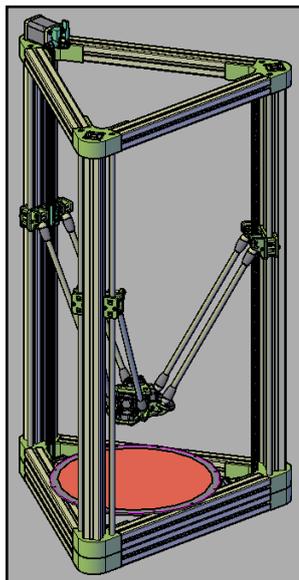


FIGURA 113: TERCERA ITERACIÓN SISTEMA ESTRUCTURAL

Una cuarta iteración se muestra en la figura 115. Se colocó una caja de interfaz de usuario preliminar. Además de la ubicación de los rollos de

impresión provisional y por último, una propuesta de ubicación de los motores extrusores en la parte posterior del producto.

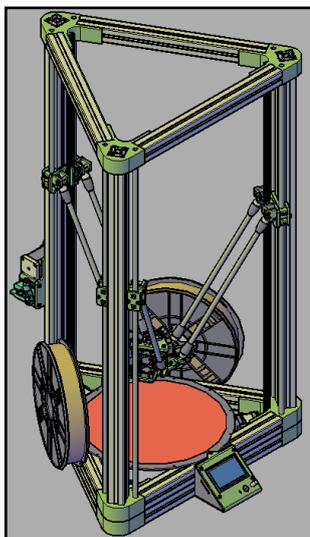


FIGURA 114: CUARTA ITERACIÓN DEL SISTEMA ESTRUCTURAL

A partir de este punto, se continuó el proceso de diseño de detalle con definiendo la forma exterior del producto. Para determinar esta forma, se siguió un proceso de análisis de conceptos subjetivo basado en la estética percibida que sale de los fines técnicos de este documento. Sin embargo, se muestra a continuación un bosquejo tridimensional básico de la forma que debería tener el producto en la figura 116.

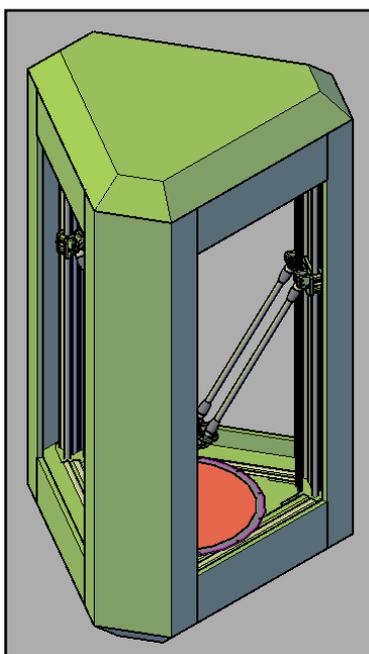


FIGURA 115: BOSQUEJO TRIDIMENSIONAL VISTA EXTERIOR DEL PRODUCTO

Mediante la guía visual de este bosquejo tridimensional, se obtuvo, paso a paso, primordialmente mediante piezas manufactura por corte láser en MDF de 5.5 mm, los componentes exteriores del producto.

La figura 117 muestra los cobertores para las columnas diseñados para la impresora. Estos, como se puede apreciar, inicialmente se acoplaban entre sí mediante uniones pequeñas de MDF y pernos M3.

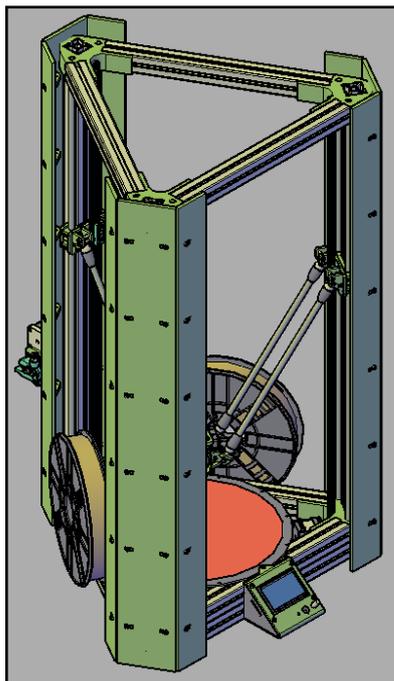


FIGURA 116: COBERTORES DE COLUMNAS AGREGADOS

Continuando, se obtuvo un primer diseño de detalle de las esquinas que adaptan los perfiles de aluminio y los diferentes elementos del sistema de locomoción. Esta primera aproximación a la esquina de MDF se muestra en la figura 118.

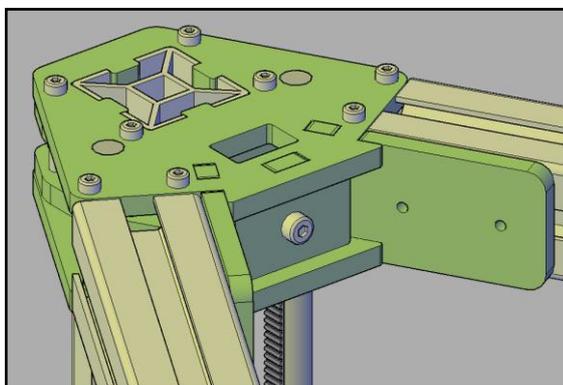


FIGURA 117: ESQUINAS ESTRUCTURALES DE MDF

Posteriormente, se realizó una segunda propuesta de estructura similar al modelo Rostock (RepRap, 2016), en la que sólo las columnas estarían compuestas por perfiles de aluminio en t y todos los demás componentes estructurales serían producidos en MDF de 5.5 mm por corte láser. Esta propuesta se muestra en la figura 119.

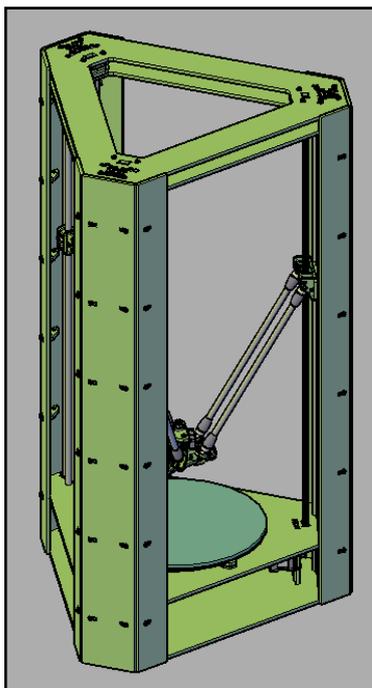


FIGURA 118: PROPUESTA DE ESTRUCTURA ROSTOCK

Para lograr un mejor agarre de las partes en MDF que cubren las esquinas del producto y a su vez, los perfiles de aluminio en t, se diseñó un acople preliminar que utilizaba dos pernos M3 x 15 mm. Este tipo de acople se muestra en la figura 120.

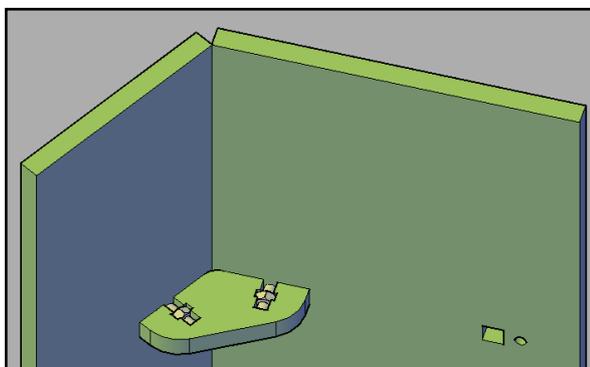


FIGURA 119: ACOPLER PARA ESQUINAS DE PROPUESTA ESTRUCTURA ROSTOCK

Una primera iteración satisfactoria del sistema estructural se muestra en la figura 121. Se cerró la cámara interna mediante partes de MDF de 5.5mm de espesor y acrílico con un grosor preliminar de 4 mm de espesor. Además, se agregó una versión más refinada de la caja de interfaz de usuario, como se puede apreciar en mayor detalle en la figura 122.

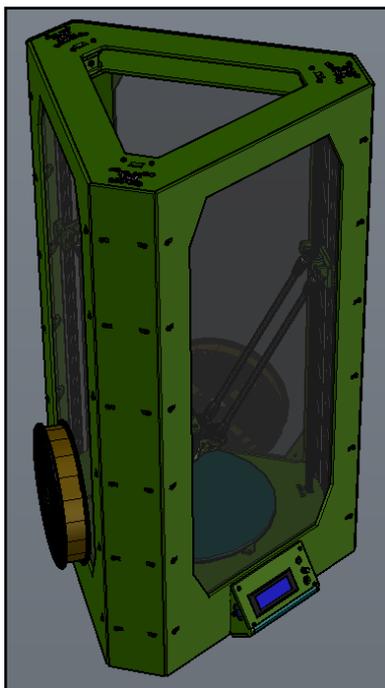


FIGURA 120: PRIMERA ITERACIÓN EXITOSA SISTEMA ESTRUCTURAL

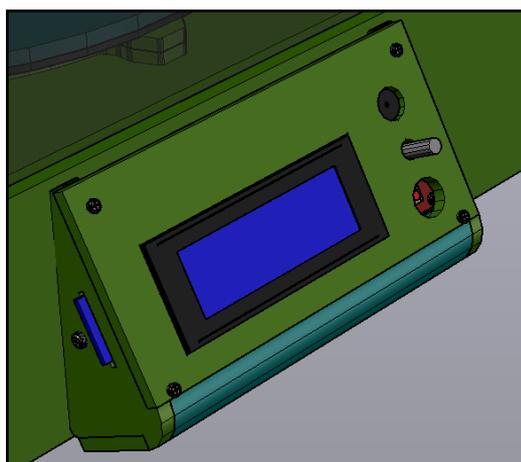


FIGURA 121: CAJA INTERFAZ DE USUARIO REFINADA PRIMERA ITERACIÓN DEL PRODUCTO

Una segunda iteración del sistema estructural se muestra en la figura 123. Se cerró en esta propuesta la parte superior del producto para prevenir corrientes de aire verticales (y expandir a futuro las capacidades del

producto integrando un control de temperatura interno). Por otro lado, se ubicó las bobinas de impresión en la parte superior de la estructura para colocar los terminales fríos en la parte superior de manera que se pueda reducir el torque utilizado por estos. La parte superior de los cobertores recuerdan a un diamante, por esta razón se seleccionó el nombre comercial del producto.

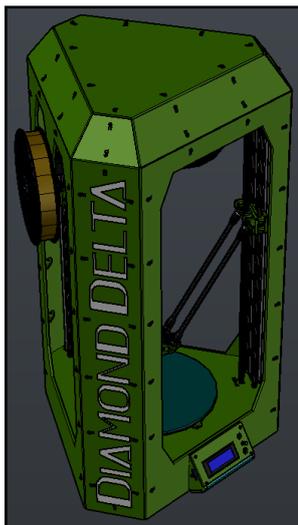


FIGURA 122: SEGUNDA ITERACIÓN SISTEMA ESTRUCTURAL

Para la tercera iteración del sistema estructural se incorporaron los cobertores laterales de acrílico, se diseñó un sistema de cerradura de puerta con imanes de neodimio y se incorporaron los terminales fríos preliminares en la parte superior del mismo. Todo esto se puede apreciar en la figura 124.

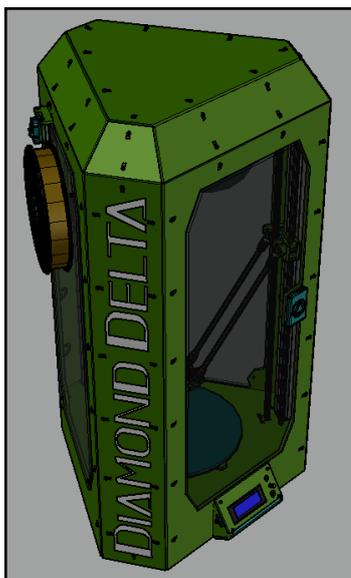


FIGURA 123: TERCERA ITERACIÓN SISTEMA ESTRUCTURAL

Se puede apreciar en la figura 125 el detalle del sistema de cerradura magnética para la puerta del producto. Consta de dos imanes de neodimio dispuestos en posición de atracción para mantener cerrada la cámara cuando sea conveniente. Sin embargo, fácilmente se puede vencer esta fuerza cuando se desee acceder a la cámara interna de la impresora.

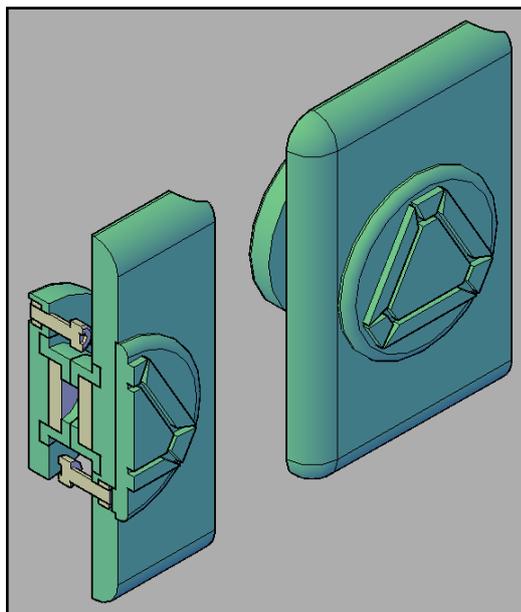


FIGURA 124: CERRADURA MAGNÉTICA DE CÁMARA INTERNA

En la figura 126 se puede apreciar la ubicación provisional de un terminal frío para esta iteración.

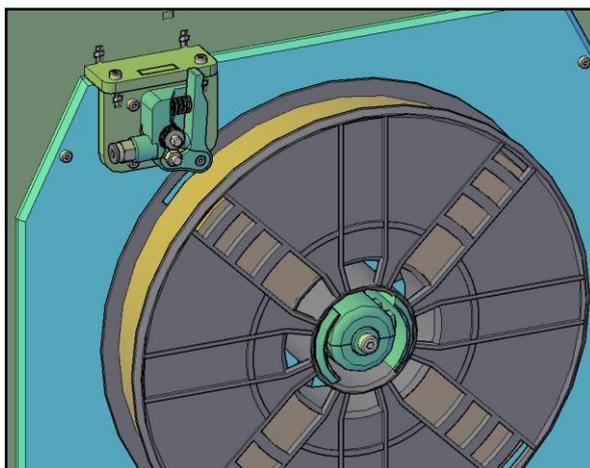


FIGURA 125: POSICIÓN PRELIMINAR TERMINAR FRÍO

Para la cuarta iteración del sistema estructural se agregaron las bisagras para el acrílico frontal del producto, que sirve como puerta del mismo hacia la cámara interna. También se probó una distribución nueva de

los componentes del sistema de extrusión (específicamente el conjunto bobina-terminal frío). La nueva iteración se muestra en la figura 127, mientras que la bisagra para el panel frontal de acrílico y la nueva distribución de componentes del conjunto bobina-terminal frío se muestran en las figuras 128 y 129 respectivamente.

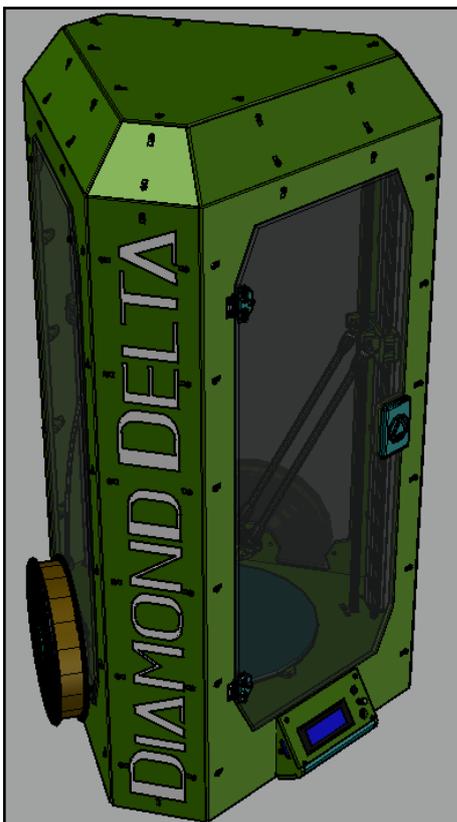


FIGURA 126: CUARTA ITERACIÓN SISTEMA ESTRUCTURAL

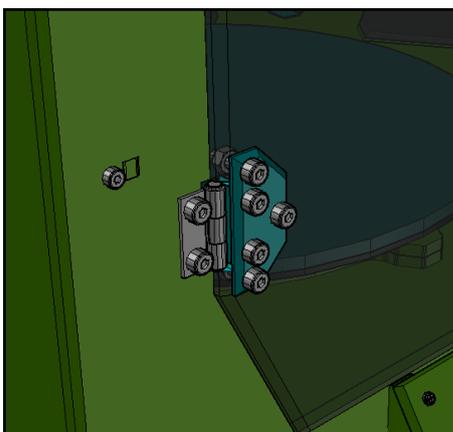


FIGURA 127: BISAGRA PARA COBERTOR FRONTAL DE ACRÍLICO

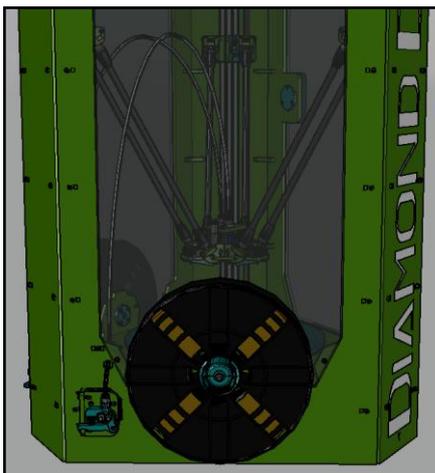


FIGURA 128: DISTRIBUCIÓN DE COMPONENTES DEL CONJUNTO BOBINA-TERMINAL FRÍO

La quinta y última iteración del sistema estructural antes del diseño del sistema de ensamblaje se muestra en la figura 130. Se implementó una distribución final del conjunto bobina-terminal frío que se muestra en la figura 131. Se eligió esta distribución de componentes debido a que fue la que lograba un menor requerimiento de torque para el terminal frío. Sin embargo, al colocar un gran peso, como el de las dos bobinas en la parte superior del producto, probablemente se requiera hacer la estructural mucho más rígida para no introducir vibración al sistema al intentar movimientos rápidos del cabezal de impresión.

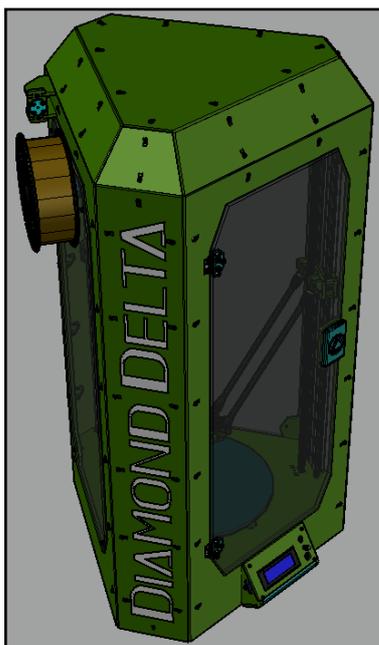


FIGURA 129: QUINTA ITERACIÓN DEL SISTEMA ESTRUCTURAL

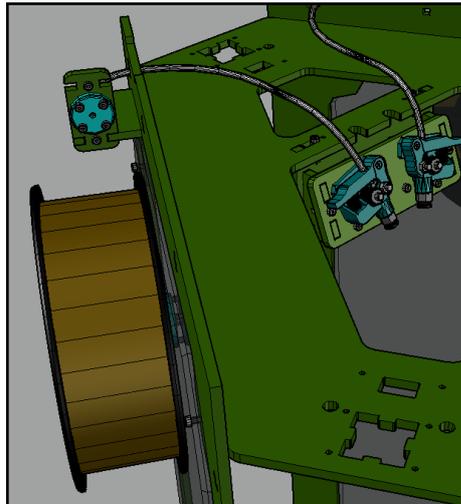


FIGURA 130: DISTRIBUCIÓN FINAL DE COMPONENTES SISTEMA EXTRUSIÓN

4.2.5. Diseño de detalle del sistema de ensamblaje

Un buen diseño del sistema de ensamblaje permite que se dé un producto más barato y fácil de usar. Además, al repasar la forma en que se ha establecido que un producto se ensamble, es posible encontrar métodos que puedan hacer más fácil y rápido este proceso, ya que resulta de especial importancia en producción masiva. Un ejemplo claro de lo anteriormente dicho es encontrar componentes que se pueden fusionar para cumplir todas las funciones que cumplen cada uno de los mismos pero que al estar unidos no requieren de tiempo para acoplarlos. Al hacer esto, se reduce el tiempo de ensamble al contener el producto un menor número de componentes.

Además, un diseño de ensamblaje permite diseñar de manera correcta las interfaces entre los diferentes sistemas, por lo que a este sistema también se le ha denominado integración de sistemas, ya que, en gran medida, fue la etapa en la que se integraron la mayoría de sistemas mediante interfaces. Un ejemplo son las bases inferiores y superiores del sistema de locomoción.

En el diseño de esta impresora 3D se tuvieron en cuenta dos iteraciones del sistema de ensamblaje. La primera iteración se muestra paso a paso en la siguiente serie de imágenes que la detallan. Adicionalmente a esto, en la sección de anexos se puede encontrar un manual de ensamble del producto.

Esta primera iteración del sistema de ensamblaje del producto comienza con la colocación de la placa base de MDF, tal como se muestra en la figura 132.

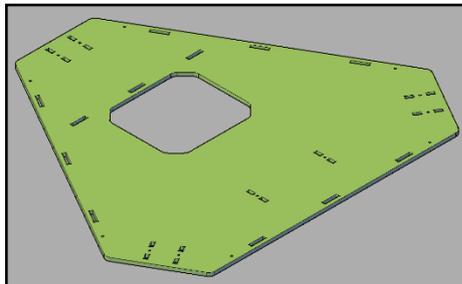


FIGURA 131: COLOCAR PLACA BASE SOBRE MESA

Posteriormente, se colocan las paredes laterales de la base inferior como se muestra en la figura 133. También, se ubicó la fuente de alimentación del producto que es una fuente regulada de computadora de 550 W, además de las bases para el acoplamiento de la tarjeta controladora.

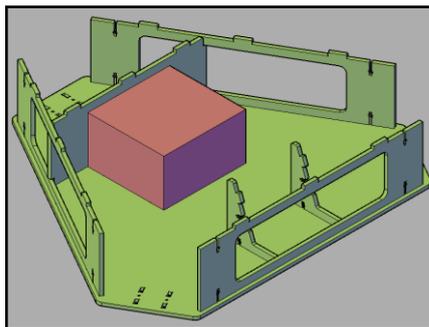


FIGURA 132: PLACA BASE Y COLOCACIÓN DE VARIOS COMPONENTES SOBRE LA MISMA

Después de esto, se construyen las bases del sistema de locomoción que son, naturalmente, tres. Estas bases, como se ha mencionado anteriormente, poseen varias funciones, como servir de soporte a los motores del sistema de locomoción, tener una cavidad para el paso de las correas GT2, acoplar tuercas especiales T para el acoplamiento de los perfiles de aluminio, entre otras. Una de estas bases se muestra en la figura 134, mientras que el resultado de su acoplamiento en el conjunto total se muestra en la figura 135.

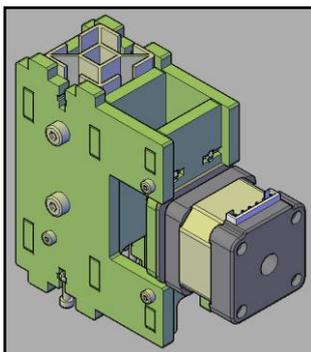


FIGURA 133: BASES DEL SISTEMA DE LOCOMOCIÓN PRELIMINARES

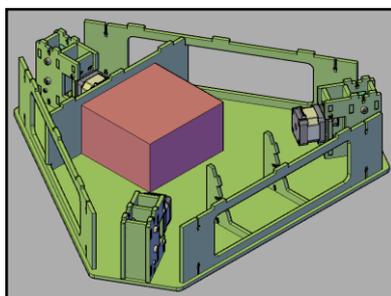


FIGURA 134: ACOPLAMIENTO BASES SISTEMA DE LOCOMOCIÓN EN CONJUNTO TOTAL

Acto seguido, se construyen las bases para las varillas lisas como se muestra en la figura 136. Con lo que el resultado del conjunto total se muestra en la figura 137. Este conjunto ya posee integrado la cama caliente y el cobertor superior de la base del producto. Es destacable de este diseño el hecho de que compensa cualquier imperfección el rango de milímetros para la longitud de la varilla (errores muy comunes en el corte) a través de un concepto implementado de ajuste por deformación de la pieza receptora de la varilla. Esto permite que la varilla sea acoplada no en sus extremos, sino a los lados.

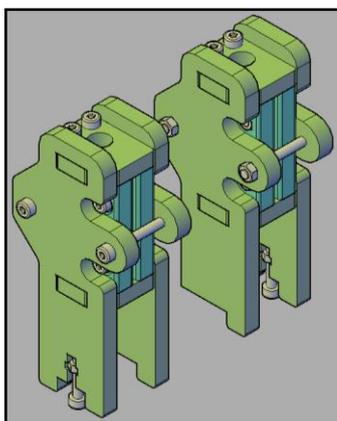


FIGURA 135: BASES DE ACOPLAMIENTO DE VARILLAS LISAS PARA UNA COLUMNA

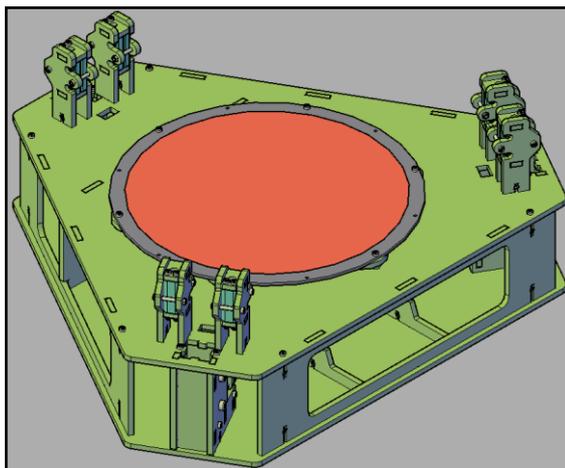


FIGURA 136: BASE COMPLETA DEL PRODUCTO

A continuación se insertan y aseguran los perfiles de aluminio en t de apoyo estructural y las varillas lisas para el sistema de locomoción como se muestra en la figura 138. Para asegurar los perfiles de aluminio en t se utilizaron tuercas tipo t especiales y manufacturadas en impresión 3D como se muestra en la figura 138, mientras que para asegurar las varillas lisas se utilizaron las bases de acoplamiento que ya se mostraron en la figura 139.

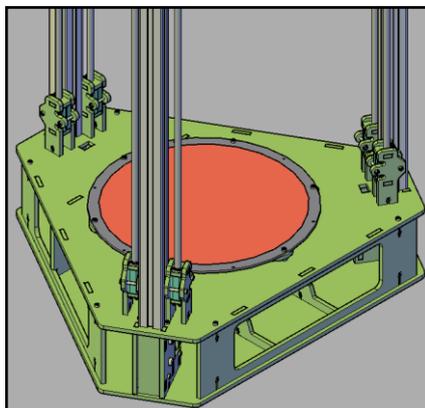


FIGURA 137: PERFILES DE ALUMINIO EN T Y VARILLAS LISAS ACOPLADAS

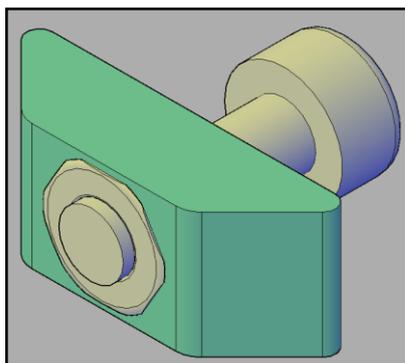


FIGURA 138: PRIMERA APROXIMACIÓN A TUERCA TIPO T

Para continuar con el proceso de ensamblaje se ensamblan por separado tres carros de locomoción como el que se muestra en la figura 140 y se insertan en el ensamblaje total.

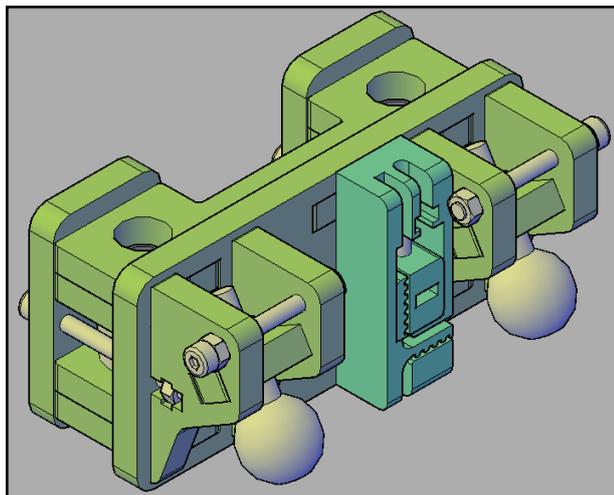


FIGURA 139: CARRO DE LOCOMOCIÓN

También, se debe construir el conjunto estructural superior que se muestra en la figura 141. Este conjunto posee las poleas superiores, los finales de carrera del sistema de locomoción, acoplamiento para los perfiles de aluminio en t y soporte estructural para el producto. El resultado del acoplamiento de todos estos elementos se muestra en la figura 142.

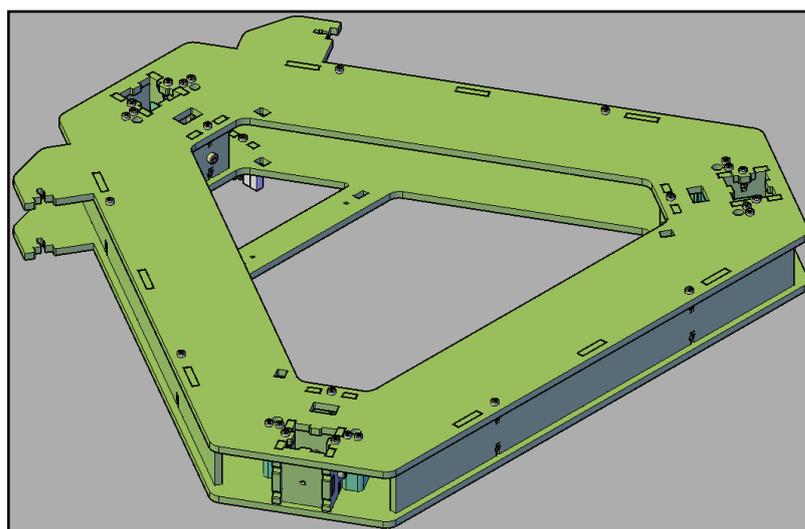


FIGURA 140: CONJUNTO ESTRUCTURAL SUPERIOR DEL PRODUCTO

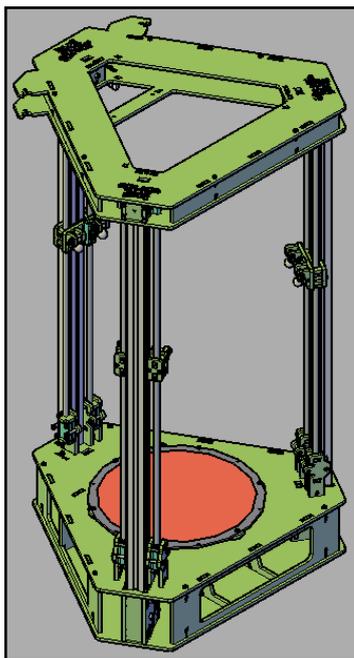


FIGURA 141: CARROS DE LOCOMOCIÓN Y CONJUNTO SUPERIOR ENSAMBLADO

Posteriormente se ensambla el conjunto de terminales fríos que se muestra en la figura 143. Además, se ensamblan los conjuntos de los paneles laterales, como se muestra en la figura 144. Estos paneles poseen los mantenedores de filamento y las partes de acrílico que permiten ver el interior del producto. Todos estos componentes ensamblados en el producto se muestran en la figura 145.

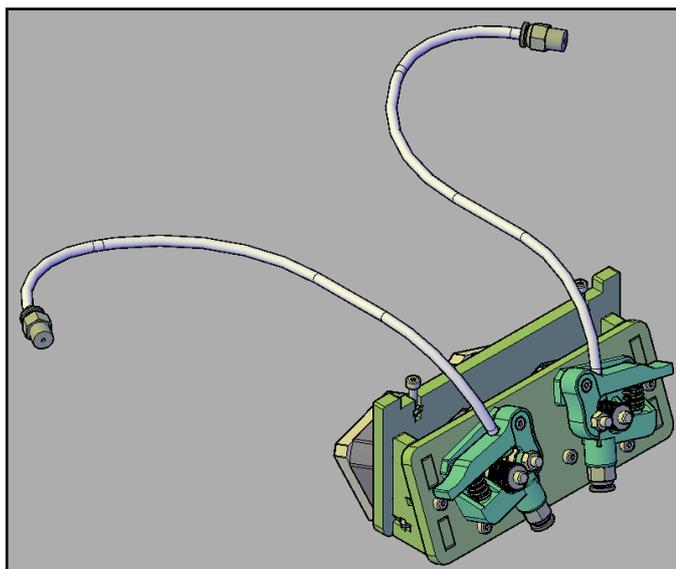


FIGURA 142: CONJUNTO DE TERMINALES FRÍOS

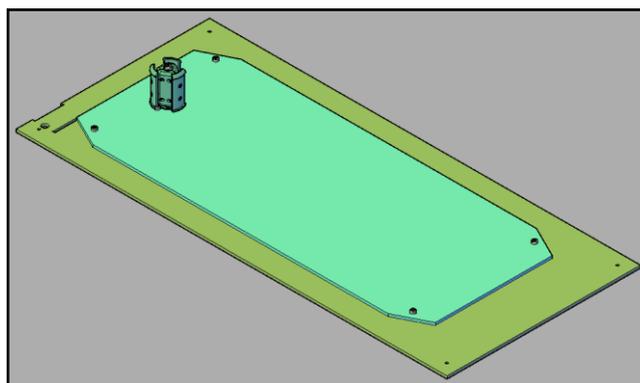


FIGURA 143: CONJUNTO DE TERMINALES FRÍOS

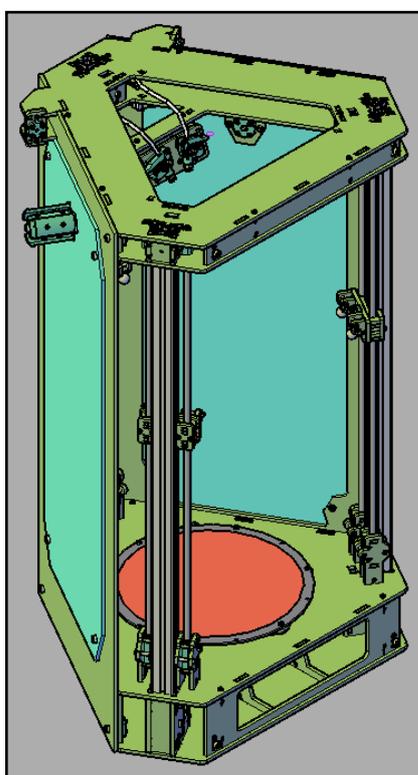


FIGURA 144: CONJUNTO TERMINALES FRÍOS Y PANELES LATERALES ENSAMBLADOS

Posteriormente, se ensambla el cabezal de impresión y la caja de interfaz de usuario. Por todo esto, se obtiene el resultado que se muestra en la figura 146. Cabe recalcar que en este punto se puede, y es incluso deseable, realizar las pruebas de calibración y funcionamiento del producto, puesto que todos los componentes que se van a ensamblar a continuación no influyen en aspectos funcionales del producto exceptuando la cámara cerrada contra corrientes de aire laterales.

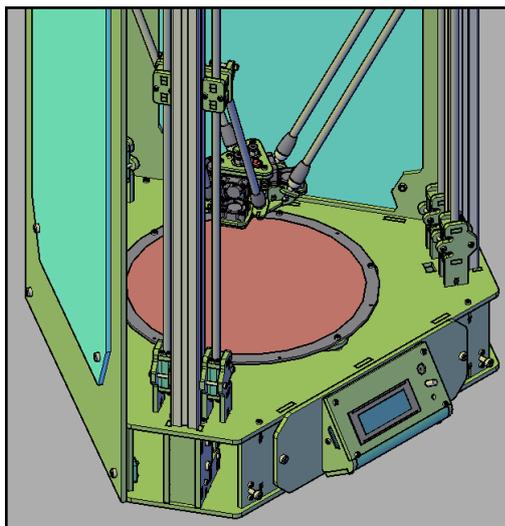


FIGURA 145: CABEZAL DE IMPRESIÓN Y CAJA DE INTERFAZ DE USUARIO INSTALADA

Una vez finalizado lo anterior, se procede a ensamblar el panel frontal de la impresora. Este panel contiene la puerta de acrílico con sus bisagras y el sistema de cerradura magnética que utiliza imanes de neodimio. Una vez ensamblado este conjunto, se muestra el resultado en la figura 147.

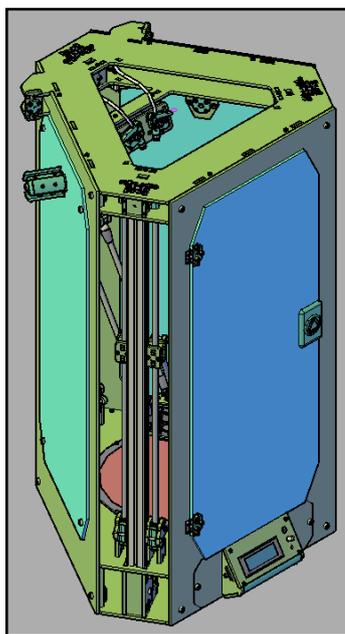


FIGURA 146: PANEL FRONTAL INSTALADO EN CONJUNTO TOTAL

El siguiente paso para el ensamblaje del producto es el acoplamiento de los paneles laterales pequeños, esto se muestra en la figura 148. Por último, se ensamblan las partes que constituyen la cubierta superior del producto como se muestra en la figura 149.

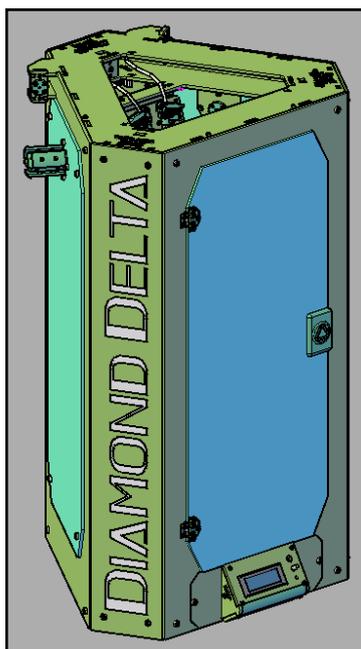


FIGURA 147: PANELES LATERALES PEQUEÑOS INSTALADOS

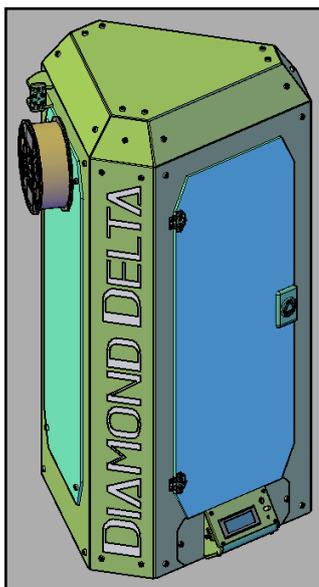


FIGURA 148: PRODUCTO ENSAMBLADO

4.2.6. Diseño de detalle del sistema de cableado

El diseño del sistema de cableado fue, para este producto, prácticamente indisoluble de los demás sistemas, en especial del sistema estructural. Por lo que el diseño de detalle de este sistema se podría explicar en base a la modificación del sistema estructural.

Básicamente, el principio elemental bajo el cual se diseña este sistema es que todos los elementos deben tener conexión con la placa principal del producto. La condición para estas conexiones es que no comprometan la funcionalidad de cualquiera de los otros sistemas y a su vez, estén protegidos contra cualquier esfuerzo que se produzca en ellos. Por ejemplo, no se pueden conectar los cables del cabezal de impresión de forma que pasen por cualquier punto del volumen de impresión de la máquina.

Para esto, se utilizaron las ranuras centrales de los perfiles de aluminio en t para transporten los cables de cualquier elemento que no se encuentre en la base de la máquina. Estos cables fueron los del cabezal de impresión y los de los finales de carrera.

La distribución de estos cables a través de las tres columnas de perfiles t se muestra en la figura 150.

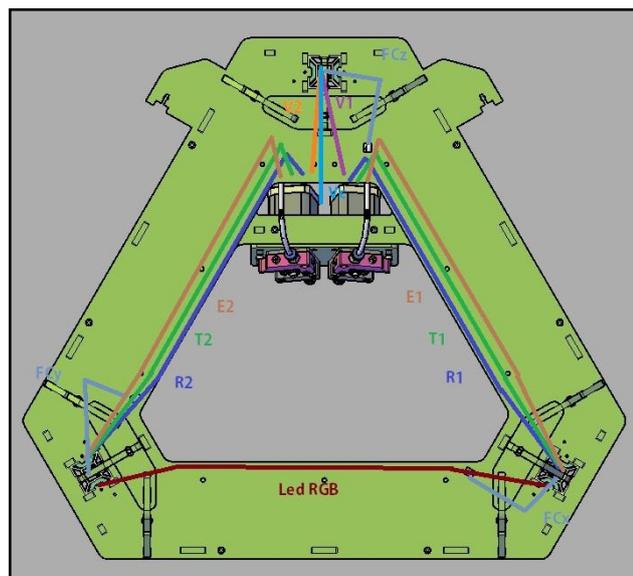


FIGURA 149: DISTRIBUCIÓN CABLES DEL PRODUCTO

4.2.7. Integración de sistema

En la diseño de detalle se previó una etapa de integración de sistemas en la que se diseñan todas las interfaces que permiten el correcto, y sinérgico funcionamiento de los diferentes sistemas del producto. Si bien estas interfaces fueron diseñadas de manera preliminar, en esta etapa se

refinan en conjunto hasta lograr una versión del producto suficientemente desarrollada como para entrar a una fase de pruebas del mismo.

La figura 151 muestra una primera iteración funcional, con respecto a ensamblaje y movimiento, del producto. Se finalizó en esta etapa el diseño del sistema de ensamblaje, es decir, que el producto es totalmente armable en este punto. Además, se implementaron los cobertores de diseño industrial de las bisagras que se muestran en la figura 151 y un detalle estético de patas en la figura 153.

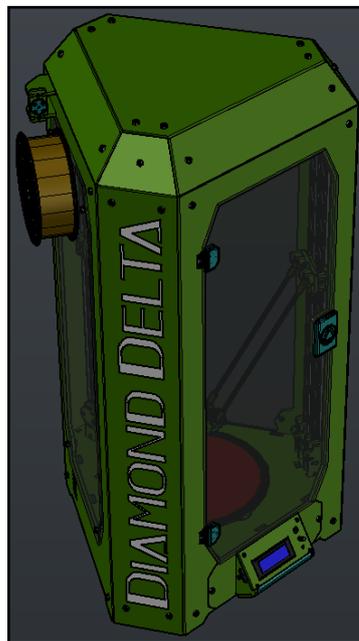


FIGURA 150: PRIMERA ITERACIÓN FUNCIONAL DEL PRODUCTO

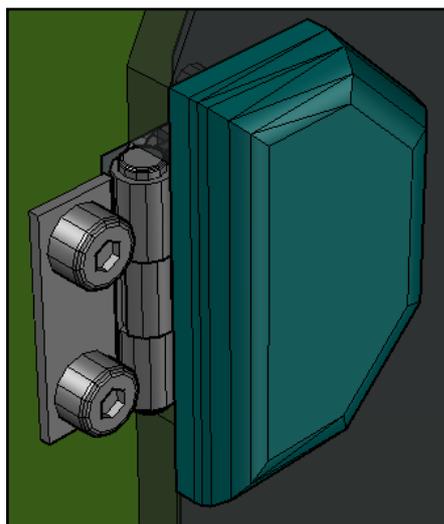


FIGURA 151: COBERTOR DISEÑO INDUSTRIAL BISAGRAS

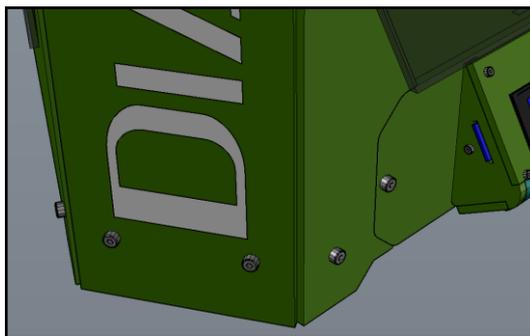


FIGURA 152: DETALLE ESTRUCTURAL EN FORMA DE PATAS PARA ESTRUCTURA

Con respecto a las interfaces que se mencionó al inicio del capítulo, se muestran en las siguientes imágenes: En la figura 154 se muestra las bases inferiores y superiores del sistema de locomoción, estas constituyen la interfaz entre el sistema de locomoción y el sistema estructural. En la figura 155 se muestra el punto de acoplamiento del mantenedor de filamento, así como el puerto de recepción de filamento, que constituyen ejemplos de interfaces del sistema de extrusión con el sistema estructural.

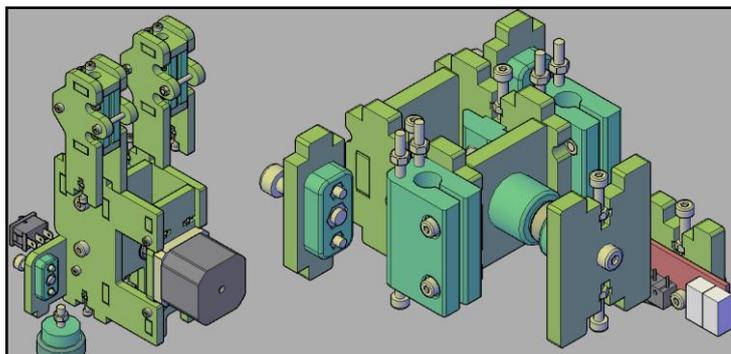


FIGURA 153: INTERFACES SISTEMA DE LOCOMOCIÓN CON SISTEMA ESTRUCTURAL

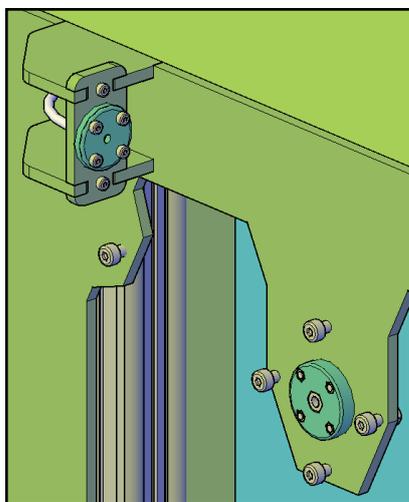


FIGURA 154: INTERFACES SISTEMA DE EXTRUSIÓN CON SISTEMA ESTRUCTURAL

Por último, y ya que se obtuvo un diseño funcional en el anterior paso, se simplificó el diseño para hacerlo más eficiente en cuanto a componentes y en cuanto en cuanto a los tiempos de ensamblaje. Se muestra en la figura 156 la iteración del producto total lograda en este punto.

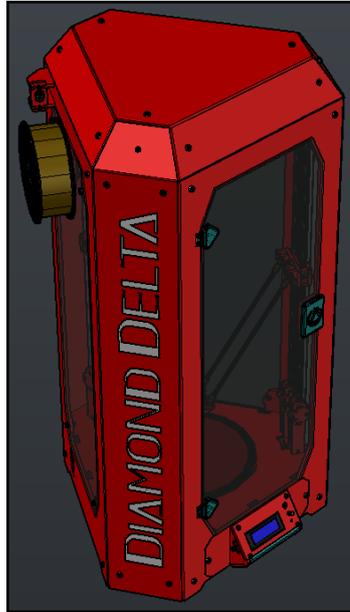


FIGURA 155: ITERACIÓN FINAL DEL PRODUCTO ANTES DE CONSTRUCCIÓN

CAPÍTULO V

5. CONSTRUCCIÓN DEL PRODUCTO

Una vez que se ha obtenido un refinamiento considerable del diseño del producto, como el que se mostró en la figura 156, se puede avanzar a la fase de construcción del mismo. Esto no implica que el diseño esté culminado, sino que el proceso de construcción dará la información necesaria al desarrollador para terminar el diseño funcional. Esto se debe a que realizar ciertas pruebas de funcionamiento en software requeriría una mayor inversión de recursos de desarrollo que entrar en una fase de pruebas, errores y calibración como la que se sigue a continuación.

Por tanto, en este capítulo se detalla no solo la construcción de la iteración resultante del anterior capítulo, sino los errores que se encontraron en la misma y cómo se corrigieron hasta obtener un prototipo funcional. Estos errores principalmente se encontraron como dimensiones incorrectas, tolerancias no consideradas, inercias de partes móviles demasiado altas para lograr una velocidad de impresión competitiva y errores funcionales que se muestran en detalle.

5.1. Pasos previos a la construcción del prototipo

Antes de la construcción formal del prototipo que se muestra en el numeral 5.3 fue necesario llevar a cabo varias actividades para asegurar una mínima probabilidad de errores en la construcción. Un ejemplo de esto puede ilustrarse teniendo en cuenta la siguiente situación:

Para el diseño del cabezal de impresión, se utilizó una aproximación digital del fusor E3D V6 cuyas medidas se estimaron en base a registros fotográficos hallados en internet. Sin embargo, era necesario antes de manufacturar partes que acoplaran este componente, verificar que estas medidas fueran tan exactas como fuera posible. Por esta razón, primero se obtuvieron los componentes físicos, con los cuales se verifico y corrigió medidas en los diseños en los casos en que fue necesario.

5.1.1. Importación de componentes de proveedores extranjeros

Como se vio anteriormente, un primer paso fue la importación de componentes extranjeros para la verificación y posible corrección de sus dimensiones. Esto se realizó mediante la empresa eBay, la cual sirvió de intermediaria para obtener componentes chinos y norteamericanos. Algunos componentes que al momento sólo se producen en el extranjero y que solo pueden ser obtenidos con rentabilidad por importación son:

- Fusores E3D V6
- Varillas lisas de acero inoxidable de 8 mm (En Ecuador sólo existen varillas diámetros en pulgadas y este es un componente que demanda mucha precisión dimensional)
- Cama caliente Onyx V6
- Correas GT2

5.1.2. Verificación y calibración dimensional de componentes de proveedores extranjeros

Como se mencionó anteriormente, para varios de los componentes importados se necesitó un proceso de verificación dimensional y en algunos casos, de corrección. Un ejemplo de estos últimos fueron los fusores, que necesitaron un proceso de re-digitalización para obtener las medidas apropiadas de los mismos. Otros componentes que requirieron este proceso fueron:

- Fuente de poder ATX de 550 W
- Fines de carrera MakerBot V1.2
- Uniones de rótula (esfera de acero-imán ranurado de neodimio)
- Cama caliente Onyx V6
- Dientes de correas GT2

5.1.3. Pruebas para las partes producidas en corte láser

Una vez verificadas y, corregidas de ser necesario, todas las dimensiones de los componentes de la impresora 3D, fue útil notar que la precisión del proceso de corte láser para obtener las piezas que constituir de la impresora, no era perfecta. Por lo tanto, fue necesario realizar pruebas para compensar errores de precisión de la máquina con la que se disponía hacer el proceso.

Por ejemplo, se muestra en la figura 157 las pruebas realizadas en este método de manufactura para el agujero cuadrado para los perfiles de aluminio en t. Se supuso al inicio de la prueba, que la compensación debía ser positiva (agujero real mayor a agujero digital).



FIGURA 156: PRUEBAS EN MDF PARA RANURA PERFILES DE ALUMINIO EN T

Debido a la luz y tamaño de la fotografía de la figura 157 no se puede apreciar que cada ranura cuadrada está nombrada desde 3200 hasta 3215 puesto que varían de forma muy pequeña sus dimensiones. La ranura en la que mejor entre el perfil de aluminio será la elegida para manufacturarse, primero en el prototipo, y después en serie.

Un proceso similar se siguió para obtener el ajuste correcto en las tuercas que se implantan mediante presión en algunas partes manufacturadas por esta técnica. Por otro lado, también se realizaron pruebas para el grabado láser y cuyo resultado se muestra en la figura 158. Es interesante recalcar que el tiempo de grabado con respecto al de corte es de aproximadamente un tercio.



FIGURA 157: PRUEBAS EN MDF DE 5.5MM DE GRABADO

Otra observación muy útil antes de entrar en el proceso de construcción, fue notar que una parte de MDF de 5.5 mm sufría un aumento de grosor considerable al ser pintada y lacada como se hizo. Se tomaron varias medidas y se aplicó un promedio para encontrar que las nuevas planchas pintadas y lacadas tenían un grosor medio de 5.8 mm. Esto implicó un largo proceso de reajuste digital del diseño final en software. Sin embargo, la calidad obtenida en el ajuste de las piezas manufacturadas en MDF fue espectacular, probablemente con el equilibrio óptimo entre ajustado y holgado.

Con todos estos ajustes realizados correctamente, se procedió a manufacturar todas las partes en MDF de 3 y 5.5 mm. El tiempo de este proceso fue de aproximadamente 5 horas. Con estas partes listas, se procedió a calibrar las medidas de las partes manufacturadas por impresión 3D como se ve a continuación.

5.1.4. Pruebas para las partes producidas en impresión 3D

Una vez que se poseen todos los elementos físicos (elementos funcionales y estructurales en MDF) para probar las partes impresas en 3D, se puede realizar un proceso iterativo de calibración para las mismas con respecto a la máquina que se está utilizando. En este caso se utilizó una MakerBot Replicator de quinta generación para la impresión de estos componentes para la impresora.

La figura 159 muestra la pieza que se pretende calibrar. Se ha nombrado a las partes de impresión 3D de acuerdo a su función. Por lo que se Sujetador de paneles finales.

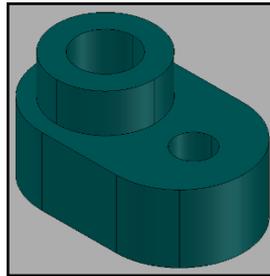


FIGURA 158: SUJETADOR DE PANELES FINALES

El agujero cilíndrico más cercano a la esquina inferior derecha de la figura tiene un diámetro de 3 mm inicialmente pues fue diseñado para ser atravesado por un perno M3. Sin embargo, al imprimir la pieza se notó que el perno no entraba con facilidad al agujero. Esto se debía a las propiedades de la impresora que se estaba utilizando.

Para compensar este error, se aumentó el diámetro de este agujero a 3.2 mm. Sin embargo, se siguió notando que el ajuste era demasiado alto, por lo que el proceso continuó hasta obtener un diámetro de 3,5 mm, el cual fue perfecto para la aplicación. Este proceso fue llevado a cabo para todas las dimensiones de los componentes manufacturados por impresión 3D, por lo que fue un largo y tedioso. Sin embargo, garantizó un ajuste óptimo en todas las piezas y una gran facilidad y rapidez de ensamble.

5.1.5. Preparación del lugar de construcción

Una vez que se obtuvieron todos los componentes necesarios para construir un prototipo del producto, se colocaron los mismos sobre una mesa firme y se apartó otra para construir sobre la misma. Varios componentes son destacables, como las partes impresas en 3D, las varillas lisas de acero inoxidable cromado, la tornillería del producto y los motores de locomoción y extrusión.

5.2. Construcción de un prototipo del mantenedor de filamento

Como primer paso en la construcción del producto se imprimieron prototipos del mantenedor de filamento expuesto en el capítulo de diseño. El

primero de estos, que sólo consta de las aletas tangenciales se muestra en la figura 161.



FIGURA 159: PRIMERA ITERACIÓN FÍSICA MANTENEDOR DE FILAMENTO

Se hizo pruebas en este prototipo para verificar su funcionamiento. Para esto, se adaptó el mismo mediante partes manufacturadas en corte láser a una impresora Replicator de quinta generación de MakerBot como se muestra en la figura 162. Las pruebas dieron resultados excelentes, pues el mecanismo reduce la fricción significativamente al tiempo que se adapta al rollo que se esté utilizando.



FIGURA 160: PRIMERA ITERACIÓN MANTENEDOR DE FILAMENTO CON REPLICATOR

Después de este último paso, se construyó una segunda iteración funcional del mantenedor de filamento. Esta poseía aletas longitudinales activadas por resortes angulares que previenen el movimiento del rollo en la posición axial como se puede apreciar en la figura 163.

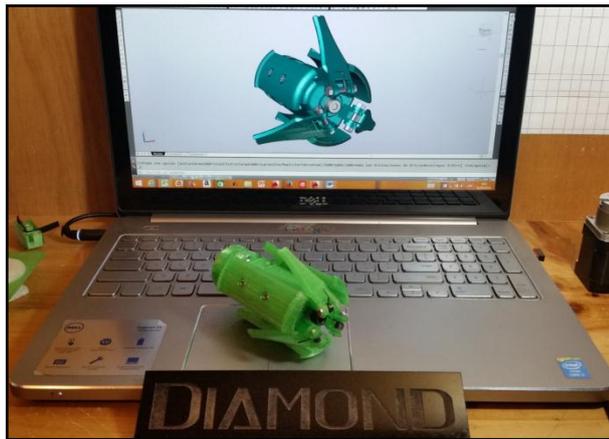


FIGURA 161: SEGUNDA Y ÚLTIMA ITERACIÓN FÍSICA DEL MANTENEDOR DE FILAMENTO

5.3. Construcción del prototipo total del producto

Para empezar con la construcción de un prototipo del producto, se siguió el proceso de ensamblaje definido anteriormente hasta obtener la base del producto que se muestra en la figura 164. La misma se cableó correctamente y se le colocó la fuente de poder, además de las bases del sistema de locomoción así como las patas del producto que poseían una parte en caucho para evitar el deslizamiento.

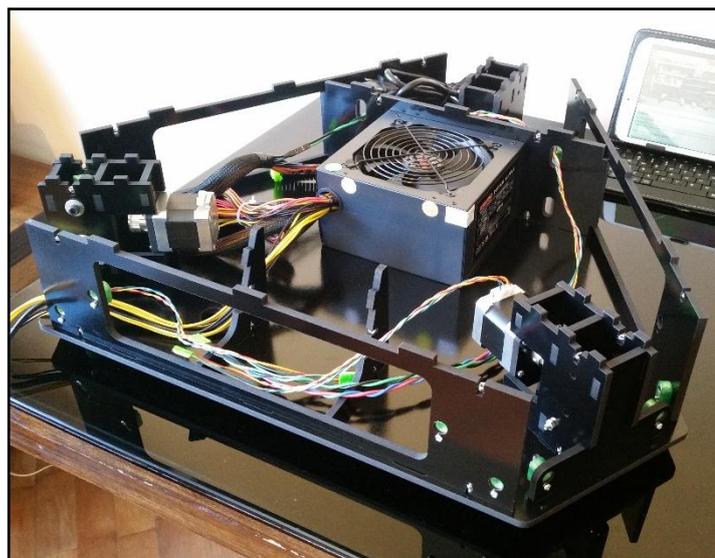


FIGURA 162: BASE DEL PRODUCTO CONSTRUIDA

La figura 165 muestra en detalle una base del sistema de locomoción. Se puede apreciar que la misma tiene acoplado un motor NEMA 17 con su

respectiva polea dentada. Además, se puede apreciar en la imagen el adaptador para paneles finales manufacturado en impresión 3D en la esquina inferior izquierda y las tuercas t para adaptar los perfiles de aluminio en la parte central de la imagen.

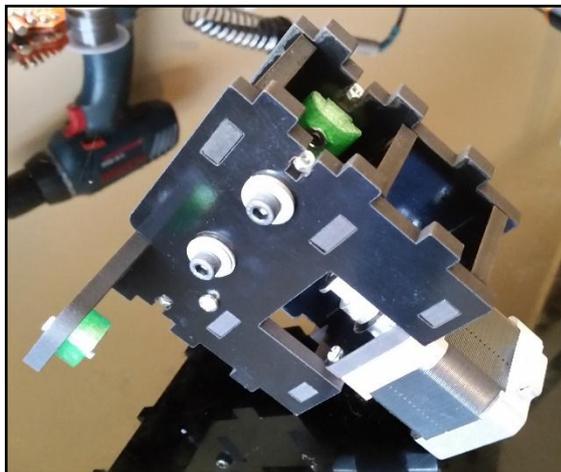


FIGURA 163: BASE DEL SISTEMA DE LOCOMOCIÓN

Se colocó y conectó preliminarmente la tarjeta madre del producto mediante sus adaptadores de MDF como se muestra en la figura 166. Estos adaptadores fueron diseñados de esta manera para que el usuario tenga un acceso fácil y rápido a la electrónica, lo que facilita la reparación y mantenimiento.

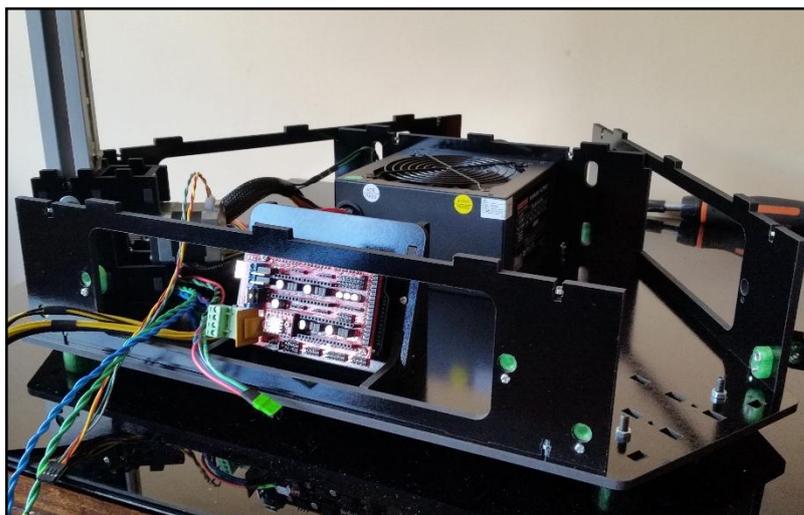


FIGURA 164: TARJETA MADRE INSTALADA

La figura 167 muestra la base del producto con todos los componentes agregados y el cableado apropiado listo. Se puede apreciar en el perfil de la parte superior izquierda de la imagen instalada la tira RGB que servirá para

proveer información rápida sobre los estados de la máquina. Además, se puede visualizar la distribución de cables diseñada para el sistema de cableado, en la que los mismos son uniformemente repartidos a través de los perfiles de aluminio en t y llevados hacia su conexión con la tarjeta madre del producto.

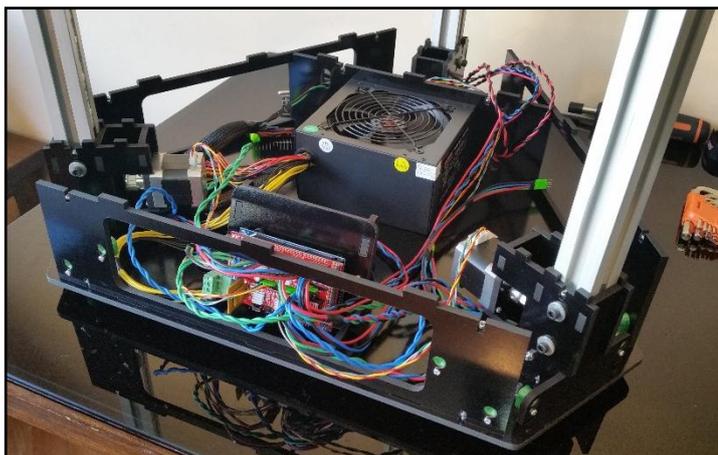


FIGURA 165: BASE DEL PRODUCTO FINALIZADA

Se muestra en la figura 168 el resultado obtenido en la construcción hasta este punto y como los cables necesarios para el cabezal de impresión y otros componentes ubicados en la parte superior del producto salen por los extremos superiores de los perfiles de aluminio.



FIGURA 166: CABLES DE COMPONENTES PARTE SUPERIOR SALEN POR PERFILES

Se realizó en este punto una prueba de las tiras LED RGB instaladas cuyo resultado se muestra en la figura 169.

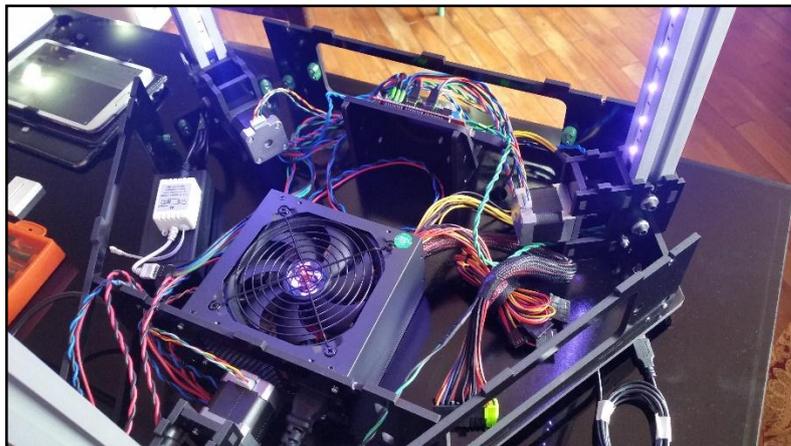


FIGURA 167: TIRAS LED RGB FUNCIONANDO

Una vez realizado el anterior paso, se instalaron varios componentes según indicaba el sistema de ensamblaje diseñado. Como primer paso, se instaló la tapa de la base del producto que contiene la cama caliente, además de los acopladores para las varillas lisas. Después, se construyeron e instalaron los carros de locomoción para instalarse finalmente el conjunto superior del producto con todos sus componentes. Esto se muestra en la figura 170.

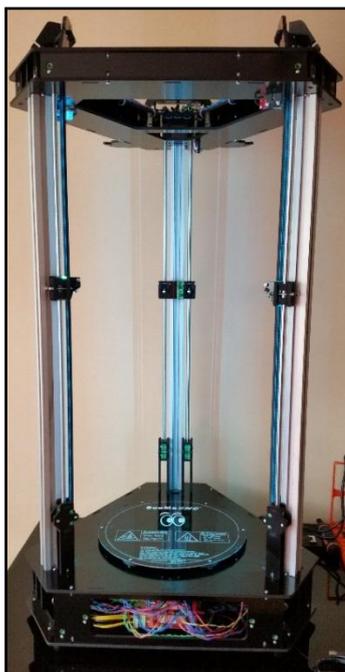


FIGURA 168: BASE SUPERIOR, CARROS DE LOCOMOCIÓN Y BASE SUPERIOR INSTALADOS

Posteriormente se instalaron los terminales fríos, el panel lateral izquierdo con su respectivo mantenedor de filamento y el cabezal de impresión con el cableado cubierto mediante malla de nylon como se muestra en la figura 171.



FIGURA 169: TERMINALES FRÍOS, PANELES LATERALES Y CABEZAL DE IMPRESIÓN, INSTALADOS

La figura 172 muestra el cabezal de impresión desde un ángulo en el cual se puede apreciar mayor detalle.

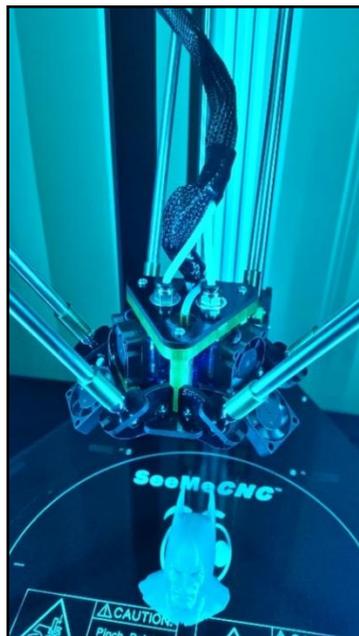


FIGURA 170: CABEZAL DE IMPRESIÓN

Posteriormente, se cubrió el producto con los paneles finales como se muestra en la figura 173. El panel frontal posee las bisagras y una cerradura con un sistema de cierre por imanes. Se puede verificar que el impacto visual del producto es muy bueno.



FIGURA 171: PANELES FINALES INSTALADOS

El producto presenta un mayor impacto visual en ambientes oscuros, en los que se puede apreciar con toda claridad el sistema de iluminación de la cámara interna del producto. Un ejemplo se muestra en la figura 174.



FIGURA 172: SISTEMA ILUMINACIÓN DE CÁMARA INTERNA

Para finalizar el proceso de construcción, se instalaron los paneles laterales pequeños de la máquina con las partes de acrílico y se acopló también la caja de interfaz de usuario del producto. Todo esto se muestra en la figura 175.



FIGURA 173: PANELES FINALES LATERALES E INTERFAZ DE USUARIO INSTALADOS

Para finalizar este apartado se muestra el producto en un ambiente oscuro y con todos los componentes instalados en la figura 176.

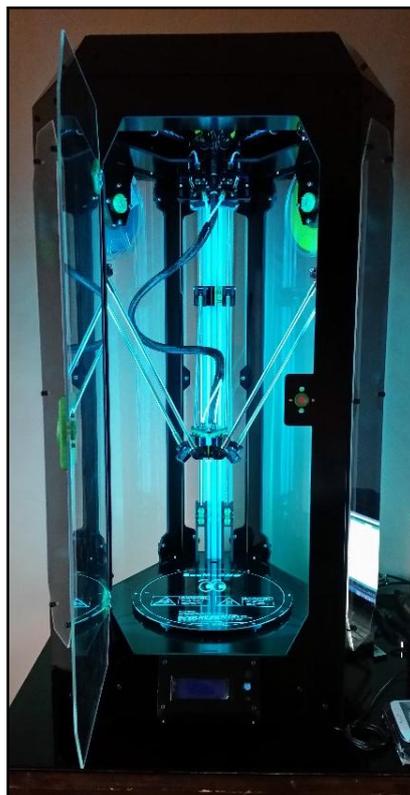


FIGURA 174: IMPRESORA 3D DIAMOND DELTA V1.0

CAPÍTULO VI

6. CALIBRACIÓN DEL FIRMWARE

Una vez finalizada la construcción mecánica y la instalación de todos los componentes electrónicos del producto, se procede a la calibración e implementación del software firmware. Como se vio en capítulos atrás, este programa controla toda la mecánica del producto, desde establecer el número de pasos necesarios de cada motor para mover de forma precisa cada carro del sistema de locomoción, hasta controlar la temperatura de los fusores y la cama caliente.

Dado que el firmware controla todos los aspectos de la impresión, su calibración es fundamental para lograr la mayor relación calidad/ velocidad de impresión de la que sea capaz la mecánica del producto. Ahora bien, calibrar el firmware es un proceso en el cual se seleccionan constantes relacionadas con la mecánica del producto y que en conjunto con el código controlan todas las funciones de la impresora.

El firmware utilizado para la impresora fue Repetier debido a su gran versatilidad y gran información disponible en la web. En algunos de los siguientes apartados se muestra la sección de código modificada en el archivo de configuración para la calibración de la variable respectiva.

A continuación se presenta un proceso estándar de calibración para una impresora delta como la que se realizó en el presente proyecto.

6.1. Comprobación de construcción mecánica correcta

La precisión dimensional de los componentes de un robot delta es mucho menos importante que la simetría que se presenta en la misma (CMINOW, 2013). Por lo tanto, la distancia entre columnas es menos crítica que el hecho de que esta distancia sea la misma en todas las columnas. Otros aspectos críticos de la construcción son el paralelismo de las columnas del robot y la equidistancia de los brazos que conectan las columnas con el cabezal de impresión.

Todos estos aspectos fueron revisados rigurosamente en el diseño mecánico del producto, y puesto que todos los componentes del producto fueron realizados con tecnologías de fabricación digital, lograr las 4 condiciones para una buena construcción del robot fue sencilla. Se describe a continuación estas 4 condiciones básicas que tuvo que cumplir el producto para continuar con el proceso de calibración:

- **Estructura rígida:** La estructura del producto es suficientemente rígida como para resistir las fuerzas internas que se generan por la disposición del cabezal de impresión en el espacio y el movimiento del mismo sin generar vibraciones que disminuyan la calidad de la impresión.
- **Paralelismo en columnas:** Las columnas están colocadas y aseguradas en su posición mediante piezas cortadas en láser con una precisión de 0.1 mm por lo que se puede asegurar que cualquier error que se presente en este aspecto será insignificante o podrá ser corregido mediante software.
- **Equidistancia de columnas:** En un robot delta cada columna debe estar ubicada a 120 grados de la otra. Un error de 1 grado puede causar grandes deformaciones en las piezas producidas y efectos trapezoidales no deseados en las mismas (Dolpin, 2015). Sin embargo, como se mencionó anteriormente, las partes que posicionan cada columna fueron producidas en corte láser por lo que se puede asegurar que el error presentado será insignificante o podrá ser fácilmente calibrado en el firmware.
- **Misma longitud en brazos diagonales:** Cada brazo diagonal debe tener la misma longitud que los otros brazos de la máquina puesto que pequeñas diferencias en sus tamaños (1 a 2 mm) pueden producir grandes deformaciones en la pieza entregada por la máquina. Sin embargo, se ha manufacturado los brazos en varilla de aluminio con un torno manual y con una precisión de 0.1 mm por lo que las diferencias en los tamaños podrían resultar insignificantes o bien ser fácilmente calibradas por firmware.

6.2. Calibración de pasos por milímetros de carros

En este punto de la calibración se debe calcular cuántos micro-pasos (impulsos del driver del motor) se deben realizar para que el carro del sistema de locomoción se mueva 1 mm. Para esto, se utiliza la siguiente fórmula basada en las características mecánicas de construcción:

$$\begin{aligned} & \text{Pasos Por Milímetro} \\ &= \frac{((\text{Pasos por vuelta del motor}) * (\text{Micropasos del driver}))}{((\text{Paso de la Correa}) * (\text{Número de dientes de engrane acoplador}))} \end{aligned}$$

$$\text{Pasos por vuelta del motor} = 200$$

Ya que el motor debe dar 200 pasos a 1.8 grados por paso para completar los 360 grados.

$$\text{Micropasos del driver} = 16$$

El driver A4988 seleccionado está configurado para dividir cada paso del motor en 16 partes o 16 micropasos.

$$\text{Paso de la correa} = 2$$

La correa GT-2 seleccionada debido a la alta precisión con la que es producida recorre 2 mm para el movimiento de un diente del engrane acoplador.

$$\text{Número de dientes del engrane acoplador} = 20$$

Reemplazando los valores anteriores en la ecuación obtenemos que:

$$\text{Pasos por milímetro} = \frac{200 \times 16}{2 \times 20} = 80 \frac{\text{pasos}}{\text{mm}}$$

Ahora bien, este valor de 80 pasos por milímetro es simplemente un valor teórico que no considera muchísimos fenómenos que en menor o mayor medida se presentan en el producto, como fricción en los ejes de movimiento y pesos de las piezas móviles, sin embargo, se utiliza como valor inicial de calibración.

Para verificar este valor, y corregirlo si es necesario, se envía un movimiento de 100 mm en cada eje. Si este valor se cumple realmente, se puede mantener el valor de 80 mm, pero si este valor es diferente, se puede

utilizar varias iteraciones de la siguiente fórmula para corregir el movimiento de cada eje hasta la precisión sea la adecuada.

$$\begin{aligned} & \text{Nuevos pasos por milímetros del motor} \\ &= \frac{\text{Distancia medida}}{\text{Distancia enviada}} \\ & \times \text{Antiguos pasos por milímetro del motor} \end{aligned}$$

6.3. Calibración de pasos por milímetros de extrusores

Para la calibración de pasos por milímetros de los extrusores, se utiliza un proceso iterativo hasta obtener resultados suficientemente precisos. Primero, se establece un valor inicial de los pasos por milímetros de los mecanismos extrusores. Este valor se inició en 300.

Después de esto, se envía la orden mediante el software host de imprimir 100 mm de material y se mide la cantidad real que imprimió para recalibrar utilizando la fórmula utilizada anteriormente. Fueron necesarias 2 iteraciones hasta obtener un resultado suficientemente preciso. Las operaciones realizadas se muestran a continuación.

Primera iteración:

$$\begin{aligned} \text{Nuevos pasos por milímetro del extrusor} &= \frac{152.3}{100} \times 300 \\ \text{Nuevos pasos por milímetro del extrusor} &= 456.9 \frac{\text{pasos}}{\text{mm}} \end{aligned}$$

Segunda iteración:

$$\begin{aligned} \text{Nuevos pasos por milímetro del extrusor} &= \frac{101.12}{100} \times 456.9 \\ \text{Nuevos pasos por milímetro del extrusor} &= 462.02 \frac{\text{pasos}}{\text{mm}} \end{aligned}$$

No hubo necesidad de una tercera iteración ya que al ingresar el valor obtenido en la segunda iteración se obtuvo un resultado suficientemente preciso.

6.4. Constantes PID para cama caliente y fusores

Para encontrar las constantes PID para el sistema de control de temperatura de la cama caliente y de los fusores se utilizó la función de autotune del software host (en este caso, Repetier Host).

Mediante el comando g M303 podemos pedir a la máquina que encuentre constantes apropiadas para el control de temperatura. Los comandos que se utilizaron para este fin, fueron:

M303 E0 S215 C8 Que encuentra las constantes PID para el extrusor 0 con una temperatura objetivo de 215 grados y un análisis de 8 ciclos.

M303 E1 S215 C8 Que encuentra las constantes PID para el extrusor 1 con una temperatura objetivo de 215 grados y un análisis de 8 ciclos. Dado que se utilizó 2 fusores idénticos, las constantes que entrega el software son muy similares a las del extrusor 0.

M303 E-1 S90 C8 Que encuentra las constantes PID para la cama caliente con una temperatura objetivo de 90 grados y un análisis de 8 ciclos.

Después de realizar este proceso se encontró que las constantes para los fusores fueron:

$$K_p = 26.54$$

$$K_I = 2.78$$

$$K_D = 63.27$$

Las constantes para la cama caliente fueron:

$$K_p = 235.99$$

$$K_I = 9.3$$

$$K_D = 1496.34$$

6.5. Calibración inicial de altura de impresión

Para calibrar la altura de impresión, enviamos el cabezal de impresión a la mínima altura posible realizando lo siguiente:

G1 Z5 F10000 *que le indica a la máquina que posicione el cabezal a 5 mm de la cama. Después de esto utilizamos el control manual para bajar la punta del cabezal hasta que una hoja de papel pase con cierta fricción entre el cabezal y la cama.*

Cuando obtengamos esto, vemos la posición en Z que indica el control manual y la restamos de la distancia teórica que habíamos ingresado antes en el firmware. Ejemplo:

MANUAL_Z_HOME_POS 456 //Antes del procedimiento

Distancia medida en el procedimiento: 1.9 mm

Nueva Altura = Vieja Altura – Distancia Medida en Host

Nueva Altura = 456 – 1.9 = 454.1 mm

MANUAL_Z_HOME_POS 454.1 //Después del procedimiento

6.6. Calibración de tornillos de torres

Para calibrar la posición de cada carro con respecto a cada torre se debe ajustar la distancia entre el carro y la cabeza de su respectivo tornillo de manera que si el extrusor se posiciona en 0 mm (teórico) en su posición más cercana posible a esa torre, una hoja de papel pueda pasar entre la cama y el nozzle con algo de fricción.

Una vez ajustado el tornillo de la torre A se procede a ajustar el tornillo de la torre B, para después ajustar el tornillo de la torre C. Después de esto, normalmente se verifica que el tornillo de ajuste de la torre A siga calibrado y se repite el proceso hasta que las 3 torres se encuentren calibradas simultáneamente.

6.7. Calibración de impresión plana

Una vez realizado el proceso del numeral 6.6 debemos verificar que el punto un cuarto punto ubicado en el centro del área de impresión, se encuentre calibrado. Para esto, seguimos el siguiente proceso:

G1 Z5 F10000 //Enviamos el cabezal a una altura de 5 mm.

Después de esto, bajamos el cabezal de impresión poco a poco hasta que z sea 0 o el nozzle haya topado la cama con la prueba del papel. Con lo que actuamos dependiendo de cuál de los siguientes casos se presente:

Si el nozzle está ubicado en $Z = 0$ según el firmware pero aún no ha tocado realmente la cama significa el robot se mueve en una superficie cóncava y aunque el cabezal cumpla la condición del papel en los 3 puntos de las columnas, está por encima de $Z = 0$ en el centro de la cama. Por lo que para bajarlo necesitamos aumentar la variable `DELTA_SMOOTH_ROD_OFFSET` por una unidad para comenzar y repetir el proceso del numeral 6.5. para poder verificar de nuevo la posición del nozzle. Eventualmente y mediante algunas iteraciones, se encontrará el valor correcto de esta variable para que la prueba del papel se cumpla en los 4 puntos del plano.

Evidentemente, si Z es mayor a 0 en el Host pero el nozzle no puede bajar más porque chocaría con la cama tenemos que el robot delta se mueve en una superficie convexa y debemos disminuir la variable `DELTA_SMOOTH_ROD_OFFSET`.

Este es un proceso largo y que requiere paciencia. Sin embargo, solo se debe realizar una vez para una construcción específica del producto, otras calibraciones pequeñas y periódicas pueden ser compensadas por el procedimiento de auto-nivelación.

6.8. Corrección de dimensiones de piezas

Después de la realización correcta de los anteriores procedimientos de calibración, la impresora imprime correctamente con respecto a la forma de la pieza y dimensión en z . Por otro lado, lo más probable es que las dimensiones en X y Y todavía no sean lo suficientemente precisas. Para esto, imprimimos un cubo de calibración de arista 2 cm, medimos sus dimensiones reales y aplicamos la siguiente fórmula que ajusta la dimensión de una variable llamada `DELTA_DIAGONAL_ROD` en el firmware.

$$\begin{aligned} & \text{NuevoDELTA_DIAGONAL_ROD} \\ &= \frac{\text{Distancia medida}}{\text{Distancia enviada}} \times \text{AntiguosDELTA_DIAGONAL_ROD} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{NuevoDELTA_DIAGONAL_ROD} \\ &= \frac{\text{Distancia medida}}{\text{Distancia enviada}} \times \text{AntiguosDELTA_DIAGONAL_ROD} \end{aligned}$$

$$\text{NuevoDELTA_DIAGONAL_ROD} = \frac{1.98}{2} \times 335 = 331.65$$

Una vez realizado todos los anteriores procedimientos, la impresora está totalmente calibrada y lista para su utilización.

CAPÍTULO VII

7. PRUEBAS Y RESULTADOS

En los siguientes numerales se muestra el proceso de comprobación que se siguió para cada una de las funciones principales de la impresora diseñada en el presente proyecto. Seguido de esto se muestra los resultados de las mismas junto con imágenes que los respaldan cuando sea necesario.

7.1. Funciones de la impresora

- *Posicionamiento del sistema de locomoción*

Se comprobó el sistema de posicionamiento de la impresora enviando algunos comandos de movimiento en el control manual del Host y midiendo las distancias reales que se desplazó el cabezal. Se comprobó que el sistema de locomoción funcionaba de forma correcta y estaba listo para su utilización.

- *Control de temperatura de fusores*

Para comprobar el funcionamiento del control de temperatura de los fusores enviamos la orden a la máquina de calentar el primer fusor (extrusor 0) a 200 C y analizamos la gráfica entregada por el Host que se muestra en la figura 176.

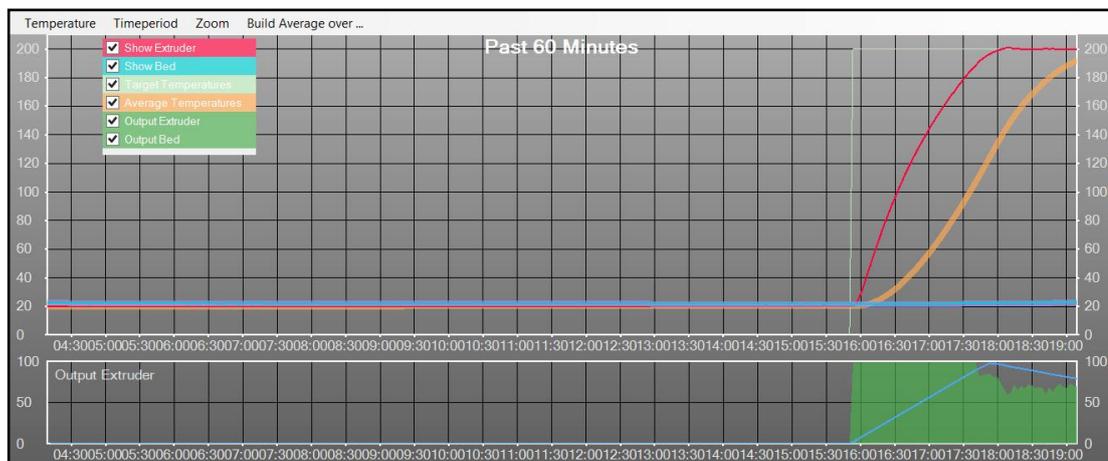


FIGURA 175: CURVA DE TEMPERATURA DEL FUSOR 1

Como se puede ver en la anterior gráfica, la temperatura del extrusor subió de forma suave y rápida hasta el objetivo de 200 grados en tan solo 2 minutos y 30 segundos, por lo que podemos afirmar que el sistema PID para este elemento se instaló y calibró de forma correcta.

Dado que el fusor 2 posee las mismas características mecánicas y eléctricas del fusor 1 y por tanto las mismas constantes PID, podemos afirmar que el sistema de control de temperatura para este elemento también funciona de manera correcta y por tanto no se incluye su curva de temperatura en este apartado (aunque esta fue comprobada).

- *Control de temperatura de cama caliente*

Para comprobar el funcionamiento del control de temperatura de la cama caliente enviamos la orden a la máquina de calentar la misma a 70 C y analizamos la gráfica entregada por el Host que se muestra en la figura 178.

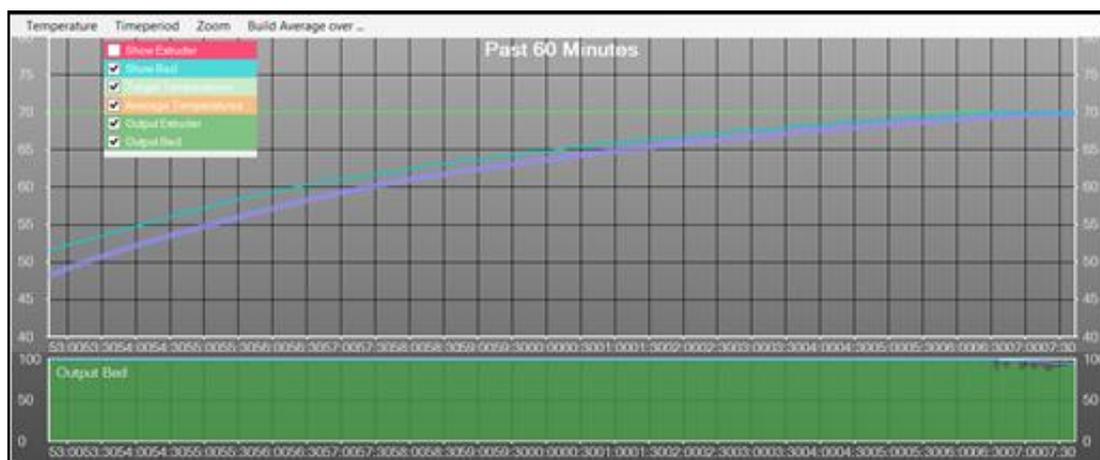


FIGURA 176: CURVA DE TEMPERATURA DE LA CAMA CALIENTE

Como se puede ver en la anterior gráfica, la temperatura del extrusor subió de forma suave hasta el objetivo de 70 grados en 20 minutos, por lo que podemos afirmar que el sistema PID para este elemento se instaló y calibró de forma correcta, teniendo en cuenta que llevar un elemento de grandes dimensiones a esta temperatura lleva tiempo.

Este tiempo, que en principio podría parecer largo para una sola impresión, puede disminuirse si tenemos en cuenta que solo es necesario calentar la cama una vez para utilizarla con muchas impresiones.

- *Interfaz de usuario*

Se probaron todas las funciones de la interfaz de usuario, desde el HOME hasta el precalentamiento de la máquina, y se comprobó que su funcionamiento era correcto. En la figura 179 se puede apreciar el menú principal de la interfaz de usuario que muestra información relevante sobre el estado de la máquina.



FIGURA 177: MENÚ PRINCIPAL DE LA INTERFAZ DE USUARIO

- *Mantenedor de filamento*

La función del mantenedor de filamento diseñado es aceptar varios tamaños de rollos y darles soporte tanto tangencialmente como axialmente. Esto es deseable ya que las bobinas disponibles en el mercado varían mucho en tamaños. La figura 180 muestra una bobina de filamento estándar instalada en el mantenedor izquierdo de la máquina.



FIGURA 178: MANTENEDOR DE FILAMENTO IZQUIERDO

- *Extrusores*

Después del rediseño de los mecanismos extrusores reemplazando el motor NEMA 17 convencional por uno con una caja de engranes planetarios para obtener mayor torque, se obtuvo resultados excelentes en la extrusión del plástico. Se puede apreciar los mecanismos extrusores de la máquina cargados con filamento en la figura 181.

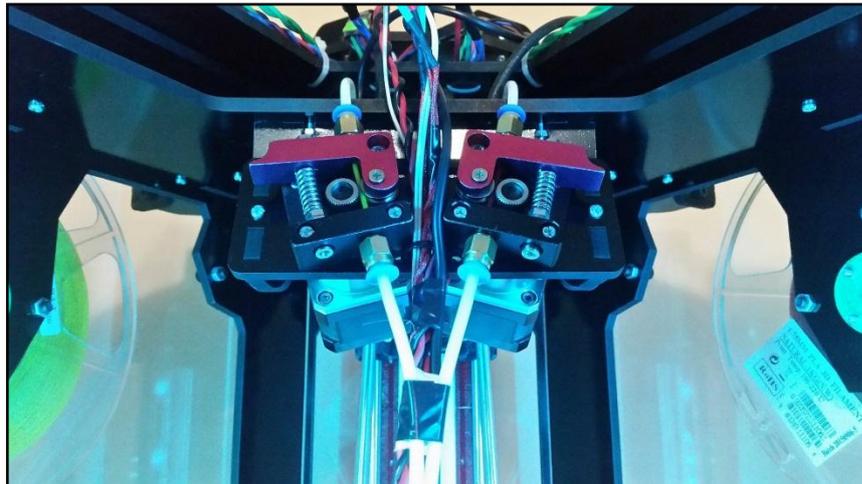


FIGURA 179: MECANISMOS EXTRUSORES INSTALADOS Y CARGADOS CON FILAMENTO

- *Auto-nivelación*

La impresión de la primera capa para una impresora 3D con tecnología FDM es crítica para alcanzar un proceso de impresión exitoso. La distancia entre el nozzle y la cama caliente cuando el software cree que la posición del cabezal es 0 mm es importante debido a que determina si la primera capa de material se depositaba de forma que su adherencia soporte la construcción de las capas posteriores sin estar aplastada. Esta distancia óptima se encuentra en un intervalo de distancias aceptables (en el rango de μm). Por debajo de este intervalo, la primera capa se aplastará, provocando un fallo en el proceso de impresión. Por otro lado, por encima de este intervalo, la primera capa de material no conseguirá una adherencia correcta a la cama, por lo que también en este caso fallará. Si la distancia entre el nozzle y la cama caliente se encuentra dentro de este intervalo, la impresión será exitosa. Esta es conocida como la condición de primera capa.

Sin embargo, la superficie de la cama no es perfectamente plana, puesto que presenta imperfecciones en el rango de décimas de milímetro que afectan a la condición de primera capa en distintas partes de la misma.

La función de auto-nivelado crea una matriz virtual que refleja estas imperfecciones a través de un proceso de regresión para encontrar una superficie aproximada de la cama y compensa por software según sea conveniente bajando y subiendo el extrusor la distancia indicada por esta superficie aproximada.

Esto permite una impresión de la primera capa de mayor calidad que si no se utilizara esta función. La figura 182 muestra la impresión de la primera capa sin proceso de auto-nivelación, se puede apreciar que algunas partes están aplastadas, mientras que otras ni siquiera fueron impresas. Mientras que la figura 183 muestra la misma impresión aplicando el proceso de auto-nivelación en la que se puede apreciar que la primera capa está impresa de forma correcta.

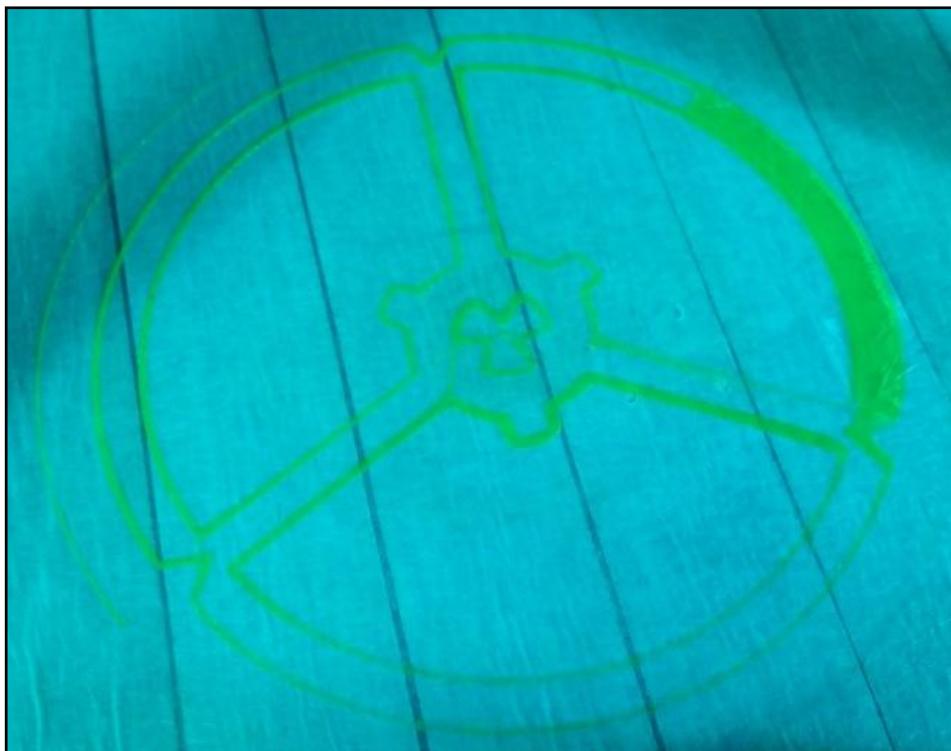


FIGURA 180: PRIMERA CAPA NO NIVELADA

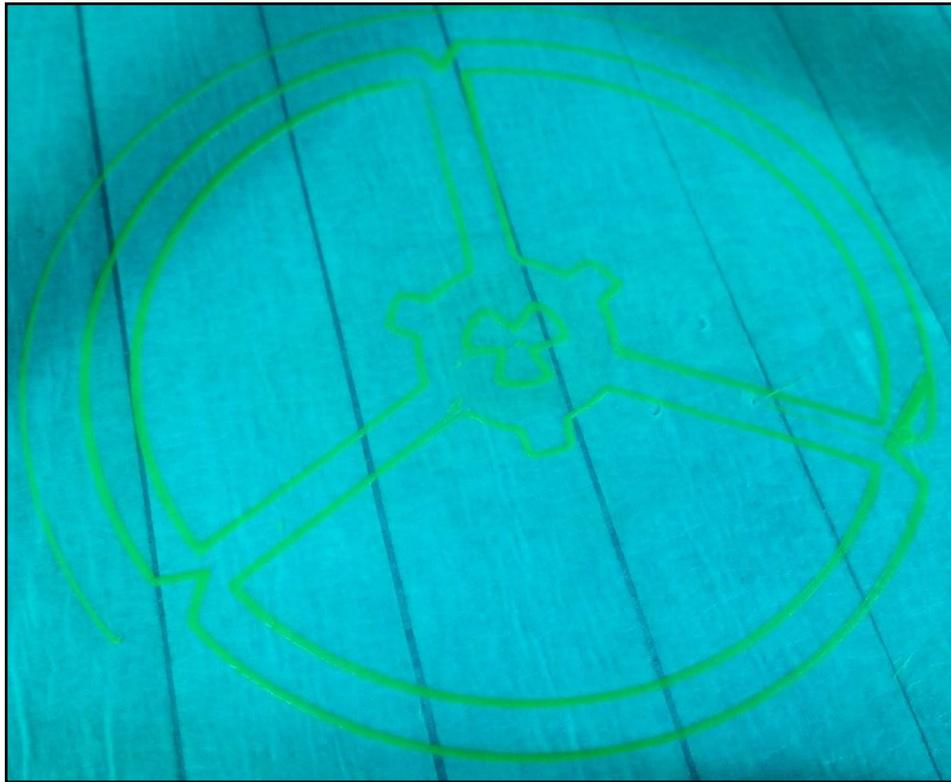


FIGURA 181: PRIMERA CAPA NIVELADA

7.2. Impresión en PLA a 1 color

Se realizó gran cantidad de piezas de prueba probando distintos parámetros de configuración de índole mecánica, electrónica y de programación como se puede apreciar en la figura 184. En la misma se puede apreciar un aumento progresivo de la calidad de impresión de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo.



FIGURA 182: EVOLUCIÓN DE LA CALIDAD DE IMPRESIÓN

La calidad máxima de impresión a la que puede llegar el producto todavía no se ha alcanzado, sin embargo, a la fecha de presentación de este documento, se han logrado piezas de gran calidad como las que se muestra en la figura 185.



FIGURA 183: CALIDAD ACTUAL DE IMPRESIÓN DE 1 COLOR

7.3. Impresión en PLA a 2 colores

Igualmente, se realizaron algunas pruebas de impresión para la función de impresión en 2 colores. El resultado final de estas pruebas se muestra en la figura 186.



FIGURA 184: CALIDAD ACTUAL DE IMPRESIÓN DE 2 COLORES

CAPÍTULO VIII

8. ANÁLISIS ECONÓMICO DEL PRODUCTO

En el presente capítulo se realiza un análisis económico del producto pretendiendo seguir las pautas más reales posibles, debido a que en realidad se introducirá al mismo en el mercado. A saber, estas pautas son:

- Inversión inicial reducida
- Equipo de trabajo pequeño (1 o 2 socios que realizan todas las actividades de la empresa)
- Debido a la falta de inversión inicial el producto se empezará produciendo en un departamento.
- Las herramientas necesarias para el ensamblaje de cada unidad ya se las posee, por lo que no se consideran en los costos.
- Si se considera contratar personas para ensamblar las máquinas. Sin embargo, estas no requieren tener experiencia o estar cualificadas en este campo puesto que el diseño del producto está pensado para ensamblarse mediante un mínimo de herramientas y conocimientos.

8.1. Análisis de costos

A continuación, se detallan los costos de producción de una impresora 3D como la diseñada en el presente proyecto. Para esto, se distinguen 2 tipos de costos: los fijos, que hacen referencia a los gastos independientes de número de unidades producidas en cada mes y los variables, que son costos que si dependen de la misma.

8.1.1. Costos fijos

Son costos que deben pagarse sin depender del número de unidades producidas para un tiempo determinado. En este caso se utilizará 1 mes.

Arriendo de instalaciones

Un producto como el diseñado en el presente proyecto, no produce cantidades de contaminación significativas en su elaboración, por lo que se ha decidido arrendar un departamento pequeño en una zona no comercial de Quito como instalación de manufactura. El costo de arriendo del mismo es de 250 dólares.

Servicios básicos

Evidentemente, esta variable se estima basada en la experiencia en otros proyectos. Los servicios básicos, que incluyen: energía eléctrica, agua potable, teléfono, internet y mantenimiento de las instalaciones se estimarán en 150 dólares.

Sueldos de trabajadores

Para ensamblar cada producto se requiere mano de obra, sin embargo, esta no requiere ninguna cualificación antes de empezar el trabajo. Se ha estimado en base al diseño y experiencia construyendo el producto, que un ensamblador podría construir 4 unidades de Diamond Delta al mes, con un sueldo básico de 366 dólares cuya estimación final será de 400 dólares. Se empezará estimando que la empresa posee 1 solo trabajador.

Sueldo de los socios

Se estimará un sueldo de 1000 dólares para 1 sólo desarrollador y socio actual de la empresa. Debido a esto, los costos fijos de la empresa son de 1800 dólares. Sin embargo, se estimarán en 2000 dólares como seguro para cualquier imprevisto.

8.1.2. Costos variables

Se calculan a continuación los costos que se dan por cada unidad producida. Se los denomina variables ya que aumentan con la cantidad de máquinas producidas al mes.

Materiales, servicios y ensamblaje

Los costos de producción necesarios para una unidad de Diamond Delta se muestran en la tablas 29.

TABLA 29:

LISTA DE MATERIALES Y PROCESOS DIAMOND DELTA

Lista de materiales y procesos			
Conjunto de componentes	Costo	Proveedor N	Costo Producción
Pernos y Tuercas	22,5	100%	1116,82
Partes Impresas	30	100%	
Tableros MDF	26,97	100%	
Electrónica	199,4	5%	
Locomoción	188,6	25%	
Misceláneo	130,3	20%	
Procesos	230	100%	
Costos adicionales	289,1	100%	

Como se puede apreciar, el precio de meta de 2000 dólares es totalmente alcanzable.

Servicio de entrega y embalaje

Cada unidad vendida se entrega en la ubicación del comprador, por lo que este costo para la ciudad de Quito se ha estimado en 50 dólares. Por lo tanto, el precio total de producción y entrega de una máquina como la diseñada en el presente proyecto es de 1166.82 dólares, lo que para un precio de venta de 2000 dólares genera una utilidad de 833.18 dólares.

8.2. Cálculo del punto de equilibrio

El punto de equilibrio para un producto se define como el número de unidades que se deben producir y vender para no generar ganancias ni pérdidas en la empresa.

Partamos entonces de la utilidad percibida por cada unidad vendida de Diamond Delta.

$$Utilidad = 833.18 \text{ dólares}$$

Después de esto, definamos los costos fijos del producto para un tiempo de 1 mes.

$$Costos \text{ fijos} = 2000 \text{ dólares}$$

Notemos que el punto de equilibrio puede ser calculado dividiendo los costos fijos de la empresa entre la utilidad de un producto puesto que esta es la cantidad de máquinas que deben ser vendidas para pagar únicamente los costos fijos de la empresa, sin generar ganancias pero tampoco pérdidas.

$$Punto \text{ de equilibrio} = \frac{Costos \text{ fijos}}{Utilidad}$$

$$Punto \text{ de equilibrio} = \frac{2000}{833.18} = 2.4 \text{ unidades}$$

Por tanto, observamos que la empresa debe vender 3 unidades al mes del producto para obtener una mínima ganancia.

CAPÍTULO IX

9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

9.1. Conclusiones

- La estructura del producto es suficientemente rígida como para resistir las fuerzas internas que se generan por la disposición del cabezal de impresión en el espacio y el movimiento del mismo sin generar vibraciones que disminuyan la calidad de la impresión.
- Las columnas están colocadas y aseguradas en su posición mediante piezas cortadas en láser con una precisión de 0.1 mm por lo que se puede asegurar que cualquier error que se presente en este aspecto será insignificante o podrá ser corregido mediante software.
- Se logró un aumento del volumen de impresión en un 233.76% con respecto al anterior prototipo de la universidad sin aumento del volumen de la máquina.
- Se alcanzó un diseño de mantenedor de filamento que admite gran variedad de rollos disponibles en el mercado mediante la implementación de un nuevo concepto con aletas axiales y tangenciales que compensan las variaciones en el diámetro interno y grosor de las bobinas.
- Se diseñó el cabezal de la máquina para ser modular, esto quiere decir que su acoplamiento (tanto mecánico como electrónico) es extremadamente rápido. Esto en principio permite facilidad de ensamblaje al usuario, pero también permite mejoras a futuro de la máquina, como nuevos módulos para corte láser y maquinado.
- El precio establecido en el alcance del proyecto se logró de forma satisfactoria. Sin embargo, aún se deben superar algunos obstáculos de producción antes de implementar el diseño en el mercado. Ejemplos de esto son reducir significativamente la cantidad de piezas manufacturadas en impresión 3D, puesto que estas partes aumentan en gran medida los tiempos de producción.

- Se implementó una cama caliente en el diseño que logra una mejor adherencia de la pieza a realizar en la máquina y el evita el warping de la misma.
- La tarjeta electrónica utilizada como interfaz de usuario implementa una pantalla LCD que junto a un encoder permite controlar las funciones de la máquina sin depender de la conexión con un computador. Además, una ranura para una tarjeta SD permite la impresión de piezas sin la necesidad de utilizar un computador.
- La función de auto-calibración de cama permite alcanzar la condición de primera capa. Esta permite a la máquina compensar cualquier deformación de la cama o imperfecciones pequeñas en el calibrado manual inicial para obtener una primera capa adherida de forma optimizada, elemento clave para un proceso de impresión exitoso.
- La máquina es totalmente replicable a gran escala. Esto se logró ya que se diseñó e implementó el prototipo considerando siempre en los aspectos de producción y manufactura, por lo que se tuvo especial atención en el sistema de ensamblaje.

9.2. Recomendaciones

- Se recomienda sustituir las varillas lisas de 8 mm utilizadas en el actual diseño por varillas de 16 mm recocidas para evitar el problema de flexión de las de 8 mm, lo que mejorará notablemente la calidad de impresión.
- El volumen total de la máquina podría reducirse notablemente si se diseña un cabezal con menor distancia entre su centro geométrico y las juntas articuladas.
- El sistema de ensamblaje del producto podría mejorarse reemplazando las cubiertas laterales pequeñas por partes de acrílico dobladas con calor. Esto a su vez implicaría una cámara totalmente cerrada, por lo que en un futuro se podría implementar un control interno de temperatura.
- La modularidad del cabezal de impresión se debe mejorar implementado un puerto de conexión eléctrica de rápida conexión y desconexión.

- El proceso de carga de filamento debe mejorarse, ya que al momento, aunque es funcional, no resulta cómodo ni fácil para el usuario.
- El diseño actual se puede simplificar fusionando las funciones de varias piezas. Esto implicaría menores costes debido a una mayor facilidad de manufactura.
- El diseño de la puerta se puede mejorar para una mayor comodidad del usuario mediante una puerta corrediza que al abrirse se oculte por dentro de la cámara interna.
- Se podría implementar una electrónica más robusta como la tarjeta RAMBO o una GEN32. Esto permitirá una mayor calidad de impresión al tiempo que aumentará significativamente la robustez del producto.
- Una rigidez estructural mayor podría lograrse mediante el diseño y la implementación de un marco estructural totalmente compuesto por perfiles de aluminio en T y con juntas de impresión 3D de alta densidad (se recomienda 80%).
- Se puede lograr velocidades de impresión mayores si se rediseña los eslabones móviles del robot con una optimización de bajo peso.
Esto, como se sabe, implica una menor inercia de las partes móviles al moverse, por lo que las piezas podrían realizarse en un menor tiempo.
- El sistema de iluminación interna mediante luces led RGB puede mejorarse si estas se ubican de tal manera que el usuario de la máquina nunca las vea de forma directa. Esto permitiría una correcta iluminación de la cámara interna, al tiempo que haría más cómodo el producto para el usuario.
- Debido a que el producto se enfoca a la calidad más que al costo, podría reemplazarse la tarjeta RepRap Smart Controller que posee un LCD simple, con una tarjeta Full Graphics que dotaría de mayor imponenci y versatilidad al producto.
- Una simulación de la rigidez de los eslabones del robot es necesaria antes de empezar el proceso de construcción. Esto permite ahorrar innumerables horas de corrección y costos de prototipaje.

- Las partes móviles de todo robot deben optimizarse en peso mientras que mantienen gran rigidez (para la gran mayoría de aplicaciones, y una impresora 3D no es la excepción).

9.3. Trabajos futuros

- Se realizará una actualización de la tarjeta electrónica del producto desde un procesamiento de 8 bits como el actual hasta un procesamiento de 32 bits con la tarjeta Smootieborad. Esto permitirá controlar de mejor manera el control de locomoción de una impresora delta.
- Se realizará un rediseño completo del cabezal de impresión optimizándolo en volumen, peso, rigidez y simplicidad. Una reducción del volumen de cabezal implicará una disminución en el volumen de la máquina.
- Se realizará un rediseño completo de todos los componentes del sistema de locomoción para asegurar que resistan los esfuerzos producidos en los mismos sin una deformación significativa. Esto permitirá una confiabilidad mucho mayor del diseño en la etapa de software, reduciendo significativamente los costos en prototipos.
- Se realizará un rediseño completo del mecanismo extrusor de manera que el nuevo diseño incorpore guías que imposibiliten el paso del hilo de filamento de forma incorrecta. Además, se evaluará si se puede reducir el torque de los motores extrusores mediante la inclusión de un mecanismo tipo Greg.
- Se realizará un rediseño parcial del sistema estructural para reducir significativamente el número de componentes del mismo y el nivel de complejidad de ensamblaje.
- Se planea sustituir los componentes de la cubierta de diseño industrial para obtener un diseño industrial más curvo.

BIBLIOGRAFÍA

- 3DSystems. (24 de 10 de 2016). 3D Systems. Obtenido de 3D Systems: <https://prod.cubify.com/>
- ABSPlastic. (26 de 09 de 2016). <http://www.absplastic.eu/>. Obtenido de <http://www.absplastic.eu/>: <http://www.absplastic.eu/5-most-popular-3d-printing-thermoplastics/>
- Atom3dp. (20 de 10 de 2016). Atom3dp. Obtenido de Atom3dp: http://www.atom3dp.com/en/atom25_en_home/
- CMINOW. (21 de 08 de 2013). MINOW. Obtenido de MINOW: <http://minow.blogspot.com/>
- DIWO. (04 de 09 de 2016). DIWO. Obtenido de DIWO: <http://diwo.bq.com/sistema-double-drive-gear-y-tracciona-todo-lo-que-necesites/>
- Dolpin. (28 de 03 de 2015). Thingiverse. Obtenido de Thingiverse: <http://www.thingiverse.com/thing:745523>
- E3DOnline. (18 de 10 de 2016). E3D Online. Obtenido de E3D Online: <http://e3d-online.com/E3D-v6>
- Filament2Print. (18 de 10 de 2016). Filament2Print. Obtenido de Filament2Print: http://filament2print.com/es/blog/9_Dudas-habituales-sobre-la-temperatura-y-la-ve.html
- Isaacson, W. (2011). Steve Jobs La biografía. California: Independiente.
- KickStarter. (26 de 10 de 2016). KickStarter. Obtenido de KickStarter: <https://www.kickstarter.com/projects/aiorobotics/zeus-the-worlds-first-all-in-one-3d-copy-machine?lang=es>
- KikaiLabs. (29 de 10 de 2016). KikaiLabs. Obtenido de KikaiLabs: <http://kikailabs.com.ar/>
- LulzBot. (25 de 10 de 2016). LulzBot. Obtenido de LulzBot: <https://www.lulzbot.com/>
- MakerBot. (20 de 10 de 2016). MakerBot. Obtenido de MakerBot: <https://store.makerbot.com/printers/replicator-mini/>

- matterhackers. (26 de 09 de 2016). www.matterhackers.com. Obtenido de www.matterhackers.com: <https://www.matterhackers.com/store/3d-printer-filament/hips-175mm-1kg>
- ORDSolutions. (25 de 10 de 2016). ORD Solutions. Obtenido de ORD Solutions: <http://www.ordsolutions.com/rova3d-5-extruder-3d-printer-package/>
- Paniagua, S. (18 de 02 de 2013). Big data. Obtenido de Impresión 3D Makers: <http://www.sorayapaniagua.com/2013/02/18/de-reprap-a-makerbot-la-impresion-3d-y-la-manufactura-personal/>
- PrintBot. (25 de 10 de 2016). PrintBot. Obtenido de PrintBot: <http://prinrbot.com/product-category/3d-printers/>
- RepRap. (14 de 09 de 2016). <http://reprap.org/>. Obtenido de <http://reprap.org/>: <http://reprap.org/wiki/Kossel>
- RepRap. (16 de 09 de 2016). <http://reprap.org/>. Obtenido de <http://reprap.org/>: <http://reprap.org/wiki/Rostock>
- RepRap. (15 de 10 de 2016). RepRap. Obtenido de RepRap: http://www.reprap.org/wiki/Clone_Wars:_Software/es
- RepRap. (17 de 10 de 2016). RepRap. Obtenido de RepRap: http://reprap.org/wiki/RepRap_Machines
- RepRap. (17 de 10 de 2016). RepRap. Obtenido de http://reprap.org/wiki/Greg%27s_Hinged_Extruder
- RepRap. (18 de 10 de 2016). RepRap. Obtenido de RepRap: <http://reprap.org/>
- RepRap. (26 de 09 de 2016). www.reprap.com. Obtenido de www.reprap.com: <http://www.reprap.org/wiki/Filament>
- RepRap. (04 de 10 de 2016). www.reprap.org. Obtenido de www.reprap.org: http://www.reprap.org/wiki/Hot_End_Design_Theory
- SeeMe CNC. (30 de 08 de 2016). SeeMe CNC. Obtenido de SeeMe CNC: <https://www.seemecnc.com/collections/parts-accessories/products/1-x-1-t-slot-sold-by-the-inch>
- SeeMeCNC. (20 de 10 de 2016). SeeMeCNC. Obtenido de SeeMeCNC: <https://www.seemecnc.com/collections/diy-3d-printer-kits>

- SKF. (29 de 10 de 2016). SKF. Obtenido de SKF: <http://www.skf.com/group/splash/index.html>
- Thingiverse. (18 de 10 de 2016). Thingiverse. Obtenido de Thingiverse: https://www.thingiverse.com/tag:filament_holder/page:2
- Ulrich-Eppinger. (2013). Diseño y Desarrollo de productos. México D.F.: McGrawHill.
- Ultimaker. (25 de 10 de 2016). Ultimaker. Obtenido de Ultimaker: <https://ultimaker.com/en/products>
- Wikipedia. (15 de 10 de 2016). Wikipedia. Obtenido de Wikipedia: https://es.wikipedia.org/wiki/Modelado_por_deposici%C3%B3n_fundida
- xataca. (24 de 09 de 2016). www.xataca.com. Obtenido de www.xataca.com: <http://www.xataka.com/perifericos/estas-son-las-tecnologias-de-impresion-3d-que-hay-sobre-la-mesa-y-lo-que-puedes-esperar-de-ellas>
- XYZPrinting. (21 de 10 de 2016). XYZPrinting. Obtenido de XYZPrinting: http://us.xyzprinting.com/us_en/product

ANEXOS

ANEXO A

MANUAL DE CONSTRUCCIÓN