



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
INNOVACIÓN Y TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA**

CENTRO DE GESTIÓN DE POSGRADOS

**MAESTRÍA EN MANUFACTURA Y DISEÑO ASISTIDOS POR
COMPUTADOR**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE MAGISTER EN MANUFACTURA Y DISEÑO
ASISTIDOS POR COMPUTADOR**

**TEMA: INVESTIGACIÓN DEL PROTOTIPADO RÁPIDO DE
PIEZAS CON ORIENTACIÓN DE FIBRAS SEGÚN SU PERFIL
MEDIANTE EL ROBOT KUKA KR16 DE LA ESPE-EL**

AUTOR: LASLUISA NARANJO, HÉCTOR GEOVANNY

DIRECTOR: ING. ACUÑA, FAUSTO Ms.C

SANGOLQUÍ

2017



**VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN Y
TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA**

**MAESTRÍA EN MANUFACTURA Y DISEÑO ASISTIDOS POR
COMPUTADOR**

CERTIFICADO

ING. FAUSTO VINICIO ACUÑA COELLO MS.c

CERTIFICA En calidad de director del trabajo de grado, titulado, "INVESTIGACIÓN DEL PROTOTIPADO RÁPIDO DE PIEZAS CON ORIENTACIÓN DE FIBRAS SEGÚN SU PERFIL MEDIANTE EL ROBOT KUKA KR16 DE LA ESPE-EL", presentado por el señor HÉCTOR GEOVANNY LASLUIA NARANJO con cédula de identidad N° 0502411804, requisito previo para la obtención del título de MAGISTER EN MANUFACTURA Y DISEÑO ASISTIDO POR COMPUTADOR, I Promoción, fue desarrollada bajo mi dirección y asesoría. La misma que cumple con los requerimientos científicos, tecnológicos y académicos, razón por la cual autorizo su presentación y defensa.

Sangolquí, 27 de octubre de 2017

Ing. Fausto Vinicio Acuña Coello

DIRECTOR



**VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN Y
TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA**

**MAESTRÍA EN MANUFACTURA Y DISEÑO ASISTIDOS POR
COMPUTADOR**

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, HÉCTOR GEOVANNY LASLUIA NARANJO, con cédula de identidad N° 0502411804 declaro que este trabajo de titulación "INVESTIGACIÓN DEL PROTOTIPADO RÁPIDO DE PIEZAS CON ORIENTACIÓN DE FIBRAS SEGÚN SU PERFIL MEDIANTE EL ROBOT KUKA KR16 DE LA ESPE-EL", ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como 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, 27 de octubre de 2017

Héctor Geovanny Lasluisa Naranjo

C.C. 0502411804



**VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN Y
TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA**

**MAESTRÍA EN MANUFACTURA Y DISEÑO ASISTIDOS POR
COMPUTADOR**

AUTORIZACIÓN

Yo, HÉCTOR GEOVANNY LASLUIA NARANJO, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE publicar en la biblioteca virtual de la Institución el presente trabajo de grado denominado: "INVESTIGACIÓN DEL PROTOTIPADO RÁPIDO DE PIEZAS CON ORIENTACIÓN DE FIBRAS SEGÚN SU PERFIL MEDIANTE EL ROBOT KUKA KR16 DE LA ESPE-EL", cuyo contenido, ideas y criterios son de mi autoría y responsabilidad.

Sangolquí, 27 de octubre de 2017

Héctor Geovanny Lasluisa Naranjo

C.C. 0502411804

DEDICATORIA

Este trabajo va dedicado a las personas que han estado a mi lado brindándome su apoyo incondicional, a mis padres, suegros y demás familiares.

Y principalmente a dos personas muy especiales, a mi querida esposa Margarita por su amor y comprensión y al motor de mi vida, mi pequeño Matías, y es que sólo ellos pueden dar testimonio de todo el esfuerzo y sacrificio que fueron necesarios para concluir con esta tarea.

Héctor Geovanny Lasluisa Naranjo

AGRADECIMIENTO

A mi Dios padre por darme la fortaleza y nunca desampararme.

A mi esposa Margarita, mi compañera de vida.

A mi hijito Matías, por ser mi inspiración para superarme cada día.

Gracias por apoyarme en este sueño, que a pesar de que nos ha quitado mucho tiempo de estar juntos, al final puedo decir que todo esfuerzo tiene su recompensa.

También quiero agradecer a mi Director de Tesis el Ing. Fausto Vinicio Acuña

Coello MS.c por su paciencia y valiosos consejos.

Héctor Geovanny Lasluisa Naranjo

INDICE DE CONTENIDO

CERTIFICADO DEL DIRECTOR	ii
OFICIO DE AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	iii
OFICIO DE AUTORIZACIÓN	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vi
INDICE DE CONTENIDO	vii
INDICE DE TABLAS	ix
INDICE DE FIGURAS	ix
RESUMEN	xiii
ABSTRACT	xiv
CAPÍTULO I	1
1. Introducción	1
1.1 Motivación	1
1.2 El problema	2
1.2.1 Planteamiento del problema.....	2
1.2.2 Formulación del problema	3
1.3 Justificación e importancia.....	3
1.4 Objetivos	4
1.4.1 Objetivo General	4
1.4.2 Objetivos Específicos.....	4
1.5 Hipótesis.....	4
CAPÍTULO II	5
2. Marco teórico	5
2.1 Estado del arte	5
2.2 Manufactura aditiva / prototipado rápido.....	8
2.3 Modelado por deposición fundida FDM.....	10
2.3.1 Sistema empleado para la deposición de material fundido FDM	13
2.3.2 Materiales empleados en el FDM	16
2.3.3 Robótica industrial	17

2.3.4 Post-procesado para el prototipado rápido.....	18
2.3.5 Programación de robots industriales.....	20
CAPÍTULO III.....	22
3. Desarrollo.....	22
3.1 Metodología.....	22
3.2 Descripción del sistema.....	22
3.3 Materiales de impresión.....	24
3.4 Componentes de la unidad de extrusión.....	24
3.4.1 Hotend Reprap MK8.....	27
3.4.2 Calefactor.....	28
3.4.3 Sensor de temperatura.....	28
3.4.4 Unidad de arrastre Greeetech MK8.....	29
3.4.5 Motor del extrusor.....	30
3.4.6 Diseño del soporte del extrusor.....	33
3.4.7 Soporte del extrusor.....	36
3.4.8 Base de deposición.....	38
3.5 Etapa electrónica.....	39
3.5.1 Control del motor paso a paso (P.A.P).....	41
3.6 Programación.....	45
3.6.1 Sólido de prueba.....	49
3.7 Implementación.....	63
CAPITULO IV.....	66
4. Pruebas.....	66
4.1 Procedimiento.....	66
4.2 Validación de la hipótesis.....	75
4.3 Análisis de costos.....	77
4.4 Conclusiones.....	79
4.5 Recomendaciones.....	80
4.6 Bibliografía.....	81
4.7 Anexos.....	84

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de la Manufactura aditiva, estándar ASTM F2792.....	9
Tabla 2 Caracterización de los parámetros de FDM.....	10
Tabla 3 Caracterización del ABS & PLA	17
Tabla 4 Relación entre el grosor de capa y el ángulo de deposición.	19
Tabla 5 Aplicaciones de los polímeros empleados en FDM.....	24
Tabla 6 Evaluación de requerimientos del kit de impresión 3D	27
Tabla 7 Partes del hotend Reprap MK8	28
Tabla 8 Características motor NEMA 17.....	30
Tabla 9 Secuencia motor a pasos	42
Tabla 10 Puertos del controlador A4988	43
Tabla 11 Comparativa del software para programación de robots industriales	49
Tabla 12 Test de movimientos del robot en el área de trabajo.....	67
Tabla 13 Resultados de la prueba de continuidad en los cableados.....	67
Tabla 14 Voltajes de los elementos de consumo	68
Tabla 15 Grados de giro del motor a pasos nema 17	68
Tabla 16 Parámetros considerados para el prototipado rápido	71
Tabla 17 Detalle de costos	78
Tabla 18 Evaluación cualitativa del costo beneficio.....	79

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Proyección de crecimiento de la industria de AM.....	6
Figura 2 Órtesis de antebrazo “Novacast”	8
Figura 3 Etapas de la manufactura aditiva, estándar ASTM F2792-12A	9
Figura 4 Esquema de impresión por FDM.....	10

Figura 5 Diagrama de causa y efecto en el proceso de FDM.....	12
Figura 6 Parámetros del extrusor de FDM.....	13
Figura 7 Componentes del sistema de FDM.....	14
Figura 8 Distribución de la fuerza entre capas FA: fuerza de ataque, FT: componente de tracción de FA, FS: componente de corte de FA.	19
Figura 9 Ángulos para las trayectorias de la boquilla.....	20
Figura 10 Layout para el FDM con el brazo robótico.....	23
Figura 11 Hotend RepRap MK8.....	29
Figura 12 Sistema de arrastre GREEETECH MK8.....	30
Figura 13 Primera propuesta de diseño.....	34
Figura 14 Segunda propuesta de diseño.....	34
Figura 15 Tercera propuesta de diseño.....	35
Figura 16 Vista isométrica del soporte principal y seguro.....	36
Figura 17 Análisis de elementos finitos del soporte.....	37
Figura 18 Análisis térmico en Solidworks Simulation.....	37
Figura 19 Acoplamiento del extrusor al brazo robótico.....	38
Figura 20 Base de deposición (cama caliente).....	39
Figura 21 Esquema general de interconexión.....	39
Figura 22 Etapas de conexión electrónica.....	40
Figura 23 Entradas y salidas del módulo WAGO.....	41
Figura 24 Esquema de interconexión electrónica.....	45
Figura 25 Algoritmo para el FDM con el robot KUKA.....	46
Figura 26 Probeta seleccionada.....	50
Figura 27 Programación mediante KUKA prc.....	50
Figura 28 Representación de la estrategia de deposición en zigzag.....	51

Figura 29 Sólido con trayectorias tipo zigzag.....	52
Figura 30 Sólido generado para el soporte.....	52
Figura 31 Perfil de la probeta en Rhinoceros.....	53
Figura 32 Sólido y perfil en Rhinoceros	53
Figura 33 Pantalla de inicio del plugin Grasshopper	53
Figura 34 Entorno de programación en el componente KUKA prc.....	54
Figura 35 Bloques input de programación paramétrica	55
Figura 36 Bloques de procesamiento de curvas.....	55
Figura 37 Bloques de unión de curvas de superficie.....	56
Figura 38 Bloque para la propagación de superficies	56
Figura 39 Bloques de paralelado y puntos NURBS de control.....	56
Figura 40 Bloques para la orientación de movimientos del robot kuka.....	57
Figura 41 Trayectorias que dan forma al soporte.....	58
Figura 42 Bloques para el enlace hacia el perfil de curva del sólido (probeta)	58
Figura 43 Bloques de procesamiento para la generación de trayectorias tipo zig zag.....	59
Figura 44 Sólido obtenido.....	59
Figura 45 Unión de las programaciones parciales	60
Figura 46 Simulación en Rhinoceros	60
Figura 47 Ventana de configuración del Kuka PRC.....	61
Figura 48 Opción avanzada de configuración.....	62
Figura 49 Extracto del Código KRL obtenido	62
Figura 50 Acoplamiento al robot del sistema de extrusión.....	63
Figura 51 Caja de control electrónica	63
Figura 52 Esquema del guiado del cable.	64
Figura 53 Interconexión entre el KRC2 y el Arduino.....	64

Figura 54 Resultado de la prueba inicial de prototipado de 3 capas.....	69
Figura 55 Diseño típico de una probeta para ensayos mecánicos.....	70
Figura 56 Plano 3D de la probeta (mm).....	71
Figura 57 a) PLA plano, b) PLA curvo, c) ABS plano, d) ABS curvo.....	72
Figura 58 Centro de fomento productivo metalmecánico carroceros, Ambato.....	72
Figura 59 Máquina de ensayos Metrotec Serie MTE50.....	73
Figura 60 Curvas esfuerzo deformación de las probetas de PLA.....	73
Figura 61 Curvas esfuerzo deformación de las probetas de ABS.....	74

RESUMEN

Esta investigación explora un método de fabricación innovador (impresión 3D de acuerdo al perfil de pieza o también llamado por ciertos autores como impresión 3D curva), el cual tiene como propósito la optimización de las características mecánicas de los objetos obtenidos mediante la tecnología de manufactura aditiva, para lo cual se realiza el estudio de los principios y parámetros que rigen el prototipado rápido de dos materiales termoplásticos específicos, el ABS y el PLA que son los filamentos de uso más común en la industria de la impresión 3D. Mediante el acoplamiento del robot industrial KUKA modelo KR16 a un dispositivo de extrusión convencional se ha implementado una plataforma física que permite ejecutar los movimientos en el espacio para la deposición de material fundido. Este sistema agrupa a varios componentes y adaptaciones de tipo mecánico, electrónico y de software, cada uno con sus particularidades y características propias, los cuales se integran en un funcionamiento coordinado para obtener una plataforma de impresión 3D robotizada. Los objetos manufacturados mediante esta aplicación, han sido sometidos a ensayos mecánicos de tracción, en donde gracias a las curvas de esfuerzo deformación obtenidas es posible cuantificar y analizar el comportamiento y las nuevas características mecánicas obtenidas.

Palabras claves:

- **PROTOTIPADO**
- **IMPRESIÓN 3D**
- **ROBOT INDUSTRIAL**
- **TERMOPLÁSTICO**

ABSTRACT

This research explores an innovative manufacturing method (3D printing according to the part profile or also called by certain authors as 3D curve printing), which aims to optimize the mechanical characteristics of the objects obtained by additive manufacturing technology, for which the study of the principles and parameters that govern the rapid prototyping of two specific thermoplastic materials, ABS and PLA, which are the filaments most commonly used in the 3D printing industry, is carried out. By means of the coupling of the KUKA industrial robot model KR16 to a conventional extrusion device, a physical platform has been implemented that allows to execute the movements in the space for the deposition of molten material. This system brings together various components and adaptations of mechanical, electronic and software type, each with its own characteristics and characteristics, which are integrated in a coordinated operation to obtain a robotic 3D printing platform. The objects manufactured by this application have been subjected to mechanical tensile tests, where thanks to the deformation stress curves obtained it is possible to quantify and analyze the behavior and the new mechanical characteristics obtained.

Keywords:

- **PROTOTYPING**
- **3D PRINT**
- **INDUSTRIAL ROBOT**
- **THERMOPLASTIC**

CAPÍTULO I

1. Introducción

1.1 Motivación

El empleo de robots en las diversas industrias es cada vez mayor, sin embargo su uso ha estado enfocado casi exclusivamente a ejecutar operaciones repetitivas, como es el caso en líneas de ensamblaje, pintura, soldadura y paletizado en un 88% (Robotic Industries Association, 1Q 2015).

La definición más comúnmente aceptada la de la Asociación de Industrias de Robótica (RIA, Robotic Industry Association), según la cual: “Un robot industrial es un manipulador multifuncional programable, capaz de mover materias, piezas, herramientas o dispositivos especiales, según trayectorias variables, programadas para realizar tareas diversas”.

Hoy en día los robots industriales pueden ver ampliadas sus aplicaciones a diversos campos como la arquitectura, la construcción automatizada, el arte, reorientando así su utilidad. Situación que se ha originado por el continuo desarrollo de nuevas técnicas enfocadas a la manufactura digital y fabricación de prototipos que pueden ser perfectamente adoptadas por los robots.

Entre las ventajas del empleo de los robots industriales tenemos, mayor precisión, rapidez y eficiencia debido a un mayor grado de libertad de sus movimientos.

Poco a poco los robots van ganando espacio reemplazando a otras tecnologías de manufactura, desde ámbitos experimentales hasta aplicaciones reales como el fresado multiejes.

En el campo de la fabricación aditiva, se han podido observar proyectos tangibles como el de la empresa 3D robotprinting la cual mediante la deposición de termoplástico fundido crean objetos de tamaño medio con el espacio interior vacío pero que presentan gran resistencia mecánica.

Como propuesta innovadora se plantea acoplar un extrusor termoplástico a un brazo robótico industrial Kuka KR16 para variar la dirección de deposición del material fundido en dirección del perfil del objeto en lugar de los ejes cartesianos tradicionales y mejorar la resistencia mecánica de las piezas manufacturadas.

1.2 El problema

Las impresoras 3D convencionales emplean movimientos de deposición en los ejes X,Y, esto debido a su composición estructural y al software de procesamiento de impresión 3D, lo cual puede ocasionar el desmedro de algunas características mecánicas produciéndose cierta vulnerabilidad de la pieza ante la exposición a determinados esfuerzos.

Para mejorar las propiedades mecánicas de las piezas es necesario variar la deposición de material respecto al eje Z y así poder direccionar las fibras de impresión de acuerdo al perfil de la pieza.

La manufactura aditiva con robots permite una amplia libertad de movimientos, sin embargo este es un campo relativamente nuevo en la industria robótica mundial; en el ámbito nacional y regional hay escasa información al respecto y al momento tampoco existen proyectos relacionados.

1.2.1 Planteamiento del problema

Mediante la investigación se podrá manufacturar piezas con orientación de las fibras según su perfil empleando el prototipado rápido con el robot KUKA KR16.

1.2.2 Formulación del problema

- Caracterización mecánica y físico-química del material termoplástico ABS y PLA utilizado en el proceso de prototipado rápido.
- Establecer los parámetros necesarios para el prototipado rápido con robots para la orientación de las fibras según el perfil de la pieza.
- Adaptar un sistema de extrusión a la muñeca del robot KUKA KR16 para ejecutar un proceso de prototipado rápido.

1.3 Justificación e importancia

De acuerdo al cambio de la matriz productiva en lo referente a la explotación del conocimiento y del talento humano se busca aprovechar los recursos existentes de manera eficiente mediante el correcto empleo de la técnica e innovación en los procesos de manufactura.

La presente investigación busca establecer los lineamientos para el empleo del robot KUKA KR16 de la ESPE extensión Latacunga en un proceso de prototipado rápido para orientar la deposición del material según el perfil de la pieza a manufacturar.

En el ámbito académico, se sentarán las bases de conocimiento de un proceso de manufactura innovador y con un futuro promisorio, colocando a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE a la vanguardia en el manejo de este tipo de tecnología, que representa varias ventajas como es la impresión 3D de 6 ejes, la manufactura de piezas geoméricamente más complejas y de mayor tamaño y la posibilidad de optimizar las propiedades mecánicas de los objetos producidos.

La investigación se fundamenta en la caracterización de los materiales a emplearse, luego se establecen los parámetros del prototipado rápido empleando

robots para luego integrar un sistema de deposición de material termoplástico al brazo robótico KUKA KR16, finalmente se ejecutarán ensayos mecánicos básicos a las piezas manufacturadas cuyos resultados servirán como datos referenciales para la comparación con objetos obtenidos mediante la impresión 3D tradicional.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Investigar sobre el prototipado rápido de piezas con orientación de fibras según su perfil mediante el robot kuka KR16 de la ESPE-EL.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Investigar sobre la caracterización mecánica de materiales termoplásticos ABS y PLA.
- Determinar los parámetros esenciales del prototipado rápido con el robot KUKA KR16 para manufacturar piezas con fibras según su perfil.
- Integrar un sistema de extrusión al brazo robótico KUKA KR-16 para realizar prototipado rápido.
- Ejecutar ensayos mecánicos con las piezas manufacturadas con fibras según su perfil y con fibras paraxiales y comparar sus resultados.

1.5 Hipótesis

Mediante la investigación se podrá manufacturar piezas con orientación de fibras según su perfil empleando el prototipado rápido con el robot KUKA KR-16 de la ESPE-EL.

CAPÍTULO II

2. Marco teórico

2.1 Estado del arte

El prototipado rápido es una tecnología de manufactura aditiva que consiste en obtener un objeto físico desde un modelo tridimensional computarizado mediante la deposición capa por capa de material termoplástico, proceso que también es conocido como modelado por deposición de hilo fundido FDM (Fused Deposition Modelling).

La manufactura aditiva AM (Additive Manufacturing) es considerada por muchos como la precursora de la cuarta revolución industrial, y en la actualidad va ganando cada vez más espacio en varios campos de la industria, de tal forma que ya es empleada no sólo para producir prototipos sino componentes funcionales. Un ejemplo es la industria aeronáutica donde ya se utilizan estos componentes en aviones comerciales como el Airbus A350 XWB (Wimpenny D., 2016).

La proyección de este tipo de manufactura es muy prometedora, hacia 2018 se prevé que la venta de sistemas y servicios se aproximará a los 7 mil millones USD a nivel mundial, hacia 2021 Wohlers Associates estima que la industria alcance los 10,8 mil millones USD. (Figura 1).

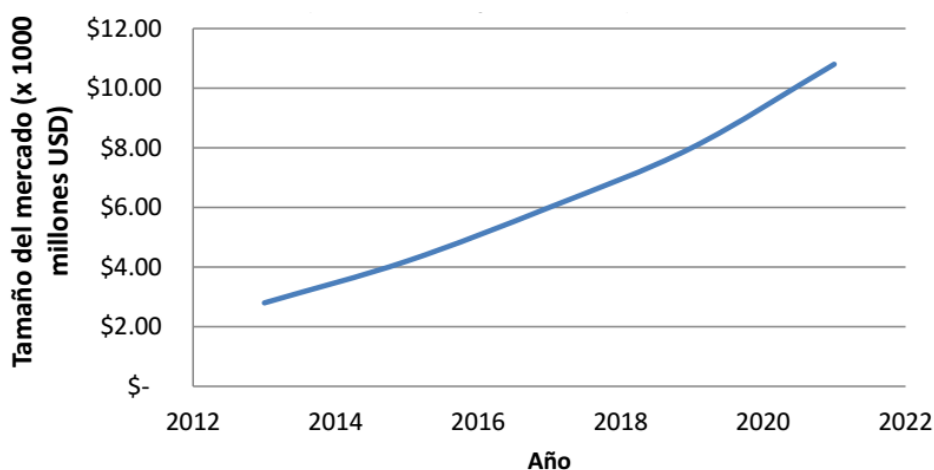


Figura 1 Proyección de crecimiento de la industria de AM

Fuente: (Wohlers Report, 2013)

Los laboratorios Arevo Labs de Silicon Valley con su proyecto RAMP Robot Based Additive Manufacturing Platform han desarrollado un sistema que emplea robots industriales marca ABB para ejecutar los movimientos de deposición de material termoplástico fundido con 6 grados de libertad y así manufacturar objetos sólidos con trayectorias (toolpath) libres. Dawson D. (2016). *Automation: Robots taking off in commercial aircraft*, Composites World.

Así también empresas particulares como 3D robotprinting y Dirk Vander Kooij ya producen objetos con utilidad doméstica como sillas, mesas, y artículos para decoración.

Dentro del ámbito arquitectónico el Instituto de Cataluña (IAAC), la Universidad de Tsinghua en China, las empresas Branch Technology, Gramazio & Kohler, AI-Build y MX3D, han desarrollado aplicaciones para emplear la manufactura aditiva mediante robots en innovadoras alternativas para la construcción de obras civiles.

Otros trabajos relacionados a la impresión mediante robots son: “3D Robot Printing Arm” por Swanson, Spurgeon, Vass, Danielewics, 2016, donde no

obtuvieron resultados óptimos en los objetos creados, debido a que el sistema no es capaz de controlar de forma adecuada el flujo del material fundido, debido a las limitaciones de hardware y a la baja memoria del controlador del robot. Y el trabajo titulado “Desarrollo de un sistema de modelado por deposición fundida adaptado a un brazo robótico de 5 grados de libertad” por Torres S., 2015, en el cual lograron una correcta integración de los componentes del sistema, pero no presentan un análisis de los resultados obtenidos.

Al tratarse de una plataforma todavía en desarrollo el empleo de robots integrados con sistemas de prototipado rápido no se ha extendido a aplicaciones a gran escala, sin embargo es interesante el giro que esta tecnología puede dar a la industria manufacturera.

La ventaja de emplear esta plataforma es la posibilidad de orientar las fibras de impresión 3D para optimizar las características mecánicas de los objetos creados, además de la factibilidad de producir piezas de mayor tamaño.

El presente proyecto se desarrolla con el objeto de evaluar el comportamiento ante determinados esfuerzos de objetos manufacturados mediante una impresora 3D convencional frente a probetas producidas a través del sistema de prototipado rápido con un brazo robótico y determinar las ventajas y desventajas de este tipo de manufactura.

El propósito del proyecto es el de establecer los lineamientos para aprovechar la funcionalidad del brazo robótico Kuka KR16 de la ESPE-EL integrándolo a un sistema de deposición de material fundido para prototipar objetos con orientación de las fibras de acuerdo a su perfil, optimizando así sus características mecánicas.

2.2 Manufactura aditiva / prototipado rápido

El término prototipado rápido es utilizado para describir el proceso de creación rápida de un sistema u objeto antes de su producción definitiva.

Las mejoras en la calidad de acabado de las piezas obtenidas en la actualidad está muy cerca a la calidad del producto final, por lo que muchos objetos ya son fabricados directamente, como la órtesis de la Figura 2, por lo cual ya no sería posible etiquetarlas únicamente como “prototipos”.



Figura 2 Órtesis de antebrazo “Novacast”

Fuente: (Revista Innovación UNAM, 2017)

El principio básico consiste en un modelo tridimensional asistido por ordenador (3D CAD) de un objeto, que puede ser fabricado directamente sin necesidad de una extensa planificación del proceso, sino sólo algunos detalles básicos dimensionales y un cierto conocimiento de cómo funciona la máquina y de los materiales a utilizar.

La clave de cómo funciona la AM es que los objetos se crean añadiendo material en capas; cada capa es una delgada sección transversal de la pieza derivada de la información original CAD.

Un adecuado y comprensible método de clasificación de las técnicas de manufactura aditiva es el descrito por la ASTM (Asociación de normas y estándares internacionales), el cual está estructurado según el tipo de proceso utilizado para la unión del material de aporte (Tabla 1)

Tabla 1.**Clasificación de la Manufactura aditiva, estándar ASTM F2792**

Categoría	Descripción
Binder jetting	Un agente de unión es depositado de manera selectiva para unir el polvo.
Material jetting	Pequeñas gotas de material son depositadas de manera selectiva
Powder bed fusión	Una fuente de energía funde selectivamente regiones de material en polvo
Directed energy deposition	Una fuente de energía derrite el material al tiempo que es depositado.
Sheet lamination	Diferentes capas de material se van depositando en estado fundido
Vat photopolimerization	Un fotopolímero líquido es curado gracias a un foco de luz
Material extrusión	Un material es dispensado y dispuesto sobre una superficie de manera selectiva a través de un inyector

Fuente: (ASTM, 2013)

El proceso de manufactura aditiva se inicia con un modelo tridimensional creado en un software de diseño CAD (Computer Aided Design) que es guardado con el formato STL (Standard Triangle Language), posteriormente mediante software se realiza el rebanado en capas del objeto y finalmente se manufactura el objeto físico mediante la adición de capas de material, una sobre la otra, las etapas se resumen en la Figura 3.

**Figura 3 Etapas de la manufactura aditiva, estándar ASTM F2792-12A**

Fuente: (ASTM, 2013)

2.3 Modelado por deposición fundida FDM.

La presente investigación se basa en esta técnica de manufactura, que fue desarrollada y patentada por la compañía Stratasys (Patente Nro. US005340433A), y está caracterizada por un sistema de extrusión que conduce el termoplástico en forma de hilo hasta una cámara de precalentamiento que funde el material para luego fluir a través de un inyector de forma controlada para finalmente ser depositado en una plataforma donde el objeto manufacturado toma forma. (Figura 4).

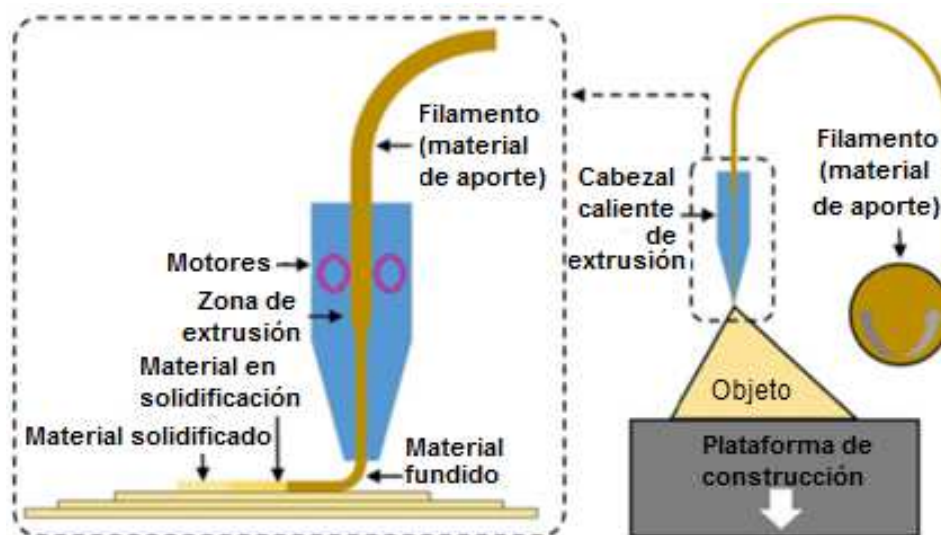


Figura 4 Esquema de impresión por FDM

Fuente: (Olmsted P., 2012)

La siguiente es una síntesis de la caracterización hecha para los parámetros clave del proceso de FDM. Se intenta mostrar los valores típicos definidos en términos generales (Tabla 2)

Tabla 2

Caracterización de los parámetros de FDM

Característica	Descripción
Material de aporte	Alimentador de resina
Uso de soportes	BASS y waterworks
Envolvente de trabajo	de (203x203x203)mm hasta (599x500x599)mm
Espesor de capa típico	0,178 - 0,33 mm
Precisión dimensional	($\pm 0,127\text{mm} < 13\text{cm}$)($\pm 0,0015\text{mm} > 13\text{cm}$)
Acabado superficial/coeficiente de rugosidad	Deficiente. Rugosos y porosos. Mejora manipulando diámetros de extrusión y ancho de capa.
Definición / Detalle	Los detalles mínimos se limitan al doble del espesor de capa. Entre (0,41 - 0,61)mm
Color	Blanco, azul, naranja, rojo, verde, negro, gris o blanco
Estabilidad	Buena. Sus materiales no varían sus propiedades con la exposición de ningún ambiente
Maquinabilidad	Fácilmente sin mayores problemas
Resistencia	Mismas propiedades del material base. ABS soporta hasta 93°C y agentes químicos: petróleo, gas, aceite, ácidos. PLA soporta hasta 60°C.
Fabricación Hr. Muestreos	42hr 10min. Tiempos mayores que otras tecnologías. Parámetros: volumen de pieza, soportes, material y diámetro de deposición.

Fuente: (Mungia F., 2010)

Los parámetros que engloban el proceso de FDM también pueden ser clasificados y estructurados de acuerdo al diagrama de causa y efecto, como se muestra en la Figura 5.

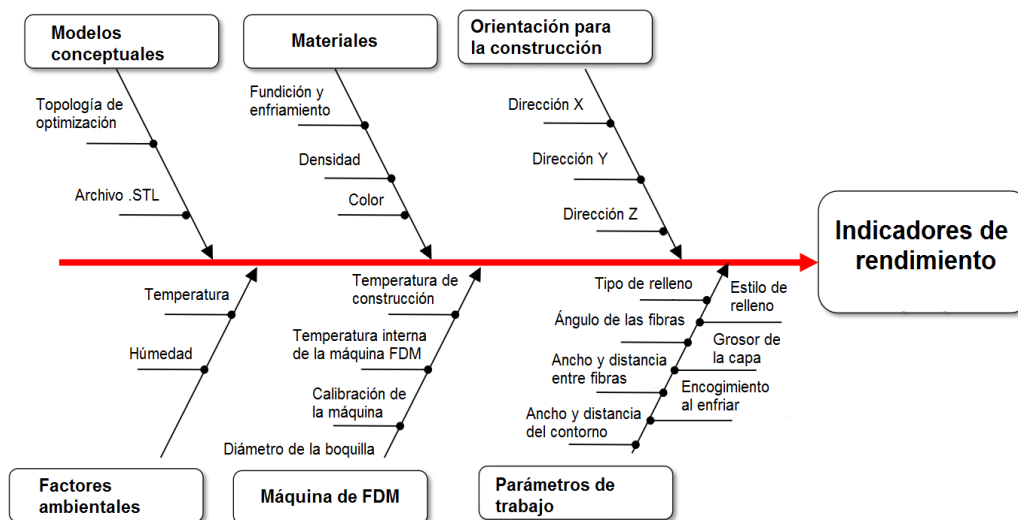


Figura 5 Diagrama de causa y efecto en el proceso de FDM

Fuente: (Mohamed O., 2014)

El principio del FDM consiste en que mediante el efecto que produce el incremento de la temperatura sobre ciertos materiales se logre el comportamiento viscoelástico llamado estado de transición vítrea del material, en este estado el material puede fluir sin cambiar sus propiedades.

La temperatura de transición vítrea normalmente se encuentra entre 0,5 a 0,75 veces la de fusión.

La resolución de la impresión 3D se encuentra en función de varios parámetros adicionales como presiones, ángulos y volúmenes.

$$\text{Calidad de impresión} = f(T, \Delta P, d) \quad [1]$$

$$\Delta = f(\alpha, d)$$

donde:

T= Temperatura en la que el polímero alcanza la transición vítrea

ΔP = Presión de alimentación

d= Diámetro de extrusión del filamento

α = Ángulo de conicidad en la boquilla de extrusión (Figura 6)

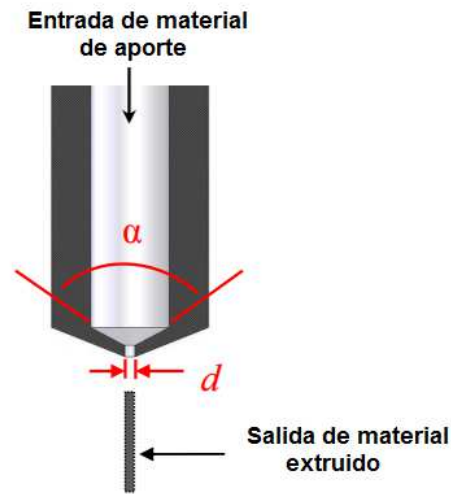


Figura 6 Parámetros del extrusor de FDM

Fuente: (Roxas, J., 2008)

2.3.1 Sistema empleado para la deposición de material fundido FDM

Denominado también como sistema de extrusión, es el conjunto de elementos que tienen como objetivo elevar la temperatura del polímero a las condiciones óptimas de trabajo, considerando variables como la velocidad y la cantidad de material, y hacerlo fluir adecuadamente hasta depositarlo en una base.

Se compone de dos partes principales. La primera es *el extrusor*, que se encarga de empujar y transportar el material plástico hasta la *boquilla de inyección* (que es la segunda parte), donde el material es fundido y posicionado, de esta manera se puede crear un objeto con una forma preestablecida.

La Figura 7 muestra los componentes del sistema de FDM.

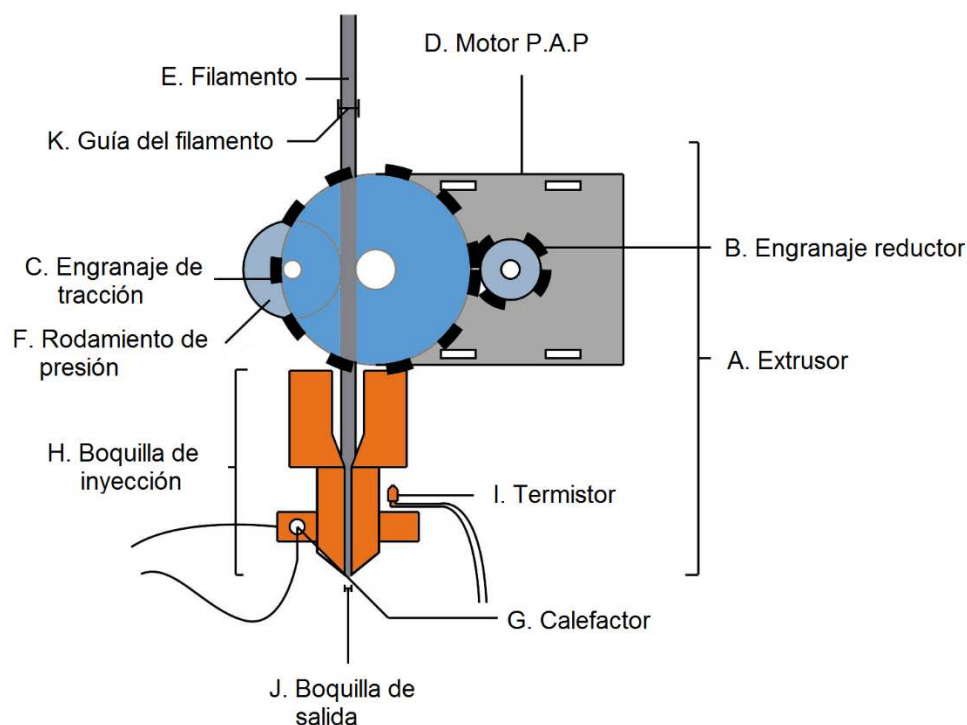


Figura 7 Componentes del sistema de FDM

Fuente: (Nikhil A. (2014). 3D Printing Processes.[Figura 2]. Recuperado de <https://www.engineersgarage.com/sites/default/files/Material-Extrusion-3D-Printer-Head-02.jpg>)

2.3.1.1 El extrusor

Este sistema (Figura 7-A), recibe el material en forma de filamento a través de un orificio de guía, luego lo empuja hacia la boquilla o hotend. Está compuesto por:

- **Motor a pasos:** Su función es proporcionar la fuerza mecánica necesaria para empujar el material de aporte desde su ingreso al sistema hasta su salida por la boquilla. Se trata de un motor digital de precisión controlado electrónicamente para que gire con pequeños ángulos de avance (Fig. 7-D).
- **Conjunto de engranajes:** que pueden empujar el material con tracción directa (velocidad y par directos del motor al filamento) ó tracción indirecta

(con variación de velocidad y par mediante varios engranajes (Figura 7-B, 7-C)).

- **Rodamiento de presión:** es un rodamiento que presiona al filamento sobre el engranaje de tracción para asegurar un adecuado desplazamiento (Figura 7-F).

2.3.1.2 Boquilla de inyección (HOTEND)

Es un tubo metálico dispuesto en posición vertical, que por su extremo de mayor diámetro ingresa el filamento en estado sólido, en su interior éste se funde debido al aumento de temperatura por calefacción eléctrica, finalmente el material es expulsado al exterior en estado semilíquido por el extremo de menor diámetro (Figura 7-H). Sus partes son:

- **Guía del filamento:** Es un tubo simple que guía el filamento desde el motor hasta el hotend. (Figura 7-K).
- **Elemento calefactor:** de carácter resistivo, transforma la energía eléctrica en energía calorífica (Figura 7-G).
- **Sensor de temperatura:** transforma proporcionalmente la energía calorífica en una señal eléctrica que luego es interpretada por un sistema electrónico de control (Figura 7-I).
- **Boquilla de salida:** es de forma cónica y se encarga de depositar el material fundido de forma continua a un menor diámetro. (Figura 7-J).

La cantidad de material depositado en cada movimiento de la boquilla se calcula en base a ciertos parámetros como el diámetro del filamento, el diámetro de la boquilla, la altura de capas, la velocidad de la trayectoria entre otros. Tal operación es realizada por un software de post-procesado empleado para la impresión 3D, el

cual establece una relación entre el número de pasos necesarios para que el motor P.A.P arrastre una determinada cantidad de material.

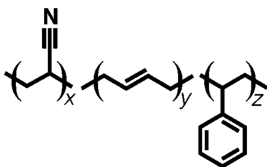
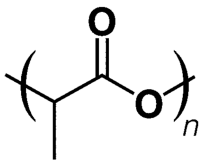
Para el presente proyecto no se requiere diseñar el sistema de extrusión ni la boquilla de inyección (hotend), ya que serán empleados los ya existentes y que son comercialmente disponibles.

2.3.2 Materiales empleados en el FDM

Los materiales más empleados en el proceso de FDM y los cuales son objeto de estudio para la presente investigación son el ABS y PLA.

- **ABS:** (Acrilonitrilo Butadieno Estireno) es un termoplástico amorfo con alta resistencia a químicos, a agentes abrasivos e impactos. Es muy utilizado en automóviles y electrodomésticos, siendo su uso más conocido el de los juguetes “Lego”. Es el primer material que se utilizó en impresoras 3D, y es uno de los plásticos más complejos de trabajar.
- **PLA:** (Poliácido Láctico o Acido Poli-láctico) es un poliéster alifático termoplástico biodegradable, derivado de fuentes renovables como el maíz, soja, caña de azúcar y básicamente cualquier tipo de almidón. Se utiliza en implantes médicos, embalaje, fibras y textiles no tejidos, productos de higiene, entre otros. La impresión 3D doméstica actual tiende a su masificación como materia prima. (Tabla 3).

Tabla 3**Caracterización del ABS & PLA**

Característica	ABS	PLA
Representación		
Origen	Derivado del petróleo	De origen vegetal
Diámetro del filamento comercial	1,75 – 3 mm	1,75 – 3 mm
Temperatura de extrusión:	200 °C - 240 °C	180 °C - 200 °C
Transición vítrea:	100 °C	60 °C - 65 °C
Punto de fusión:	177 °C - 185 °C	110 °C - 170 °C
Temperaturas de trabajo	Melt (177-274)°C, Nozzle (215-274)°C, Die (200-250)°C	Melt (45-120)°C, Nozzle (171-220)°C, Die 190°C
Velocidad de fundido	1,0 - 36 g/10 min	6,0 - 7,8 g/10 min
Tiempo de secado	2,8 - 3,7 hr	2,8 - 10 hr
Densidad	1,04 g/cm ³	1,25 g/cm ³
Resistencia última a la tracción	41 - 45 Mpa	50 Mpa
Estiramiento máximo	25%	35%
Velocidad de impresión	50 mm/s	20 - 60 mm/s
Velocidad de la primera capa	20 mm/s	20 mm/s
Altura de la primera capa	> 0,2 mm	0,3 mm
Requiere cama caliente	80 °C - 110 °C	20 °C - 60 °C
Ventilador de capa	Desactivado o a baja velocidad	Recomendado a baja velocidad
Elemento adhesivo para impresión	Cinta de poliamida o laca	No requiere elementos externos
Toxicidad	Nocivos en áreas cerradas	Humos no nocivos y olor más agradable
Colores del material	22 variedades	hasta 26

Fuente: (Markershop, 2014)

2.3.3 Robótica industrial

Un robot industrial es un manipulador de 3 o más ejes, con control automático, reprogramable, multiplicación, móvil o no, destinado a ser utilizado en aplicaciones de automatización industrial. Incluye al manipulador (sistema mecánico

y accionadores) y al sistema de control (software y hardware de control y potencia), (ISO-8373-1998).

Un brazo robótico se puede definir como el conjunto de elementos electromecánicos que propician el movimiento de un elemento terminal (gripper o herramienta). (Ramirez K, 2010)

La ESPE extensión Latacunga cuenta con un robot KUKA modelo KR-16 de 6 grados de libertad, cada articulación realiza movimientos rotatorios desarrollados por actuadores que para este caso son servomotores AC unidos a encoders de posición absolutos. El robot maneja una carga útil nominal de 16Kg, tiene un alcance de 1610 mm y combina una velocidad máxima de 2100 mm/s con una repetibilidad de $\pm 0,05$ mm.

Dispone del controlador KRC2 habilitado con salidas digitales mediante el módulo WAGO.

2.3.4 Post-procesado para el prototipado rápido

En esta etapa un software ejecuta la segmentación horizontal (algunos autores la llaman rebanado, laminado, fileteado) del objeto tridimensional, para finalmente convertir las capas planas en códigos G entendibles para el sistema de impresión 3D, estos códigos contienen las posiciones, trayectorias y velocidades de movimiento de la unidad de extrusión.

Sin embargo para la presente investigación se requiere de un método diferente de laminado, el cual debe adaptarse a perfiles con curvas variables. La técnica de laminado curvo, estudiado por varios autores, consiste en que las capas impresas ya no son planas ni de espesor uniforme, lo cual ha proporcionado varias ventajas como

la optimización de las propiedades mecánicas de los objetos manufacturados. (Huang B., 2012).

Los objetos impresos con laminación tradicional resultan menos resistentes a los esfuerzos de tracción a lo largo de la dirección de las fibras de impresión en los planos X, Y, lo que puede conducir a su delaminación, esto se produce porque la geometría plana limita la adherencia entre las capas.

Las fibras con curvas pueden distribuir las fuerzas de tracción en componentes de tracción y de cizalla, siendo esta última una fuerza característica de las piezas impresas por FDM. La figura 8 muestra cómo el componente de cizalla FS incrementa al aumentar el ángulo de la curva.

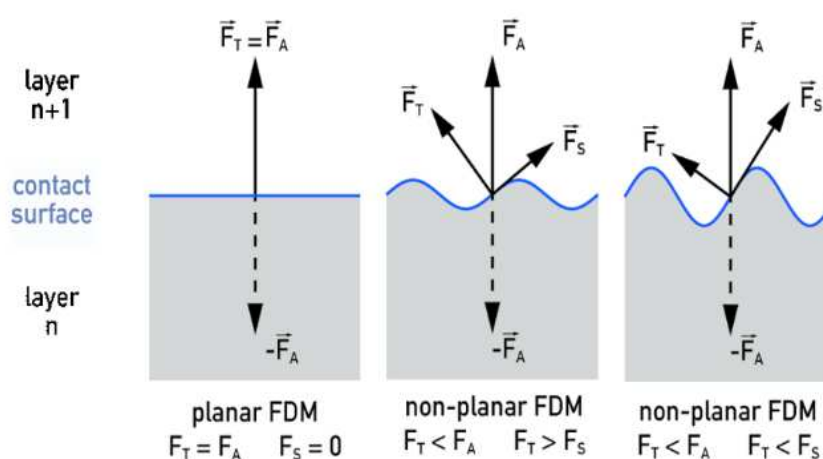


Figura 8 Distribución de la fuerza entre capas FA: fuerza de ataque, FT:

componente de tracción de FA, FS: componente de corte de FA.

Fuente: (Moritz W. (2016). 3D printing: non-planar layer FDM. Recuperado de https://hackadaycom.files.wordpress.com/2016/07/non-planar-layer-fdm_graphics-022.png)

Factores físicos como el hardware, la gravedad, la variación de la temperatura del material durante la inyección limitan las trayectorias de las curvas de deposición y el grosor de las capas, según determinados ángulos. (Ver Tabla 4.)

Tabla 4

Relación entre el grosor de capa y el ángulo de deposición.

GROSOR DE CAPA	ÁNGULO
0,4 mm	0° - 15°
0,8 mm	15° - 90°

Fuente: (Huang B., 2012)

Durante la impresión curva es importante considerar las limitaciones propias del hardware disponible, evitando exceder en los ángulos de deposición de la boquilla. (Figura 9).

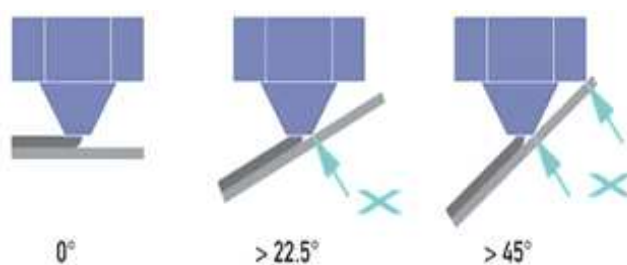


Figura 9 Ángulos para las trayectorias de la boquilla

Fuente: (Fuente: Moritz W. (2016). 3D printing: non-planar layer FDM. Recuperado de <https://hackaday.com/2016/07/27/3d-printing-non-planar-layer-fdm/#jp-carousel-215638>)

2.3.5 Programación de robots industriales

Tres son los métodos empleados para la programación de los robots KUKA:

- *Online/automática*, empleada en aplicaciones industriales de carga y soldadura, programada empleando el mando KCP (Kuka Control Panel) o en el entorno virtual KUKA SimPro. En operaciones donde el flujo de trabajo digital es importante, no se puede emplear la programación online.
- *Offline/manual*, es similar a trabajar con el código CNC (trasladando los datos CAD al CAM) y luego transformar al lenguaje de máquina o código G, y para emplearlo en un brazo robótico se requiere de un post-procesador/simulador en este caso Kuka Simpro/Kuka CamRob, es decir se requiere de al menos 3 tipos de software de diferentes desarrolladores, esto da

como resultado la falta de retroalimentación en el diseño y producción en tiempo real que permita evaluar las propiedades de fabricación a lo largo del flujo de trabajo.

- *Offline paramétrica*, consiste en crear los códigos en lenguaje del robot mediante scripts personalizados, automatizando así el proceso de fabricación para el control de parámetros para un gran volumen de trabajo.

El KRL (Kuka Robot Lenguaje) es el lenguaje de programación de los robots KUKA, es de carácter propietario con similitudes al lenguaje Pascal. A diferencia del código G, no solo contiene órdenes para el movimiento de la máquina herramienta, sino que también puede declarar variables y trabajar con sentencias condicionales. Básicamente, el lenguaje KRL consta de dos archivos separados: Un archivo * .DAT donde se almacenan variables como la posición inicial y un archivo * .SRC que contiene comandos, como de movimiento, bucles, entradas, etc.

En el prototipado rápido con robots es necesario controlar con precisión la ubicación del extrusor, por lo que requiere el uso de coordenadas cartesianas. La simulación de la cinemática del robot en un entorno de diseño permite al diseñador reaccionar ante las restricciones de accesibilidad o posibles colisiones, optimizando así el uso del espacio de trabajo disponible.

CAPÍTULO III

3. Desarrollo

3.1 Metodología

Para el desarrollo de la presente investigación se dispone de un robot KUKA KR16, en el cual se deben realizar varias adaptaciones, para cumplir con las tareas requeridas.

Para acoplar la técnica de modelado por deposición fundida al robot, se deben considerar varios factores, entre los cuales se encuentra el material de aporte que será un rollo de filamento termoplástico capaz de alimentar la boquilla del sistema de extrusión.

La boquilla elevará su temperatura hasta alcanzar el estado de transición vítrea del termoplástico extruido y mediante un mecanismo de dosificación se podrá controlar el flujo del material fundido, el mismo que será inyectado en una base de deposición para lograr una buena adherencia del material.

La mayor parte de los componentes a emplearse son comerciales, por lo tanto se seleccionarán a los que cumplan con las características requeridas, además será necesario realizar adaptaciones mediante elementos fabricados para este fin.

También es preciso el empleo de un software de post-procesado que ejecute el laminado curvo y luego se transmita las diversas instrucciones y parámetros al lenguaje del brazo robótico y finalmente prototipar sólidos en tres dimensiones.

3.2 Descripción del sistema

Para el funcionamiento del sistema robotizado de prototipado rápido se debe establecer la comunicación y maniobra del efector final (extrusor termoplástico)

desde el controlador KRC2 mediante acoplamientos mecánicos y componentes electrónicos. (Figura 10).

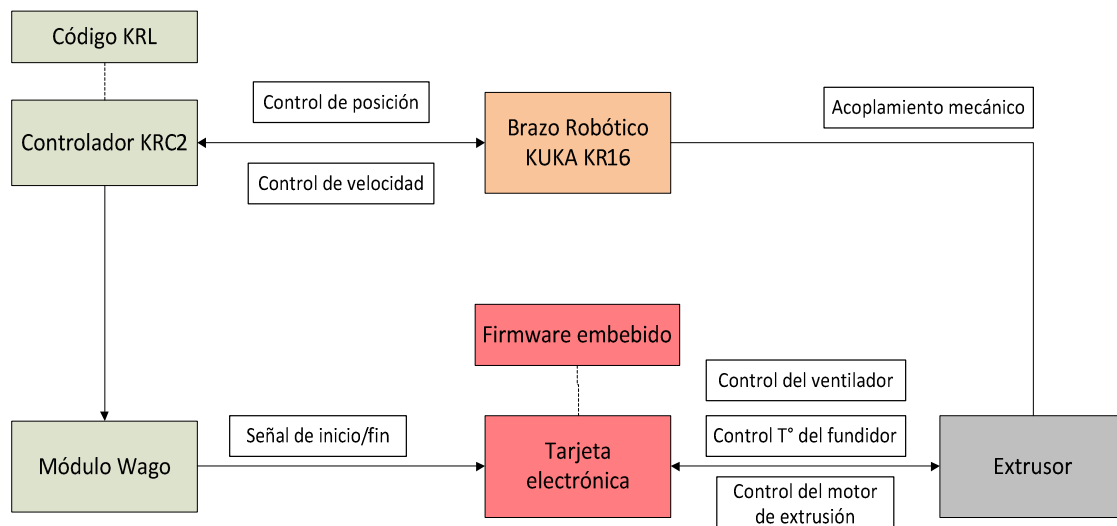


Figura 10 Layout para el FDM con el brazo robótico

Fuente: (Curved Layer Carbon Fiber 3D Printing fiber orientation control for stronger 3D printed parts, Ascoli P., 2015)

En general el sistema de control es de lazo abierto, ya que no existe una realimentación directa desde el extrusor hacia el controlador KRC2 (estos componentes sólo se comunican al inicio y al final del programa ejecutado por el robot) (Refiérase al numeral 3.7 del presente capítulo). Se conceptualizó de esta manera para evitar conflictos de comunicación (físicos y lógicos) tendiendo a la configuración más sencilla posible.

También existe un sistema de lazo cerrado entre el extrusor que realimenta a la tarjeta electrónica para controlar el nivel de temperatura del sistema.

Por lo tanto el programa en lenguaje robot es la variable de entrada general del sistema, la variable controlada es la extrusión del material y las variables manipuladas son la temperatura del hotend y la velocidad del motor a pasos.

A continuación se detallará todo el proceso de diseño, selección y las adaptaciones que se deben realizar para lograr nuestro objetivo.

3.3 Materiales de impresión.

Las materias primas a utilizarse son: el ABS y el PLA, cuyo empleo en aplicaciones prácticas es una realidad, resultando de gran utilidad en varios campos (Tabla 5).

Tabla 5

Aplicaciones de los polímeros empleados en FDM

PLA	ABS
Desarrollo Biomédico (Ingeniería de Tejidos)	Carcasas de electrodomésticos.
Empaques desechables (vasos, bolsas, platos)	Cascos deportivos
Botellas y recipientes (agua, aceites de cocina, lácteos)	Cubiertas internas de las puertas de refrigeradores
	Fabricación de tubería sanitaria como sustituto del PVC
	Por su característica de ser cromable se utiliza ampliamente en la industria automotriz

Resulta prometedor imaginar en las ventajas que se podrían obtener al optimizar las características mecánicas de objetos que ya son parte de nuestro diario convivir, tales como: objetos más resistentes a agentes externos, más livianos, con mejor acabado y ergonomía, son sólo una muestra del potencial por descubrir.

3.4 Componentes de la unidad de extrusión

La unidad de extrusión es de gran importancia ya que es el efector final que entrega una variable física de todo el proceso (planta) ejecutado por el sistema, por lo que se debe prestar especial atención en los elementos que la componen.

Ciertas empresas privadas que desarrollan tecnología en un intento por masificar el acceso a la impresión 3D han democratizado su utilización mediante plataformas Open Source (código abierto) de gran fiabilidad y accesibilidad, en la actualidad ya existen kits completos (con componentes todo en uno de electrónica, mecánica y software) para implementar aplicaciones de impresión 3D, bajo la filosofía conocida como hágallo usted mismo o DIY (Do It Yourself) por sus siglas en inglés.

Entre las ventajas de emplear kits completos, se puede mencionar la compatibilidad verificada entre cada uno de sus componentes, y la optimización previa de sus parámetros físicos de funcionamiento como son: el adecuado acoplamiento físico, facilidad de montaje, manejo de las magnitudes eléctricas, comunicación de datos, paquetes informáticos ya desarrollados y niveles de seguridad óptimos, lo que asegura la estabilidad y confiabilidad del sistema implementado. Además una comunidad de usuarios con cada vez más presencia en los canales virtuales pueden ofrecer un oportuno soporte técnico.

De esta forma se evita la ardua labor del análisis y dimensionamiento individualizado de cada componente hasta lograr su compatibilidad debidamente justificada, condicionados también por su disponibilidad en el mercado.

Bajo este panorama y teniendo como objetivo la integración del robot Kuka con un sistema de prototipado rápido existente, se selecciona al kit de impresión 3D como alternativa válida para su implementación.

Varias son las marcas que ofertan estos kits como son: Quimat, Sintron, Elegoo, SainSmart y Kuman, las mismas que han estandarizado sus componentes

hacia las plataformas Raspberry Pi y Arduino, siendo esta última la más empleada en el área de la impresión 3D por sus prestaciones a la medida para esta aplicación.

Para la selección del kit de impresión 3D se analizaron cuatro opciones que cumplan con los siguientes requerimientos:

- Extrusor para ABS y PLA, diámetro boquilla (0,4mm – 06mm), tipo de extrusión directa, temperatura de extrusión (180°-240°C), velocidad de extrusión (20mm/s-60mm/s), ancho de capa (entre 0,2-0,3 mm)
- Tarjeta electrónica: I/O analógicas (mínimo 6), I/O digitales (mínimo 5)

Firmware embebido de código abierto.

Drivers para el manejo de motores PAP.

Tarjeta o módulo conversor A/D.

Shields de expansión

- Cama caliente: 215 x 215 mm, 100°C, 12 Vdc
- Alimentación. 110Vac a 12Vdc
- Precio y disponibilidad.

Las ponderaciones están en el rango de 1 a 5, siendo 5 el mayor valor a asignarse:

Tabla 6***Crterios de evaluaci3n de los kits de impresi3n 3D***

	Extrusor						Electr3nica					Cama Caliente	Alimentaci3n	PVP	Disponible	Total
	Extrusi3n directa	ABS/PLA	Boquilla	T° de trabajo	Velocidad	Ancho de Capa	I/O	Firmware	Drivers	Conversor A/D	Expandible					
Sintron 3D Printer Kit Prusa i3	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	4	5	74
Quimat 3D Printer Kit	0	0	0	0	0	0	5	5	5	5	5	5	5	5	3	43
SainSmart 3D Printing Kit for RepRap	0	0	0	0	0	0	5	5	5	5	5	5	5	4	2	41
Kuman kossel mini kit	0	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	4	1	65

Durante la selecci3n (Tabla 6) se pudo observar la similitud en los componentes de los kits analizados, sin embargo Quimat y SainSmart no integraban un sistema de extrusi3n.

Kuman al disponer de un sistema de extrusi3n indirecta, no cumple con uno de los requerimientos.

Por lo que se selecciona el kit Sintron para la implementaci3n del sistema, cuyos componentes se detallan a continuaci3n:

3.4.1 Hotend Reprap MK8

Este hotend resalta por la sencillez y eficacia de su dise±o, reduce al m3nimo la propagaci3n de calor del extremo de la punta caliente hacia el sistema extrusor.

En la Tabla 7, se enlistan cada de una de las partes del hotend, con su respectivo material y funci3n.

Tabla 7**Partes del hotend Reprap MK8**

COMPONENTE	MATERIAL	FUNCIÓN
Boquilla	Aluminio	Salida de material Ø 0.3,0.35,0.4,0.5 mm, va en conjunto con el elemento calefactor y la sonda de temperatura
Elemento calefactor	Cromo-níquel	Calentar la boquilla
Termistor	NTC	Captar la temperatura de la boquilla
Disipador térmico	Aluminio	Evacuar el calor interno
Tubo conductor	Metal & teflón	Unión al extrusor, aislante
Aislante	PTFE	Aislante
Barrera térmica	PTFE	Aislante

Fuente: (http://rigidtalk.com/wiki/index.php?title=Technical_Specifications)

También se detallan varios componentes adicionales:

3.4.2 Calefactor

Es un alambre de tipo resistivo compuesto por una aleación de cromo-níquel, tiene buenas características de conducción térmica (dispersión uniforme del calor y fácil control electrónico), además de buen aislamiento térmico (característica que permite almacenar el calor disminuyendo pérdidas). Su resistencia varía entre 4.5Ω y 5.5Ω. (Figura 11-A).

3.4.3 Sensor de temperatura

El sensor 100K NTC es un termistor pequeño de alta precisión (1%), está sellado herméticamente, encapsulado junto con el cable axial. Su rango de temperaturas va desde -40°C a 260°C, 12 V de alimentación y 40W de potencia, tiene una resistencia de 100KΩ. (Figura 11-A).

En la figura 11 se muestra el hotend a emplear.

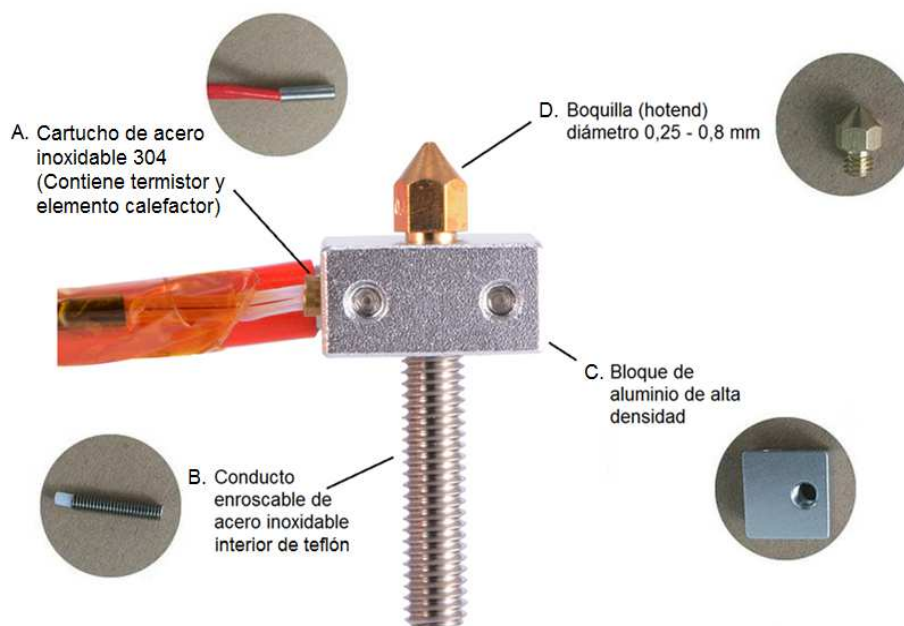


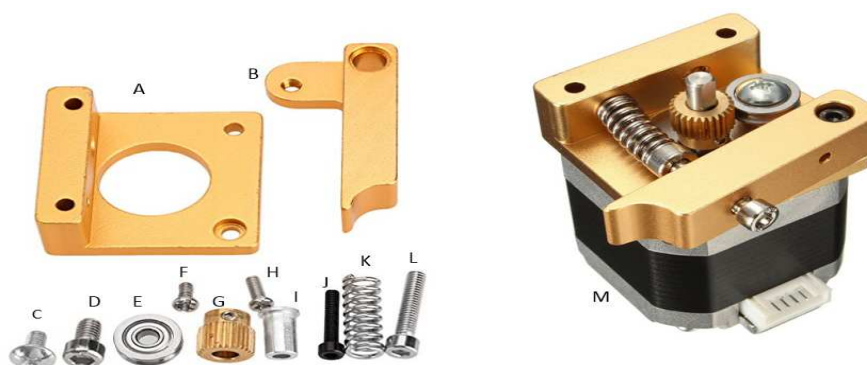
Figura 11 Hotend RepRap MK8

Fuente (Sánchez A. (2015). The new extruder from BQ. Recuperado de <http://www.xcsourcepic.com/TE599-E-10-4.jpg>)

3.4.4 Unidad de arrastre Greeetech MK8

A continuación se analizarán los elementos más importantes que tiene la unidad de arrastre Greeetech MK8. Para ello se identifica cada uno de estos elementos de acuerdo a la Figura 12, y se detalla la función de cada uno.

Si se analizan estos elementos se obtendrá la información necesaria para relacionar la cantidad de pasos que debe dar el motor, con la cantidad de material a extruir.



A, B	Estructura de aluminio
C, F, H	Tornillos cabeza segmentada
D, J, L	Tornillos cabeza hexagonal (interna)
E	Rueda de presión
G	Rueda dentada de tracción
I	Separador
K	Resorte de presión
M	Motor NEMA 17

Figura 12 Sistema de arrastre GREEETECH MK8

Fuente: (RepRap. (2015). Extruder assembly. Recuperado de <http://alexnl.com/wp-content/uploads/2015/12/025b8eb8-cf37-4395-a43a-77b5c2e1354d.jpg>)

3.4.5 Motor del extrusor

Este motor (Fig. 12-M), es el NEMA 17 que tiene las siguientes características (Tabla 8).

Tabla 8

Características motor NEMA 17

SERIE SL42STH40-1204A	CARACTERÍSTICAS
Ángulo de pasos (°)	18
Número de fases	2
Máxima fuerza radial (N)	28
Máxima fuerza axial (N)	10
Torque (Kg*cm)	4,4
Voltaje nominal (V)	2,8
Corriente nominal (A)	1,68
Resistencia por bobina (Ω)	2,8 (25°C)

Fuente: (Datasheet NEMA 17, 2016)

De acuerdo con estos datos se tiene que el trabajo a paso completo por revolución será:

$$\#pasos = \frac{360^\circ}{1,8^\circ} = 200 \quad [2]$$

La potencia disipada por el motor a pasos se calcula con la siguiente expresión:

$$P = I^2 \times R \quad [3]$$

$$P = (1,68)^2 \times 2,8$$

$$P = 7,9 \text{ W}$$

3.4.5.1 Cálculo de las velocidades

El reductor es el componente que aumenta el torque y reduce la velocidad, está acoplado a una rueda motriz desde un eje dentado hacia la alimentación del material plástico.

De acuerdo al número de dientes de las ruedas de engranajes se obtiene una relación de transmisión de:

$$\text{Relación de transmisión} = \frac{13}{36} = 3 \quad [3]$$

Para el cálculo de la velocidad angular de la extrusora hay que tomar las recomendaciones de la industria de impresión 3D respecto a la velocidad de impresión adecuada, la cual es de 45 mm/s, y una velocidad máxima de 200 mm/s.

$$W_e = \frac{V}{r} \quad [4]$$

En donde “r” es el radio del eje de transmisión, el cual impulsa el material hacia el hotend. Este eje se acopla con la rueda motriz conducida, la cual está acoplada a la rueda motriz conductora que está montada en el motor.

Por lo tanto:

$$W_e = \frac{45}{5} = 9 \left[\frac{\text{rad}}{\text{seg}} \right]$$

$$W_e = \frac{9 * 60}{2 * \pi} = 86 \text{ r}$$

Se desea conocer la velocidad angular del motor a pasos, para lo cual, se divide el valor de la relación de transmisión para la velocidad angular del mecanismo de ruedas extrusoras.

$$W_m = \frac{86}{3} = 28,6 \text{ rpm}$$

El siguiente paso es calcular la velocidad de inyección y el caudal del material fundido.

Velocidad del motor = 28,6 rpm

Número de pasos: 200

Paso medio/completo = 1

Dientes rueda de transmisión = 36

Diámetro del eje = 8 mm

Diámetro de alimentación = 3 mm

Diámetro del filamento = 1,75 mm

$$V_m = \frac{28.6[\text{rpm}] \times 200 [\text{pasos}]}{60} = 95,3 \text{ pasos/seg} \quad [5]$$

Los pasos por milímetro de alimentación serán:

$$\text{alimentación} = \frac{200 [\text{pasos}]}{8[\text{mm}] * \pi * \frac{13}{36}} = 22,03 \text{ pasos/mm} \quad [6]$$

El caudal del material fundido será:

$$\text{Caudal} = \frac{V_m}{\text{alimentación}} \left(\frac{D_a}{2}\right)^2 \pi \quad [7]$$

$$\text{Caudal} = \frac{95,3 \left[\frac{\text{pasos}}{\text{seg}}\right]}{22,03 \left[\frac{\text{pasos}}{\text{mm}}\right]} * \left(\frac{3[\text{mm}]}{2}\right)^2 \pi = 38,57 \frac{\text{mm}^3}{\text{s}}$$

La velocidad de alimentación (V_a) será:

$$V_a = \frac{\text{Flujo}}{\left(\frac{D_f}{2}\right)^2 * \pi} \quad [8]$$

$$V_a = \frac{38,57 \left[\frac{\text{mm}^3}{\text{s}}\right]}{\left(\frac{1,75 [\text{mm}]}{2}\right)^2 * \pi} = 16,03 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$$

3.4.6 Diseño del soporte del extrusor

A continuación se lleva a cabo un diseño completo mediante el uso de un software de diseño CAD de fácil manejo para crear piezas, ensamblajes y generación de planos.

Para lo cual es necesario analizar varias alternativas, hasta encontrar el diseño que mejor se adapte al sistema y presente una mejor funcionalidad.

En el primer diseño (Figura 13), se propone crear un soporte para el material acoplado al brazo de oscilación del robot entre las articulaciones A2 y A3, esta propuesta no fue aprobada debido a los problemas que pudieran ocasionar la distancia entre el rollo de filamento y el extrusor, ya que los movimientos del robot durante su funcionamiento ocasionarían posibles interrupciones de alimentación del material, afectando a la precisión y estabilidad durante la ejecución del proceso.

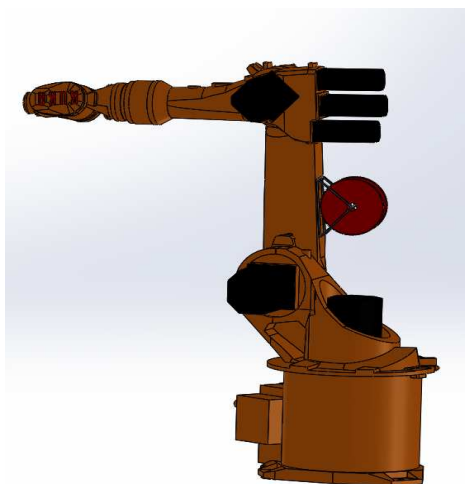


Figura 13 Primera propuesta de diseño

Por este motivo se decidió reubicar el rollo de filamento bajo el brazo robótico como se ve en la figura 14.

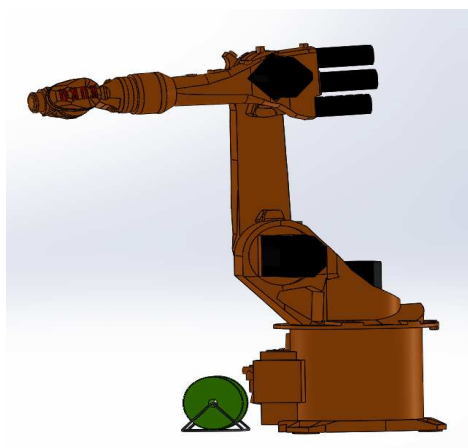


Figura 14 Segunda propuesta de diseño

En el segundo diseño se separa al carrete de la estructura del robot, por lo que ayudaría a mejorar la estabilidad durante el funcionamiento, sin embargo se descarta esta opción ya que persiste la distancia de separación entre el filamento y el extrusor.

La tercera opción (Figura 15), agrupa totalmente el extrusor y el carrete del filamento en el muñon del robot, lo cual incrementa la estabilidad del sistema, y gracias a la mínima distancia de separación entre estos componentes, se minimiza el

impacto de los movimientos del robot, considerando esta característica como factor discriminante se selecciona la tercera configuración.

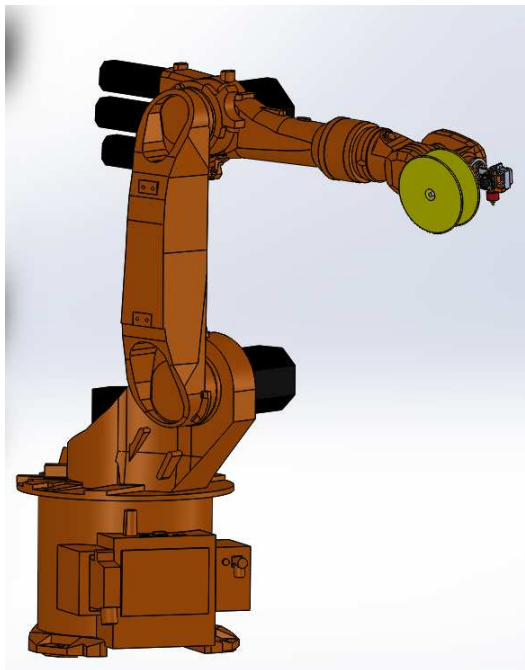


Figura 15 Tercera propuesta de diseño

Luego de la conceptualización del diseño, se particulariza el estudio para cada componente que se irá adaptado al robot, lo cual permitirá un óptimo dimensionamiento, logrando una adecuada funcionalidad una vez ensambladas todas las partes.

En esta etapa hay que tener en cuenta los procesos de manufactura, ensamblaje y acabado final.

Una ventaja de la opción seleccionada es que las zonas muertas del robot no representan una limitación, también debido a que el espacio de trabajo a emplearse es de reducidas dimensiones, igualmente no hay afectación desde la estructura del soporte para que el filamento pueda cargarse cuando el robot adopte la posición de cero de pieza.

Además se debe considerar que el sistema pueda desmontarse con facilidad, y de esta forma adoptar otras configuraciones acordes al empleo del robot.

3.4.7 Soporte del extrusor

Se decide utilizar una estructura fabricada en polímero mediante impresión 3D por su rápida manufactura y baja transferencia de calor. El diseño del soporte fue realizado a fin de acoplarse al cambiador de herramienta, reduciendo la masa sin afectar su robustez, y así pueda soportar las cargas aplicadas (Fig. 16)

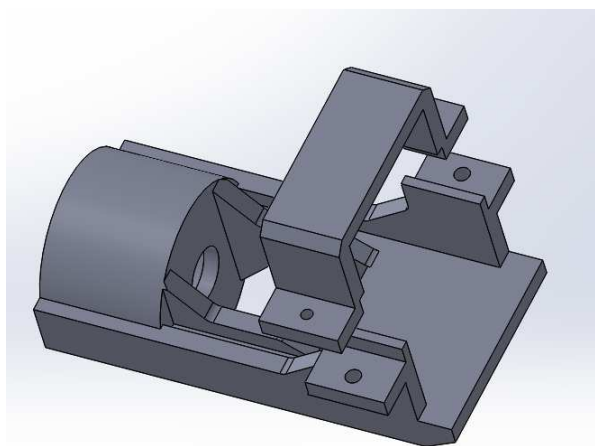


Figura 16 Vista isométrica del soporte principal y seguro.

Para el diseño del soporte del hotend, mediante software primero se realizó un análisis de esfuerzos para verificar su resistencia ante determinadas cargas, y también un análisis térmico, para verificar la tasa de transferencia de calor.

En la Figura 17 se observa el resultado obtenido al aplicar una fuerza de 200 Newtons = 100 Kg/mm² mediante simulación por elementos finitos, la carga es relativamente exagerada ya que en la práctica el soporte no sufrirá grandes esfuerzos, como resultado tenemos un desplazamiento máximo de 0,0079 m y un factor de seguridad de 3.

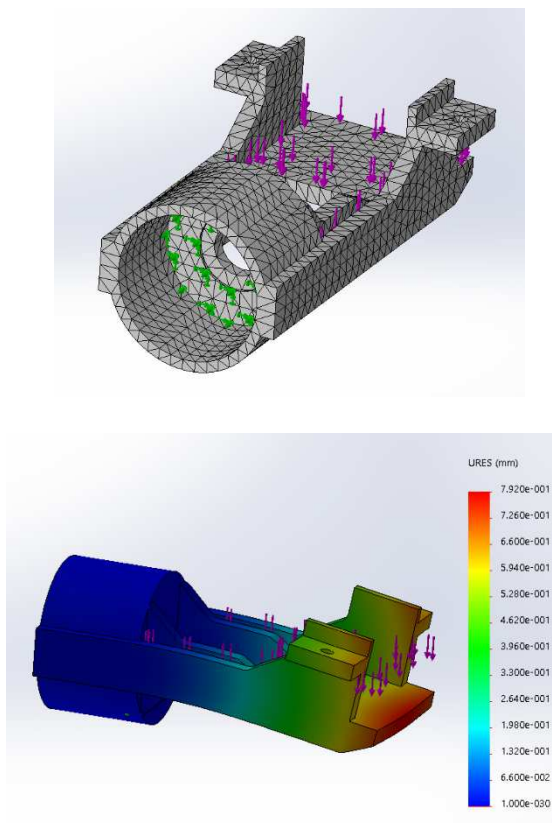


Figura 17 Análisis de elementos finitos del soporte

Para el análisis térmico aplicamos una temperatura de 80 °C en los extremos donde irá fija la unidad de extrusión (color rojo) y al finalizar el análisis se concluye que el punto de contacto con el robot (color azul) no sufre incremento de temperatura (Figura 18).

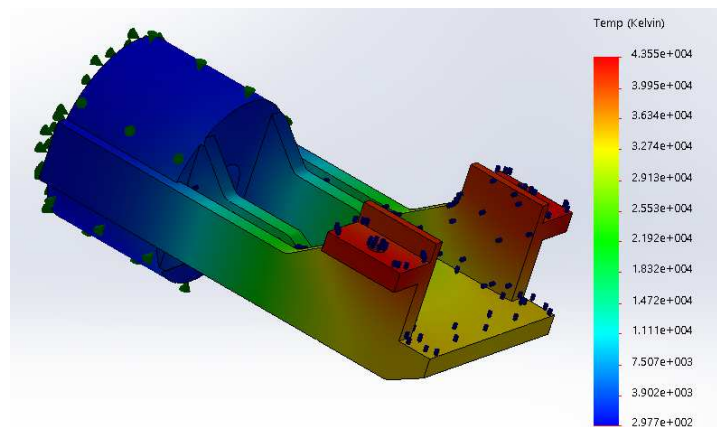


Figura 18 Análisis térmico en Solidworks Simulation

En la Figura 19, se representa el acoplamiento del soporte y el extrusor termoplástico al brazo robótico KUKA KR-16.

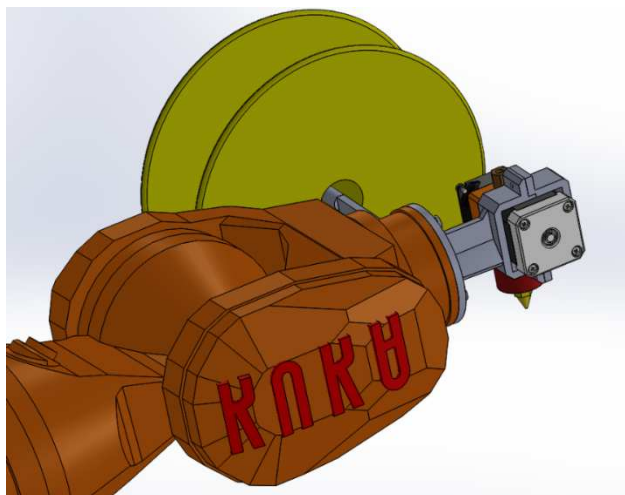


Figura 19 Acoplamiento del extrusor al brazo robótico

3.4.8 Base de deposición

Este elemento es donde se deposita el material fundido, debe ser una superficie plana, e irá sujeta directamente a la mesa de trabajo del robot. Dispondrá de pernos que ayuden a regular la superficie con respecto a la mesa de trabajo reduciendo los errores de nivelación.

Esta base MK2B es comercial y está fabricada en chapa de aluminio, fácilmente desmontable para su mantenimiento y limpieza. Las dimensiones de la base son de 215 x 215 mm, con conexión a 12 y 24 Vdc, y puede alcanzar temperaturas de hasta 80°C. (Ver Figura 20).



Figura 20 Base de deposición (cama caliente)

3.5 Etapa electrónica

Luego de haber realizado el ensamblaje y comprobación de los componentes mecánicos el siguiente paso es el diseño electrónico.

Los componentes electrónicos permitirán comunicar los diferentes elementos con el controlador del robot, el cual es el cerebro del sistema (Figura 21).

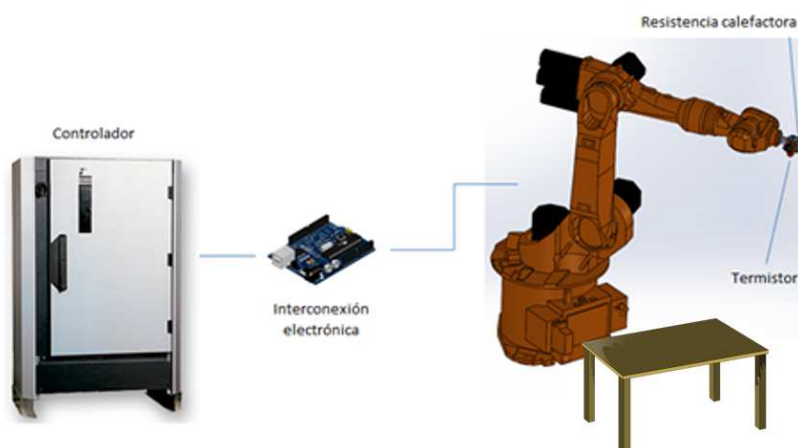


Figura 21 Esquema general de interconexión

Son dos las etapas (Figura 22) que deben ejecutarse durante el funcionamiento del sistema:

- Etapa de control: Con señales digitales que transmitan las órdenes desde el controlador KRC2 del robot hacia los elementos de control (extrusor).
- Etapa de potencia: Con señales analógicas que gobiernen directamente los parámetros físicos del sistema.

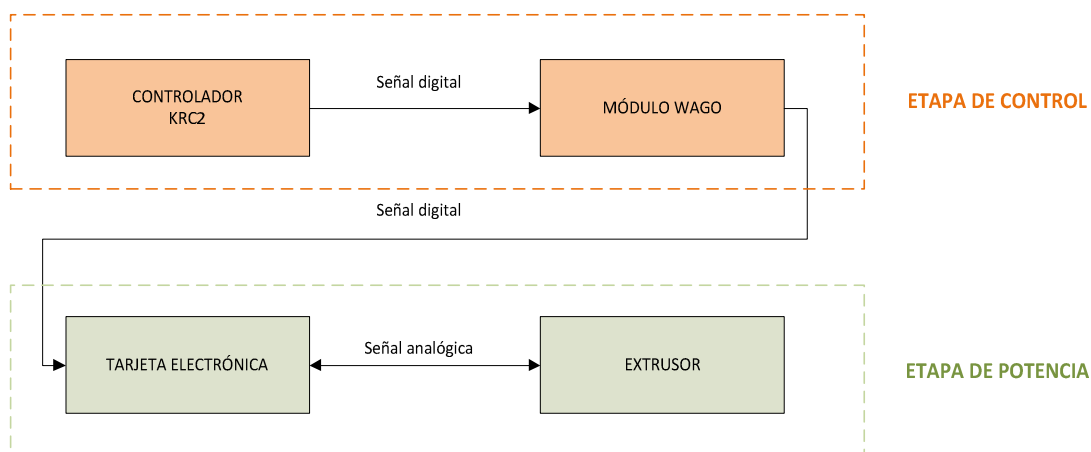


Figura 22 Etapas de conexión electrónica

El controlador KRC2 se comunica con el mundo exterior a través del módulo WAGO, el cual permite la conexión de entradas/salidas digitales mediante software, normalmente el número de entradas y salidas digitales disponibles es de 1024, pero existe la posibilidad de utilizar 2048 o 4096.

En el armario de control KRC2 está instalado un módulo WAGO que para la etapa de control de este proyecto se utiliza una salida digital (Figura 23).

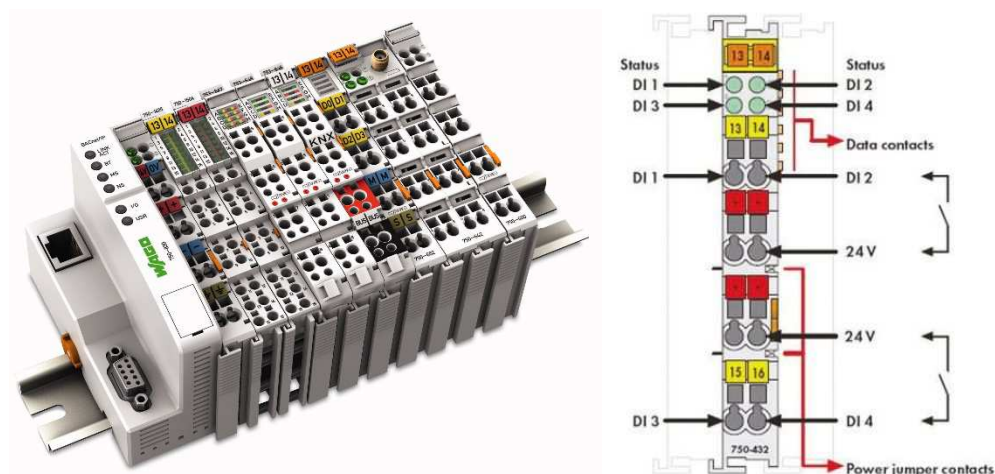


Figura 23 Entradas y salidas del módulo WAGO

Fuente: (Datasheet wago 787, 2011)

En la etapa de potencia, los elementos (efector final) que se desea controlar en el sistema son:

- El sistema de extrusión: Compuesto principalmente por el motor a pasos para el arrastre del material termoplástico.
- Calefactor: Incrementa la temperatura del sistema para la fundición del filamento. Para el caso del ABS y PLA, que son los materiales con los que se harán las pruebas las temperaturas de fusión son de 240°C y 200°C respectivamente.
- Sensor de temperatura: Permite monitorear la temperatura de trabajo.
- La base de deposición no será calentada para el caso del PLA pero para el ABS se debe calentar a una temperatura de 80°C.
- Ventiladores: ayudan al enfriamiento rápido del extrusor y del material fundido.

La placa electrónica incluida en el kit seleccionado en el numeral 3.5 del presente capítulo es la Arduino Mega 2560 que es una de las más empleadas en impresión 3D. Está basada en el microcontrolador ATmega 2560 y es probablemente el microcontrolador más capaz de la familia Arduino. Posee 54 pines digitales que funcionan como entrada/salida; 16 entradas análogas, un cristal oscilador de 16 MHz, una conexión USB, un reset y una entrada para la alimentación de la placa.

3.5.1 Control del motor paso a paso (P.A.P)

El motor P.A.P Nema 17 dosifica la inyección del material fundido, para su funcionamiento requiere cumplir una determinada secuencia (Tabla 9).

Tabla 9***Secuencia motor a pasos***

Paso	Bobina	Bobina	Bobina 2^a	Bobina
Paso 1	1	0	1	0
Paso 2	1	0	0	1
Paso 3	0	1	0	1
Paso 4	0	1	1	0

Fuente: (Datasheet NEMA 17, 2016)

La secuencia del motor se controlará mediante el driver Pololu A4988, las características principales de este controlador son las siguientes:

- Interface para control de pasos y dirección sencilla.
- Posee 5 resoluciones diferentes de paso que son: completo, medio, un cuarto, un octavo y un dieciseisavo de paso.
- Controla la corriente mediante la variación de un potenciómetro, lo cual permite usar voltajes superiores a los nominales y así lograr mayores tasas de paso.
- Control de troceo inteligente, el cual, detecta y selecciona automáticamente el modo de caída de corriente (caída mixta, caída lenta).
- Apagado automático por exceso de temperatura, bloqueo por bajo voltaje, y protección contra sobre corriente.
- Corto a tierra y protección contra corto-circuito.
- Dispone de 16 puertos, requiere un voltaje lógico de polarización (VDD) de 3 a 5.5 voltios y soporta de 8 a 35 voltios para la alimentación del motor (Vmot). Para proteger el motor de picos de tensión destructivos, el fabricante recomienda usar un condensador electrolítico mayor a 50 [uF] a través del motor y tierra.

El controlador A4988 consta de los siguientes puertos (Tabla 10):

Tabla 10

Puertos del controlador A4988

PIN	PUERTO	DESCRIPCIÓN
1	Enable	Entrada para encender o apagar el controlador.
2	MS1	Entrada de selección de modo de paso.
3	MS2	Entrada de selección de modo de paso.
4	MS3	Entrada de selección de modo de paso.
5	RESET	Entrada usada para setear el controlador a su estado inicial.
6	SLEEP	Entrada para poner el controlador en modo de bajo consumo
7	STEP	Entrada de tren de pulsos equivalentes a cada micropaso.
8	DIR	Entrada de direccionamiento del sentido de giro del motor.
9	GND	Conexión a tierra del controlador.

Fuente: (Datasheet pololu A4988, 2015)

La tarjeta que acopla las señales digitales de control con las señales analógicas de potencia es la RAMPS 1.4 (RepRap Arduino Mega Pololu Shield) que es una placa adicional al Arduino, la cual traduce las órdenes digitales del controlador en órdenes por pasos, a través de los drivers para los motores paso a paso.

Para enviar la señal de movimiento al motor, se necesita enviar pulsos a la entrada STEP de la tarjeta, y para controlar la dirección lo hacemos a través de la entrada DIR.

El controlador puede manejar una corriente máxima de 2A por bobina, siempre y cuando el circuito se encuentre a una temperatura no muy alta. Para corrientes mayores a 1A por bobina, se recomienda usar disipadores de calor u otro método de enfriamiento en el controlador.

El motor Nema 17 maneja hasta 1.7A por bobina, por lo cual es necesario añadir un disipador de calor.

La entrada ENABLE activa o desactiva el controlador, cuando se envía un cero lógico se activan las salidas, mientras que con la señal en uno lógico las desactiva.

La entrada de RESET sirve para resetear el controlador aplicando una señal en alto. La entrada SLEEP sirve como modo de trabajo a bajo consumo. Debido a que en el circuito necesita mantener enclavados los motores para mantener la posición, la entrada SLEEP debe permanecer en bajo para mantenerse activa la controladora, por lo cual se conecta en serie a la entrada RESET que se encuentra flotando, de acuerdo a las recomendaciones del fabricante.

Cuando el RESET, se encuentra en encendido el motor arrancará y el driver leerá los comandos enviados.

Cuando la señal de STEP, se activa, permite avanzar al motor una vez por cada pulso de energía, esta secuencia se controla mediante la instrucción T To PASOS, que crea un bucle, que no se detendrá hasta cumplir con el valor determinado.

Los comandos DLY, es el tiempo que se detiene el programa, para pasar a otra instrucción.

A continuación en la figura 24, se muestra la conexión general del circuito electrónico.

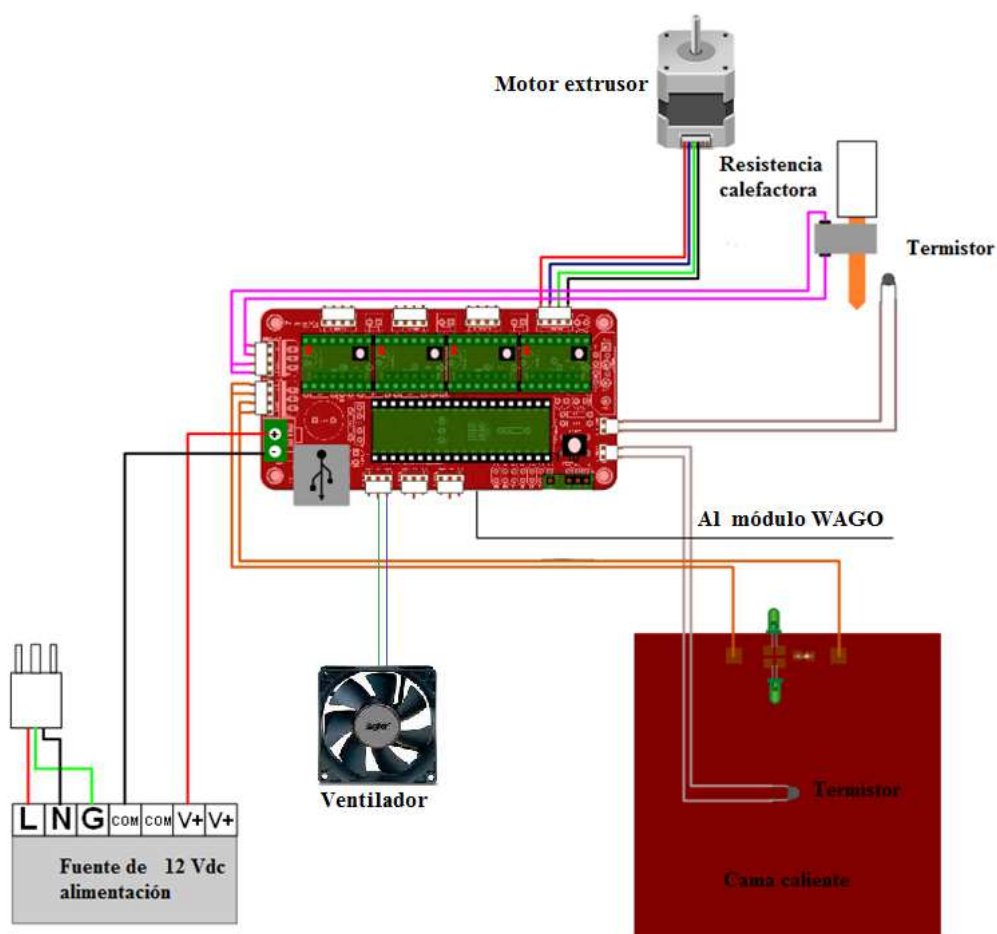


Figura 24 Esquema de interconexión electrónica

Fuente: (RAMPS 1.4 Assembly Guide, 2015)

3.6 Programación

La última etapa en el diseño es aquella en la cual mediante sentencias y líneas de código se proporciona al sistema las instrucciones que debe ejecutar para cumplir con el objetivo principal.

En la Figura 25 se visualiza el algoritmo para el funcionamiento del sistema.

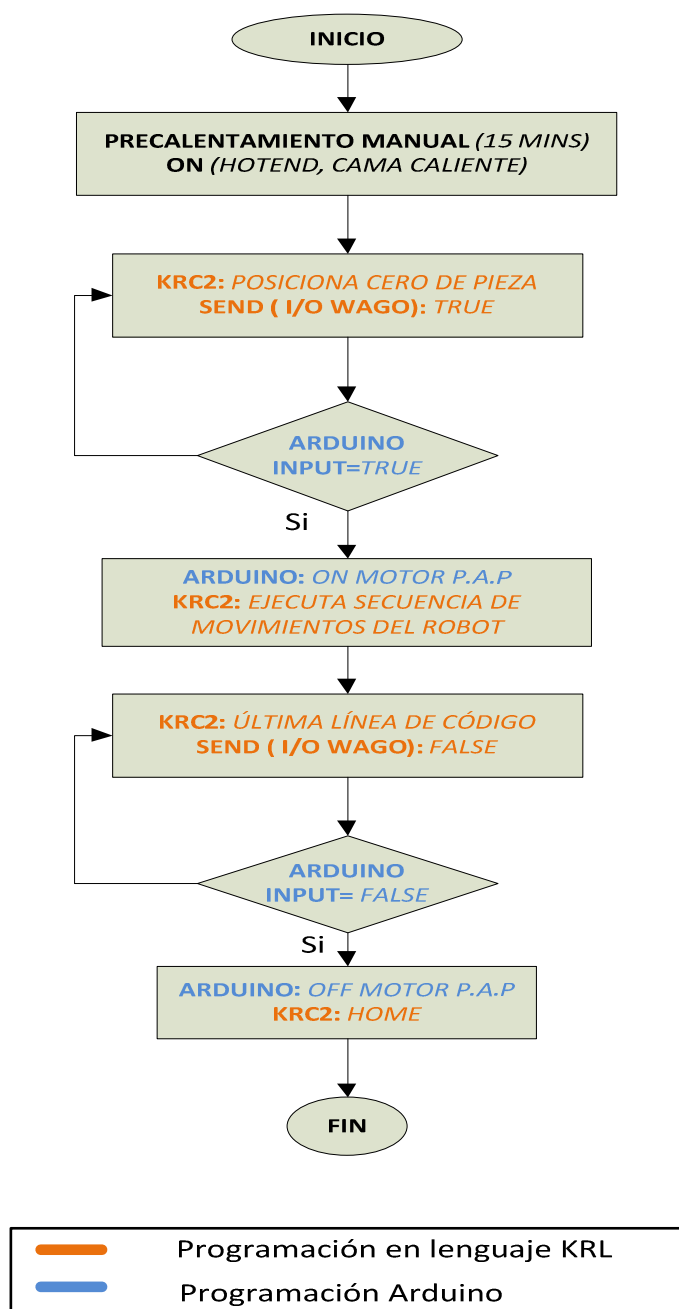


Figura 25 Algoritmo para el FDM con el robot KUKA

La secuencia comienza con el precalentamiento manual del hotend y la cama caliente, el programa principal da inicio posicionando al robot en el cero de pieza, llegado a ese punto se envía una orden a la tarjeta Arduino para iniciar con la deposición del material, en ese momento y durante el resto de la operación ambos programas (KUKA KRL & Arduino) se ejecutarán simultáneamente pero por

separado, el primero desplazará al robot a través de determinadas trayectorias y el segundo gobernará al sistema de extrusión.

Al completar la última trayectoria, el robot ordenará al Arduino la desactivación del sistema de extrusión. La placa electrónica Arduino Mega 2560 trae embebido el firmware de impresión 3D Marlin y al ser de código abierto nos permitirá realizar pequeñas modificaciones para adaptarlo a los requerimientos de nuestro sistema.

El estudio y desarrollo de un software de post-procesado es un tema amplio y de considerable complejidad, el cual consiste en crear un programa mediante una secuencia de instrucciones basadas en algoritmos, empleando un lenguaje de programación específico.

Para la presente investigación fue necesario contar con un post-procesador con dos funcionalidades específicas, la primera es que permita ejecutar el rebanado curvo (Capítulo 2, numeral 2.3.4) y luego que transforme las instrucciones en lenguaje KRL entendible por el robot Kuka.

Al no existir un software comercial para el rebanado curvo, se ha buscado varias alternativas, que son adaptaciones de paquetes informáticos existentes:

- Empleo de software CAM de fresado (MasterCAM), cuya naturaleza es la manufactura sustractiva, por lo que presentó varios inconvenientes como: variabilidad en la forma y separación de las trayectorias, generación de ángulos mayores a 55°.
- Empleo de scripts (subprogramas) enlazados al software Cura, sin embargo se produjo cierta deficiencia en el funcionamiento obteniendo superficies con baja curvatura.

- Empleo del software Rhinoceros para generar superficies curvas individuales, luego sobreponerlas y así obtener un sólido que sea transferido al software Cura, con lo cual también se obtuvo una baja curvatura.

Para transformar los códigos G al lenguaje del robot Kuka existe el software del fabricante, pero no está destinado para la manufactura aditiva, por lo que se plantearon dos opciones:

- Utilizar el software Kuka CamRob, que fue desarrollado para aplicaciones como encolar, desbarbar, soldar, serrar, etiquetar o medir, y adaptándolo para el prototipado rápido, se importaron los códigos G del software Cura, pero los movimientos resultaron imprecisos.
- Desarrollar un software de conversión, pero al existir un antecedente negativo en el trabajo de investigación realizado por Torres Sandino, 2015, en donde implementó un programa mediante el lenguaje Java y se obtuvo una baja calidad en la impresión, se desecha esta opción.

También existe el problema de que el Código G obtenido de un software de impresión 3D está destinado para un hardware cartesiano y no antropomórfico como lo es el brazo robótico, y se generan problemas durante la ejecución del programa KRL.

Sin embargo en los últimos años, ciertas empresas ya han logrado integrar la manufactura aditiva al entorno de los robots industriales mediante una plataforma informática optimizada. En la tabla 11, se realiza una evaluación de acuerdo a los requerimientos para el prototipado rápido robotizado.

Tabla 11***Comparativa del software para programación de robots industriales***

REQUERIMIENTO	Robotmaster	KUKA PRC	HAL
Rebanado curvo	No	No	No
Generación de trayectorias libres	Si	Si	Si
Importación de códigos G	Si	Si	No
Generación de lenguaje KRL	Si	Si	No
Soporte para robots Kuka	Si	Si	No
Tipo de programación	CAD/CAM	Paramétrica en entorno CAD	Paramétrica en entorno CAD
Aplicaciones extra	No	Si	Si
Precio USD	4500,00	432,00	459,00

Se determina que la opción más viable es el software KUKA|PRC por cumplir con la mayor cantidad de requerimientos y por su bajo costo (Referirse a las cotizaciones de los anexos 3, 4, 5).

3.6.1 Sólido de prueba

Para iniciar con la programación y dirigir nuestros esfuerzos hacia un objetivo en particular, es necesario determinar el sólido a ser manufacturado mediante el prototipado rápido con el robot Kuka.

Se ha tomado como referencia los trabajos de investigación titulados: Development of a Software procedure for Curved Layered Fused Deposition Modelling (CLFDM) del autor Bin Huang, y Modeling and evaluation of curved layer fused deposition del autor Sarat Singamneni, para seleccionar al sólido de la Figura 26, el mismo que es un modelo optimizado para ejecutar pruebas con la técnica de deposición curva de material fundido. El proceso de selección del sólido de impresión se detalla en el Capítulo IV del presente trabajo.

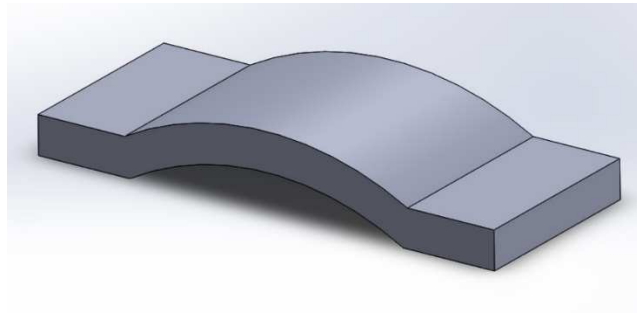


Figura 26 Probeta seleccionada

Fuente: (Huang B., 2012)

3.6.2 Programación mediante KUKA|prc

El KUKA|prc es un conjunto de componentes del plugin Grasshopper instalable en el software Rhinoceros que proporciona el Control Paramétrico para robots KUKA (PRC Parametric Robot Control).

Es un lenguaje de programación visual (Figura 27) basado en el modelado de algoritmos, no requiere de amplios conocimientos de programación o secuencias de comandos, pero permite la construcción de generadores de código, de forma que dan lugar a múltiples posibilidades de aplicación.

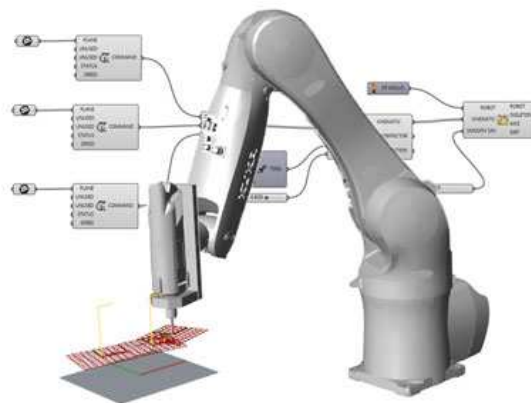


Figura 27 Programación mediante KUKA|prc

Fuente: (Brahuman J. (2016). Tutorial: Basic KUKA|PRC. Recuperado de

<http://forum.robotsinarchitecture.org/extradata/prcintro.jpg>)

Es un programa que se puede simplificar como una herramienta de uso de parámetros y componentes, donde los parámetros contienen y almacenan los datos, y los componentes guardan acciones que irán destinadas a trabajar con esos datos.

Pese a disponer de la herramienta de importación de códigos G obtenidos de Slic3r o Cura, no es posible su empleo en la presente investigación, en virtud de que éstos software sólo pueden realizar capas y trayectorias planas.

Por esta razón como una alternativa de solución para la manufactura del sólido se plantea crear las trayectorias “individualmente”, aprovechando las funciones del KUKA|prc, el cual mediante el ingreso de determinados parámetros puede realizar trazados en 2 y 3 dimensiones.

Se empleará la estrategia de deposición en zigzag por ser la más sencilla de ejecutar y el acabado superficial debe ser de nivel medio, con un ancho de capa de 0,5 mm, para el soporte y 0,3 mm para el sólido (Figura 28).



Figura 28 Representación de la estrategia de deposición en zigzag

Al emplear la estrategia de deposición en zigzag, se obtendrán capas con trayectorias continuas enlazadas entre sí, de tal forma que al superponerse una sobre otra se conforme el sólido tridimensional (Figura 29).

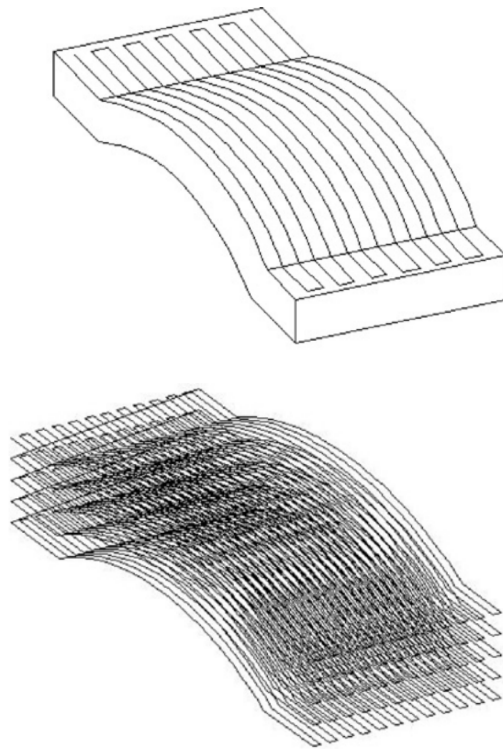


Figura 29 Sólido con trayectorias tipo zigzag

Para apoyar las formas geométricas con salientes, los programas de impresión 3D generan soportes automáticamente para evitar la caída y desperdicio del material,

Por esta razón en el entorno de Rhinoceros se inicia creando un soporte para la región arqueada, se trata una superficie generada desde una red de curvas con una base plana de 75 mm, un arco con radio de 75,25 mm y una profundidad de 50 mm (Figura 30). El sólido se asienta en el plano XY.

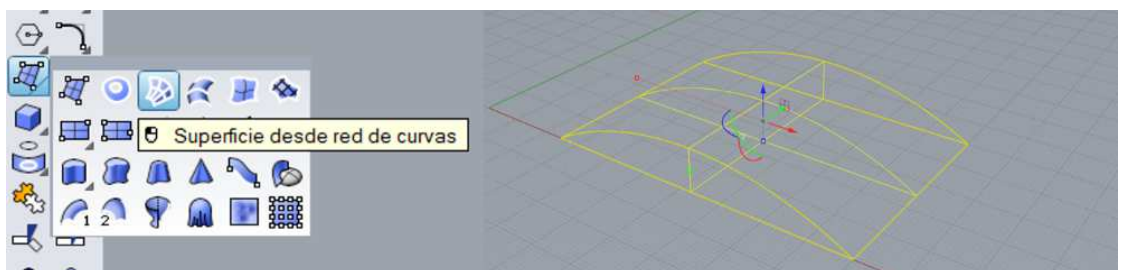


Figura 30 Sólido generado para el soporte.

Luego se realiza el trazado del perfil de la probeta, con un arco de radio de 75,25 mm y líneas de salida de 25 mm en cada extremo (Figura 31). La curva bidimensional está proyectada en el plano XY.

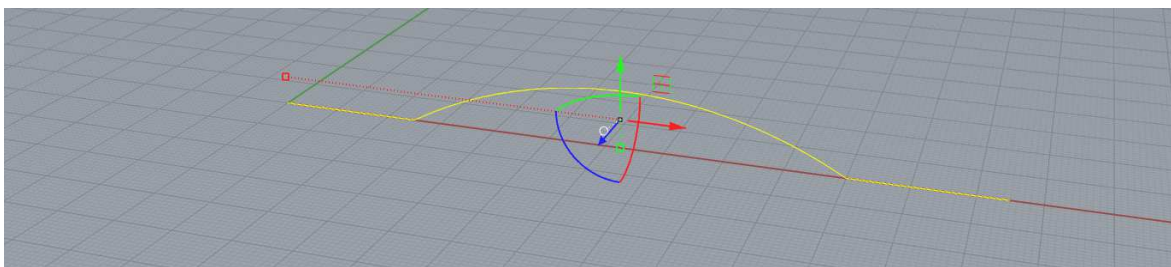


Figura 31 Perfil de la probeta en Rhinoceros

Los dos elementos deben ser coincidentes, es decir deben estar proyectados en el mismo plano y referenciados en las mismas coordenadas, como se visualiza en la Figura 32.

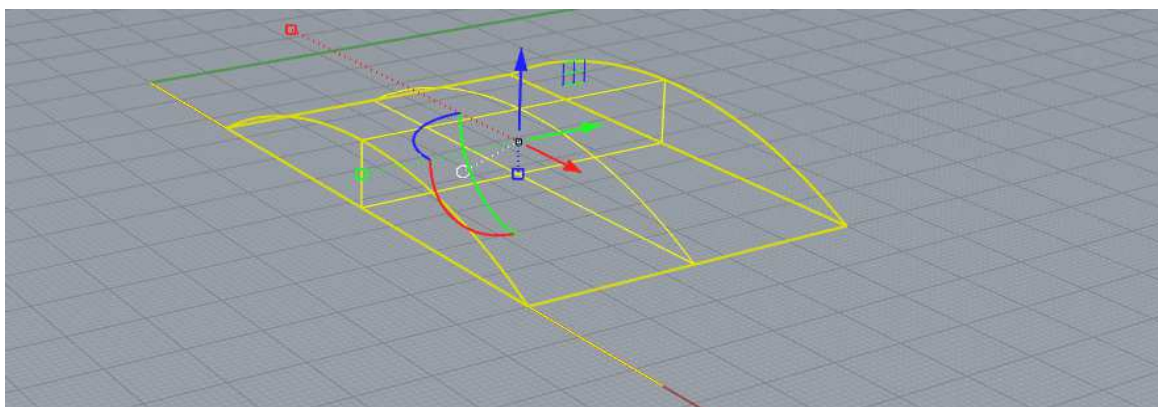


Figura 32 Sólido y perfil en Rhinoceros

En la línea de comandos de Rhinoceros digitar Grasshopper y enter para iniciar este plugin (Figura 33), dentro del cual se ejecutará el componente KUKA|prc.



Figura 33 Pantalla de inicio del plugin Grasshopper

La nueva pantalla desplegada muestra un entorno de programación gráfica con un área de trabajo (o lienzo), menú y varias herramientas.

Los scripts que guardan algoritmos para ejecutar una determinada acción están agrupados por categorías y se los puede seleccionar de la barra de tareas, generalmente son de forma cuadrada y tienen entradas y salidas. En la barra de herramientas se encuentra la pestaña KUKA|prc v2 con varias opciones como: núcleos, robots y herramientas virtuales, utilidades de toolpath y para automatización. (Figura 34).

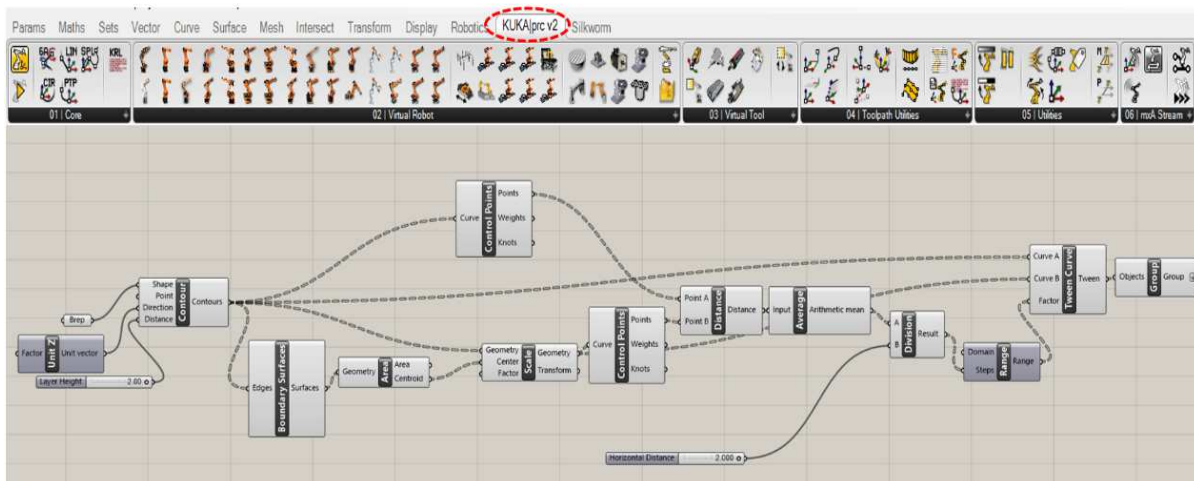


Figura 34 Entorno de programación en el componente KUKA|prc

La programación paramétrica para el prototipado del soporte inicia con el bloque Contour, mediante la herramienta Brep se enlaza al sólido diseñado en Rhinoceros, para orientar los contornos a través del eje z y se establece el ancho de la capa en 0,5 mm. (Figura 35).

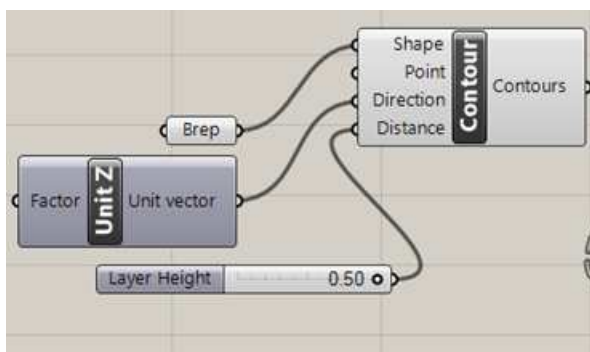


Figura 35 Bloques input de programación paramétrica

Los contornos obtenidos son enviados a cuatro bloques para las siguientes operaciones (Figura 36):

- Boundary surfaces, crea superficies planas desde un conjunto de bordes o curvas.
- Control points (CP), de los contornos o líneas se crean puntos de control y/o nodos.
- Scale, realiza la proyección de las curvas hacia una dirección.
- Tween curve, unifica la distancia de separación entre las líneas.

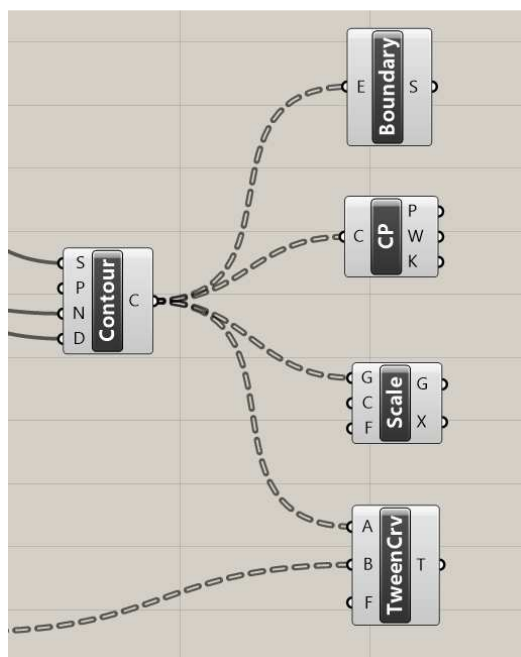


Figura 36 Bloques de procesamiento de curvas

El bloque Boundary surfaces se une al bloque Area, con el cual se limita a determinada área la proyección de las curvas y/o líneas (Figura 37).

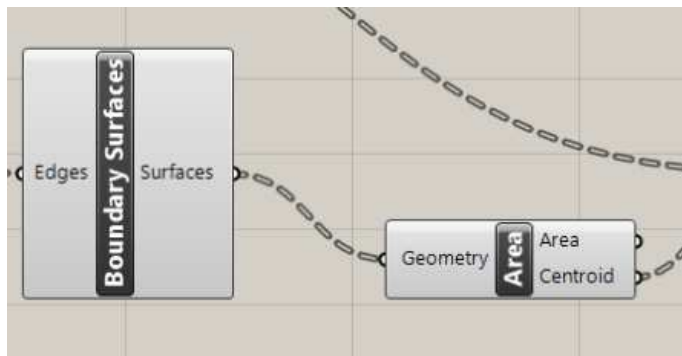


Figura 37 Bloques de unión de curvas de superficie.

Desde la salida centroid se realiza la conexión al bloque Scale para multiplicar el perfil en varias direcciones (Figura 38).

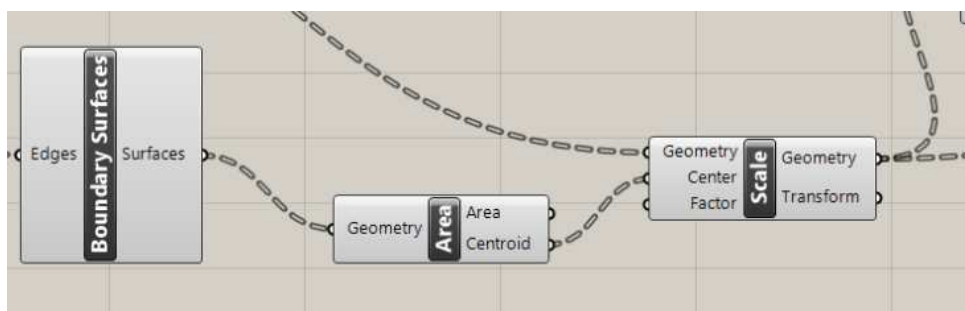


Figura 38 Bloque para la propagación de superficies

La salida geometry se conecta a dos bloques: a Tween Curve en donde se unifica la distancia (paralelado) entre las líneas de las trayectorias y a Control points que divide la curva en varios puntos NURBS para el control (Figura 39).

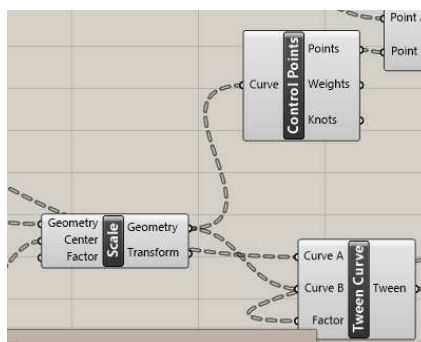


Figura 39 Bloques de paralelado y puntos NURBS de control

En el bloque Tween Curve se realizan dos operaciones, la de conformación de las trayectorias y la generación de puntos de control de cada curva o contorno. La salida es entregada al bloque Group que reagrupa las trayectorias, luego el bloque Dispatch genera dos listados de trayectorias para que a continuación el bloque Reverse List reordene una de las listas en sentido contrario (lo que da origen a la forma zigzag), el siguiente bloque Weave, une el final de una trayectoria con el inicio de la siguiente dando continuidad a toda la operación, nuevamente se repite el ciclo de generación de nuevos puntos de control en el bloque Control Points, luego la información pasa a posicionarse en el plano XY gracias al bloque XY Plane, el cual también configura el movimiento del robot en ese plano mediante el bloque Kuka PRC Linear movement que transmite la información al bloque Kuka Prc tool axis movement que añade un offset para los movimientos de aproximación del robot (Figura 40).

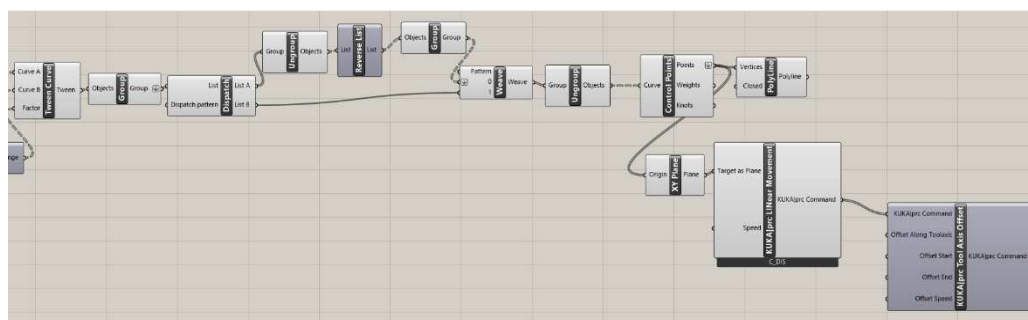


Figura 40 Bloques para la orientación de movimientos del robot kuka

El primer resultado parcial de esta programación es un conjunto de líneas que dan forma al soporte (Figura. 41)

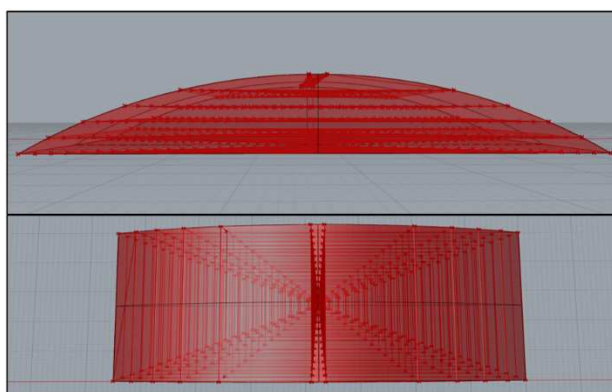


Figura 41 Trayectorias que dan forma al soporte

El siguiente paso es realizar la programación paramétrica para obtener el sólido, que consiste en una operación similar a la del soporte, con sus particularidades de emplear un perfil de curva que se multiplica en los planos XY y XZ dando forma al objeto deseado y cuya curvatura nos será útil para la deposición de material fundido en el eje Z.

Mediante la herramienta Curve Crv, se realiza el enlace con el perfil de curva generado en el entorno de Rhinoceros (Refiérase a la figura 31)

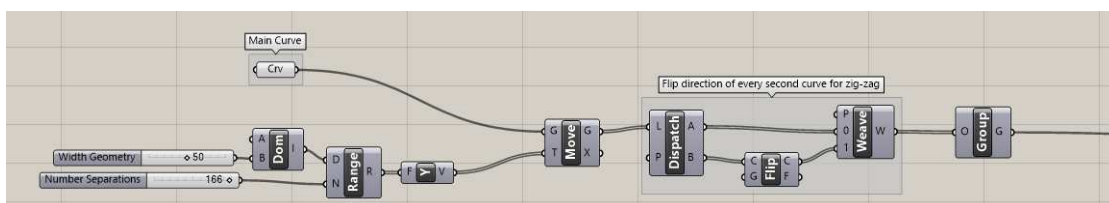


Figura 42 Bloques para el enlace hacia el perfil de curva del sólido (probeta)

A través del bloque Domain (Figura 42) se establece la profundidad de la geometría, de 50 mm. que es la distancia donde se proyectarán el perfil de la curva con dirección en el eje Y, luego el bloque Range establece la separación entre las líneas de perfil:

$$\text{Nro. de separaciones en Y} = \frac{\text{profundidad}}{\text{ancho de capa}} = 50/0,5 = 166,66 \quad [9]$$

El bloque Move fusiona el perfil de la curva con los parámetros del paso anterior, a continuación el bloque Dispatch crea dos listados de las líneas generadas y

una de ellas es invertida en el orden mediante el bloque flip, el bloque weave enlaza el final de una línea con el inicio de la siguiente proporcionando la continuidad requerida para la trayectoria (Figura 43).

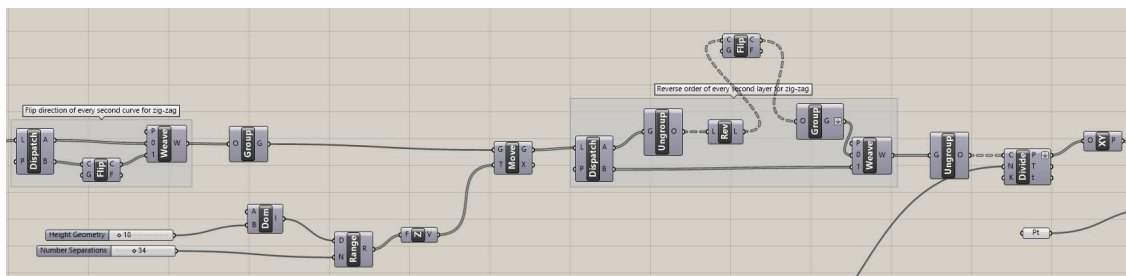


Figura 43 Bloques de procesamiento para la generación de trayectorias tipo zigzag

A continuación se busca desplazar las líneas en el eje Z para lograr el aumento volumétrico del sólido, por lo que se repite el paso anterior con la variación de emplear el vector Z como conexión entre los bloques Range y Move.

Ya en el bloque Ungroup se realiza la individualización de las líneas para pasar al bloque Divide y luego proyectarse al plano XY y conectarse al bloque Kuka Prc tool axis movement que añade un offset para los movimientos de aproximación del robot.

El segundo resultado parcial de esta programación es un conjunto de líneas que dan forma al sólido (Figura 44)

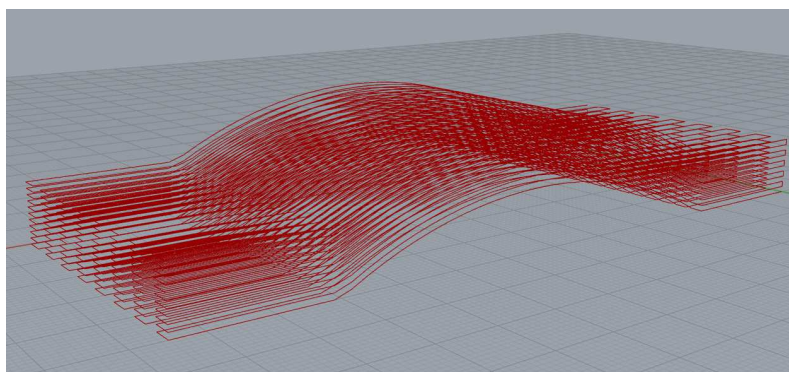


Figura 44 Trayectorias obtenidas para el sólido

Para obtener un solo código es necesario unir las dos programaciones parciales, lo cual se realiza empleando el bloque Merge (Figura 45).

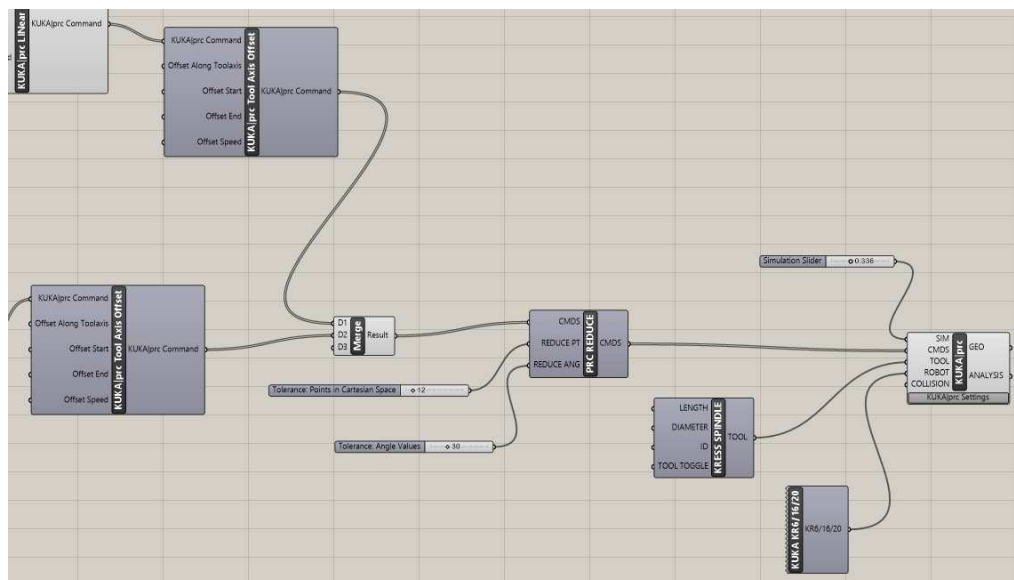


Figura 45 Unión de las programaciones parciales

Finalmente junto con los bloques de tipo de robot (KR16) y herramienta (recomendado el spindle) se conecta con el bloque Kuka Core, que es el generador de código para robots KUKA (Figura 46).

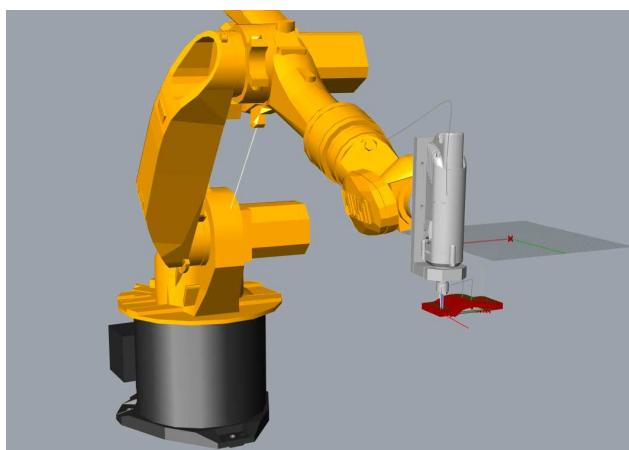


Figura 46 Simulación en Rhinoceros

Dando doble click izquierdo sobre la opción Kuka Prc Settings del bloque Kuka Prc Core se despliega la ventana de configuración (Figura 47).

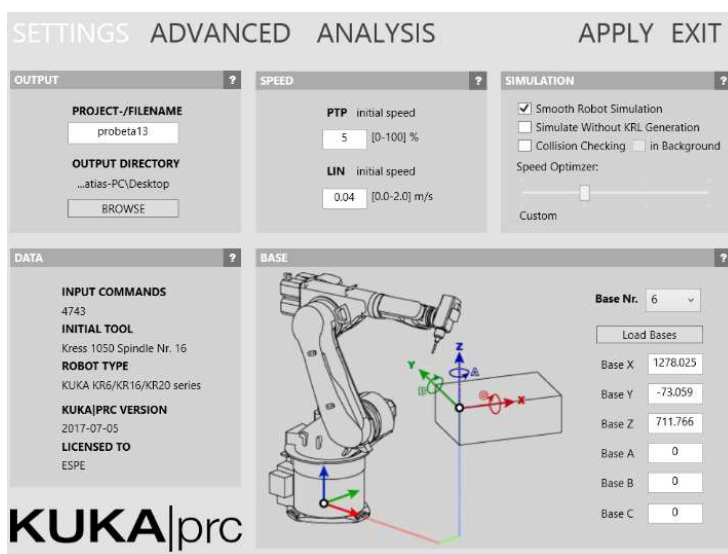


Figura 47 Ventana de configuración del Kuka PRC

En la pestaña settings, opción load bases escogemos el archivo \$config.DAT perteneciente al robot KukaKr16, el cual guarda las configuraciones propias de orientación, herramientas, bases de trabajo, etc.

En Base Nr. se selecciona el número 6, en la opción PROJECT-/FILENAME asignamos un nombre al archivo de salida, en OUTPUT DIRECTORY/BROWSE se direcciona al destino de almacenamiento del archivo, en la opción PTP initial speed ingresar el valor 5, que es la velocidad de aproximación del robot al punto de inicio, y en LIN initial speed asignar el valor de 0,004 que es la velocidad en m/s para los movimientos del robot durante la ejecución del programa de extrusión. (Figura 47).

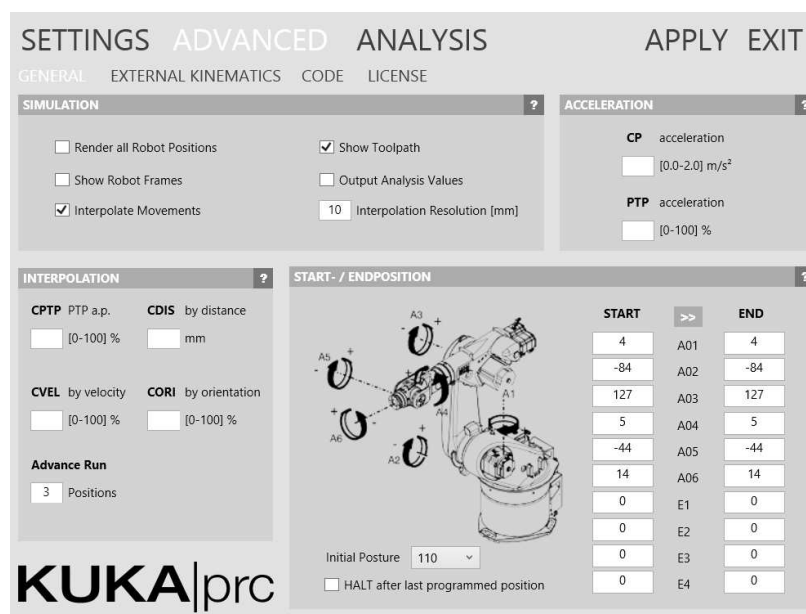


Figura 48 Opción avanzada de configuración

Pasando a la pestaña ADVANCED se ingresan los valores para A01, A02, A03, A04, A05, A06 de la opción START y END (Figura 48), que definen la posición home del programa, luego en la opción Initial Posture se selecciona el valor 110 que corresponde al método de aproximación del robot a la base de trabajo (trayectoria más corta).

Finalmente dar click en APPLY para la generación del archivo .KRL compatible con el robot Kuka (Figura 49).

```
&ACCESS RVP
&REL 1
&PARAM TEMPLATE = C:\KRC\Roboter\Template\vorgabe
&PARAM EDITMASK = *
DEF probeta13 ( )

;FOLD INI
;FOLD BASISTECH INI
GLOBAL INTERRUPT DECL 3 WHEN $STOPMESS==TRUE DO IR_STOPM ( )
INTERRUPT ON 3
BAS (#INITMOV,0 )
;ENDFOLD (BASISTECH INI)
;ENDFOLD (INI)

;FOLD STARTPOSITION - BASE IS 6, TOOL IS 16, SPEED IS 5%, POSITION IS A1 4,A2 -84,A3 127,A4 5,A5 -44,A6 14,E1 0,E2 0,E3 0,E4 0
$BWDSTART = FALSE
PDAT_ACT = {VEL 5,ACC 100,APO_DIST 50}
FDAT_ACT = {TOOL_NO 16,BASE_NO 6,IPO_FRAME #BASE}
BAS (#PTP_PARAMS,5)
PTP {A1 4,A2 -84,A3 127,A4 5,A5 -44,A6 14,E1 0,E2 0,E3 0,E4 0}
;ENDFOLD

;FOLD LIN SPEED IS 0.04 m/sec, INTERPOLATION SETTINGS IN FOLD
$VEL_CP=0.04
$ADVANCE=3
;ENDFOLD

;FOLD COMMANDS IN FOLD. SELECT EDIT/FOLDS/OPEN ALL FOLDS TO DISPLAY
PTP {E6POS: X 50, Y 15, Z -79.62, A 0, B 90, C 0, E1 0, E2 0, E3 0, E4 0, S 'B 110'} C_PTP
LIN {E6POS: X 50, Y 15, Z -79.62, A 0, B 90, C 0, E1 0, E2 0, E3 0, E4 0} C_DIS
LIN {E6POS: X 25, Y 15, Z -79.62, A 0, B 90, C 0, E1 0, E2 0, E3 0, E4 0} C_DIS
LIN {E6POS: X 0, Y 15, Z -79.62, A 0, B 90, C 0, E1 0, E2 0, E3 0, E4 0} C_DIS
```

Figura 49 Extracto del Código KRL obtenido

3.7 Implementación

Para la materialización del proyecto se inició con la fabricación e instalación de los componentes del hardware del sistema, como son: acoplamiento para el soporte entre el extrusor y el extremo del brazo del robot (obtenido en impresión 3D) y acoplamiento para el soporte entre el brazo robot y el carrete del filamento (obtenido en impresión 3D) (Figura 50).



Figura 50 Acoplamiento al robot del sistema de extrusión.

Luego se realizó la instalación de los componentes electrónicos en el interior de la caja de control (Figura 51).



Figura 51 Caja de control electrónica

El siguiente paso fue realizar el guiado del cableado el cual comunicará a los diferentes componentes del sistema (Figura 52).

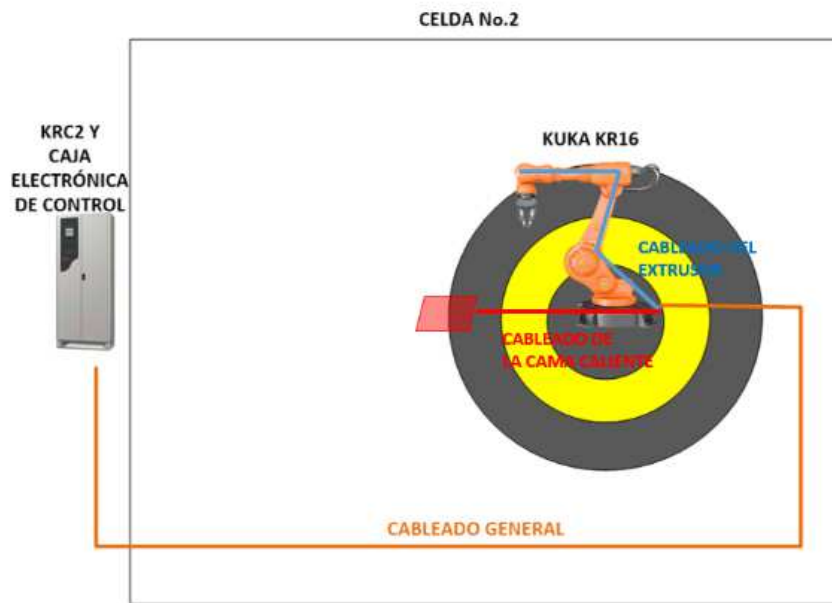


Figura 52 Esquema del guiado del cable.

A continuación se interconecta el controlador KRC2 con la tarjeta electrónica que controla el extrusor, esto se realiza mediante un relé cuya bobina está conectada al módulo Wago, y su contacto normalmente abierto proporciona 5Vdc al puerto de entrada digital del Arduino (Fig. 53).

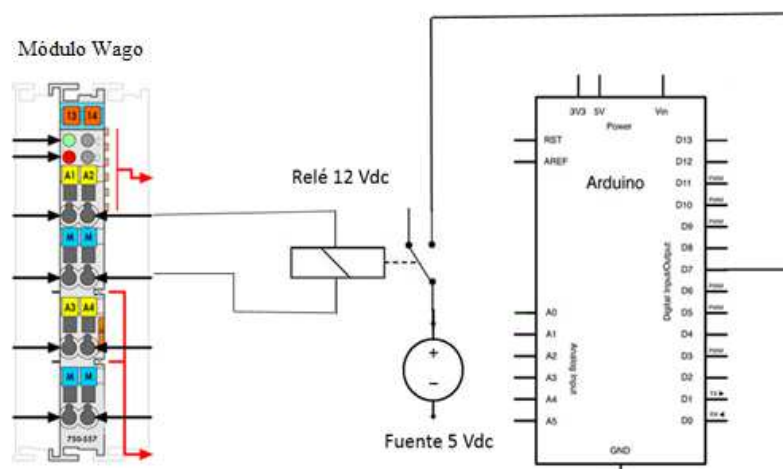


Figura 53 Interconexión entre el KRC2 y el Arduino

Luego se realiza la habilitación por software tanto en el controlador KRC2 (salida digital) y de la tarjeta Arduino (entrada digital)

A continuación, se emplea una memoria USB para copiar el archivo obtenido del software KUKA|prc desde el computador hasta el controlador KRC2 del robot (en modo programador experto), se inserta en la carpeta RC1 y seleccionar con el Soft key.

Se debe iniciar precalentando el extrusor (hasta los 200°C) y la cama caliente (hasta los 50°C), esto toma aproximadamente 15 minutos y se lo realiza mediante la caja de control electrónica.

Para ejecutar el programa es necesario cambiar al modo automático mediante la perilla selectora del KCP (Kuka Control Panel), luego seleccionar el archivo .KRL obtenido del software KUKA|prc y posteriormente pulsar dos veces el softkey Start (+), (Referirse al manual de operación del sistema del Anexo 1).

Las primeras capas del soporte fueron adhiriéndose unas a continuación de otras gracias al pegamento aplicado en la cama caliente y al emplear la velocidad y temperatura adecuada se obtuvo un comportamiento estable.

Una vez impreso el soporte, de forma continua se dio inicio a la impresión del sólido. En la parte curva, se pudo observar el movimiento rotatorio del cabezal extrusor, esto con el propósito de mantener su perpendicularidad hacia la trayectoria de deposición.

Luego de 4 horas y 41 minutos finalizó la impresión para luego dar paso al tratamiento mecánico de acabado post-impresión, que consistió únicamente en la separación del soporte del sólido principal mediante una herramienta de corte.

CAPITULO IV

4. Pruebas

4.1 Procedimiento.

Previo a la impresión de la probeta seleccionada, fue necesario ejecutar ciertas pruebas iniciales para luego llegar al prototipado final, estas son:

- Acoplamiento de los componentes adaptados al robot KUKA.
- Impresión de trayectorias cortas.
- Impresión final de la probeta seleccionada.
- Y ensayos mecánicos específicos de los sólidos obtenidos, que nos permitan evaluar y comparar sus características.

En las pruebas funcionales se verificó que las adaptaciones, acoplamientos mecánicos y cableado no impidan el libre movimiento del robot, para lo cual se desarrolló un test de movimientos en el área de trabajo que es de 2.311.250 mm³, correspondiente a la cama caliente, el mismo que no presentó colisiones como se muestra en la tabla 12.

Tabla 12*Test de movimientos del robot en el área de trabajo.*

Movimientos		Coordenadas		Colisiones
		Inicio	Final	
home → área de trabajo		1278,-73,711	0,0,0	0
Dentro del área de trabajo	X	0,0,0	215,0,0	0
		0,215,0	215,215,0	0
		0,0,50	215,0,50	0
		0,215,50	215,215,50	0
	Y	0,0,0	0,215,0	0
		215,0,0	215,215,0	0
		0,0,50	0,215,50	0
		215,0,50	215,215,50	0
	Z	0,0,0	0,0,50	0
		0,215,0	0,215,50	0
		215,0,0	215,0,50	0
		215,215,0	215,215,50	0
			TOTAL	0

Luego se realizaron pruebas de continuidad eléctrica del cableado (Tabla 13).

Tabla 13*Resultados de la prueba de continuidad en los cableados*

LÍNEA	CONTINUIDAD
(+) extrusor	Si
(-) extrusor	Si
(+) termistor 1	Si
(-) termistor 1	Si
(+) ventilador 1	Si
(+) ventilador 2	Si
(1A) Rojo Motor P.A.P	Si
(1B) Azul Motor P.A.P	Si
(2A) Verde Motor P.A.P	Si
(2B) Negro Motor P.A.P	Si
(+) cama caliente	Si
(-) cama caliente	Si
(+) termistor 2	Si
(-) termistor 2	Si
PORCENTAJE TOTAL	100%

También se realizó la energización del extrusor, cama caliente y ventiladores mediante la caja electrónica de control y la medición de los niveles de voltaje de alimentación (Tabla 14).

Tabla 14

Voltajes de los elementos de consumo

ELEMENTOS ELÉCTRICOS PASIVOS VOLTAJE	
Calefactor extrusor	12V
Ventilador 1	11,5V
Ventilador 2	11,43V
Calefactor cama caliente	11,76V

Para comprobar el funcionamiento del motor a pasos Nema 17 se empleó el menú de la caja electrónica para enviar las órdenes de giro en determinados grados. (Tabla 15).

Tabla 15

Grados de giro del motor a pasos nema 17

GRADOS	
Programado	Obtenido
90°	90°
180°	180°
270°	270°
360°	360°

Las pruebas de prototipado rápido se iniciaron en el modo T1 (manual) con la impresión de trayectorias lineales cortas y luego la formación de las 3 primeras capas para de esta forma verificar el comportamiento del sistema (Ver figura 54). Se pudo comprobar la poca adherencia de las primeras capas a la cama caliente, lo cual fue solucionado aplicando una pequeña cantidad de pegamento blanco antes de iniciar con la operación.

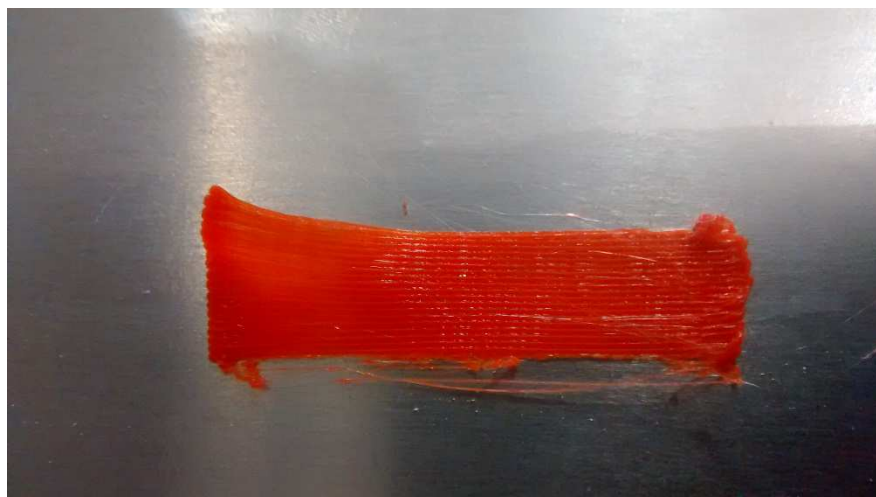


Figura 54 Resultado de la prueba inicial de prototipado de 3 capas

El cambiador de herramienta del robot kuka kr16 al cual fue acoplado el sistema de extrusión generó una considerable distancia de separación (30 cm) entre la boquilla de extrusión y el muñón del robot, lo que ocasionó cierta vibración durante los movimientos en el sentido $X \rightarrow -X$, razón por lo cual se optó por generar la mayor parte de trayectorias para movimientos a través del eje Y.

Autores como Jhoannes Brauman, Torres Sadino y Swanson recomiendan que el archivo en lenguaje .KRL no debe exceder el 1MB de tamaño, ya que podría causar conflictos con la memoria interna del controlador KRC2, ventajosamente para el presente proyecto no se excedió ese límite.

A continuación centraremos nuestra atención en el estudio de los resultados obtenidos durante los ensayos mecánicos.

Para la elaboración de objetos de prueba (probetas), existen varias normas y estándares enfocados para los diferentes tipos de materiales. Para los polímeros obtenidos mediante manufactura aditiva existen las normas ASTM D638, ISO 527-2, ASTM D3039 e ISO 458.

Sin embargo las dimensiones y geometría plana de las probetas establecidas en tales normativas no permitirían visualizar con claridad los efectos de la impresión de acuerdo al perfil de la pieza (impresión curva) (Figura 55).

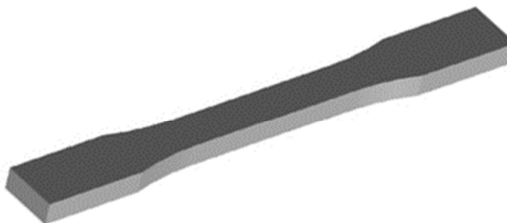


Figura 55 Diseño típico de una probeta para ensayos mecánicos

Fuente: (Norma ASTM D638-10, 2010)

Luego de la recopilación de material bibliográfico, se pudo verificar que al momento no existe una normativa establecida para el dimensionamiento y análisis de la técnica de impresión 3D con curvas, por lo cual se buscó información en trabajos científicos relacionados, siendo los más útiles para nuestro propósito los siguientes:

- Development of a Software procedure for Curved Layered Fused Deposition Modelling (CLFDM) del autor Bin Huang, en esta investigación el autor realiza el estudio de un algoritmo matemático en Matlab para el prototipado rápido con curvas, pero obtiene piezas con baja calidad de acabado, sin embargo este estudio nos resulta de utilidad ya que por primera vez se emplea una probeta dimensionada para este propósito.
- Modeling and evaluation of curved layer fused deposition del autor Sarat Singamneni, que es un trabajo complementario al anterior, y en el que nuevamente se emplea el mismo modelo de probeta para prototipado rápido con curvas (Figura 56).

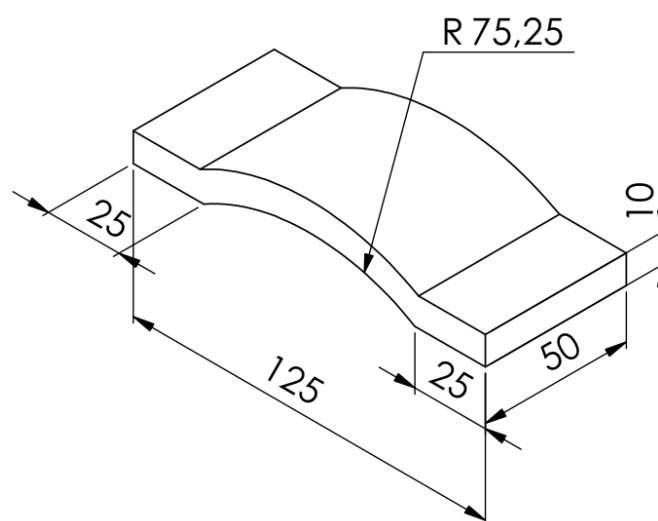


Figura 56 Plano 3D de la probeta (mm)

Fuente: (Huang B., 2012)

El sólido fue manufacturado considerando los siguientes parámetros:

Tabla 16

Parámetros considerados para el prototipado rápido

Material	ABS/PLA
Altura de capa	0,3mm sólido / 0,5mm soporte
Temperatura extrusor	200 °C (ABS) / 180 °C (PLA)
Temperatura cama caliente	80 °C (ABS) / 60 °C (PLA)
Estrategia de deposición	Zigzag
Velocidad de avance	40 mm/s
Tipo de impresión	Plano (impresión 3D convencional) y curvo (impresión robotizada)
Ventilador	Velocidad baja
Calidad acabado	Medio bajo

Los sólidos obtenidos se muestran en la Figura 57.

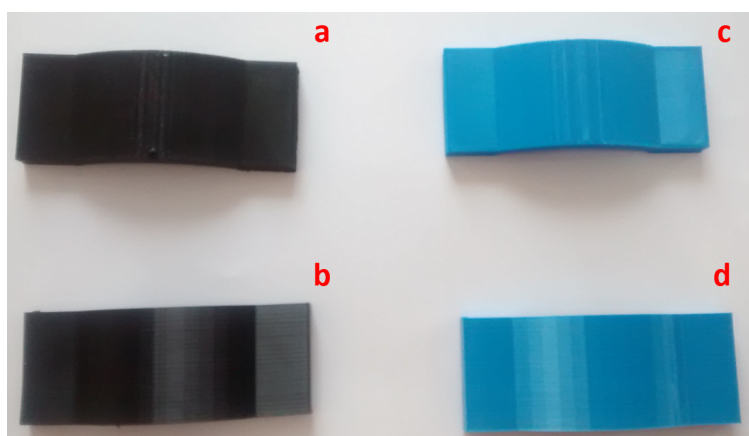


Figura 57 a) PLA plano, b) PLA curvo, c) ABS plano, d) ABS curvo

Los ensayos mecánicos se ejecutaron en el Centro de fomento productivo metalmecánico carrocerero (Figura 58), localizado en la ciudad de Ambato (Para el informe de resultados referirse al Anexo 2).



Figura 58 Centro de fomento productivo metalmecánico carrocerero, Ambato.

Para los ensayos se utilizó la máquina Metrotec Serie MTE50, aplicable para materiales poliméricos, cerámicos, compuestos y metales ligeros con 50 KN de fuerza (Figura 59).



Figura 59 Máquina de ensayos Metrotec Serie MTE50

Fuente: (TechLab Systems. (2014). Máquinas universales de ensayos. Recuperado de

http://www.metrotec.es/wp-content/uploads/sites/30/2014/01/MTE_10-

[50_Maquinas_Universales_Ensayos.pdf](#))

Se aplicó la norma ASTM D638 (norma para materiales poliméricos obtenidos por manufactura aditiva). Las probetas en PLA fueron las primeras en ser sometidas a un esfuerzo continuo de tensión

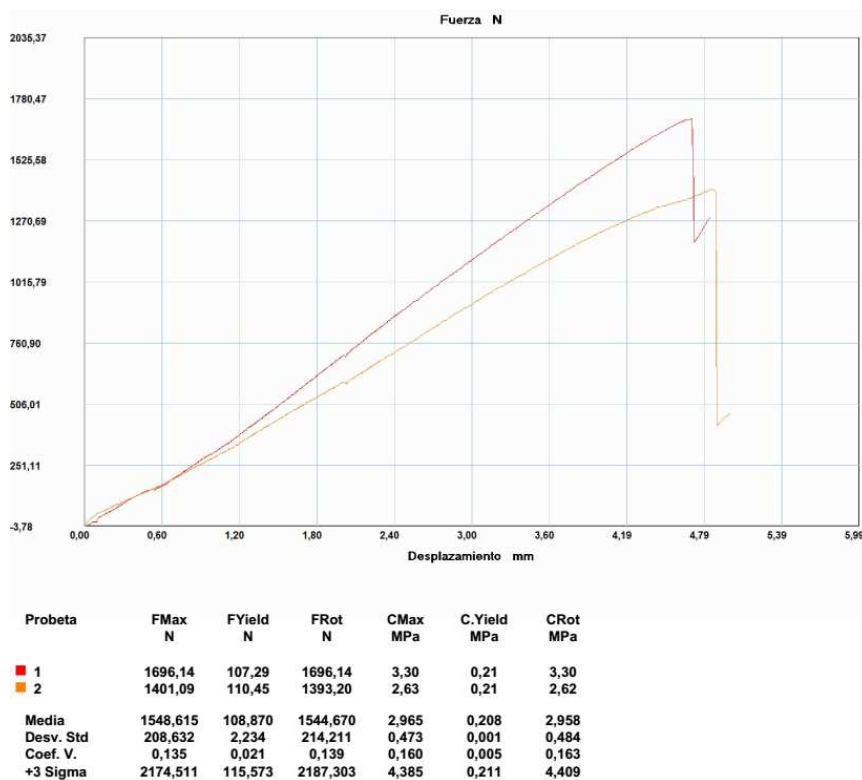


Figura 60 Curvas esfuerzo deformación de las probetas de PLA

La probeta 1 está formada por fibras de impresión curvas, y la probeta 2 está formada por fibras de impresión planas.

Se puede comprobar que las dos probetas presentaron un comportamiento casi similar (Fig. 60) hasta alcanzar los 251 N de fuerza (aproximadamente), con valores superiores la probeta 2 sufre un mayor desplazamiento (deformación) respecto a la probeta 1; el comportamiento resulta uniforme con una pendiente mayor para la probeta 1 (mayor resistencia), al final la probeta 2 sufre rotura ante 1401,09 N de fuerza, mientras que la probeta 1 lo hace ante 1696,14N (Fig.50).

Finalmente se realizó el ensayo con las probetas en material ABS, cuyos resultados se presentan en la Figura 61.

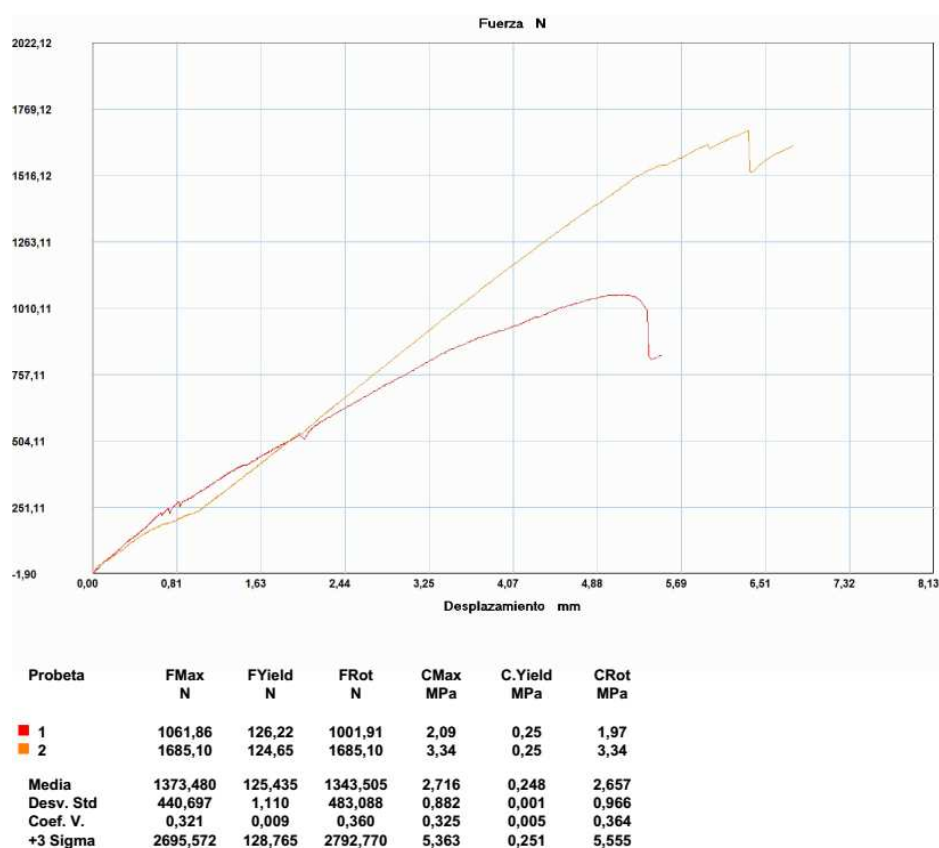


Figura 61 Curvas esfuerzo deformación de las probetas de ABS

En este caso la probeta 1 está constituida por fibras de impresión planas, y la probeta 2 está constituida por fibras de impresión curva.

Se comprueba que la probeta 2 presenta una mayor resistencia a la tensión (1685,10 N) frente a la probeta 1 que soportó un máximo de (1061,86 N).

Con los valores obtenidos en los ensayos de tracción, se calcula la diferencia porcentual entre las fuerzas máximas soportables (F_{max} [N]) de los sólidos con impresión curva y plana.

$$Diferencia\ porcentual(\%) = \frac{Valor\ mayor - valor\ menor}{valor\ menor} * 100 \quad [10]$$

Por lo tanto,

$$Diferencia\ porcentual(\%) = \frac{F_{max}(curva) - F_{max}(plana)}{F_{max}(plana)} * 100$$

$$Diferencia\ porcentual\ PLA = \frac{1696,14 - 1401,09}{1401,09} * 100$$

$$Diferencia\ porcentual\ PLA = 21,05\%$$

$$Diferencia\ porcentual\ ABS = \frac{1685,10 - 1061,86}{1061,86} * 100$$

$$Diferencia\ porcentual\ ABS = 58,69\%$$

Con estos resultados se puede determinar que los sólidos en PLA y ABS con impresión curva tienen un 21,05% y 58,69% más resistencia mecánica al esfuerzo de tensión respecto a los objetos con capas planas (Figura 60, 61).

4.2 Validación de la hipótesis

Para el presente trabajo de investigación se planteó la siguiente hipótesis:

“Mediante la investigación se podrá manufacturar piezas con orientación de fibras según su perfil empleando el prototipado rápido con el robot KUKA KR-16 de la ESPE-EL”

Para la validación cuantitativa de la hipótesis planteada, fue necesario dimensionar los resultados obtenidos (al ejecutar los ensayos) y compararlos con los valores deseados. Esto lo realizamos al dar respuesta a dos interrogantes en particular:

- *Pregunta principal:* ¿Cuántas piezas con orientación de fibras de acuerdo al perfil empleando el robot KUKA KR16 se logró manufacturar?

Valor deseado: piezas manufacturadas ≥ 1

Resultado obtenido: piezas manufacturadas = 4

Valoración: positiva

- *Pregunta implícita:* ¿La orientación de las fibras mejoró las propiedades mecánicas de los objetos manufacturados?

Valor deseado: $F_{max} [N] \text{ impresión curva} > F_{max} [N] \text{ impresión plana}$

Resultado obtenido: PLA 1696,14 N > 1401,09 N

ABS 1685,10 N > 1061,86 N

Valoración: positiva

En la validación cualitativa se pueden analizar otros aspectos logrados, como son:

- **Se conoce específicamente el prototipado rápido con robots.**

En el presente documento se detalla un estudio de los componentes del sistema robotizado de prototipado rápido: acoplamiento mecánico, circuitos

electrónicos y software de post-procesado y los parámetros necesarios para esta operación.

- **Descripción de los procesos que se ejecutan en el prototipado rápido robotizado.**

En donde se muestra una visión conjunta del sistema, que permite evidenciar la lógica de funcionamiento, comunicación e interacción de sus componentes.

- **Manual o guía para la utilización del sistema de prototipado rápido con el robot KUKA KR-16.**

Este documento se encuentra incluido en los anexos, y describe los pasos para la utilización del sistema, desde el proceso de obtención del código en lenguaje .KRL, la maniobra de los circuitos electrónicos, hasta el prototipado rápido de objetos.

- **Conocimiento de la programación paramétrica de robots KUKA.**

En el capítulo III, numeral 3.7.2, se detalla la programación realizada específicamente para el prototipado rápido empleando el software KUKA|prc y la obtención del código en lenguaje .KRL

Por lo anteriormente expuesto se determina que la hipótesis planteada tiene validez desde los puntos de vista cuantitativo y cualitativo.

4.3 Análisis de costos

Para desarrollar este análisis en la tabla 17 se detallan los costos asumidos para la presente investigación.

Tabla 17*Detalle de costos*

COSTOS	PRECIO (USD)
Kit de impresión 3D	500,00
Rollos de filamentos	100,00
Componentes mecánicos	200,00
Componentes eléctricos	200,00
Repuestos	200,00
Materiales de oficina	100,00
Software	432,00
6 meses de investigación	2000,00
TOTAL	3732

Si bien el crecimiento de la industria de impresión 3D ha logrado ir abaratando sus precios, para la implementación de proyectos innovadores de prototipado rápido con robots los costos son relativamente altos, un ejemplo es la empresa ROBOTMASTER cuya cotización alcanza los USD 4.500,00 pero únicamente para la impresión de un modelo de probeta (Referirse a la cotización del Anexo 3), este valor es superior al costo del presente proyecto (Tabla 17), que si tiene la posibilidad de ampliar su aplicación para otros modelos de piezas.

De acuerdo a las diferencias porcentuales calculadas mediante la ecuación [10], al utilizar objetos con impresión curva existe un ahorro de recursos a largo plazo en aplicaciones reales, debido a la reducción en la periodicidad de tiempo para reemplazar o reponer las piezas deterioradas.

El sistema de prototipado rápido mediante el robot Kuka KR16 al momento no está destinado para alguna aplicación de índole comercial, por lo cual no es posible evaluar su costo beneficio de forma cuantitativa, más bien se ha proporcionado una valoración de índole cualitativo que permite destacar ciertas bondades de utilidad aplicables para determinados grupos (Tabla 18).

Tabla 18*Evaluación cualitativa del costo beneficio*

CARACTERÍSTICA/UTILIDAD	GRUPO AFECTADO		
	Taller de robótica industrial	Universidad FF.AA (ESPE)	Industria
Impresora 3D robotizada	✓		
Capacidad de combinarse en una celda de manufactura integral (aditiva/sustractiva)	✓		
Innovación de conocimientos		✓	
Vanguardia tecnológica - académica		✓	
Optimización de características mecánicas			✓
Desarrollo de nuevos productos			✓

4.4 Conclusiones

- La investigación del prototipado rápido de piezas con orientación de fibras según su perfil mediante el robot kuka KR16, evidenció que es un proyecto viable, pero que se trata de un tema todavía en desarrollo y con limitada información; las opciones de hardware y software que fueron seleccionadas son las más adecuadas en la actualidad.
- Las características mecánicas de los materiales ABS y PLA, que definen los parámetros requeridos para la manufactura aditiva son: temperatura de fundición, velocidad de deposición y altura de capa.
- El Kuka KR16 es un robot de alta precisión (repetibilidad de 0,05 mm y velocidad máxima de 2100 mm/s), por lo que es perfectamente adaptable a los parámetros de impresión 3D convencionales.
- Se realizó la integración de un sistema de impresión 3D comercial al brazo robótico Kuka KR16 empleando adaptaciones mecánicas, electrónica comercial, software de código abierto y programación paramétrica.

- Al ejecutar los ensayos mecánicos de tensión se pudo comprobar que los objetos manufacturados con impresión de acuerdo al perfil de la pieza (impresión curva) tanto en ABS como en PLA presentan una mejor resistencia final a los esfuerzos aplicados, por lo que queda comprobada la ventaja de esta estrategia de manufactura frente a la tradicional (impresión plana).

4.5 Recomendaciones

Luego de haber cumplido con los objetivos del trabajo de investigación se recomienda lo siguiente:

- Para futuros trabajos relacionados, se debe utilizar la menor distancia de separación posible entre el sistema de extrusión y el extremo del último eslabón (muñón) del brazo robótico.
- Es recomendable que los archivos en lenguaje .KRL generados no superen el 1MB de tamaño para que el controlador KRC2 pueda reconocerlos.
- Para optimizar el proceso de extrusión se recomienda implementar un sistema de control directo del motor a pasos desde el KRC2.

4.6 Bibliografía

Fuentes de conocimiento: Libros, revistas, internet, catálogos, otros.

- [1]. Wimpenny D. (2016). *Advances in 3D Printing & Additive Manufacturing Technologies*. New Dheli. Springer.
- [2]. Schey J. (2011). *Procesos de manufactura*. México. McGraw Hill.
- [3]. Huang B. (2009). *Development of a software procedure for curved layered fused deposition modeling (CLFDM)*. Nueva Zelanda. Auckland University of technology
- [4]. Huang B. (2014). *Alternate slicing and deposition strategies for fused deposition modelling*. Nueva Zelanda. Auckland University of technology
- [5]. Huang B. (2012). *Alternate slicing and deposition strategies for fused deposition modelling of light curved parts*. Nueva Zelanda. Auckland University of technology
- [6]. Song X. (2013). *Development of a low-cost parallel kinematic machine for multi-directional additive manufacturing*. USA. University of Southern California.
- [7]. Ishak I. (2014). *Robot arm platform for rapid prototyping: concept*. USA. Florida Institute of technology.
- [8]. Ding D. (2015). *Process planning for robotic wire arc additive manufacturing*, Australia. University of Wollongong.
- [9]. Enríquez R. (2009). *Guía de usuario de arduino*. España. Universidad de Córdoba.
- [10]. Heller B. (2012). *Effect of extrudate swell, nozzle shape, and convergence zone on fiber orientation in fused deposition modeling nozzle flow*. USA. Baylor University
- [11]. Brock J. (2000). *Fused deposition modeling (FDM) material properties characterization*. USA. Spring Semester.

- [12]. (2013). O'Reilly T. *Make magazine: Ultimate guide to 3D printing*. USA. Branwyn.
- [13]. (2003). Bellini A. *Mechanical characterization of parts fabricated using fused deposition modeling*. Dinamarca. Technical University of Denmark.
- [14]. (2012). Singamneni S. *Modeling and evaluation of curved layer fused deposition*. Nueva Zelanda. Auckland University of technology
- [15]. (2015). Forster A. *Materials testing standards for additive manufacturing of polymer materials*. USA. NIST
- [16]. (2015). Naboni R. *Advanced Customization in Architectural design and construction*. Springer. Politecnico de Milano.
- [17]. (2015). Gramazio K. *The robotic touch*. Suiza. ETH Zurich.
- [18]. (2013). Gallo V. *Diseño e implementación de una celda de manufactura con brazo robótico centralizado y control de calidad con visión artificial en el laboratorio de robótica industrial de la ESPE-L*. Ecuador. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE extensión Latacunga.
- [19]. (2013). Braumann J. *Robotic fabrication in architecture, art, and design*. Viena. Robots in architecture.
- [20]. (2011). Braumann J. *Parametric robot control, integrated CAD/CAM for architectural design*. Austria. Vienna University of Technology
- [21]. (2009). Payne A. *Manual de grasshopper en español*. Rajaa I. Rhino3D
- [22]. (2016). Swanson M. *3D Printing Robotic Arm*. USA. Worcester Polytechnic Institute

[23]. (2015). Torres S. *Desarrollo de un sistema de modelado por deposición fundida adaptado a un brazo robótico de 5 grados de libertad*. Valencia. Universidad Politécnica de Valencia

4.7 Anexos