



# **ESPE**

**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA**

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

**CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

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

**TEMA: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE  
IMPRESIÓN 3D MEDIANTE EL BRAZO ROBÓTICO KUKA KR16 PARA  
EL PROTOTIPADO RÁPIDO CON LA TÉCNICA DE SOBRE-  
EXTRUSIÓN Y CON UNA ETAPA FINAL DE ACABADO PARA PIEZAS  
DE MAYOR RESISTENCIA Y TAMAÑO**

**AUTORES:  
LEÓN TAPIA, KEVIN ANDRÉS  
RAMOS CHANCUSIG, KARINA MAGALY**

**DIRECTOR: ING. ACUÑA COELLO, FAUSTO VINICIO**

**LATACUNGA-ECUADOR**

**2019**



# ESPE

**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS**  
**INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA**

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

**CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA**

## CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE IMPRESIÓN 3D MEDIANTE EL BRAZO ROBÓTICO KUKA KR16 PARA EL PROTOTIPADO RÁPIDO CON LA TÉCNICA DE SOBRE-EXTRUSIÓN Y CON UNA ETAPA FINAL DE ACABADO PARA PIEZAS DE MAYOR RESISTENCIA Y TAMAÑO**”, realizado por el señor **León Tapia, Kevin Andrés** y la señorita **Ramos Chancusig, Karina Magaly**, el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

**Latacunga, 9 de diciembre del 2019**

Atentamente

Una firma manuscrita en tinta azul sobre una línea horizontal.

Ing. Fausto Vinicio Acuña Coello

C.C.:0501510267

DIRECTOR



# ESPE

**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS**  
**INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA**

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

**CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA**

## **AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD**

Nosotros, **León Tapia, Kevin Andrés y Ramos Chancusig, Karina Magaly**, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE IMPRESIÓN 3D MEDIANTE EL BRAZO ROBÓTICO KUKA KR16 PARA EL PROTOTIPADO RÁPIDO CON LA TÉCNICA DE SOBRE-EXTRUSIÓN Y CON UNA ETAPA FINAL DE ACABADO PARA PIEZAS DE MAYOR RESISTENCIA Y TAMAÑO”**, es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

**Latacunga, 9 de diciembre del 2019**

León Tapia, Kevin Andrés  
C.C.:1721854584

Ramos Chancusig, Karina Magaly  
C.C.:0502753841



# ESPE

**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS**  
**INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA**

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

**CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA**

## **AUTORIZACIÓN**

Nosotras, **León Tapia, Kevin Andrés y Ramos Chancusig, Karina Magaly** autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación **“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE IMPRESIÓN 3D MEDIANTE EL BRAZO ROBÓTICO KUKA KR16 PARA EL PROTOTIPADO RÁPIDO CON LA TÉCNICA DE SOBRE-EXTRUSIÓN Y CON UNA ETAPA FINAL DE ACABADO PARA PIEZAS DE MAYOR RESISTENCIA Y TAMAÑO”**, en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad

**Latacunga, 9 de diciembre del 2019**

León Tapia, Kevin Andrés  
C.C.:1721854584

Ramos Chancusig, Karina Magaly  
C.C.:0502753841

## DEDICATORIA

El presente proyecto de titulación lo dedico de todo corazón a mis padres Alfredo y Miriam, quienes nunca me prohibieron nada, pero me educaron como para que yo sepa cuáles son mis límites, con el carácter fuerte que identifica a cada uno de ellos formaron la persona que soy y me brindan su incondicional apoyo en cualquier proyecto que me proponga.

A mi hermano Rodrigo, por brindarme su fuerza en tiempos de flaqueza, consejos cuando más lo necesitaba y enseñarme que rendirse no es una opción para nosotros.

A Camila, mi hermana, quien con un simple abrazo me da fuerzas y me reinicia el alma para seguir adelante, con sus ocurrencias me ha sacado más de una carcajada aliviando el estrés.

Y a todas las personas que no están en este mundo conmigo para disfrutar de este logro, donde quiera que estén sé que van a estar orgullosas de la persona que ayudaron a formar.

**Kevin León**

Este trabajo va dedicado a mis amados padres Marco y María, este triunfo no me pertenece a mí, sino a ellos, a mi querido padre que ya no está conmigo físicamente, pero yo sé que está feliz de ver hasta donde he llegado y a mi madre que es la persona más fuerte que conozco ya que por ella soy lo que soy el día de hoy, gracias por levantarme tantas veces para seguir por estar ahí incondicionalmente.

A mi querida hermana, Cinthya la persona más luchadora del mundo, mi pilar, mi alegría, mi energía cuando desfallezco, esa hermana cuidadosa y amorosa, gracias por todo.

A mi familia en sí por todo el apoyo, la buena vibra y el cariño.

**Karina Ramos**

## **AGRADECIMIENTO**

Principalmente, damos gracias a Dios por las experiencias vividas en esta etapa de nuestras vidas dentro de la Universidad, por darnos la fuerza y sabiduría para afrontar cada percance hasta cumplir nuestras metas.

A nuestros familiares, por ser el pilar fundamental en nuestras vidas y habernos brindado su apoyo incondicional en los momentos más difíciles, pese a las adversidades e inconvenientes que ellos estuviesen pasando.

Un sincero agradecimiento al director del proyecto Ing. Fausto Acuña quien nos brindó parte de su conocimiento, experiencia y motivación para la culminación del presente proyecto, ganándose nuestro respeto.

A las personas encargadas del laboratorio de robótica industrial de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE sede Latacunga, Ing. Marco Singaña y Don Patricio Anchatuña, quienes siempre estuvieron pendientes de los avances realizados en la tesis y totalmente dispuestos a ayudar con lo solicitemos.

De manera general a todos los docentes que formaron parte de nuestro desarrollo académico, en especial al Ing. Darío Mendoza director de la Carrera de Ingeniería Mecatrónica que con sus sabios consejos y pertinente ayuda supo guiarnos.

Finalmente, a nuestros amigos con los cuales pasamos los momentos más amenos de nuestra época universitaria, con ellos compartimos muchos momentos felices como nostálgicos.

**Karina y Kevin**

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

### CARÁTULA

CERTIFICADO DEL DIRECTOR.....	i
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD.....	ii
AUTORIZACIÓN.....	iii
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTO.....	v
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	vi
ÍNDICE DE TABLAS.....	xii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiv
RESUMEN.....	xix
ABSTRACT.....	xx

## CAPÍTULO I

### FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

1.1. Definición del problema de investigación.....	1
1.2. Estado del arte sobre prototipado rápido y brazos robóticos.....	2
1.2.1. Diabase Engineering Serie H.....	2
1.2.2. AiBuild.....	5

1.2.3.	Impresión robotizada ESPE .....	7
1.2.4.	Laboratorio de Robótica Industrial de la ESPE sede Latacunga.....	10
1.2.5.	Near net .....	13
1.2.6.	Manufactura híbrida .....	13
1.2.7.	Sobre-extrusión .....	15
1.2.8.	Preprocesado .....	15
1.2.9.	Post procesado.....	15
1.3.	Tipos de materiales termoplásticos para el sistema de impresión 3D .....	17
1.3.1.	ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno).....	18
1.3.2.	PLA (Ácido Poli láctico).....	18
1.3.3.	Nylon (poliamida) .....	18
1.3.4.	Poliuretano termoplástico (TPU) .....	18
1.4.	Sistema de control de prototipadoras rápidas .....	19
1.4.1.	Control.....	19
1.4.2.	Códigos G.....	19
1.4.3.	Lenguaje del robot.....	19
1.4.4.	KUKA Robot Lenguaje.....	19
1.4.5.	Controlador KR C2 .....	20
1.5.	Alternativas de solución .....	20

1.5.1.	Torreta .....	22
1.5.2.	Carga admisible.....	23
1.5.3.	Mecanismo de extrusión y hotend.....	23
1.5.4.	Campo de trabajo .....	24
1.5.5.	Superficie de impresión.....	24
1.5.6.	Material .....	25
1.5.7.	Postprocesado.....	25
1.5.8.	Alternativas de procedimientos a realizar de acuerdo al software .....	26
1.5.9.	Software de impresión 3D.....	27
1.5.10.	Software especializado.....	28
1.5.11.	Tarjeta de control y firmware.....	30
1.5.12.	Caja de control .....	30
1.5.13.	Apariencia .....	30
1.5.14.	Vista general de la ubicación de componentes.....	30

## **CAPÍTULO II**

### **DISEÑO MECATRÓNICO**

2.1.	Diseño mecánico.....	32
2.1.1.	Parámetros de diseño.....	32

2.1.2.	Análisis del diseño .....	37
2.1.3.	Validación del diseño .....	52
2.1.4.	Selección de componentes .....	55

### **CAPÍTULO III**

#### **CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE IMPRESIÓN 3D Y MECANIZADO**

3.1.	Construcción de los componentes del sistema .....	70
3.1.1.	Manufactura de las piezas .....	70
3.2.	Ensamble de los componentes .....	74
3.2.1.	Ensamble del plato tool y disco de seguridad .....	74
3.2.2.	Ensamble del plato en V.....	75
3.2.3.	Ensamble del ensamblaje del hotend y extrusor .....	75
3.2.4.	Ensamble de la herramienta .....	75
3.2.5.	Montaje del mecanismo de la cama caliente.....	76
3.3.	Instalación del sistema.....	76
3.4.	Instalación del sistema eléctrico .....	77
3.5.	Implementación del sistema de control .....	77
3.6.	Programación.....	78

3.6.1.	Generar archivo de impresión 3D .....	78
3.6.2.	Generar archivo de Autodesk Fusion360 .....	81
3.6.3.	Programación KUKA prc .....	85
3.6.4.	Tratamiento de códigos .....	94
3.7.	Ejecución del sistema de impresión y fresado.....	95
3.8.	Diagrama de flujo del funcionamiento .....	99

## **CAPÍTULO IV**

### **PRUEBAS Y RESULTADOS**

4.1.	Pruebas de funcionamiento del sistema de impresión 3D y fresado .....	101
4.2.	Manufactura de probetas .....	102
4.2.1.	Norma y medidas de probetas .....	102
4.2.2.	Número de probetas .....	103
4.3.	Pruebas de tenacidad de las probetas.....	104
4.3.1.	Probetas de impresión 3D .....	106
4.3.2.	Probetas de impresión 3D con sobre-extrusión y fresado .....	107
4.3.3.	Análisis.....	107
4.4.	Validación de la hipótesis.....	111

4.4.1.	Validación de la hipótesis para el aumento en la resistencia de las probetas por el método de t-student .....	111
4.4.2.	Validación de la hipótesis de volumen de trabajo.....	114
4.5.	Análisis económico.....	119
4.6.	Análisis costo beneficio.....	120

## **CAPÍTULO V**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

5.1.	Conclusiones.....	122
5.2.	Recomendaciones .....	124

### **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....**

**125**

### **ANEXOS .....**

**134**

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> <i>Esfuerzos máximos y deformación por segmentos</i> .....	49
<b>Tabla 2</b> <i>Escala de ponderación</i> .....	55
<b>Tabla 3</b> <i>Alternativas de hotend</i> .....	55
<b>Tabla 4</b> <i>Valoración de las alternativas del hotend</i> .....	56
<b>Tabla 5</b> <i>Alternativas de extrusor</i> .....	57
<b>Tabla 6</b> <i>Valoración de las alternativas del extrusor</i> .....	58
<b>Tabla 7</b> <i>Alternativas de cama caliente</i> .....	59
<b>Tabla 8</b> <i>Valoración de las alternativas de la cama caliente</i> .....	60
<b>Tabla 9</b> <i>Alternativas de material</i> .....	61
<b>Tabla 10</b> <i>Valoración de las alternativas de material</i> .....	62
<b>Tabla 11</b> <i>Alternativa de mototool</i> .....	63
<b>Tabla 12</b> <i>Valoración de las alternativas del Mototool</i> .....	64
<b>Tabla 13</b> <i>Alternativa de la Tarjeta de control para impresión 3D</i> .....	65
<b>Tabla 14</b> <i>Valoración de las alternativas de las tarjetas de control</i> .....	66
<b>Tabla 15</b> <i>Alternativas del software especializado</i> .....	67
<b>Tabla 16</b> <i>Valoración de las alternativas del software especializado</i> .....	68
<b>Tabla 17</b> <i>Alternativas del software de impresión 3D</i> .....	68
<b>Tabla 18</b> <i>Valoración de las alternativas del software de impresión 3D</i> .....	69
<b>Tabla 19</b> <i>Piezas a mecanizar</i> .....	71
<b>Tabla 20</b> <i>Piezas a prototipar</i> .....	72
<b>Tabla 21</b> <i>Construcción de caja de control</i> .....	74

<b>Tabla 22</b> <i>Configuración de herramientas</i> .....	96
<b>Tabla 23</b> <i>Configuración de bases</i> .....	96
<b>Tabla 24</b> <i>Pruebas de funcionamiento</i> .....	101
<b>Tabla 25</b> <i>Parámetros de prototipado rápido</i> .....	103
<b>Tabla 26</b> <i>Resultados de ensayos de probetas de impresión 3D</i> .....	106
<b>Tabla 27</b> <i>Resultados de ensayos de probetas con sobre-extrusión y fresado</i> .....	107
<b>Tabla 28</b> <i>Condiciones para la validación de la hipótesis nula <math>H_0</math></i> .....	112
<b>Tabla 29</b> <i>Comparación por volumen máximo</i> .....	116
<b>Tabla 30</b> <i>Comparación por especificaciones</i> .....	118
<b>Tabla 31</b> <i>Análisis económico</i> .....	119
<b>Tabla 32</b> <i>Análisis costo beneficio</i> .....	120

## ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.</i> Diabase Engineering Serie H.....	2
<i>Figura 2.</i> Extrusor Flexion .....	3
<i>Figura 3.</i> Celda de Impresión Robotizada de AiBuild .....	5
<i>Figura 4.</i> AiMarker.....	6
<i>Figura 5.</i> AiCell.....	7
<i>Figura 6.</i> Layout para el FDM con el brazo robótico.....	8
<i>Figura 7.</i> Diseño de soporte .....	9
<i>Figura 8.</i> Celda de soldadura.....	11
<i>Figura 9.</i> Celda de manufactura y paletizado   Celda de control de calidad y paletizado .....	12
<i>Figura 10.</i> Manufactura tradicional vs Near net.....	13
<i>Figura 11.</i> Figura con sobre-extrusión .....	15
<i>Figura 12.</i> Pieza con capa de resina epoxi .....	16
<i>Figura 13.</i> Pieza en vapor de acetona.....	16
<i>Figura 14.</i> Pintura de imprimación.....	17
<i>Figura 15.</i> Campo de trabajo y volumen máximo.....	24
<i>Figura 16.</i> Generación de códigos G.....	26
<i>Figura 17.</i> Procedimiento del proyecto .....	27
<i>Figura 18.</i> Mejor alternativa de ubicación de los componentes.....	31
<i>Figura 19.</i> Volumen de trabajo.....	34
<i>Figura 20.</i> Ubicación del volumen de trabajo .....	35
<i>Figura 21.</i> Fuerzas en el corte .....	40

<b>Figura 22.</b> Fuerzas de fresado en concordancia .....	42
<b>Figura 23.</b> Dirección y sentido de las fuerzas .....	42
<b>Figura 24.</b> Primera propuesta de Diseño .....	44
<b>Figura 25.</b> Herramienta de corte plano XY .....	45
<b>Figura 26.</b> Herramienta de corte plano YZ .....	46
<b>Figura 27.</b> Teoría de Von Mises primera propuesta.....	50
<b>Figura 28.</b> Desplazamientos resultantes primera propuesta.....	51
<b>Figura 29.</b> Factor de seguridad primera propuesta.....	51
<b>Figura 30.</b> Segunda propuesta de diseño.....	52
<b>Figura 31.</b> Teoría de Von Mises segunda propuesta .....	53
<b>Figura 32.</b> Desplazamientos resultantes segunda propuesta .....	54
<b>Figura 33.</b> Factor de seguridad segunda propuesta .....	54
<b>Figura 34.</b> Hotend V6.....	55
<b>Figura 35.</b> Hotend Lite6 .....	55
<b>Figura 36.</b> Hotend Volcano .....	55
<b>Figura 37.</b> Extrusor Titan .....	57
<b>Figura 38.</b> Extrusor Titan Aero .....	57
<b>Figura 39.</b> Extrusor FlexionHT .....	57
<b>Figura 40.</b> Cama caliente MK2 21.5x21.5cm .....	59
<b>Figura 41.</b> Cama Caliente 300x200 MK3 .....	59
<b>Figura 42.</b> Cama caliente 300x300 MK3 .....	59
<b>Figura 43.</b> ABS.....	61
<b>Figura 44.</b> PLA.....	61

<i>Figura 45.</i> Pla con fibra de carbono .....	61
<i>Figura 46.</i> Dremel 3000 .....	63
<i>Figura 47.</i> Mototool Toolcraft.....	63
<i>Figura 48.</i> Mototool Total .....	63
<i>Figura 49.</i> MKS GEN .....	65
<i>Figura 50.</i> RAMPS 1.4.....	65
<i>Figura 51.</i> RAMBO.....	65
<i>Figura 52.</i> KUKA Prc.....	67
<i>Figura 53.</i> KUKA Sim Pro.....	67
<i>Figura 54.</i> Robotmaster .....	67
<i>Figura 55.</i> Slic3r.....	68
<i>Figura 56.</i> Ultimaker Cura .....	68
<i>Figura 57.</i> Simplify .....	68
<i>Figura 58.</i> Elementos mecanizados.....	71
<i>Figura 59.</i> Elementos prototipados .....	73
<i>Figura 60.</i> Caja de control.....	74
<i>Figura 61.</i> Ensamble de la herramienta.....	75
<i>Figura 62.</i> Montaje de la cama caliente .....	76
<i>Figura 63.</i> Ensamble del sistema.....	76
<i>Figura 64.</i> Configuración de impresión .....	79
<i>Figura 65.</i> Configuración de filamento .....	79
<i>Figura 66.</i> Configuración de impresora .....	80
<i>Figura 67.</i> Exportar G-code.....	81

<b>Figura 68.</b> Cargar archivo CAD.....	81
<b>Figura 69.</b> Configuración de SETUP .....	82
<b>Figura 70.</b> Selección multi-eje .....	82
<b>Figura 71.</b> Configuración de herramienta .....	83
<b>Figura 72.</b> Cargar parámetros de corte .....	84
<b>Figura 73.</b> Simulación del mecanizado .....	84
<b>Figura 74.</b> Post-procesado de archivo *.XML .....	85
<b>Figura 75.</b> Interface KUKA prc.....	87
<b>Figura 76.</b> Programación en KUKA prc.....	87
<b>Figura 77.</b> Proceso de impresión 3D .....	89
<b>Figura 78.</b> Proceso de cambio de herramienta .....	91
<b>Figura 79.</b> Proceso de mecanizado.....	92
<b>Figura 80.</b> Configuración principal .....	93
<b>Figura 81.</b> Diagrama de flujo y pantalla principal del filtrado de códigos .....	94
<b>Figura 82.</b> Entrada y salida de archivo .src .....	95
<b>Figura 83.</b> Ingresar a “modo experto” .....	97
<b>Figura 84.</b> Modo automático .....	97
<b>Figura 85.</b> Cargar el archivo a la caja de control .....	98
<b>Figura 86.</b> Selección del archivo *.gcode .....	98
<b>Figura 87.</b> Diagrama de flujo del funcionamiento .....	100
<b>Figura 88.</b> Imágenes termografías del extrusor y cama caliente .....	102
<b>Figura 89.</b> Medidas de la probeta tipo I .....	102
<b>Figura 90.</b> Manufactura híbrida de probeta tipo I .....	103

<i>Figura 91.</i> Orientación de impresión 3D.....	104
<i>Figura 92.</i> Probetas realizadas en dirección XY con sobre-extrusión y fresado.....	104
<i>Figura 93.</i> Máquina Universal MTE-50.....	105
<i>Figura 94.</i> Ingreso de datos .....	105
<i>Figura 95.</i> Ensayo de tracción de probeta tipo I.....	106
<i>Figura 96.</i> Comparación del esfuerzo máximo entre probetas.....	107
<i>Figura 97.</i> Curvas de probetas de impresión convencional.....	109
<i>Figura 98.</i> Curvas de probetas con sobre-extrusión .....	110
<i>Figura 99.</i> Tenacidad de probetas de impresión convencional y con sobre-extrusión.....	111
<i>Figura 100.</i> Creación de volumen .....	115
<i>Figura 101.</i> Comprobación del volumen.....	115
<i>Figura 102.</i> Volumen de trabajo permisible para el proyecto.....	116
<i>Figura 103.</i> Comparación por volumen máximo .....	117
<i>Figura 104.</i> Comparación de costos para el volumen máximo .....	117
<i>Figura 105.</i> Comparación por especificaciones .....	118

## RESUMEN

La impresión de piezas de gran tamaño en la actualidad está en desarrollo, la misma se ve limitada por la superficie de trabajo y la temperatura del ambiente donde se imprime, las piezas realizadas por impresión 3D soporta esfuerzos menores a las obtenidas de un material en bruto, por lo que se ha implementado una herramienta de manufactura aditiva y sustractiva en un brazo robótico KUKA KR 16 en el laboratorio de Robótica Industrial de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE sede Latacunga , al aprovechar el volumen de trabajo el mismo que es 461182.769 cm<sup>3</sup> que ofrece el brazo, asimismo las características de precisión y repetibilidad de éste; se crea piezas con parámetros de sobre-extrusión, como consecuencia no se obtiene un buen acabado por lo que interviene el mecanizado y corrige el exceso de las medidas de las piezas, en el presente proyecto se analizaron las probetas fabricadas mediante prototipado rápido convencional y manufactura híbrida, se obtuvo como resultado de los ensayos mecánico a las probetas con sobre-extrusión que tienen un comportamiento más homogéneo con una variación de apenas el 7.97% en relación a 11.78% perteneciente a las probetas de impresión convencional, y con menores tolerancias al valor al que fue diseñado, además de mejorar los tiempos de producción en relación a máquinas comerciales gracias a la velocidad en movimientos rápidos que alcanza los 2000mm/s.

### **PALABRAS CLAVE:**

- MANUFACTURAS HÍBRIDAS
- IMPRESORAS 3D
- ROBOT INDUSTRIAL

## ABSTRACT

The printing of large pieces is currently under development, it is limited by the working surface and the temperature of the environment where it is printed, the parts made by 3D printing supports less stress than those obtained from a raw material, so we have implemented an additive manufacturing tool and subtractive in a robotic arm KUKA KR 16 in the industrial robotics laboratory of the University of the Armed Forces ESPE-L, we have taken advantage of the work volume which is 461182.769 cm<sup>3</sup> offered by the arm, as well as its characteristics of precision and repeatability; parts are created with over-extrusion parameters, as a result a good finish is not obtained, so the machining intervenes and corrects the excess of the measures of the parts, in the present project the specimens manufactured by conventional rapid prototyping and hybrid manufacture were analyzed, it was obtained as a result of the mechanical tests to the specimens with over-extrusion that have a more homogeneous behaviour with a variation of barely 7.97% in relation to 11.78% belonging to normal specimens, and with less tolerances to the value at which it was designed, in addition to improving production times in relation to commercial machines as a result of the speed in rapid movements reaching 2000mm/s.

### KEYWORDS:

- HYBRID MANUFACTURING
- 3D PRINTER
- INDUSTRIAL ROBOT

# CAPÍTULO I

## FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

### 1.1. Definición del problema de investigación

La impresión 3D convencional es débil a esfuerzos cortantes por la técnica de manufactura aditiva de las piezas, que consiste en añadir el material en capas, lo que la unión entre éstas no resulta totalmente rígida se da como resultado esfuerzos en dirección de las capas que llegan a deformar o romper la pieza.

El tamaño es un factor importante en la industria, que está limitado por la cama de impresión convencional, el tamaño de los ejes, la rigidez del sistema y la localización de éstos, sin mencionar la poca precisión, repetitividad y ser propensa a la descalibración al moverse, además presenta poca versatilidad en el uso de ejes para crear cualquier forma.

La velocidad del proceso es un factor determinante para la realización de las piezas de gran tamaño en un tiempo óptimo porque el sistema mecánico con el que trabaja hace que esta velocidad sea reducida, es decir el tiempo sea relativamente mayor, igualmente son propensos a la vibración de los ejes por lo que va a tener un error notorio en la deposición de material fundido, por la falta de desplazamiento uniforme (Simplify3D, 2018).

La extrusora del proyecto “Investigación del prototipado rápido de piezas con orientación de fibra según su perfil mediante el robot KUKA KR16 de la ESPE-EL” presenta inconvenientes a la hora de realizar piezas pequeñas con gran detalle, al utilizar la velocidad del brazo existe diferencia de momentos de inercia por lo que la calidad de prototipado se vuelve menos preciso, es decir, tiene tolerancias dimensionales grandes, asimismo al realizar piezas de gran tamaño, con la

capacidad del brazo robótico, tiende a demorar demasiado por el mecanismo utilizado, ya que depende de la extrusión de material fundido y el tamaño de la boquilla.

Por lo cual se propone realizar un sistema de impresión 3D para extruir mayor cantidad de material en menor tiempo al elevar la potencia del extremo caliente y aumentar el diámetro de la boquilla, por lo que se logrará una mayor deposición de material y también mejorarán las propiedades mecánicas de las piezas.

## **1.2.Estado del arte sobre prototipado rápido y brazos robóticos**

### **1.2.1. Diabase Engineering Serie H**

La impresora multi material opera con una torreta de 5 posiciones, en donde se encuentran diferentes motores que ayudan a la aplicación deseada ya sea extrusores para el prototipado de piezas realizadas por la deposición de material fundido de distintos termoplásticos, fresas para el acabado superficial de las piezas realizadas o láser para el escaneo de moldes.



**Figura 1.** Diabase Engineering Serie H  
Fuente: (Diabase Engineering LLC, 2018e)

La deposición de material fundido (FDM) es muy recomendada a niveles de trabajos de aficionados, por tanto, no se usa a nivel comercial o industrial debido a la reducida resistencia y al acabado superficial grueso, una de las ventajas ofrecidas por las impresoras de extrusión es la deposición de múltiples capas de materiales en una misma pieza, lo cual resulta a nivel industrial

una característica muy infravalorada, en la Figura 1 se puede apreciar los múltiples cabezales extrusores.

El alcance de las impresoras multi material se basa en crear objetos con distribuciones de propiedades, esto se logra con el aporte de un material específico en áreas del objeto que los requiera, lo que significa que cumplan con las necesidades específicas y así poder evitar una etapa de ensamble del producto final (Diabase Engineering LLC, 2018c).

Es una máquina herramienta híbrida la cual combina capacidades de manufactura aditiva, sustractiva y un post-procesamiento en un solo entorno de construcción, éste proceso se logra con una torreta de alta precisión para los cambios rápidos de herramienta y una unidad de acondicionamiento auto limpiable, tal como se muestra en la Figura 1.

Los elastómeros son adecuados para crear piezas funcionales con impresión por extrusión, mucho más que los plásticos rígidos. La alta adhesión que poseen los uretanos da como resultado piezas terminadas mucho más isotrópicas y duradera. Gracia al mecanismo Extrusor Flexion (Figura 2) el cual es muy útil al imprimir elastómeros de forma rápida y precisa, lo cual es un punto de partida a la creación de esta prototipadora, los elastómeros elegidos para el relleno es un uretano 85 shore A (fabricado por Makeshaper).



**Figura 2.** Extrusor Flexion  
Fuente: (Diabase Engineering LLC, 2017)

En la industria el cabezal llega a ser un componente de alta masa por lo cual tiene más sentido mover la pieza en X e Y con el cabezal en el eje Z. Esta configuración es muy común en los centros de mecanizado vertical donde es necesario un movimiento rígido, preciso y de alta velocidad. El cambio de herramientas de esta prototipadora es muy parecido a la configuración de un torno mas no de una fresadora.

La presente prototipadora usa motores Nema para el movimiento de los ejes, Nema 23 para el eje X y Z y un motor Nema 17 en el caso del eje Y, para el accionamiento de la herramienta de corte se utiliza un motor Nema 23 y un husillo a bolas precargado de paso 5 mm. Depende de la geometría de la pieza y del acabado superficial, el material retirado representa entre 5 y el 15% de la construcción total, ya que se pueden utilizar boquillas más grades y alturas de capa más gruesas los tiempos de construcción disminuyen.

Cabe recalcar que la máquina es diseñada para mecanizar termoplásticos, los cuales no toleran velocidades y avances excesivos por lo que los husillos son de menor potencia a comparación de una fresadora típica (Diabase Engineering LLC, 2018b).

- **Interfaz de control de la máquina:** Está basado en el controlador Wifi Duet, y la horquilla H-Series Controller es código abierto.
- **Generación de toolpath aditivo:** Se genera las operaciones de impresión con Simplify3D, la salida del código G puede ir directamente a la máquina.
- **Generación de toolpath sustractivo:** Existe un post-procesador que se puede cargar en Autodesk Fusion360 para que el archivo de salida sea compatible con el H-Series Controller. Esto le permite controlar los cambios de herramienta, las revoluciones del

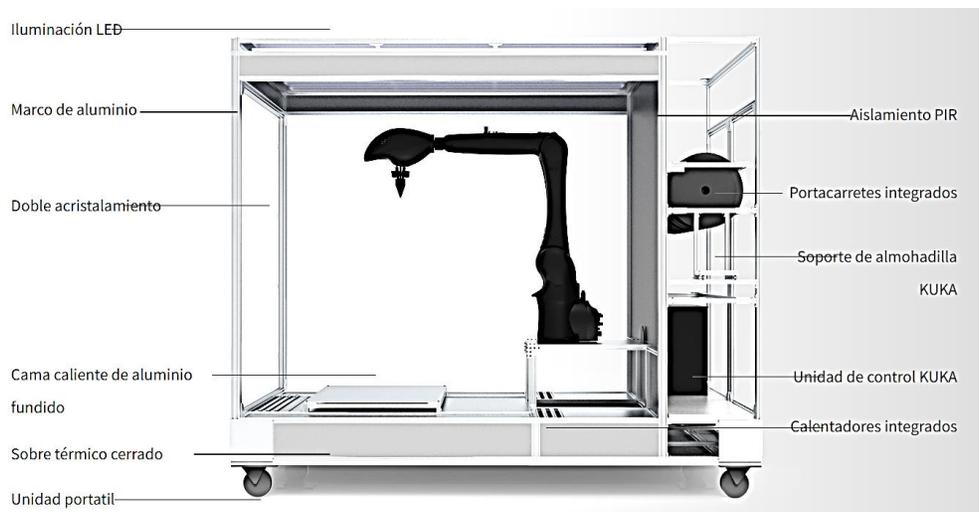
husillo, la orientación de la pieza y los chorros de aire de limpieza de virutas utilizan los controles estándar del Autodesk Fusion360 (Diabase Engineering LLC, 2018a).

### 1.2.2. AiBuild

En el prototipado rápido la principal limitación es el tamaño de las piezas, Ai Build ha desarrollado un cabezal de impresión 3D, para brazos robóticos de 6 grados de libertad, el cual se acopla a la muñeca y aprovecha de mejor manera el volumen de trabado para la fabricación de piezas a mayor escala.

Su tecnología de impresión 3D a gran escala es completamente autónoma, corrige los errores más comunes, aumenta la productividad y la automatización de la manufactura aditiva (Robótica Industrial, 2019).

Ai Build creó una celda, como se muestra en la Figura 3, para la impresión 3D.



**Figura 3.** Celda de Impresión Robotizada de AiBuild  
Fuente:(Robótica Industrial, 2019)

Utiliza un software online llamado AiSync, el cual permite conectar, controlar y monitorizar con ayuda de inteligencia artificial desde cualquier lugar y en cualquier momento, su principal

característica es producir trayectorias tridimensionales optimizadas para una alta velocidad de producción.

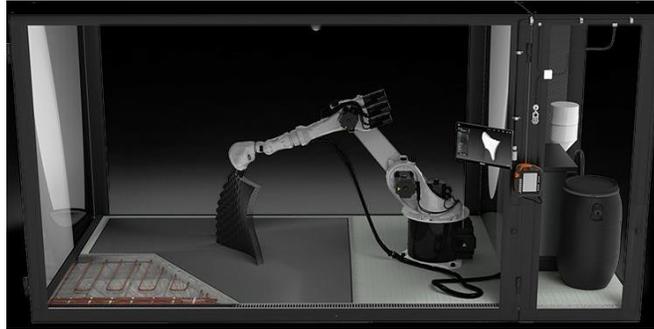
AiMarker es el efector final, un brazo robótico industrial de alta precisión y su hotend, ta como se observa en la Figura 4, garantiza una extrusión constante de polímeros y materiales compuestos, con ayuda de AiSync y sensores es capaz de detectar problemas y corregirlos con decisiones autónomas gracias a la inteligencia artificial.(AiBuild, 2019) .



**Figura 4.** AiMarker  
(AiBuild, 2019)

Para la creación de AiCell se consideró las condiciones ambientales en las que trabaja una impresora 3D para mejorar la calidad y resistencia del producto final, ya que el aire del ambiente influye demasiado en el prototipado rápido, a temperaturas bajas el filamento se encogerá ha diferente velocidad entre capas y a elevada temperatura no se solidificará de manera adecuada.

AiCell es un gabinete (Figura 5) que crea un ambiente controlado, disminuye la transferencia de calor con el ambiente, incluye la alimentación del filamento al extrusor, además consta de un brazo robótico KUKA con su controlador y una superficie de impresión de aluminio fundido, otra característica del gabinete es ser portátil(Leonidas Leonidou, 2019).



**Figura 5.** AiCell  
(AiBuild, 2019)

AiCell logra obtener una temperatura homogénea en toda la pieza prototipada, esto se debe a que la superficie de impresión llega a los 60°C y el ambiente dentro del gabinete mantiene constante la temperatura a 40°C, al término del proceso se comienza a enfriar de manera uniforme el espacio y la superficie de impresión, gracias a esto se evita el encogimiento diferencial (Leonidas Leonidou, 2019).

Dimensiones máximas de impresión de la cama caliente:

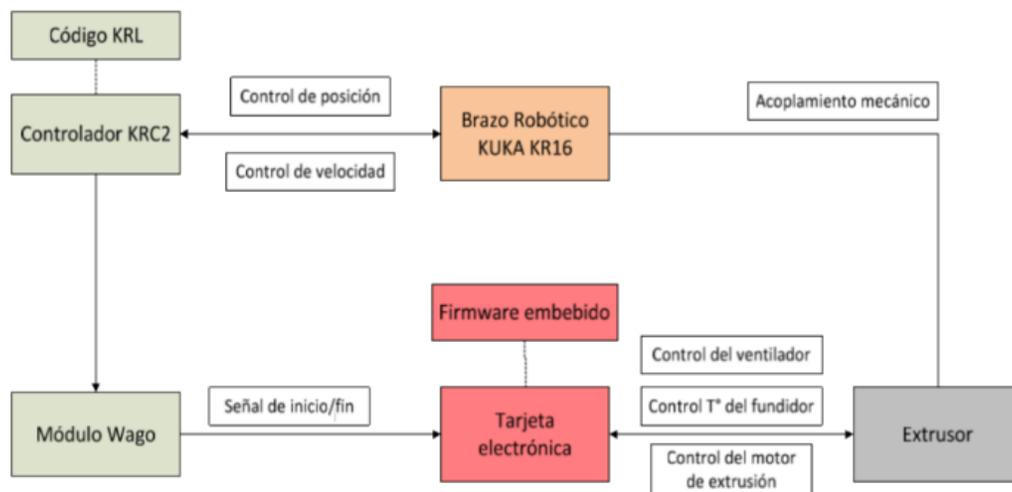
- Pequeño: 800 mm x 600 mm
- Medio: 1200 mm x 800 mm
- Grande: 1600 mm x 1200 mm
- Altura máxima depende del modelo de robot(AiBuild, 2019)

### **1.2.3. Impresión robotizada ESPE**

En el trabajo de investigación realizado por (Lasluisa Naranjo Héctor Geovanny, 2017) en el laboratorio de robótica de la ESPE sede Latacunga, indica que su principal objetivo es crear piezas mediante la deposición de material fundido con orientación de fibra según su perfil, por lo que en el prototipado rápido las variables serán los ejes X, Y, Z al mismo tiempo y no como es usual en las prototipadoras rápidas, donde Z es constante en la deposición de cada capa de material. Se

consideran factores tales como el termoplástico que se usó, el extrusor encargado de halar al material, el hotend, la boquilla y una superficie plana generalmente es una cama caliente, en gran parte los componentes seleccionados en esta investigación son de uso comercial y seleccionados para cumplir dicho objetivo.

El control de este sistema se encuentra en lazo abierto por lo cual no existe retroalimentación desde el extrusor hacia el controlador KRC2, la tarjeta electrónica está cargada con el código Marlín y modificado a conveniencia, este firmware embebido tiene la retroalimentación de la temperatura del extrusor y la cama caliente, por lo que este control está en lazo cerrado, como se muestra en la Figura 6.



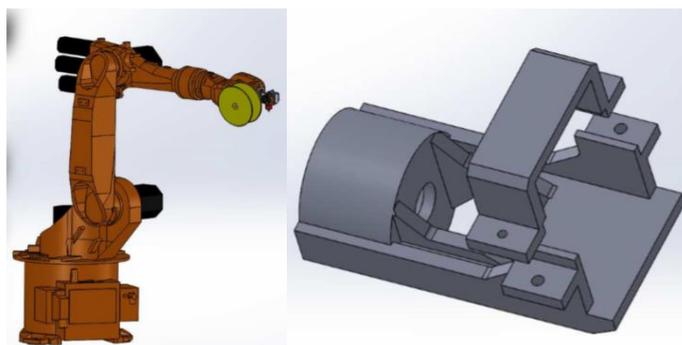
**Figura 6.** Layout para el FDM con el brazo robótico  
Fuente: (Lasluisa Naranjo Héctor Geovanny, 2017)

Se usaron componentes como: Sintron 3D Printer Kit Prusa i3, el cual es un kit para la extrusión del material, Arduino Mega con la Shield RAMPS 1.4, para proporcionar I/O analógicas y digitales, firmware embebido de código abierto, driver de motores PAP, cama caliente MK2 20x20cm, fuente de alimentación 110Vac a 12Vdc, así como el precio y la disponibilidad en el mercado local.

Se consideraron varios parámetros en la creación de la herramienta para el prototipado rápido y solucionaron problemas como la distancia entre el rollo del filamento y el extrusor, asimismo se consideró que el sistema sea totalmente desmontable con facilidad.

En el proceso de impresión 3D ambos programas KUKA KRL y Marlin se ejecutan simultáneamente mas no como uno solo para lo cual deberá existir una correcta comunicación, el desplazamiento del robot a través de trayectorias seleccionadas está a cargo de KUKA KRL, mientras que Marlin controla el sistema de extrusión y de temperatura del hotend y la cama caliente.

Mediante KUKA|PRC y el ingreso de determinados parámetros se realizó trazados en 2 y 3 dimensiones, en las pruebas realizadas se verifico el funcionamiento del robot, para lo cual se desarrolló un test, en el mismo los resultados fueron aceptables al no presentar colisiones.



**Figura 7.** Diseño de soporte

Fuente: (Lasluisa Naranjo Héctor Geovanny, 2017)

Los problemas que presenta esta investigación son los desplazamientos de X a  $-X$  debido a la inercia generada por el rollo del material ubicado en el mismo soporte del extrusor, otra dificultad es la distancia existente de 30cm entre la boquilla del hotend y el muñón de robot, como se puede ver en la Figura 7.

**Limitaciones:**

La superficie de impresión es 210 \*210 mm lo que provoca que las piezas que en ella puedan realizarse tengan este tamaño como máximo.

La existencia de un momento creado por la distancia entre el muñón del robot y el extrusor provoca pequeñas vibraciones al momento de depositar el material con la boquilla.

El tamaño de la boquilla utilizada es de 0.4 -0.6 mm, que mejora el terminado de las piezas, pero tiene un tiempo mayor en la creación de las mismas.

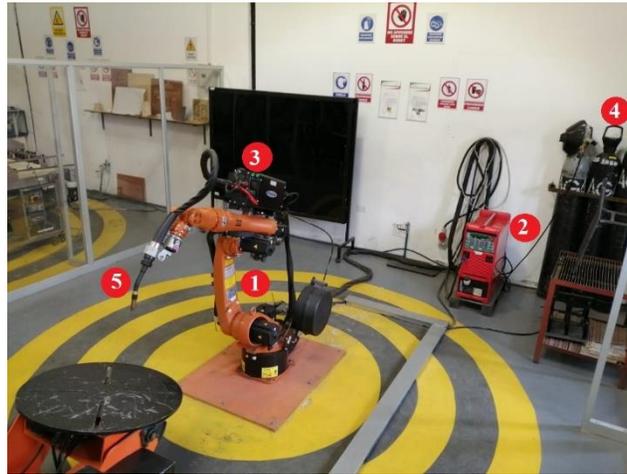
Para las pruebas realizadas se basaron en características de la norma ASTM D638, pero esta no es compatible con el tipo de probeta ya que se necesita una con orientación de fibra, así que implementaron sus propias probetas y como resultado estas presentan mayor resistencia.

**1.2.4. Laboratorio de Robótica Industrial de la ESPE sede Latacunga**

Este laboratorio está ubicado en el campus Latacunga, comprende tres brazos robóticos, un KUKA KR 5 ARC y dos KUKA KR 16, cada uno con las protecciones y conexiones similares al campo industrial, cuyo objetivo es la realización de actividades prácticas relacionadas con robótica y la familiarización de los estudiantes con robots de complejidad mediana y alta. El trabajo en este Laboratorio se centra en las temáticas de manipuladores robóticos con aplicaciones a nivel industrial.

La celda de soldadura Figura 8 consta de un brazo robótico KUKA KR 5ARC, una fuente Fronius, sistema de avance de hilo, gas protector, alimentación de hilo y una boquilla, para realizar soldadura robotizada tipo GMAW, el cual es versátil, flexible y productivo para reducir el tiempo de soldadura y de manera paralela realiza variedad de partes soldadas gracias a sus 6 grados de

libertad y control de monitoreo digital pues además mejora la calidad de soldadura con menos implementos de seguridad.



**Figura 8.** Celda de soldadura

1. Brazo Robótico KUKA KR5 ARC
2. Fuente de poder Fronius
3. Sistema de avance y alimentación de hilo
4. Gas protector
5. Boquilla para soldadura

Además existen dos celdas adicionales, una de manufactura y paletizado y la otra de control de calidad y paletizado Figura 9, en las cuales constan de brazos robóticos KUKA KR 16 y en éstas se han desarrollado múltiples tesis relacionadas como: la réplica de piezas 3D mediante el fresado, el prototipado de piezas según la orientación de fibras de acuerdo a su perfil, un cambiador automático de tres herramientas, control de calidad con visión a través de las bandas transportadoras; por las excelentes características como su carga útil de 16 Kg, alcance máximo de 1610mm, sus 6 grados

de libertad, repetibilidad de 0.1mm y su estructura mecánica, proporciona resistencia y flexibilidad, para realizar estas actividades de manera eficaz (RobotWorx, 2018).



**Figura 9.** Celda de manufactura y paletizado | Celda de control de calidad y paletizado

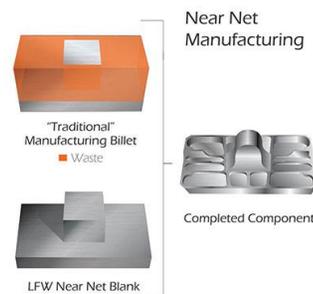
1. Brazo Robótico KUKA KR 16
2. Mesa de trabajo
3. Bandas transportadoras
4. Cambiador automático de herramientas
5. Brazo Robótico KUKA KR 16
6. Sistema de control de calidad
7. Cambiador automático de herramientas
8. Bandas transportadoras

Cabe destacar que el software utilizado en la réplica de piezas 3D es KUKA.Sim Pro cuya ventaja principal es la planificación debido a una potente interfaz de acuerdo a la instalación real por su amplia biblioteca de componentes, pero la desventaja de este es que no integra otras maneras de manufactura como impresión 3D, en cambio en la tesis de prototipado de piezas según la orientación de fibra, utiliza un plug-in reciente llamado Grasshoper que corre en Rhinoceros, del

cual se destaca su programación visual a través de bloques o nodos con algoritmos desarrollado para funciones específicas, es un software inclusivo pues trata de fusionar la manufactura aditiva y sustractiva por medio de código abierto ideal para el desarrollo de trabajos innovadores, pero sobresale un gran inconveniente el constante desarrollo de los algoritmos internos provocan errores que se corrigen a la marcha; estos dos softwares son propietarios y multilinguaje.

### 1.2.5. Near net

Este concepto comprende las técnicas de manufactura de objetos los cuales en su producción inicial tienen casi su forma final, ver Figura 10, esta característica reduce significativamente la necesidad de acabado superficial, es decir mecanizado o rectificado para disminuir hasta dos tercios de los costos (Karunakaran, Suryakumar, Pushpa, & Akula, 2010).



**Figura 10.** Manufactura tradicional vs Near net  
Fuente:(American Friction Welding, 2018)

### 1.2.6. Manufactura híbrida

Es una combinación de las mejores características entre un método sustractivo, en este caso el mecanizado CNC que, aunque depende de la intervención humana para la generación de códigos es de alta calidad, y el prototipado rápido a través de FDM que construye piezas sin intervención humana, utiliza el concepto de near net para reducir considerablemente la programación y los costos (Karunakaran et al., 2010).

La integración híbrida de diferentes equipos debe realizarse como características adicionales sin perturbar el diseño mecánico y de control sin necesidad de información propietaria pero al adicionarse un equipo al otro pueden presentarse problemas mecánicos, eléctricos y de control (Karunakaran et al., 2010).

La deposición de material fundido (FDM) maneja un solo tipo de proceso, sin tomar en cuenta que la fabricación de productos en la actualidad debe hacerse en el menor tiempo posible y se integra múltiples procesos para la fabricación.

La mejora de procesos de fabricación por FDM ha evolucionado de manera que ya no se usa solo para prototipos, pues incluso está presente en modelos funcionales de piezas por su diseño y calidad superior que se obtenía anteriormente.

Los procesos de manufactura aditiva han logrado resolver un problema frecuente en la industria como es la fabricación de formas complejas se elimina de manera sustancial el costo adicional de procesos de mayor robustez y tiempo, el reto actual de este tipo de fabricación es encontrar el proceso más adecuado para realizar cada pieza pues existen muchas posibilidades (Kerbrat, Mognol, & Hascoët, 2011).

La marcada diferencia entre la manufactura aditiva que realiza geometrías complejas con calidad relativa, pero tolerancias mínimas y el mecanizado tiene su gran característica de precisión, pero deficiente para realizar formas complicadas, se puede combinar con la fabricación híbrida, que combina estos dos procesos, además de las máquinas que los realizan, ya que acumula las ventajas de cada uno y reduce las desventajas de los mismos (Newman, Zhu, Dhokia, & Shokrani, 2015).

### 1.2.7. Sobre-extrusión

La sobre-extrusión, como se muestra en la Figura 11, es el resultado directo de un excesivo suministro de material polimérico en la boquilla de extrusión lo que provoca que el modelo CAD ideal se modifique por la cantidad de plástico en el exterior y provoca que se pierdan las características geométricas iniciales, esta condición se da gracias al multiplicador de extrusión y por el ajuste de flujo en el archivo de ajustes, se puede corregir al modificar estos parámetros (Marinescu, Stamin, Tică, & Duță, 2018).



*Figura 11.* Figura con sobre-extrusión  
Fuente: (Leon3D, 2017)

### 1.2.8. Preprocesado

Se define como las acciones, procesos o actividades que son necesarias para un correcto funcionamiento de una máquina como pueden ser alineamiento de objetos, el retardo o descarte de los mismos o preparación previa, lo cual puede ser las capas de uretano como soportes de una impresión 3D.

### 1.2.9. Post procesado

Esta etapa consiste en mejorar la apariencia de capas del FDM, además determina la calidad de las piezas, es decir los detalles, un acabado liso y profesional por lo que existe una gran cantidad de post procesado entre ellos:

- **Lijado y resina epoxi**

Este tipo de post procesado se utiliza mayormente en el PLA, esta técnica consiste en tener lijas de diferentes granos y en la aplicación de resina epoxi (Figura 12) y su catalizador en correctas proporciones, por un lapso hasta que esta se endurezca, se eliminan las imperfecciones a base de lijado con grano grueso al principio y terminar con grano fino o extra fino.



**Figura 12.** Pieza con capa de resina epoxi

Fuente: (Feroqa S.A, 2018)

- **Baño de vapor de acetona**

Es común utilizarlo en materiales plásticos que se puedan maquinar como el ABS, esta técnica suaviza la unión de capas porque fusiona el plástico soluble en acetona (Figura 13), el problema existente con este tipo de post procesado se debe a que los detalles demasiado pequeños o exactos pierden su forma original del modelado 3D.



**Figura 13.** Pieza en vapor de acetona

Fuente:(DIMA 3D, 2015)

- **Imprimación de alta densidad**

La imprimación se define como un recubrimiento de pintura, como se muestra en la Figura 14, para pequeñas hendiduras y se utiliza en FDM cuya diferencia de capas sea lo mínimo posible como en las impresoras estereolitográficas y las figuras se lijan con granos finos y extra fino (Carles Ferrero Ibáñez, 2016).



**Figura 14.** Pintura de imprimación  
Fuente:(TodoHobby, 2016)

- **Fresado**

Se utiliza en materiales termoplásticos que sean maquinables, mejora la apariencia del producto y se puede llegar a confundir con un objeto hecho con inyección de plástico, se realiza en base a la pieza original del CAM y ésta debe estar sujeta a la mesa de manera firme se logra al utilizar uretanos.

### **1.3.Tipos de materiales termoplásticos para el sistema de impresión 3D**

Para el modelado por deposición fundida existe una gran variedad de materiales compatibles como son los polímeros termoplásticos: PLA y ABS entre los más utilizados, y los policarbonatos como PET, nylon, PVA y muchos otros filamentos, estos ofrecen propiedades mecánicas a la pieza realizada (Susana Sánchez Restrepo, 2017).

### **1.3.1. ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno)**

Es un plástico derivado del petróleo, muy resistente a impactos por lo cual se puede pulir, limar, taladrar entre otros procesos industriales y su temperatura de fusión es de 240°C, para la impresión 3D, se necesita una cama caliente para adherirse de forma estable y evitar que se levante o deforme (Impresoras3D, 2018).

### **1.3.2. PLA (Ácido Poli láctico)**

Está fabricado a base de caña de azúcar o almidón de maíz, el uso de una cama caliente ya no es necesario para sostener la pieza, los objetos impresos con PLA no son tan duraderos o fuertes, su temperatura de fusión es de 180°C, unas desventajas para este material es muy complicado su post proceso y no se pueden reciclar(Anonymous Projects, 2018).

### **1.3.3. Nylon (poliamida)**

El comúnmente utilizado en las impresiones 3D es el nylon 618, su temperatura de fusión es de 242 °C, presenta características semejantes al ABS, por consiguiente, tiene una cierta inestabilidad lo que hará que se despegue de la plataforma de la estructura, tiende a encogerse, para ello se debe usar un fijador sobre la base en la que vaya a trabajar(Anonymous Projects, 2018).

### **1.3.4. Poliuretano termoplástico (TPU)**

El poliuretano termoplástico tiene propiedades que permiten catalogarlo como un plástico de ingeniería entre ellas su alta resistencia a la abrasión, al desgaste, al desgarre, al oxígeno y a las bajas temperaturas, es un material semiflexible y resistente a químicos con una fuerte unión de entre capas, el poliuretano termoplástico puede llegar hasta 580% de alargamiento antes de la ruptura(Ultimaker, 2018).

## **1.4.Sistema de control de prototipadoras rápidas**

### **1.4.1. Control**

La comunicación entre el hardware y el controlador KRC2 a través del módulo WAGO permite la conexión entre las entradas y salidas digitales disponibles, todo esto está contenido en el armario de control.

En la etapa de potencia se realiza un control de los elementos como el sistema de extrusión, el calefactor, sensor de temperatura, la cama caliente y ventiladores.

### **1.4.2. Códigos G**

Es el lenguaje de descripción de operaciones para máquinas de control numérico computarizado a través de sentencias y bucles, además es el lenguaje más usado, fue popularizado por su uso en la impresión 3D, pues especifica la posición, cuanto calentar el filamento y como disponer de éste.

Existen programas de código libre para modelado e impresión 3D, que genera el código G para la fabricación, llamado comúnmente como laminado (Ventura, 2014).

### **1.4.3. Lenguaje del robot**

Existen programas que generan bloques de movimiento sobre la base de datos de código G de tal manera que pueda ejecutar el controlador KRC (KUKA Roboter GmbH, 2004).

### **1.4.4. KUKA Robot Lenguaje**

Se ha desarrollado un programa en el lenguaje KRL (KUKA Robot Language), que es el que contiene las ordenes de movimiento del robot, para ello se ha utilizado el KRC Editor, programa facilitado para KUKA.

Es importante destacar que el lenguaje KRL trabaja directamente con el hardware del robot, facilita al programador el control de los movimientos, ya que solo se especifica el punto destino al cual se quiere que se desplace y el tipo de trayectoria a seguir para alcanzarlo.

Las características de velocidad, fiabilidad y robustez de los programas en KRL: hacen que se aproveche al máximo las capacidades del robot (KUKA AG, 2018).

#### **1.4.5. Controlador KR C2**

El controlador KR C2 integra todas las instalaciones de alimentación, seguridad y movimientos, con gran rendimiento, escalabilidad, flexibilidad, a la vez permite reducir los costes de integración y mantenimiento, aumenta la eficiencia. KUKA ha desarrollado una arquitectura de estándares abiertos de alto rendimiento en la que todos los controles tienen una base de datos y una arquitectura común (KUKA AG, 2018).

### **1.5. Alternativas de solución**

Se analiza la prototipadora rápida de Diabase Engineering, de la cual, sus piezas fabricadas constan de diferentes polímeros en una misma pieza por ende diferentes propiedades por secciones, se resalta el mecanismo de torreta, el cual permite hasta 5 cabezales de impresión, fresado y escaneo laser los cuales son intercambiables, éste es adecuado para la ejecución del proyecto ya que brinda la facilidad de uso de múltiples herramientas en un solo mecanismo.

La celda creada por AiBuild, se examina y se destaca el uso de un brazo robótico para el prototipado rápido a gran escala, el hotend de gran tamaño, la superficie de impresión y el gabinete para la creación de un ambiente controlado, la celda aporta al proyecto el uso de una superficie y ambiente controlado para la realización de un prototipado a gran escala de calidad.

Del trabajo de titulación “Investigación del prototipado rápido de piezas con orientación de fibra según su perfil mediante el robot KUKA KR16 de la ESPEL” cabe destacar la comunicación entre la tarjeta de control y el módulo Wago, al igual que el software para el movimiento del brazo robótico, ésta investigación agrega al proyecto la forma de sincronizar los movimientos del brazo robótico con los del motor a pasos del extrusor y el control de los otros componentes necesarios para el prototipado.

Por lo antes analizado y la disponibilidad de herramientas en el laboratorio de robotica se propone la alternativa de usar dos herramientas, disponibles en el laboratorio de robótica, con una de ellas se puede realizar el prototipado rápido, herramienta creada por (Lasluisa Naranjo Héctor Geovanny, 2017), mientras que con otra, el motor Jäger, se procederá al mecanizado de la pieza prototipada mediante FDM con sobre-extrusión, por lo cual se deberá hacer uso del cambiador automático de herramientas para los diferentes procesos de manufactura, al igual que tomar en consideración errores y sugerencias de los autores para la mejora de esta alternativa.

Otra alternativa de solución es la creación de una nueva herramienta, en base a la prototipadora rápida Serie H de (Diabase Engineering LLC, 2018e) se toma la idea de una torreta, la misma que permitirá la manufacturar de piezas mediante FDM con sobre-extrusión desde un extremo y con el otro se realizará el mecanizado, la herramienta deberá ser ligera ya que no necesita de un motor de gran potencia en el acabado de plásticos, asimismo la placa base para la torreta deberá ser de un material ligero como el duralón.

Ambas soluciones pueden contar con una superficie de aluminio fundido y un ambiente controlado para el prototipado a gran escala, esto se logra al encerrar al robot como lo hace

(AiBuild, 2019), como resultado se obtiene pieza fabricadas con una mayor calidad y resistencia sin mencionar su gran tamaño.

Se analiza las alternativas presentadas y se toma en consideración las recomendaciones de proyectos similares como: el peso de la herramienta, su diseño, la disponibilidad y costos de componentes en el mercado local en caso de avería, al igual que su funcionalidad, el espacio que ocupará y el tiempo de cambio entre una herramienta y otra, por lo que se opta como mejor opción la segunda alternativa ya que así se evita los momentos de inercia no deseados, un peso excesivo generado por el motor Jäger y posibles fallas al momentos de usar el cambiador automático de herramientas, se desecha la idea de encerrar al brazo robótico, ya que con esto se limitaría su uso a una sola aplicación, se toma en consideración el uso de una superficie para realizar el prototipado, esto ayudará a la adherencia de la pieza para su proceso de acabado.

### **1.5.1. Torreta**

Debido a la alternativa de solución elegida anteriormente, se presenta un nuevo estudio en base al posicionamiento de las herramientas en la torreta, éstas presentan 3 posibles disposiciones:

- Perpendiculares con respecto a la base.
- Una herramienta paralela y la otra perpendicular.
- Paralelas a la base con un ángulo de  $180^\circ$  entre ellas.

La alternativa más viable, es la tercera opción, ya que a diferencia de la primera esta ocupa de mejor manera el área de trabajo, no la reduce, y no existe riesgo de colisión entre la herramienta y la pieza, asimismo no genera momento de inercia una herramienta con respecto a la otra como lo hace la segunda alternativa.

### **1.5.2. Carga admisible**

Los límites de carga admisible en la muñeca del KUKA KR16 de acuerdo a los datos técnicos proporcionados por la empresa KUKA es de 16 Kg. El peso del sensor de colisión, el cambiador automático de herramienta y la herramienta no debe superar la carga admisible, por lo que se recomienda evitar llegar al límite de este peso para que no exista problemas mecánicos, con este peso, la inercia generada al mover la herramienta a máxima velocidad dañaría seriamente la estructura interna del brazo robótico o activaría el sensor de colisión de manera brusca. Se recomienda dejar un mínimo de 2Kg menor a la carga máxima para evitar cualquier tipo de problema.

### **1.5.3. Mecanismo de extrusión y hotend**

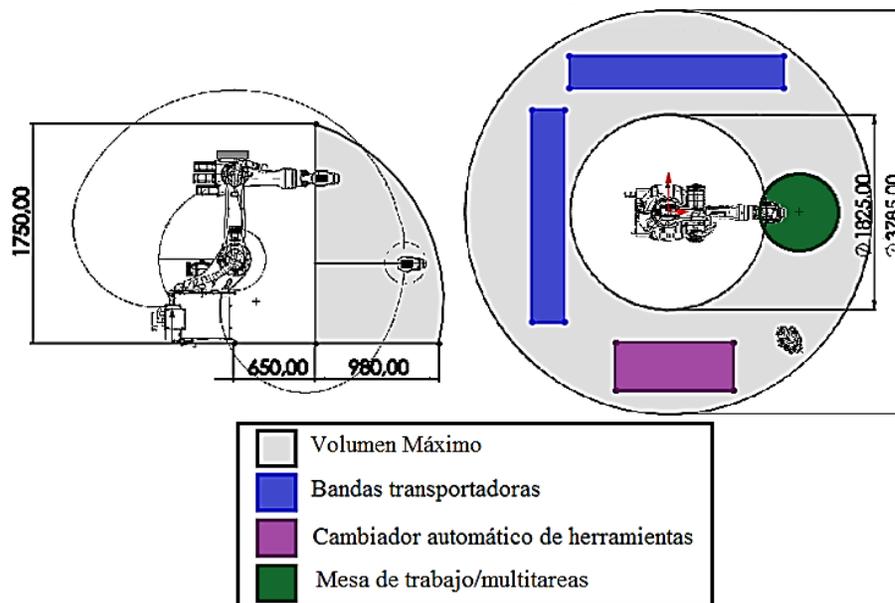
En el mercado internacional existen diferentes prototipadoras, como son las multimateriales que tienen 2 boquillas, otras que tienen un mecanismo de selección de material y máquinas ya a nivel industrial donde, estas mismas son capaces de realizar la impresión 3D con distintos materiales y proporcionar una etapa de terminado, se optó por el uso de un extrusor con su respectiva boquilla ya que el multimaterial presenta muchas fallas en el producto final.

En el mercado actual existen dos alternativas de extrusión: directa y bowden. Las ventajas de la extrusión directa es un buen control el movimiento del filamento, por ende, un mejor acabado del prototipado, y admitir muchos tipos de filamento, la extrusión bowden permite aligerar la carga y mover a mayor velocidad.

Al analizar las alternativas, cabe recalcar que se va a montar en un robot KUKA KR16, la mejor es la extrusión directa ya que el peso del motor de empuje no genera una oposición significativa en el movimiento del robot.

#### 1.5.4. Campo de trabajo

El campo de trabajo del KUKA KR 16 viene definido en manuales, esto sería una referencia para obtener un volumen máximo con respecto al proyecto, pues la herramienta tiene restricción de posición, ya que trabajará de manera vertical lo que provocará que el volumen referencial se modifique, este volumen máximo hace que el proyecto abarque las diferentes áreas de la celda de manufactura, entonces se necesitará un volumen de trabajo, el más adecuada por su ubicación y facilidad de movimiento sin mayores obstáculos será la mesa multitarea (ver **Figura 15**).



**Figura 15.** Campo de trabajo y volumen máximo

#### 1.5.5. Superficie de impresión

Los sistemas de impresión FDM utilizan diferentes superficies para realizar la impresión y que esta sea de calidad, existen dos formas de imprimirlo con o sin cama caliente, el material a utilizar es un factor discriminante para la elección de esta superficie y de acuerdo a los estudios del levantamiento de las esquinas (*warping*) se opta por utilizar una cama caliente, pues ofrece una mejor adhesión, sin utilizar productos adicionales como lacas o gomas.

### 1.5.6. Material

El material que se utilizará debe tener disponibilidad en el mercado nacional, además de precio accesible y que las características que brinde deben ser usadas a nivel educativo e industrial por lo que se reduce a dos posibles materiales PLA y ABS en estado comercial o en forma de materiales compuestos, en base a estas dos alternativas se analiza la facilidad de usarlo por lo que el PLA es la mejor opción, ya que es poco probable la existencia de *warping*.

- **Colocación de filamento**

En base a proyectos anteriores desarrollados en el laboratorio de Robótica Industrial se descartan la utilización del brazo oscilador como soporte del rollo, así como debajo del brazo robótico junto a la base y el colocar a lado de la muñeca, surgen dos alternativas obvias el uso del brazo o la base del robot para ubicar el soporte, se toman en cuenta las recomendaciones de distancia entre el rollo y el extrusor y el movimiento de estas regiones que provocarían que se enrede el filamento, después del análisis de estas opciones se opta por usar el brazo como soporte del filamento por su distancia total al extrusor y su movimiento no giratorio.

### 1.5.7. Postprocesado

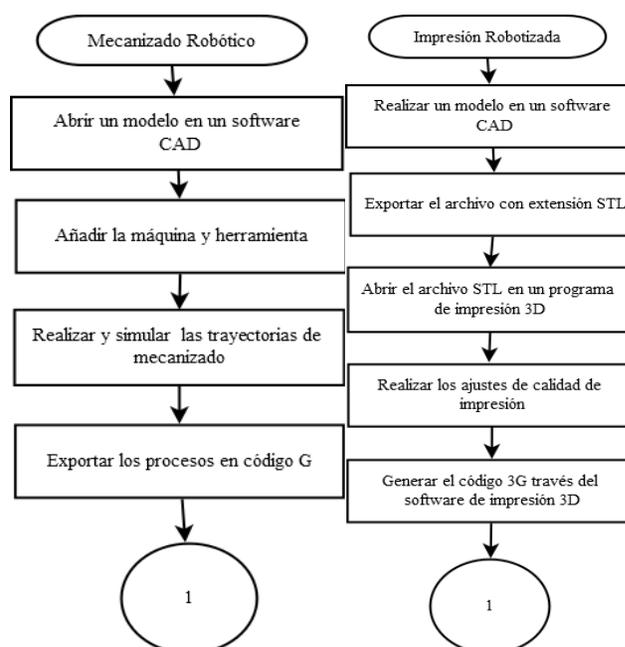
De acuerdo a las fuentes de información el mejor post procesado por la calidad de terminado y calidad en detalles es el mecanizado. Existen dos claras opciones para realizar el mecanizado y estas son: utilizar el motor Jäger existente en el laboratorio o investigar otro tipo de motor para acoplar y que las características sean las necesarias para cumplir el propósito. Se toma en cuenta las recomendaciones de los docentes del laboratorio y se descarta el utilizar el motor Jäger por su excesivo peso y la dificultad de coordinación entre una y otra herramienta; en el mercado existen

motores con mayor ergonomía, ligeros y capaces de adaptarse al proyecto llamados mototool por lo que parece ser la opción más recomendada.

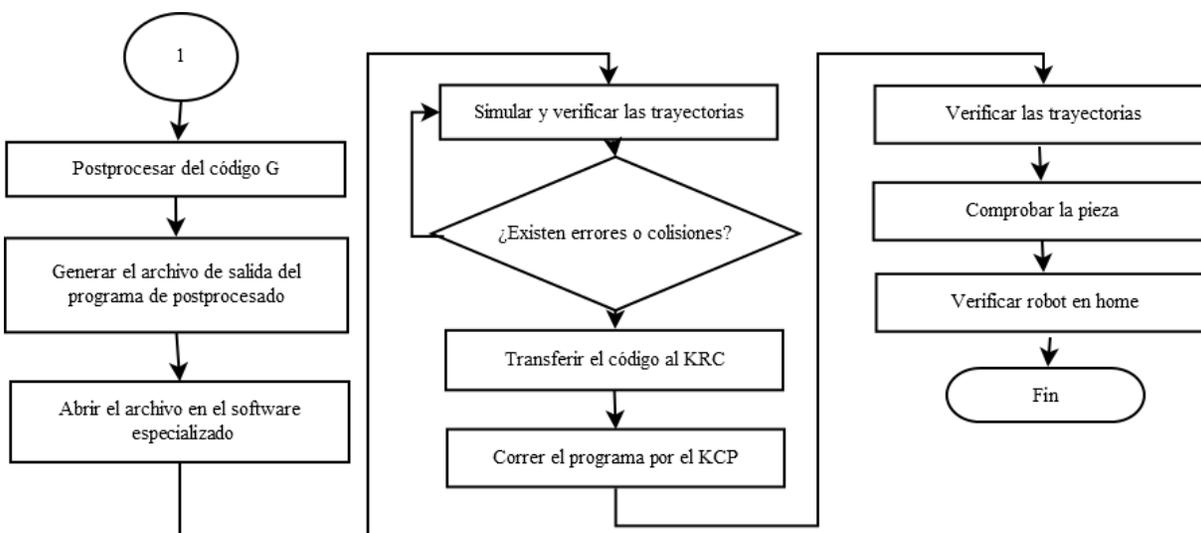
### 1.5.8. Alternativas de procedimientos a realizar de acuerdo al software

Se puede analizar las diversas alternativas existentes en el mercado actual, en el laboratorio de robótica y con fundamentación de proyectos anteriores. Por lo que se presenta la opción del uso de software para cada proceso CAD, CAM, tratamiento de código G y generación de archivos KRL, una segunda es similar a la anterior con la diferencia que se evita el tratamiento de códigos G.

En base a antecedentes realizados en el laboratorio se opta por la segunda alternativa como la mejor, ya que hace el proceso más corto, a continuación, en la Figura 16, se muestra el proceso a seguir para la obtención de códigos G ya sea de mecanizado o de Impresión, asimismo en la Figura 17 se observa el procedimiento del proyecto, donde parte desde los códigos G hasta la culminación de una pieza prototipada.



**Figura 16.** Generación de códigos G



*Figura 17.* Procedimiento del proyecto

### 1.5.9. Software de impresión 3D

El transformar un archivo de tipo CAD se puede realizar por programas licenciados o software libre de impresión 3D, su principal diferencia es la cantidad y calidad de procesos que puede realizar el uno o el otro, los parámetros fundamentales para la elección de un software son el precio de su licencia junto a la mejora continua, estos softwares generan e interpretan el lenguaje universal de Control numérico computarizado llamado códigos G, por ende y por mayor accesibilidad se elige un software libre o de código abierto.

Además, debe cumplir con parámetros como: leer archivos del tipo STL, ser editable y flexible para distintos materiales y equipos, tener características necesarias para el proyecto como, por ejemplo: realizar soportes adicionales a las piezas, variar el relleno, realizar un ajuste de flujo, variación en la velocidad de impresión, la medida de la boquilla de extrusión, la cama caliente y su forma.

### 1.5.10. Software especializado

El brazo robótico trabaja con el lenguaje KRL y este lenguaje se puede generar a través de un software especializado, por lo que las opciones para manejar el brazo robótico se reducen a un programa exclusivo de KUKA o un programa licenciado que maneje el lenguaje KRL, pero con mayor dificultad de programación, los factores discriminantes para la elección será los recursos disponibles en el laboratorio tanto programas instalados o licencias.

La interfaz es un espacio de dos dimensiones que contiene cajas con programación, parámetros y componentes, los cuales contienen datos para que los componentes trabajen con ellos, para realizar diferentes funciones lógicas o matemáticas desde muy simples a complejas y al unir se generan los algoritmos de control, las cajas contienen matrices y transformaciones que se realizan en segundo plano, las principales funciones de estas matrices son: mover, rotar, proyectar, escalar y transformar un sistema de coordenadas es decir esto se ve reflejado en el proyecto, al cambiar un movimiento en 3 dimensiones del código G al lenguaje KRL mediante múltiples transformaciones afines con operaciones como: multiplicar matrices para conmutar la geometría a un espacio entendible por el lenguaje del robot, que hacen que la pieza realizada en 3D conserve sus relaciones de paralelismo entre líneas a través de matrices de traslación, de rotación alrededor del eje X, Y, Z y con respecto a los ángulos A, B, C, utiliza matrices de escalado y sesgado, en la llamada matriz de transformación homogénea (Ecuación 1), en cambio cuando hay una transición a curvas éstas se parametrizan en función de "t", un parámetro entre 0-1, el cual maneja un método de discretización aproximada, que mientras mejor sea la especificación de precisión del brazo robótico mayor será el almacenamiento que necesitará, lo que se traslada a nuestro proyecto como: si la impresión 3D tiene curvas ocupará mayor cantidad de memoria aunque estén modificados

parámetros como la altura de capa en relación a que si utilizará geometrías lineares y en el fresado ocupará considerable cantidad de memoria realizar un mecanizado multiejes que un mecanizado cartesiano.

$${}^1_4T = \begin{bmatrix} R_{3x3} & P_{3x1} \\ f_{1x3} & 1 \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

$R_{3x3}$  = matriz de rotación

$P_{3x1}$  = vector de posición

$f_{1x3}$  = Transformación de perspectiva

1 = escalado

Cuando se trata de velocidades se usa la matriz jacobiana del robot, que relaciona el vector de velocidades articulares ( $\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dot{q}_n$ ) con otro vector de velocidades expresado en un espacio distinto, se pueden expresar de dos maneras, la primera por coordenadas angulares y ángulos de Euler ( $\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}, \dot{\Phi}, \dot{\theta}, \dot{\Psi}$ ) llamada Jacobiana analítica (Ecuación 2) y la segunda con vectores de velocidad lineal y angular ( $v_x, v_y, v_z, w_x, w_y, w_z$ ), que se representa en la matriz Jacobiana geométrica (Ecuación 3), en ambos casos puede ser directa al conocer las velocidades del extremo del robot o inversa si se conoce las velocidades articulares. (Rajaa Issa, 2010).

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ \dot{\Phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\Psi} \end{bmatrix} = J_a \cdot \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \dot{q}_n \end{bmatrix} \quad \text{con } J_a = \begin{bmatrix} \frac{\delta f_x}{\delta q_1} & \dots & \frac{\delta f_x}{\delta q_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\delta f_\Psi}{\delta q_1} & \dots & \frac{\delta f_\Psi}{\delta q_n} \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 2}$$

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \\ w_x \\ w_y \\ w_z \end{bmatrix} = J \cdot \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \dot{q}_n \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 3}$$

### **1.5.11. Tarjeta de control y firmware**

El control de las impresoras 3D se dan a través de tarjetas embebidas llamadas todo en uno y por tarjetas de control con shields acopladas a estas, las opciones varían en precio, tamaño y disponibilidad por lo que la elección se centra básicamente en la tarjeta más actualizada y con mayores características como son las tarjetas todo en uno, todas las opciones tienen algo en común utilizan un firmware casi universal de código abierto llamado Marlín, es modificable y adaptable para el proyecto y sería la opción válida para acoplar a la tarjeta.

### **1.5.12. Caja de control**

Es el área específica donde se encuentran los componentes electrónicos y esta podría ser ubicada en el brazo robótico, en la periferia del mismo o sobre el KRC, de acuerdo a los resultados obtenidos en proyectos similares, se toma en cuenta la ubicación de un diseño anterior como la mejor opción, por su lugar estratégico y la infraestructura ya establecida para que no exista mayor problema, por lo cual se ubicará sobre el KRC.

### **1.5.13. Apariencia**

El desarrollo de un producto o proyecto debe ser atractivo para posibles compradores y revisores, la apariencia debe generar confianza, demostrar robustez, ergonomía y ser estético, los parámetros para esta cualidad no están definidos en el mercado por lo que esta característica esta netamente sujeta al diseño de los autores.

### **1.5.14. Vista general de la ubicación de componentes**

De acuerdo a las alternativas de solución descrita se logra obtener una visión general de la ubicación de los componentes donde la herramienta se ubica en la muñeca del robot KUKA KR16 y la superficie de impresión estará ubicada en la mesa multitarea, el cableado se regirá de acuerdo

a la disposición del laboratorio ya que consta de mangueras y canaletas, lo descrito anteriormente se puede apreciar en la Figura 18.



**Figura 18.** Mejor alternativa de ubicación de los componentes  
Fuente: (Lasluisa Naranjo Héctor Geovanny, 2017)

## **CAPÍTULO II**

### **DISEÑO MECATRÓNICO**

#### **2.1. Diseño mecánico**

Los criterios para el diseño mecánico que se utilizan son de suma importancia, pues éstos permiten realizar un diseño de manera muy eficiente acotado por parámetros que son requeridos en el laboratorio de Robótica Industrial de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

El diseño mecánico de la herramienta debe estar regido por una correcta selección de componentes y materiales, para cumplir la manufactura híbrida, se toma en cuenta la carga admisible del brazo robótico, asimismo analizar las fuerzas que intervienen a la hora de realizar el proceso de manufactura sustractiva y todos los parámetros que se correlacionan para la ejecución de la manufactura aditiva, al igual que la comunicación y control de los elementos.

##### **2.1.1. Parámetros de diseño**

###### **A. Carga admisible**

Por la recomendación anteriormente planteada de dejar libre 2Kg, la carga máxima del KUKA KR16 se reduce a 14Kg, los cuales se pueden desglosar de la siguiente manera:

Cambiador automático comprendido por el plato master, plato tool, cuya masa aproximada es de 1500gr.

Sensor de colisión con una masa aproximada de 700gr.

Mecanismo de extrusión: Un motor a pasos Nema 17 con una masa aproximada de 270 gr.

Extrusor: Los componentes del extrusor tienen aproximadamente de 125 gr.

Hotend: Una masa aproximada de 50 gr.

Motor con husillo: Mototool con distintas funcionalidades es de aproximadamente de 575gr.

Rollo de filamento para la impresión 3D generalmente consta de 1000 gr

Cabe recalcar que el filamento no se colocará en la muñeca del KUKA sino en el brazo, de manera que no dañe la estética de la celda y no impida la funcionalidad del brazo robótico.

Placas electrónicas, módulos y sensores es aproximadamente de 500 gr, los mismos que estarán en una caja de control ubicada sobre el KRC.

Estructura del sistema: para la creación de ésta y cumplir el parámetro de carga admisible, no debe exceder la carga máxima, se tiene disponible 10780gr.

### **B. Mecanismo de extrusión y hotend**

El mecanismo de extrusión deberá tener una buena relación de transmisión, así como un diseño compacto y ligero, y ser compatible con el hotend, este último deberá tener una tasa de fusión más alta para el material, así lograr un mayor espesor de capas el cual depende del diámetro de extrusión de la boquilla, el mercado actual proporciona medidas de hasta 1.2mm, lo cual da como resultado el aumento de la velocidad de deposición en el prototipado rápido.

### **C. Volumen de trabajo**

Éste se puede definir como el espacio principal donde se realizará la impresión 3D, y cuenta con los elementos necesarios para que pueda funcionar, es decir, en la celda de mecanizado se encuentra una mesa de trabajo, cuyo diámetro es igual 0.74m, y está ubicada a 0.62m del piso sobre la cual se desarrollará el proyecto, la cama puede estar inscrita a la mesa, entonces sus dimensiones serían

0.74m\*0.74m, esto deja a las esquinas totalmente sin apoyo, por lo que se reducirá el área a una que se pueda crear con camas calientes comerciales, se toma en cuenta que para controlarlas se necesita de más fuentes de alimentación, como resultado se tiene que el cambio de medidas es 0.6m\*0.6m, y de acuerdo a las mediciones realizadas, se obtiene el volumen que se puede observar en la Figura 19.



**Figura 19.** Volumen de trabajo

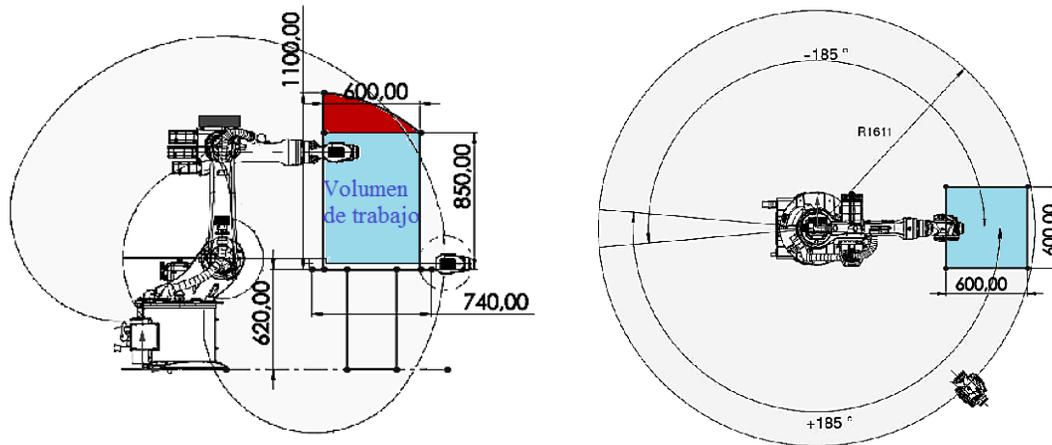
La herramienta va a trabajar de manera cartesiana por lo que restringe el volumen de trabajo a un rectángulo, se tiene que la longitud (l) es 0.6m, el ancho (w) es 0.6m y la altura (h) es 0.85m, calculado en la Ecuación 4, se muestra en la Figura 20 el campo de trabajo principal del KUKA KR 16 con el volumen de trabajo.

$$V_{trabajo} = l * w * h$$

**Ecuación 4**

$$V_{trabajo} = 0.6m * 0.6m * 0.80m$$

$$V_{trabajo} = 0.288m^3$$



**Figura 20.** Ubicación del volumen de trabajo

#### **D. Superficie de impresión**

La base de deposición estará conformada por varias camas calientes, estas estarán elevadas a una distancia de 3cm de una superficie plana, la cual se encuentra fijada a la mesa multitareas a través de bridas de sujeción, de tal forma lograr utilizar toda el área de la mesa de trabajo del KUKA KR16, lo cual permitirá el prototipado rápido de piezas más grandes en comparación a las impresoras 3D convencionales, la temperatura generada por la superficie de impresión debe ser de 50°C.

#### **E. Parámetros de mecanizado**

La velocidad de corte necesaria para mecanizar los termoplásticos debe ser la más óptima, ni tan rápida que genere demasiado calor que comience a fusionarse con la pieza final y cambie su geometría(Mariano, 2011), de acuerdo a estos datos y las características del mototool con broquero y pinza de 1/8 in, se tiene que la velocidad mínima de corte en plásticos es  $46 \frac{m}{min}$ , la velocidad máxima puede llegar a  $137 \frac{m}{min}$  según (Enrique Esparza, 2019).

El avance por diente  $f_z$  es de 0.025mm para una fresa de diámetro 3.175 mm  $\approx \frac{1}{8}$  in (Enrique Esparza, 2019).

La profundidad de corte ( $a_p$ ) depende del material a mecanizar, de la herramienta y de la operación a realizar, con profundidades típicas de 2.5-20mm y un empañe ( $a_e$ ) de hasta el diámetro total de la fresa (Mikell P. Groover, 2007), por lo que se toma una profundidad de 5mm y un empañe de un tercio del diámetro aproximadamente 1mm.

Según (Toolmex Industrial Solutions, 2014) para fresas de procesos de terminado, el número de dientes ( $z_c$ ) que se debe usar es 4.

Se tiene que la fuerza específica de corte para plásticos es  $K_c \cong 400 \frac{N}{mm^2}$  (Francisco Mata Cabrera, 2005).

El valor típico de la eficiencia (E) para máquinas herramientas es de aproximadamente 90% (Mikell P. Groover, 2007).

El coeficiente de fricción entre el plástico y acero es de  $\mu = 0.25$  según (Federico Vázquez, 2013).

## **F. Material**

Debe tener características favorables para la realización de este proyecto entre ellas: el peso del rollo del filamento puede variar entre 0.5 a 1 Kg, el diámetro debe ser de 1.75mm ya que es el más común, ser un material de calidad para evitar el *warping* y las fisuras o burbujas internas en el filamento, por último, debe ser apto para un postproceso de mecanizado.

- **Colocación del filamento**

Para la ubicación del rollo de filamento debe constar de un soporte el cual estará sujeto mediante pernos para una mayor fijación, como se ve en las impresoras 3D convencionales el soporte no generará algún tipo de resistencia cuando este sea hallado por el extrusor, asimismo el rollo estará orientado de tal forma que no obstruya los demás componentes del brazo robótico.

## 2.1.2. Análisis del diseño

### A. Velocidad de husillo

Se va a utilizar la velocidad de corte promedio (Ecuación 5) de acuerdo a los parámetros de mecanizado, especificado en el literal E de la sección 2.1.1. Parámetros de diseño.

$$V_{cprom} = \frac{V_{cmin} + V_{cmax}}{2} \quad \text{Ecuación 5}$$

$$V_{cprom} = 91.5 \frac{m}{min}$$

Se calculará la velocidad del husillo con la Ecuación 6 y los datos anteriores.

$$n = \frac{V_{cprom} * 1000}{\pi * D_c} \quad \text{Ecuación 6}$$

$$n = 9173.34 \frac{rev}{min}$$

Con el resultado obtenido, el mototool debe tener la capacidad de llegar a aproximadamente 10000 rpm para un correcto acabado en las piezas prototipadas mediante FDM sin el peligro que las mismas se deformen por el exceso de calor generado al momento de fresarlas.

## B. Velocidad de avance

Cálculo del avance de mesa mediante la Ecuación 7; se reemplaza los datos obtenidos anteriormente.

$$V_f = f_z * n * z_c \quad \text{Ecuación 7}$$

$$V_f = 917.334 \frac{mm}{min}$$

## C. Potencia

Para calcular la potencia neta requerida ( $P_c$ ) se ocupa la Ecuación 8.

$$P_c = \frac{a_p * a_e * V_f * K_c}{60 * 10^6} \quad \text{Ecuación 8}$$

$$P_c = 0.0305 \text{ KW} \equiv 30.577 \text{ W}$$

Para la obtención de la velocidad de arranque de viruta ( $Q$ ) se usa la Ecuación 9.

$$Q = \frac{a_p * a_e * V_f}{1000} \quad \text{Ecuación 9}$$

$$Q = 4.586 \frac{mm^3}{min}$$

El cómputo del par de apriete ( $M_c$ ) se logra mediante la Ecuación 10.

$$M_c = \frac{P_c * 30 * 10^3}{\pi * n} \quad \text{Ecuación 10}$$

$$M_c = 0.0317 \text{ N} * m$$

Cálculo de la fuerza cortante ( $F_c$ ) a con la Ecuación 11, se toma en cuenta las unidades y se realiza una correcta transformación.

$$F_c = \frac{P_c}{V_{cprom}} \quad \text{Ecuación 11}$$

$$F_c = 20.05 \text{ N}$$

Cálculo de tasa de remoción de material ( $R_{MR}$ ), se logra mediante la Ecuación 12, como en el caso anterior se deben considerar las unidades.

$$R_{MR} = V_{cprom} * f_z * a_p \quad \text{Ecuación 12}$$

$$R_{MR} = 190.625 \frac{\text{mm}^3}{\text{s}}$$

El cálculo de potencia real del motor de la máquina herramienta se obtiene mediante la Ecuación 13.

$$P_g = \frac{P_c}{E} \quad \text{Ecuación 13}$$

$$P_g = 33.97 \text{ W}$$

Este resultado es un parámetro importante en la selección de componentes, por lo que se deduce que el mototool debe tener una potencia mínima requerida de aproximadamente 34W.

#### **D. Fuerzas en el corte**

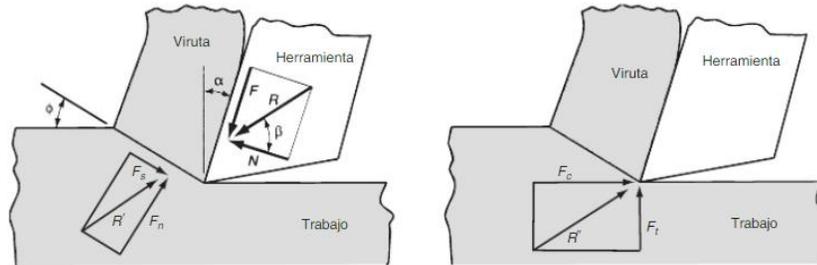
Cálculo del coeficiente de fricción se obtiene por medio de la Ecuación 14.

$$\mu = \frac{F}{N} \quad \text{Ecuación 14}$$

Donde F es la fuerza a la fricción y N es la fuerza normal a la fricción.

$$F = 0.25 * N$$

Las ecuaciones para relacionar las cuatro fuerzas componentes que no se pueden medir con las dos fuerzas que se pueden medir se observa en la Figura 21.



**Figura 21.** Fuerzas en el corte  
Fuente: (Mikell P. Groover, 2007)

Se obtiene las siguientes ecuaciones:

$$F = F_c \operatorname{sen} \alpha + F_t \cos \alpha \quad \text{Ecuación 15}$$

$$N = F_c \cos \alpha - F_t \operatorname{sen} \alpha \quad \text{Ecuación 16}$$

$$F_s = F_c \cos \phi - F_t \operatorname{sen} \phi \quad \text{Ecuación 17}$$

$$F_n = F_c \operatorname{sen} \phi + F_t \cos \phi \quad \text{Ecuación 18}$$

Donde  $F_t$  es la fuerza de empuje,  $F_s$  es la fuerza cortante y  $F_n$  es la fuerza normal a la fuerza cortante, en el caso del corte ortogonal el ángulo inclinado  $\alpha = 0$ , las ecuaciones se reducen a:

$$F = F_t$$

$$N = F_c$$

$$N = 20.05 \text{ [N]}$$

$$F_t = 0.25 * N$$

$$F_t = 5.0125 \text{ [N]} \therefore F = 5.0125 \text{ [N]}$$

Para el cálculo del ángulo de fricción se logra mediante la Ecuación 19.

$$\beta = \tan^{-1} \mu \quad \text{Ecuación 19}$$

$$\beta = 14.036^\circ$$

El cálculo del ángulo del plano de corte se logra con la Ecuación 20.

$$\phi = 45 + \frac{\alpha}{2} + \frac{\beta}{2} \quad \text{Ecuación 20}$$

$$\phi = 52.018^\circ$$

Para el cálculo del área del plano de corte se utiliza la Ecuación 21, donde  $t_o$  es el espesor de viruta antes de su formación  $t_o = a_p$ , el ancho de la operación de corte ortogonal es  $w = a_e$ .

$$A_s = \frac{t_o * w}{\text{sen } \phi} \quad \text{Ecuación 21}$$

$$A_s = 6.3435 \text{ mm}^2$$

Cálculo de la fuerza cortante  $F_s$  mediante la Ecuación 17 y de la fuerza normal a la cortante  $F_n$  con la Ecuación 18.

$$F_s = F_c \cos \phi - F_t \text{sen } \phi$$

$$F_s = 8.388[N]$$

$$F_n = F_c \text{sen } \phi + F_t \cos \phi$$

$$F_n = 18.888[N]$$

Para el cálculo del esfuerzo requerido para la operación de maquinado que actúa a lo largo del plano de corte entre el trabajo y la viruta, se obtiene con la Ecuación 22.

$$\tau = \frac{F_s}{A_s}$$

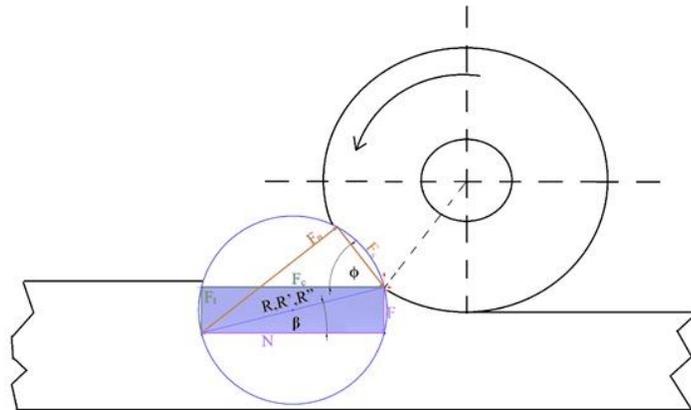
**Ecuación 22**

$$\tau = 1.322 \text{ MPa}$$

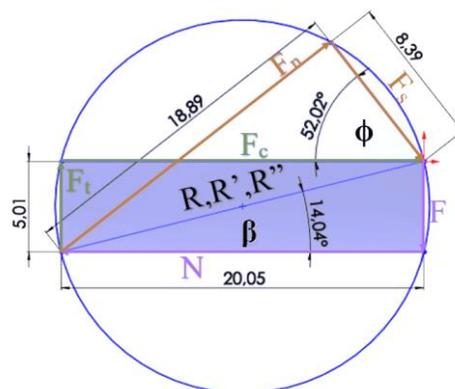
Este esfuerzo es igual al esfuerzo cortante del material de trabajo ( $\tau = S$ ) bajo las condiciones en las que ocurre el corte.

- **Dirección y sentido de las fuerzas**

En la Figura 23 y Figura 23 se muestran el diagrama de fuerzas con las relaciones geométricas entre todas estas.



**Figura 22.** Fuerzas de fresado en concordancia



**Figura 23.** Dirección y sentido de las fuerzas

$$R = \sqrt{F^2 + N^2}$$

$$R = \sqrt{427.127 [N^2]}$$

$$R, R', R'' = 20.66 [N]$$

$$R = (-20.05 i - 5.0125j)[N]$$

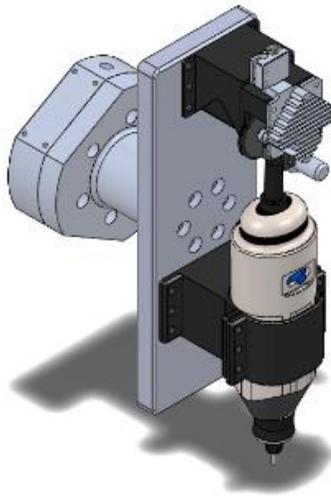
$$R' = (20.05i + 5.0125j)[N]$$

$$R'' = (20.05i + 5.0125j)[N]$$

### E. Propuesta de diseño

El diseño inicial sirve para entender el problema con una visión propia y resolverlo, es decir, es un modelo para trabajar en una dirección correcta, pues muestra los errores en puntos no tomados en consideración en una fase inicial, por lo que conlleva a desarrollar los detalles de acuerdo a un nuevo enfoque.

Este primer diseño consta del plato en “V” modificado de tal forma que exista una columna con una longitud considerable para evitar colisión con el pin de sujeción al soporte del cambiador de herramientas, además de una placa mecanizada en un material ligero y resistente como es el duralón, también a esta placa están sujetos el hotend y el mototool, a través de los soportes impresos con material reforzado, a una distancia donde el punto home coincida en las dos herramientas.(Ver Figura 24).



**Figura 24.** Primera propuesta de Diseño

#### **F. Esfuerzos combinados, desplazamientos y factor de seguridad**

El método de diseño asegura que los valores de los esfuerzos obtenidos sean menores que el valor de fluencia de los materiales es decir, la seguridad de los componentes a diseñar, por esto los cálculos están guiados de acuerdo a las fórmulas, principios y corolarios de (Robert L. Mott,P.E, 2006).

Con los datos obtenidos en el literal D. Fuerzas en el Corte, se tiene el valor de las fuerzas aplicadas en la herramienta de corte:

$$F_x = 20.05[N]$$

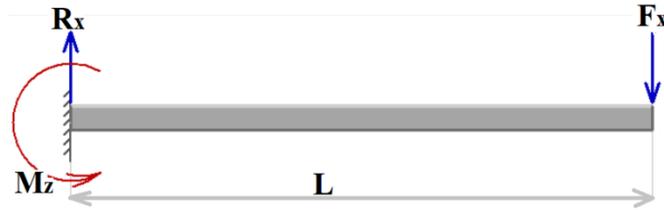
$$F_z = 5.0125 [N]$$

$$T = M_c = 0.0317 [N * m]$$

$$\phi = 3.175 \text{ mm}$$

$$L = 10\text{mm}$$

Plano XY



**Figura 25.** Herramienta de corte plano XY

Cálculos de las fuerzas y momentos

$$\sum F_x = 0$$

$$R_x = F_x$$

$$R_x = 20.05 \text{ [N]}$$

$$\oplus \sum M_z = 0$$

$$M_z = F_x * d$$

$$M_z = 20.05 \text{ [N]} * 0.01 \text{ m}$$

$$M_z = 0.2005 \text{ [N} \cdot \text{m]}$$

Cálculo del esfuerzo debido a la flexión

$$\sigma_{Mz} = \frac{M_c}{I}$$

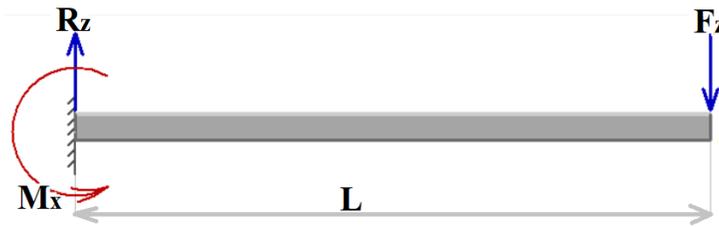
**Ecuación 23**

$$\sigma_{Mz} = \frac{M \left( \frac{D}{2} \right)}{\pi * \frac{D^4}{64}} = \frac{32 * M}{\pi * D^3}$$

$$\sigma_{Mz} = \frac{32 * 0.2005 [M * m]}{\pi * (3.175mm)^3 * \left(\frac{1m}{1000mm}\right)^3}$$

$$\sigma_{Mz} = 63.809 MPa$$

Plano YZ



**Figura 26.** Herramienta de corte plano YZ

Cálculos de las fuerzas y momentos

$$\sum F_z = 0$$

$$R_z = F_z$$

$$R_z = 5.0125 [N]$$

$$\oplus \sum M_x = 0$$

$$M_x = F_z * d$$

$$M_x = 5.0125 [N] * 0.01m$$

$$M_x = 0.050125 [N * m]$$

Cálculo del esfuerzo normal mediante la Ecuación 23, producido por un momento flexionante.

$$\sigma_{Mx} = \frac{32 * M}{\pi * D^3}$$

$$\sigma_{Mx} = \frac{32 * 0.050125 [N * m]}{\pi * (3.175mm)^3 * \left(\frac{1m}{1000mm}\right)^3}$$

$$\sigma_{Mx} = 15.952 MPa$$

Cálculo del esfuerzo cortante producido por torsión, este se lo puede calcular con la Ecuación

24.

$$\tau_{xy} = \frac{T * c}{J}$$

**Ecuación 24**

$$\tau_{xy} = \frac{T * \left(\frac{D}{2}\right)}{\frac{\pi}{32} * D^4} = \frac{16 * T}{\pi * D^3}$$

$$\tau_{xy} = \frac{16 * 0.0317 [N * m]}{\pi * (3.175mm)^3 * \left(\frac{1m}{1000mm}\right)^3}$$

$$\tau_{xy} = 5.044 MPa$$

Cálculo de los esfuerzos principales máximo  $\sigma_1$ , mínimo  $\sigma_2$  y esfuerzo cortante máximo  $\tau$ , mediante la Ecuación 25.

$$\sigma_{1,2} = \frac{1}{2} * (\sigma_{Mz} + \sigma_{Mx}) \pm \sqrt{\left(\frac{1}{2} * (\sigma_{Mz} - \sigma_{Mx})\right)^2 + \tau_{xy}^2}$$

**Ecuación 25**

$$\sigma_1 = 64.334 MPa$$

$$\sigma_2 = 15.426 MPa$$

$$\tau = \pm 24.454 MPa$$

En el cálculo de las deformaciones máximas, se realiza con el uso de la Ecuación 26, la cual depende de la relación entre fuerza, longitud, módulo de elasticidad del material, en este caso se utiliza un AISI 8760 con un módulo elástico de  $E=207\text{GPa}$ , y la inercia.

$$X_{max} = \frac{F_x * L^3}{3 * E * I} \quad \text{Ecuación 26}$$

$$X_{max} = 6.472 * 10^{-6}m$$

$$X_{max} = 6.472 * 10^{-3}mm$$

Se utiliza la Ecuación 26 para el cálculo de la deformación en Z

$$Z_{max} = \frac{F_z * L^3}{3 * E * I}$$

$$Z_{max} = 1.619 * 10^{-3}mm$$

El factor de seguridad tiene varios valores para distintos tipos de cargas, pero en este estudio se toma que el factor de diseño  $N = 2$  ya que se utiliza fuerzas estáticas, donde cualquier material si es sometido a un esfuerzo hasta su máxima resistencia a la cedencia y al borde de la fractura, este daría como factor de seguridad  $N = 1$  (Robert L. Mott, P.E, 2006).

Para el factor de seguridad se utiliza el esfuerzo normal máximo junto al esfuerzo último del material, en este caso un AISI 8760 con  $\sigma_u = 415\text{MPa}$ , para el respectivo cálculo de utiliza la Ecuación 27.

$$N = \frac{\sigma_u}{\sigma_d} \quad \text{Ecuación 27}$$

$$N = \frac{415 \text{ MPa}}{64.334 \text{ MPa}}$$

$$N = 6.45$$

En el análisis para los siguientes segmentos el proceso es idéntico por lo que se decide tabular los resultados obtenidos, como son los esfuerzos y deformaciones.

**Tabla 1**

*Esfuerzos máximos y deformación por segmentos*

Segmento	Esfuerzos (MPa)			Deformaciones ( $10^{-3}$ mm)		
	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\tau$	X	Y	Z
Herramienta de corte	64.334	15.426	24.454	6.472		1.619
Porta herramienta	4.935	1.228	1.853	0.985		0.2463
Segmento de Mototool	0.0655	0.0127	0.0264	1.008		0.2521
Soporte de Mototool	0.1159	0.0128	0.0516		-0.1444	0.0113
Placa de duralón	0.929	0.036	0.446	444.93		1.007
Plato en V	0.277	0.0404	0.188		-0.2719	0.03949

El factor de seguridad del segmento de Herramienta de corte es el mínimo o más crítico por su reducida área donde se aplica los esfuerzos, con un valor de 6.45 se considera por lo que se considera apto el diseño con este punto de vista, la sumatoria de las deformaciones de la Tabla 1 en X es 0.453mm, en Y es  $-0.4163 \times 10^{-3}$  mm y en Z es  $3.175 \times 10^{-3}$  mm, debido a las deformaciones el desplazamiento en el extremo de la herramienta de corte será de 0.4534mm, el desplazamiento resultante es mucho mayor al esperado, para realizar operaciones de mecanizado este diseño será modificado, ya que produciría una gran variación a las medidas en el producto final, se debe hacer uso de un análisis de elementos finitos para comprobar estos resultados.

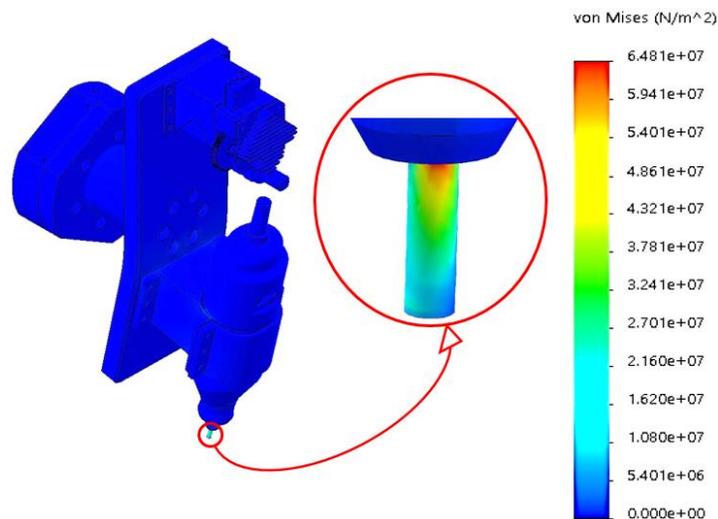
### G. Análisis y comprobación a través de un software CAE

Se realizó un análisis estático para estimar el comportamiento de las piezas sometidas a distintas cargas mediante herramientas computacionales las cuales desarrollan simulaciones mediante el

método de elementos finitos y a los resultados obtenidos se los compara con los valores hallados mediante las ecuaciones previas.

- **Esfuerzos máximos**

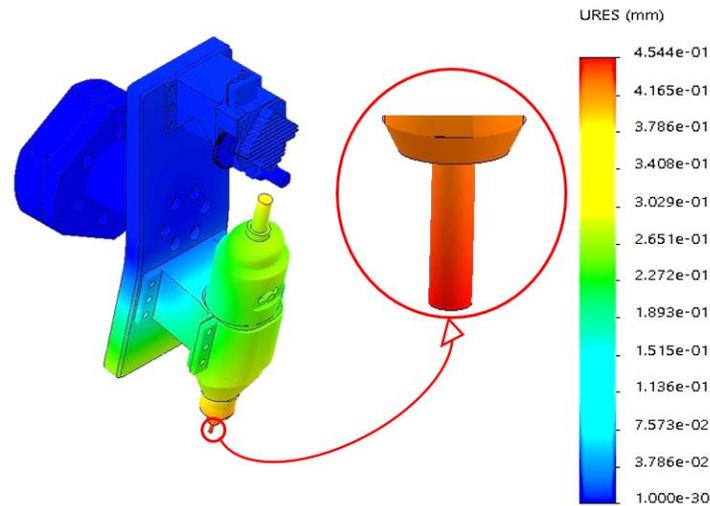
El mayor esfuerzo se produce en la herramienta de corte y de acuerdo a los cálculos se obtiene un valor de  $64.334\text{Mpa}$  que coincide con el análisis computacional, donde se muestra de color rojo equivalente a  $64.81\text{MPa}$  ver Figura 27.



*Figura 27.* Teoría de Von Mises primera propuesta

- **Desplazamientos resultantes**

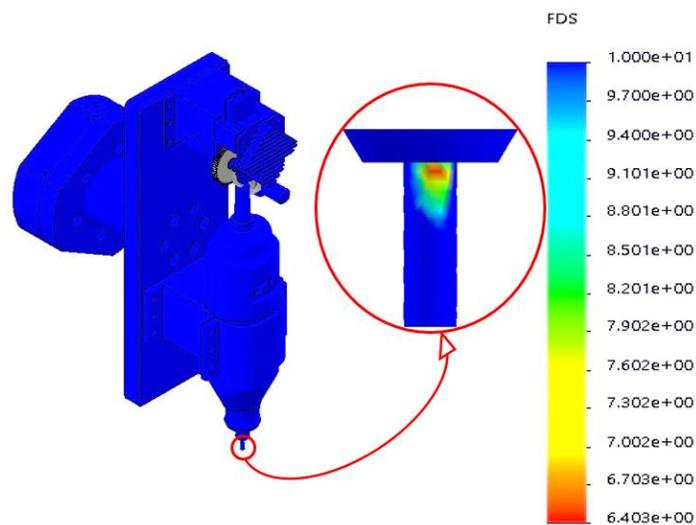
El mayor desplazamiento hallado mediante los cálculos realizados, se encuentra en la placa de duralón, y si esta llega a desplazarse lo hace de igual manera el soporte y el mototool el valor hallado es de aproximadamente  $0.4534\text{mm}$  y de acuerdo al código de colores se encuentra alrededor de  $0.4544\text{mm}$  como se observa en la Figura 28.



**Figura 28.** Desplazamientos resultantes primera propuesta

- **Factor de seguridad**

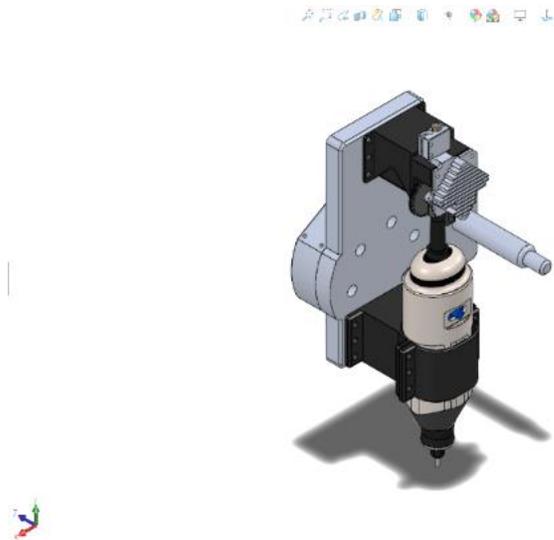
En los cálculos realizados se toma el valor del menor factor de seguridad, pues en ese punto podría llegar a fallar y este se produce en la herramienta del corte, donde  $N = 6.45$ , el cual es un valor aceptable y coincide con el color rojo equivalente a  $N = 6.403$  como se muestra en la Figura 29.



**Figura 29.** Factor de seguridad primera propuesta

## H. Mejora a la propuesta de diseño

Las mejoras realizadas en el diseño se basan en corregir el desplazamiento resultante en la herramienta por lo que se minimiza la vibración causada al momento de realizar el proceso de mecanizado, esto se logra al reducir la distancia entre la herramienta para el acabado y el plato en V. Se combinó el diseño del plato en V y la placa de duralón, también se cambió el material a un aluminio 6061 T4 por lo que se logra un diseño más compacto y resistente a la flexión generada por el proceso de mecanizar como se observa en la Figura 30.



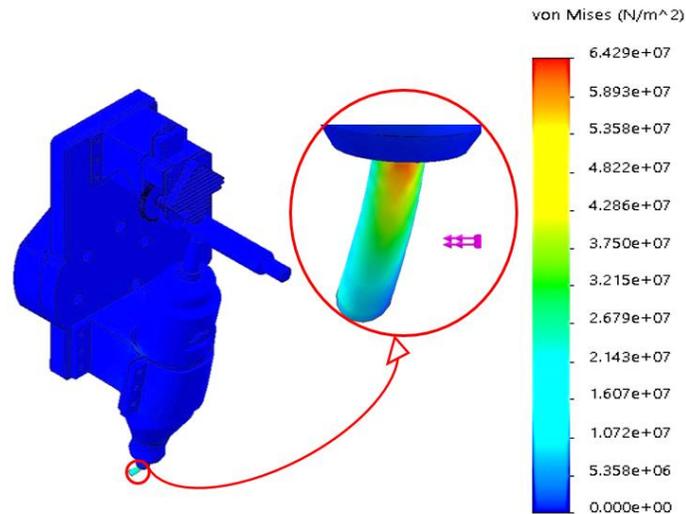
*Figura 30.* Segunda propuesta de diseño

### 2.1.3. Validación del diseño

#### A. Esfuerzos máximos

En el siguiente diseño modificado no se alteró la herramienta de corte por lo que el mayor esfuerzo producido aún sigue generándose en esta sección, acorde con los cálculos realizados se obtuvo un valor de 64.334MPa el cual coincide con el análisis computacional, mismo que se puede

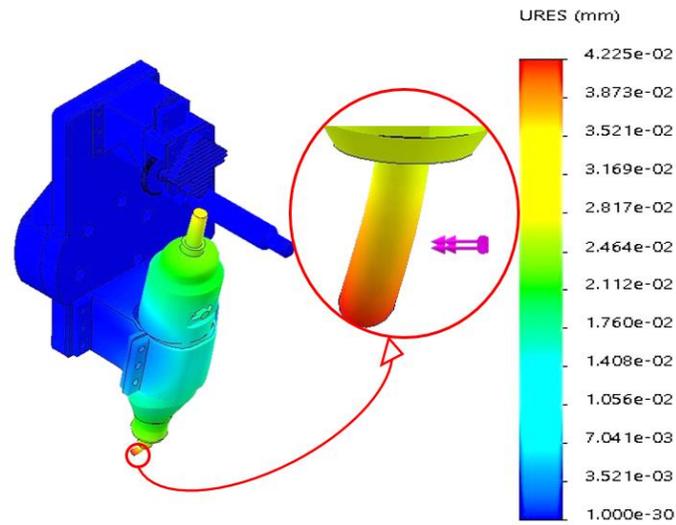
apreciar de mejor manera, representado de color rojo con un valor aproximado de 64.29MPa como de puede apreciar en la Figura 31.



*Figura 31.* Teoría de Von Mises segunda propuesta

## **B. Desplazamientos resultantes**

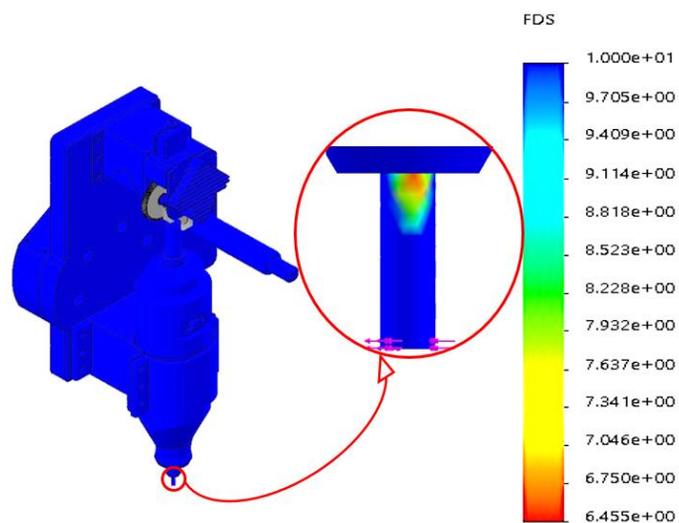
Al corregir el diseño se cambió el material del soporte a uno con mayor resistencia a la cedencia, en este caso se eligió el aluminio, asimismo se alteró la forma para producir menos momentos flectores. En el anterior diseño se obtuvo un desplazamiento resultante de 0.4534mm, en el actual análisis se comprobó que el desplazamiento producido por las fuerzas de corte es de 0.04225mm los cuales se pueden apreciar con el código de colores visibles en la Figura 32.



**Figura 32.** Desplazamientos resultantes segunda propuesta

### C. Factor de seguridad

El factor de seguridad más bajo es producido en la herramienta de corte con un valor de  $N=6.45$  que se puede observar en la Figura 33, ya que en este punto es donde también se encuentra el esfuerzo máximo, el valor calculado es muy aceptable el cual coincide con el análisis que da un valor de factor de seguridad mínimo de  $N=6.455$ .



**Figura 33.** Factor de seguridad segunda propuesta

## 2.1.4. Selección de componentes

La selección de los componentes se realiza al tomar en cuenta las alternativas existentes en el mercado, para ellos se utilizará una escala de ponderación (Tabla 2), esto ayudará a una correcta selección (Arturo Izurieta Valery, 1997).

**Tabla 2**

*Escala de ponderación*

Calificación	% del óptimo	Significado
0	<35	Insignificante
1	35-50	Satisfactorio
2	51-75	Bueno
3	76-89	Muy bueno
4	90-100	Óptimo

### A. Hotend

Es la parte final del extrusor que funde el filamento y lo coloca sobre la superficie de impresión para la realización de piezas 3D deseadas, se configura en base a tipo de boquilla, diámetro del filamento a fundir, tipo de material mediante este se puede conseguir piezas con diferente calidad y acabado, como se puede observar en la Tabla 3 (Filament2print, 2018).

**Tabla 3**

*Alternativas de hotend*

Alternativa 1 Hotend V6	Alternativa 2 Hotend lite6	Alternativa 3 Hotend Volcano
		
<b>Figura 34.</b> Hotend V6 Fuente: (E3D, 2018a)	<b>Figura 35.</b> Hotend Lite6 Fuete:(E3D, 2018b)	<b>Figura 36.</b> Hotend Volcano Fuente:(E3D, 2018c)
<b>Características</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Diseño totalmente metálico</li> <li>• Desempeño hasta los 400°C</li> <li>• Compacto</li> </ul>	<b>Características</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Desempeño hasta los 240°C</li> <li>• Velocidad de uso medio 20-50 mm/s</li> </ul>	<b>Características</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Diseño totalmente metálico</li> <li>• Velocidad más alta</li> <li>• Aguda transición térmica</li> </ul>

CONTINÚA 

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fácil de usar</li> <li>• Aguda transición térmica</li> <li>• Adaptable</li> <li>• Soporte técnico</li> <li>• Velocidades altas 20-100mm/s(E3D, 2018a).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cuerpo metálico(E3D, 2018b).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mejor tasa de fusión</li> <li>• Adaptable</li> <li>• Altura de capa más grande</li> <li>• Capacidad de objetos más grandes (E3D, 2018c).</li> </ul>
--	--	--

### Criterio de selección del hotend

En base a los siguientes parámetros se procederá a la selección del hotend más adecuado para la fusión adecuada del material:

- Velocidad de deposición
- Tasa de fusión del material
- Altura de capa
- Material totalmente metálico
- Adaptable
- Transición térmica

### Selección de la mejor alternativa del hotend

**Tabla 4**

*Valoración de las alternativas del hotend*

Parámetros	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Velocidad de deposición	2	3	4
Tasa de fusión del material	2	3	4
Altura de capa	3	3	4
Material totalmente metálico	4	4	4
Adaptable	4	4	4
Transición térmica	2	3	4
TOTAL	17	20	24

La alternativa 3 de la Tabla 4, ofrece una mejor fusión del filamento ya que tiene una mayor área calentada, por lo que se logra un gran control y estabilidad, gracias a esto se obtiene una impresión con diámetro de boquilla mayor a 1.2mm, piezas con mayor resistencia y rigidez.

## B. Extrusor

Su principal funcionamiento es arrastrar el filamento del material desde su almacenamiento hacia el hotend de forma precisa con una velocidad adecuada para la realización de la impresión 3D, para lo cual interviene motor de arrastre y ruedas dentadas, en la Tabla 5 se presenta diferentes alternativas (Filament2print, 2018).

**Tabla 5**  
*Alternativas de extrusor*

Alternativa 1 Titan	Alternativa 2 Titan Aero	Alternativa 3 FlexionHT
 <p><b>Figura 37.</b> Extrusor Titan Fuente: (Filament2Print, 2018a)</p>	 <p><b>Figura 38.</b> Extrusor Titan Aero Fuente: (Filament2Print, 2018b)</p>	 <p><b>Figura 39.</b> Extrusor FlexionHT Fuente: (Diabase Engineering LLC, 2018d)</p>
<p><b>Características</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Fácil mantenimiento</li> <li>• Sistema de engranajes Greg´s Wade´s</li> <li>• Compatible con hotend E3D Volcano</li> <li>• Fácil de cargar filamento</li> <li>• Compatible con cualquier material</li> <li>• Compacto y preciso</li> <li>• Relación de transmisión 3:1</li> </ul>	<p><b>Características</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Compatible con hotend E3D Volcano</li> <li>• Compatible con cualquier material</li> <li>• Calidad y aumenta precisión</li> <li>• Menor distancia en eje Z</li> <li>• Impresión continua después de paros y arranques a velocidades altas</li> </ul>	<p><b>Características</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mayor resolución</li> <li>• Menor fallos</li> <li>• Impresión a toda velocidad de filamento flexible</li> <li>• Impresión mejorada con PLA y ABS</li> <li>• Unidad de auto limpieza (Diabase Engineering LLC, 2018d).</li> </ul>

CONTINÚA 

(Filament2Print, 2018a)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Facilidad al cambio de filamento</li> <li>• Fácil mantenimiento (Filament2Print, 2018b)</li> </ul>
-------------------------	---

### Criterio de selección para el extrusor

En la selección del extrusor se tomarán en consideración algunos aspectos, los que permitirán obtener como resultado una impresión 3D precisa ejecutada a altas velocidades, para ello se analizará aspectos como:

- Compatible con hotend Volcano
- Precisión
- Compacto en eje Z
- Mantenimiento
- Apto para filamentos de distintos materiales
- Deposición continua

### Selección de la mejor alternativa del extrusor

**Tabla 6**

*Valoración de las alternativas del extrusor*

Parámetros	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Compatible con hotend Volcano	4	4	2
Precisión	2	3	2
Compacto en eje Z	3	4	3
Mantenimiento	3	3	4
Apto para filamentos de distintos materiales	4	4	4
Deposición continua	3	4	4
TOTAL	19	22	19

Acorde a la selección de la mejor alternativa del mecanismo de extrusión, valorado en la Tabla 6, se opta por el extrusor Titan Aero ya que es compatible con el hotend Volcano y permite una impresión 3D más precisa, sensible y continua después de paros y arranques a altas velocidades, reduce el extrusor la flexión del filamento a niveles nulos y así logra impresiones mejores con los filamentos flexibles.

### C. Cama caliente

Es una superficie plana y nivelada donde se coloca el material fundido por el hotend, la misma que debe ser capaz de generar calor para que no exista una gran diferencia de temperatura con el filamento depositado y así lograr mayor adherencia y evitar el *warping*, se presenta las siguientes opciones (Tabla 7).

**Tabla 7**

*Alternativas de cama caliente*

Alternativa 1 Cama caliente MK2 21.5x21.5	Alternativa 2 Cama Caliente 300x200 MK3	Alternativa 3 Cama caliente 300x300 MK3
<p><b>Figura 40.</b> Cama caliente MK2 21.5x21.5cm Fuente:(Impresoras3D, 2019b)</p>	<p><b>Figura 41.</b> Cama Caliente 300x200 MK3 Fuente: (Orballo Printing, 2019)</p>	<p><b>Figura 42.</b> Cama caliente 300x300 MK3 Fuente:(Createc3D, 2019)</p>
<p><b>Características</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Tamaño total 215 x 215 mm</li> <li>Tamaño de impresión 20cm x 20cm</li> <li>1 ohm de resistencia</li> </ul>	<p><b>Características</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Tamaño total 200x300 mm</li> <li>Imprime directamente sin necesidad de cristal</li> <li>Superficie anti-<i>warping</i> PEI</li> </ul>	<p><b>Características</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Tamaño total 300x300 mm</li> <li>Imprime directamente sin necesidad de cristal</li> <li>Trabaja a 12V o 24V</li> </ul>

CONTINÚA 

---

• Calentamiento rápido (Impresoras3D, 2019b)	• 1.4 Ohm de resistencia (Orballo Printing, 2019)	• Superficie anti- <i>warping</i> PEI (Createc3D, 2019)
---	---	--

---

### Criterio de selección de la cama caliente

Para la selección de la cama caliente se debe tomar en cuenta los siguientes criterios:

- Disponibilidad en el mercado local
- Tamaño
- Facilidad de impresión
- Superficie anti-*warping*
- Tensión de trabajo

### Selección de la mejor cama caliente

**Tabla 8**

*Valoración de las alternativas de la cama caliente*

Parámetros	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Disponibilidad	4	3	3
Tamaño	2	3	4
Facilidad de impresión	2	4	4
Anti- <i>warping</i>	3	4	4
Tensión de trabajo	4	4	4
TOTAL	15	18	19

La alternativa 3 de la superficie de impresión (ver Tabla 8), ofrece grandes beneficios como son la posibilidad muy baja de generar el *warping*, asimismo tiene un área de impresión muy amplia, se considera el área de trabajo que tiene el brazo robótico para lo cual es factible el uso de varias camas de 300x300mm, de esta forma se ocupa de forma eficiente el espacio.

## D. Materiales para el sistema de impresión 3D

Existe una gran variedad de materiales compatibles utilizados en la deposición de material fundido (Tabla 9), estos pueden ser polímeros termoplásticos, policarbonato y filamentos compuestos basados en metal, piedra, madera. Estos materiales aportan propiedades mecánicas a la pieza prototipada, tanto el ABS como el PLA son filamentos usado por el 95% de usuarios de impresoras 3D, aunque existen materiales compuestos que se usan en menor frecuencia (Susana Sánchez Restrepo, 2017).

**Tabla 9**  
*Alternativas de material*

Alternativa 1 ABS	Alternativa 2 PLA	Alternativa 3 PLA con fibra de carbono
 <p><b>Figura 43.</b> ABS Fuente: (Pixel Sistemas, 2018)</p>	 <p><b>Figura 44.</b> PLA Fuente: (Impresoras3D, 2017b)</p>	 <p><b>Figura 45.</b> Pla con fibra de carbono Fuente: (Impresoras3D, 2017a)</p>
<p><b>Características</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Punto de fusión alto</li> <li>• Extrusión aproximadamente 240 grados</li> <li>• Uso de cama caliente</li> <li>• Desprende gases</li> <li>• Reciclable</li> <li>• Fácil de mecanizar y con buen acabado</li> <li>• Apto para aplicaciones industriales (Impresoras 3D, 2017b)</li> </ul>	<p><b>Características</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• No resiste altas temperaturas</li> <li>• Extrusión aproximadamente 200 grados</li> <li>• Impresión sin base caliente</li> <li>• No emite gases</li> <li>• No reciclable</li> <li>• Postproceso muy complicado</li> <li>• Poco utilizado en la industria (Impresoras 3D, 2017b)</li> </ul>	<p><b>Características</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Punto de fusión alto</li> <li>• Extrusión aproximadamente 240-265°C</li> <li>• No necesita cama caliente</li> <li>• No desprende gases</li> <li>• Temperatura de transición vítrea +- 85°C</li> <li>• Gran adhesión entre capas</li> <li>• Apto para aplicaciones industriales (Impresoras3D, 2017a)</li> </ul>

### Criterio de selección del material

En base a los siguientes parámetros se procederá a la selección del material más adecuado para el estudio de las propiedades:

- Resistencia a altas temperaturas
- Uso de cama caliente
- Emisión de gases
- Postproceso
- Uso en la industria
- Reciclable

### Selección de la mejor alternativa del material

**Tabla 10**

*Valoración de las alternativas de material*

<b>Parámetros</b>	<b>Alternativa 1</b>	<b>Alternativa 2</b>	<b>Alternativa 3</b>
Resistencia a altas temperaturas	3	3	4
Uso de cama caliente	2	3	3
Emisión de gases	1	2	2
Postproceso	3	2	4
Uso en la industria	4	3	4
Facilidad de impresión	2	4	4
<b>TOTAL</b>	15	17	<b>21</b>

Con la valorización realizada en la Tabla 10, la alternativa 3, es la mejor opción, elegida por su facilidad de impresión, su fácil manejo de material en una etapa de postproceso y uso tanto en la industria como didácticamente, por lo tanto, el PLA con fibra de carbono será el Material a utilizar.

## E. Mototool

Es una herramienta rotativa cuya finalidad es la de cortar, tallar, pulir y dar el acabado a diversos materiales (Hyper Mods, 2018), existen diferentes marcas con características y cualidades variadas, como se muestra en la Tabla 11.

**Tabla 11**

*Alternativa de mototool*

Alternativa 1 Mototool Dremel 3000	Alternativa 2 Mototool Toolcraft	Alternativa 3 Mototool Total
		
<p><b>Figura 46.</b> Dremel 3000 Fuente:(Dremel, 2019)</p>	<p><b>Figura 47.</b> Mototool Toolcraft Fuente:(Tolcraft, 2018)</p>	<p><b>Figura 48.</b> Mototool Total Fuente: (Total, 2018)</p>
<p><b>Características</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ergonómico</li> <li>• Velocidad de 5000 hasta 35000 RPM</li> <li>• Voltaje 120 V C</li> <li>• Frecuencia 60 Hz</li> <li>• Amperaje 1.2 A</li> <li>• Potencia 130W(Dremel, 2019)</li> </ul>	<p><b>Características</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 1/8 de broquero</li> <li>• Potencia 135 W</li> <li>• Velocidad regulable de 15000 a 35000 RPM (Tolcraft, 2018)</li> </ul>	<p><b>Características</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Voltaje 110-120 60 Hz</li> <li>• Velocidad variable de 10000 a 32000RPM</li> <li>• Potencia 130W</li> <li>• Broquero 1/8(Total, 2018)</li> </ul>

### Criterio de selección de mototool

De acuerdo a la velocidad necesaria para mecanizar termoplásticos se tomará los siguientes parámetros de referencia:

- Voltaje
- Tamaño del broquero
- Potencia

- Velocidad
- Ergonómico

### Selección del mejor mototool

**Tabla 12**

*Valoración de las alternativas del Mototool*

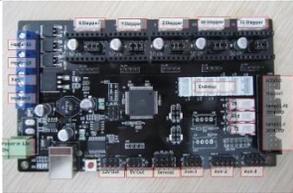
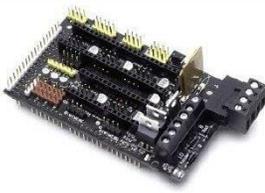
Parámetros	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Voltaje	4	4	4
Tamaño del broquero	4	4	4
Potencia	4	3	3
Velocidad	4	3	4
Ergonómico	4	3	3
TOTAL	20	17	18

De acuerdo al resultado final de la suma de cada valoración de los parámetros (Tabla 12) se obtiene que la alternativa 1 es la más adecuada según a su velocidad, pues este está en el rango necesario para mecanizar termoplásticos, este parámetro es la principal discriminante para la elección del mototool, al igual que la potencia comercial, pues es la más cercana a la calculada en la Ecuación 13 que es igual a 101.92 W.

### F. Tarjeta de control para el sistema de impresión 3D

El control tradicional de los componentes se realiza a través de dispositivos electrónicos llamados “todo en uno” los cuales integran en una placa diferentes drivers tanto de motores, sensores de temperatura entre otros además estos son compatibles con Arduino, se muestra diferentes opciones en la Tabla 13.

**Tabla 13**  
*Alternativa de la Tarjeta de control para impresión 3D*

Alternativa 1 MKS GEN	Alternativa 2 Ramps 1.4	Alternativa 3 Rambo
		
<i>Figura 49.</i> MKS GEN Fuente: (RepRap, 2018b)	<i>Figura 50.</i> RAMPS 1.4 Fuente: (Impresoras3D, 2019 <sup>a</sup> )	<i>Figura 51.</i> RAMBO Fuente: (RepRap, 2018 <sup>a</sup> )
Características	Características	Características
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fuente de alimentación de 12-24V</li> <li>• Tiene procesadores Atmega2560 y FT232 compatibles con Arduino</li> <li>• Firmware compatible para Ramps 1.4</li> <li>• Conector de display y SD Card</li> <li>• Controladores de 5 motores</li> <li>• Pines para tres sensores de temperatura</li> <li>• Protección contra cortocircuitos(RepRap, 2018b)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bajo costo</li> <li>• Compatible con Arduino mega 2560 y Pololu</li> <li>• Salidas de potencia protegidas</li> <li>• Permite doble extrusor</li> <li>• Conexión a LCD</li> <li>• Drivers para 5 motores Pololu</li> <li>• Pines para 3 termistores (Impresoras3D, 2019<sup>a</sup>)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Los procesadores Atmega2560 y Atmega32u2 compatibles con Arduino MEGA</li> <li>• Compatible con Firmware RAMPS</li> <li>• 4 pines para termistor</li> <li>• 5 controladores para motores</li> <li>• Puntos de pruebas para señales</li> <li>• Alta capacidad y alta temperatura(RepRap, 2018<sup>a</sup>)</li> </ul>

### **Criterio para la selección de la tarjeta de control**

De acuerdo al microcontrolador utilizado se tiene los siguientes parámetros para la selección de la tarjeta de control como son:

- Tipo de procesador
- Costo de tarjeta
- Firmware compatible

- Cantidad de pines de termistor
- Cantidad de controladores de motor
- Tamaño

### Selección de la mejor alternativa

**Tabla 14**

*Valoración de las alternativas de las tarjetas de control*

Parámetros	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Tipo de procesador	4	4	4
Costo	3	2	1
Firmware	4	4	4
Pines de termistor	3	3	4
Cantidad de controladores de motor	4	4	4
Tamaño	4	3	2
Total	22	20	19

En la suma de la Tabla 14 se ve reflejado que la alternativa 1 tarjeta MKS GEN es la mejor opción por lo que se toma como principal discriminante el costo de la tarjeta, su afinidad con Arduino y el Firmware RAMPS, parámetros necesarios para que exista compatibilidad entre componentes.

### G. Software especializado de conversión a KRL

Existen diferentes opciones de software especializado como se muestra en la Tabla 15.

**Tabla 15***Alternativas del software especializado*

Alternativa 1. KUKA Prc	Alternativa 2. KUKA Sim pro	Alternativa 3. Robotmaster
 <p><b>Figura 52.</b> KUKA Prc Fuente:(Robots in Architecture, 2019)</p>	 <p><b>Figura 53.</b> KUKA Sim Pro Fuente: (KUKA, 2019)</p>	 <p><b>Figura 54.</b> Robotmaster Fuente: (Robotmaster, 2019)</p>
Características:	Características	Características
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Plugin instalable en Rhinoceros</li> <li>• Lenguaje de programación visual</li> <li>• Permite construcción de generadores de código</li> <li>• Permite 67mporter códigos G(<b>Robots in Architecture, 2019</b>)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Licencia valida en los equipos del laboratorio de robótica industrial</li> <li>• Capacidad para realizar varias aplicaciones con el mismo software</li> <li>• Control de colisiones</li> <li>• Diversos procesos de fabricación</li> <li>• Importa códigos G, NC y TXT</li> <li>• Generación de lenguaje KRL (KUKA, 2019)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Genera trayectorias libres</li> <li>• Importa códigos G</li> <li>• Es un software licencia de costo alto</li> <li>• Compatible con KUKA(Robotmaster, 2019)</li> </ul>

**Criterio de selección del software**

De acuerdo a los parámetros siguientes se elegirá a la opción más adecuada para el proyecto:

- Compatible con KUKA
- Costo
- Compatibilidad con códigos G
- Dificultad de programación

## Selección de la mejor alternativa de software

**Tabla 16**

*Valoración de las alternativas del software especializado*

Parámetros	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Compatible con KUKA	4	4	4
Costo	3	3	1
Compatibilidad con códigos G	4	4	4
Dificultad de programación	3	3	3
Total	14	14	12

De acuerdo a la valoración (Tabla 16), se tiene que la primera opción es la más adecuada y como factor importante para la elección es su compatibilidad entre programas y la lectura de códigos de impresión en mecanizado en un solo complemento.

### H. Software de impresión 3D

Existen distintos softwares de impresión (Ver Tabla 17), sus características y capacidades se detallan a continuación:

**Tabla 17**

*Alternativas del software de impresión 3D*

Alternativa 1. SLIC3R	Alternativa 2 Ultimaker Cura	Alternativa 3. Simplify3d
 <p><b>Figura 55.</b> Slic3r Fuente: (Slic3r, 2019)</p>	 <p><b>Figura 56.</b> Ultimaker Cura Fuente: (Ultimaker Cura, 2019)</p>	 <p><b>Figura 57.</b> Simplify Fuente: (Simplify3D, 2019)</p>
<p><b>Características</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Convierte tus modelos 3D a códigos G</li> <li>• Gestión avanzada de la configuración</li> <li>• Código abierto</li> <li>• Soporte para extrusoras duales (Slic3r, 2019)</li> </ul>	<p><b>Características</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Código abierto</li> <li>• Modo recomendado y modo personalizado</li> <li>• Configuración de hardware y material</li> <li>• Trabajo en línea a través de Cura connect</li> <li>• Compatibilidad con varios formatos de archivo (Ultimaker Cura, 2019)</li> </ul>	<p><b>Características</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Compatible con cientos de impresoras 3D</li> <li>• Recursos en línea y de soporte</li> <li>• Software de paga</li> <li>• Asesoramiento profesional a tiempo completo</li> <li>• Mejoras y actualizaciones (Simplify3D, 2019)</li> </ul>

## Criterio de selección de software

Los parámetros que se analizarán para la elección del software de impresión 3D son los siguientes:

- Costo
- Compatibilidad entre equipos y materiales
- Capacidad de variabilidad de los parámetros
- Soporte y actualizaciones

## Selección de la mejor alternativa de software

**Tabla 18**

*Valoración de las alternativas del software de impresión 3D*

Parámetros	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Costo	4	4	1
Compatibilidad entre equipos y materiales	4	3	4
Capacidad de variabilidad de los parámetros	4	4	4
Soporte y actualizaciones	4	4	4
Total	16	15	13

De acuerdo a la valoración realizada en la Tabla 18, la mejor es la opción 1, con ayuda del análisis de los parámetros se tiene que el costo es la principal discriminante pues esta opción es un software de código abierto, sujeto a actualizaciones, compatibilidad con el software elegido en el literal G e interacción con los usuarios para el soporte.

## **CAPÍTULO III**

### **CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE IMPRESIÓN 3D Y MECANIZADO**

#### **3.1. Construcción de los componentes del sistema**

Este proyecto concatena a trabajos previos de titulación como “Diseño y construcción de un cambiador automático para tres herramientas del brazo robótico KUKA KR 16-2 en el laboratorio de Robótica Industrial de la ESPE-L”, del cual se toma el plato tool y el disco de seguridad para acoplarlo al plato master ubicado en la muñeca del brazo robótico.

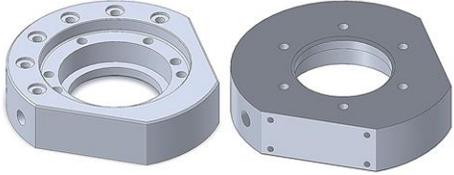
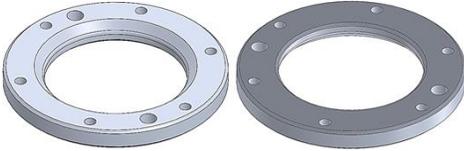
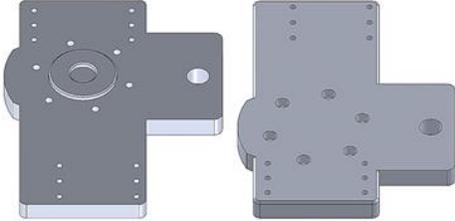
##### **3.1.1. Manufactura de las piezas**

Para la fabricación de cada una de las piezas a utilizar, se va a intercalar entre diferentes técnicas de manufactura de acuerdo al análisis en la sección 2.1.2 Análisis del diseño.

##### **A. Manufactura sustractiva: Mecanizado**

Por la geometría y sobre todo la precisión para cumplir las especificaciones de tolerancias de estas piezas se utilizará un centro de mecanizado CNC, para realizar procesos como planeado, perfilado, vaciado, taladrado y roscado en la fabricación del plato tool, plato en v y disco de seguridad, en la Tabla 19 se especifica el nombre, material, modelado 3D y anexos de planos y hojas de procesos, cabe destacar que la generación de las láminas se realizó a través de Solid Works.

**Tabla 19**  
*Piezas a mecanizar*

Nombre de la pieza	Material	Modelado 3D	Anexo	
			Plano	Hoja de procesos
Plato Tool	Aluminio 6061 T-6		A-04	B-01
Disco de seguridad	Aluminio 6061 T-6		A-03	B-02
Plato en V	Aluminio 6061 T-6		A-05	B-03

Después de realizar el mecanizado, a cada pieza se la limpia de cualquier residuo o grasa, se le aplica una capa de pintura naranja para obtener un acabado similar al del brazo robótico como se observan en la Figura 58.



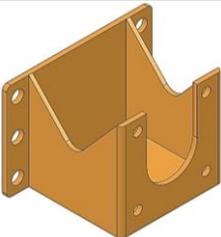
**Figura 58.** Elementos mecanizados

## B. Manufactura aditiva: Impresión 3D

Debido a su bajo costo, al tiempo que demora su fabricación y sobre por todo por su peso, que está relacionado con el material que usan las impresoras 3D, se opta por este tipo de manufactura para el soporte mototool, la tapa del soporte mototool, el soporte motor Nema 17 y el soporte ventilador.

La Tabla 20 muestra el nombre de las piezas, material que se utilizará y el modelado 3D, en cambio, otras características relevantes como su construcción se detallan en los anexos tanto en los planos como en las hojas de mecanizado.

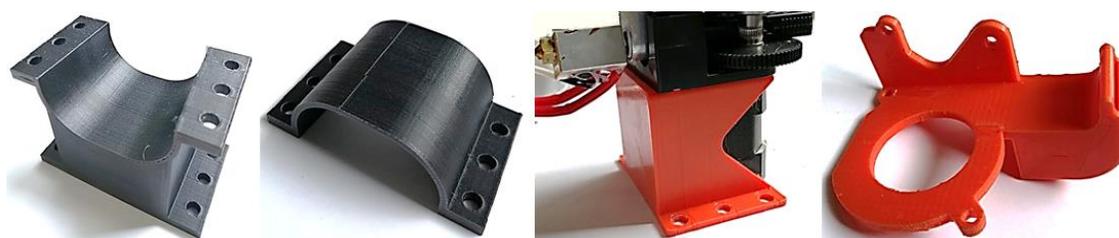
**Tabla 20**  
*Piezas a prototipar*

Nombre de la pieza	Material	Modelado 3D	Anexo	
			Plano	Hoja de procesos
Soporte mototool	Pla con fibra de carbono		A-09	B-04
Tapa del soporte mototool	Pla con fibra de carbono		A-10	B-05
Soporte motor Nema 17	Pla		A-06	B-06

CONTINÚA 

Soporte del ventilador	Pla		A-07	B-07
------------------------	-----	---	------	------

Las piezas realizadas por impresión 3D se muestran a continuación en la Figura 59 se enfatiza la diferencia de color debido al material que se utilizó.

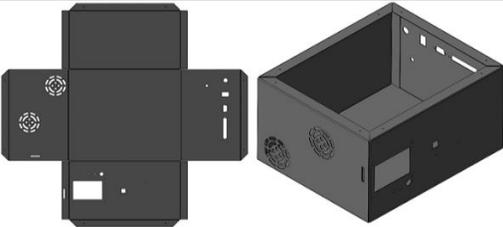


**Figura 59.** Elementos prototipados

### C. Construcción de la caja de control

La caja de control tiene la función de contener los componentes electrónicos y de potencia, indispensables para implementar el sistema de control, que están detallado en el anexo C, además de ser el enlace de comunicación con el KRC2, su diseño posee el espacio necesario para albergar todos estos elementos, de manera compacta y atractiva para el usuario, en la Tabla 21 se especifica el nombre, material, modelado 3D, anexos del plano y las hojas de procesos.

**Tabla 21**  
*Construcción de caja de control*

Nombre de la pieza	Material	Modelado 3D	Anexo	
			Plano	Hoja de procesos
Caja de control	Tol 1mm		A-11	B-08 B-09 B-10

La Figura 60 muestra la caja de control después de ser cortada, doblada, soldada, pintada para un mejor acabado y se colocó los elementos que ésta contiene como: las fuentes de poder, la tarjeta MKS GEN, Mosfets de potencia y todos los drivers necesarios para que opere con normalidad.



*Figura 60.* Caja de control

### 3.2. Ensamble de los componentes

#### 3.2.1. Ensamble del plato tool y disco de seguridad

El plato tool consta de un orificio central para el acople del anillo de seguridad, este sirve como pista de rodamientos, sujeción y alineación con el pin del plato master.

### 3.2.2. Ensamble del plato en V

El plato en V consta de una guía para centrarse con el plato tool, este se sujeta a través de pernos de cabeza allen que van desde la placa del plato en V hasta el disco de seguridad, esto hace que se acoplen como si fueran una sola pieza.

### 3.2.3. Ensamble del ensamblaje del hotend y extrusor

Al motor Nema 17 se coloca el sistema de arrastre de filamento, es decir los engranes y el resorte de ajuste, se acopla al disipador de calor el bloque y la boquilla, también se instalan los ventiladores, que permiten el enfriamiento tanto del disipador de calor como del filamento depositado.

### 3.2.4. Ensamble de la herramienta

Para acoplar los elementos en el plato en V, se sujetan mediante pernos de cabeza tipo allen, estos fijan al motor Nema 17 y el sistema de arrastre de filamento al plato en V mediante el soporte Nema17, esta situación se repite al asegurar el mototool, además tienen la función de no permitir la vibración excesiva y logra mantener cada pieza en su lugar.

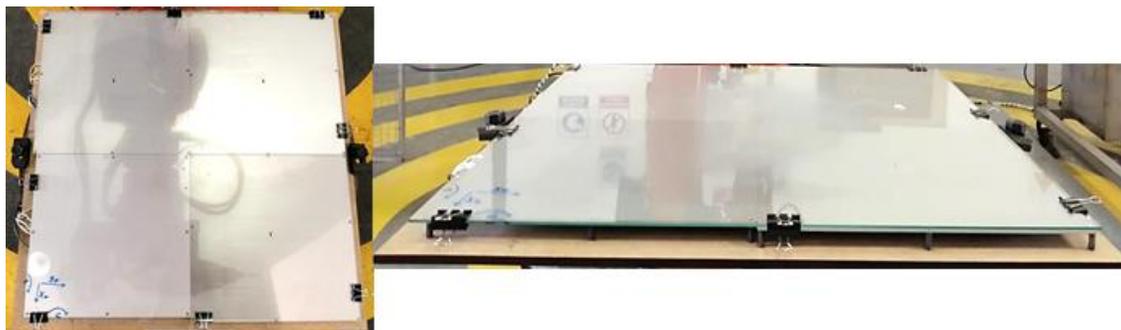
La Figura 61 muestra una vista general de la herramienta y la ubicación de sus componentes, ya sean los platos, soportes y tapas al igual que los elementos de sujeción.



**Figura 61.** Ensamble de la herramienta

### 3.2.5. Montaje del mecanismo de la cama caliente

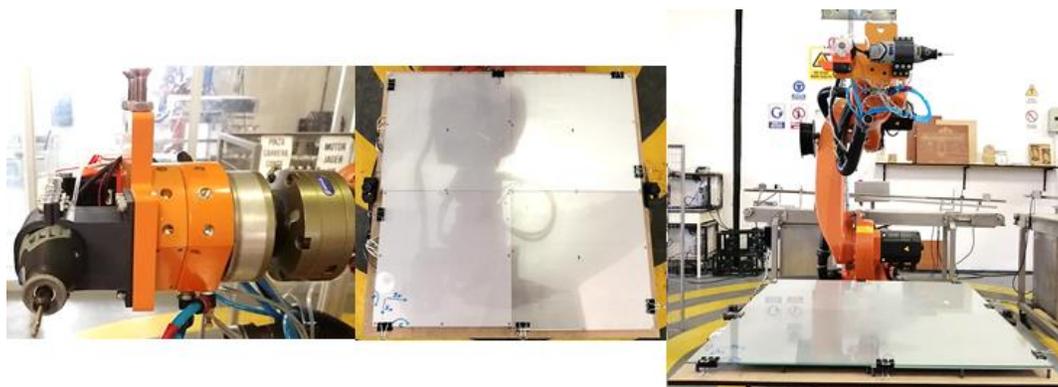
Las camas se predisposieron de tal manera que, cada una esté unida a la otra por medio de un sistema tornillo-resorte que permita nivelar a las camas individualmente, además consta de un vidrio para crear una superficie totalmente plana, como se muestra en la Figura 62.



*Figura 62.* Montaje de la cama caliente

### 3.3. Instalación del sistema

La caja de control se encuentra ubicada sobre el armario de control KRC2, la herramienta se acopla al brazo robótico mediante el sistema de acople entre el plato tool y el plato master, esto se logra por medio de la activación de la válvula solenoide encargada en el cambio de herramientas, las camas se sujetan a la mesa de trabajo por bridas (ver Figura 63).



*Figura 63.* Ensamble del sistema

### **3.4.Instalación del sistema eléctrico**

Gracias al aporte de proyectos anteriores realizados en la celda N°2, se encuentran ubicadas las canaletas que son utilizadas para el guiado de cables entre el brazo robótico y el armario de control KRC2, por consiguiente, se hizo uso de estas instalaciones y se etiquetó los cables empleados, para que en caso de avería se pueda solucionar mucho más rápido.

Para lograr que el proyecto en curso sea totalmente modular, se usó conectores DB, ubicados en puntos estratégicos como: en el muño del brazo robótico, en la mesa multitareas, al final de la canaleta y un último que sale del KRC2, la distribución de pines se encuentra detallada en los anexos C-05, C-06, C-07, y C-08 respectivamente.

### **3.5.Implementación del sistema de control**

La tarjeta MKS GEN tiene todos los pines necesarios de control y drivers para el manejo de toda la electrónica imprescindibles para el proyecto.

Se destaca la conexión de las camas calientes, con el mosfet de control, el extrusor y los ventiladores, el motor paso a paso encargado de la distribución del filamento, la activación de los finales de carrera, el pin de control y los sensores responsables de la temperatura del extrusor y la cama caliente, estos se detallan de manera más visual en los anexos C-01, C-02, C-03, C-04 y C-09.

Las camas calientes tienen una conexión individual a la fuente de alimentación y se realiza la comprobación de su temperatura a través del termistor y la señal que lo activa, es la señal en paralelo de los mosfet de control, la cual proviene de la tarjeta, el extrusor utiliza la misma forma de trabajo de las camas, pues tiene una niquelina y termistor controlado por la tarjeta.

Para que la tarjeta funcione adecuadamente necesita la señal de los finales de carrera, después de que el extrusor y las camas calientes lleguen a la temperatura adecuada de manejo, se programó a través del programa Slic3r que al cumplir con estas dos condiciones se mande un pulso por el auxiliar 2, el pin 44, a un relé de 5V a 24V, que activa la entrada digital 8 del módulo WAGO, la cual espera el brazo robótico en la zona de seguridad, el KRC2 al recibir la entrada digital 8, envía por medio de la salida digital 3 un pulso de respuesta a un relé industrial, que la tarjeta recibe como la señal de los finales de carrera y se sincroniza la extrusión del filamento con el movimiento del brazo robótico, se da lugar al proceso de impresión.

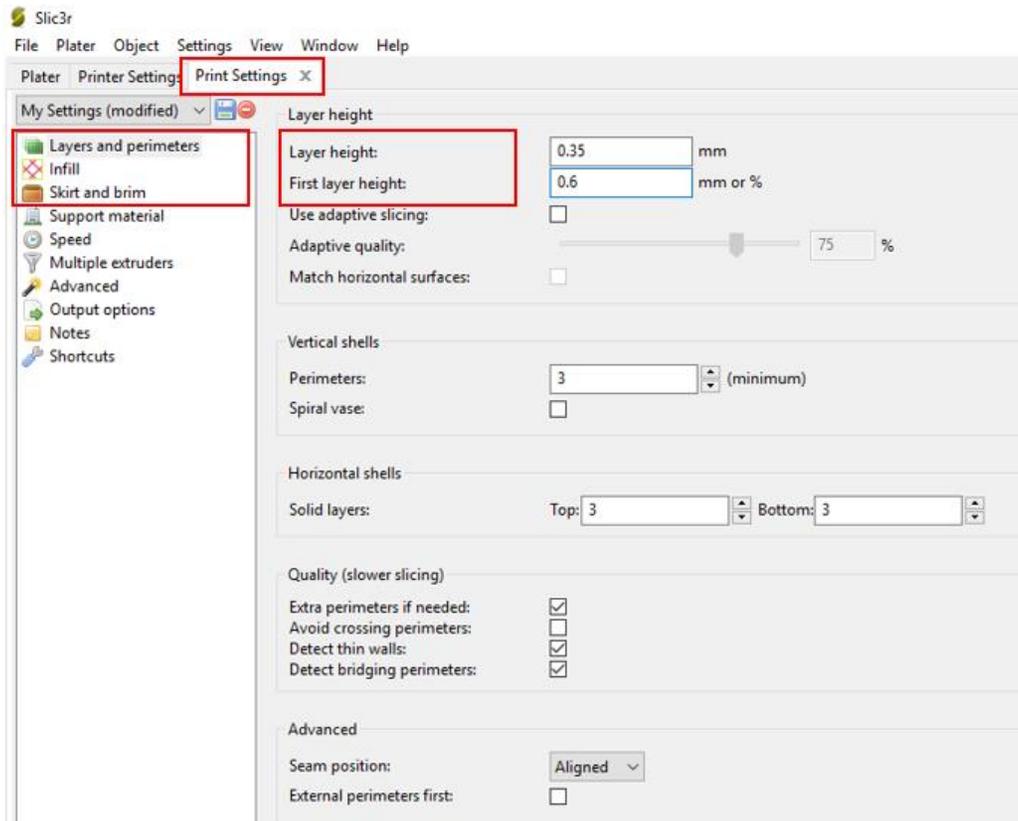
Después de efectuado el proceso de impresión, se realiza el cambio de herramienta para el mecanizado, se programó que después del intercambio de la herramienta se ubica en un punto seguridad, en esta posición el KRC2 manda un pulso a la salida digital 4 del módulo WAGO, el cual va a un relé industrial y prende el mototool.

### **3.6.Programación**

#### **3.6.1. Generar archivo de impresión 3D**

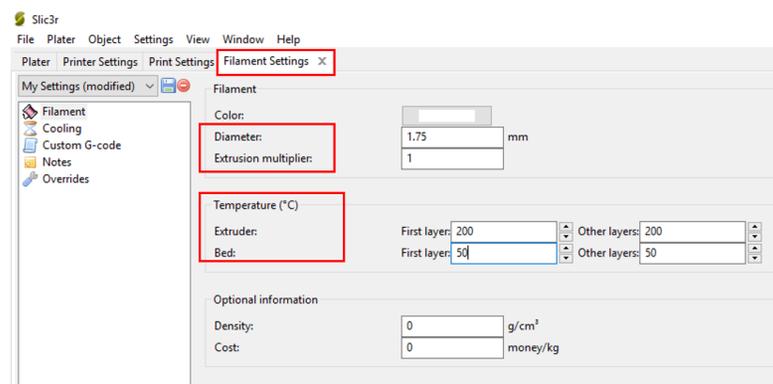
Para generar archivos de impresión 3D, se utiliza el software Slic3r, para lo cual se importan archivos \*.STL de la pieza a realizar el prototipado rápido, se toma en cuenta ciertos parámetros de configuración dentro del mismo, como, por ejemplo:

En la pestaña de configuración de impresión resalta la altura de capas, tipo y cantidad de relleno, falda, soporte y número de extrusores (Ver Figura 64).



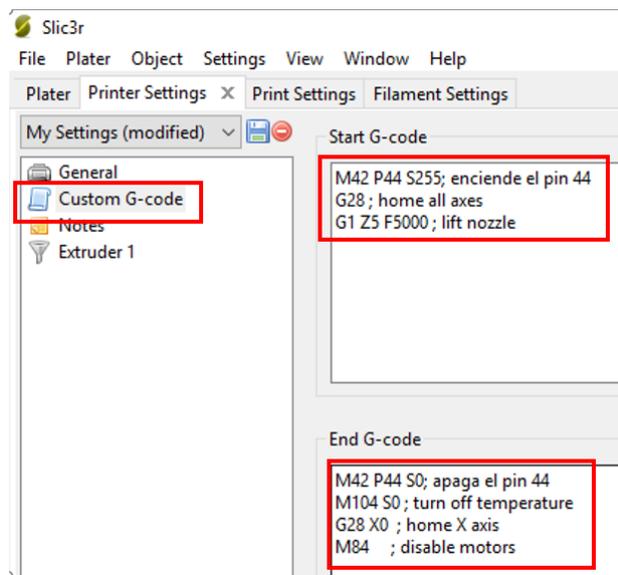
**Figura 64.** Configuración de impresión

La siguiente pestaña, de configuración de filamento, destaca con parámetros de configuración como: el diámetro del filamento empleado, el multiplicador de extrusión y la temperatura tanto del extrusor como de la cama caliente como se observa en la Figura 65.



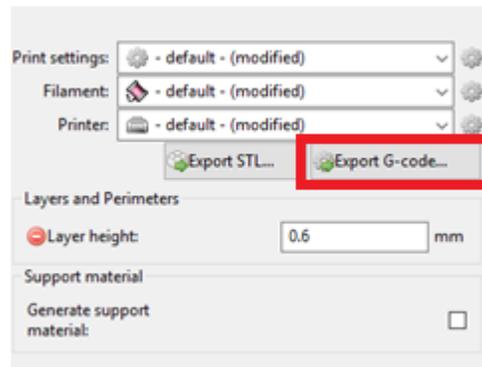
**Figura 65.** Configuración de filamento

En configuración de impresora, se permite el cambio de la forma y tamaño de la cama caliente al igual que, cambiar el centro de ésta, asimismo en el menú general la sección de avanzado, se debe activar las opciones de usar Set-and-wait tanto para la cama como para el extrusor. En la misma pestaña en el menú se selecciona personalizar G-code como se muestra en la Figura 66, en la sección de iniciar se agrega la línea M42 P44 S255, esto activa el pin 44 e indica que tanto la cama como el extrusor están listos para ser usados, al finalizar la impresión 3D se desactiva el pin se ingresa a la línea M42 P44 S0.



**Figura 66.** Configuración de impresora

Por último, para la obtención del archivo \*.gcode se lo hace en la pestaña Plater en la opción de Exportar G-code, una vez realizado todas las configuraciones necesarias, queda por escoger el lugar donde se desea guardar el archivo, tal como se muestra en la Figura 67.

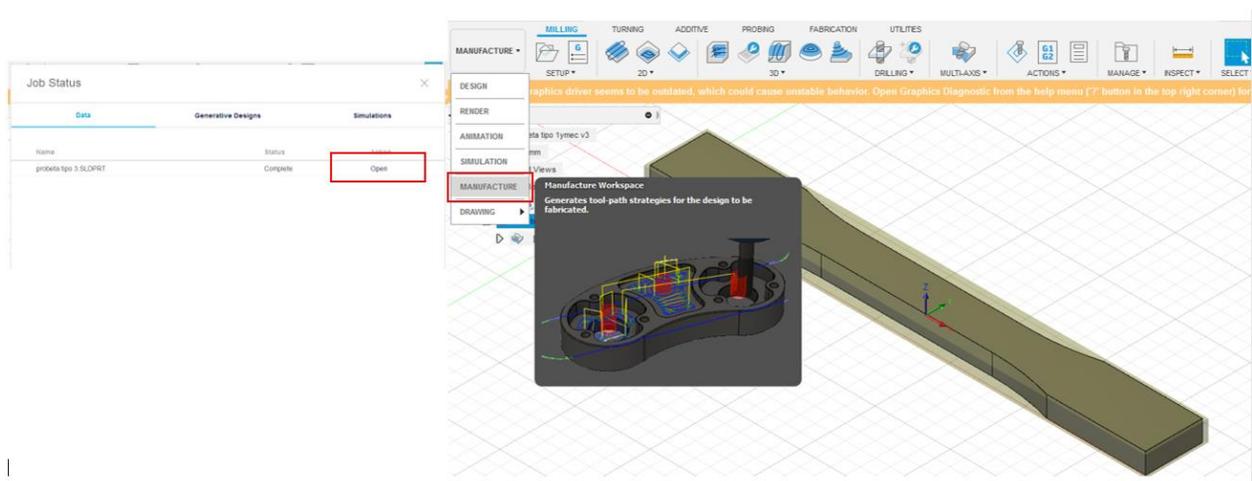


**Figura 67.** Exportar G-code

### 3.6.2. Generar archivo de Autodesk Fusion360

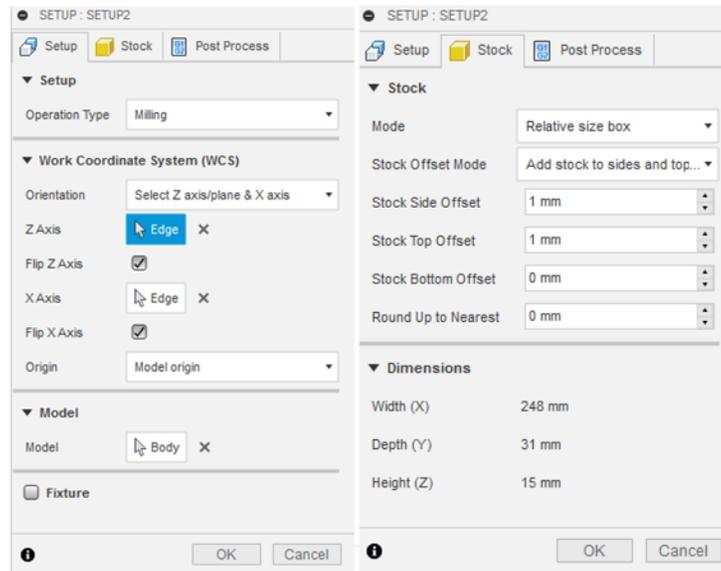
Mediante el software Autodesk Fusion360, se logra la generación del archivo de mecanizado .XML, al igual que en el caso anterior, se debe realizar las correctas configuraciones para no tener errores al momento de ejecutarlo.

Para iniciar, se debe cargar el modelo CAD en Autodesk Fusion360 y ubicarla según sea necesario, se procede a cambiar al modo de Manufactura, en la cual permitirá realizar diferentes procesos, adecuados para la realización de una pieza, como se puede apreciar en la Figura 68.



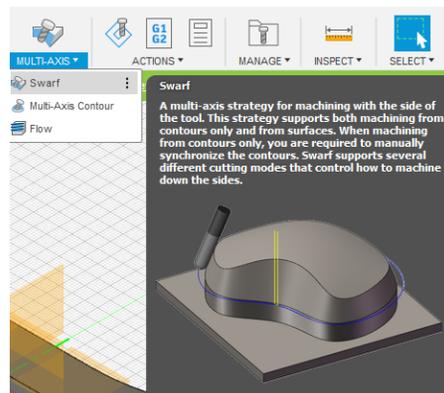
**Figura 68.** Cargar archivo CAD

A continuación, en la opción SETUP, colocar el origen de la pieza y la orientación de los ejes, de tal forma que coincida con la realidad, para evitar conflictos y colisiones, asimismo configurar el STOCK, como muestra la Figura 69.



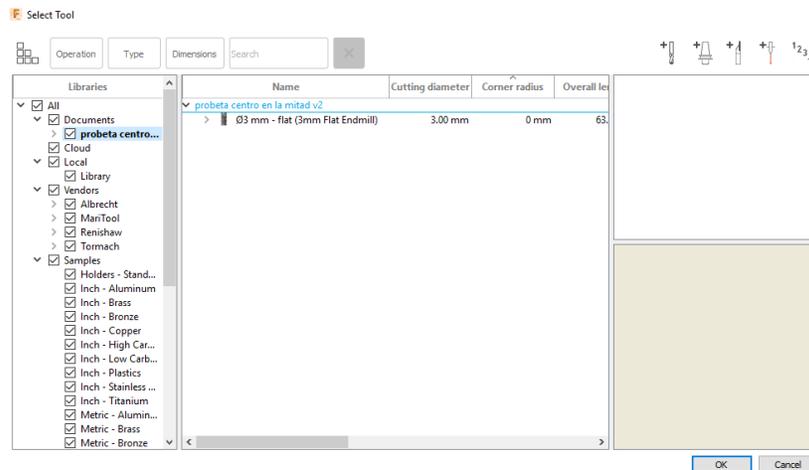
**Figura 69.** Configuración de SETUP

Seleccionar el SETUP creado, escoger la operación más conveniente, y la estrategia, esta debe ser adecuada a la pieza a mecanizar, en este caso se escoge SWART que es mecanizado multiejes (observar Figura 70).



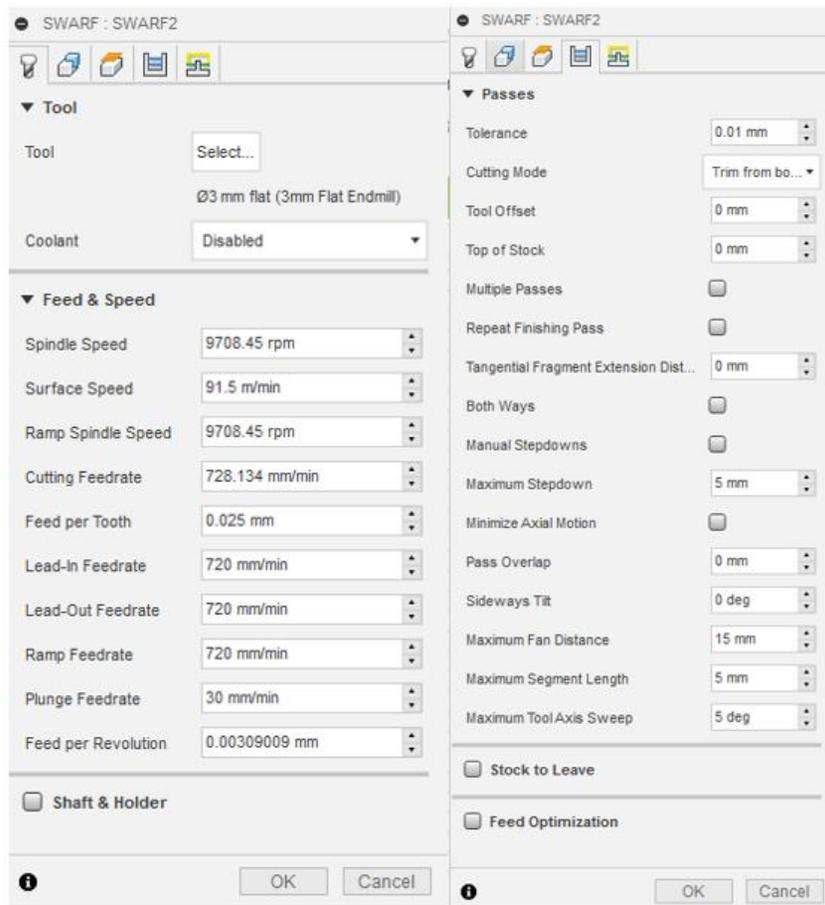
**Figura 70.** Selección multi-eje

Asimismo, cargar el tipo de herramienta y configurar sus dimensiones, hacer lo mismo con el porta-herramienta, en caso de no estar disponible en la biblioteca de Autodesk Fusion360, este permite crear uno nuevo a conveniencia, de acuerdo a la interfaz mostrada en la Figura 71.



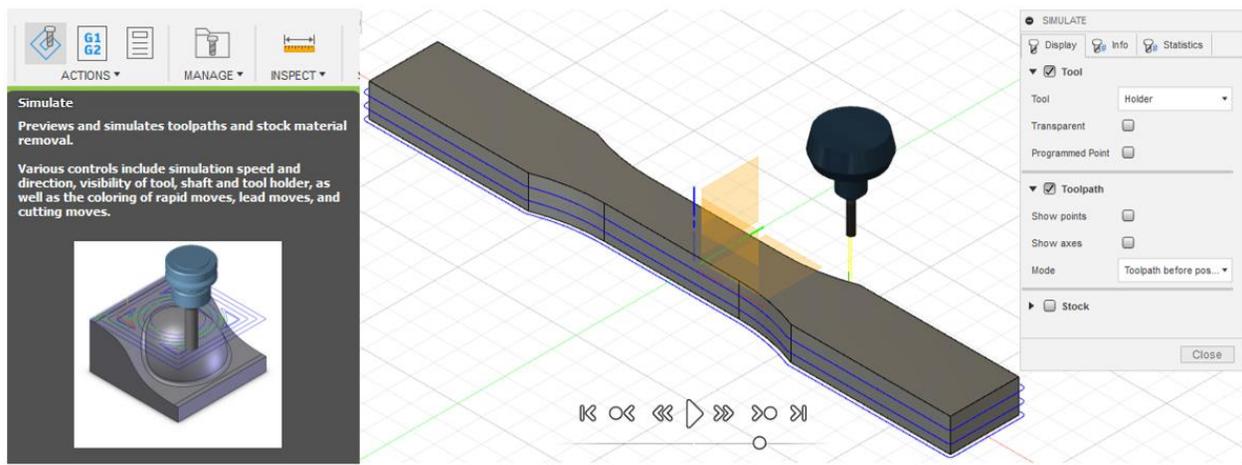
**Figura 71.** Configuración de herramienta

Con los cálculos realizados en la sección 2.1.1 Parámetros de diseño, se establece los parámetros de corte necesarios para el proceso, zona de seguridad, número de pasadas, los mismos que deberán ser cargados en el software, ver la Figura 72.



**Figura 72.** Cargar parámetros de corte

Se procede a seleccionar la opción Simular como se ve en la Figura 73, ubicada en el grupo Acción, con esto se puede apreciar las trayectorias de mecanizado e interpretar algún error.



**Figura 73.** Simulación del mecanizado

Una vez que todos los parámetros y trayectorias sean los adecuados, se procede a la generación del archivo .XML, en el grupo Acción, se selecciona Post-Procesador, se desplegará una ventana, en la cual se debe cargar previamente el post-procesador generado por el software KUKA|prc, por ultimo escoger la dirección de salida para guardar el archivo, mostrada en la Figura 74.

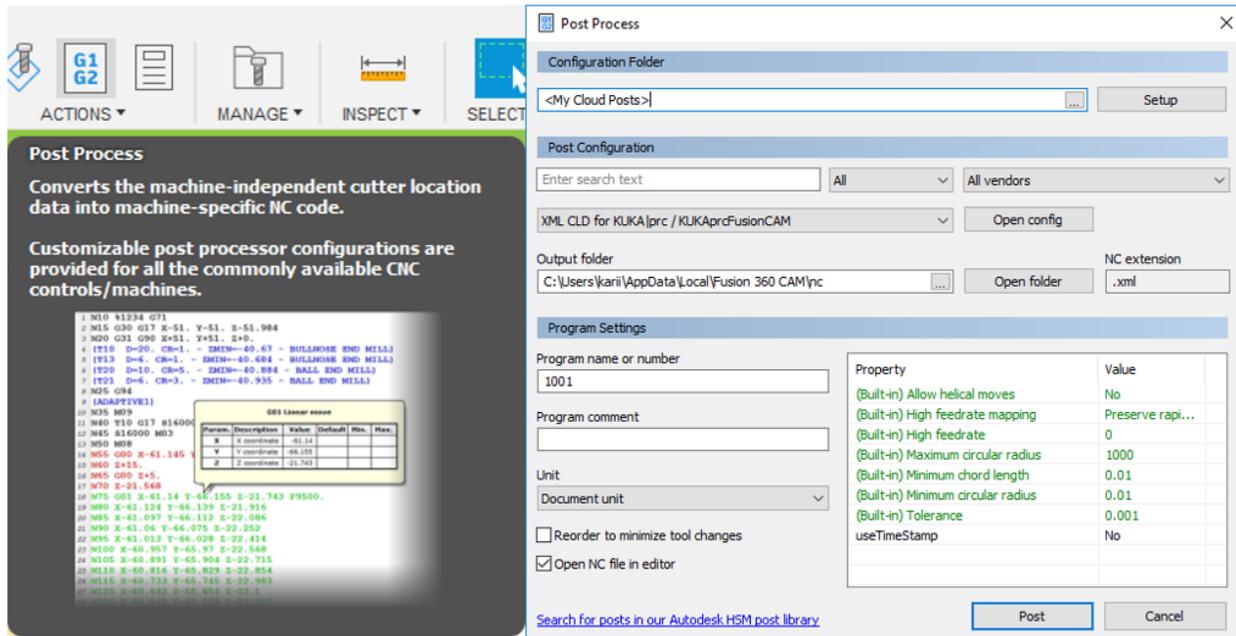


Figura 74. Post-procesado de archivo \*.XML

### 3.6.3. Programación KUKA|prc

Como se explicó en la sección 1.5.10 Software especializado se tiene un ejemplo y una explicación más clara acerca de lo que contiene los bloques aparte de un manejo geométrico y de proporciones también traslada datos, es así que si se desea mover el brazo robótico a un punto de manera manual se debe definir el valor de la velocidad y la aceleración de los ejes (\$VEL.CP=0.03), y se define una estructura en KRL en la cual debe constar: el tipo de movimiento, el nombre de la estructura, el tipo de datos y los valores de estos.

Por ejemplo, en el cambio de este código G

G1 X0 Y0 Z5 E0.646

G1: interpolación lineal al punto X, Y, Z (0,0,5) y extruir (E) 0.646 mm de filamento

A código KRL:

LIN {E6POS: X 0, Y 0, Z 5, A 0, B 90, C -90, E1 0.646, E2 0, E3 0, E4 0} C\_DIS, donde:

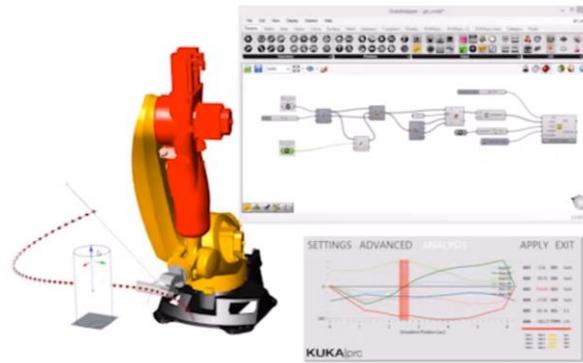
LIN= consigue un movimiento continuo y lineal.

E6POS= es una estructura que consta de los valores de posición en el espacio de un punto en coordenadas X, Y, Z (0, 0, 5) y la orientación de éstos en A, B, C (0, 90, -90) los valores de E1, E2, E3, E4 se definen como ejes externos, en este caso toma un valor para el extrusor.

C\_DIS= interpolación por distancia que sirve para el posicionamiento aproximado(KUKA Roboter GmbH, 2003).

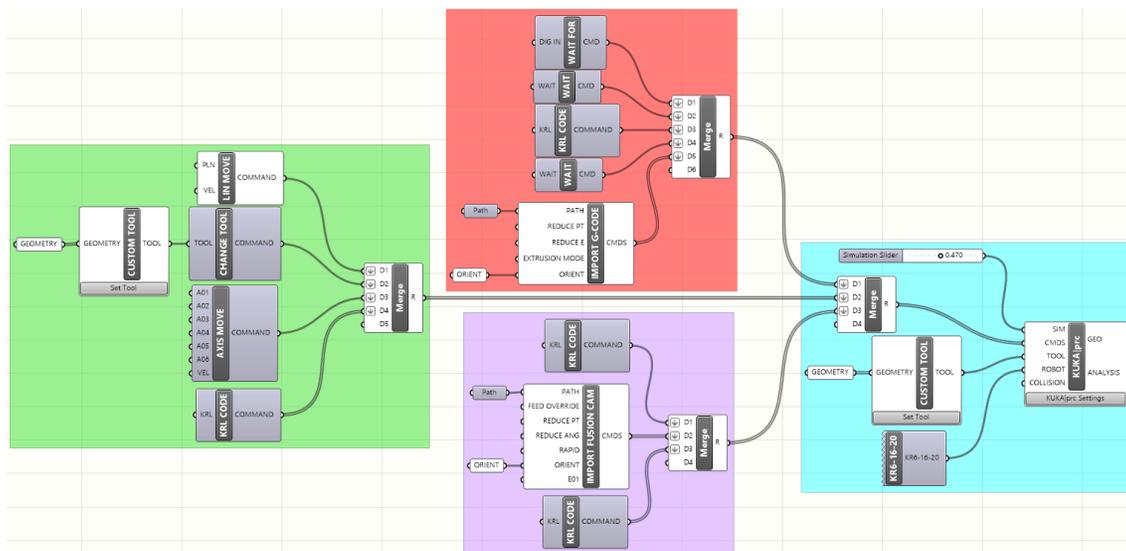
Se obtuvo a partir de la compra de una licencia estudiantil el complemento KUKA|PRC (Parametric Robot Control) con la duración de un año, está basado en la programación visual de Grasshopper, el cual forma parte del software Rhinoceros (observar Figura 75).

Proporciona los bloques de construcción en el área de robótica para la integración de un manipulador de la marca KUKA en un entorno paramétrico, ya que consta de una gran biblioteca, desde los pequeños hasta los de 1 tonelada de carga útil, asimismo se incluye el KUKA iiwa de 7 ejes, los bloques se conecta entre ellos sin la necesidad de líneas de código, los resultados son apreciados de inmediato, al visualizar los movimientos de los ejes, a detectar, prevenir colisiones y singularidades, además de manipular el estado de I/O (Robots in Architecture, 2015).



**Figura 75.** Interface KUKA|prc  
Fuente:(Robots in Architecture, 2015)

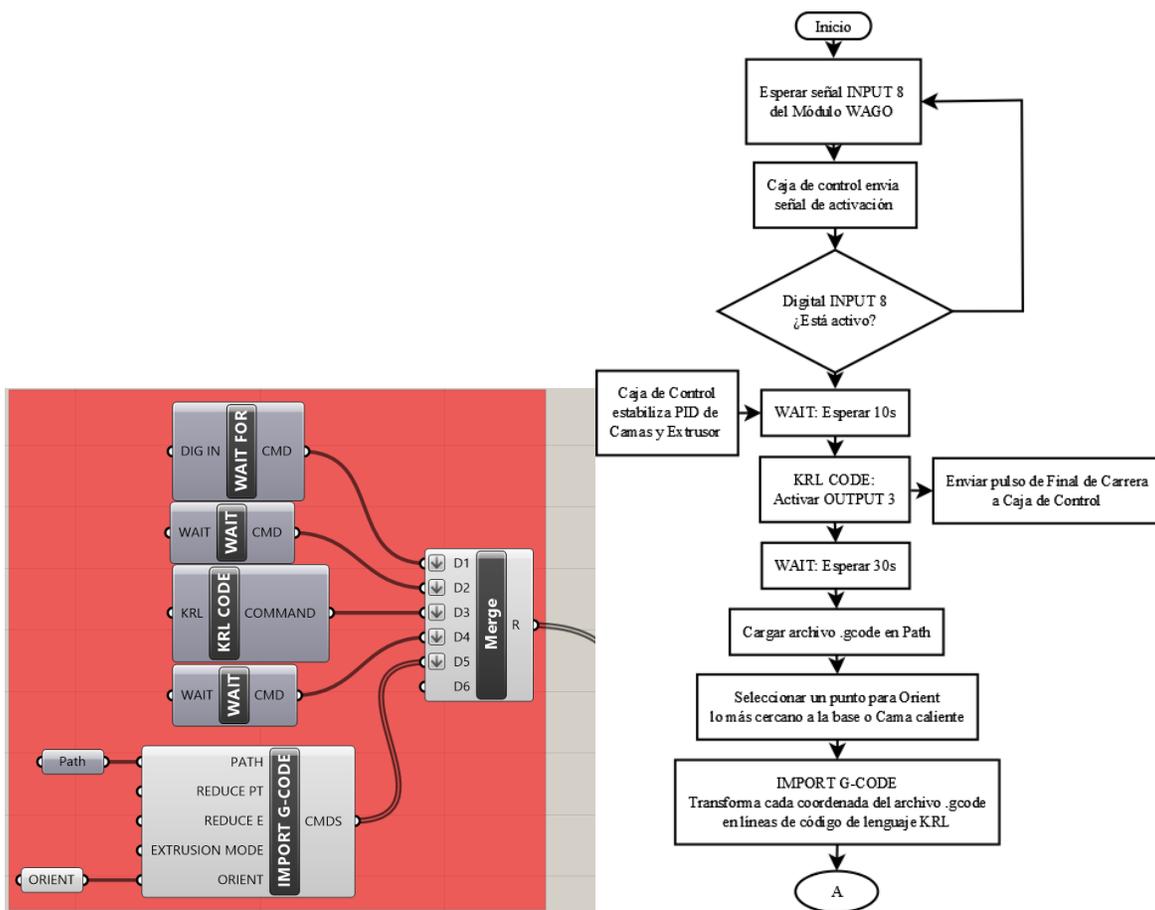
Para la obtención del archivo que corresponde al brazo robótico KUKA (.src), se utiliza los bloques del componente KUKA|prc, instalado en el plugin Grasshopper del software Rhinoceros, a continuación, se observa en la Figura 76, la programación por bloque que se utilizó, la misma está agrupada por procesos como: prototipado rápido, cambio de herramienta, mecanizado y generación de archivo, representados por los colores rojo, verde, morado y celeste respectivamente.



**Figura 76.** Programación en KUKA|prc

Cada uno de los bloques generan sus propios comandos, por lo cual es necesario unirlos a un bloque Merge y así obtener una sola salida con toda la información.

A continuación, se detalla el proceso de prototipado rápido, este se encuentra conformado por ocho bloques de programación, `WAIT FOR` espera la entrada digital 8 del módulo Wago, la cual es activada desde la caja de control, esto indica que la cama caliente y extrusor están listos para realizar el prototipado, el primer `WAIT` está configurado para generar un retraso de 10 segundos, en este tiempo se estabiliza el control PID de la cama caliente, el bloque `KRL CODE` interpreta el lenguaje KRL, por lo que si conoce las líneas de código se puede escribirlas sin problemas, en este caso en particular ayuda a activar la salida digital 3, por tanto esta señal sirve para indicar a la caja de control que el brazo robótico está en la posición inicial para comenzar el prototipado, el segundo `WAIT` crea un retraso de 30 segundos que ayuda a la correcta sincronización entre el sistema de extrusión y el brazo robótico, `IMPORT G-CODE` es el componente exclusivo para la transformación de los códigos G generados por el software Slic3r a lenguaje KRL, para el correcto funcionamiento de este componente se debe ingresar la dirección y un punto de orientación, la dirección del archivo `.gcode` es ingresada a través del bloque `Path` y en `ORIENT` un punto de orientación cerca de la cama caliente. Las salidas de los componentes se unen al bloque `Merge` en el orden que se desea ejecutar cada uno y así obtener una única salida del proceso de prototipado rápido, como se puede apreciar en la Figura 77.



**Figura 77.** Proceso de impresión 3D

El proceso de Cambio de herramienta consta de 7 bloques los cuales ayudan a la transición de la manufactura aditiva a la sustractiva, al culminar el proceso de prototipado rápido el brazo robótico debe ir a un punto de seguridad, esto se logra con LIN MOVE, cuyos parámetros de configuración son: un plano en el punto deseado y la velocidad de desplazamiento, en este caso 0.3 m/s.

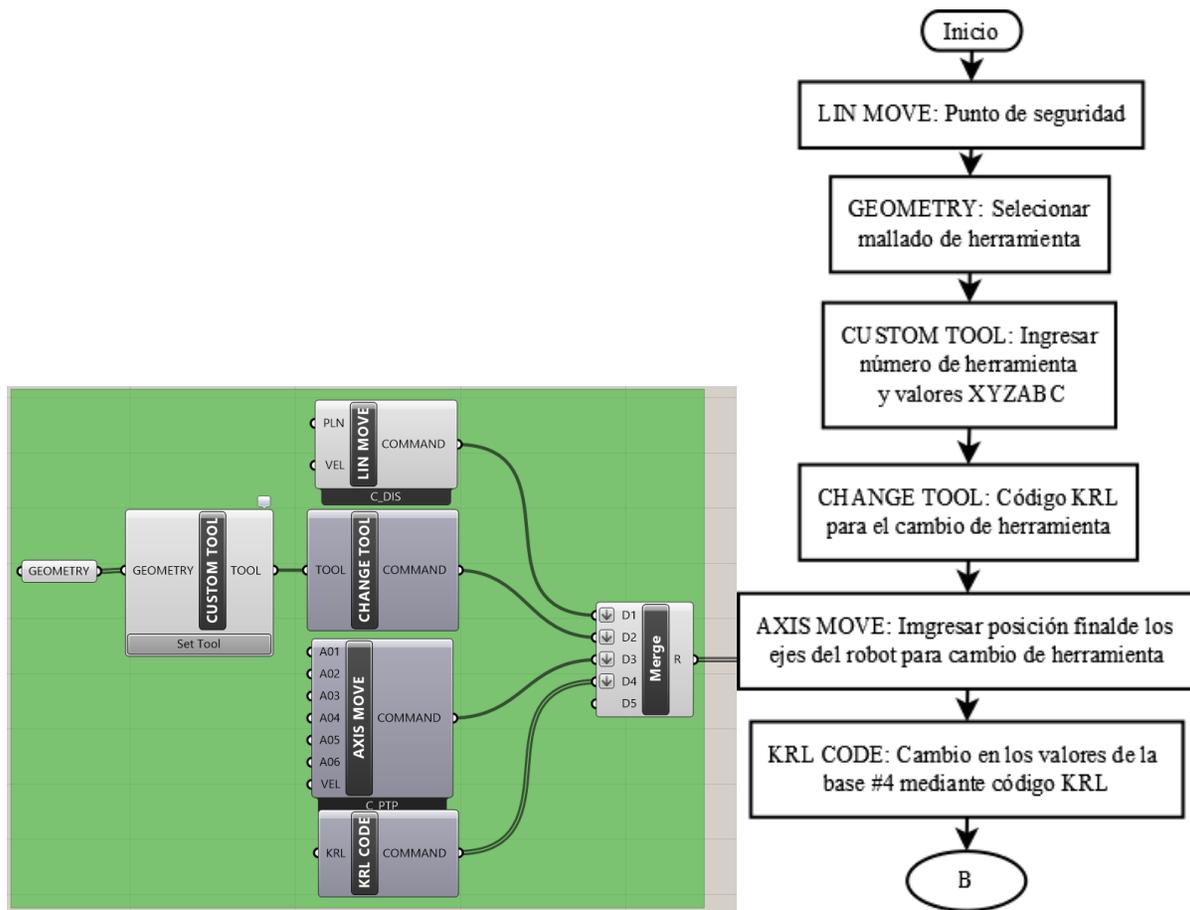
Los siguientes bloques son la configuración de la nueva herramienta, en este caso en particular se empleará la manufactura sustractiva, consta de GEOMETRY, donde se selecciona todo el mallado de la herramienta en la interfaz de Rhinoceros, este bloque está conectado a CUSTOM TOOL, como configuración se coloca el número y los valores XYZABC de la nueva herramienta,

el mismo se une a CHANGE TOOL, como salida se obtiene las líneas de código necesarias para realizar la operación.

Existe un error al ejecutar el cambio de herramienta, que en la simulación no es visible, se lo aprecia de forma real con la activación del final de carrera del eje 4, KUKA|prc es un software relativamente nuevo por lo que sigue en constante desarrollo, para evitar esto se ocupa el bloque AXIS MOVE, permite ingresar el valor de cada uno de los ejes para la posición final y la velocidad del movimiento.

En bloque KRL CODE se encuentra las líneas de código para un cambio de base, en este caso es necesario, ya que mediante pruebas la nueva herramienta y la base presentan desfase en los ángulos de inclinación.

Se conecta la salida de los componentes en el orden deseado al bloque Merge, como resultado se obtiene el código para un cambio de herramienta, lo antes descrito se muestra en la Figura 78.



**Figura 78.** Proceso de cambio de herramienta

Para el proceso de mecanizado se utiliza 6 bloques de programación de KUKA|prc, estos facilitan tanto el encendido y apagado del husillo como las trayectorias a seguir en la manufactura sustractiva.

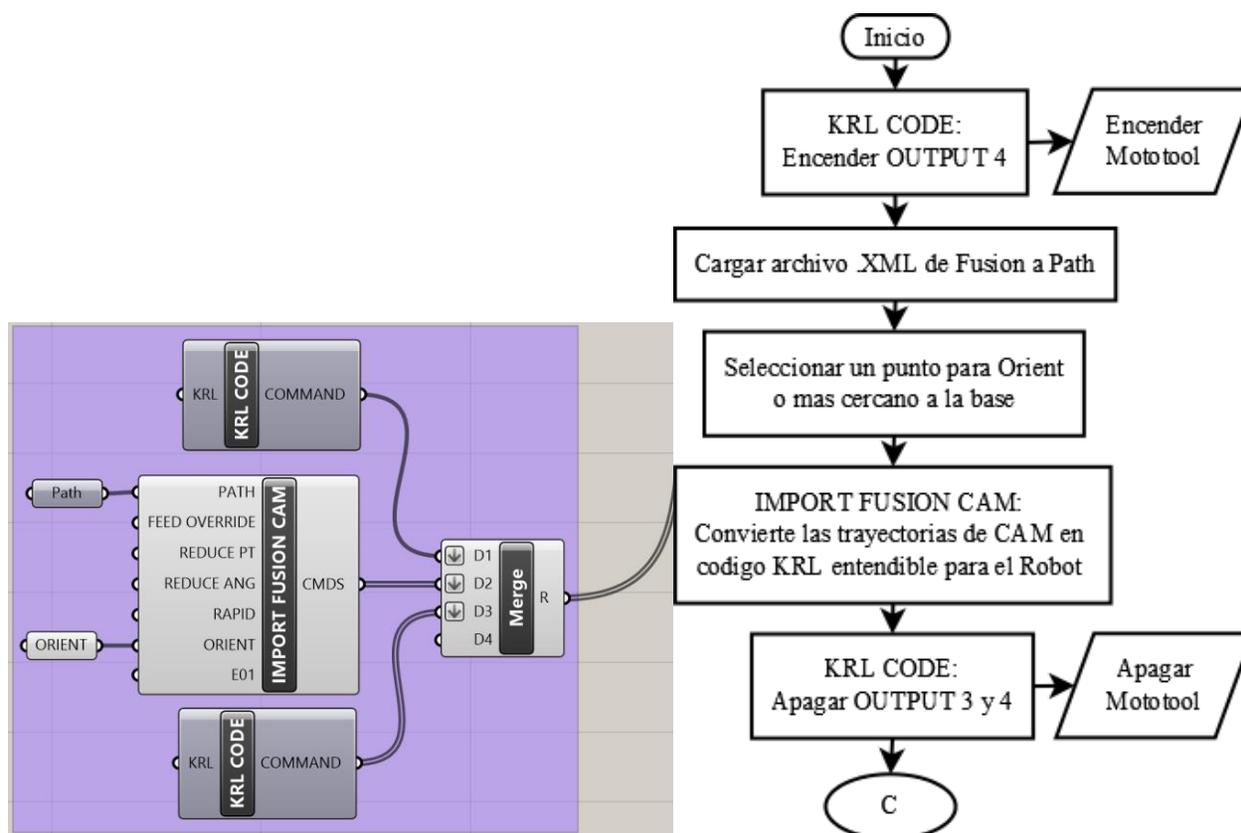
El bloque KRL CODE está configurado para la activación de la salida digital 4, con la ayuda de un relé industrial permite el encendido del mototool.

IMPORT FUSION CAM, en este bloque se puede extraer el postprocesador para Autodesk Fusion360, al hacer click derecho en la franja negra y “Output postprocessor for Fusion 360”, se usa el post-procesador KUKAprcFusionCAM, que genera datos con la extensión .XML, la dirección del archivo es cargada en el bloque Path, en ORIENT se configura un punto lo más

cercano al proceso de mecanizado, por lo que este parámetro es el mismo en el prototipado rápido, como salida se obtiene los comandos necesarios para el correcto movimiento del brazo robótico.

f como resultado se apaga el mototool y finaliza el proceso de mecanizado.

Al igual que en los casos anteriores, los bloques se unen a Merge en un orden determinado para la obtención de la salida del proceso, como se observa la Figura 79.



**Figura 79.** Proceso de mecanizado

El último proceso culmina con la generación del archivo con extensión .src, esto se logra con la correcta configuración del bloque KUKA|prc y los parámetros solicitados.

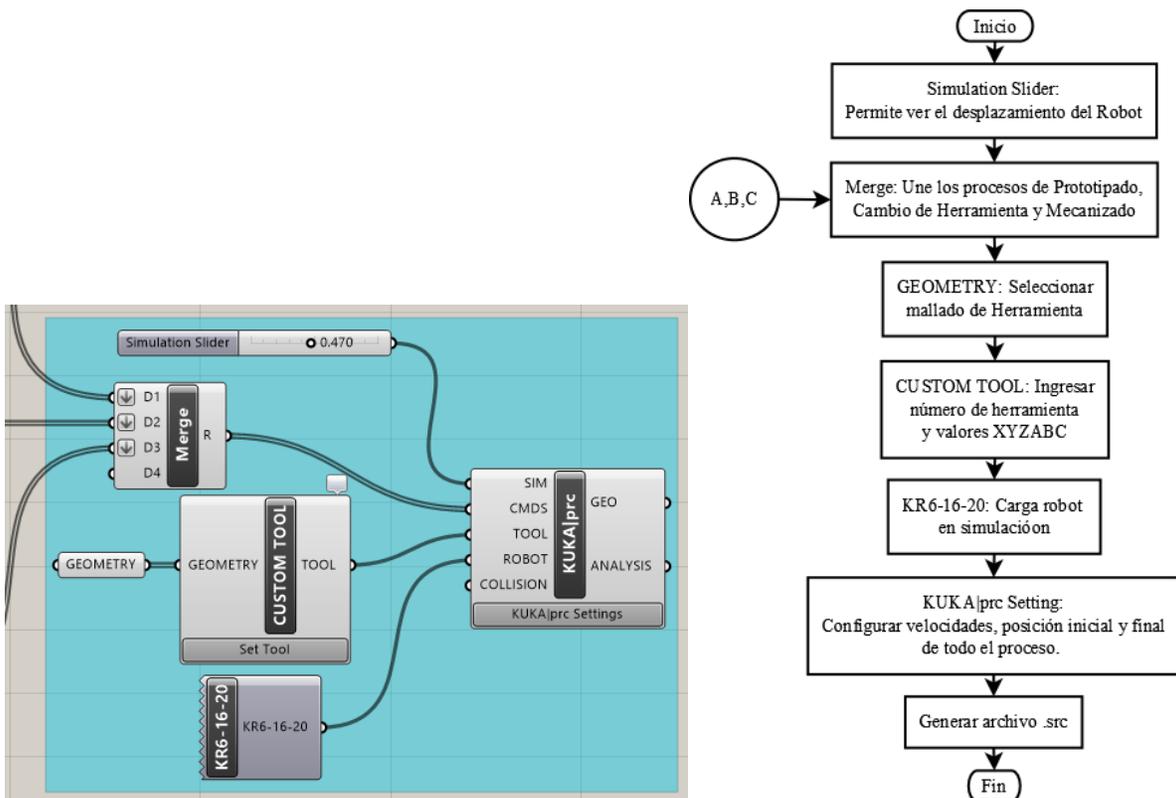
Simulation Slider permite manejar la simulación y ver las trayectorias que va a tomar el brazo robótico, este debe ir conectado en SIM del bloque KUKA|prc.

A continuación, los proceso de prototipado rápido, cambio de herramienta y mecanizado deben ir a Merge para generar una sola salida de códigos, la misma irá a CMDS del bloque KUKA|prc, de esta forma se genera las rutas tanto en la simulación con en el archivo de salida.

Asimismo, se debe cargar la herramienta designada para el prototipado rápido, ya que es la herramienta del proceso inicial, al igual que en el caso anterior, costa de GEOMETRY conectado a CUSTOM TOOL y se configura tanto el número de herramienta y los valores XYZABC, la salida va conectada a TOOL del bloque KUKA|prc.

Se inserta el bloque perteneciente al brazo robótico KR16 el cual se conecta a ROBOT del bloque KUKA|prc, de esta forma en la interfaz de Rhinoceros se aprecia un brazo KUKA listo para la simulación.

Las conexiones antes descritas se pueden ver en la Figura 80.



**Figura 80.** Configuración principal

Dentro del bloque KUKA|prc, se puede configurar la posición inicial y final del brazo robótico, las velocidades de LIN y PTP, así como el número y los valores de la base inicial y la dirección de salida del archivo .src.

### 3.6.4. Tratamiento de códigos

Grasshopper con el plugin KUKA|prc transforma los códigos G, tanto de impresión 3D como de mecanizado, en trayectorias válidas para el brazo robótico. Al generar el archivo .src, ocurre un error, la velocidad declarada en la parte superior de los códigos G se pierde y las velocidades se convierten en negativas o en nulas, esto se debe a que el plugin aún está en desarrollo y produce ciertos errores, por lo que es necesario filtrar los códigos o instrucciones que no son reconocidas por el robot.

Se creó un programa ejecutable que elimina códigos o instrucciones erróneas, que sigue el diagrama de flujo de la Figura 81 con la portada, que consta de una presentación y debidas indicaciones para ser usado, su función general e información sobre los autores.



**Figura 81.** Diagrama de flujo y pantalla principal del filtrado de códigos

Al presionar siguiente se despliega la pantalla mostrada en la Figura 82, la cual permite buscar todos los archivos con la extensión .src, cargar la ubicación del archivo de entrada y salida, se crea una carpeta de manera automática en la misma dirección del archivo de entrada llamada SALIDA que contiene el archivo del programa.

FILTRADO PARA KUKA





**Filtrado de códigos compatibles con KUKA KR 16**

**Archivo de Entrada**

**Archivo de Salida**

**Figura 82.** Entrada y salida de archivo .src

El archivo de salida está listo para ser ingresado y ejecutado por el brazo robótico, se recomienda, correr el programa en vacío y a una velocidad del 50% para apreciar posibles choques o malas trayectorias, asegurarse que los números y valores de las herramientas sean los adecuados para así evitar accidentes.

### 3.7.Ejecución del sistema de impresión y fresado

Para comenzar el proceso de impresión se debe verificar la presión de aire, el robot debe estar encendido, el paro de emergencia debe estar desactivado, las conexiones eléctricas conectadas adecuadamente y una correcta alimentación del material, en este caso el PLA, (referirse al manual de usuario en el anexo D).

A continuación, tomar en cuenta la configuración de las herramientas y base, para el proceso de impresión y fresado se asignan los números de herramientas 4 y 8 respectivamente, los valores se muestran en la Tabla 22.

**Tabla 22**  
*Configuración de herramientas*

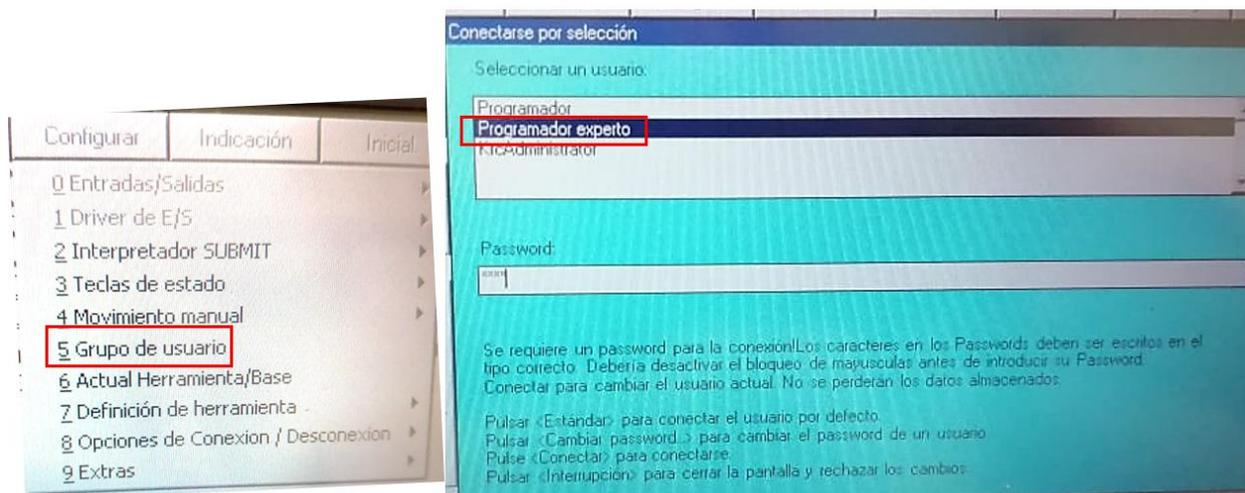
Herramienta	X	Y	Z	A	B	C
<b>Herramienta de impresión</b>	84.183	-136.944	236.331	-60	0	270
<b>Herramienta de fresado</b>	-98.438	158.523	236.128	120	0	270

La base número 4, es utilizada para este proyecto, se realizaron varias pruebas de funcionamiento con ambas herramientas, por lo que se pudo detectar la necesidad de una nueva base o el cambio de valores de esta, lo cual se logra mediante el código generado por el software KUKA|prc y se muestra sus valores en la Tabla 23.

**Tabla 23**  
*Configuración de bases*

Base	X	Y	Z	A	B	C
<b>Base con herramienta de impresión</b>	1218.636	-35.366	640.021	0	0.175	0.250
<b>Base con herramienta de fresado</b>	1218.636	-35.366	640.421	0	-0.390	0.090

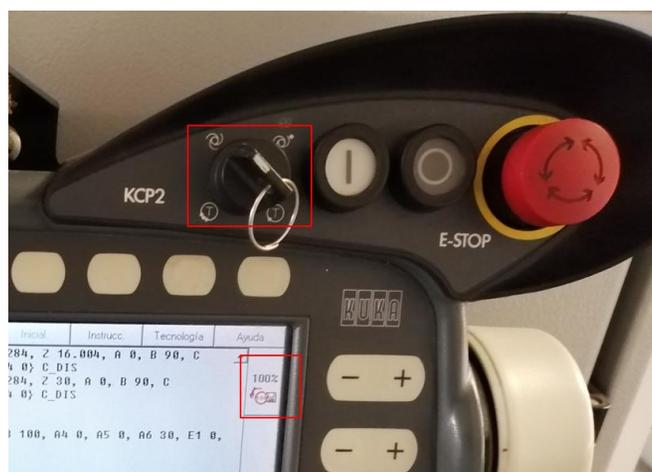
Para poder cargar el archivo .src ya filtrado al KRC2, se accede al modo experto (ver Figura 83) en el menú configurar/grupo de usuarios/programador experto, digitar la contraseña kuka y presionar conectar.



**Figura 83.** Ingresar a “modo experto”

Mediante una memoria USB trasladar el archivo \*.src desde el computador hacia el CPU del KRC y copiarlo en la ubicación R1, en esta carpeta se encuentra todos los archivos disponibles para ejecutarlos.

Para la ejecución del programa se selecciona el mismo, el KCP debe estar en T3, como en la Figura 84, o modo automático a una velocidad baja, por recomendación, posteriormente pulsar dos veces Start (+), el brazo robótico esperará hasta que la caja de control envíe la señal de estar lista para el proceso y sincronizar el movimiento.



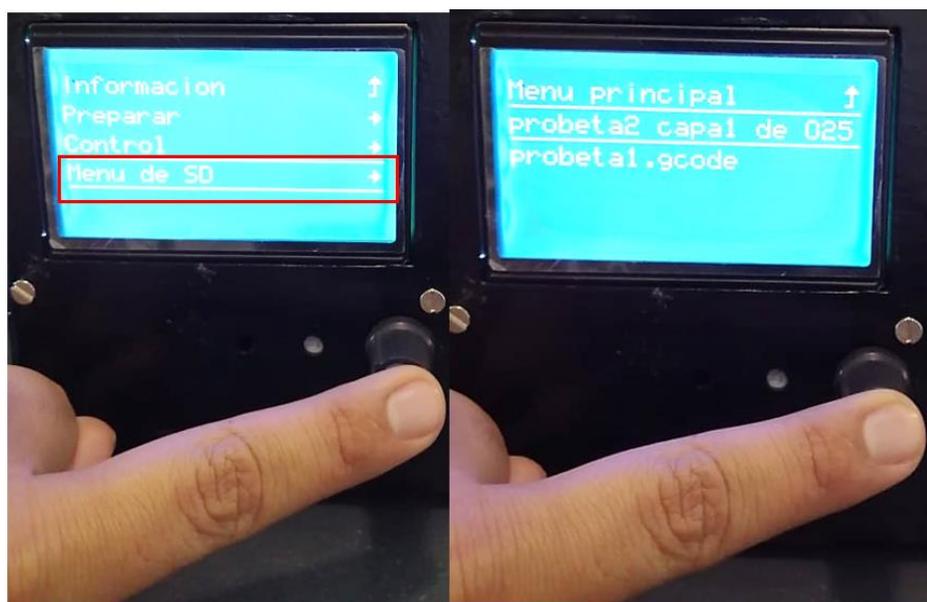
**Figura 84.** Modo automático

Posteriormente cargar el archivo \*.gcode generado por el programa Slic3r a la caja de control, esto se logra a través del lector de tarjeta SD, donde se copia el archivo desde el ordenador hacia la caja de control, la tarjeta debe ingresar en la ranura de la parte izquierda de la pantalla de la caja, como se lo realiza en la Figura 85.



**Figura 85.** Cargar el archivo a la caja de control

Mediante el uso de la perilla se puede configurar ciertas funciones y calentar tanto el extrusor como la cama caliente, en este caso se ingresa a la tarjeta SD y selecciona el archivo que ese desea imprimir, como se ve en la Figura 86.



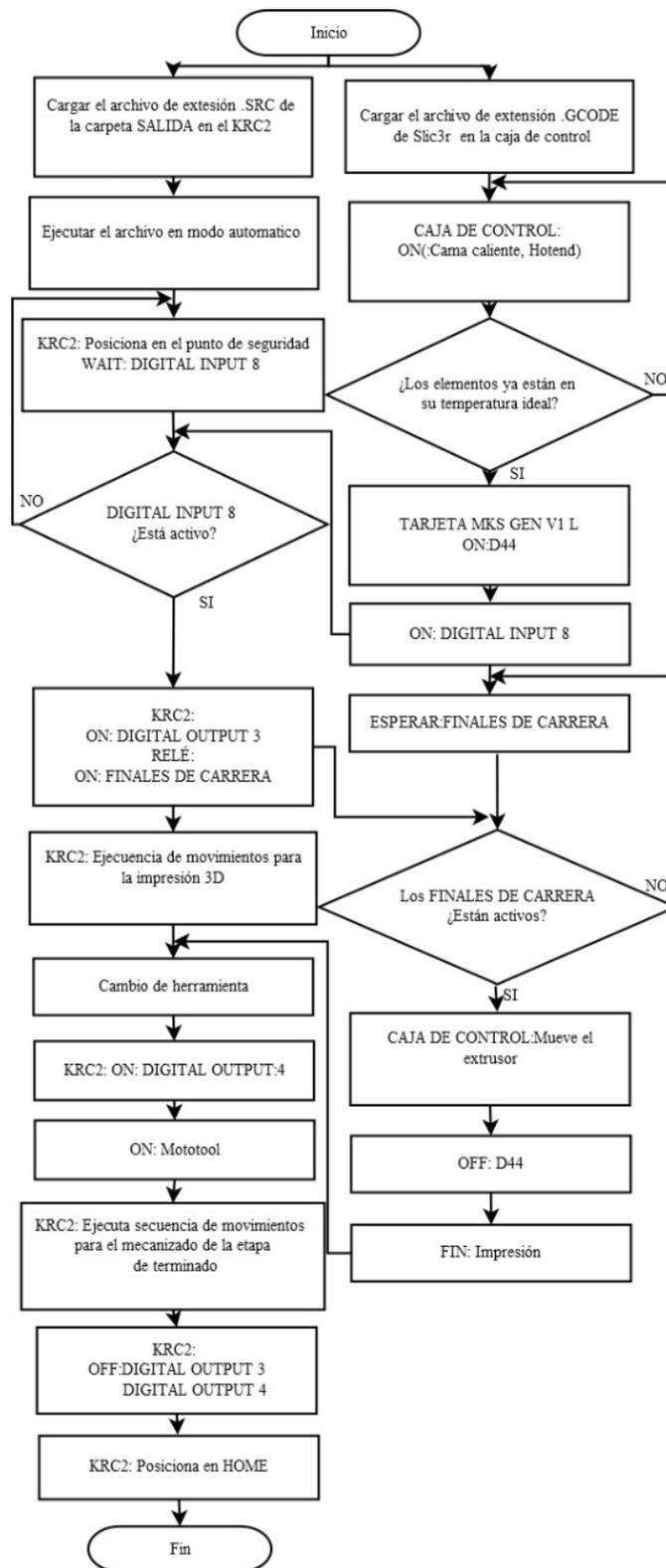
**Figura 86.** Selección del archivo \*.gcode

En el archivo seleccionado ya está configurado para mandar una señal, la misma será activa cuando hayan pasado 10 segundos después de que la cama caliente y el extrusor hayan llegado a la temperatura deseada, mediante un relé activará la entrada del módulo Wago y el brazo robótico empezará a moverse.

Observar las trayectorias del robot con velocidad media hasta que la herramienta de impresión comience a realizar el proceso, verificar que las trayectorias no tengan conflicto y subir la velocidad al 100%, el cambio de herramienta se realiza automáticamente al igual que el de la base, verificar que la herramienta no tenga conflictos en la penetración.

### **3.8. Diagrama de flujo del funcionamiento**

A continuación, en la Figura 87 se muestra el funcionamiento del proyecto, el diagrama de flujo inicia con la existencia de los archivos para la caja de control y el controlador KRC2, en la primera rama se carga el archivo generado por el programa de los autores y éste se ejecuta en T3 automático hasta llegar a un punto de seguridad y espera la entrada digital 8, cuando la recibe el KRC2 prende la salida digital 3 a un relé que da el pulso de los finales de carrera y se ejecuta la secuencia de movimientos de impresión 3D, en paralelo se tiene que en la segunda rama se ejecuta el archivo en la caja de control y se calienta la cama caliente y el extrusor hasta el set point, entonces la tarjeta MKS GEN manda un pulso por el pin digital 44, que prende la entrada digital 8 y espera la confirmación de los finales de carrera una vez que se confirma se mueve el extrusor para colocar el material en la cama caliente hasta que se termine, así se sincroniza los dos procesos y ahora se fusionan en el cambio de herramienta, el KRC2 prende la entrada digital 4 que a su vez prende el Mototool y se procede a ejecutar la secuencia de movimientos para el mecanizado, después de terminado esto se apagan las salidas digitales 3 y 4 y se posiciona el brazo robótico en HOME y termina todo el diagrama.



**Figura 87.** Diagrama de flujo del funcionamiento

## CAPÍTULO IV

### PRUEBAS Y RESULTADOS

#### 4.1. Pruebas de funcionamiento del sistema de impresión 3D y fresado

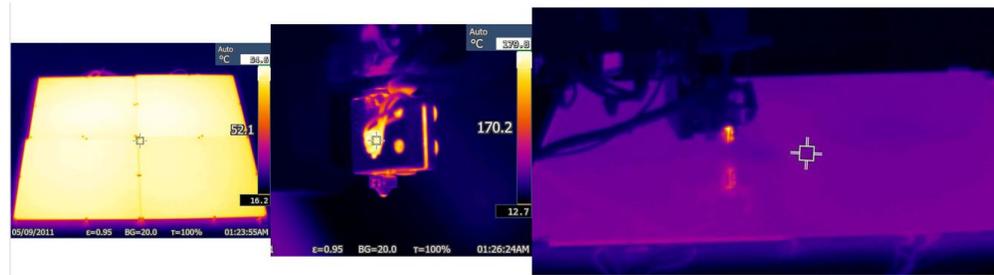
Para verificar el funcionamiento de la herramienta se realizan pruebas en vacío, comprobar el movimiento, las temperaturas y el cambio de herramienta.

**Tabla 24**

*Pruebas de funcionamiento*

PROCESO/DISPOSITIVO	FUNCIONAMIENTO		
	SI	NO	N/A
Encendido de la caja de control	X		
Fusible			X
Motor Nema 17	X		
Tarjeta MKS Gen	X		
Cama caliente	X		
Mosfet de potencia	X		
Mecanismo de extrusión	X		
Encendido de los Ventiladores	X		
Relé 5V/24V	X		
PID de temperatura de la cama caliente y la boquilla	X		
Señal de los termistores del extrusor y la cama caliente	X		
Encendido de mototool	X		
Cambia de herramienta	X		
KUKA envía pulsos para la activación de señales	X		
KUKA recibe señales para activar movimiento	X		
Extrusión de filamento	X		
Atascamiento del PLA		X	
Calentamiento excesivo de las fuentes de poder		X	
Cortocircuitos		X	

Los resultados que se obtuvieron en la Tabla 24 muestran el correcto funcionamiento de todos los componentes de la herramienta y estos a su vez cumplen con su objetivo, se calentó la cama caliente y el extrusor (Figura 88), se logró extruir el PLA y el mototool se encendió para realizar el fresado, no se produjeron cortocircuitos, ni calentamiento excesivo de las fuentes de poder no hubo saltos del fusible.



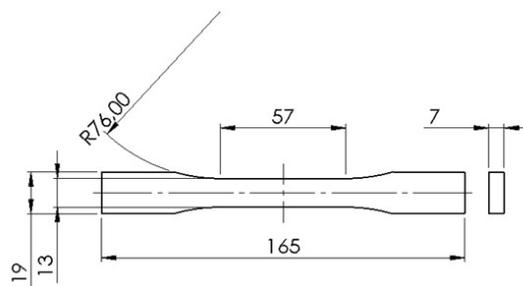
**Figura 88.** Imágenes termografías del extrusor y cama caliente

## 4.2. Manufactura de probetas

### 4.2.1. Norma y medidas de probetas

Para la elaboración de las probetas estandarizadas se hace uso de la norma ASTM D638-14, la cual proporciona las medias y la forma, datos de propiedades de tracción de materiales plásticos reforzados y no reforzados, asimismo especifica las condiciones de los ensayos (ASTM International, 2014).

Mediante la norma ASTM D638-14 en la sección de Muestras de Prueba se detalla el tipo de probeta para plásticos rígidos y semirrígidos, la misma recomienda usar del tipo I con un espesor de 7mm o menos, las dimensiones se muestran en la Figura 89.



**Figura 89.** Medidas de la probeta tipo I

Para la manufactura de las probetas estandarizadas mediante prototipado rápido debe cumplir con los parámetros de la Tabla 25 y las medidas anteriores, al igual que se debe tomar en consideración el entorno de prueba donde la probeta se encuentra expuesta y así obtener resultados fiables, si se desea manufacturar piezas en diferentes condiciones referirse al anexo D-02.

**Tabla 25***Parámetros de prototipado rápido*

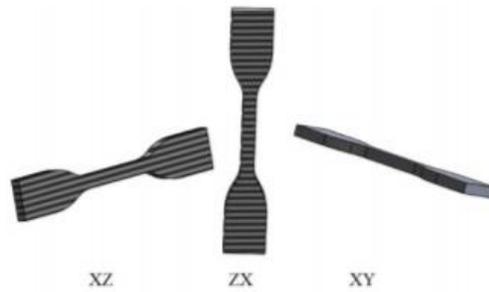
<b>Parámetros de Prototipado Rápido</b>	
<b>Tipo de filamento</b>	PLA con fibra de carbono
<b>Porcentaje de relleno</b>	80%
<b>Patrón de relleno</b>	Rectangular a 0° y 90°
<b>Medida de boquilla</b>	1.2 mm
<b>Temperatura de cama</b>	50 °C
<b>Temperatura de extrusor</b>	210 °C
<b>Altura de primera capa</b>	0.35 mm
<b>Altura de capas</b>	0.6 mm
<b>Velocidad de impresión</b>	60 mm/s
<b>Tipo de adherencia a la cama</b>	Borde

La Figura 90 muestra la ejecución de la manufactura híbrida y el producto final en este caso una probeta.

**Figura 90.** Manufactura híbrida de probeta tipo I

#### 4.2.2. Número de probetas

En el prototipado rápido de piezas 3D se lo puede realizar en diferentes direcciones (XZ, ZX, XY), ver Figura 91, esto depende mucho de la decisión del operario en función a la geometría y la dirección de esfuerzos aplicados a dicha pieza.



**Figura 91.** Orientación de impresión 3D

Fuente: (León & Romero, 2018)

Según la norma ASTM D638-14 el mínimo de probetas es 5 por cada dirección, en el estudio realizado por (León & Romero, 2018) mediante ensayos experimentales, se dedujo que “*En referencia al módulo de Young presta mejores características las probetas impresas en la dirección XY con una media de 4,7708 [MPa]*”, con esto el número de ensayo se ve limitado a la dirección XY, como muestra la Figura 92.



**Figura 92.** Probetas realizadas en dirección XY con sobre-extrusión y fresado

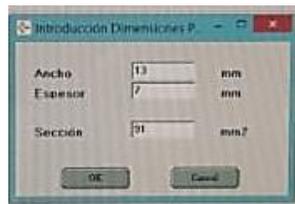
#### 4.3. Pruebas de tenacidad de las probetas

Los ensayos se realizaron en una Máquina Universal MTE-50, como muestra en la Figura 93, la misma que se encuentra instalada y calibrada en el Centro de Fomento Productivo Metalmecánico Carrocero, ubicado en la ciudad de Ambato.



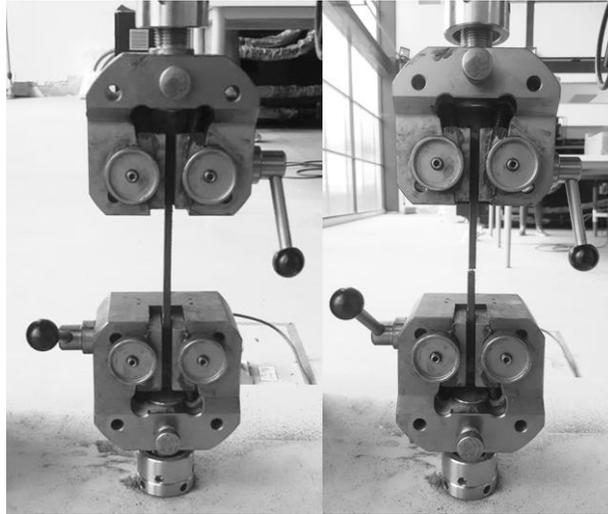
**Figura 93.** Máquina Universal MTE-50  
Fuente: (Esperanza Núñez González, 2018)

Para iniciar el proceso de ensayo de tracción es muy importante medir las dimensiones de las probetas e ingresarlas en el software de la maquina como parámetros, ver Figura 94, como resultado se obtiene datos correctos de esfuerzo-deformación.



**Figura 94.** Ingreso de datos

Las probetas deben estar sujetas correctamente por los extremos y se deja libre la longitud calibrada, ya que de ésta depende la obtención de datos de deformación, la Figura 95 muestra la ejecución del ensayo de tracción.



**Figura 95.** Ensayo de tracción de probeta tipo I

Una vez culminado el ensayo el software da como resultado el diagrama esfuerzo-deformación de cada una de las probetas, estos diagramas son similares, pero no iguales ya que varían debido a imperfecciones microscópicas, forma de fabricación, composición del material, temperatura, velocidad y carga aplicada durante el ensayo.

#### 4.3.1. Probetas de impresión 3D

Las condiciones para los ensayos se considera una precarga de 0.01[N], una velocidad de prueba de 50 [mm/min] y sin ningún tipo de acondicionamiento, la temperatura ambiente fue de 22.5[°C] con una humedad del 48.7% durante el proceso del ensayo, los resultados de aprecian en la Tabla 26.

**Tabla 26**

*Resultados de ensayos de probetas de impresión 3D*

PROBETA	Fuerza máxima [N]	Esfuerzo máximo de tracción [MPa]	Módulo de elasticidad [Mpa]	Elongación[%]
ETP 01-1	3239.24	35.60	262.97	13.54
ETP 01-2	3553.22	39.05	272.44	14.33
ETP 01-3	2748.54	30.20	237.71	12.71
ETP 01-4	3802.51	41.79	261.23	16.00
ETP 01-5	3363.88	36.97	256.60	14.41

### 4.3.2. Probetas de impresión 3D con sobre-extrusión y fresado

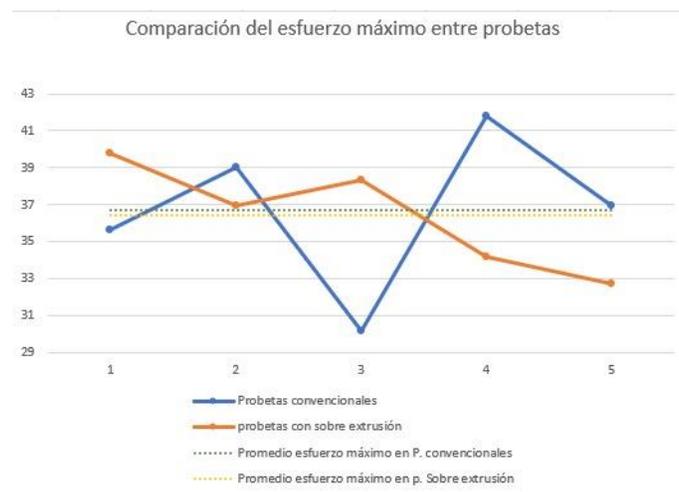
En los ensayos a las probetas con sobre-extrusión fueron realizados con los mismos valores de precarga y velocidad de prueba que en el caso anterior, la temperatura ambiente incremento a 24.5[°C] con una humedad del 49.8%, los resultados de muestran en la Tabla 27.

**Tabla 27**

*Resultados de ensayos de probetas con sobre-extrusión y fresado*

PROBETA	Fuerza máxima [N]	Esfuerzo máximo de tracción [MPa]	Módulo de elasticidad [Mpa]	Elongación[%]
ETP 02-1	3619.49	39.77	287.35	13.84
ETP 02-2	3365.46	36.98	295.11	12.53
ETP 02-3	3486.95	38.32	298.32	13.24
ETP 02-4	3113.01	34.21	312.64	10.94
ETP 02-5	2978.90	32.74	271.84	12.52

### 4.3.3. Análisis



**Figura 96.** Comparación del esfuerzo máximo entre probetas

En la Figura 96 la curva de color azul representa el esfuerzo máximo de las probetas de impresión convencional, cuyo comportamiento es bastante variable con notorios picos, en cambio la curva de color naranja representa las probetas con sobre-extrusión y se observa que tiene un comportamiento mucho más lineal, las líneas punteadas muestran el promedio de esfuerzo máximo

en probetas de impresión convencional en color verde con un valor de 36.722 MPa y el promedio del esfuerzo máximo en probetas con sobre-extrusión en color amarillo con un valor de 36.404 que tienen un valor similar y se considerarían iguales.

Como análisis aplicativo se tiene que, si se fabrica una pieza de manera normal para un esfuerzo crítico de cualquier mecanismo, no se asegura del todo que el comportamiento sea el mismo bajo iguales condiciones, es decir la media de estas piezas no es garantía de su comportamiento real, en cambio realizar estas partes con características de sobre-extrusión y fresado hacen que el valor o media para el que fue diseñado se cumpla con una tolerancia mínima.

El comportamiento de las probetas muestra una dispersión notoria en las probetas de impresión convencional en cambio en las de sobre-extrusión, no presentaron dicha característica, por lo que se va a calcular la desviación estándar corregida (Ecuación 28) para muestras pequeñas y el coeficiente de variación (Ecuación 29) para hacer una comparación acerca de esta conducta.

$$s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad \text{Ecuación 28}$$

$$CV = \frac{s}{|\bar{x}|} \quad \text{Ecuación 29}$$

Donde:

$s$ =Desviación estándar corregida

$N$ =Número de la muestra

$x_i$ =Datos

$\bar{x}$ =Media del conjunto de datos

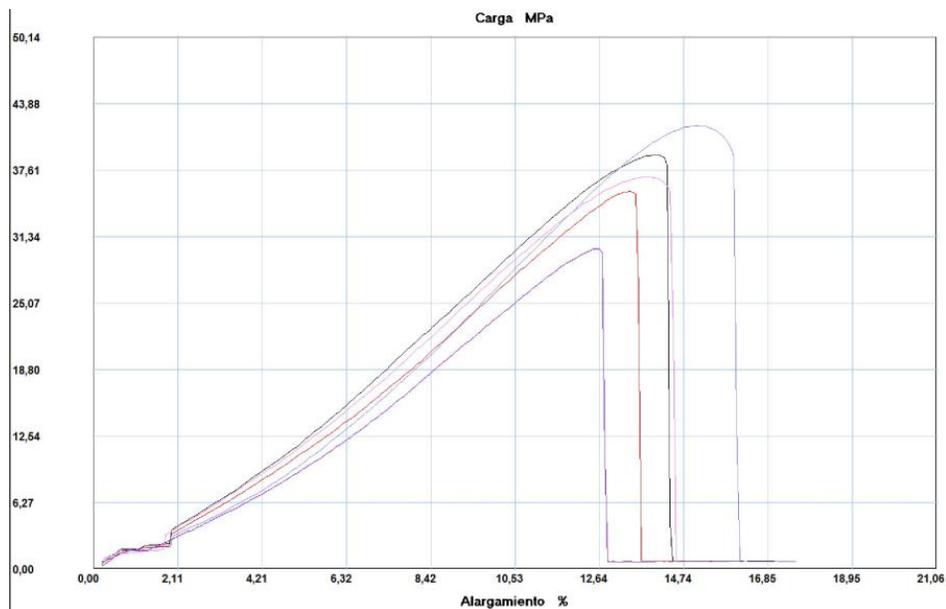
$$s_{\text{probetasnormales}} = 4.329$$

$$CV_{\text{probetasnormales}} = 11.78\%$$

$$s_{\text{probetasconsobre extrusión}} = 2.897$$

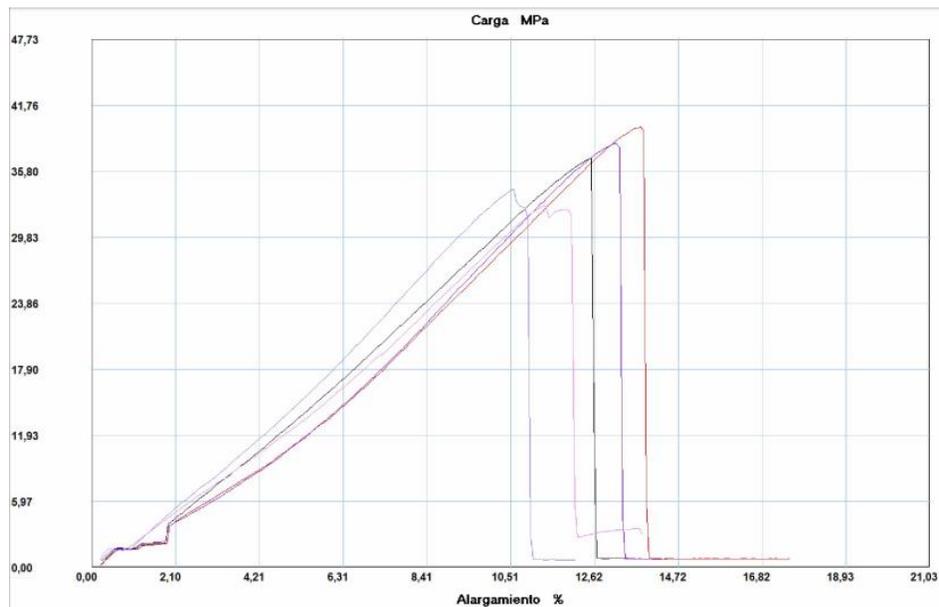
$$CV_{\text{probetassobreextrusión}} = 7.97\%$$

La desviación estándar de las probetas de impresión convencional es mayor a la desviación de las probetas con sobre-extrusión, lo que comprueba que existe una mayor dispersión de valores en las probetas de impresión convencional y que al utilizar la técnica de sobre-extrusión se genera un comportamiento menos aleatorio con este tipo de manufactura pues la variación de datos es apenas del 7.97% en relación al 11.78% de las probetas de impresión convencional.



**Figura 97.** Curvas de probetas de impresión convencional

La Figura 97 representa las curvas de las probetas de impresión convencional en las que se ve una curva suave antes de la fractura debido a la estricción o descenso de la curva tensión-deformación, el cambio de área por deformación plástica, las curvas muestran a un material dúctil, se aprecia que la forma de las curvas es parecido y que el 40% de las muestras sufren la misma deformación unitaria y que el 60% varía notoriamente en esta deformación, las curvas además demuestran un proceso de fabricación en condiciones iguales.



**Figura 98.** Curvas de probetas con sobre-extrusión

La Figura 98 representa las probetas con sobre-extrusión y una etapa de acabado, en la cual destaca que es una curva con una estricción menor antes de la fractura lo que hace que la curva tenga un pico, es decir se comporta como un material menos dúctil comparado con el otro conjunto de muestras, sobresale que el 40% de las curvas tienen otra forma, lo que se entendería que estas dos muestras tuvieron una zona elástico-plástica antes de fracturarse o que estas probetas fueron manufacturadas en otras condiciones distintas al 60% restante que mantienen un patrón definido antes de romperse.

Con las curvas de ingeniería, proporcionadas por el Centro de Fomento Productivo Metalmeccánico Carrocero, se obtuvo el área bajo la curva mostradas en la Figura 99 que representa la tenacidad o la capacidad del material para resistir fuerzas antes de romperse y se obtiene que las muestras normales tienen un 25.05% más tenacidad que las muestras con sobre-extrusión y fresado.



**Figura 99.** Tenacidad de probetas de impresión convencional y con sobre-extrusión

Desde el punto de vista del diseño mecánico, el uso de probetas con sobre-extrusión para cumplir requerimientos deseados, como esfuerzo máximo en un desplazamiento conocido es recomendable pues se tiene que su deformación unitaria con respecto a las probetas de impresión convencional es 12% más estable de acuerdo a los rangos de elongación en las pruebas, esto garantizará la funcionalidad de un elemento diseñado bajo estos parámetros.

#### 4.4. Validación de la hipótesis

##### 4.4.1. Validación de la hipótesis para el aumento en la resistencia de las probetas por el método de t-student

La hipótesis está definida como:

¿El diseño e implementación de un sistema de impresión 3D mediante el brazo robótico KUKA KR16 para el prototipado con la técnica de sobre-extrusión permitirá piezas de mayor resistencia y tamaño con una etapa final de terminado?

La validación de la hipótesis, para el esfuerzo máximo a tracción se lo realizó por el método t-student para dos variables dependientes, ya que permite la aceptación o negación de determinados cambios que han sucedido al comparar dos muestras bajo las mismas condiciones con diferente proceso de elaboración, como es la impresión 3D convencional y la impresión 3D por sobre-

extrusión, para lo cual se plantean dos hipótesis, una nula y otra alternativa como establece (W. León, 2013):

- Ho: El esfuerzo máximo a tracción de las probetas no aumenta con la impresión 3D por sobre-extrusión. ( $D=0$ )
- Ha: El esfuerzo máximo a tracción de las probetas si aumenta con la impresión 3D por sobre-extrusión. ( $D>0$ ).

En la **Tabla 28** se puede observar las condiciones para la validación de la hipótesis nula o alternativa.

**Tabla 28**  
*Condiciones para la validación de la hipótesis nula Ho.*

<b>Condición</b>		<b>Decisión</b>
$-t_c < t_{n-1} < t_c$	<b>Ecuación 30</b>	No se rechaza Ho
$t_{n-1} < -t_c$ ó $t_{n-1} > t_c$	<b>Ecuación 31</b>	Se rechaza Ho

Fuente:(W. León, 2013)

Donde:

$t_c$ : Estadístico t calculado

$t_{n-1}$ : Estadístico t para el número de grados de libertad ( $GL$ ) y nivel de significancia ( $\alpha= 0,05$ )

Para las 5 probetas realizadas por sobre-extrusión y una etapa de acabado, así como 5 probetas realizadas en una impresora 3D, se establece el valor para el grado de libertad ( $GL$ ) con la Ecuación 32.

$$GL = n - 1 \qquad \qquad \qquad \mathbf{Ecuación 32}$$

$$GL = 5 - 1 = 4$$

Por lo tanto, de la tabla t-student Anexo E-01, se puede encontrar:

$$t_{n-1} = 2,132$$

El estadístico t calculado se establece mediante la Ecuación 33:

$$t_c = \frac{\bar{d} - \bar{D}}{\frac{S_d}{\sqrt{n}}} \quad \text{Ecuación 33}$$

Donde:

$\bar{d}$ : Media de la diferencia de los datos de las dos variables dependientes (Valores de esfuerzo máximo a tracción).

$\bar{D}$ : Media del valor cualitativo de la hipótesis nula.

$S_d$ : Desviación estándar de la muestra se establece con la Ecuación 34.

$$S_d = \sqrt{\frac{\sum (d_i - \bar{d})^2}{n - 1}} \quad \text{Ecuación 34}$$

Donde:

$d_i$ : Es la diferencia entre los valores de esfuerzo máximo de tracción

Para los valores de esfuerzo máximo de tracción, los resultados obtenidos de la Tabla 26 y Tabla 27, asimismo se despeja las Ecuación 33 y Ecuación 34 y se obtiene:

$$\bar{d} = 0,318$$

$$\sum (d_i - \bar{d})^2 = 162,452$$

$$S_d = \sqrt{\frac{162,452}{4}}$$

$$S_d = 6,373$$

$$t_c = \frac{0,318 - 0}{\frac{6,373}{\sqrt{5}}}$$

$$t_c = 0,112$$

Para este caso en especial cumple la segunda condición de la Ecuación 31.

$$t_{n-1} > t_c$$

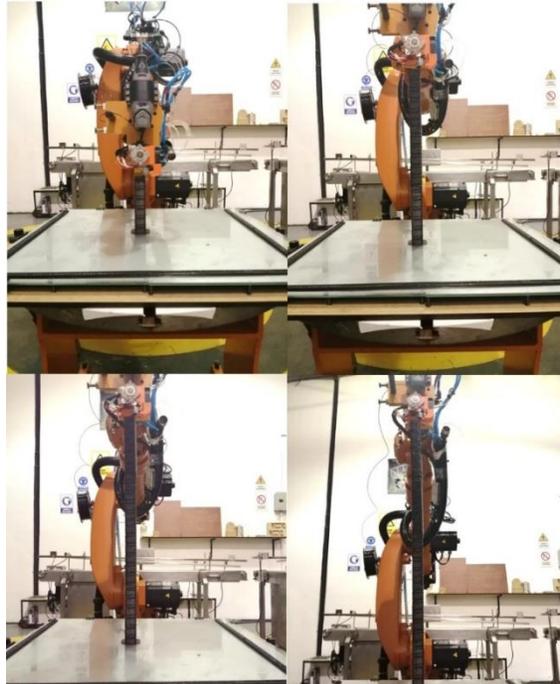
$$2,1318 > 0,112$$

Por lo que se rechaza la hipótesis nula y se valida la hipótesis alternativa, con un nivel de significancia del 5%, el esfuerzo máximo a tracción de las probetas si aumenta con la impresión 3D por sobre-extrusión.

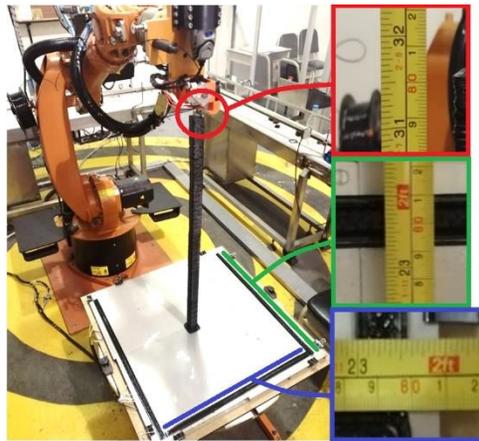
#### **4.4.2. Validación de la hipótesis de volumen de trabajo**

Esta hipótesis se validó de manera teórica, como lo indica (Diana Sánchez Guerrero, 2014), por medio de una descripción detallada de las variables comprobadas a través de la equivalencia de grupos o en este caso de objetos, tomada de (Roberto Hernández Sampieri, Carlos Fernández Collado, & Pilar Baptista Lucio, 1997).

Se tomó en cuenta dos características relevantes, para comparar el volumen de trabajo del proyecto, estas son: el costo económico de la herramienta y sus principales especificaciones, el volumen obtenido es  $60*60*80 \text{ cm}^3$  como se puede observar en la Figura 100 y Figura 101.



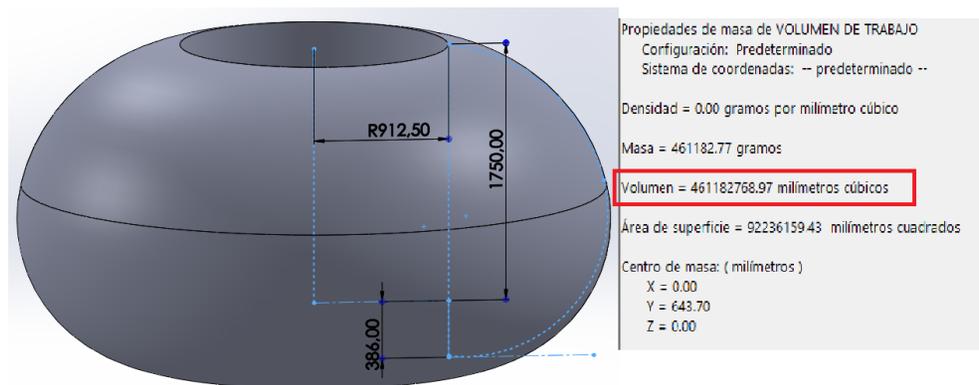
*Figura 100.* Creación de volumen



*Figura 101.* Comprobación del volumen

### Validación por volumen máximo

En la sección 2.1.1 Parámetros de diseño se define el volumen máximo del proyecto y la **Figura 102** muestra el cálculo a través del software SolidWorks en la pestaña “Calcular” opción “Propiedades Físicas”.



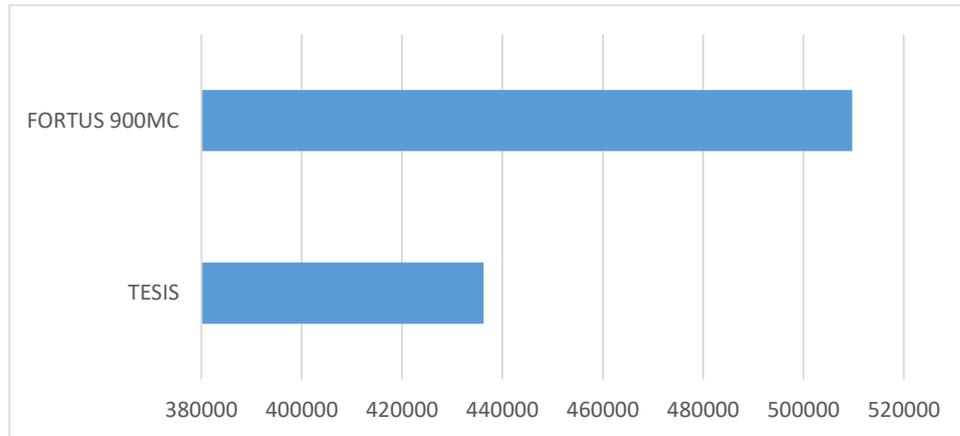
**Figura 102.** Volumen de trabajo permisible para el proyecto

El volumen máximo se compara con la máquina de mayor volumen de trabajo en el mercado nacional la cual es una impresora 3D modelo FORTUS 900MC (Anexo E-04), ésta se encuentra en Centro de Fomento Productivo Metalmecánico Carrocero de Ambato, además en la sección 4.5 Análisis económico, se puede obtener un precio neto de la herramienta con todos los accesorios que la hace funcional por \$1564.30, se toma en cuenta este parámetro y se le añade un costo aproximado por brazo robótico de \$70000.00 con un costo total de \$71564.30.

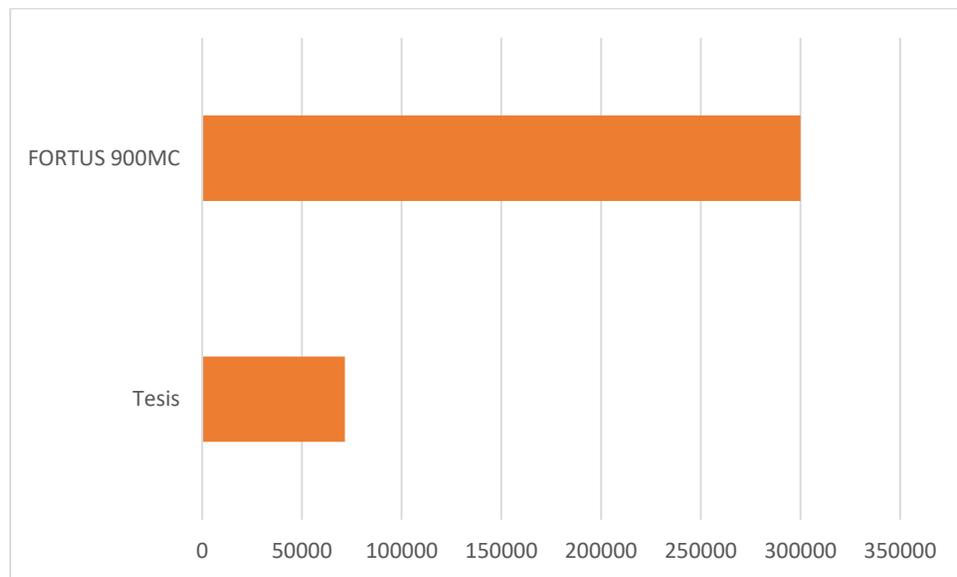
**Tabla 29**

*Comparación por volumen máximo*

	Impresoras	
	Tesis	FORTUS 900MC
<b>Costo</b>	\$71564.30	\$300000.00
<b>Eje X</b>		91.44 cm
<b>Eje Y</b>		60.96cm
<b>Eje Z</b>		91.44cm
<b>Volumen total cm3</b>	461182.769cm3	509703.23cm3
<b>Velocidad en tiempos muertos</b>	2000mm/s	900mm/s



**Figura 103.** Comparación por volumen máximo



**Figura 104.** Comparación de costos para el volumen máximo

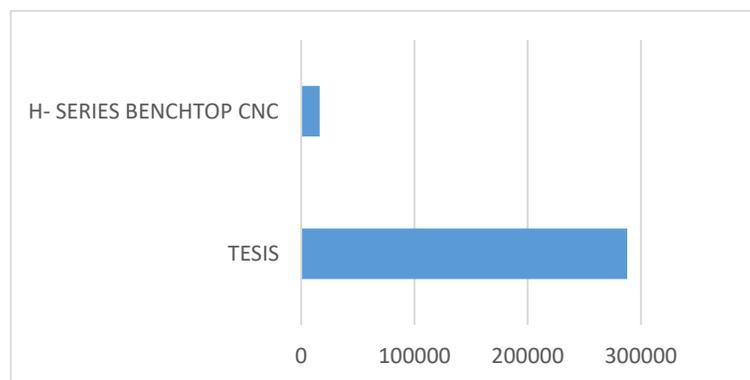
En la Tabla 29 y Figura 103 se muestran los volúmenes en  $\text{cm}^3$ , destaca que la máquina FORTUS 900MC aventaja al proyecto con un 10.5% más de volumen, pero con una diferencia notoria entre costos (Figura 104), la implementación a un brazo robótico es cuatro veces más barata que la adquisición del FORTUS 900MC y su velocidad en tiempos muertos es el doble por lo que estos se mejoran con un brazo robótico.

## Validación por especificaciones

La especificación discriminante del proyecto es la utilización de la manufactura híbrida por lo que, se encuentra una impresora de este tipo llamada H-SERIES BENCHTOP CNC, cuyas especificaciones se encuentran en el anexo E-03 y se las compara en la Tabla 30.

**Tabla 30**  
*Comparación por especificaciones*

	Impresoras	
	H- SERIES BENCHTOP CNC	Tesis
<b>Costo</b>	\$6900.00 (3 herramientas de manufactura aditiva y 2 de manufactura sustractiva) más envío e impuestos	\$1564.30
<b>Costo en relación a una herramienta de manufactura aditiva y una de manufactura sustractiva</b>	\$2760.00 más envío e impuestos	\$1564.30
<b>Diámetro de la herramienta de corte</b>	1/8 in	1/8 in
<b>Eje X</b>	41.6 cm	60 cm
<b>Eje Y</b>	18.6cm	60 cm
<b>Eje Z</b>	21cm	80cm
<b>Volumen de trabajo</b>	16248.96cm <sup>3</sup>	288000 cm <sup>3</sup>
<b>Incremento</b>		1672.42%



**Figura 105.** Comparación por especificaciones

Se analiza H-SERIES BENCHTOP CNC por ser la una de las pioneras en cuanto se refiere a manufactura híbrida similar al proyecto en curso, al igual que en el caso anterior el volumen de trabajo de la tesis es 1672.42% mayor, ver Tabla 30 y Figura 105.

#### 4.5. Análisis económico

En la Tabla 31, se detalla los gastos generados para el desarrollo del proyecto, tanto en la herramienta, caja de control y cama caliente.

**Tabla 31**  
*Análisis económico*

CANTIDAD	DETALLE	VALOR UNITARIO \$	VALOR TOTAL \$
<b>Sistema Mecánico</b>			
1	Mecanizado de las piezas	280.00	280.00
1	Servicio de torno	30.00	30.00
1	Servicio de corte laser de metal	38.50	38.50
1	Servicio de corte laser en MDF	3.50	3.50
32	Resortes para nivelar la cama caliente	0.80	25.60
1	Servicio de doblado de tol	10.00	10.00
	Múltiples tornillos y tuercas	18.00	18.00
	Gastos varios	45.00	45.00
	<b>Subtotal 1</b>		<b>447.10</b>
<b>Sistema Eléctrico y de Control</b>			
1	Titan Aereo, Block Volcano, Nozzel volcano	325.00	325.00
	Flete y reempaquetado de componentes	110.00	110.00
	Pago de entrada y salida de divisas	30.00	30.00
	USB	6.00	6.00
	Mototool	70.00	70.00
	Camas caliente	310.00	310.00
	Conectores DB	87.00	87.00
	Cables y conectores tipo "U"	38.00	38.00
	Portafusible, fusible y switch	1.20	1.20
	Materiales varios	20.00	20.00
	Licencia de KUKA prc	120.00	120.00
	<b>Subtotal 2</b>		<b>1117.20</b>
<b>Análisis de materiales</b>			
7	Impresión de probeta sin sobreextrusión	3.00	21.00
8	Impresión de probetas con sobreextrusión	4.50	36.00
10	Ensayo de probetas	11.20	112.00
2	Curvas de ingeniería	2.80	5.60
	<b>Subtotal 3</b>		<b>174.60</b>
	<b>TOTAL</b>		<b>\$1738.90</b>

El costo total para la implementación suma en total \$1738.90, el cual comparado con otras herramientas comerciales con el mismo propósito cuyo precio bordea los \$2800.00, se verifica que el proyecto es factible económicamente.

#### 4.6. Análisis costo beneficio

La directriz para el cálculo de costo beneficio según Blank, Leland & Tarquin, Anthony (1998), determinan a BC como el valor costo beneficio:

- Si  $BC \geq 1.0$  se determina que el proyecto si es económicamente aceptable.
- Si  $BC < 1.0$  se determina que el proyecto no es económicamente aceptable.
- Si  $BC = 1.0$  el proyecto está muy cerca de ser económicamente aceptable

La Tabla 32 muestra los parámetros escogidos entre el beneficio de implementar un sistema de prototipado rápido y fresado hecho en el laboratorio de Robótica Industrial de Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE sede Latacunga, frente a la adquisición de una máquina con características similares pero que se debe importar y añadir costos adicionales para obtener todas las ventajas de ésta.

**Tabla 32**

*Análisis costo beneficio*

Parámetros	Tesis	H- SERIES BENCHTOP CNC
Costo por una herramienta de impresión y una herramienta de fresado	\$1564.30	\$2760.00
<b>Total</b>	\$1564.30	\$2760.00

De la tabla se toma como valor neto actual (VAN) al costo de adquirir una máquina H- SERIES BENCHTOP CNC y al valor actual de la inversión (VAP) al costo del desarrollo del proyecto de tesis, el resultado se indica en la Ecuación 35 de Blank, Leland & Tarquin, Anthony (1998).

$$BC = \frac{VAN}{VAP} \quad \text{Ecuación 35}$$

$$BC = \frac{2760.00}{1564.30}$$

$$BC = 1.76$$

El valor calculado demuestra que el proyecto es económicamente aceptable y existe un beneficio si se desea implementar a un brazo robótico, un sistema de prototipado rápido y una etapa final de acabado.

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. Conclusiones

Se diseñó e implementó un sistema de impresión 3D mediante el brazo robótico KUKA KR16, para el prototipado rápido; se utilizó el software libre SLIC3R con la técnica de sobre-extrusión y en la etapa final de acabado se utilizó el software Autodesk Fusion360, con el fin de obtener piezas de mayor tamaño, con un volumen de trabajo de  $600 \times 600 \times 800 \text{ mm}^3$ , en el que se logró el movimiento cartesiano del brazo robótico en cada punto.

Los ensayos mecánicos de tracción demostraron que las piezas manufacturadas con los parámetros de sobre-extrusión y una etapa final de acabado presentan un comportamiento más homogéneo con una variación de datos de 7.97%, siendo así más estable en relación a piezas manufacturadas de manera normal con una variación del 11.78%, asimismo desde punto de vista de diseño el uso de piezas con sobre-extrusión tienden a aproximarse con menor tolerancia a la media por lo que garantiza la funcionalidad de elementos creados bajo esta técnica.

La velocidad al ejecutar el proyecto en tiempos muertos alcanza los 2000mm/s, ya sea al ubicar el robot en las posiciones de home, específicas y en movimientos rápidos, duplica a las máquinas comerciales como la FORTUS 900MC, por lo que el tiempo de producción se mejora notablemente, con un gran volumen máximo de  $461182.769 \text{ cm}^3$ , a un cuarto del costo.

Los componentes seleccionados fueron los que mejores características y prestaciones proporcionaron para el desarrollo del proyecto, el elemento de mayor relevancia fue tarjeta MKS GEN por su robustez y control de todos los componentes en ella acoplados, en especial para mantener la temperatura idónea de la cama caliente y el extrusor durante la impresión.

El diseño mecánico del proyecto fue validado mediante un software CAD CAE con el que se obtuvo un factor de seguridad de 6.45 de la herramienta de corte en el punto de esfuerzo máximo, se seleccionó el PLA con fibra de carbono como material base para las probetas ya que es apto para la manufactura híbrida por sus propiedades mecánicas, las probetas realizadas con este material no necesitaron sujeción extra por lo que la etapa final de acabado se realizó directamente en la mesa de trabajo.

Se utilizó el plugin Grasshopper en Rhinoceros, para coordinar los movimientos entre el brazo robótico y los códigos generados para la impresión 3D y el fresado, en el software con el complemento Kuka|prc se programa el algoritmo necesario para la ejecución del proyecto y generar un archivo de salida .src en lenguaje entendible para el robot es decir KRL.

Debido a que la Universidad de las Fuerzas Armadas tiene brazos robóticos que permiten el uso para diferentes aplicaciones, cuyas características de precisión, repetibilidad y velocidad son mayores a las ofrecidas en el mercado, la implementación de una herramienta para FDM y Fresado resulta muy atractiva y económica.

Se descartó el empleo del software CAMRob, aunque admite archivo de mayor tamaño este genera retardos ya que por su configuración llega a los puntos con una velocidad de 0, y al existir una gran densidad de puntos en el prototipado rápido el movimiento del robot es lento.

## 5.2.Recomendaciones

- La calibración de los ejes a través de la unidad UEA es necesaria de manera periódica e indispensable en nuevas aplicaciones de la celda, pues el brazo robótico está en constante descalibración debido a choques, frenos bruscos o el accionamiento de los finales de carrera.
- Se debe realizar el mantenimiento de los mecanismos internos del brazo robótico para que la precisión y repetibilidad no se altere de manera que afecten a proyectos posteriores.
- Verificar el tamaño del archivo de salida que se va ejecutar en el brazo robótico, pues este está limitado por la memoria interna de máximo 2MB y la memoria RAM del KRC, por lo que se debe utilizar la boquilla más grande y la mayor altura de capa permisible.
- Verificar el cero de las herramientas antes de realizar cualquier trabajo, pues este puede variar al apagar y encender nuevamente el KRC.
- Ubicar la cama caliente de acuerdo a las marcas en la mesa de trabajo y sujetar firmemente con las bridas de sujeción, precalentar antes de comenzar con la tarea de prototipado.
- Evitar trabajar en un área con corrientes de aire fuertes, para evitar el *warping*, de igual manera se puede colocar goma en spray para mejorar la adhesión.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AiBuild. (2019). Ai Build Technology. Recuperado 16 de julio de 2019, de <https://ai-build.com/technology.html#hardware>
- American Friction Welding. (2018). Putting Linear Friction Welding To Use. Recuperado 13 de noviembre de 2018, de American Friction Welding website: <https://teamafw.com/putting-linear-friction-welding-to-use/>
- Anonymous Projects. (2018). Materiales que se pueden utilizar para imprimir en 3D. Recuperado 13 de noviembre de 2018, de Anonymous-projects.com website: <http://anonymous-projects.com/materiales-que-se-pueden-utilizar-para-imprimir-en-3d/>
- Arturo Izurieta Valery. (1997). *Manual para la Medicion de la Eficiencia de Manejo de un Sistema de Areas Protegidas y sus Zonas de Influencia, aplicado a un Area de Conservacion en Costa Rica*. Bib. Orton IICA / CATIE.
- ASTM International. (2014). *Test Method for Tensile Properties of Plastics D638-14*. <https://doi.org/10.1520/D0638-14>
- Blank, Leland, & Tarquin, Anthony. (1998). *Ingenieria Económica*. Recuperado 1 de diciembre de 2019, de [https://www.academia.edu/37365579/Ingenieria\\_Econ%C3%B3mica\\_-\\_6ta\\_Edici%C3%B3n\\_-\\_Leland\\_Blank\\_y\\_Anthony\\_Tarquin.pdf](https://www.academia.edu/37365579/Ingenieria_Econ%C3%B3mica_-_6ta_Edici%C3%B3n_-_Leland_Blank_y_Anthony_Tarquin.pdf)
- Carles Ferrero Ibáñez. (2016). FERRERO - Aplicación del modelado digital y la impresión 3D en el proceso de elaboración de props. Recuperado 5 de noviembre de 2018, de <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/91973/FERRERO%20-%20Aplicaci%C3%B3n%20del%20modelado%20digital%20y%20la%20impresi%C3%B3n>

n%203D%20en%20el%20proceso%20de%20elaboraci%c3%b3n%20de%20props....pdf?  
sequence=1&isAllowed=y

Createc3D. (2019, junio 27). Cama caliente MK2A 300 x 300 mm de aluminio. Recuperado 27 de junio de 2019, de Createc 3D Shop—La tienda del maker—Impresoras 3D Granada website: <http://createc3d.com/shop/es/comprar-electronica-impresora-3d/824-cama-caliente-mk2a-300-x-300-mm-de-aluminio.html>

Diabase Engineering LLC. (2017). Single Flexion retrofit kit for single extruder. Recuperado 12 de noviembre de 2018, de <https://flexionextruder.com/shop/single/>

Diabase Engineering LLC. (2018a). H-Series Software. Recuperado 12 de noviembre de 2018, de <https://www.diasemachines.com/blog/h-series-software>

Diabase Engineering LLC. (2018b). Is The H-Series Like A Duck? Recuperado 12 de noviembre de 2018, de <https://www.diasemachines.com/blog/master-of-none>

Diabase Engineering LLC. (2018c). Multi-Material Printing. Recuperado 30 de octubre de 2018, de <https://www.diasemachines.com/blog/multi-material-printing>

Diabase Engineering LLC. (2018d). Single Flexion retrofit kit for single extruder | Flexion Extruder. Recuperado 28 de enero de 2019, de <https://flexionextruder.com/shop/single/>

Diabase Engineering LLC. (2018e). The H-Series Machine. Recuperado 12 de noviembre de 2018, de <https://www.diasemachines.com/technology>

Diana Sánchez Guerrero. (2014, mayo 21). VALIDACIÓN DE HIPOTESIS. Recuperado 28 de noviembre de 2019, de Prezi.com website: [https://prezi.com/ej4e\\_3zwawgu/validacion-de-hipotesis/](https://prezi.com/ej4e_3zwawgu/validacion-de-hipotesis/)

DIMA 3D. (2015, julio 2). Tratamientos superficiales post-impresión 3D (VI). Tratamientos químicos (II). Recuperado 13 de noviembre de 2018, de Impresión 3D Prototipado | 3D

Printing Prototyping | Dima 3D website: <http://www.dima3d.com/tratamientos-superficiales-post-impresion-iv-tratamientos-quimicos-ii/>

Dremel. (2019). Minitorno Dremel 3000 130w + 10 Accesorios Mini Torno—\$ 3.051,50. Recuperado 3 de junio de 2019, de [https://articulo.mercadolibre.com.ar/MLA-706145433-minitorno-dremel-3000-130w-10-accesorios-mini-torno-\\_JM](https://articulo.mercadolibre.com.ar/MLA-706145433-minitorno-dremel-3000-130w-10-accesorios-mini-torno-_JM)

E3D. (2018a). E3D V6 Hotends. Recuperado 3 de octubre de 2018, de <https://e3d-online.com/v6#customise>

E3D. (2018b). Lite6 HotEnd. Recuperado 4 de octubre de 2018, de <https://e3d-online.com/lite6>

E3D. (2018c). Volcano Kits. Recuperado 4 de octubre de 2018, de <https://e3d-online.com/volcano-kits>

Enrique Esparza. (2019). Tabla Excel de Velocidades de Corte. Recuperado 24 de mayo de 2019, de Maquineros CNC website: <https://maquineros.com/Producto/tabla-excel-velocidades-corte/>

Esperanza Núñez González. (2018). MAQUINAS UNIVERSALES DE ENSAYOS Electromecánicas Modelos MTE-10/25/50. Recuperado 1 de diciembre de 2019, de <https://docplayer.es/79337529-Maquinas-universales-de-ensayos-electromecanicas-modelos-mte-10-25-50.html>

Federico Vázquez. (2013, mayo 9). Tablas de valores de los coeficientes. Recuperado 29 de mayo de 2019, de VFísica website: <https://vallyblog.wordpress.com/fisica-2013/2-periodo/friccion/coeficiente-de-friccion/tablas-de-valores-de-los-coeficientes/>

Feroxa S.A. (2018). XTC-3D Recubrimiento Epoxi para impresiones 3D. Recuperado 13 de noviembre de 2018, de Feroxa, S.A. website: <http://www.feroca.com/es/epoxi-smooth-on/238-xtc-3d-recubrimiento-epoxi-para-impresiones-3d.html>

Filament2Print. (2018a). E3D Titan Extruder original | Filament2Print. Recuperado 28 de enero de 2019, de <https://filament2print.com/es/extrusores/814-e3d-titan-extruder-original.html>

Filament2Print. (2018b). Extrusor E3D Titan Aero Original | Filament2Print. Recuperado 28 de enero de 2019, de <https://filament2print.com/es/extrusores/803-extrusor-titan-aero-original.html>

Filament2print. (2018, diciembre 11). Tipos de extrusores 3D y HotEnd. Recuperado 2 de enero de 2019, de [https://filament2print.com/es/blog/36\\_tipos-extrusores-y-hotend.html](https://filament2print.com/es/blog/36_tipos-extrusores-y-hotend.html)

Francisco Mata Cabrera. (2005). *Aportación al maquinado de los plásticos reforzados*. VIII(Nº 29), 34-39.

Hyper Mods. (2018). Qué es un Mototool? Conocido como Dremel—HYPER MODS. Recuperado 24 de enero de 2019, de <http://hypermods.com/mototool-conocido-la-gran-mayoria-dremel/>

Impresoras3D. (2017a). Carbonfil: Filamento Fibra De Carbono. Recuperado 4 de junio de 2019, de Impresoras3d.com website: <https://www.impresoras3d.com/carbonfil-filamento-fibra-de-carbono/>

Impresoras3D. (2017b, enero 12). ABS y PLA: Diferencias, ventajas y desventajas. Recuperado 8 de octubre de 2018, de Impresoras3d.com website: <https://www.impresoras3d.com/abs-y-pla-diferencias-ventajas-y-desventajas/>

Impresoras3D. (2018, septiembre 18). Top 5 de los mejores materiales técnicos para impresión 3D. Recuperado 13 de noviembre de 2018, de Impresoras3d.com website: <https://www.impresoras3d.com/top-5-de-los-mejores-materiales-tecnicos-para-impresion-3d/>

- Impresoras3D. (2019a, mayo 12). RAMPS 1.4 SB Premium. Recuperado 5 de junio de 2019, de Impresoras3d.com website: <https://www.impresoras3d.com/producto/ramps-1-4-sb-premium/>
- Impresoras3D. (2019b, junio 27). Cama caliente MK2. Recuperado 27 de junio de 2019, de Impresoras3d.com website: <https://www.impresoras3d.com/producto/cama-caliente-mk2/>
- Karunakaran, K. P., Suryakumar, S., Pushpa, V., & Akula, S. (2010). Low cost integration of additive and subtractive processes for hybrid layered manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 26(5), 490-499. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2010.03.008>
- Kerbrat, O., Mognol, P., & Hascoët, J.-Y. (2011). A new DFM approach to combine machining and additive manufacturing. *Computers in Industry*, 62(7), 684-692. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2011.04.003>
- KUKA. (2019). KUKA.Sim. Recuperado 3 de julio de 2019, de KUKA AG website: [https://www.kuka.com/es-es/productos-servicios/sistemas-de-robot/software/planificación-proyección-servicio-seguridad/kuka\\_sim](https://www.kuka.com/es-es/productos-servicios/sistemas-de-robot/software/planificación-proyección-servicio-seguridad/kuka_sim)
- KUKA AG. (2018). KUKA industrial intelligence. Recuperado 22 de noviembre de 2018, de KUKA AG website: <https://www.kuka.com/es-es>
- KUKA Roboter GmbH. (2003). *SOFTWARE KR C2 / KR C3 Expert Programming KUKA System Software (KSS) Release 5.2*. 183.
- KUKA Roboter GmbH. (2004, abril 28). Camrob r10. Recuperado 13 de noviembre de 2018, de [http://robot.zaab.org/wp-content/uploads/2014/04/camrob\\_r10\\_en.pdf](http://robot.zaab.org/wp-content/uploads/2014/04/camrob_r10_en.pdf)

- Lasluisa Naranjo Héctor Geovanny. (2017). *Investigación del prototipado rápido de piezas con orientación de fibras según su perfil mediante el robot KUKA KR16 de la ESPE-EL*. Universidad de la Fuerzas Armadas ESPE, Latacunga.
- León, M. A., & Romero, P. A. (2018, junio 19). INVESTIGACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS DE MATERIALES FLEXIBLES IMPRESOS EN 3D PARA EL DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE ÓRTESIS FUNCIONAL DE MANO, CONTROLADA AUTOMÁTICAMENTE PARA FACILITAR HABILIDADES MOTRICES. Recuperado 1 de diciembre de 2019, de <https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/14692/1/T-ESPEL-MEC-0135.pdf>
- León, W. (2013, septiembre 2). Prueba de Hipotesis para Muestras Pequeñas [Ingeniería]. Recuperado 1 de diciembre de 2019, de <https://es.slideshare.net/williamleon20/prueba-de-hipotesis-para-muestras-pequeas-est-ind-clase03>
- Leon3D. (2017). GUÍA DE RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS EN IMPRESIÓN 3D. Recuperado 13 de noviembre de 2018, de LEON3D website: <https://www.leon-3d.es/guia-de-resolucion-de-problemas/>
- Leonidas Leonidou. (2019, abril 2). Diseñar el AiCell. Recuperado 16 de julio de 2019, de <https://medium.com/ai-build-techblog/engineering-the-aicell-e65a4deb0f3c>
- Mariano. (2011, junio 17). Mecanizado de plásticos | Tecnología de los Plásticos. Recuperado 4 de febrero de 2019, de Mecanizado de plásticos | Tecnología de los Plásticos website: <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/06/mecanizado-de-plasticos.html>
- Marinescu, G. C., Stamin, Ş., Tică, B., & Duţă, A. (2018). Analysis of Problems during 3D Printing Manufacturing Process. *Applied Mechanics and Materials*, 880, 297-302. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.880.297>

- Mikell P. Groover. (2007). *Fundamentos de manufactura moderna* (Tercera). Mexico: McGraw Hill.
- Newman, S. T., Zhu, Z., Dhokia, V., & Shokrani, A. (2015). Process planning for additive and subtractive manufacturing technologies. *CIRP Annals*, 64(1), 467-470.  
<https://doi.org/10.1016/j.cirp.2015.04.109>
- Orballo Printing. (2019, junio 27). Cama caliente MK3 Aluminio 300x200. Recuperado 27 de junio de 2019, de Orballo Printing website: <http://orballoprinting.com/es/home/107-cama-caliente-mk3-aluminio-300x200-.html>
- Pixel Sistemas. (2018). ABSPlus—Pixel Sistemas [Producto]. Recuperado 8 de octubre de 2018, de <https://www.pixelsistemas.com/fabricacion-aditiva-impresion-3d/tecnologia-fdm/materiales/absplus>
- Rajaa Issa. (2010, febrero 1). *Matematicas\_Esenciales para diseño computacional*. Recuperado 3 de diciembre de 2019, de <Http://www.miatd.org/> website: [http://www.miatd.org/Contenidos/Matematicas\\_Esenciales.pdf](http://www.miatd.org/Contenidos/Matematicas_Esenciales.pdf)
- RepRap. (2018a, agosto 19). Rambo. Recuperado 6 de junio de 2019, de <https://reprap.org/wiki/Rambo>
- RepRap. (2018b, diciembre 28). MKS GEN. Recuperado 5 de junio de 2019, de [https://reprap.org/wiki/MKS\\_GEN](https://reprap.org/wiki/MKS_GEN)
- Robert L. Mott,P.E. (2006). *Diseño de elementos de maquinas* (cuarta). México: Pearson Educación.
- Roberto Hernández Sampieri, Carlos Fernández Collado, & Pilar Baptista Lucio. (1997). *Metodología de la investigación* (Tercera). México: McGraw-Hill : Interamericana.

- Robótica Industrial. (2019, febrero 3). Impresión en 3D con Robot. Recuperado 16 de julio de 2019, de <https://robotica-industrial.com/2019/02/03/impresion-en-3d-con-robot/>
- Robotmaster. (2019). Robotmaster CAD/CAM para robots (Programación Off-Line). Recuperado 3 de julio de 2019, de <https://www.robotmaster.com/es/>
- Robots in Architecture. (2015). Association for Robots in Architecture | KUKA|prc. Recuperado 1 de diciembre de 2019, de <https://www.robotsinarchitecture.org/kuka-prc>
- Robots in Architecture. (2019). Association for Robots in Architecture | KUKA|prc. Recuperado 3 de julio de 2019, de <https://www.robotsinarchitecture.org/kuka-prc>
- RobotWorx. (2018). KUKA KR 16. Recuperado 13 de septiembre de 2018, de RobotWorx website: <https://www.robots.com/robots/kuka-kr-16>
- Simplify3D. (2018). Print Quality Troubleshooting Guide | Simplify3D Software. Recuperado 22 de agosto de 2018, de </support/print-quality-troubleshooting/>
- Simplify3D. (2019). Simplify3D Software | All-In-One 3D Printing Software. Recuperado 3 de julio de 2019, de <https://www.simplify3d.com/>
- Slic3r. (2019). Slic3r—Open source 3D printing toolbox. Recuperado 3 de julio de 2019, de <https://slic3r.org/>
- Susana Sánchez Restrepo. (2017, octubre 9). FDM o modelado por deposición fundida, te explicamos todo! Recuperado 13 de noviembre de 2018, de 3Dnatives website: <https://www.3dnatives.com/es/modelado-por-deposicion-fundida29072015/>
- TodoHobby. (2016). IMPRIMACION ALTA DENSIDAD GRIS OSCURO SPRAY 400ML - TodoHobby—Tienda de Aeromodelismo y radiocontrol. Recuperado 13 de noviembre de 2018, de <http://www.todohobby.net/es/pinturas/38494-imprimacion-alta-densidad-gris-oscuro-spray-400ml.html>

- Tolcraft. (2018). Mototool 135watts Marca Tolcraft Nuevo Con Garantía—U\$S 45,00. Recuperado 24 de enero de 2019, de [https://articulo.mercadolibre.com.ec/MEC-418490985-mototool-135watts-marca-tolcraft-nuevo-con-garantia-\\_JM](https://articulo.mercadolibre.com.ec/MEC-418490985-mototool-135watts-marca-tolcraft-nuevo-con-garantia-_JM)
- Toolmex Industrial Solutions. (2014, mayo 20). 2014 Catálogo de Herramienta de Corte. Recuperado 24 de mayo de 2019, de Issuu website: <https://issuu.com/toolmexcorporation/docs/tmx-cutting-tool-catalog-2013-spani>
- Total. (2018). Mototool Multiproposito 13w Marca Total—U\$S 40,00. Recuperado 24 de enero de 2019, de [https://articulo.mercadolibre.com.ec/MEC-418285157-mototool-multiproposito-13w-marca-total-\\_JM](https://articulo.mercadolibre.com.ec/MEC-418285157-mototool-multiproposito-13w-marca-total-_JM)
- Ultimaker. (2018). TPU 95A: Print durable and flexible parts | Ultimaker. Recuperado 13 de noviembre de 2018, de Ultimaker.com website: <https://ultimaker.com/en/products/materials/tpu-95a>
- Ultimaker Cura. (2019). Ultimaker Cura: Powerful, easy-to-use 3D printing software. Recuperado 3 de julio de 2019, de Ultimaker.com website: <https://ultimaker.com/software/ultimaker-cura>
- Ventura, V. (2014, diciembre 3). ¿Qué es G-Code? Recuperado 13 de noviembre de 2018, de Polaridad.es website: <https://polaridad.es/que-es-g-code/>

# ANEXOS



# ESPE

**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS**  
**INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA**

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

**CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA**

## CERTIFICACIÓN

Se certifica que el presente trabajo fue desarrollado por el señor **Kevin Andrés León Tapia** y la señorita **Karina Magaly Ramos Chancusig**.

En la ciudad de Latacunga, a los 9 días del mes de diciembre del 2019.

**Aprobado por,**

Ing. Fausto Acuña  
**DIRECTOR DEL PROYECTO**

Ing. Darío Mendoza  
**DIRECTOR DE CARRERA**

Dr. Rodrigo Vaca  
**SECRETARIO ACADÉMICO**