



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA**

**TEMA**

“PROCESO DE FABRICACIÓN DE UNA ARTICULACIÓN POLICÉNTRICA DE RODILLA, USANDO LA METODOLOGÍA DE DISEÑO PARA LA FABRICACIÓN Y MANUFACTURA (DFMA).”

TRABAJO DE GRADO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERO EN MECTARÓNICA

**AUTOR**

JENIFFER ALEXANDRA ARELLANO GUEVARA

**DIIRECTOR**

MSc. FERNANDO VINICIO VALENCIA AGUIRRE

**IBARRA, 2023**



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

## BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

### AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN

#### A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

#### 1. Identificación de la obra

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que se a publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
<b>Cédula de Identidad:</b>	1003332127		
<b>Apellidos y Nombres:</b>	Arellano Guevara Jeniffer Alexandra		
<b>Dirección:</b>	Ibarra- Yacucalle		
<b>Email:</b>	<a href="mailto:jaarellanog@utn.edu.ec">jaarellanog@utn.edu.ec</a>		
<b>Teléfono Fijo:</b>	-	<b>Teléfono Móvil:</b>	0968334835
DATOS DE LA OBRA			
<b>Título:</b>	“Proceso de fabricación de una articulación policéntrica de rodilla, usando la metodología de diseño para la fabricación y manufactura (DFMA).”		
<b>Autor:</b>	Arellano Guevara Jeniffer Alexandra		
<b>Fecha:</b>	6/2/2023		
<b>Programa:</b>	Pregrado		
<b>Título por el que Opta:</b>	Ingeniero en Mecatrónica		
<b>Director:</b>	Ing. Fernando Valencia, MSc.		

## 2. Constancias

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que se asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamos por parte de terceros.

Ibarra, a los 6 días del mes de febrero del 2023



---

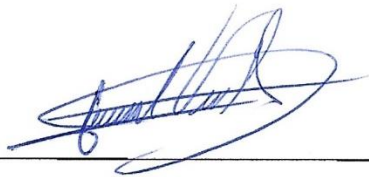
Firma:

Nombre: Jeniffer Alexandra Arellano Guevara

Cédula: 1003332127

### **Certificación**

En calidad de tutor del trabajo de grado titulado: “PROCESO DE FABRICACIÓN DE UNA ARTICULACIÓN POLICÉNTRICA DE RODILLA, USANDO LA METODOLOGÍA DE DISEÑO PARA LA FABRICACIÓN Y MANUFACTURA (DFMA).” certifico, que el presente trabajo fue desarrollado por el egresado Jeniffer Alexandra Arellano Guevara, bajo mi supervisión.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Fernando Valencia', is written over a horizontal line.

Ing. Fernando Valencia, MSc.  
DIRECTOR DEL PROYECTO

## **Agradecimientos**

En primer lugar, quiero agradecer a Dios, a mi madre por todo el apoyo incondicional que me ha brindado para que pueda cumplir una meta más en mi vida como es conseguir un título universitario, a mi abuelita por su cariño y sus consejos en los momentos difíciles, a mis hermanos, a mi novio quien más que un compañero ha sido mi soporte, mi guía y a mi hija quien con sus sonrisa y abrazos es el motor que me impulsa cada día.

A mi docente MSc. Fernando Valencia, por su paciencia y apoyo en el desarrollo de este trabajo, gracias a sus palabras y correcciones oportunas he podido culminar con tan anhelado objetivo.

A mis cotutores de tesis, ing. Víctor Erazo e ing. Cosme Mejía por cada instante que me dedicaron en aclarar cualquier duda he inquietud.

Al ing. Edwin Guevara por su colaboración y generosidad en compartir su gran experiencia y conocimiento en los temas que fueron útiles para culminar con ese proyecto.

## **Abstract**

The objective of this work is based on achieving the manufacture of an external, safe and economical polycentric knee joint with the most affordable production technology, previously the selection of two already existing knee joints on the market that meet the criteria will be developed. Of human gait.

Currently, there are a number of external knee prostheses such as: pneumatic, hydraulic, mechanical, monocentric and polycentric, all these joints are designed with the aim of controlling the movements of the knee joint, (one of the movements complex of the human body) naturally, but all these prosthetic joints are imported products, at high acquisition costs, which is why the analysis of the manufacturing processes of each of the elements that make up two joints is carried out commercial knee braces that meet the human gait criteria and a low-cost, functional, safe, comfortable, and aesthetic device with the most affordable technologies and materials in the Ecuadorian market will be proposed for Imbabura prosthesis patients in the city of Ibarra Ecuador.

With the objective of optimizing the manufacturing process, the simulation of the manufacturing process of the device is carried out by means of CAM, considering the manufacturing and assembly time.

## **Resumen**

El objetivo del presente trabajo se basa en conseguir la fabricación de una articulación policéntrica de rodilla externa, segura y económica con la tecnología de producción más asequible, previamente se desarrollará la selección de dos articulaciones de rodillas ya existentes en el mercado que cumplan con los criterios de marcha humana.

En la actualidad, existen un sin número de prótesis de rodilla externa como son: neumáticas, hidráulicas, mecánicas, monocéntricas y policéntricas, todas estas articulaciones están diseñadas con el objetivo de controlar los movimientos de la articulación de la rodilla, (uno de los movimientos más complejos del cuerpo humano ) de forma natural, pero, todas estas articulaciones protésicas son productos de importación, a elevados costos de adquisición, es por ello que se realiza el análisis de los procesos de fabricación de cada uno de los elementos que componen dos articulaciones de rodilla comerciales que cumplan con el criterio de marcha humana y se propondrá un dispositivo a bajo costo, funcionalidad, seguridad, comodidad y estética con las tecnologías y materiales más asequibles en el mercado ecuatoriano, para los pacientes de prótesis Imbabura de la ciudad de Ibarra Ecuador.

Con el objetivo de optimizar el proceso de fabricación se realiza la simulación del proceso de fabricación del dispositivo mediante CAM, considerando el tiempo de fabricación y ensamblaje.

## ÍNDICE

CAPÍTULO I .....	14
El Problema .....	14
1.1. Planteamiento del problema.....	14
1.2. Objetivos .....	15
1.2.1. Objetivo general.....	15
1.2.2. Objetivos específicos .....	15
1.3. Justificación .....	15
1.4. Alcance.....	16
1.5. Antecedentes.....	16
CAPÍTULO II.....	18
MARCO TEÓRICO .....	18
2.1. Marcha humana.....	18
2.1.1. Principales alteraciones en la marcha del amputado de miembro inferior.	19
2.2. Articulación de la rodilla.....	19
2.3. Biomecánica de la rodilla.....	20
2.3.1. Flexión .....	20
2.3.2. Extensión .....	20
2.4. Prótesis de miembro inferior.....	21
2.4.1. Prótesis de rodilla de tipo transfemoral. ....	21
2.4.2. Articulaciones de rodilla monocéntricas. ....	21
2.4.3. Articulaciones de rodilla policéntricas. ....	23
2.5. Articulación de rodilla policéntrica ÖSSUR 2000.....	24
2.6. Rodilla policéntrica Streifeneder 3A 20.....	25
2.7. Estudio de Materiales.....	26
2.7.1. Principales requerimientos en el estudio de materiales para prótesis. ....	27
2.7.2. Costo y disponibilidad.....	28
2.8. Métodos de Fabricación. ....	28
2.8.1. Procesos de manufactura. ....	29
2.9. Proceso de Fundición.....	29
2.9.1. Tipos de moldes .....	30
2.9.2. Proceso de fundición con moldes permanentes. ....	31
2.9.3. Parámetros para el diseño de piezas fundidas.....	31



2.9.5.	Flujo del metal fundido.....	35
2.9.10.	Vida de un molde permanente. ....	38
2.11.	Programación CNC.....	39
2.12.	Máquinas CNC .....	39
2.12.1.	Ventajas del mecanizado CNC.....	40
2.12.2.	Máquina fresadora CNC.....	40
2.12.3.	Máquina Torno CNC .....	41
2.12.	Parámetros de corte. ....	41
2.12.1.	Velocidad de corte.....	41
2.12.2.	Velocidad de avance.....	42
2.12.3.	Número de Revoluciones .....	42
2.12.4.	Profundidad de la pasada.....	42
2.13.	Relación de funciones del código G y operaciones de mecanizado. ....	42
2.14.	Costos de operación y de fabricación. ....	43
CAPÍTULO III.....		45
Marco metodológico .....		45
3.1.	Modelo de investigación. ....	46
3.2.	Estructura de la investigación. ....	46
3.2.1.	Fase 1: Investigación .....	46
3.2.2.	Fase 2: Generar alternativas de fabricación. ....	46
3.2.3.	Fase 3: Seleccionar una alternativa de fabricación. ....	47
3.2.4.	Fase 4: Simulación y Pruebas. ....	47
3.2.5.	Fase 5: Tiempo y costos. ....	47
CAPÍTULO IV .....		48
Resultados y Análisis.....		48
4.1.	Selección de dos prótesis de rodilla externa transfemoral. ....	48
4.2.	Requerimientos. ....	48
4.2.1.	Requerimientos del cliente. ....	48
4.2.2.	Requerimientos del ingeniero. ....	49
4.3.	Descripción de los componentes de Ossur 2000.....	50
4.4.	Descripción de los componentes de Streifeneder. ....	51
4.5.	Proceso de fabricación. ....	52
4.5.1.	Rediseño de prótesis .....	52
4.5.2.	Selección de los procesos de fabricación en base a la geometría. ....	56
4.5.3.	Selección del material para los moldes.....	57

4.5.4. Selección del material para mecanizado por arranque de viruta y mediante fundición.	57
4.6. Simulación mediante herramientas computacionales.	58
4.6.1. Propuestas de Fabricación.	60
4.7. Simulaciones CAM.	68
4.8. Selección de una alternativa.	74
4.9. Pruebas.	77
CAPÍTULO V.	89
Conclusiones y recomendaciones.	89
5.1. Conclusiones.	89
5.2. Recomendación.	90
Referencias.	91
Anexos.	97
Anexo 1: Funciones Código “G” y Código “M”.	97
Anexo 3: Matriz QFD.	100
Anexo 4: Planos.	100
Anexo 5: Hojas de procesos.	106

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b>	<i>Los planos del cuerpo [10].</i>	18
<b>Figura 2</b>	<i>Las fases de la marcha humana normal [10].</i>	19
<b>Figura 4</b>	<i>Movimiento de Extensión [10].</i>	21
<b>Figura 5</b>	<i>Articulación de rodilla monocéntrica 3W010-1 [30].</i>	22
<b>Figura 6</b>	<i>Rodilla policéntrica 3A1800 de Streifeneder [32].</i>	23
<b>Figura 7</b>	<i>Articulación de rodilla Ossur 2000 [33].</i>	24
<b>Figura 8</b>	<i>Componentes de la articulación de rodilla Ossur 2000.</i>	25
<b>Figura 9</b>	<i>Articulación de Rodilla Streifeneder 3A20 [34].</i>	26
<b>Figura 10</b>	<i>Proceso de fundición mediante moldeo.</i>	30
<b>Figura 11</b>	<i>Colada en Molde permanente metálico [43].</i>	30
<b>Figura 12</b>	<i>Moldeo en bloque de arena [43].</i>	31
<b>Figura 13</b>	<i>Proceso de moldeo y sus elementos.</i>	35
<b>Figura 14</b>	<i>Metodología aplicada</i>	45
<b>Figura 15</b>	<i>Partes de Total Knee 2000.</i>	50
<b>Figura 16</b>	<i>Componentes de Streifeneder 3A 20.</i>	51
<b>Figura 17</b>	<i>Comparación de la distancia entre centros.</i>	52
<b>Figura 18</b>	<i>Propuesta de prótesis de rodilla alternativa 1.</i>	55
<b>Figura 19</b>	<i>Propuesta de prótesis alternativa 2.</i>	56
<b>Figura 20</b>	<i>Análisis estático de Streifener.</i>	59
<b>Figura 21</b>	<i>Sistema de alimentación.</i>	64
<b>Figura 22</b>	<i>Molde del Eslabón superior.</i>	65
<b>Figura 23</b>	<i>Molde del Eslabón inferior</i>	65
<b>Figura 24</b>	<i>Moldes correspondientes al eje pivote y enlace de fondo.</i>	66
<b>Figura 25</b>	<i>Moldes correspondientes a la carcasa y chasis.</i>	67
<b>Figura 26</b>	<i>Fresado CNC de los moldes correspondientes al Eslabón superior.</i>	77
<b>Figura 27</b>	<i>Moldes construidos del Eslabón Superior.</i>	78
<b>Figura 28</b>	<i>Fundición del metal.</i>	79
<b>Figura 29</b>	<i>Pre calentamiento de los moldes.</i>	79
<b>Figura 30</b>	<i>Centrado de la matriz.</i>	80
<b>Figura 31</b>	<i>Vertido de la colada a 750°C.</i>	80
<b>Figura 32</b>	<i>Extracción de la pieza fundida de la matriz.</i>	81
<b>Figura 33</b>		81
<b>Figura 34</b>	<i>Pieza fundida.</i>	82

<b>Figura 35</b> <i>Matriz rediseñada.</i> .....	82
<b>Figura 36</b> <i>Pieza fundida (Segunda prueba).</i> .....	83
<b>Figura 37</b> <i>Eslabón superior sujeta para eliminar el sistema de alimentación.</i> .....	84
<b>Figura 38</b> <i>Operación de Taladrado</i> .....	84
<b>Figura 39</b> <i>Taladrado del tope.</i> .....	85
<b>Figura 40</b> <i>Operación de roscado.</i> .....	85
<b>Figura 41</b> <i>Pieza final.</i> .....	86
<b>Figura 42</b> <i>Pieza Terminada.</i> .....	86

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Características de la articulación de rodilla 3W010-1 [30]. .....	22
Tabla 2 Características de la articulación de rodilla policéntrica 3A1800 [32]. .....	23
Tabla 3 Principales características de la articulación Ossur 2000 [33]. .....	24
Tabla 4 Características Streifeneder 3A20. ....	26
Tabla 5 Materiales usados en la construcción de prótesis de rodilla externa. ....	27
Tabla 6 Propiedades de diferentes materiales. ....	27
Tabla 7 Formas y métodos comunes de producción [42]. ....	29
Tabla 8 Contracción de diferentes materiales en mm [46]. ....	32
Tabla 9 Ángulos de salida y pendientes. ....	33
Tabla 10 Contracción de algunos metales y aleaciones durante la solidificación [47].	33
Tabla 11 Temperatura de Fusión de los materiales. ....	34
Tabla 12 Requerimientos del cliente. ....	48
Tabla 13 Requerimientos de ingeniería. ....	49
Tabla 14 Detalle de cambios realizados en el rediseño. ....	53
Tabla 15 Detalles de cambios realizados a Ossur 2000. ....	54
Tabla 16 Resumen de características y métodos de producción [42]. ....	56
Tabla 17 Propiedades de las alternativas de materiales. ....	57
Tabla 18 Alternativas de materiales en el uso de prótesis externa de rodilla. ....	58
Tabla 19 Método de producción de los componentes de la prótesis. ....	60
Tabla 20 Alternativa 2. ....	61
Tabla 21 Simulaciones del molde del eslabón superior. ....	68
Tabla 22 Resultados de la simulación del pin auxiliar 1. ....	69
Tabla 23 Resultados de la Simulación del molde del Eslabón inferior .....	70

Tabla 24 Resultados de la simulación del pin auxiliar 2. ....	71
Tabla 25 Resultados de la simulación del Elemento Regulación .....	72
Tabla 26 Resultados de la simulación de las Bielas Laterales.....	73
Tabla 27. Comparación entre Streifeneder y Ossur 2000.....	74
Tabla 28 Orden de importancia de los requerimientos. ....	75
Tabla 29 Comparación respecto al material. ....	75
Tabla 30 Evaluación respecto a la geometría de la prótesis. ....	75
Tabla 31 Comparación respecto a las horas de mecanizado.....	76
Tabla 32 Evaluación respecto al bajo costo.....	76
Tabla 33 Evaluación respecto a la emulación de la marcha humana. ....	76
Tabla 34 Análisis de alternativas. ....	76
Tabla 35 Análisis dimensional de la pieza fundida respecto a plano. ....	87
Tabla 36 Análisis de costos de los moldes permanentes. ....	87
Tabla 37 Análisis de costos para fabricar la alternativa 1. ....	88
Tabla 38 Operaciones CAM. ....	99

# CAPÍTULO I

## El Problema

En este capítulo se menciona las principales causas que definen el problema de investigación, además de dar a conocer el objetivo general y objetivos específicos, alcance y antecedentes.

### 1.1.Planteamiento del problema

Actualmente en Imbabura 13381 personas tiene algún tipo de discapacidad, el 39,73 % sufre de una discapacidad física según datos del Consejo Nacional de Discapacidades de Ecuador CONADIS [1]. Las personas que sufren de una amputación transfemoral pierden la articulación de la rodilla y se les dificulta desarrollar sus actividades diarias según el Ministerio de Salud Pública del Ecuador [2], es por ello que se recurre al uso de una prótesis de rodilla externa que le permita mejorar su calidad de vida brindándole libertad en la participación de las diferentes actividades [3], la mayoría de las personas amputadas no tienen acceso a una prótesis por su costo elevado.

En el proyecto de investigación “Modelo paramétrico de articulación de rodilla para amputación transfemoral unilateral” [4], se realizó la selección de dos articulaciones de rodilla comerciales, en las cuales se va a basar para el desarrollo de esta investigación.

Diversas prótesis externas de rodilla se encuentran en el mercado ecuatoriano, pero son productos de importación, generalmente de Estados Unidos de Norte América y Alemania, su costo va alrededor de veinte a sesenta mil dólares [5], lo que hace que sea poco accesibles a la población afectada. Es por lo que se busca desarrollar una alternativa más económica y con la misma funcionalidad, es decir que simule de mejor manera la marcha humana [6], mediante una investigación sobre los procesos de fabricación y manufactura que sea factible en nuestro país.

Esta investigación está orientada a analizar diferentes procesos de fabricación para la construcción de las articulaciones de rodilla. Por medio del estado del arte se ha seleccionado al menos dos prótesis de rodilla comerciales [7], de las cuales se analizan cada uno de los elementos que componen dichas articulaciones en función de los procesos de fabricación usando herramientas computacionales como SOLIDWORKS y SOLID CAM [8], entre otros, se obtendrá como resultado una articulación de rodilla funcional,

de calidad y bajo costo, que será fabricada de acuerdo a los materiales y procesos de manufactura disponibles.

Las personas que han sido sometidas a una amputación de miembro inferior a nivel transfemoral, es decir, sobre la rodilla, se ve afectada tanto psicológica como físicamente [9], es por ello que opta por usar una prótesis de rodilla para que el paciente amputado recupere su capacidad e independencia funcional, y con esto, logre reintegrarse a su medio social, familiar y laboral [10].

Desarrollar una alternativa más económica y con las mismas características ayudará significativamente a los pacientes locales.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo general**

- Determinar el proceso de fabricación de al menos dos prótesis comerciales para desarrollar una metodología de fabricación orientada a la reducción de costos.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

- Determinar las principales características de fabricación de las articulaciones de rodilla seleccionadas.
- Analizar los distintos procesos de fabricación con base en la metodología DFMA para proponer alternativas de fabricación.
- Seleccionar una de las alternativas de fabricación.
- Simular la alternativa de fabricación seleccionada a través de un software de ingeniería.

## **1.3. Justificación**

La rodilla es uno de los elementos más complejos del cuerpo humano debido a su diseño y su articulación está dotada de un sólo sentido de libertad de movimiento la flexión-extensión que le permite a una persona ponerse de pie, caminar y brinda estabilidad al cuerpo [11].

La articulación de rodilla protésica es el componente más crítico entre todos los módulos de la prótesis, es indispensable para una persona que ha sufrido una amputación obtener una prótesis de rodilla que le permita recuperar sus funciones básicas y así

mejorar su calidad de vida [12], pero la mayoría de estas personas no pueden acceder a una prótesis por su costo elevado.

Por ello, en esta investigación se orienta al desarrollo de un nuevo método más conveniente, que cumpla con los requerimientos de accesibilidad económica para obtener una articulación de rodilla mediante métodos computacionales [13], siendo más accesible a la población, además este estudio beneficia al grupo de investigación SIBI de la Universidad Técnica del Norte mediante el campo de desarrollo de la manufactura, diseño, simulación, análisis por medio de herramientas computacionales, los resultados obtenidos aportaran con un nuevo proceso de construcción repetitiva de articulación de rodilla que se puede fabricar en nuestro país a menor costo.

#### **1.4. Alcance**

En este estudio, se realizará el análisis de los métodos de fabricación de los elementos que componen dos articulaciones externas de rodilla que ya se encuentran seleccionadas en el proyecto de investigación científica “Modelo paramétrico de articulación de rodilla para amputación transfemoral unilateral” [14] ,se basará en la metodología DFMA [15] esta técnica toma en cuenta el método de fabricación desde las fases iniciales de diseño, busca disminuir costos y el uso de componentes estándar en base a su disponibilidad en el mercado local [16] y se propondrá al menos una alternativa para la posterior fabricación.

Al realizar este proyecto se pretende dar solución a la necesidad de obtener una articulación de rodilla externa funcional y de costo accesible para personas con amputación transfemoral unilateral que le permita al paciente estar de pie y desarrollar la caminata humana, no es apta para realizar actividad deportiva [13].

Esto se desarrolla mediante técnicas, herramientas computacionales, materiales disponibles en el país y se usará el equipo y herramientas disponibles en los laboratorios de procesos de manufactura y CNC.

#### **1.5. Antecedentes**

La fabricación de prótesis se ha convertido en una ciencia en los últimos años, como resultado del enorme número de amputaciones producidas en las guerras mundiales, accidentes de tránsito, y enfermedades catastróficas como la diabetes [17] [18] .



En la actualidad existen diversos tipos de prótesis de articulación de rodilla, los cuales se basan en dos mecanismos: el de tipo bisagra o monocéntrico y el policéntrico; el de tipo bisagra es más simple y limita la marcha; por otra parte, el mecanismo de tipo policéntrico es más complejo y actualmente es el más eficiente, porque tiene mayor estabilidad en la marcha que el de tipo bisagra.

En este caso se estudia las prótesis transfemorales, las articulaciones pueden estar en la rodilla o el tobillo para simular un paso natural. Los materiales empleados buscan obtener una articulación de bajo coeficiente de fricción; se utilizan metales especiales: acero inoxidable, aleación de cromo-cobalto-molibdeno, aleación de titanio, la fibra de carbono y aleaciones de aluminio.

En [19] se realiza el diseño de una prótesis por encima de la rodilla en donde se propone la fabricación en impresión 3D y aleaciones de aluminio, mediante procesos que no repercutan en la disminución de las propiedades mecánicas de los materiales.

Mediante el estudio comparativo del uso de Zylon y otros materiales utilizados normalmente en la fabricación de prótesis de rodilla se tiene como fin la posibilidad de fabricar prótesis en Ecuador [20].

En este trabajo se realiza el estudio exhaustivo de dos articulaciones de rodillas policéntricas, su método de producción, para posteriormente gestionar la fabricación en serie.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

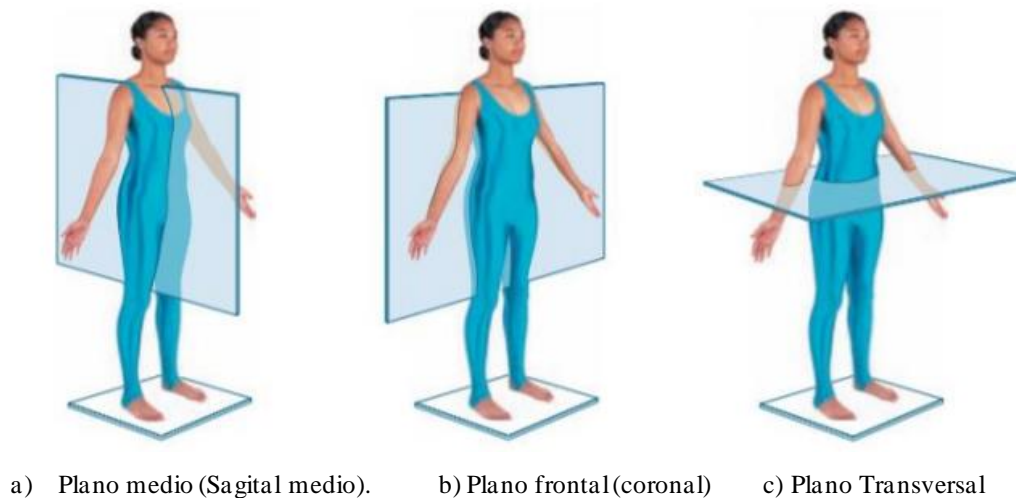
En este capítulo, se describen los aspectos teóricos que ayuda a entender el concepto de prótesis, su importancia, métodos de fabricación, materiales que las constituyen y serán útiles para el análisis de las principales características de fabricación de dos articulaciones de rodilla externa, las cuales son: Ossur 2000 y Streifeneder, se presenta las características y funcionalidad de dichas articulaciones de rodilla que posteriormente lleva a proponer varias alternativas de fabricación.

#### 2.1. Marcha humana.

Para entender mejor los tipos de prótesis que existen en el mercado, es necesario comprender antes las fases de la marcha humana y los planos en los que realizan los movimientos el cuerpo, se muestra a continuación en la figura 1 los planos del cuerpo.

#### Figura 1

*Los planos del cuerpo [10].*



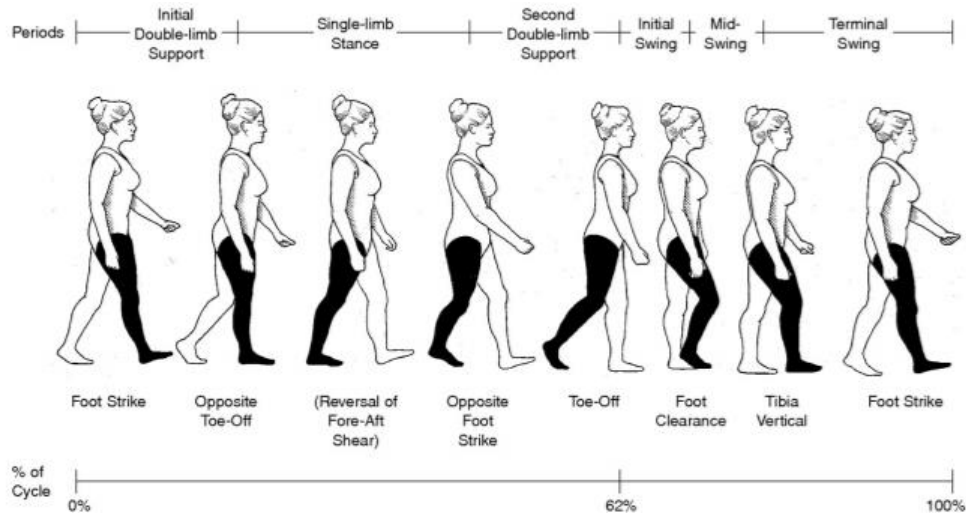
La característica más antigua del ser humano es la de caminar erguido. La marcha humana es un movimiento del cuerpo de forma rítmica, en posición bípeda, que se realiza en el plano sagital, siendo su peso soportado alternativamente por ambos miembros inferiores [21] [22].

La marcha humana viene determinada por un patrón característico, pero existen pequeñas diferencias entre la marcha de un individuo y de otro. [23]

El ciclo de la marcha normal comienza cuando el pie contacta con el suelo y termina con el siguiente contacto con el suelo del mismo pie provocando el movimiento para delante o para atrás. Los dos mayores componentes del ciclo de la marcha son: la fase de apoyo (60%) y la fase de balanceo (40%) como se muestra en la figura 2 [22].

**Figura 2**

*Las fases de la marcha humana normal [10].*



### 2.1.1. Principales alteraciones en la marcha del amputado de miembro inferior.

Usar una prótesis en sí ya producen diferencias respecto al ciclo de marcha normal al ciclo de la marcha de una persona protésica. Varios aspectos son los causantes de este cambio entre los cuales tenemos: el alineamiento de la prótesis, la sensación de inestabilidad, la debilidad muscular el amputado, las personas también consumen más energía [24].

Dos articulaciones comerciales que se asemejan en la locomoción de la marcha humana normal son Ossur 2000 y Streifeneder A 320 las cuales se detallan a continuación.

### 2.2. Articulación de la rodilla.

La rodilla es la más compleja de las articulaciones del cuerpo humano. Está formada por la articulación de tres huesos: el fémur, la tibia y el peroné. La rodilla es una articulación tipo bisagra con el objetivo funcional de dar, estabilidad, resistencia al peso que tiene que soportar y la movilidad suficiente para trasladarlo [25].

## 2.3. Biomecánica de la rodilla

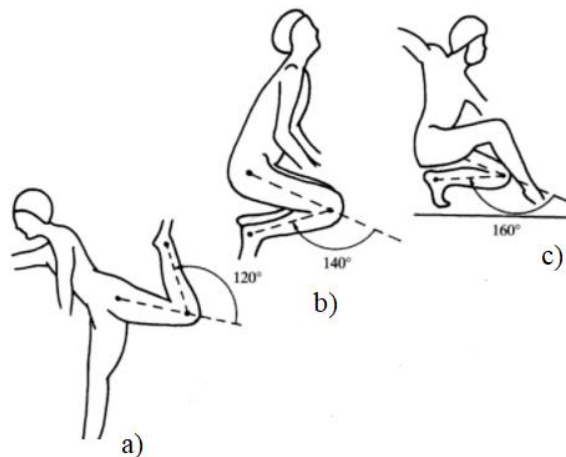
Los movimientos que realiza la rodilla son de flexión y extensión, los cuales se desarrollan en el plano sagital y el de rotación los que tienen lugar en un plano frontal.

### 2.3.1. Flexión

La flexión de la rodilla implica estirar el talón hacia arriba hasta la parte trasera del muslo. La flexión puede ser llevada hasta casi 120 grados con la articulación de la cadera extendida figura 3a, hasta casi 140 grados cuando es flexionada la articulación de la cadera figura 3b y hasta casi 160 grados cuando se introduce un elemento pasivo, tal como sentarse sobre los talones figura 3c [26].

### Figura 3

*Movimientos de Flexión de la rodilla [10].*

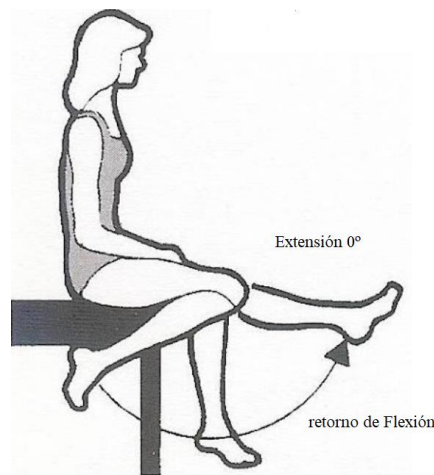


### 2.3.2. Extensión

La extensión de la rodilla es el movimiento de regreso de la flexión. El rango de movimiento es de 140° a 0° de extensión como se muestra en la figura 4.

### Figura 3

*Movimiento de Extensión [10].*



#### 2.4. Prótesis de miembro inferior

El objetivo de usar una prótesis de extremidad inferior consiste en lograr una marcha con la máxima estabilidad, el menor coste energético y la apariencia más normal posible.

El diseño de las prótesis necesita adecuarse a estos objetivos para que cada extremidad pueda encargarse del control del soporte, la oscilación, el despegue y se reduzcan, en la medida de lo posible, los cambios degenerativos en la columna lumbar, las caderas y las rodillas.

##### 2.4.1. Prótesis de rodilla de tipo transfemoral.

Las prótesis de rodilla son mecanismo que tienen la finalidad de sustituir completamente la función que realiza la rodilla [27], este dispositivo mecánico debe moverse como la articulación normal y se caracteriza por igualar lo más posible la biomecánica de la marcha humana, proporcionando funcionalidad, estabilidad, confort y seguridad [28] [29].

En el mercado existen diversas articulaciones externas de rodilla, las principales diferencias están en el mecanismo de la rodilla de las cuales tenemos:

##### 2.4.2. Articulaciones de rodilla monocéntricas.

Las articulaciones de rodilla monocéntricas o de un solo eje como se muestra en la figura 5, realizan el movimiento tipo bisagra.

Con las prótesis de eje sencillo estándar un típico problema es el espacio del pie al piso durante la fase de oscilación. El amortiguamiento con el que cuenta es eficiente en unos cuantos pasos, en caminatas prolongadas el usuario tendrá que realizar esfuerzos mayores [19].

**Figura 4**

*Articulación de rodilla monocéntrica 3W010-1 [30].*



En la tabla 1 se muestran las características y descripción de la articulación de rodilla 3W010-1.

**Tabla 1**

*Características de la articulación de rodilla 3W010-1 [30].*

Descripción del producto	Funciones Principales	Información general	
Para amputados con actividad media.	Rodilla monocéntrica con impulsor.	Peso máximo del paciente	100Kg
Alta seguridad en la fase de balanceo.	Flexión de apoyo ajustable	Peso de la prótesis	517 g
Control medio de la fase de impulsión.	Ángulo de flexión de rodilla alto (hasta 150°)	Material:	Acero inoxidable
Mínimo impacto y tensión en el muñón.	Adaptabilidad de pilón de 30 mm (13/16")	Tipo de articulación	Mecánica

### 2.4.3. Articulaciones de rodilla policéntricas.

Estas rodillas tienen múltiples ejes de rotación que pueden proporcionar una serie de capacidades funcionales. Están diseñadas para ofrecer una mejor estabilidad de la rodilla, combinada con la capacidad de flexionarse [30], es muy útil para las amputaciones transfemorales de rodilla como se muestra en la figura 6.

**Figura 5**

*Rodilla policéntrica 3A1800 de Streifeneder [32].*



En la tabla 2 se menciona las principales características de la prótesis de rodilla policéntricas 3A1800.

**Tabla 2**

*Características de la articulación de rodilla policéntrica 3A1800 [32].*

Descripción del producto	Funciones Principales	Información general	
Rodilla policéntrica con control neumático de la fase de impulsión	Seguridad mecánica en la fase de apoyo mediante el sistema policéntrico	Peso máximo del paciente	125Kg
Apoyo en la fase de extensión mediante el resorte impulsor integrado	Flexión de apoyo ajustable	Peso de la prótesis	960 g
Control medio de la fase de impulsión	Ángulo de flexión de rodilla alto (hasta 150°)	Material: Aluminio y acero inoxidable.	Acero inoxidable
Brinda una marcha armónica y natural	Adaptabilidad de pílón de 30 mm (13/16")	Tipo de articulación	Policéntrica

## 2.5. Articulación de rodilla policéntrica ÖSSUR 2000

La rodilla policéntrica o multi-eje, Total Knee 2000 de Ossur presenta un diseño de siete ejes con cojinetes de agujas, anillos de retención y una mejor extensión, ayuda a incrementar su durabilidad, que ofrece control, una marcha natural y absorción de impactos a través de la flexión de apoyo ajustable. La rodilla Total Knee 2000 también incluye un sistema de bloqueo geométrico para proporcionar la máxima seguridad; un sistema hidráulico de tres fases que permite cambios suaves de velocidad; y flexión de apoyo, que actúa como un amortiguador para reducir la tensión y simular la flexión natural de la rodilla se muestra en la figura 7 [31].

### Figura 6

*Articulación de rodilla Ossur 2000 [33].*



En la tabla 3 se presentan las principales características de funcionalidad de esta prótesis.

### Tabla 3

*Principales características de la articulación Ossur 2000 [33].*

Descripción del producto	Funciones Principales	Información general
<b>Absorción de impactos</b>	Rodilla policéntrica con sistema de cierre geométrico	Peso máximo del paciente 100 Kg
<b>Confort y marcha natural</b>	Flexión de apoyo ajustable	Peso de la prótesis
<b>Cambio de velocidad de marcha</b>	Ángulo de flexión de rodilla alto (hasta 160°)	Material: Titanio
<b>Mínimo impacto y tensión en el muñón.</b>	Adaptabilidad de pilón de 30 mm (13/16")	

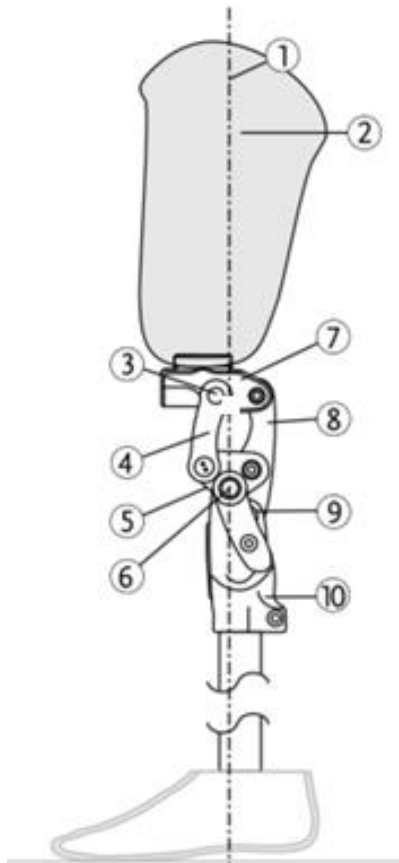


## Descripción de sus principales componentes

En la figura 8 se presenta los principales elementos que componen la articulación de rodilla Ossur 2000 [32].

### Figura 7

*Componentes de la articulación de rodilla Ossur 2000.*



1. Línea de referencia de alineación
2. Socket
3. Referencia del centro de la rodilla
4. Enlace frontal
5. Unidad de equilibrio
6. Eje de pivote (eje de alineación)
7. Carcasa hidráulica
8. Vínculo hacia atrás
9. Enlace inferior
10. Chasis

## 2.6. Rodilla policéntrica Streifeneder 3A 20

Streifeneder 3A20 es una rodilla policéntrica que consigue el equilibrio entre la estabilidad y la dinámica de la articulación, así como facilidad de uso.

La construcción policéntrica permite un ángulo de flexión especialmente grande y disminuye el riesgo a tropezar, asegurando una marcha armónica y natural al usuario [33], esta se presenta en la figura 9.

## Figura 8

Articulación de Rodilla Streifeneder 3A20 [34].



En la tabla 4, se presentan las diferentes características de la prótesis de rodilla Streifeneder.

### Tabla 4

Características Streifeneder 3A20.

Descripción del producto	Funciones Principales	Información general
Policéntrica con impulsor integrado.	La construcción policéntrica permite una reducción de la longitud de la pierna en la fase de impulsión.	Peso: hasta 100kg.
Posibilidad de ajuste continuo de la resistencia neumática de extensión y flexión para una marcha natural.	Ángulo de flexión 120°.	Grado de movilidad Walky 1 a 2.
Apoyo de extensión mediante el impulsor de resorte integrado.	Acero inoxidable.	

## 2.7. Estudio de Materiales

Para efectuar un buen diseño ingenieril, es necesario seleccionar de manera anticipada los materiales para desempeñar los requerimientos de la pieza, por lo tanto, se

debe analizar todas las propiedades para traducir en los parámetros deseados y cumpla su funcionalidad. Hay que evitar la pérdida de funcionalidad o mantener en un nivel aceptable [20].

De acuerdo con las articulaciones de rodilla antes mencionadas los materiales más utilizados en la construcción de prótesis de rodilla son los mostrados en la tabla 5.

**Tabla 5**

*Materiales usados en la construcción de prótesis de rodilla externa.*

Articulación de rodilla transfemoral	Material
3W010-1	Acero inoxidable
3A1800	Acero inoxidable y aluminio
Ossur 2000	Titanio
Streifeneder 3A20	Acero inoxidable

### 2.7.1. Principales requerimientos en el estudio de materiales para prótesis.

Como en todo estudio lo que se desea obtener es una buena relación beneficio-costo, por esto es importante seleccionar los materiales para los productos, primero se considera sus propiedades mecánicas, propiedades físicas como: densidad, calor específico y punto de fusión y propiedades de manufactura que determina si los materiales pueden ser fundidos, maquinados o sujetos a corte, todo esto con el objetivo que evite que el producto final falle.

De acuerdo con la tabla 5 establecida anteriormente se procede a estudiar los principales materiales, los cuales se especifican a continuación en la tabla 6.

**Tabla 6**

*Propiedades de diferentes materiales.*

Material	Módulo de elasticidad	Coficiente de Poisson	Resistencia ultima a la tracción	Dureza Brinell	Módulo de corte	Punto de fusión
Aleación de aluminio 356.0	10000 ksi	0,33	228 Mpa	65	27,2 Gpa	557,2-612,8 ° C

Titanio	116 Gpa	0,34	220 Mpa	70	43,0 Gpa	1650-1670 ° C
Aluminio 6063	10000 ksi	0,33	241 Mpa	73	25,8 Gpa	616-654 ° C
Acero inoxidable	193 GPa	0,29	505 Mpa	123	77,0 GPa	1400- 1455 ° C
Acero ASTM A36	29000 ksi	0,26	400- 550Mpa	73	25,8 Gpa	1548° C
Hierro fundido	69 GPa	0,29	151 MPa	120	77,0 GPa	1539 ° C

### 2.7.2. Costo y disponibilidad.

El costo y la disponibilidad de los materiales en bruto o procesados son consideraciones de importancia en la manufactura. Los aspectos económicos de la selección de los materiales son relevantes como las consideraciones tecnológicas de las propiedades y de las características de estos [34].

El diseño de un producto se puede modificar para aprovechar las dimensiones estándares en que se encuentra otro factor que afecta el precio es la demanda.

### 2.8.Métodos de Fabricación.

El diseño y la manufactura son actividades que se correlacionan [34]. Cada pieza o componente de un producto, en este caso una prótesis de rodilla debe ser diseñada no solo para que cumpla con los requerimientos y especificaciones de diseño y del cliente, sino también para ser manufacturado económica y eficientemente lo que se conoce como diseño para la manufactura o metodología (DFMA) [35].

Para implementar correctamente esta metodología se requiere comprensión de los procesos de manufactura, operaciones, maquinaria y equipo relacionado, incluye también conocimiento sobre el desempeño de las máquinas, acabado superficial de la pieza y el tiempo de proceso.

En la tabla 7 se describe los métodos de producción que se pueden utilizar de acuerdo con la superficie y geometría.

**Tabla 7***Formas y métodos comunes de producción [42].*

Forma o característica	Método de producción
Superficies planas	Laminado, cepillado, brochado, fresado, formado, esmerilado
Piezas con cavidades	Fresado de acabado, maquinado por descarga eléctrica, fundición
Piezas con características agudas	Fundición de molde permanente, maquinado, metalurgia de los polvos
Formas huecas delgadas	Fundición en cáscara, electroformado, fabricación
Formas tubulares	Formado por rodillos, girado, fundición centrífuga
Curvatura en láminas delgadas	Formado estirado, formado por golpeo, ensamble
Aperturas en hojas delgadas	Troquelado, troquelado fotoquímico
Secciones transversales	Estirado, extruido, cepillado de acabado, torneado
Bordes a escuadra	Troquelado fino, maquinado, esmerilado con banda
Pequeños orificios	Láser, electroerosión,
Texturas superficiales	Moleteado, cepillado con alambre, esmerilado
Características detalladas de las superficies	Acuñado, fundición a la cera perdida, fundición en moldes permanentes
Partes roscadas	Cortes de roscas, laminado de roscas, esmerilado de roscas
Piezas muy grandes	Fundición, forja, fabricación, ensamble
Piezas muy pequeñas	Fundición a la cera perdida, maquinado, grabado, metalurgia de polvos, nano fabricación, micromaquinado

**2.8.1. Procesos de manufactura.**

Por lo general se utiliza más de un método para producir una pieza a partir de la materia prima.

La selección de una secuencia de procesos depende de la forma a producirse y también de muchos otros factores correspondientes a las propiedades del material [34].

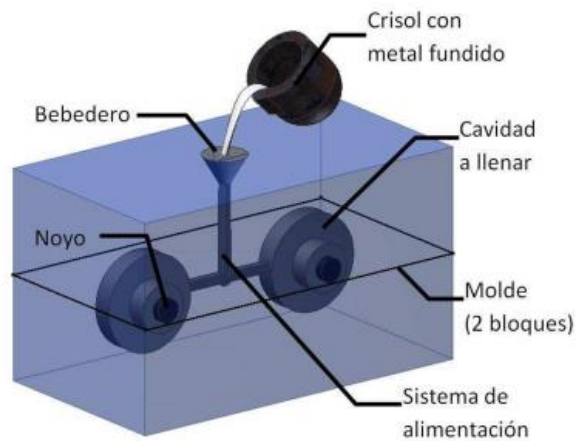
**2.9. Proceso de Fundición.**

Mediante este proceso se fabrican piezas, metálicas o de plástico, que consiste en elevar la temperatura de un material para que este pase a estado líquido e introducir en un recipiente con cavidad de la forma que se desea obtener llamado molde, en donde se solidifica y adopta la forma prevista.

En la figura 10 se muestra un ejemplo de fundición, se vierte el metal fundido por el bebedero, por gravedad.

### Figura 9

*Proceso de fundición mediante moldeo.*

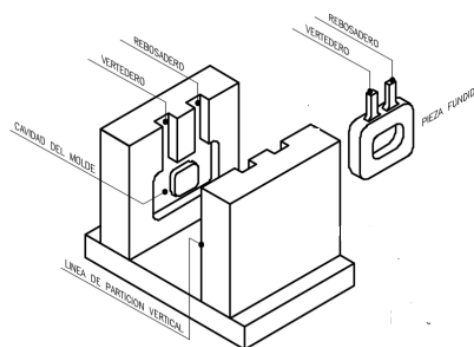


#### 2.9.1. Tipos de moldes

**Los moldes permanentes o coquillas.** - Son metálicos, por ejemplo, de acero o de hierro colado, las principales aleaciones que se colan en estos moldes son: zinc, estaño, aluminio y sus aleaciones como se muestra en la figura 11, la cavidad se forma por maquinado con el fin de lograr una alta precisión y un buen acabado superficial, pueden utilizarse para un gran número de coladas, se emplean sobre todo para la fabricación en serie [36].

### Figura 10

*Colada en Molde permanente metálico [43].*

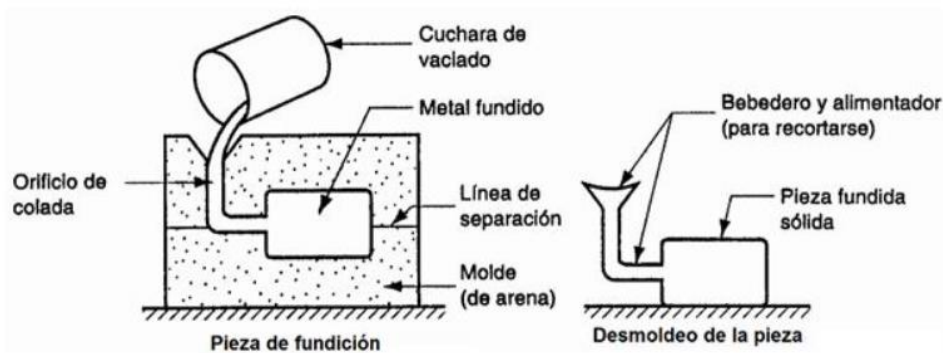


Están divididos en dos partes o más para poder extraer la pieza, deben ser resistentes a la erosión y con una alta resistencia a la fatiga térmica.

**Los moldes no permanentes.** - Están hechos de arena, se utilizan para una sola colada y se destruyen al extraer la pieza moldeada, se llena de metal líquido un molde de arena como se muestra en la figura 12.

### Figura 11

*Moldeo en bloque de arena [43].*



#### 2.9.2. Proceso de fundición con moldes permanentes.

Las piezas fundidas por colada metálica pueden producirse por diversos procedimientos, entre estos se encuentran tres tipos: baja presión, por gravedad y alta presión [36].

El proceso en general consiste en precalentar a una cierta temperatura (150-200°C) y favorecer el flujo del metal líquido, recubrir el molde, posterior el cierre del molde se vacía el metal fundido y finalmente se abre y extrae la fundición [37].

#### 2.9.3. Parámetros para el diseño de piezas fundidas.

- **Rediseño de las piezas o modelo.** -Un modelo es una réplica de la pieza de tamaño mayor debido a la contracción del material [38], también se deben evitarse esquinas y ángulos agudos, estos actúan como concentradores de tensión y favorecen el agrietamiento, en la tabla 8 se menciona los valores de la contracción en milímetros de diferentes metales.

**Tabla 8***Contracción de diferentes materiales en mm [46].*

Aleaciones	Dimensiones del modelo <i>mm</i> <sup>2</sup>	Piezas con hoyos Mm	Contracción en 0/00 o en mm/m
	hasta 600	hasta 600	10,0
Fundición Gris	de 600 a 1200	de 600 a 920	8,5
	más de 1200	más de 920	7,0
Fundición gris de gran resistencia	hasta 600	hasta 600	13,0
	de 600 a 1200	de 600 a 920	10,5
	más de 1200	más de 920	8,5
Fundición blanca colada en arena			15,0 a 16,0
Fundición blanca colada en coquilla			18,0
Fundición maleable			13,0
espesor 3 mm			10,0
espesor 10mm			7,0
espesor 20mm			
	Piezas pequeñas hasta 12500	Pequeñas Medianas	13,0 a 15,0 12,0 a 13,0
Aluminio y sus aleaciones	Piezas medianas > 12500	Grandes	11,0 a 12,0
	Piezas grandes		
Aleaciones de magnesio			11,0 a 14,0
	Hasta 600	hasta 450	20,0
Aceros	De 630 a 1800	de 480 a 1200	15,0
	más de 1800	más de 1200	13,0

- **Ángulos de salida.** - También llamado ángulo de desmoldeo es necesario en los modelos para el proceso de fundición para que la pieza salga sin dificultad. Los ángulos de salida tienen un valor de 5- 15 mm/m es decir 0,5- 3°. En la tabla 9 se observa los ángulos de desmoldeo de acuerdo con la altura del modelo.



**Tabla 9***Ángulos de salida y pendientes.*

Altura del modelo	Ángulos de salida y pendientes
De 1 a 10 mm	3°
De 11 a 20 mm	2°
De 21 a 35 mm	1°
De 36 a 65 mm	0°45'
De 66 a 150 mm	0°30'
De 151 a 250 mm	1.5 mm
De 251 a 400 mm	2,5 mm
De 401 a 600 mm	3,5 mm
De 601 a 800 mm	4,5 mm
De 801 a 1000 mm	5,5 mm

- **Tolerancias para la contracción.** –Las tolerancias son para evitar cambios dimensionales debido a la contracción de solidificación, este valor varía entre 0.8 y 6mm [39] [34]. Debido a este coeficiente de contracción los moldes deben hacerse mayores que las piezas moldeadas por colada [40], en la tabla 10 se muestra los valores de la contracción metálica.

**Tabla 10***Contracción de algunos metales y aleaciones durante la solidificación [47].*

Material	% de contracción
Fundición Gris, cobre, estaño, plomo	4.9%
Aleaciones de aluminio y magnesio	4-7.1%
Latón, bronce, similar	4,5%
Fundición maleable	1,6%
Acero colado	2,5-4%
Zinc	6,5%

- **Temperatura de fusión del material.** -Cada material tiene diferente temperatura de fusión, se presenta en la tabla 11 distintos materiales usados para fundición [41]

**Tabla 11**

*Temperatura de Fusión de los materiales.*

Metal	Temperatura
Estaño	232°C
Plomo	327 °C
Zinc	419 °C
Hierro	1539°C
Aluminio	658 °C
Plata	960 °C
Oro	1063 °C
Acero	1375 °C

- **Operaciones de acabado.** - Es importante considerar las operaciones posteriores, si se va a perforar un orificio, el diseño puede tener una hendidura como punto de referencia.

#### **2.9.4. Sistemas de alimentación.**

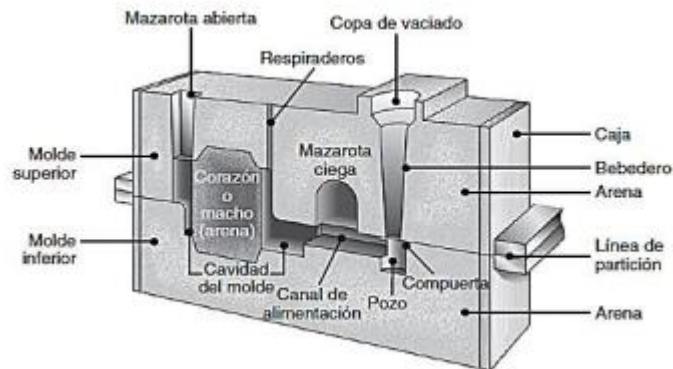
Muchos factores se deben controlar para obtener una buena pieza de fundición hay que diseñar los elementos por donde el metal fundido ingresara a la cavidad del molde, esto es el sistema de alimentación, para ello se debe conocer los principios de flujo de fluidos y características de solidificación [38], a continuación, se mencionan las partes principales que componen el sistema de alimentación.

- Bebedero. - Distribuye la colada hacia los canales
- Copa de vertido. - Donde se introduce el material o colada al interior del molde, asegura que el flujo del metal sea continuo.
- Pozo o escoriador. - Filtrado de escoria y regularización del flujo.
- Mazarota. - Elementos auxiliares para dar una compensación a la contracción volumétrica.
- Línea de partición. - Separa las mitades superior e inferior del molde, permite extraer la pieza.
- Canales de alimentación. - Conducen el metal liquido del bebedero.

En la figura 13 se muestra todos estos componentes incluso las salidas de aire que permiten la evacuación de gases del interior de la cavidad

## Figura 12

Proceso de moldeo y sus elementos.



### 2.9.5. Flujo del metal fundido.

Una fundición con éxito requiere un diseño apropiado y un control del proceso de solidificación para asegurar un flujo del fluido adecuado.

Si el metal que entra es demasiado lento se corre el riesgo que solidifique antes que la cavidad del molde se llene debido a un enfriamiento prematuro por el contrario si el vertido es demasiado rápido podría ser un flujo turbulento lo que se traduce en mucho gas generando una pieza fundida defectuosa. Por lo que es importante calcular la velocidad del fluido y se calcula mediante la siguiente fórmula [39]:

$$V_f = k \sqrt{2gz_f} \quad (1)$$

Siendo  $k$  un factor de pérdida entre 0 y 1, si no hay pérdida el término  $k=1$

$V_f$  = Velocidad del fluido

$g$  = Gravedad

$Z_f$  = Longitud del bebedero

Finalmente, el caudal de entrada al molde a través de la compuerta será:

$$Q_f = V_f \cdot A_f \quad (2)$$

$Q_f$  = Caudal.

$V_f$  = Velocidad del fluido.

$A_f$  = Sección del bebedero.

El tiempo de llenado del molde puede entonces estimarse como:

$$t_f = \frac{V_f}{Q_f} \quad ( 3 )$$

$t_f$  =Tiempo de llenado (min)

$V_f$  =Volumen del fluido ( $m^3$ )

$Q_f$  = Caudal ( $m^3 / \text{min}$ )

### 2.9.6. Tiempo de solidificación.

El proceso de solidificación toma un tiempo, este va desde el vertido de la colada hasta que el modelo este en estado sólido, el tiempo depende del tamaño y de la forma de la fundición está definido por la regla de Chvorinov [42]:

$$t_s = c \left( \frac{V_t}{S_t} \right)^n \quad ( 4 )$$

Donde:

$t_s$  = Tiempo de solidificación total (min)

$V_T$  = Volumen de fundición ( $m^3$ )

$S_t$  = Superficie del molde ( $m^2$ )

C= constante que depende del metal fundido y del molde ( $\text{min}/m^2$ )

n= Suele tomarse igual a 2

Como indica la regla de Chvorinov se relaciona volumen a superficie, una fundición con una relación más grande se enfriará y solidificará más lentamente que otra con una relación más baja.

### 2.9.7. Dimensionamiento de Mazarotas.

El diseño y dimensionamiento correcto de la mazarota asegura una pieza sana. Las mazarotas son volúmenes adicionales en los que se puede almacenar líquido durante el proceso de solidificación de manera que se compense el volumen de la contracción y se eviten los rechupes [42].

La mazarota se puede diseñar de diferentes formas, una de ellas usar la regla de Chvorinov.

Aplicando otro criterio se lo puede hacer mediante una relación de volumen:

$$V_{Mzta} = V_{pza} \cdot K \cdot \%C \quad ( 5 )$$

$V_{Mzta}$  =Volumen de mazarota ( $m^3$ ).

$V_{pza}$  =Volumen de pieza ( $m^3$ ).

$\%C$  = Porcentaje de contracción, este valor depende del material a fundir.

$K=1$ , Cuando la mazarota está en contacto con la pieza.

$K=2$ , Cuando la mazarota se ubica lateralmente y su sombra genera un ángulo de  $45^\circ$  con la pieza

$K=3$ , cuando la mazarota está separada de la cavidad.

### **2.9.8. Área superior del bebedero.**

Los bebederos son conductos verticales de forma cónica los cuales conducen la colada a los canales de alimentación, sus dimensiones vienen dadas por la siguiente formula [43]:

$$A_{1bbd} = \frac{Q}{d \cdot v} \quad ( 6 )$$

$A_{1bbd}$  = Área superior del bebedero

$Q$  = Caudal

$d$  = Densidad del material

$v$  = Velocidad del fluido

### **2.9.9. Área inferior del bebedero.**

El área de la sección inferior del bebedero se calcula aplicando la Ecuación de Bernoulli y la ecuación de continuidad estableciendo una relación entre áreas y distancias [43].

$$A_{2bbd} = A_{1bbd} \cdot \sqrt{\frac{h1}{h2}} \quad ( 7 )$$

$A_{2bbd}$  = Área inferior del bebedero

$A_{1bbd}$  = Área superior del bebedero

$h_1$  = altura punto inicial

$h_2$  = altura punto final

### **2.9.10. Vida de un molde permanente.**

Los moldes permanentes se deterioran por el fenómeno de fatiga térmica que son los sucesivos ciclos de calentamiento-enfriamiento que sufren durante el trabajo por eso tienen una vida útil limitada.

La temperatura de la superficie de un molde varía de 500°C en la etapa de calentamiento de la matriz hasta 150°C en enfriamiento para desmoldeo, esta variación produce tensiones internas debido a la contracción/ dilatación a la que está sometido el material, este fenómeno causa grietas superficiales, al inicio, de manera microscópica y mientras siga en trabajo a condiciones macroscópicas.

De acuerdo con la investigación realizada en [44], en donde se realiza diferentes ensayos con probetas sometidas a fatiga térmica se determinó que en los aceros de trabajo en caliente tiene una vida útil entre 200000 y 400000 fundiciones de aluminio.

Por la experiencia del ingeniero Edwin Guevara especializado en procesos de fundición y gerente de la empresa fundidora SMO ratifica que en aceros comunes como el Acero ASTM A36 soporta hasta 2000 coladas de aluminio.

### **2.10. Mecanizado por arranque de viruta.**

El arranque de material en forma de viruta se realiza mediante la penetración de una herramienta, la cual es de mayor dureza que el material de la pieza a cortar [45]. Este arranque ocurre mientras se efectúa el movimiento relativo entre la pieza a trabajar y la herramienta de corte y son realizadas por medio de máquinas-herramientas [46].

#### **2.10.1. Tipos de mecanizado.**

Según el acabado superficial con el que se desea obtener la pieza terminada se distingue tres tipos de mecanizado:

##### **Desbastado**

Eliminación de mucho material con poca precisión a orden de décimas de milímetro.

## **Acabado**

Con el objetivo de obtener no solo las medidas finales de la pieza, sino también poca rugosidad en la superficie, el material eliminado es de centésimas de milímetro, con herramientas de corte que trabajen con velocidades de avance bajas y con velocidades de corte más altas que en el desbastado.

### **2.11. Programación CNC**

La máquina CNC mediante un programa ejecutará una lista de secuencia de instrucciones de maquinado en la que contiene toda la información para que una pieza pueda ser fabricada de manera automática, a las instrucciones se las conoce como CÓDIGO G, estos programas serán guardados y ejecutados por una máquina CNC [47].

#### **2.11.1. Métodos de programación CNC**

Actualmente se emplean tres métodos de programación CNC:

**Programación manual:** El operario introduce el código G y la secuencia de la pieza y herramienta manualmente en el programa, es un proceso largo y reiterativo [46].

**Programación asistida:** El programador elige la operación que debe realizar la máquina y se va introduciendo los datos para ejecutar esta acción.

**Programación CAD/CAM:** Se realiza mediante programas que facilitan la producción y además permiten cambios rápidos de las dimensiones de las distintas piezas así como de diferentes parámetros.

### **2.12. Máquinas CNC**

Las máquinas más comunes de control numérico computarizado (CNC) son: tornos CNC y fresadoras CNC, que juntas representan más de la mitad de las máquinas CNC en el mercado. Los centros de mecanizado controlados por computadora son comúnmente seleccionados para trabajos de manufactura debido gracias a su flexibilidad y versatilidad, ausente en otro tipo de máquinas herramientas [48].

Un operario debe conocer los límites en los que opera la máquina, de los procesos y sus variables operativas, no es suficiente colocar la pieza y manipular el panel de control, se debe estudiar y planificar todo el proceso [49].

### 2.12.1. Ventajas del mecanizado CNC

Las siguientes características hacen que el control numérico computarizado (CNC) sea productivo [50]:

**Cambio automático de herramientas.** – Para fabricar una pieza se necesita de varias operaciones de mecanizado, en las maquinas CNC se puede hacer el cambio de diferentes herramientas de forma automática.

**Fabricación en serie.** -Una vez verificado y validado el programa CNC se puede realizar la fabricación en masa, es decir, lograr fácilmente dos, diez o mil piezas de trabajo idénticas.

**Mayor flexibilidad.** – Se puede realizar cambios de manera ágil haciendo referencia un trabajo anterior, requiere abrir un programa ya hecho y realizar, ciertas modificaciones como ocurre en cualquier otro software [50].

**Mayor seguridad.** - Al haber una interacción mínima del operador con la máquina en la mayor parte de los movimientos. Anteriormente, al intervenir en acciones como el cambio de cabezales, la carga de material y el paro de un movimiento, había más probabilidades de tener accidentes [51].

### 2.12.2. Máquina fresadora CNC.

En las máquinas fresadoras CNC la trayectoria de la fresa se controla por datos numéricos, estas están adaptadas especialmente para el fresado de perfiles, fresado de cavidades, fresado de contorno de superficies, en las que se debe controlar simultáneamente dos o tres ejes de la mesa de trabajo [50].

Los cálculos para el fresado CNC se hace de igual manera que para el fresado convencional, estos parámetros son importantes ya que de estos depende la vida de la herramienta, el acabado superficial y el tiempo de corte que en definitiva se traduce en un coste.

Los factores que influyen para determinar la velocidad de corte son: el tipo de fresa y sus dimensiones, el material a cortar, el avance y la profundidad de corte y velocidad de corte, este es un valor que por lo general viene establecido en tablas, elaboradas después de numerosas experiencias e investigación [34].



### 2.12.3. Máquina Torno CNC

Al igual que la fresadora el torno CNC es operado mediante control numérico, elimina material de la pieza mediante el movimiento de rotación, ofrece gran flexibilidad para mecanizado de distintos tipos de piezas de revolución, rapidez de movimientos y precisión. Pueden ser equipados con torre portaherramientas de indexación automática, que proporciona una significativa reducción en el tiempo de mecanizado [52].

Al igual que el torno convencional el movimiento es de rotación y lo lleva la pieza y los movimientos de avance y penetración los lleva la herramienta y son rectilíneos generando el desbaste o acabado con el buril, las operaciones más usadas son: cilindrado, refrentado, roscado, ranurado y tronzado.

### 2.12. Parámetros de corte.

Se debe tener en cuenta los factores que influyen en el mecanizado tanto en el torneado como en el fresado, los parámetros para estas dos máquinas- herramientas son similares tomando en cuenta que en el torneado la pieza es la que lleva el movimiento circular y la herramienta realiza el movimiento lineal y en el fresado la herramienta lleva el movimiento circular mientras que la mesa de trabajo en donde se encuentra la pieza lleva el movimiento lineal.

#### 2.12.1. Velocidad de corte

Se define como velocidad de corte a la velocidad con la que la herramienta se enfrenta al material para ser eliminado, se expresa en metros por minuto (m/min) y por lo general se extrae de tablas [53]. Para la determinación de este parámetro influyen los siguientes factores como el material de la pieza, tipo de herramienta y de la dureza [40].

Se la puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$V_c = \frac{N \cdot D \cdot \Pi}{1000} \quad (8)$$

$V_c$ = Velocidad de corte (mm/min).

$D$ = Diámetro de la herramienta en el caso de fresado y diámetro del material en el torneado (mm)

$N$ = Número de revoluciones (rpm)

### 2.12.2. Velocidad de avance

La velocidad de avance es la velocidad relativa entre herramienta y pieza, en el caso de fresado es la velocidad a la que se mueve la mesa de trabajo, mientras que en el torneado es la velocidad a la que avanza la herramienta [50]. Se describe por la siguiente ecuación:

$$Va = Nzf \quad ( 9 )$$

$Va$  = Velocidad de avance (mm/min)

$N$  = Velocidad del husillo (rev/min)

$z$  = número de dientes de la herramienta

$f$  = avance por diente (mm/ diente)

### 2.12.3. Número de Revoluciones

Es la velocidad a la que rota el husillo en donde se encuentra la herramienta para el fresado y la velocidad a la que rota la pieza de trabajo para torneado se calcula mediante la siguiente expresión:

$$N = \frac{1000 Vc}{D\Pi} \quad ( 10 )$$

$N$  = número de revoluciones del husillo (Rev/min)

$Vc$  = Velocidad de corte (mm/min)

$D$  = Diámetro de la herramienta para fresado, diámetro de la pieza de trabajo en torneado (mm)

### 2.12.4. Profundidad de la pasada.

La profundidad de la pasada se determina por la cantidad de viruta que se tenga que remover, también depende si se trata de una operación de acabado o desbaste y de la tolerancia de mecanizado [53].

### 2.13. Relación de funciones del código G y operaciones de mecanizado.

El programa de mecanizado deberá contener todos los datos geométricos y técnicos necesarios para que la máquina-herramienta ejecute las operaciones que el operario desea.

Este código permite controlar en todo momento el desplazamiento relativo de la herramienta en relación de la pieza [54].

Funciones que componen el código:

- Funciones preparatorias (G): permite posicionar la herramienta, indicar el tipo de trayectoria, aplicar una compensación longitudinal o radial por tamaño de herramienta.
- Funciones de control de avances y velocidades de corte (F, S): Para fijar la velocidad de avance y corte de la máquina.
- Funciones de control de la herramienta (T): Contiene la información sobre la geometría de las herramientas que se van a utilizar en cada fase, para poder aplicar la compensación en radio y/o longitud.
- Funciones auxiliares (M): Contiene información tecnológica, como activar el refrigerante o especificar el sentido de giro del usillo [54].

#### **2.14. Costos de operación y de fabricación.**

Los factores que se involucran para determinar el costo de producción son: el diseño, costo del herramental, material que va a conformar la pieza de trabajo y vida esperada del producto. En la fabricación de piezas cuan menor sea el desperdicio, más económico será el proceso de producción; por lo que se debe hacer todo el intento hacia un desperdicio cero [55].

La disponibilidad de máquinas en el mercado o en talleres de la zona y la experiencia del operario con los procesos de manufactura también son factores de costos importantes. El número de piezas requeridas en cantidad y por hora son importantes en la determinación de la economía de la producción, además otras operaciones de acabado implican costos adicionales [34].

#### **2.15. Metodología DFMA**

El DFMA cuyo significado es “Design for Manufacturing and Assembly” Diseño para la fabricación y ensamblaje, consiste en un conjunto de técnicas y metodologías para la mejora del diseño o rediseño de un producto y tiene como objetivo mejorar la fabricación, montabilidad y costos sin alterar las funciones esenciales del producto [35].

##### **2.15.1. Principios del DFMA**

Varias empresas de automatización hacen usos de técnicas y herramientas del DFMA para:

- Minimizar el número de piezas
- Minimizar el número de tornillos o piezas de fijación
- Estandarización
- Evitar el uso de componentes difíciles
- Simplificar los productos
- Mejorar la calidad.
- Recortar los costes de fabricación y montaje.

Además, el DFMA hace uso de técnicas de diseño que facilitan el montaje y la fabricación, el uso de componentes de mercado y subcontratación de partes, el uso de herramientas asistidas por ordenador o el uso de herramientas de diseño de CAD 3D.

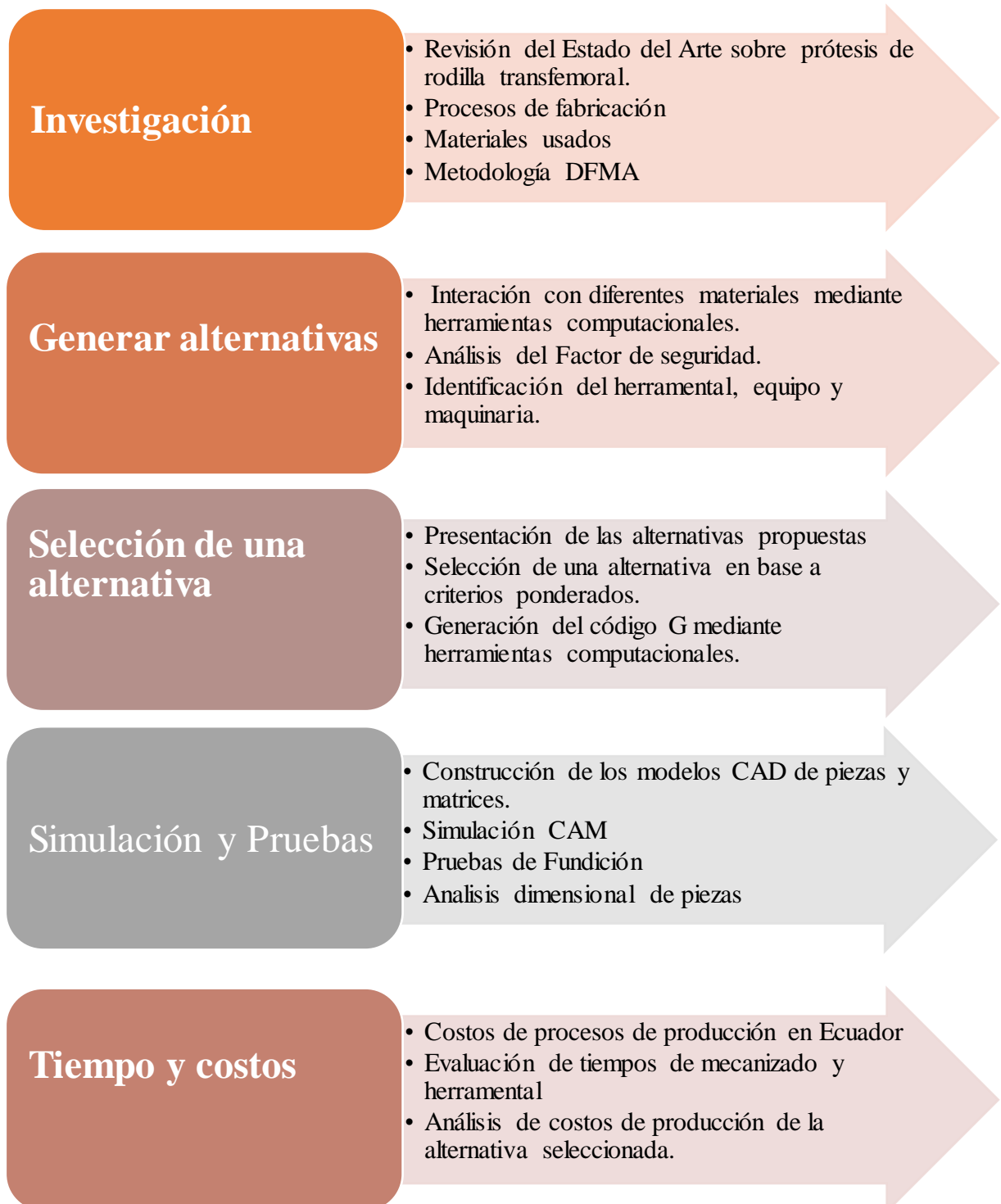
## CAPÍTULO III

### Marco metodológico

En el presente capítulo se detalla la metodología aplicada para el desarrollo de esta investigación, se describe claramente el proceso que se ha trazado para cumplir con los objetivos planteados, tal como se muestra en la figura 14.

**Figura 13**

*Metodología aplicada*



### 3.1. Modelo de investigación.

En este trabajo de investigación se utiliza la investigación bibliográfica, científica y aplicada que a continuación se detalla.

- **Investigación bibliográfica:** A partir de la indagación de información en documentos y revistas científicas se recolecta y selecciona datos necesarios para continuar con el cumplimiento de los objetivos [56].
- **Investigación científica:** Es una actividad encaminada a la solución de problemas, su objetivo consiste en hallar soluciones mediante el empleo de procesos científicos [56].
- **Investigación aplicada:** Se conoce también como práctica, se basa en abordar estrategias que fueron empleadas para la solución de problemas en forma práctica y posteriormente obtener resultados. [56].

### 3.2. Estructura de la investigación.

En este capítulo se muestra cada una de las fases para llevar a cabo el estudio para una alternativa de fabricación de dos prótesis de rodillas comerciales.

#### 3.2.1. Fase 1: Investigación

En esta fase se recolecta información sobre prótesis de rodilla para amputación transfemoral, como: tipos de prótesis, materiales que las componen, prótesis existentes en el mercado nacional y movimientos que realizan como otros parámetros que se describen a continuación.

- Actividad 1: Revisión del Estado del Arte en fuentes bibliográficas acerca de prótesis de rodilla transfemoral.
- Actividad 2: Recopilación de información sobre procesos de fabricación existentes en Ecuador.
- Actividad 3: Búsqueda de Información sobre materiales utilizados en la fabricación de prótesis de rodilla transfemoral.
- Actividad 4: Revisión de la metodología DFMA y principios que la componen.

#### 3.2.2. Fase 2: Generar alternativas de fabricación.

En esta etapa, mediante el uso de herramientas computacionales se realiza las simulaciones con diferentes materiales ya estudiados en el capítulo 2 y el desarrollo del

proceso de producción de cada uno de los elementos que componen las prótesis de rodilla seleccionadas, la identificación del herramental, equipo y maquinaria.

- Actividad 1: Interactuar con diferentes materiales mediante simulaciones en las prótesis de rodilla usando un software de ingeniería, se utiliza aluminio 6063 y Aleación de aluminio 356.0-T6.
- Actividad 2: Verificación del factor de seguridad obtenido mediante el análisis de cargas durante el ciclo de la marcha humana.
- Actividad 3: Identificación de la maquinaria, equipo y herramental para la construcción de las diferentes piezas.

### **3.2.3. Fase 3: Seleccionar una alternativa de fabricación.**

Con los datos obtenidos en la fase anterior se lleva a cabo la selección de una alternativa de fabricación de la prótesis de rodilla policéntrica.

- Actividad 1: Presentación de las alternativas propuestas.
- Actividad 2: Selección de una alternativa mediante criterios ponderados.
- Actividad 3: Generación del código G mediante herramientas computacionales.

### **3.2.4. Fase 4: Simulación y Pruebas.**

Para validar la alternativa se vio necesario realizar la simulación y respectivas pruebas de los procesos de fabricación propuestos de la siguiente forma.

- Actividad 1: Construcción de los modelos CAD de piezas y matrices.
- Actividad 2: Simulación CAM del proceso de fresado.
- Actividad 3: Construcción de los moldes permanentes
- Actividad 4: Pruebas del proceso de fundición de los moldes construidos.
- Actividad 5: Análisis dimensional de las piezas fundidas.

### **3.2.5. Fase 5: Tiempo y costos.**

Con el fin de conocer el costo de la alternativa seleccionada se realiza el respectivo análisis de costos, siguiendo la siguiente estructura.

- Actividad 1: Costos de los procesos de producción
- Actividad 2: Costos de herramientas y tiempo de mecanizado.
- Actividad 3: Análisis de costos de producción de la alternativa seleccionada.

## CAPÍTULO IV

### Resultados y Análisis

En este capítulo se presenta el análisis de dos prótesis de rodilla externa policéntrica de las cuales se realiza la selección, la interacción con diferentes materiales mediante simulación en un software de ingeniería, también tras el estudio de los procesos de fabricación existentes en el país se procede a generar el código de acuerdo con el método de producción para continuar con la propuesta de dos alternativas de producción de la cual se selecciona una de estas.

#### 4.1. Selección de dos prótesis de rodilla externa transfemoral.

Se selecciona dos articulaciones de rodilla externa entre cuatro de ellas, las variables que se toman en cuenta para la selección de prótesis de rodilla externa son: equilibrio, seguridad, función, comodidad, eficiencia en la emulación de la marcha [57] con un nivel de actividad K3 según el sistema Mobis de Ottobock [58].

La selección se llevó a cabo mediante Matriz QFD, a continuación, se describe los requerimientos del cliente como los “Qués” y los requerimientos del ingeniero o técnicos como los “Cómos”.

#### 4.2. Requerimientos.

Es necesario identificar lo que desea el cliente y los requerimientos técnicos a través de los cuales se responderá a los “Que” es decir como satisfacer los deseos del cliente. A continuación, se realiza una evaluación de la relación entre la voz del cliente con las prótesis propuestas, esta es de alta, media y baja, esta relación es posible de realizar ya que se conoce de antemano las especificaciones del producto [59].

##### 4.2.1. Requerimientos del cliente.

De acuerdo con el estudio realizado en [12] [59], se identifica los requerimientos del cliente que se describen a continuación en la tabla 12.

**Tabla 12**

*Requerimientos del cliente.*

Requerimientos del cliente	Descripción del requerimiento
Equilibrio	El paciente puede mantenerse de pie con el dispositivo en uso.



Estética	Mantener el esquema corporal de la persona amputada.
Precio bajo	Un valor asequible para el paciente.
Fácil de ensamblar	Fácil de armar.
Bajo peso	Los componentes de la prótesis deben ser de bajo peso, debido a que el paciente llevara puesta la prótesis en su vida diaria.
Comodidad	Facilitar la adaptación del amputado a las actividades.
Emulación de la marcha	Que garantice la caminata del paciente.
Seguridad	Favorecer psicológicamente a la persona amputada a no tener miedo a caerse

#### 4.2.2. Requerimientos del ingeniero.

Es importante hacer referencia a los requerimientos de ingeniería con el fin de analizar las especificaciones que debe cumplir las prótesis transfemorales, se detallan los requerimientos en la tabla 13.

**Tabla 13**

*Requerimientos de ingeniería.*

Requerimientos del ingeniero	Descripción de los requerimientos
Materiales que conforma la prótesis	Sea duradero y no falle.
Emulación de la marcha	Respecto a la cinemática, dinámica y centro instantáneo de rotación.
Diseño	Suplir la estructura faltante del amputado.
Peso de la prótesis	Es de gran importancia el peso que conforma la prótesis para el desarrollo del amputado.
Peso del paciente	Un parámetro que se toma en cuenta en el momento del diseño.
Numero de ejes	Un mecanismo con mayor número de ejes asemeja su comportamiento al de una rodilla sana.

Número de componentes de la prótesis	Un elevado número de componentes conlleva a mayor costo de fabricación.
Dimensión del mecanismo	Optimización de los espacios y del material, además un mecanismo pequeño se reduce en peso.

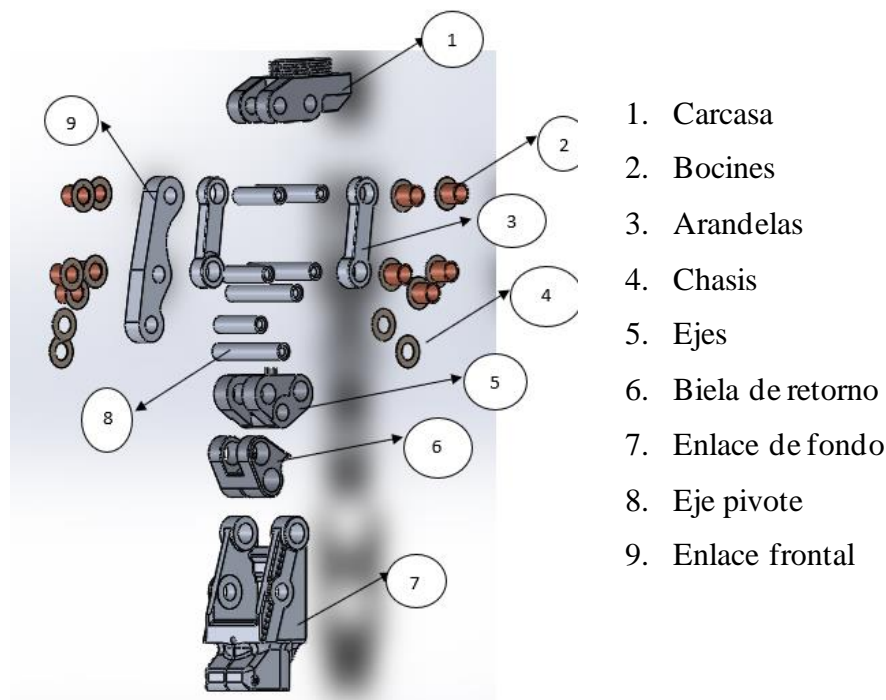
Del análisis de la matriz se determina que las prótesis que obtuvieron la mayor ponderación respecto a los requerimientos técnicos y de la voz del cliente son, así como la comparación entre los requerimientos del ingeniero entre las diferentes prótesis son Ossur 2000 y Streifeneder 3A20, la matriz QFD se muestra en el anexo 3.

#### 4.3. Descripción de los componentes de Ossur 2000.

La Total Knee Ossur 2000, es una rodilla policéntrica que imita el movimiento de la articulación de la rodilla humana y sus ejes simulan la acción que ocurre dentro de ella durante la marcha, tiene un peso de 800 g y está fabricada de titanio. A continuación, se describe cada uno de los elementos que forman parte de esta prótesis, como se muestra en la figura 15.

**Figura 14**

*Partes de Total Knee 2000.*

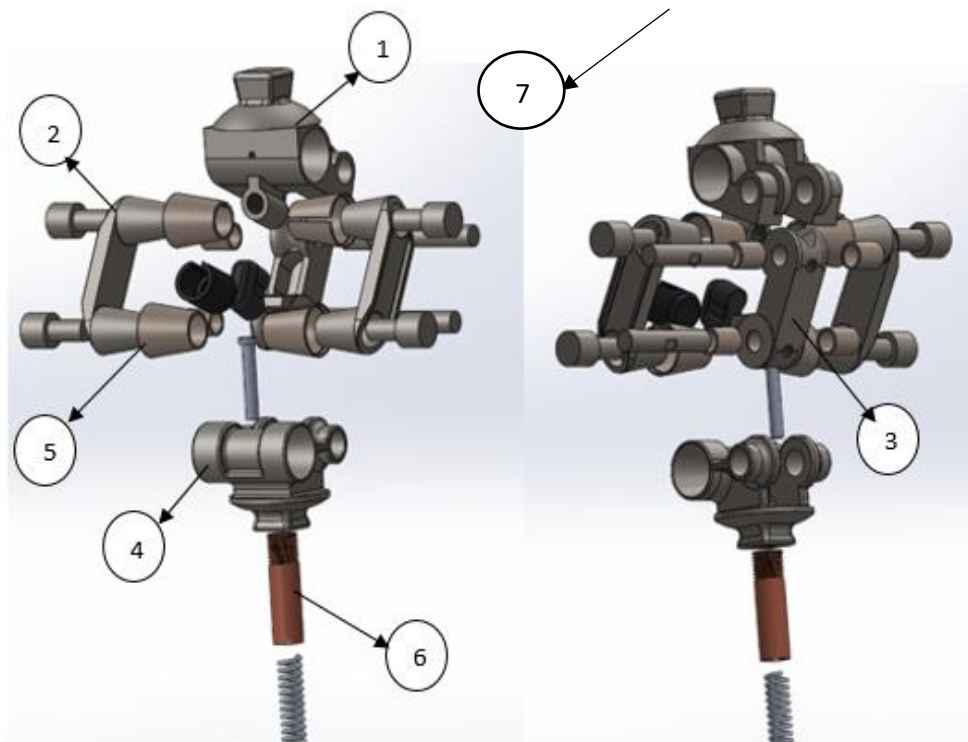


#### 4.4.Descripción de los componentes de Streifeneder.

Streifeneder 3A20, es una rodilla policéntrica en Acero inoxidable con un peso de 680 gramos, que imita el movimiento de la rodilla y sus ejes simulan la acción que ocurre dentro de la articulación, a continuación, en la figura 16 se presenta sus componentes.

**Figura 15**

*Componentes de Streifeneder 3A 20.*



Como se muestra en la figura 16 la articulación de rodilla está compuesta por los siguientes elementos:

- 1: Eslabón superior
- 2: Biela delantera
- 3: Regulación
- 4: Eslabón inferior
- 5: Bocines de cobre
- 6: Resorte.
- 7: Eje

De los cuales se analiza una alternativa de fabricación de: Eslabón superior, Bielas delanteras, Regulación y Eslabón inferior, los bocines y resorte se buscará adquirir en el mercado nacional.

#### 4.5. Proceso de fabricación.

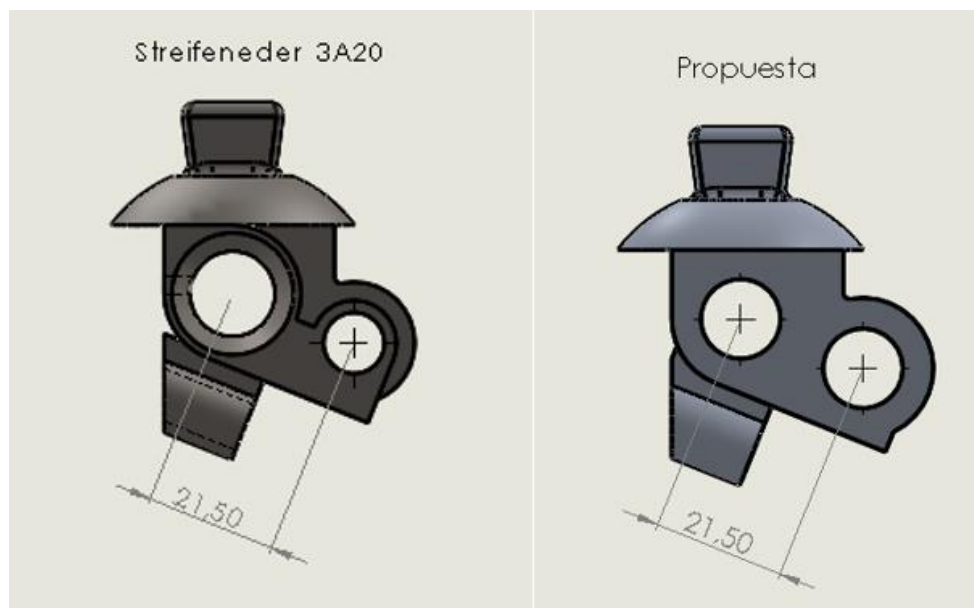
Para describir el proceso de fabricación, se empieza por detallar el rediseño de la prótesis en estudio, posteriormente los métodos empleados para producir cada pieza, el herramental necesario y su respectiva simulación con el uso de un software computacional.

##### 4.5.1. Rediseño de prótesis

La nueva propuesta está desarrollada en base a la prótesis comercial Streifeneder 3A20, para el rediseño se mantiene las dimensiones de cada elemento, así como la distancia entre centro de los ejes para no alterar su funcionamiento como se muestra en la figura 17. Con el objetivo de facilitar su construcción se simplifica la geometría de las piezas de tal manera que para la fabricación se pueda emplear un herramental y procesos existentes en el mercado nacional de esta manera se cumple con los principios de la metodología DFMA.

**Figura 16**

*Comparación de la distancia entre centros.*

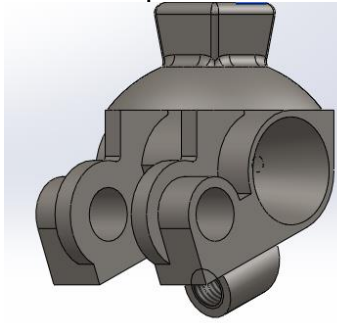
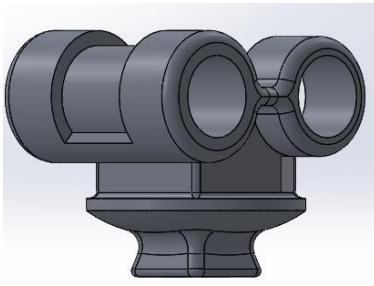
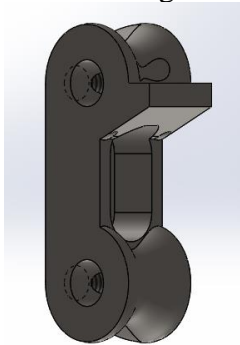
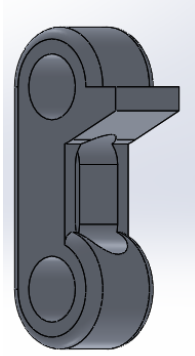
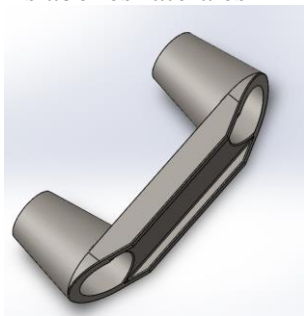


En la tabla 14 y 15 se menciona los cambios realizados para obtener una nueva propuesta en base a los criterios de la metodología DFMA como son: la simplificación de

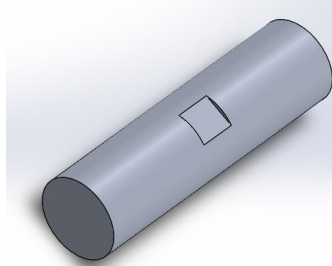
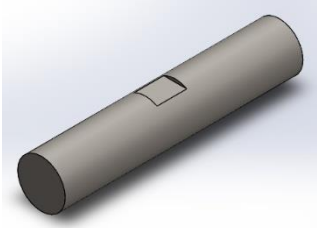
geometrías irregulares y complejas para favorecer la fabricación y ensamblaje y el uso de elementos estándar de las prótesis Streifeneder y Ossur respectivamente.

**Tabla 14**

*Detalle de cambios realizados en el rediseño.*

<b>Streifeneder 3A20</b>	<b>Rediseño</b>	<b>Cambios</b>
<p data-bbox="226 546 459 580">Eslabón superior</p> 		<p data-bbox="1074 510 1361 656">Diámetro de perforaciones para alojar bocines rectos estándares.</p> <p data-bbox="1074 696 1361 763">Eliminación de aristas.</p> <p data-bbox="1074 804 1361 913">Aumento del espesor de la geometría irregular.</p>
<p data-bbox="226 949 451 983">Eslabón inferior</p> 		<p data-bbox="1074 949 1361 1016">Perforaciones cónicas a rectas.</p> <p data-bbox="1074 1057 1230 1090">Redondeos.</p>
<p data-bbox="226 1238 507 1272">Elemento regulación</p> 		<p data-bbox="1074 1238 1361 1348">Perforación a medida del diámetro del bocín normalizado.</p> <p data-bbox="1074 1388 1361 1496">Cambio de la geometría de reloj de arena a circular recta.</p>
<p data-bbox="226 1626 488 1659">Eslabones laterales</p> 		<p data-bbox="1074 1626 1361 1693">Incremento del volumen.</p> <p data-bbox="1074 1733 1361 1809">Cambio de salientes cónicas a rectas.</p>

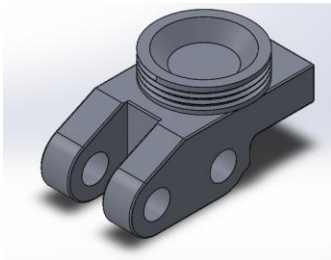
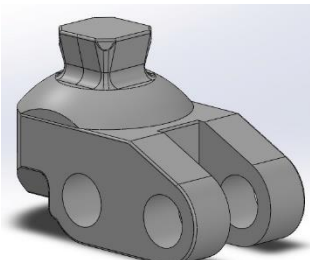
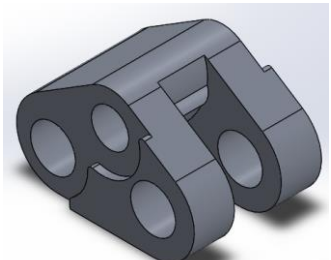
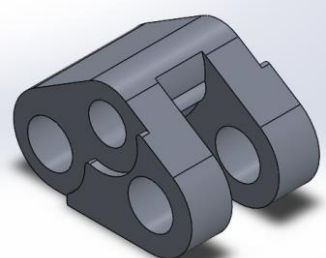
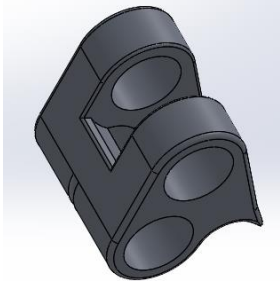
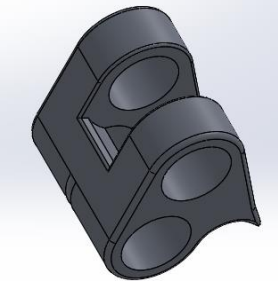
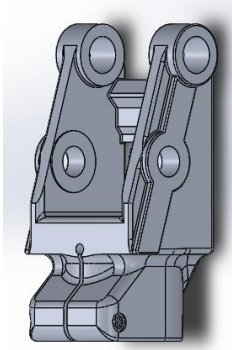
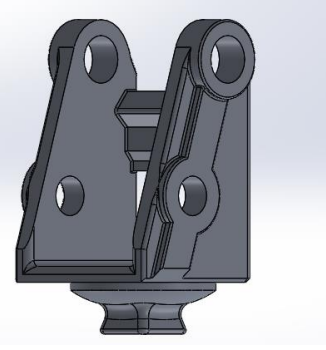
Ejes

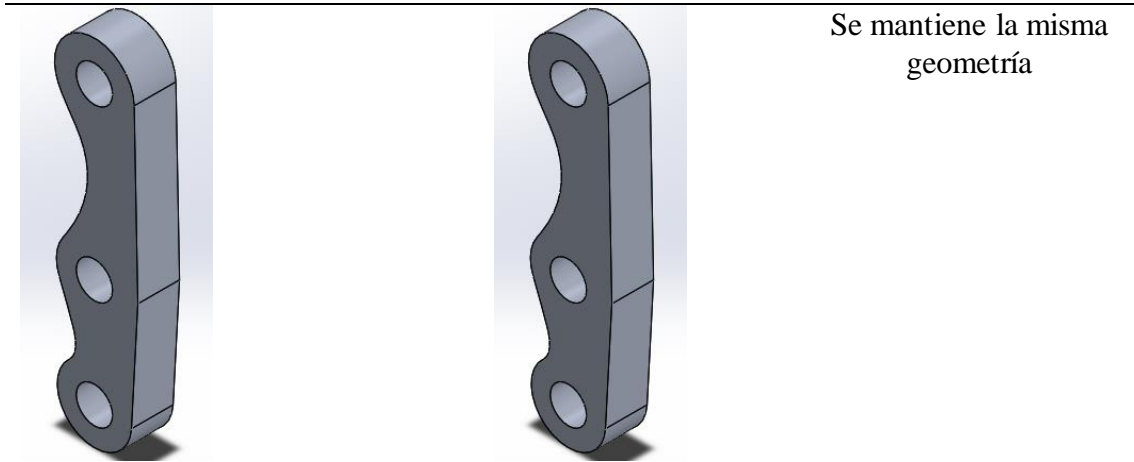


Cambio del diámetro del eje igual al diámetro del bocín seleccionado.

**Tabla 15**

*Detalles de cambios realizados a Ossur 2000.*

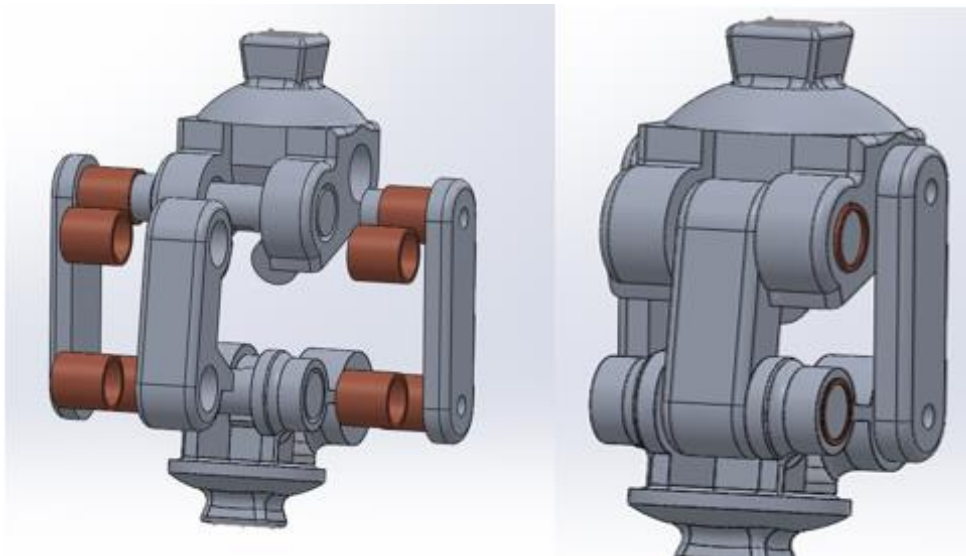
Ossur 2000	Rediseño	Cambios
		Cambio del acople roscado al acople piramidal
		Se mantiene la misma geometría
		Se mantiene la misma geometría
		Se reduce la geometría de la pieza y se cambia la sujeción a piramidal al pilar



Una vez realizado el rediseño se obtuvo los modelos presentados en la figura 18 y 19 de la alternativa 1 y alternativa 2 respectivamente.

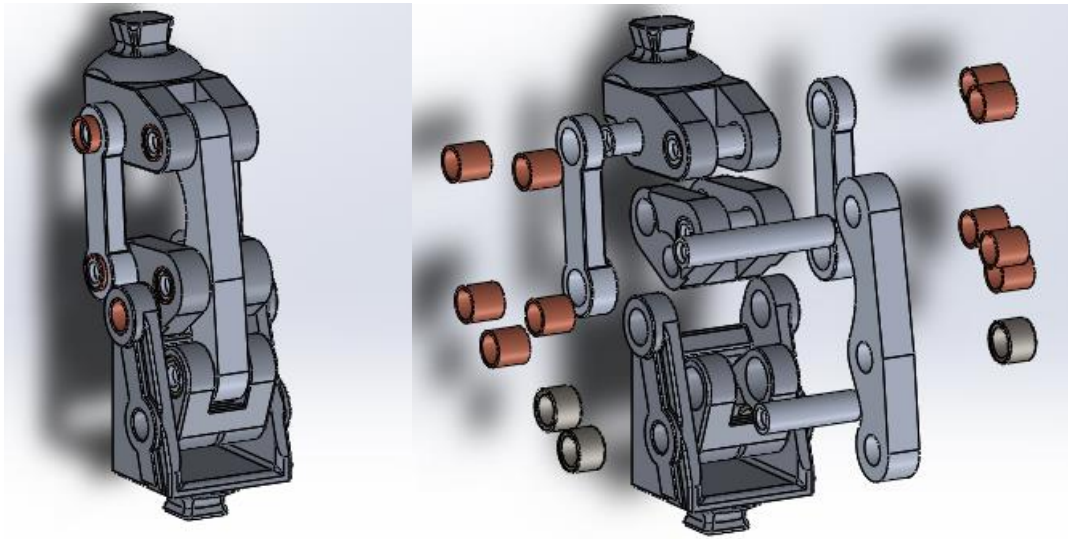
**Figura 17**

*Propuesta de prótesis de rodilla alternativa 1.*



**Figura 18**

*Propuesta de prótesis alternativa 2.*



Se presenta dos alternativas funcionales, para la posterior selección de procesos de fabricación de las prótesis rediseñadas en la figura 18 y 19.

#### **4.5.2. Selección de los procesos de fabricación en base a la geometría.**

Para seleccionar que tipo de proceso se va a utilizar se ha hecho un análisis de la geometría de cada uno de los componentes en estudio. Se muestra en la tabla 19 las características que tienen las piezas a fabricarse y el método de producción a emplearse, esta información es extraída de la tabla 16.

**Tabla 16**

*Resumen de características y métodos de producción [42].*

Forma o característica	Método de Producción
Piezas con cavidades	Fresado, maquinado por descarga eléctrica, Fundición.
Piezas con características agudas	Fundición de molde permanente, maquinado.
Característica detallada de las superficies	Fundición de moldes permanentes, Fundición a la cera perdida.
Ejes	Torneado o adquisición de ejes estándar.

Los métodos de producción que se emplean para fabricar las piezas con las características que tienen los componentes de la prótesis en estudio son: Fundición por



molde permanente, maquinado y torneado entre los más recomendados [34]. A continuación, en la tabla 16 se muestra una alternativa de fabricación, la pieza o componente y el método seleccionado para su producción.

#### 4.5.3. Selección del material para los moldes.

Los aspectos que se deben considerar para la selección del material de los moldes son: la temperatura de la colada, el tamaño de la fundición, el método de llenado (gravedad o inyección), el volumen de producción y el costo de este, además el material debe poseer una maquinabilidad adecuada. Según [60] el material adecuado para elaborar moldes permanentes es el acero W302 ya que este permite realizar trabajos en caliente y garantiza alrededor de 200 000 vertidos, pero su costo es elevado.

Otros materiales comúnmente empleados para coquillas son el acero ASTM A36 que es un acero estructural de bajo contenido en carbono, mismo que presenta características similares al del hierro gris, pero este tiene una vida más corta.

En la tabla 17 se muestra las propiedades que fueron obtenidas en la base de datos Matweb y su costo en el mercado de la cotización de diferentes proveedores en Ibarra y Quito.

**Tabla 17**

*Propiedades de las alternativas de materiales.*

Material	Densidad	Punto de fusión	Maquinabilidad	Costo en el mercado Kg
Hierro fundido	7,2 g/cc	1200°C		2 USD
Acero ASTM A36	7,85 g/cc	1,425-1,538 °C	72%	2,12 USD
Acero W302	7,60 g/cc	1425-153 °C	72%	15,50 USD

Para este estudio se selecciona el Acero A36 por su bajo costo en relación con el acero W302, permite validar el proceso de fundición y analizar la geometría de las piezas fundidas.

#### 4.5.4. Selección del material para mecanizado por arranque de viruta y mediante fundición.

Los materiales seleccionados deben cumplir con características tales como: baja densidad, mayor resistencia a la rotura, resistencia al desgaste, sean mecanizables con una

viruta quebradiza en el caso del material que será seleccionado para las piezas a fabricarse por arranque de viruta y buena colabilidad es decir la capacidad de llenar completamente la cavidad del molde en el caso del proceso de fundición.

En la tabla 18 se muestra los materiales que cumplen con estas características, estas se han obtenido de la página Matweb y de la cotización en el mercado ecuatoriano.

**Tabla 18**

*Alternativas de materiales en el uso de prótesis externa de rodilla.*

Material	Módulo de elasticidad (Gpa)	Densidad (g/cc)	Resistencia máxima a la tensión (Mpa)	Costo en el mercado (USD)
Aleación de aluminio 356.0 T6	72,4	2,68	228	8,00
Aluminio 6063-T6	68,9	2,70	490	8,90

Una característica del aluminio es su peso ligero y su densidad comparada con los aceros es una tercera parte de estos. Debido a la relación de la resistencia versus densidad el material seleccionado es el aluminio 6063-T6, por sus características similares al acero, menos denso y por ser menos costoso.

Para la selección del material que se va a fundir se utilizará una aleación 356.0-F (Establecida por la norma ASTM B-108) que es una aleación de aluminio para la fundición (aluminio-silicio-magnesio).

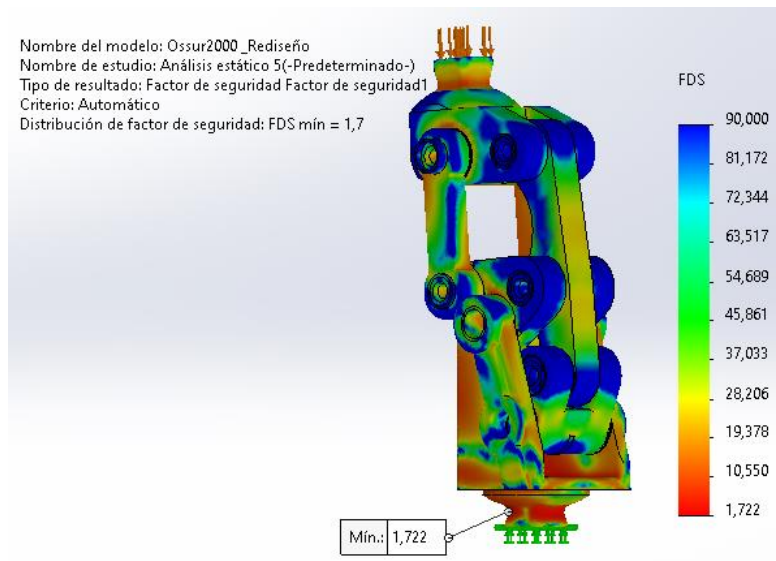
#### **4.6. Simulación mediante herramientas computacionales.**

Mediante el uso de un software computacional se realiza el estudio con el objetivo de determinar el factor de seguridad y peso de la prótesis.

Los materiales que se utilizaron para este análisis son: aleación de aluminio 356.0 para las piezas que se fabricaran mediante el proceso de fundición y aluminio 6063- T6 para las piezas por mecanizado.

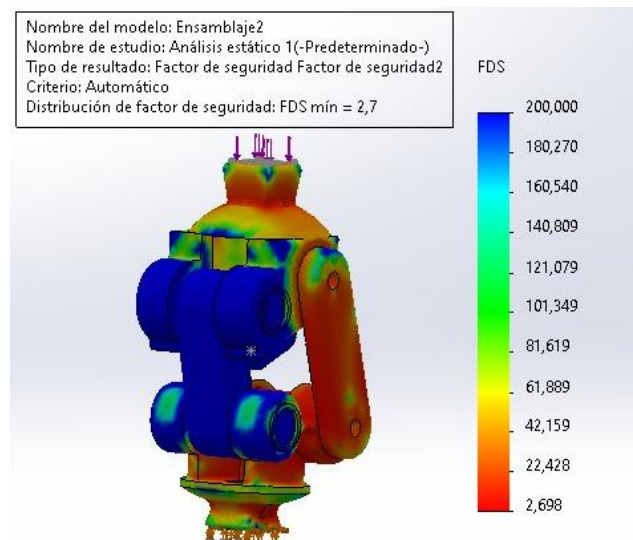
Se ha realizado el análisis en las zonas de mayor concentración de cargas como son: en la parte superior la unión de la rodilla al socket y en la parte inferior la unión al pilar, tomando en cuenta que la articulación se encuentra en compresión y soportando la

máxima carga del paciente que en este caso es de 100 kg, en la figura 20 y 21 se presenta el análisis de las dos alternativas.



**Figura 19**

*Análisis estático de Streifener.*



Los resultados obtenidos son: factor de seguridad de 2,7 para el rediseño de Streifeneder como se muestra en la figura 20 y de 1,7 para Ossur como se muestra en la figura 21

Como se aprecia, las prótesis no solo cumplen con los requerimientos de diseño como es el factor de seguridad sino también las dos prótesis son más ligeras, un parámetro

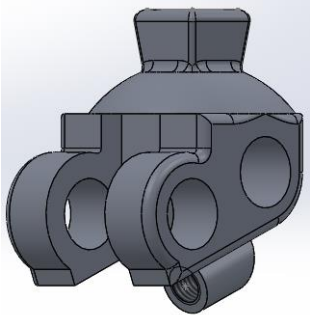
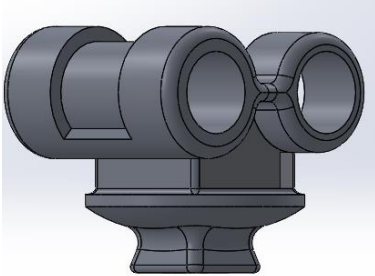
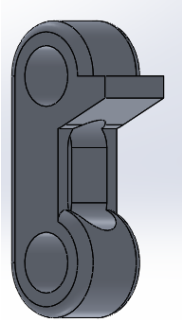
importante ya que en el estudio realizado en [61] , el paciente consume entre el 10% al 60% más de energía debido al sobredimensionamiento.

#### 4.6.1. Propuestas de Fabricación.

En base a los conceptos de la metodología DFMA se determinó los procesos de fabricación presentados en las tablas 19 y 20 para la prótesis rediseñada y Ossur 2000 respectivamente, se detalla el método (fundición, fresado CNC o torneado) correspondiente a cada eslabón.

**Tabla 19**

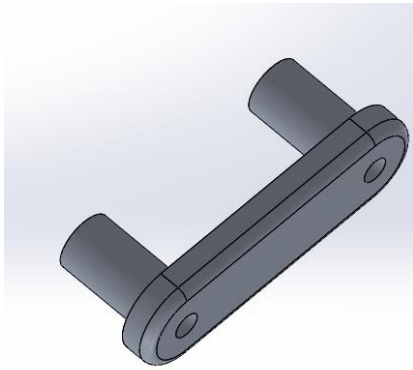
*Método de producción de los componentes de la prótesis.*

Alternativa 1	
Pieza o componente	Método de Producción
<p>Eslabón Superior</p> 	Fundición por molde permanente
<p>Eslabón inferior</p> 	Fundición por molde permanente
<p>Elemento de regulación</p> 	Fresado CNC

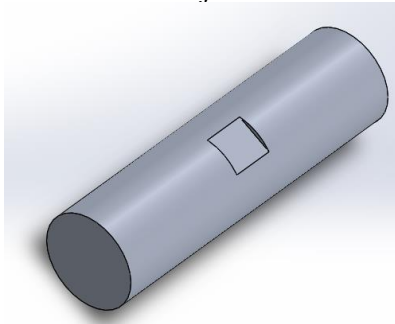
---

Eslabones laterales o ejes

Fresado CNC



Eje



Torneado y fresado.

---

Como se puede observar en la tabla 19, el eslabón superior y el eslabón inferior serán fabricados mediante el proceso de fundición por molde permanente, el elemento de regulación por fresado CNC y el eje mediante torneado.

**Tabla 20**

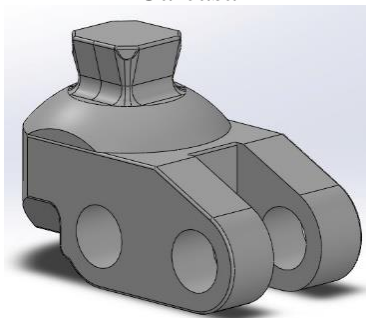
*Alternativa 2.*

---

Alternativa 2

Pieza o componente

Carcasa



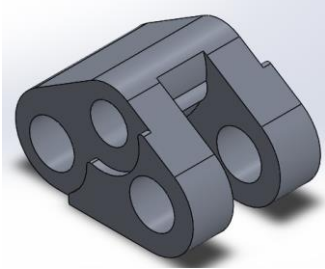
---

**Método de producción**

Fundición en molde permanente.

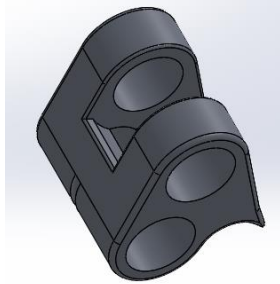
---

Eje pivote



Fundición en molde permanente.

Enlace de fondo



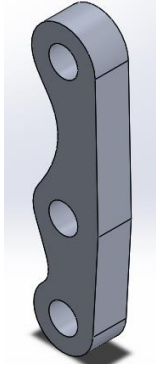
Fundición en molde permanente.

Enlace frontal



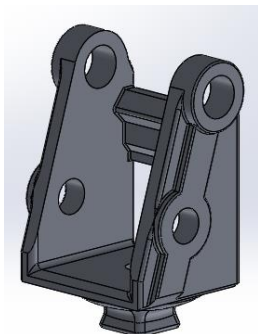
Fresado CNC

Biela de retorno



Fresado CNC

Chasis

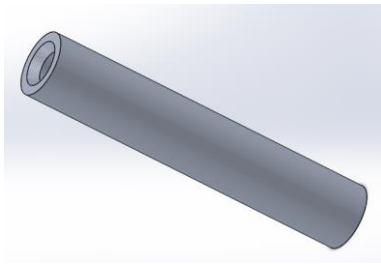


Fundición en molde permanente

---

---

Eje



Torneado

---

Mientras que en la tabla 20 se detallan las piezas que se fabricaran mediante el proceso de fundición por moldes permanentes, estas son: Carcasa, eje pivote y enlace de fondo, las piezas por fresado CNC son: Biela de retorno, enlace frontal y chasis.

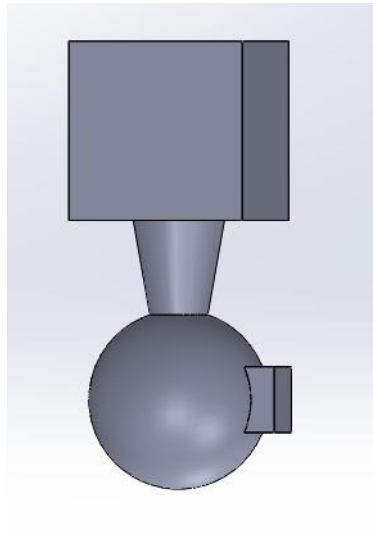
#### 4.6.2. Diseño de los moldes.

Para obtener los moldes permanentes se debe tener en cuenta las siguientes consideraciones: el modelo, el sistema de alimentación, espesor de pared y las perforaciones guías.

- El modelo, es la misma pieza dimensionada para obtener un producto final de las magnitudes requeridas, de acuerdo con la tabla 14 la contracción para aleaciones de aluminio es de 15mm/m para piezas de hasta 12500  $mm^2$  rango en el que se encuentran las piezas en estudio de ahí se obtiene que el valor del sobredimensionamiento es de 0,6 mm.
- Además, el modelo debe poseer el ángulo de desmoldeo que para este caso es de  $1^\circ$  o 0,75 mm según la tabla 15.
- Posteriormente se añade el sistema de alimentación ya diseñado y dimensionado respecto a la geometría de la pieza como se muestra en la figura 21, en donde se utiliza una mazarota esférica de diámetro 20 mm para evitar rechupes ya que por su geometría demora más tiempo en enfriarse y así provee de material a la zona de la pieza en donde puede ocurrir rechupes. El bebedero cónico de diámetro superior de mm, diámetro inferior de mm y longitud de mm.

## Figura 20

*Sistema de alimentación.*



- El espesor de la pared del molde depende del tamaño de las piezas que se vayan a fundir. Por ejemplo, un molde de paredes muy delgadas se calienta demasiado en cada llenado y a su vez se enfría con rapidez y viceversa [62], para este estudio se consideró un ancho de pared de 2,5 mm
- Perforaciones guías: sirven para centrar las dos placas del molde y limitar la distancia que recorre las placas.

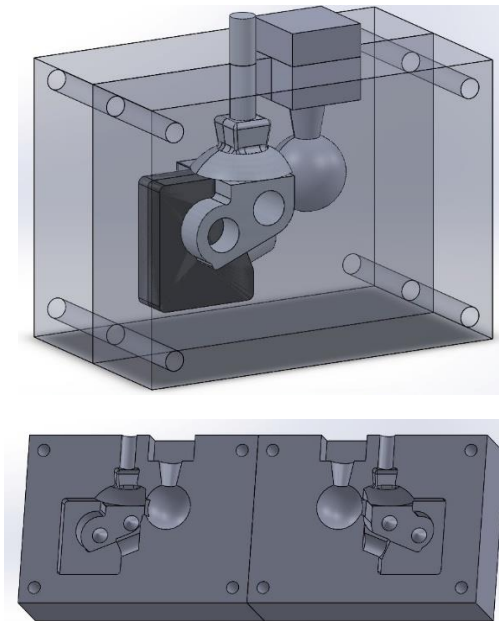
Mediante el uso de un software computacional se realiza la operación cavidad, de esta manera se obtienen los moldes de las piezas que se fabricaran mediante el proceso de fundición por molde permanente.

Se indicará los moldes correspondientes a las piezas que se fabricaran por fundición de la alternativa 1, en la figura 22 se presenta los moldes correspondientes al Eslabón superior.



## Figura 21

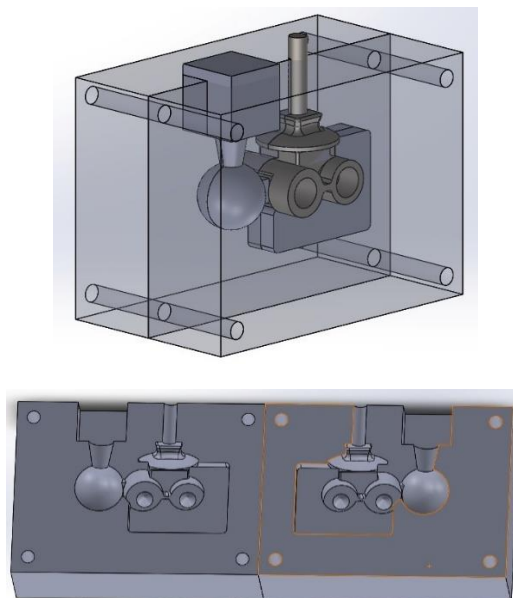
*Molde del Eslabón superior.*



En la figura 23 se presenta los moldes del eslabón inferior de la alternativa 1.

## Figura 22

*Molde del Eslabón inferior*

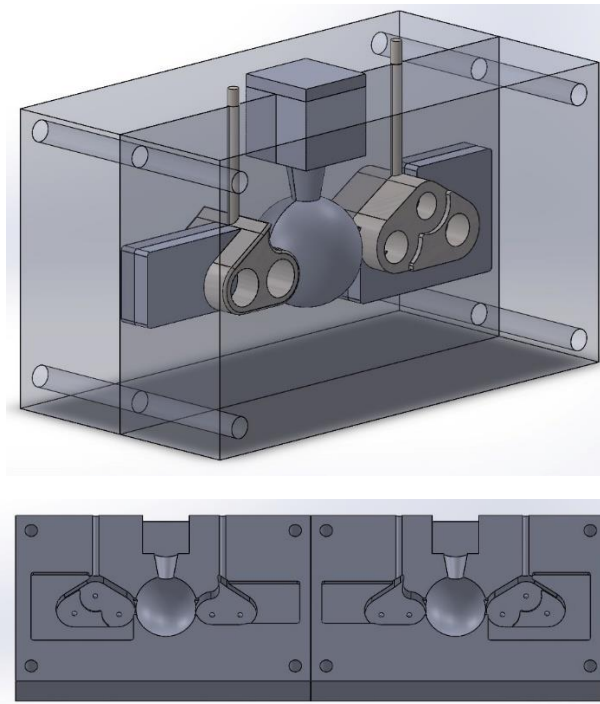


De acuerdo con la charla realizada en “Prótesis Imbabura” y a la experiencia del ortopedista se recomienda que el Eslabón inferior y el Eslabón superior se fabriquen formando una sola pieza con la pirámide, por medio de esta el eslabón superior se una al socket y el eslabón inferior al pilar, lo que permite regular la alineación de la prótesis.

A continuación, se muestra los moldes de las piezas que se fabricaran por el proceso de fundición, estos corresponden a la alternativa 2, en las figuras 24 y 25 se observa los moldes de las piezas respectivamente.

**Figura 23**

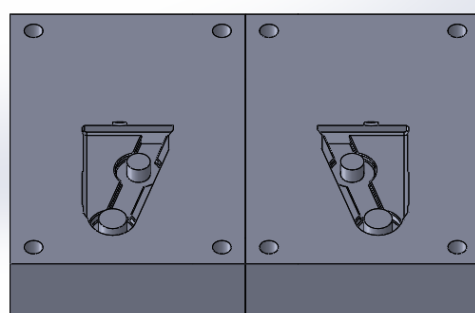
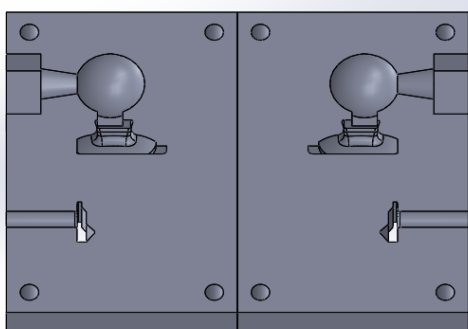
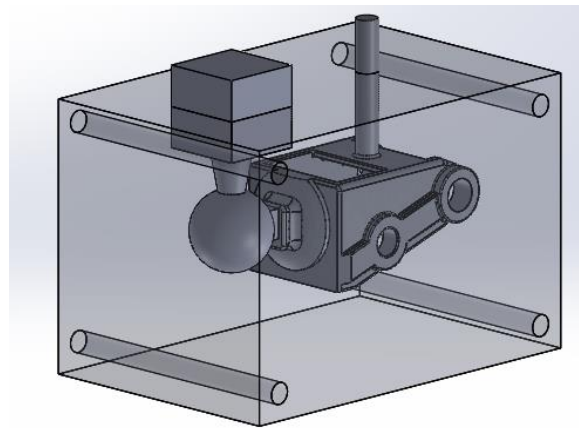
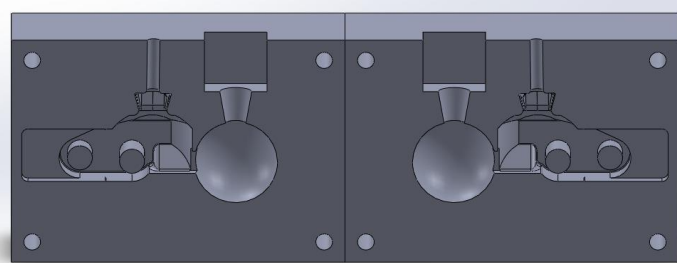
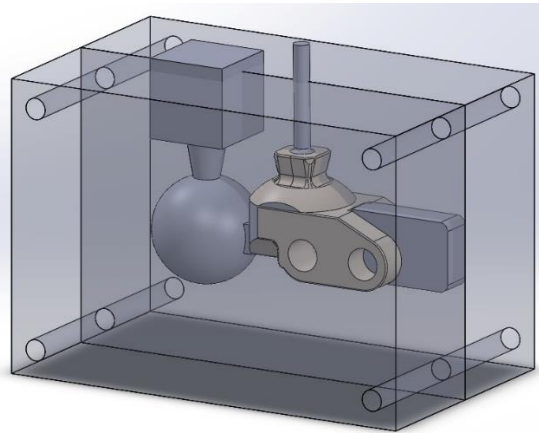
*Moldes correspondientes al eje pivote y enlace de fondo.*



En la figura 24 se observa los moldes correspondientes a las piezas ejes pivote y enlace de fondo correspondientes a la alternativa 2, como se muestra las dos piezas serán obtenidas en una misma fundición.

**Figura 24**

*Moldes correspondientes a la carcasa y chasis.*

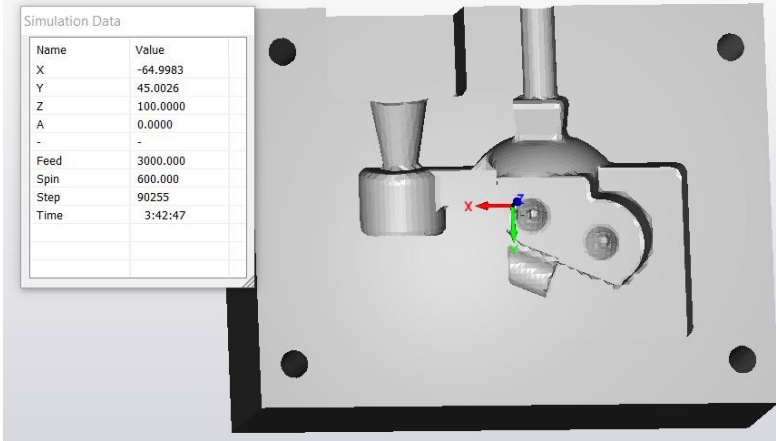


#### 4.7. Simulaciones CAM

A continuación, se presenta las simulaciones de las piezas propuestas por fresado CNC en las tablas de la 21 a la tabla 26, las mismas que fueron realizadas con la ayuda de un software de ingeniería, este permite realizar varias iteraciones mediante la combinación de diferentes operaciones y herramienta con la finalidad de reducir en tiempo de mecanizado.

**Tabla 21**

*Simulaciones del molde del eslabón superior.*


Pieza 1 Molde Eslabón superior	Número de operaciones	Número de herramientas	Tiempo de mecanizado. (h)	Tiempo de instalación, montaje y verificación. (h)	Costo estimado (USD)	Simulación final
Simulación 1	5	5	10	0	375	
Simulación 2	7	5	7	0	175	
Simulación final	8	8	3,7	2	100	

Como se muestra en la tabla 21, se realiza tres simulaciones para la manufactura del molde correspondiente al Eslabón superior, en donde se tiene como resultado un tiempo de mecanizado de 3 horas con 45 minutos.

A continuación, en la tabla 22 se muestra los resultados de las simulaciones del pin auxiliar 1, en donde se obtiene un tiempo de mecanizado de 30 minutos y un costo de máquina de 25 dólares.

**Tabla 22**

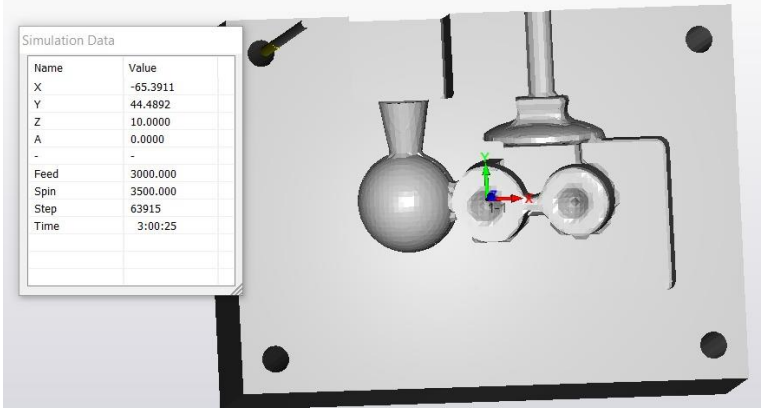
*Resultados de la simulación del pin auxiliar 1.*

Pieza 2 Pin auxiliar 1	Número de operaciones	Número de herramientas	Tiempo de mecanizado. (h)	Tiempo de instalación, montaje y verificación. (h)	Costo estimado. (USD)	Simulación final.
Simulación 1	3	2	1,5	0	33,5	
Simulación Final	3	4	0,5	0,5	25	

A continuación, en la tabla 23 se muestra los resultados obtenidos de la simulación que se realiza para la manufactura del molde del eslabón inferior, en donde se usan 6 herramientas con un tiempo de mecanizado de 3 horas.

**Tabla 23**

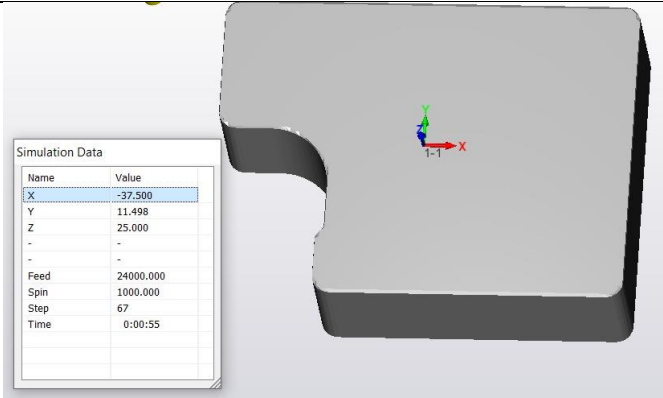
*Resultados de la Simulación del molde del Eslabón inferior.*

Pieza 3 Molde Eslabón inferior	Número de operaciones	Número de herramientas	Tiempo de mecanizado. (H0000)	Tiempo de instalación, montaje y verificación. (h)	Costo estimado	Simulación final
Simulación 1	5	4	6	0	150	
Simulación 2	4	4	4	0	100	
Simulación final	4	6	3	1,5	75	

En la tabla 24 se puede observar los resultados de las diferentes simulaciones realizadas para obtener el pin auxiliar 2, en donde se obtiene un tiempo de mecanizado de 30 minutos.

**Tabla 24**

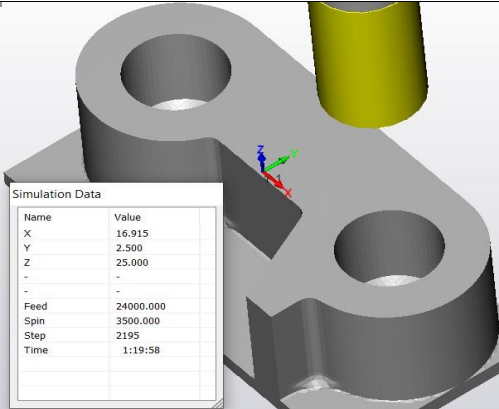
*Resultados de la simulación del pin auxiliar 2.*

Pieza 4 Pin auxiliar 2	Número de operaciones	Número de herramientas	Tiempo de mecanizado. (h)	Tiempo de instalación, montaje y verificación. (h)	Costo estimado. (USD)	Simulación final.
Simulación 1	3	2	2	0	50	
Simulación Final	3	3	1	0,5	25	

En la tabla 25 se muestra la simulación CAM del elemento regulación y los datos obtenidos de estas, como el tiempo de manufactura con un resultado de una hora con 20 minutos.

**Tabla 25**

*Resultados de la simulación del Elemento Regulación.*

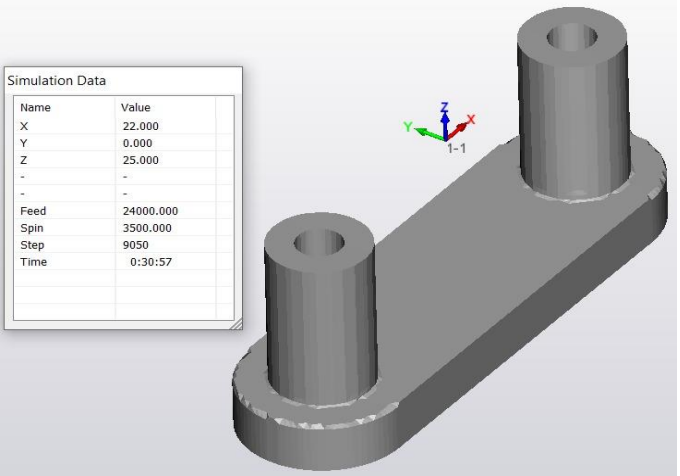
Pieza 5 Elem. Regulación	Número de operaciones	Número de herramientas	Tiempo de mecanizado. (h)	Tiempo de instalación, montaje y verificación. (h)	Costo estimado (USD)	Simulación final
Simulación 1	3	3	3	0	75	
Simulación final	2	4	1,3	0,5	33	



En la tabla 26 se muestra las simulaciones realizadas para las bielas laterales, como se observa el tiempo de mecanizado es de 30 minutos con 30 minutos en el montaje y un precio de producción de 25 dólares.

**Tabla 26**

*Resultados de la simulación de las Bielas Laterales.*

Pieza 6 Bielas laterales	Número de operaciones	Número de herramientas	Tiempo de mecanizado. (h)	Tiempo de instalación, montaje y verificación. (h)	Costo estimado. (USD)	Simulación final.
Simulación 1	3	2	1,5	0	37,5	
Simulación Final	3	3	0,5	0,5	25	

#### 4.8. Selección de una alternativa.

Para la selección de la mejor alternativa de fabricación de prótesis de rodilla se realizó la tabla 27, mediante la metodología de criterios ponderados se elegirá cuál de estas fabricar.

**Tabla 27**

*Comparación entre Streifeneder y Ossur 2000.*

Descripción	Ossur	Streifeneder
Material	Aluminio 6063 T6 y aleación 356.0	Aluminio 6063 T6 y aleación 356.0
Altura construcción	173 mm	82 mm
Masa de la rodilla	553.46 gramos	276.05 gramos
Factor de seguridad mínimo	1,7	3
Flexión máxima de rodilla	160°	120°
Peso Paciente. Max	100 kg	100 kg
Número de elementos	10	7
Número de elementos para fabricar	7	5

Con base en la matriz QFD anexo 2, se procede a extraer los criterios de diseño y del cliente presentes en la tabla 28, a continuación, se presenta la nomenclatura a utilizarse.

**M:** Material.

**Gs:** Geometría simple.

**Hm:** Horas de mecanizado.

**Np:** Número de piezas a mecanizar.

**Pr:** Peso de la prótesis resultante.

**Tabla 28***Orden de importancia de los requerimientos.*

	M	Gs	Hm	Np	Pr	$\Sigma+1$	Ponderación
M		1	1	1	0	4	0,27
Gs	0		1	0	0	2	0,13
Hm	0	0		1	0	2	0,13
Np	0	1	0		0	2	0,13
Pr	1	1	1	1		5	0,33
					Suma	21	1

Ahora se analiza cada uno de los requerimientos y se compara. En la tabla 29, se muestra la evaluación de las alternativas respecto al material.

**Tabla 29***Comparación respecto al material.*

Material	Alternativa 1	Alternativa 2	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		0,5	1,5	0,5
Alternativa 2	0,5		1,5	0,5
		Suma	3	

En la tabla 30 se evalúa respecto a la geometría que presentan las dos alternativas.

**Tabla 30***Evaluación respecto a la geometría de la prótesis.*

Geometría	Alternativa 1	Alternativa 2	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		1	2	0,67
Alternativa 2	0		1	0,33
		Suma	3	

En la tabla 31 se evalúa respecto a las horas de mecanizado de las alternativas ya que este es un factor para determinar el costo de fabricación.

**Tabla 31**

*Comparación respecto a las horas de mecanizado.*

Horas de mecanizado	Alternativa 1	Alternativa 2	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		1	2	0,67
Alternativa 2	0		1	0,33
		Suma	3	

En la tabla 32 se evalúa respecto al costo de cada alternativa.

**Tabla 32**

*Evaluación respecto al bajo costo.*

Número de piezas	Alternativa 1	Alternativa 2	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		1	2	0,67
Alternativa 2	0		1	0,33
		Suma	3	

En la tabla 33, se evalúa las alternativas respecto a la emulación de la marcha humana.

**Tabla 33**

*Evaluación respecto a la emulación de la marcha humana.*

Peso	Alternativa 1	Alternativa 2	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		1	1,5	0,67
Alternativa 2	0		1,5	0,33
		Suma	3	

Una vez obtenidos estos datos, se realiza el análisis de cada resultado y se multiplica por el peso de cada requerimiento para encontrar la alternativa más viable, como se muestra en la tabla 34.

**Tabla 34**

*Análisis de alternativas.*

	M	Gs	Hm	Np	Pr	Total	Ponderación
A1	<b>0,5x0,27</b>	<b>0,67x0,13</b>	<b>0,67x0,13</b>	<b>0,67x0,13</b>	<b>0,67x0,33</b>	<b>0,617</b>	<b>1</b>
A2	0,5x0,27	0,33x0,13	0,33x0,13	0,33x0,13	0,33x0,33	0,373	2

Una vez realizada la tabla 34, se ha encontrado que la alternativa 1, es más factible de construir respecto a los requerimientos del cliente.

#### **4.9. Pruebas**

Una vez seleccionada la alternativa de fabricación se construye los moldes permanentes del Eslabón superior ya que es la pieza de mayor complejidad geométrica mediante el uso de un software CAM

En la sección anexos 2 se detallan las operaciones CAM que se utilizan para la construcción de los moldes y se obtuvo el respectivo código G con lo cual se llevó a cabo la fabricación mediante fresado CNC como se muestra en la figura 26 y en la figura 27 en las cuales se observa el resultado final, posteriormente en la sección anexos 4 y 5 se encuentran los planos y hojas de procesos respectivamente.

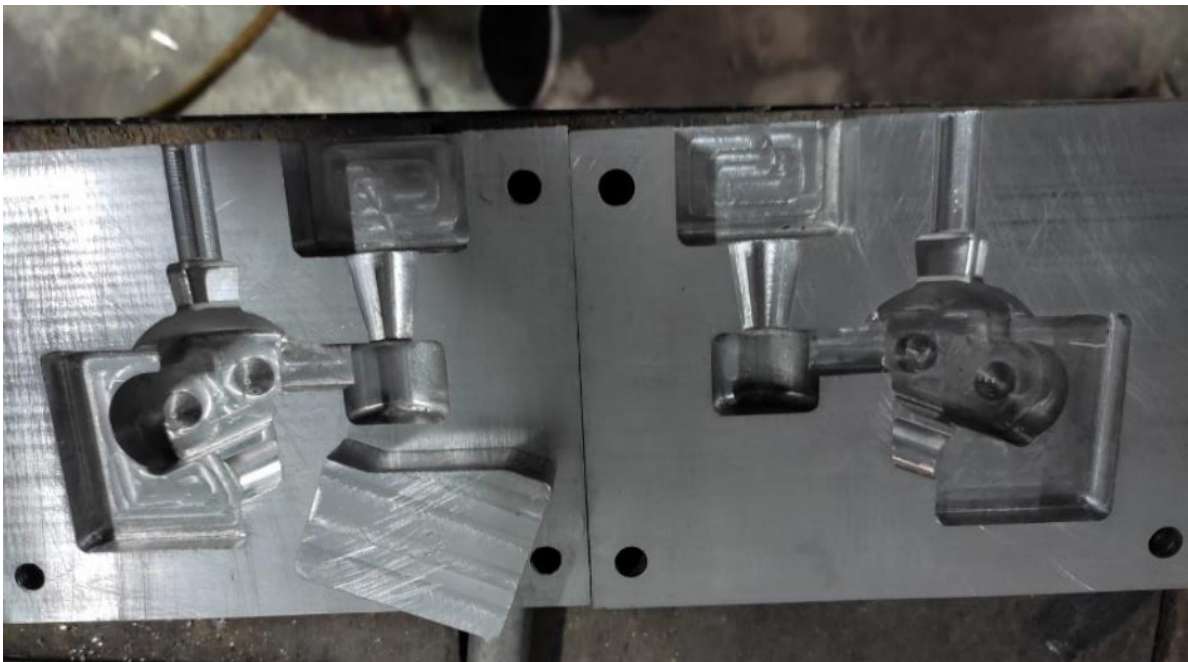
#### **Figura 25**

*Fresado CNC de los moldes correspondientes al Eslabón superior.*



## Figura 26

*Moldes contruidos del Eslabón Superior.*



Una vez obtenidos los moldes permanentes se procede a realizar las pruebas correspondientes para validar el proceso de fundición.

Para la fundición se selecciona la aleación de aluminio 356.0 designada bajo la norma (ASTM-B108) con 7% de silicio, 0,25% de cobre, 0,60% de hierro, 0,45% de magnesio, 0,35 % de manganeso, 0,35 de Zinc. Se describe el proceso:

- Se sueldan dos barras de 15 cm en cada placa para facilitar la manipulación en caliente de las coquillas.
- Se fundió el material requerido en el horno de4 crisol fijo a una temperatura de 750°C como se indica en la figura 28.

## Figura 27

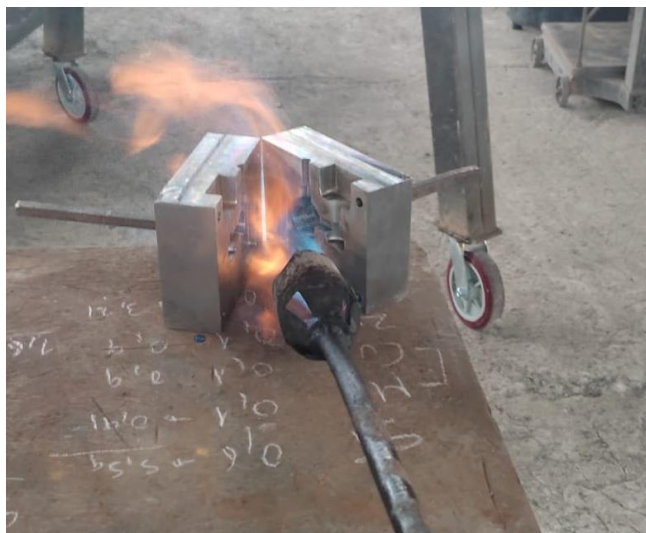
*Fundición del metal.*



- Mientras el aluminio llega a su punto de fusión se precalienta la matriz a 400°C como se observa en la figura 29, este precalentamiento ayuda a la fluidez de la colada, esta temperatura fue controlada mediante un termómetro pirómetro infrarrojo.

## Figura 28

*Precalentamiento de los moldes.*



- Posteriormente se pinta los moldes con tinta para moldes permanentes (DYCOTE LL 1400 BR) para garantizar la fluidez de la colada.
- Se ensambla la matriz, se centra con ayuda de las guías y se sujeta mediante prensas para evitar el recorrido de las placas, como se muestra en la figura 30.

### Figura 29

*Centrado de la matriz.*



- Se verte la colada dentro de la cavidad del molde a una altura aproximada de 20 cm y cuidando que el caudal sea constante, hasta que el metal rebose por el respiradero garantizando un buen llenado como se muestra en la figura 31.

### Figura 30

*Vertido de la colada a 750°C.*





- Solidificación y enfriamiento. - Se deja solidificar y enfriar por 5 minutos tiempo calculado analíticamente y tomado en el momento de realizar la prueba para validar las piezas fundidas.
- Desmoldeo. - Se abre el molde y se retira la pieza fundida como se indica en la figura 32.

### **Figura 31**

*Extracción de la pieza fundida de la matriz.*



Al momento de retirar la pieza fundida se desmoldeo fácilmente excepto el postizo debido a la dilatación del material producto del precalentamiento. Por este motivo se realizó una muesca como se observa en la figura 33 para facilitar su extracción mediante apalancamiento.

### **Figura 32**

*Postizo con muesca.*



- En la figura 34 se muestra la pieza obtenida, donde se evidencia un rechupe en la base del acople piramidal, debido a la forma y distancia de la pieza con la mazarota.

**Figura 33**

*Pieza fundida.*



Debido al rechupe presentado en la primera prueba se realiza el rediseño del molde, pasando de una mazarota cilíndrica a una esférica de diámetro 20 mm que es el diseño mostrado en la alternativa 1, tal como se muestra en la figura 35.

**Figura 34**

*Matriz rediseñada.*



## Prueba 2

Para realizar este proceso se siguen los mismos pasos indicados anteriormente y una vez finalizado se obtiene la pieza mostrada en la figura 36, la misma que no presente ninguna clase de imperfección en su estructura.

### Figura 35

*Pieza fundida (Segunda prueba).*



#### 4.10. Acabado de la pieza fundida.

Debido al proceso de fundición, la pieza requerida forma un solo cuerpo con el sistema de alimentación además carece de las diferentes perforaciones de alojamiento de los ejes, para obtener la forma de la pieza final es necesario realizar operaciones de limpieza o eliminación de mazarotas, bebederos y canales de alimentación adicional con operaciones de mecanizado para lo cual se sigue el siguiente proceso:

- Eliminación del sistema de alimentación: como se observa en la figura 37 se realiza el corte del bebedero y mazarota y en la figura 38 la eliminación disminución de presión.

**Figura 36**

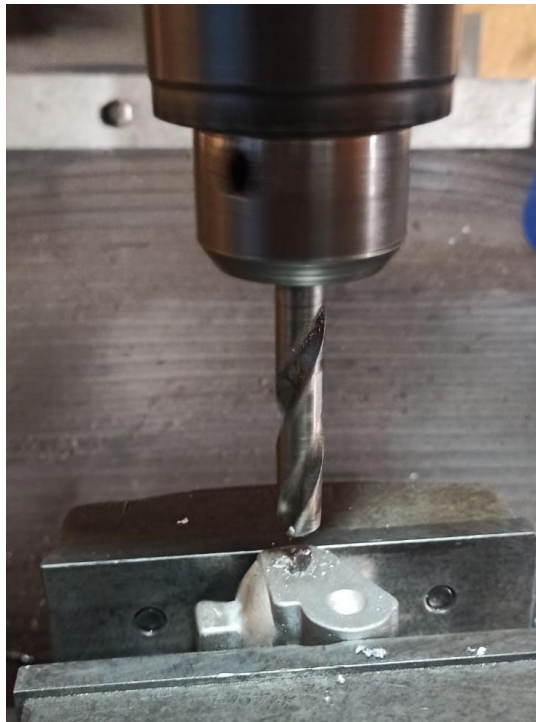
*Eslabón superior sujeta para eliminar el sistema de alimentación.*



- Perforaciones: la pieza final tiene perforaciones para los alojamientos de los ejes, en la figura 38 y 39 se muestra la operación de taladrado.

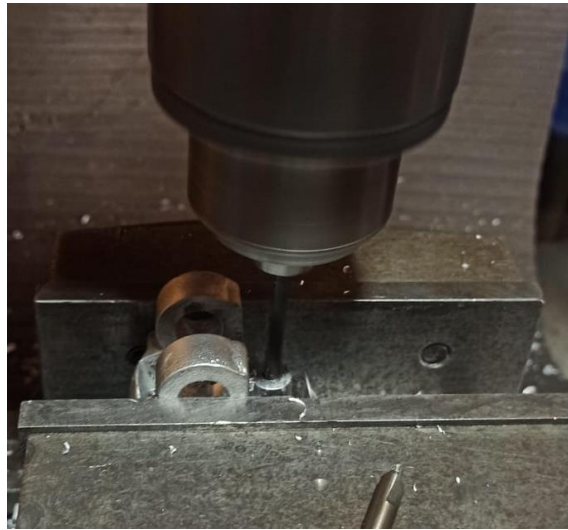
**Figura 37**

*Operación de Taladrado*



**Figura 38**

*Taladrado del tope.*



- Roscado: La pieza final posee una rosca, por lo que en la figura 40 se muestra su proceso.

**Figura 39**

*Operación de roscado.*



Las piezas metálicas fundidas en moldes permanentes generalmente presentan alta precisión en detalles, tolerancias y rugosidad [63], como se observa en la figura 41 y 42

la pieza tiene un buen acabado superficial por lo que no es necesario operaciones de eliminación de rebabas o rectificación.

**Figura 40**

*Pieza final.*



**Figura 41**

*Pieza Terminada.*



#### **4.11. Análisis dimensional.**

Una vez obtenida la pieza fundida se realiza el análisis dimensional comparando las medidas con las presentes en los planos de anexos 3 en la tabla 35.

**Tabla 35***Análisis dimensional de la pieza fundida respecto a plano.*

Ítem	Dimensiones de Pieza fundida (mm)	Dimensiones del Modelo CAD (mm)	% error
Ancho	39,9	40	0,25
Largo	28	28	0
Espesor de paredes	12	12	0
Dimensiones de la pirámide	L = 16,2	L= 16,3	0,86
Diámetro del tope	11,4	11,5	0,86

En la tabla 35 se evidencia que el margen de error no es superior al 0,86 % lo que garantiza que la pieza obtenida concuerda con las dimensiones del modelo CAD.

#### **4.12. Análisis de costos de producción.**

Para establecer el análisis de costos de producción es necesario tener definido adecuadamente los procesos de fabricación, materia prima, mano de obra directa, costos indirectos de fabricación y horas de diseño, en las tablas 36 y 37 se realiza el análisis de costos para producir la alternativa 1 de esta prótesis de rodilla.

En la tabla 36 se realiza el análisis de costos de la fabricación de los moldes permanentes, de acuerdo con el material seleccionado estos servirán para obtener alrededor de 2000 piezas fundidas.

**Tabla 36***Análisis de costos de los moldes permanentes.*

Hoja de costos para la fabricación de moldes			
	Cantidad	Valor unitario \$	Valor total \$
Materia prima directa			
Acero A36	28 kg	2,1	58,8
Materia prima indirecta			
Pernos	8 unidades	0,3	2,4
Mano de obra directa			
Mecanizado CNC	24 horas	25	600
Total			661,20
Precio por unidad			0,33

**Tabla 37***Análisis de costos para fabricar la alternativa 1.*

Hoja de costos			
	Cantidad	Valor unitario \$	Valor total \$
Materia prima directa			
Aluminio 6063-T6	1 kg	8,90	8,90
Aleación de aluminio 356.0 para fundición	1kg	2	2
Moldes Eslabón superior e inferior.	1 uso	0,33	0,33
Ejes acero inoxidable Ø 1/2'	1 unidades	6	6
Materia prima indirecta			
Bocines	4 unidades	1,50	6
Topes	1 unidad	40	40
Mano de obra directa			
Mecanizado CNC	10 horas	25	250
Fundidora	2 fundición	2	4
Diseño		1000	
Diseño por unidad	2000	0,50	0,50
Total			317,73
Utilidad	10%		31,77
Precio de venta			349,50



## CAPÍTULO V

### Conclusiones y recomendaciones.

En este capítulo se muestra las conclusiones y recomendaciones obtenidas a lo largo de este trabajo de investigación.

#### 5.1. Conclusiones

- Se determinó que las principales características de fabricación son: la distancia entre centros correspondientes a los alojamientos de los ejes, la tolerancia de estos de  $\pm 0,01$ , la altura de construcción, las magnitudes dimensionales de los eslabones y los ángulos de los acoples piramidales. Se emplea moldes permanentes considerando las siguientes características: ángulos de salida de  $1^\circ$ , sistema de alimentación, contracción del material de 4% y buen acabado superficial, adicional se selecciona dos materiales aleación de aluminio 356.0-T6 para las piezas fundidas y aleación de aluminio 6063-T6 para las piezas de mecanizado por arranque de viruta.
- Mediante el rediseño de la prótesis seleccionada se logró simplificar la geometría de las piezas sin alterar su funcionamiento y respetando sus funciones esenciales con el cual se redujo la masa en un 50% mientras que el factor de seguridad se incrementó de 1,8 a 2,7, para su fabricación se emplea el proceso de fundición mediante moldes permanentes ya que me permite obtener piezas agudas y complejas como los eslabones superior e inferior, fresado CNC para el elemento de regulación y eslabones laterales, torneado para los ejes, en bocines y topes se utilizan elementos mecánicos normalizados y de acuerdo a la tabla de costos se alcanza una reducción en 82,5 % respecto al costo del modelo comercial.
- Mediante el uso de la metodología de criterios ponderados se optó por la alternativa de fabricación 1, obteniendo una ponderación de 0,617 en relación con la otra alternativa que obtuvo 0,373 y considerando las siguientes características en el análisis: Material, Geometría, Horas de mecanizado, Número de componentes y peso de la prótesis de las cuales la alternativa 1 obtuvo una mayor ponderación en la evaluación de una geometría más simple y disminución de las horas de mecanizado.
- Mediante el uso de un software de ingeniería Solidworks- solidcam se realizó la interacción con diferentes operaciones y herramienta creando estrategia para reducir el tiempo de mecanizado que es un factor del cual depende el costo de

fabricación pasando de 50 horas a 34 horas, garantizando una producción eficiente y económica con un precio de venta de 350 dólares, manteniendo un buen acabado y dimensiones.

## **5.2. Recomendación**

- Se recomienda realizar pruebas con otros procesos de fundición, como: cera perdida o moldes permanentes por inyección para comparar con los resultados obtenidos en esta investigación.
- Para optimizar el proceso se recomienda colocar las dos piezas que se fabricaran por fundición en una misma coquilla por tratarse de dos piezas pequeñas y así fundir dos piezas al mismo tiempo.
- De ser posible construir la mayor parte de los componentes de la prótesis mediante fundición en moldes permanentes para disminuir en costos e incluso convertir en una producción en serie.
- Ensamblar la prótesis y realizar pruebas para verificar que no se haya alterado su funcionalidad.
- Considerar en el diseño tanto del molde como del sistema de alimentación que no tengan aristas vivas para evitar concentradores de esfuerzos y garantizar la vida del molde, así como también su resistencia a soportar grandes presiones.
- El volumen de la mazarota debe ser superior al volumen de la pieza y estar ubicada lo más cerca posible del modelo para garantizar que el punto caliente se encuentra en la mazarota evitando rechupes en el producto final.
- Utilizar elementos estándares que brindan información técnica: como bocines muelles, topes, ejes y pernos los cuales son fáciles de adquirir y más económicos.
- Para una producción en serie se recomienda fabricar las coquillas en acero W302 para garantizar hasta 200 000 fundiciones ya que en esta investigación se seleccionó el acero A36 por su bajo costo y así validar el proceso con el cual se obtiene alrededor de 2000 coladas y realizar las pruebas de funcionamiento.

## Referencias

- [1] CONADIS, “Información Estadística de Personas con Discapacidad”, Quito: Vicepresidencia de la República del Ecuador, 2019.
- [2] MSP, "Protocolo de atención para patologías que conlleva amputaciones", Quito: Vicepresidencia de la República del Ecuador, 2016.
- [3] J. P. J. H. J. V. E. S. C. C. M. R. C. A. y. V. P. Sánchez, “Biomecánica de la marcha humana normal y patológica”, Valencia, España: Instituto de Biomecánica de Valencia (IBV), 2005.
- [4] L. X. Valencia F, Modelo paramétrico de articulación de rodilla para amputación transfemoral unilateral., Ibarra: Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas “FICA”, 2021.
- [5] R. J. H. J. E. T. J. Sanchez, The mechanical design of a transfemoral prosthesis using computational tools and design methodology, Bogotá: Ing. Investig, 2012.
- [6] P. G. A. y. A. D. Kuo, Mechanisms of gait asymmetry due to push-off deficiency in unilateral amputees., IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 2015.
- [7] Össur, Catálogo Soluciones Protésicas, Össur Life without limitations, 2020.
- [8] J. A. C. M. M.-K. Belkys T. Amador, Uso de CAM para optimizar el proceso de fabricación de prótesis, Grupo de Biomecánica de la Universidad Simón Bolívar, 2016.
- [9] OMS, Informe mundial sobre la discapacidad, 2011.
- [10] Y. G. Bacallao, Protocolo de actuación en la rehabilitación de pacientes amputados de miembro inferior., Revista Cubana de Medicina Física y Rehabilitación 33-43, 2016.
- [11] G. G. Ledia, R. G. Cruz, G. F. Isabel y P. V. Nayra, Articulación de la rodilla y su mecánica articular / Knee articulation and its mechanics, Medisan, 2003.
- [12] L. Cifuentes, Ortesis, prótesis y ayudas técnicas para discapacitados, Madrid: Editorial Medica Panamericana, 2012.
- [13] C. M. V. E. F. Valencia, Desarrollo de una prótesis de rodilla para amputaciones transfemorales usando herramientas computacionales, Ibarra, Ecuador: Universidad Técnica del Norte, 2017.
- [14] V. F. L. X, Modelo paramétrico de articulación de rodilla para amputación transfemoral unilateral, Ibarra: Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas “FICA”, 2021.

- [15] C. M. E. V. A. L. T. Víctor Erazo A., Construcción de una prótesis de rodilla de tipo transfemoral mediante la aplicación de una metodología basada en la técnica DFMA, Ibarra, Ecuador: Universidad Técnica del Norte, 2019.
- [16] C. S. R. y. C. Cortés, «Conceptos de diseño para manufactura DFM de piezas microfundidas, Revista Ingeniería e Investigación , vol. 25, n° 3, pp. 49-60, 2005.
- [17] L. L. A. V. R. M. A. V. A. Altamirano, Prótesis Biónica de Rodilla de Bajo Costo Basada en Mecanismos, Mexico, 2012.
- [18] C. J. Alvarez J., Amputaciones en el pie diabetico, 2016.
- [19] T. L. Plaza, Diseño de Prótesis Mecánica de Pierna por Encima de la Rodilla, Madrid: UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID, 2018.
- [20] K. F. R. Vega, Estudio comparativo del comportamiento del ZYLON con el de materiales utilizados tradicionalmente en la fabricación de prótesis de rodilla., Quito-Ecuador : Escuela Politécnica Nacional , 2017.
- [21] F. d. P. y. Ortésica, Protésica del miembro inferior, Escuela de Medicina de la Universidad de Nueva York.
- [22] C. J. Martín A., “Fases de la marcha humana”, Revista iberoamericana de fisioterapia y kinesiología vol. 2, no. 1, pp. 44–49, 1999.
- [23] C. C. Lu TW, Biomechanics of human movement and its clinical applications, Kaohsiung J Med Sci, 2012.
- [24] F. C., “Implicaciones anatomofuncionales de la amputación del miembro inferior: cuidados del muñón y consecuencias en el sistema locomotor del uso prolongado de prótesis,”, Master’s thesis, Universidad de Valladolid, 2014.
- [25] M. a. F. V. Nordin, Biomecánica Básica del Sistema Muscoloesquelético, Madrid, 2004.
- [26] M. J. Alter, Los estiramientos, bases científicas y desarrollo de los ejercicios, Barcelona: Paidotribo, 2004.
- [27] S. o. production, "Prótesis miembro inferior", Gotteswinter und Aumaier GmbH, 2019.
- [28] A. L. V. Pasaguay Bález, Optimización del mecanismo de articulación de rodilla monocéntrica para prototipada de prótesis bomecátronica, Universidad Técnica del Norte, 2017.
- [29] Ortesica del miembro inferior, New York: Bilioteca O&P Facultad de medicina de la Universidad de New York, 1986.
- [30] G. Valentino, “Desarrollo de prótesis externa de rodilla con mecanismo policéntrico”, vol. 22, no. 4, pp. 247–253: Acta Ortopédica Mexicana, 2008.

- [31] ÖSSUR, Össur Dynamics Solution Total Knee 2000 pags 100-102.
- [32] Ossur, Total Knee 2000 Geometric Locking System, Instructions for Use.
- [33] Streifeneder, Streifeneder ortho productions Pags 111, 2021.
- [34] S. y. S. S. Kalpakjian, Manufactura, Ingeniería y Tecnología, México: Pearson Educación, 2002.
- [35] L. V. S. R. R. Fernández Jesús, Diseño para la fabricación y ensamblaje (DFMA), Asturias : PRODINTEC, 2018.
- [36] V. A. Oviedo Fausto, Diseño y construcción de un molde permanente utilizando el software vulcan, Quito: Escuela Polotécnica Nacional, 2012.
- [37] M. Herráez, Moldeo: Procesos de Fundición, Madrid: Universidad Rey Juan Carlos, 2020.
- [38] D. I. I. M. Avendaño Hector, Diseño y fabricación de modelos para fundición, México: Instituto Politécnico Nacional.
- [39] E. Capello, Tecnología de la fundición, Gustavo Gili, 1971.
- [40] H. Gerling, Moldeo y conformación, España: Editorial Reverté S.A pag 10, 1979.
- [41] V. Pastor, Simulación de Técnicas de Moldeo, Valencia: Universidad Politécnica de Valencia, 2016.
- [42] M. N. S. Ballesteros, Tecnología de proceso y transformación de materiales, Catalunya: Editorials UPC, 2009.
- [43] P. F. Javier, Diseño de los sistemas de distribución en procesos de fundición por gravedad mediante un método analítico., Cartagena: Universidad Politécnica de Cartagena, 2014.
- [44] H. G. I. L. A. Abuin, «Equipamiento y metodología para la determinación de la vida de materiales para moldes,» España, 2010.
- [45] S. X. Nápoles Amelia, Mecanizado por arranque de viruta, Ediciones UPC, 2000.
- [46] T. Industrial, Fabricación de piezas con arranque de material., 2000.
- [47] M. A. Perez, Programación de máquinas-herramientas por control numérico, Madrid : UNED, 2013.
- [48] D. P. C. D. T. Jhordan. A. Avila, "Diseño y construcción de un centro de mecanizado mecatrónico CNC con autocalibración por telemetría", Quito: Universidad Internacional del Ecuador, 2019.

- [49] F. Manuel, Elaboración de programas CNC para la fabricación de piezas por arranque de viruta, Málaga: ic editorial, 2013.
- [50] M. P. Groover, Fundamentos de Manufactura Moderna, Materiales, Procesos y Sistemas., México: Pearson .
- [51] M. Rossi, Herramientas modernas: Mandos hidráulicos, métodos de fabricación, tiempos de producción, Octava Edición.
- [52] Romi, Tornos CNC, Romi Catálogo, 2020.
- [53] O. A. Andrade, Manual de prácticas para el torno de control numérico (CNC) del taller de mecánica, México: Universidad Veracruzana, 2012.
- [54] M. S. Fulgueira, Elaboración de programas de CNC para la fabricación de piezas por arranque de viruta, Málaga: ic editorial , 2013.
- [55] D. G. G. Roberto Carro Paz, «Diseño y selección de procesos,» Universidad Nacional de Mar del Plata .
- [56] G. B. Paz, Metodología de la investigación, México: Grupo editorial PATRIA, 2014.
- [57] P. M, Principales causas de amputación de miembros inferiores presentes en pacientes prótesicos, atendidos en el periodo ENERO 2012–MAYO 2018 en el centro especializado en rehabilitación integral (CERI), Ecuador, 2018.
- [58] O. Bock, Nivel K Archivos Protésica, 2019.
- [59] B. Sergio, Fabricación de un prototipo de una prótesis de miembro inferior transtibial mediante tecnologías aditivas de acuerdo con las medidas antropométricas del paciente., Bogotá: Universidad Santo Tomás, 2018.
- [60] Bohler, «Acero para trabajo en caliente,» *Voestalpine high performance metals Iberica, S.A.U.*, vol. 1, p. 1, 2020.
- [61] C. S. Alexander, Análisis dinámico de una articulación de rodilla externa comercial, para mejorar la cinemática respecto a la marcha humana, para personas con amputación transfemoral de la zona 1 del Ecuador mediante herramientas computacionales., Ibarra: Universidad Técnica del Norte, 2021.
- [62] A. V. L. Fausto Oviedo Fierro, Diseño y construcción de un molde permanente utilizando un software por elementos finitos, Quito: Universidad Politécnica Nacional, 2013.
- [63] Departamento de Ingeniería Mecánica , Fundición en molde permanente., Bilbao : Universidad del país Vasco .

- [64] A. y. C. M. A. Mohamed, Development of a Mechanistic Hypothesis linking compensatory Biomechanics and stepping Asymmetry during Gait of transfemoral Amputees, Canada : Kiros Karamanidis, 2019.
- [65] L. L. A. V. R. M. A. V. A. Altamirano, Prótesis Biónica de Rodilla de Bajo Costo Basada en Mecanismos Policéntricos, México, 2012.
- [66] J. Bowker, Atlas of Limb Prosthetics: Surgical, Prosthetic, and Rehabilitation Principles, Rosemont, IL, 1992.
- [67] A. G. E. a. R. J. Maya, "Parámetros de diseño de una Prótesis de Rodilla en Colombia," IV Lat. Am. Congr. Biomed. Eng. 2007, 2007.
- [68] M. P. F. N. Fernando Valencia., Comparative analysis of the motion and kinematics of the knee joint, developed using simulation techniques, Ibarra-Ecuador.
- [69] The Aluminum Association, Aluminum Standard and Data 2013, p 1-10 , 1-11 , Tabla 6.2, Tabla 12.1, 2013.
- [70] C. A. Martinez.R, "Análisis de materiales para el diseño de un remate a compresión basado en el desempeño del producto y su fabricación ", Querétaro: CIATEQ, 2018.
- [71] Escuela Politécnica superior, "Propiedades Generales de los Materiales ".
- [72] F. G. Y. J. PLANELL, "Aplicaciones biomédicas del titanio y sus aleaciones", Barcelona: Dpto. de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica , 2010.
- [73] Iconofacto, Volumen 12 Numero 18, 2016.
- [74] F. J. y. P. Medina, Cuaderno de diseño 4, Diseño de procesos, Madrid: IED Madrid, 2014.
- [75] BONNET, BONNET suministros y maquinarias.
- [76] E. A. d. l. Torre, Desempeño mecánico en la aleación A356 ante variación en las concentraciones del refinador de grano Al-5Ti-B y adición de tierras raras, México: CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES AVANZADOS, S.C., 2013.
- [77] Z. & Glazoff, Aluminum and Its Alloys, New York: Taylor and Francis Group, 2007.
- [78] A. International, Standard Specification for Aluminum-Alloy Permanent Mold Castings, ASTM, 2003.
- [79] EFMO, «Protésica rodillas,» *Catálogo EFMO*, p. 1, 2018.
- [80] Streifeneder, «KINEGEN.air-active 3A1800,» *Streifeneder ortho production*, p. 45, 2018.

- [81] P. Gustavo, «Análisis de tracción de probetas impresas en 3D mediante deposición de hilo fundido de PLA,ABS MLO,» Universidad Politécnica Salesiana sede en Cuenca, Cuenca, 2019.
- [82] P. Jorge, «Estudio y Caracterización de materiales utilizados para la construcción de prótesis impresas mediante tecnología FDM,» Universidad Politécnica Madrid, Madrid, 2019.
- [83] S. P. Anchaluisa M, «Determinación del proceso de producción por fundición de antenas alimentadoras de energía para el sistema integrado trolebus en la ciudad de Quito,» Quito, 2012.



## **Anexos**

### **Anexo 1: Funciones Código “G” y Código “M”**

Con la finalidad de comprender la funcionalidad de los diferentes comandos del código G, se anexa el listado de comandos con su respectiva explicación.

#### **Códigos Generales**

- G00: Posicionamiento rápido (sin maquinar)
- G01: Interpolación lineal (maquinando)
- G02: Interpolación circular (horaria)
- G03: Interpolación circular (antihoraria)
- G04: Compás de espera
- G10: Ajuste del valor de offset del programa
- G20: Comienzo de uso de unidades imperiales (pulgadas)
- G21: Comienzo de uso de unidades métricas
- G28: Volver al home de la máquina
- G32: Maquinar una rosca en una pasada
- G36: Compensación automática de herramienta en X
- G37: Compensación automática de herramienta en Z
- G40: Cancelar compensación de radio de curvatura de herramienta
- G41: Compensación de radio de curvatura de herramienta a la izquierda
- G42: Compensación de radio de curvatura de herramienta a la derecha
- G70: Ciclo de acabado
- G71: Ciclo de maquinado en torneado (escalera con progresión monótona de cilindrados)
- G72: Ciclo de maquinado en frentado (escalera con progresión monótona de frentados)
- G73: Repetición de patrón
- G74: Taladrado intermitente, con salida para retirar virutas
- G76: Maquinar una rosca en múltiples pasadas
- G96: Comienzo de desbaste a velocidad tangencial constante
- G97: Fin de desbaste a velocidad tangencial constante
- G98: Velocidad de alimentación (unidades/min)
- G99: Velocidad de alimentación (unidades/revolución)

#### **Códigos Misceláneos**

- M00: Parada opcional
- M01: Parada opcional
- M02: Reset del programa

M03: Hacer girar el husillo en sentido horario  
M04: Hacer girar el husillo en sentido antihorario  
M05: Frenar el husillo  
M06: Cambiar de herramienta  
M07: Abrir el paso del refrigerante B  
M08: Abrir el paso del refrigerante A  
M09: Cerrar el paso de los refrigerantes  
M10: Abrir mordazas  
M11: Cerrar mordazas  
M13: Hacer girar el husillo en sentido horario y abrir el paso de refrigerante  
M14: Hacer girar el husillo en sentido antihorario y abrir el paso de refrigerante  
M30: Finalizar programa y poner el puntero de ejecución en su inicio  
M31: Incrementar el contador de partes  
M37: Frenar el husillo y abrir la guarda  
M38: Abrir la guarda  
M39: Cerrar la guarda  
M40: Extender el alimentador de piezas  
M41: Retraer el alimentador de piezas  
M43: Avisar a la cinta transportadora que avance  
M44: Avisar a la cinta transportadora que retroceda  
M45: Avisar a la cinta transportadora que frene  
M48: Inhabilitar Spindle y Feed override (maquinar exclusivamente con las velocidades programadas)  
M49: Cancelar M48  
M62: Activar salida auxiliar 1  
M63: Activar salida auxiliar 2  
M64: Desactivar salida auxiliar 1  
M65: Desactivar salida auxiliar 2  
M66: Esperar hasta que la entrada 1 esté en ON  
M67: Esperar hasta que la entrada 2 esté en ON  
M70: Activar espejo en X  
M76: Esperar hasta que la entrada 1 esté en OFF  
M77: Esperar hasta que la entrada 2 esté en OFF  
M80: Desactivar el espejo en X  
M98: Llamada a subprograma  
M99: Retorno de subprograma.

## Anexo 2: Operaciones CAM utilizadas para la construcción.

A continuación, en la tabla 38 se detallan las operaciones que se utilizaron en el proceso de CAM, las cuales son necesarias para obtener los moldes permanentes.

**Tabla 38**

*Operaciones CAM.*

<b>Operación</b>	<b>Herramienta</b>	<b>Tiempo min</b>	<b>Descripción</b>
Face	Piña de Ø100 mm	20	Planeado de caras
contour	Fresa Ø16 mm	40	Escuadrado, contorneado
HSR (High Speed Roughing) contour target	Fresa Ø16 mm	20	Desbaste de alta velocidad
HSR (High Speed Roughing) RestR_target	Fresa Ø12 mm		
	Fresa Ø6 mm	53	Desbaste restante
HSM (High Speed Machining) CZ_target	Fresa Ø6 mm	29	Desbaste
	Punta redonda		
HSM (High Speed Machining) Lin_target	Fresa Ø6 mm	30	Acabado
	Punta redonda		
HSM (High Speed Machining) Drill	Fresa Ø3 mm	18	Acabado
	Punta redonda		
	Broca Ø 5 mm	12	Taladrado de guías
	qwBroca Ø 8 mm		

### Anexo 3: Matriz QFD

A continuación, se presenta la matriz QFD realizada para la selección de los modelos comerciales a analizar.

Revision:  
Fecha:

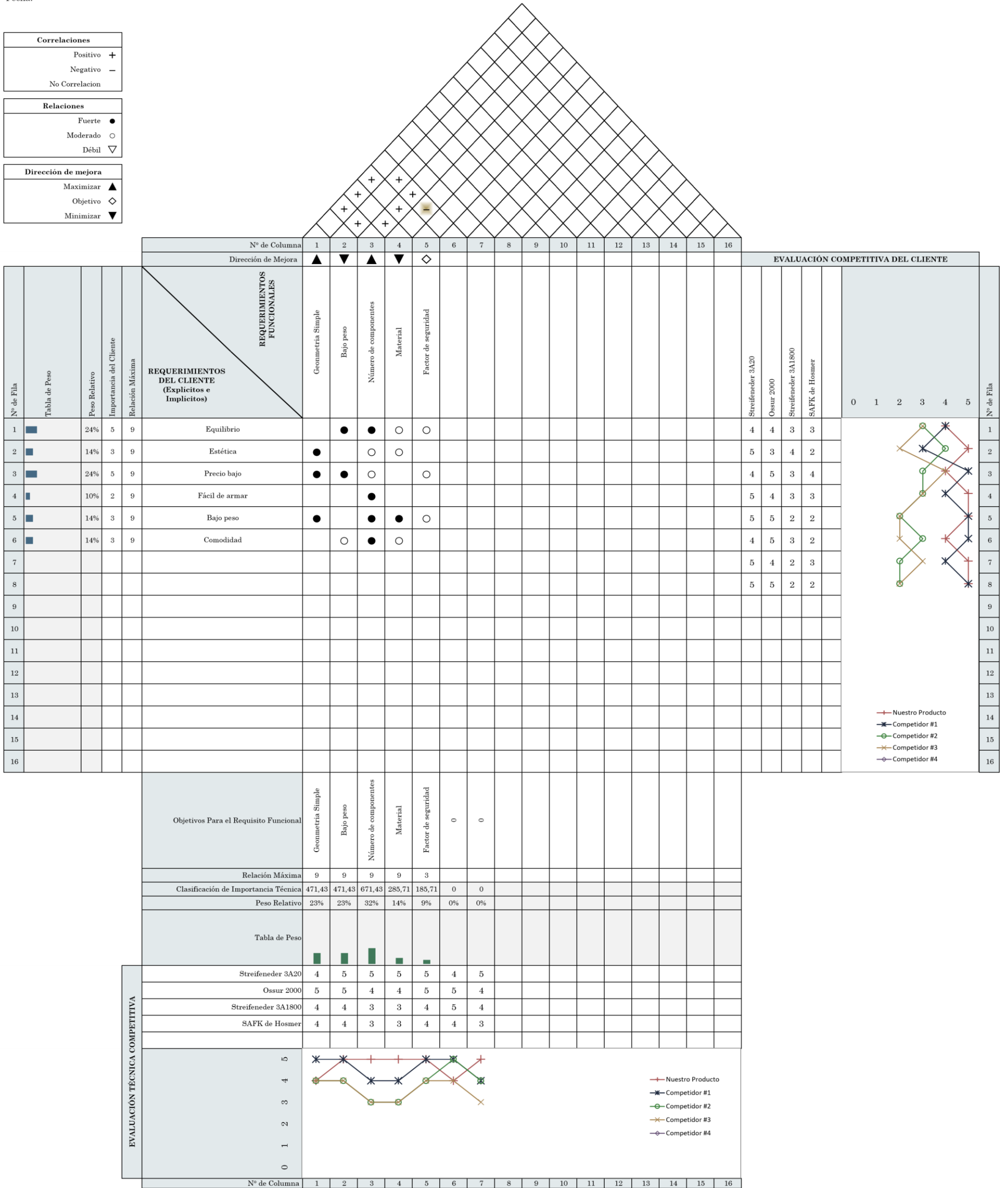
Correlaciones	
Positivo	+
Negativo	-
No Correlacion	

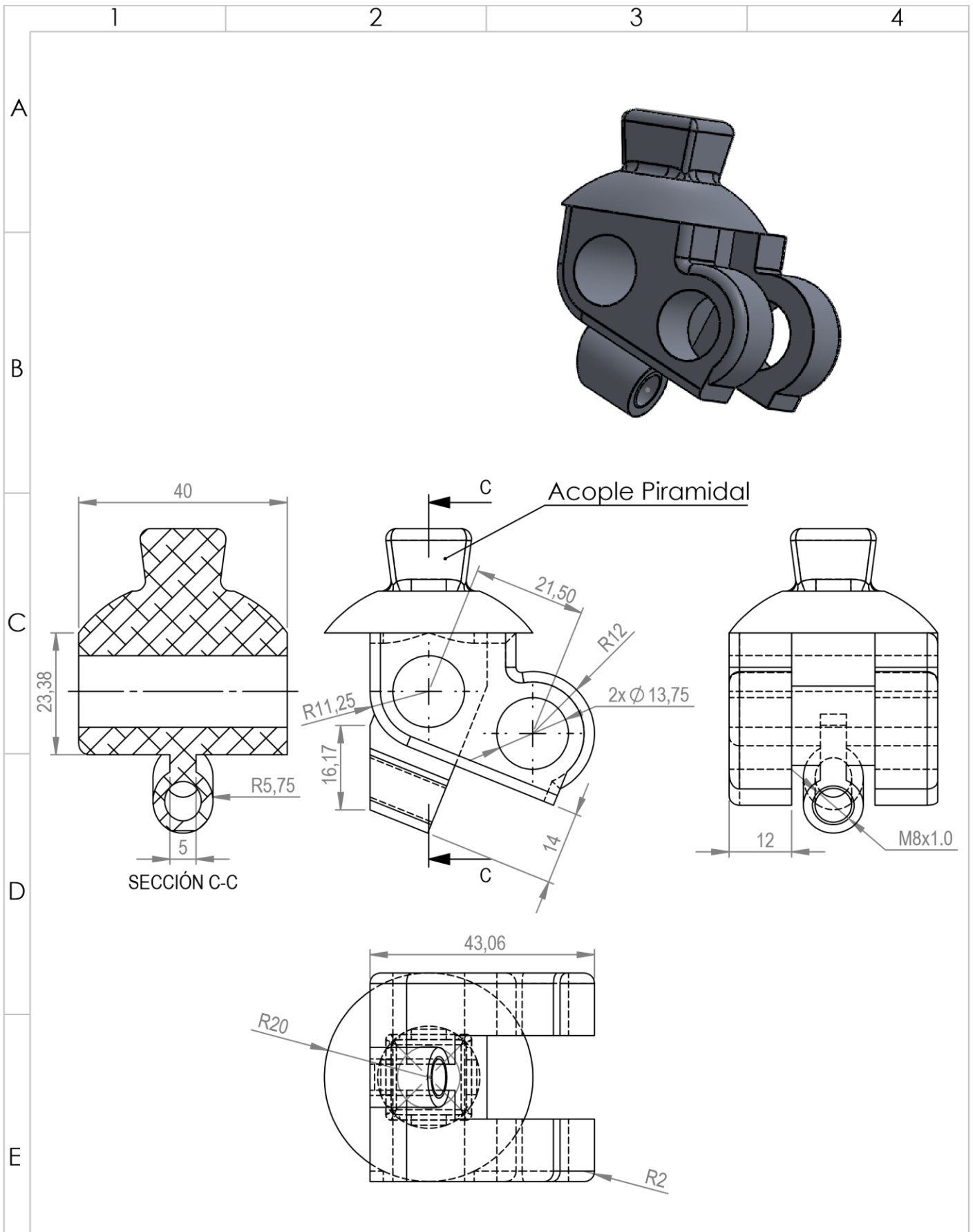
Relaciones	
Fuerte	●
Moderado	○
Débil	▽

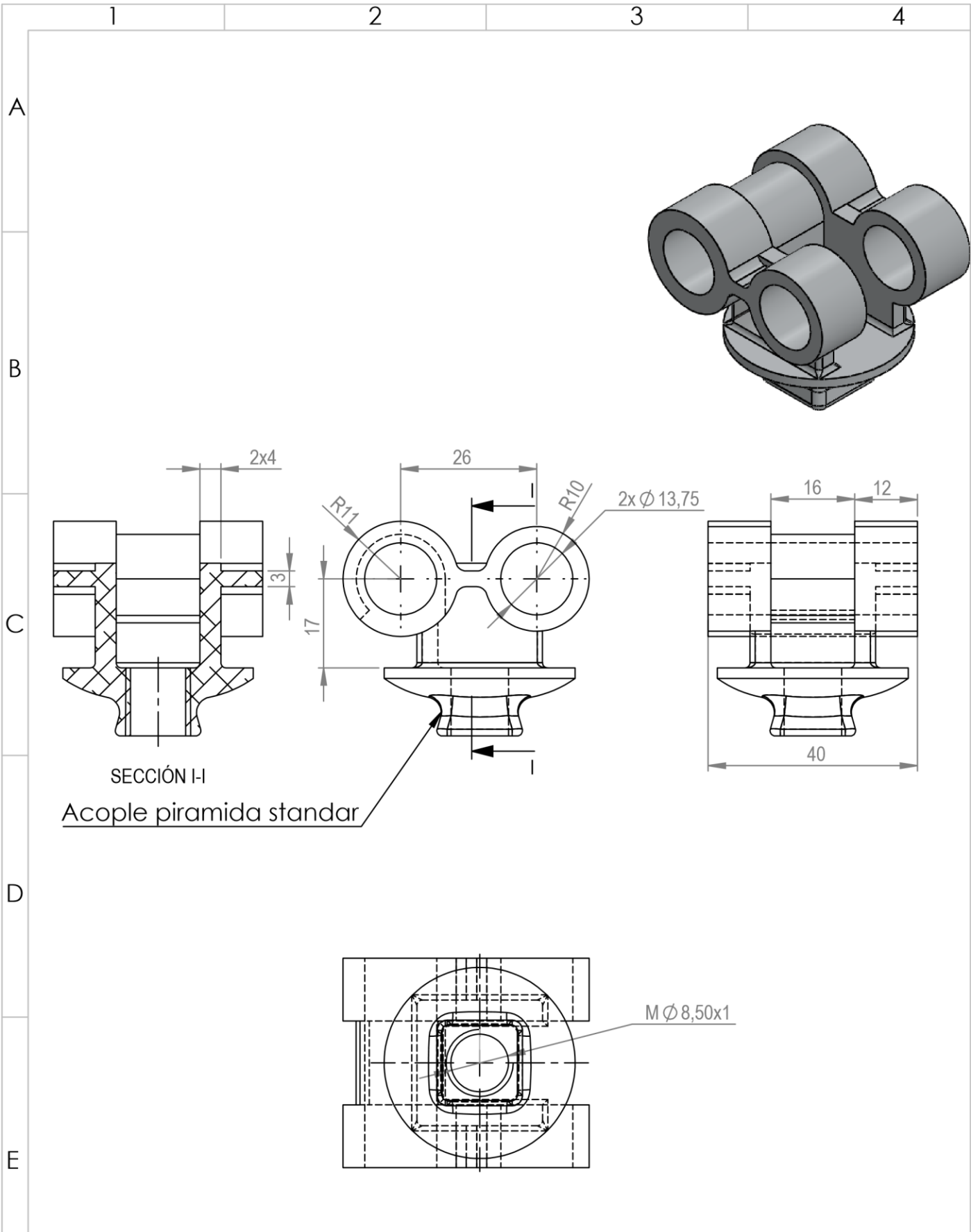
Dirección de mejora	
Maximizar	▲
Objetivo	◇
Minimizar	▼



### Anexo 4: Planos.

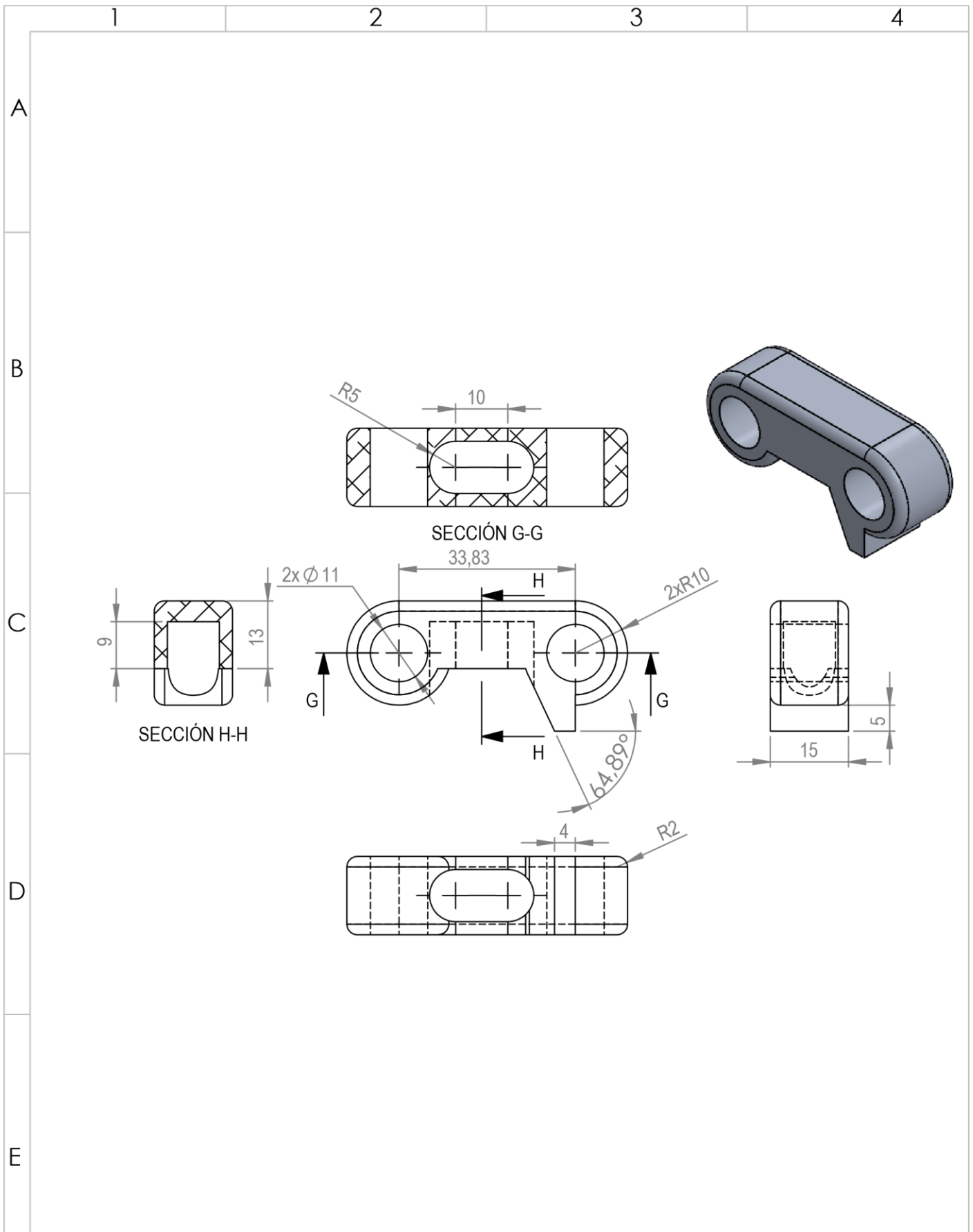


				Tolerancias 0.1	Masa 85.0 g	Aluminio 356.0	
				Fecha	Nombre	Eslabón Superior	Escala 1:1
			Dib.	10/01/22	Arellano A.		
			Rev.	10/01/22	Valencia F.		
			Aprop.	10/01/22	Valencia F.		
Edición	Modificación	Fecha	Nombre			Número del dibujo ESP-01-22	
						Sustitución	

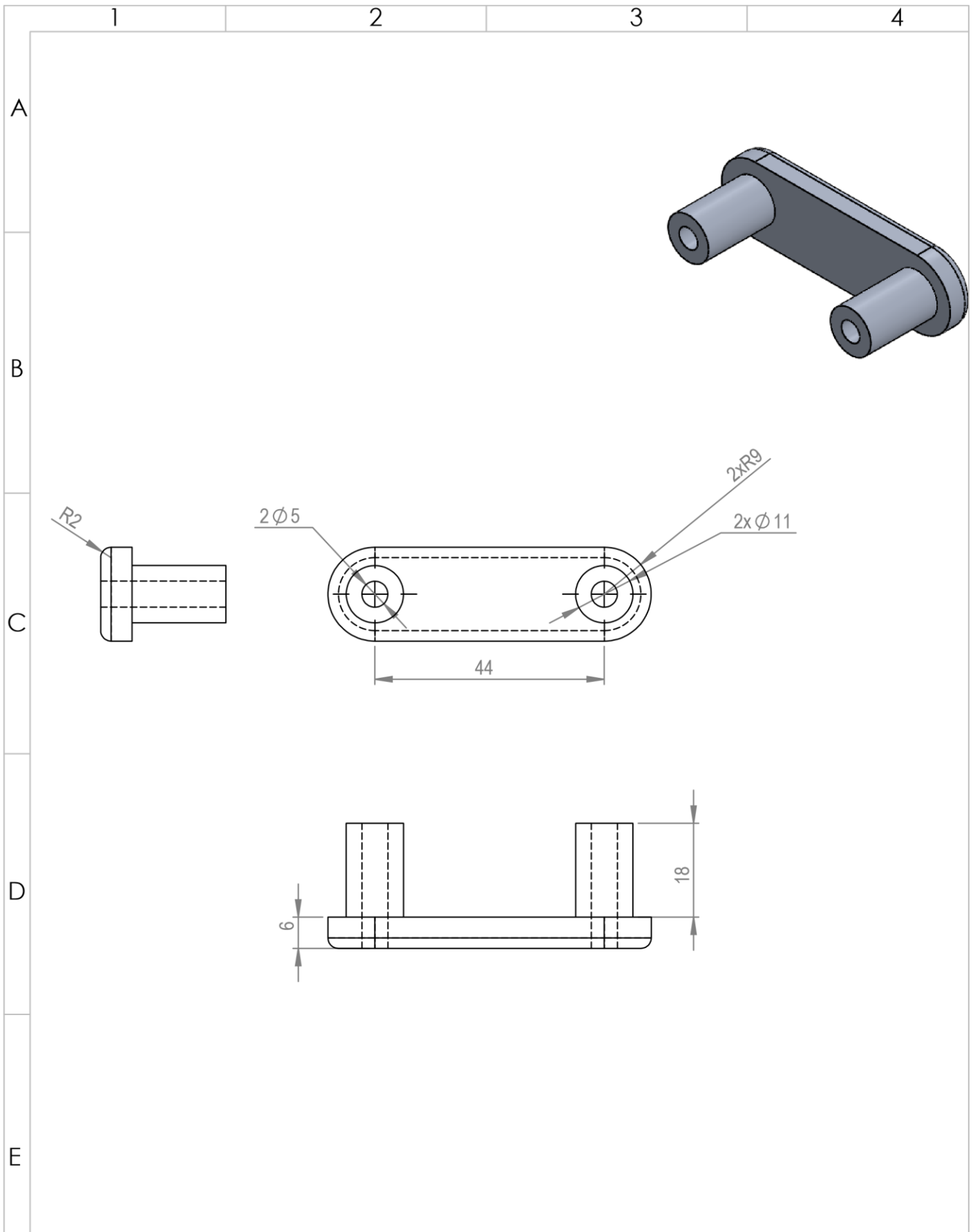


SECCIÓN I-I  
Acople piramida standar

				Tolerancias 0.1	Masa 52.89 g	Aluminio 356.0	
				Fecha	Nombre	Eslabón inferior	Escala 1:1
			Dib.	10/01/22	Arellano A.		
			Rev.	10/01/22	Valencia F.		
				Aprop.	10/01/22	Valencia F.	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre	Número del dibujo		ESIN-03-22	
				Sustitución			

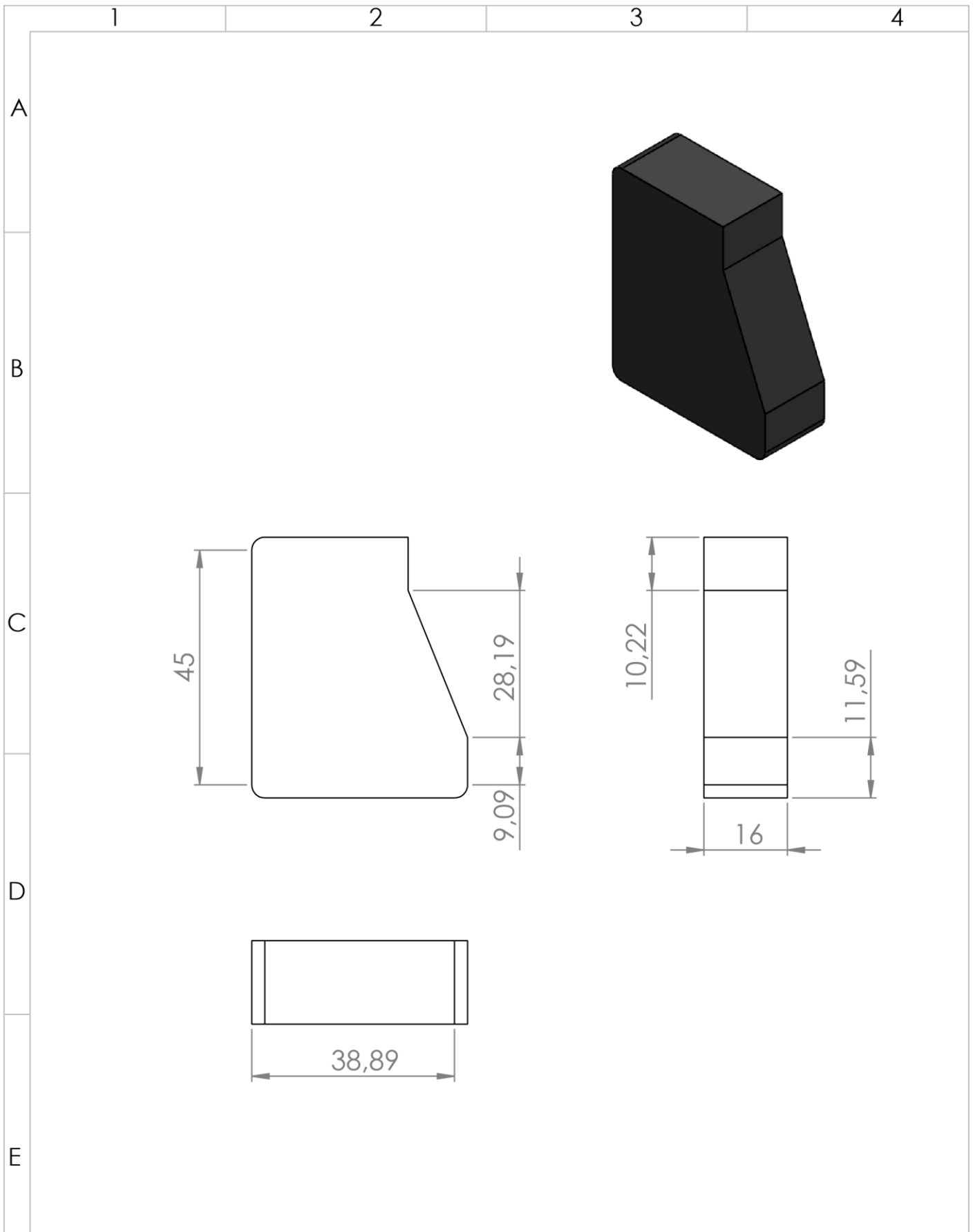


				Tolerancias 0.1	Masa 23.0 g	Aluminio 6063-T6	
				Fecha	Nombre	Eslabón de regulación	Escala 1:1
				Dib. 10/01/22	Arellano A.		
				Rev. 10/01/22	Valencia F.		
				Aprop. 10/01/22	Valencia F.		
Edición	Modificación	Fecha	Nombre			Número del dibujo ESR-02-22	
						Sustitución	



				Tolerancias 0.1	Masa 23.32 g	Aluminio 6063-T6	
				Fecha	Nombre	Eslabón Lateral	Escala 1:1
			Dib.	10/01/22	Arellano A.		
			Rev.	10/01/22	Valencia F.		
				Aprop.	10/01/22	Valencia F.	
						Número del dibujo	ESLAT-04-22
Edición	Modificación	Fecha	Nombre			Sustitución	



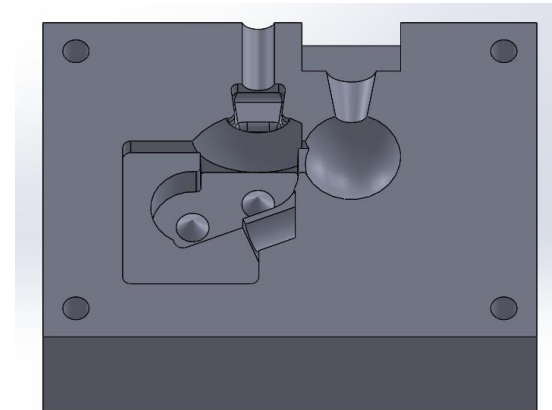
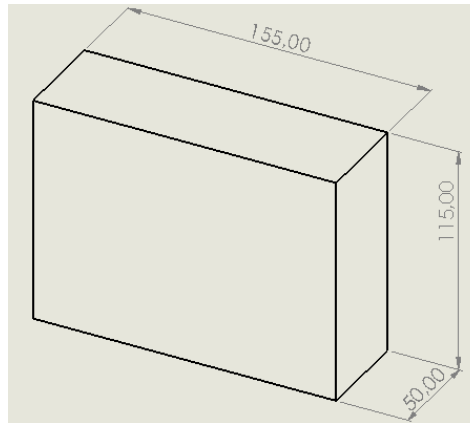
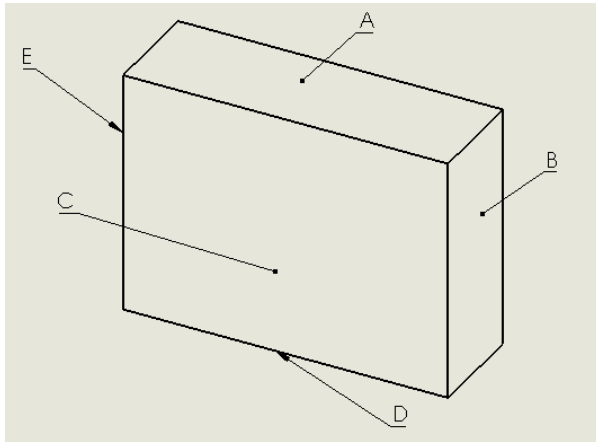


				Tolerancias 0.1		Acero A36	
					Fecha	Nombre	
				Dib.	24-5-2022	ArellanoA	Denominacion: Pin Auxiliar 1
				Rev.	24-5-22	Valencia. F	
				Aprop.	24-5-2022	Valencia .F	
						Número del dibujo	PINAUX1-22
Edición	Modificación	Fecha	Nombre			Sustitución	


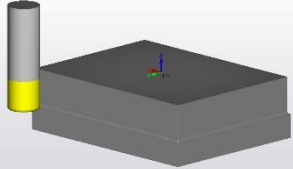
**Anexo 5: Hojas de procesos.**

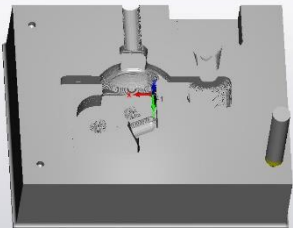
**HOJA DE PROCESO**

<b>Proyecto:</b>	Proceso de fabricación de una articulación policéntrica de rodilla, usando la metodología de diseño para la fabricación y manufactura (DFMA).	<b>Plano N.º:</b> 1	<b>Trabajo N.º:</b> 1	<b>Fecha:</b> 11/1/2022
<b>Pieza:</b>	Molde del Eslabón superior cara A	<b>Plano N.º:</b> 1	<b>Hoja:</b> 1	
<b>Material:</b>	Acero A36	<b>Dimensiones en bruto:</b> 155 x 115 x 50		
<b>Realizado por:</b> Alexandra Arellano				



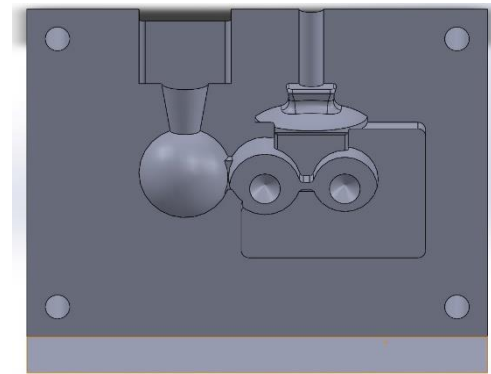
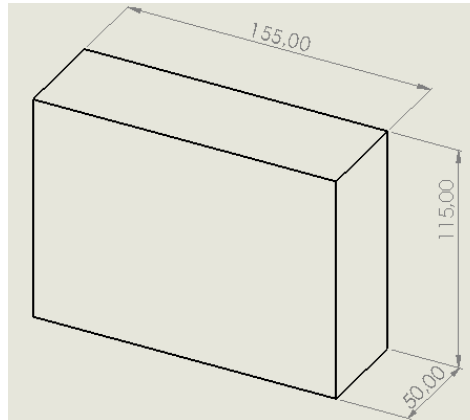
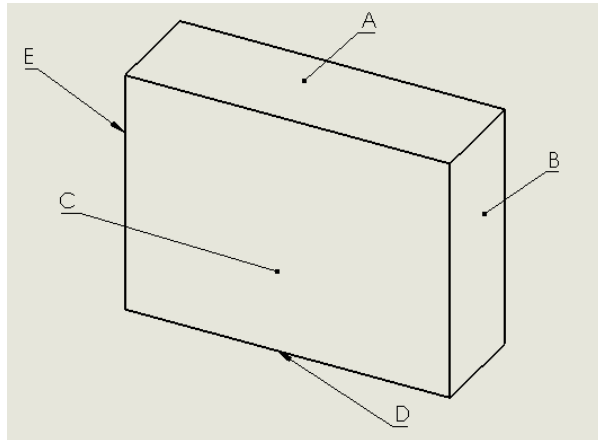
## HOJA DE PROCESOS

Proyecto:		Proceso de fabricación de una articulación policéntrica de rodilla, usando la metodología de diseño para la fabricación y manufactura (DFMA).		Plano N°: 1		Trabajo N°: 1		<b>Fecha:</b> 11/01/2022			
Pieza:		Molde del Eslabón superior cara A		Plano N°: 1		Hoja: 2					
Material:		Acero ASTM A36		Dimensiones en bruto: 155 x 115 x 50							
Realizado por: Jeniffer Alexandra Arellano Guevara.											
Fase	Sub-fase	Operac	Denominación:	Croquis	Herramienta	psd	p m m	N Rpm	Va M m/ min	Tc min	Control
<b>M E C A N I Z A D O</b>	<b>P L A N E A D O</b>	1	Sujetar la pieza		Entenallas						Nivel
		2	Cero piezas		Fresa punta recta de 6 mm						Tablero CNC
		3	Planeado cara C y F		Piña de 6 insertos de Ø 100 mm	2	2	144	90	1	Calibrador pie de rey Escuadra
		4	Contorneado caras A, B, D, E		Piña de 6 insertos de Ø 100 mm	1	1	144	90	40	Calibrador pie de rey Escuadra
	<b>D E S B A S T E</b>	5	Desbaste de la cavidad en cara C		Fresa de Ø 16 mm	2	1	3000	1600	40	Escuadra
					Fresa de Ø 12 mm	1	3	3000	800	20	Escuadra
					Fresa de Ø 6 mm	1	1	3000	450	60	Calibrador pie de rey.
		6	Acabado de cavidad	Fresa redonda Ø 3 mm	1	0,15	4000	200	60	Visual, calibrador pie de rey.	


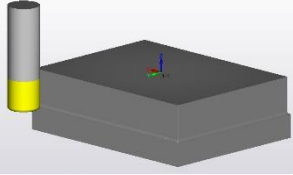
C N T A L A D R A D O											
	7	Perforación en cara C a 10 mm de E y A Ø 5 mm		Broca Ø 5 mm	1	50	1000	33	1	Visual.	
	8	Perforación en cara C a 10 mm de E y A Ø 8mm		Broca Ø 8 mm	1	50	600	33	1	Calibrador pie de rey.	

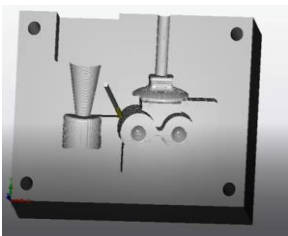
## HOJA DE PROCESO

<b>Proyecto:</b>	Proceso de fabricación de una articulación policéntrica de rodilla, usando la metodología de diseño para la fabricación y manufactura (DFMA).	<b>Plano N.º:</b> 2	<b>Trabajo N.º:</b> 1	<b>Fecha:</b> 11/1/2022
<b>Pieza:</b>	Molde del Eslabón inferior	<b>Plano N.º:</b> 2	<b>Hoja:</b> 1	
<b>Material:</b>	Acero A36	<b>Dimensiones en bruto:</b> 155 x 115 x 50		
<b>Realizado por:</b> Alexandra Arellano				

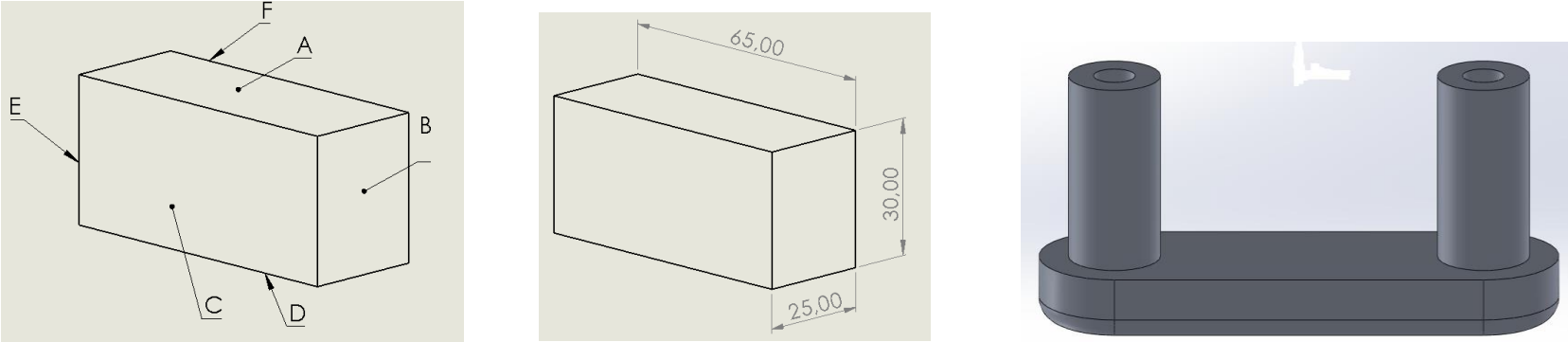


## HOJA DE PROCESOS

Proyecto:		Proceso de fabricación de una articulación policéntrica de rodilla, usando la metodología de diseño para la fabricación y manufactura (DFMA).		Plano N°: 2		Trabajo N°: 1		<b>Fecha:</b> 11/01/2022				
Pieza:		Molde del Eslabón inferior cara A		Plano N°: 2		Hoja: 2						
Material:		Acero ASTM A36		Dimensiones en bruto: 155 x 115 x 50								
Realizado por: Jeniffer Alexandra Arellano Guevara.												
Fase	Sub-fase	Operac	Denominación:	Croquis	Herramienta	psd	p m m	N rpm	Va M m/ min	Tc min	Control	
M E C A N I Z A D O	P L A N E A D O	1	Sujetar la pieza		Entenallas						Nivel	
		2	Cero piezas		Fresa punta recta de 6 mm						Tablero CNC	
		3	Planeado cara C y F		Piña de 6 insertos de Ø 100 mm	2	2	144	90	1	Calibrador pie de rey Escuadra	
		4	Contorneado caras A, B, D, E		Piña de 6 insertos de Ø 100 mm	1	1	144	90	1	Calibrador pie de rey Escuadra	
	D E S B A S T E	5		Desbaste de la cavidad en cara C		Fresa de Ø 16 mm	2	1	3000	1600	60	Escuadra
						Fresa de Ø 12 mm	1	3	3000	800	60	Escuadra
						Fresa de Ø 3 mm	1	1	3000	450	60	Calibrador pie de rey.
		6		Acabado de cavidad		Fresa redonda Ø 1,5 mm	1	0,15	4000	200	60	Visual, calibrador pie de rey.


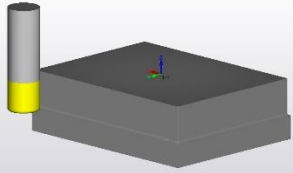
C N C	T A L A D R A D O	7	Perforación en cara C a 10 mm de E y A Ø 5 mm		Broca Ø 5 mm	1	50	1000	33	1	Visual.
		8	Perforación en cara C a 10 mm de E y A Ø 8mm		Broca Ø 8 mm	1	50	600	33	1	Calibrador pie de rey.

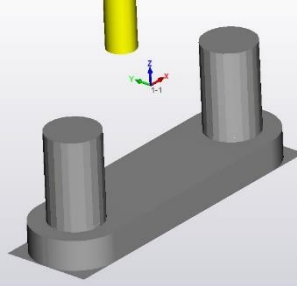
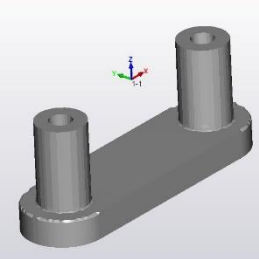
## HOJA DE PROCESO

<b>Proyecto:</b>	Proceso de fabricación de una articulación policéntrica de rodilla, usando la metodología de diseño para la fabricación y manufactura (DFMA).	<b>Plano N.º:</b> 3	<b>Trabajo N.º:</b> 1	<b>Fecha:</b> 11/1/2022
<b>Pieza:</b>	Biela lateral	<b>Plano N.º:</b> 3	<b>Hoja:</b> 1	
<b>Material:</b>	Acero A36	<b>Dimensiones en bruto:</b> 65 x 30 x 25		
<b>Realizado por:</b> Alexandra Arellano				
				



## HOJA DE PROCESOS

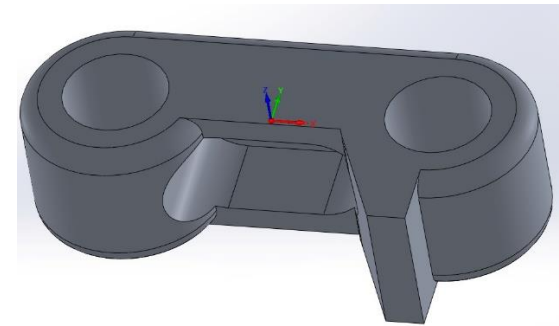
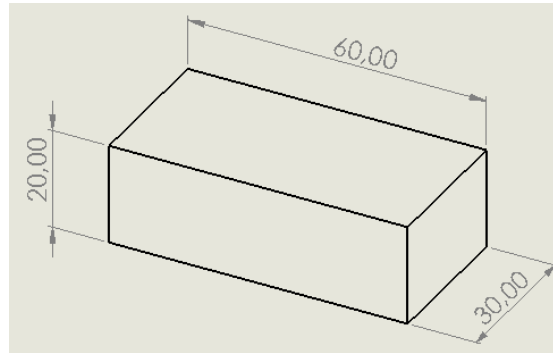
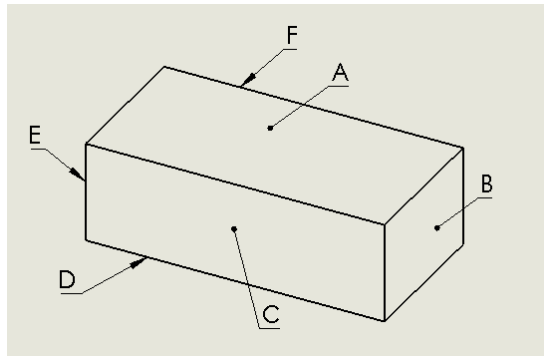
Proyecto:		Proceso de fabricación de una articulación policéntrica de rodilla, usando la metodología de diseño para la fabricación y manufactura (DFMA).			Plano N°: 3		Trabajo N°: 1			Fecha: 11/01/2022	
Pieza:		Biela lateral			Plano N°: 3		Hoja: 2				
Material:		Acero ASTM A36			Dimensiones en bruto: 65 x 30 x 25						
Realizado por: Jeniffer Alexandra Arellano Guevara.											
Fase	Sub-fase	Operac	Denominación:	Croquis	Herramienta	psd	pp m m	N rpm	Va M m/ min	Tc min	Control
MECANIZADO	PLANEO	1	Sujetar la pieza		Entenalla						Nivel, Reloj palpador
		2	Cero piezas		Fresa punta recta de 6 mm						Tablero CNC
		3	Planeado cara C y F		Piña de 6 insertos de Ø 100 mm	2	2	144	90	1	Calibrador pie de rey Escuadra
		4	Contorneado caras A, E, D, B		Piña de 6 insertos de Ø 100 mm	1	1	144	90	10	Calibrador pie de rey Escuadra
	DESBASTE	5			Fresa de Ø 6 mm	25	1	3000	500	28	Calibrador pie de rey
			Desbaste								
		6	Desbaste del contorno		Fresa de Ø 6mm	6	1	3000	500	3	Calibrador pie de rey

C N C T A L A D R A D O  P L A N E A D O	7	Perforación en cara A de $\varnothing$ 5 mm		Broca $\varnothing$ 5 mm	1	50	1000	33	1	Visual, Calibrador
	8	Desbaste de cara D		Piña de 6 insertos de $\varnothing$ 100 mm	3	1	144	90	1	Calibrador pie de rey Escuadra


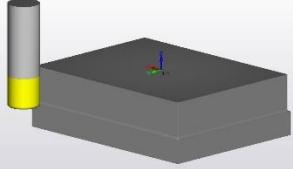
## HOJA DE PROCESO

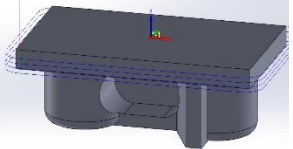
<b>Proyecto:</b>	Proceso de fabricación de una articulación policéntrica de rodilla, usando la metodología de diseño para la fabricación y manufactura (DFMA).	<b>Plano N.º:</b> 4	<b>Trabajo N.º:</b> 1	<b>Fecha:</b> 11/1/2022
<b>Pieza:</b>	Elemento de regulación	<b>Plano N.º:</b> 4	<b>Hoja:</b> 1	
<b>Material:</b>	Acero A36	<b>Dimensiones en bruto:</b> 60 x 20 x 30		

**Realizado por:** Alexandra Arellano

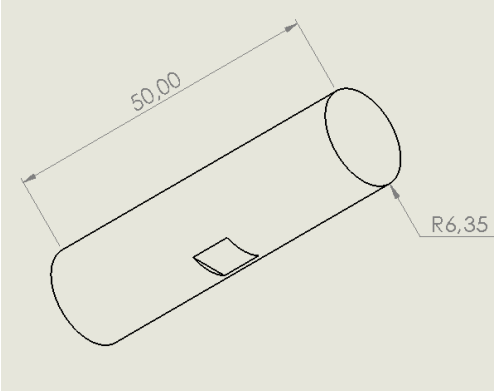
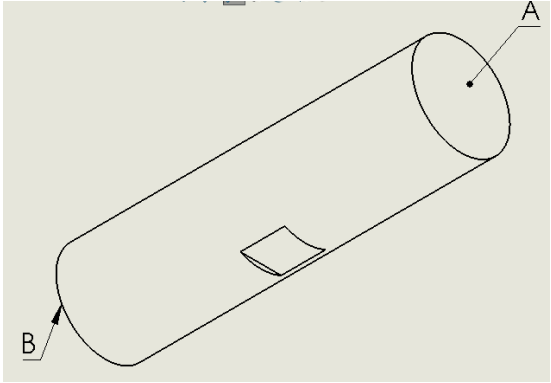
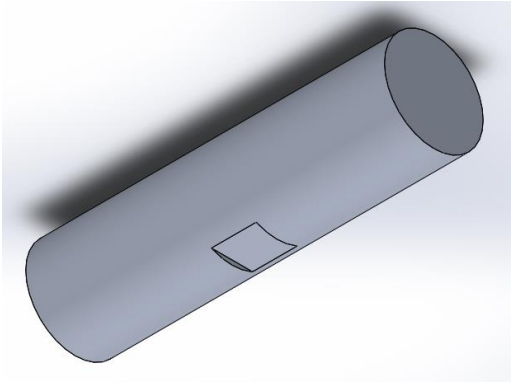


## HOJA DE PROCESOS

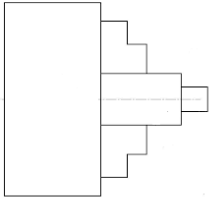
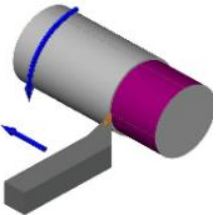
Proyecto:		Proceso de fabricación de una articulación policéntrica de rodilla, usando la metodología de diseño para la fabricación y manufactura (DFMA).		Plano N°: 4	Trabajo N°: 1					Fecha: 11/01/2022		
Pieza:		Elemento de regulación		Plano N°: 4	Hoja: 2							
Material:		Acero ASTM A36		Dimensiones en bruto: 60 x 20 x 30								
Realizado por: Jeniffer Alexandra Arellano Guevara.												
Fase	Sub-fase	Operac	Denominación:	Croquis	Herramienta	psd	pp m m	N rpm	Va M m/ min	Tc min	Control	
MECANIZADO	PLANEO	1	Sujetar la pieza		Entenalla						Nivel, Reloj palpador	
		2	Cero piezas		Fresa punta recta de 6 mm						Tablero CNC	
		3	Planeado cara A y D		Piña de 6 insertos de Ø 100 mm	2	2	144	90	1	Calibrador pie de rey Escuadra	
		4	Contorneado caras B, C, E, F		Piña de 6 insertos de Ø 100 mm	1	1	144	90	10	Calibrador pie de rey Escuadra	
	DESBASTE	5	Desbaste del contorno		Fresa de Ø 10 mm	15	1	3000	500	60	Calibrador pie de rey	
		6	Acabado		Fresa de Ø 3 mm	2	0,15	3000	250	15	Calibrador pie de rey	

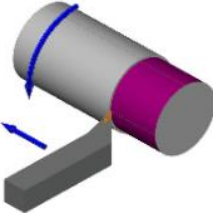
C N C	T A L A D R A D O	7	Perforación en cara A de $\varnothing$ 5 mm		Broca $\varnothing$ 5 mm	1	50	1000	33	1	Visual, Calibrador		
			Perforación en cara A $\varnothing$ 11 mm		Broca $\varnothing$ 11 mm	1	50	600	33	1	Calibrador pie de rey.		
	P L A N E A D O	8	Planeado desbaste de cara D		Piña de 6 insertos de $\varnothing$ 100 mm	3	1	144	90	1	Calibrador pie de rey Escuadra		

## HOJA DE PROCESO

<b>Proyecto:</b>	Proceso de fabricación de una articulación policéntrica de rodilla, usando la metodología de diseño para la fabricación y manufactura (DFMA).	<b>Plano N.º:</b> 5	<b>Trabajo N.º:</b> 1	<b>Fecha:</b> 11/1/2022
<b>Pieza:</b>	Eje	<b>Plano N.º:</b> 5	<b>Hoja:</b> 1	
<b>Material:</b>	Acero A36	<b>Dimensiones en bruto:</b> Ø 12,7 mm, L= 45 mm		
<b>Realizado por:</b> Jeniffer Alexandra Arellano Guevara				
  				

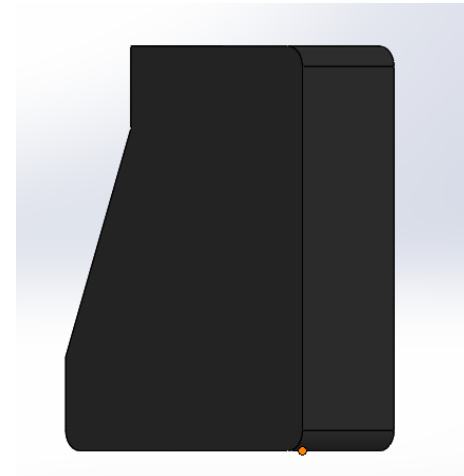
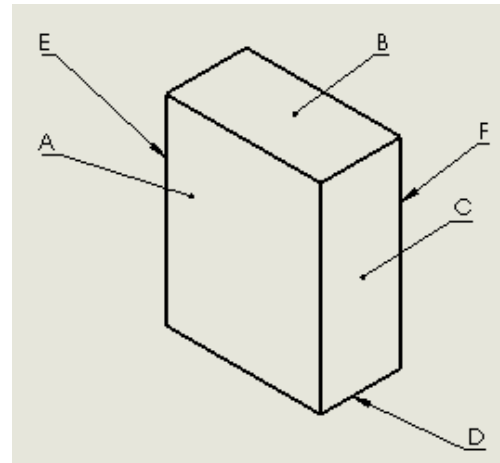
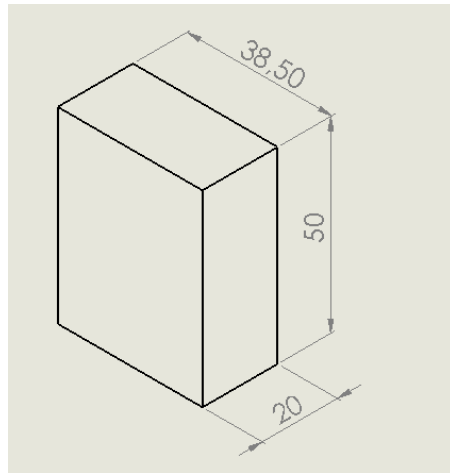
## HOJA DE PROCESOS


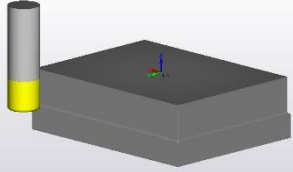
Proyecto:		Proceso de fabricación de una articulación policéntrica de rodilla, usando la metodología de diseño para la fabricación y manufactura (DFMA).		Plano N°: 5	Trabajo N°: 1	<b>Fecha:</b> 11/01/2022						
Pieza:		Eje		Plano N°: 5	Hoja: 2							
Material:		Acero ASTM A36		Dimensiones en bruto: Ø 12,7 mm, L= 45 mm								
Realizado por: Jeniffer Alexandra Arellano Guevara.												
Fase	Sub-fase	Operac	Denominación:	Croquis	Herramienta	psd	pp m m	N Rpm	Va M m/ min	Tc min	Control	
M E C A N I Z A D O	C I L I N D R A D O	1	Sujetar la pieza a 10 mm de B		Plato de 3 garras Portaherramientas						Calibrador pie de rey	
		2	Cero piezas		Buril							Calibrador pie de rey
		3	Desbaste hasta Ø de 11 mm		Buril	1	2	260	30	2	Calibrador pie de rey	
		4	Acabado de cilindrado		Buril	0,7	1	300	25	3	Calibrador pie de rey, Visual	
	R E F E N T A D O	5	Desbaste de longitud 40 mm		Buril	4	2	260	30	2	Calibrador pie de rey	
		6	Acabado del refrentado		Buril	2	1	300	25	3	Calibrador pie de rey	

A D I C I O N A L	C I L I N D R A D O  C H A V E T E R O	7	Sujetar la pieza a 10 mm de A								
		8	Desbaste de longitud 15 mm de A			4	2	260	30	2	Calibrador pie de rey
		9	Acabado de longitud 15 mm de A			2	1	300	25	3	Calibrador pie de rey
		10	Sujetar el eje en el portaherramientas		Portaherramientas						
		11	Desbaste de chavetero a 17,5 mm de A		Fresa de 5 mm	1	1	2000	20	5	Calibrador pie de rey



<b>Proyecto:</b>	Proceso de fabricación de una articulación policéntrica de rodilla, usando la metodología de diseño para la fabricación y manufactura (DFMA).	<b>Plano N.º:</b> 6	<b>Trabajo N.º:</b> 1	<b>Fecha:</b> 11/1/2022
<b>Pieza:</b>	Pin Auxiliar 1	<b>Plano N.º:</b> 6	<b>Hoja:</b> 1	
<b>Material:</b>	Acero A36	<b>Dimensiones en bruto:</b> 38,5 x 50 x 20		
<b>Realizado por:</b> Alexandra Arellano				



Proyecto:		Proceso de fabricación de una articulación policéntrica de rodilla, usando la metodología de diseño para la fabricación y manufactura (DFMA).		Plano N°: 6		Trabajo N°: 1		Fecha: 11/01/2022				
Pieza:		Pin Auxiliar 1		Plano N°: 6		Hoja: 2						
Material:		Acero ASTM A36		Dimensiones en bruto: 65 x 30 x 25								
Realizado por: Jeniffer Alexandra Arellano Guevara.												
Fase	Sub-fase	Operac	Denominación:	Croquis	Herramienta	psd	pp m m	N rpm	Va M m/ min	Tc min	Control	
M E C A N I Z A D O C N C	P L A N E A D O	1	Sujetar la pieza		Entenalla						Nivel, Reloj palpador	
		2	Cero piezas		Fresa punta recta de 6 mm						Tablero CNC	
		3	Planeado de caras A y F		Piña de 6 insertos de Ø 100 mm	2	2	144	90	1	Calibrador pie de rey Escuadra	
		4	Contorneado caras B, C,D,E		Piña de 6 insertos de Ø 100 mm	1	1	144	90	10	Calibrador pie de rey Escuadra	
	D E S B A S T E	5	5	Desbaste		Fresa de Ø 6 mm	25	1	3000	500	28	Calibrador pie de rey
			6	Desbaste del contorno		Fresa de Ø 6mm	6	1	3000	500	3	Calibrador pie de rey
			7	Acabado		Fresa de Ø 3mm	6	1	4000	150	15	Calibrador pie de rey