



# **UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA**

**TRABAJO DE GRADO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERA EN MECATRÓNICA**

**TEMA:**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN MECÁNICA DE UN PROTOTIPO  
REHABILITADOR PASIVO DE DEDOS DE LA MANO**

**AUTORA: MARÍA EUGENIA ANDRADE PASTAZ**

**DIRECTOR: ING. WASHINGTON MOSQUERA**

**IBARRA - ECUADOR**

**OCTUBRE 2016**



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**BIBLIOTECA UNIVERSITARIA**  
**AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA**  
**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

### 1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

La UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE dentro del proyecto Repositorio Digital Institucional, determinó la necesidad de disponer de textos completos en formato digital con la finalidad de apoyar los procesos de investigación, docencia y extensión de la universidad.

Por medio del presente documento dejo sentada mi voluntad de participar en este proyecto, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

<b>DATOS DEL CONTACTO</b>	
<b>Cédula de Identidad</b>	040142570-7
<b>Apellidos y Nombres</b>	Andrade Pastaz María Eugenia
<b>Email</b>	meandradep@utn.edu.ec
<b>Teléfono Fijo</b>	062234048
<b>Teléfono Móvil</b>	0988131806
<b>DATOS DE LA OBRA</b>	
<b>Título</b>	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN MECÁNICA DE UN PROTOTIPO REHABILITADOR PASIVO DE DEDOS DE LA MANO
<b>Autora</b>	Andrade Pastaz María Eugenia
<b>Fecha</b>	Octubre del 2016
<b>Programa</b>	Pregrado
<b>Título por el que aspira</b>	Ingeniera en Mecatrónica
<b>Director</b>	Ing. Washington Mosquera

## 2. AUTORIZACIÓN DE USO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD

Yo, María Eugenia Andrade Pastaz con cédula de identidad Nro. 04014257-7, en calidad de autor y titular de los derechos patrimoniales de la obra o trabajo de grado descrito anteriormente, hago entrega del ejemplar respectivo en formato digital y autorizo a la Universidad Técnica del Norte, la publicación de la obra en el Repositorio Digital Institucional y uso del archivo digital en la Biblioteca de la Universidad con fines académicos, para ampliar la disponibilidad del material y como apoyo a la educación, investigación y extensión; en concordancia con la Ley de Educación Superior Artículo 144.

## 3. CONSTANCIAS

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

Ibarra, a los 18 días del mes de octubre del 2016



.....  
María Eugenia Andrade Pastaz

C.I: 040142570-7



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

**CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE GRADO A FAVOR DE  
LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

Yo, María Eugenia Andrade Pastaz, con cédula de identidad Nro. 040142570-7, manifiesto mi voluntad de ceder a la Universidad Técnica del Norte los derechos patrimoniales consagrados en la Ley de Propiedad Intelectual del Ecuador, artículos 4, 5 y 6, en calidad de autor (es) de la obra o trabajo de grado denominado: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN MECÁNICA DE UN PROTOTIPO REHABILITADOR PASIVO DE DEDOS DE LA MANO, que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero en Mecatrónica, en la Universidad Técnica del Norte, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente. En mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Técnica del Norte.

Ibarra, a los 18 días del mes de octubre de 2016

.....  
María Eugenia Andrade Pastaz

C.I: 040142570-7

## DECLARACIÓN

Yo, María Eugenia Andrade Pastaz, declaro bajo juramento que el trabajo aquí escrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Universidad Técnica del Norte - Ibarra, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.




.....  
María Eugenia Andrade Pastaz

C.I: 040142570-7

**CERTIFICACIÓN**

En calidad de tutor del trabajo de grado titulado: “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN MECÁNICA DE UN PROTOTIPO REHABILITADOR PASIVO DE DEDOS DE LA MANO”, certifico que el presente trabajo fue desarrollado por la Srta. María Eugenia Andrade Pastaz, bajo mi supervisión.



.....

Ing. Washington Mosquera

DIRECTOR

## **AGRADECIMIENTOS**

Expreso mis más sinceros agradecimientos primeramente a Dios por brindarme la oportunidad de superarme y a todos quienes directa e indirectamente contribuyeron con la finalización exitosa de este trabajo. A toda mi familia, docentes que forman parte de la carrera de Ingeniería en Mecatrónica, en especial al Ing. Washington Mosquera por siempre brindar su apoyo incondicional en el desarrollo de este proyecto y a la Universidad Técnica del Norte noble institución en la que me he formado.

**María E.**

**DEDICATORIA**

Dedico este trabajo de manera especial a mis padres Jairo y Esperanza y a mis hermanos Alejandra y Alexander, que siempre han sido el pilar fundamental en mi vida, brindándome su apoyo incondicional, amor, esfuerzo y dedicación para que pueda seguir adelante cumpliendo mis metas y sueños, formándome como persona de bien con valores y excelencia, a ellos todo mi infinito agradecimiento por ayudarme a vencer los obstáculos y consiga ser una profesional.

**María E.**



## RESUMEN

Este proyecto de investigación presenta el diseño y construcción de un rehabilitador pasivo para los dedos de la mano creado con la finalidad de dar solución en el área de fisioterapia, donde, tanto los profesionales como los pacientes manifiestan agotamiento físico al momento de realizar los ejercicios de recuperación de la movilidad funcional de la mano, estas acciones son ejecutadas de forma manual y repetitiva por lo que al pasar el tiempo no se mantiene el mismo ritmo y fuerza en la terapia, este dispositivo proporciona un alto nivel en la repetitividad de sus movimientos y además a una fuerza constante.

Se realiza el diseño personalizado del mecanismo en base a las medidas antropométricas de un sujeto de estudio, empleando el software Solidworks para visualizar, simular y relacionar el dispositivo con la realidad, se analiza los movimientos que ejecutará la estructura y el sistema de actuación utilizando cilindros neumáticos de doble efecto; las piezas plásticas que componen el equipo fueron realizadas en impresión 3D en plástico PLA, el cilindro neumático se lo fabrica mediante el método de ingeniería inversa realizándose las respectivas pruebas mecánicas de funcionamiento hasta conseguir el prototipo final.

## ABSTRACT

This research project presents the design and construction of a passive rehabilitator for fingers created to provide solutions in the area of physiotherapy, where both professionals and patients show physical exhaustion when performing exercises recovery of functional mobility of the hand, these actions are performed manually and repetitively so with the pass of the time it does not maintain the same power and strength in therapy, this device provides a high level in the repetitiveness of their movements and in addition to a constant force.

It was designed a personalize mechanism based on anthropometric measurements of a subject in study, by using the Solidworks software to visualize, simulate and connect the device with reality, We analyzed the movements that run the structure and performance system using cylinders double-acting pneumatic; plastic parts composing the equipment were made in 3D printing plastic PLA, the pneumatic cylinder is manufactured by the method of reverse engineering performing the respective mechanical performance tests until the final prototype.



**ÍNDICE GENERAL**

IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA .....	II
AUTORIZACIÓN DE USO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD .....	III
CONSTANCIAS .....	III
CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE GRADO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE .....	IV
DECLARACIÓN .....	V
CERTIFICACIÓN .....	VI
AGRADECIMIENTOS .....	VII
DEDICATORIA.....	VIII
RESUMEN .....	IX
ABSTRACT .....	X
ÍNDICE GENERAL.....	XI
ÍNDICE DE TABLAS .....	XVII
ÍNDICE DE FIGURAS .....	XIX
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	XXIV
INTRODUCCIÓN. ....	XXV
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA. ....	XXV
ALCANCE Y LIMITACIONES.....	XXVI
JUSTIFICACIÓN. ....	XXVII
METODOLOGÍA.....	XXVIII

INVESTIGACIÓN DE CAMPO. ....	XXVIII
FUENTES BIBLIOGRÁFICAS. ....	XXIX
SELECCIÓN DE MÉTODOS DE REHABILITACIÓN. ....	XXIX
ESTABLECER CARACTERÍSTICAS DE UN SUJETO DE ESTUDIO. ....	XXIX
DISEÑOS PRELIMINARES. ....	XXX
SELECCIÓN DE MATERIAL. ....	XXX
SELECCIÓN DE ELEMENTOS CONSTITUTIVOS. ....	XXX
PROTOTIPADO. ....	XXXI
MECANIZADO. ....	XXXI
ENSAMBLAJE DEL MECANISMO. ....	XXXII
ANTECEDENTES. ....	XXXII
ESTRUCTURA DEL PROYECTO. ....	XXXII
CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO. ....	1
1.1 GUANTES DE REHABILITACIÓN DE PANASONIC. ....	1
1.2 GUANTE REHABILITADOR GLOREHA. ....	2
1.3 EXOHAND FESTO. ....	3
1.4 ANATOMÍA DE LA MANO. ....	4
1.5 OSTEOLOGÍA DE LA MANO. ....	4
1.6 ARTROLOGÍA DE LA MANO. ....	4
1.7 FISIOLOGÍA DE LA MANO. ....	5
1.7.1 ABDUCCIÓN Y ADUCCIÓN. ....	5
1.7.2 FLEXIÓN. ....	6
1.7.3 EXTENSIÓN. ....	7

1.7.4 OPOSICIÓN. ....	8
1.8 MIOLOGÍA DE LA MANO.....	9
1.9 BIOMECÁNICA DE LA MANO. ....	10
1.10 PATRONES FUNCIONALES DE LA MANO.....	11
1.10.1 AGARRES DE FUERZA. ....	11
1.10.2 AGARRE DE PRECISIÓN. ....	11
1.11 MORFOLOGÍA DE LA MANO. ....	12
1.12 PATOLOGÍAS DE LA MANO. ....	13
1.12.1. NEUROLÓGICO. ....	13
1.12.2 TRAUMATOLÓGICO.....	14
1.13 ETAPAS DE REHABILITACIÓN DE LOS DEDOS DE LA MANO.....	15
1.13.1 REHABILITACIÓN PASIVA. ....	17
1.13.2 REHABILITACIÓN ACTIVA. ....	19
CAPÍTULO II. SISTEMA MECÁNICO. ....	20
2.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO.....	20
2.2 DIMENSIONAMIENTO DEL MECANISMO DEL REHABILITADOR. ....	20
2.3 ELEMENTOS DEL DISPOSITIVO REHABILITADOR. ....	23
2.3.1 POLIÁCIDO LÁCTICO.....	23
2.3.2 GUANTE ROBESBON.....	24
2.3.3 PASADORES. ....	25
2.3.4 ANILLOS DE RETENCIÓN E.....	25
2.3.5 HORQUILLA.....	26
2.4 DISEÑO MECÁNICO. ....	27

2.5 CÁLCULOS Y ANÁLISIS ESTÁTICO DEL MECANISMO. ....	34
2.6 ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS. ....	37
2.7 IMPRESIÓN Y ENSAMBLAJE DE LOS COMPONENTES.....	44
CAPITULO III. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL CILINDRO NEUMÁTICO.....	47
3.1 SISTEMA NEUMÁTICO. ....	47
3.2 CILINDRO NEUMÁTICOS DE DOBLE EFECTO. ....	48
3.3 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO.....	49
3.4 MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN.....	50
3.6 DIMENSIONAMIENTO Y MATERIALES PARA EL MECANIZADO.....	53
3.6.1 VÁSTAGO. ....	53
3.6.2 CAMISA.....	54
3.6.3 CULATAS ANTERIOR Y POSTERIOR.....	55
3.7 DISEÑO EN CAD.....	55
3.8 CÁLCULOS.....	58
3.8.1 FUERZA.....	58
3.8.2 VELOCIDAD DEL ÉMBOLO.....	59
3.8.3 CONSUMO DE AIRE.....	60
3.8.4 CÁLCULO DEL VÁSTAGO.....	62
3.8.5 CÁLCULO DEL VÁSTAGO A PANDEO.....	64
5.8.6 CÁLCULO DE LA CAMISA.....	67
3.9 MECANIZADO DEL CILINDRO NEUMÁTICO DE DOBLE EFECTO.....	68
3.9.1 TORNEADO.....	69
3.9.2 PROCESO DE TORNEADO.....	69

3.9.3 HERRAMIENTAS.....	70
3.9.4 VELOCIDAD DE REMOCIÓN DE MATERIAL (MRR).....	72
3.9.5 TIEMPO DE CORTE.....	75
3.9.6 TORQUE Y POTENCIA.....	76
5.9.7 FUERZA DE CORTE.....	77
3.9.8 CORTES DE DESBASTE Y OPERACIONES DE ACABADO.....	83
3.9.9 DISPOSITIVOS DE SUJECIÓN E INSERTOS.....	83
3.9.10 CÓDIGOS G.....	85
3.9.11 MECANIZADO DE LAS PIEZAS DEL CILINDRO.....	86
3.9.12 ENSAMBLAJE DE COMPONENTES.....	93
3.10 ANÁLISIS DE COSTOS.....	95
CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	97
4.1 DISEÑO CAD.....	97
4.2 ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS.....	98
4.3 MECANIZADO.....	98
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	99
5.1 CONCLUSIONES.....	99
5.2 RECOMENDACIONES.....	100
Bibliografía.....	102
ANEXOS.....	106
ANEXO A: ATLAS DE LA MANO (HUESOS, RED CIRCULATORIA, RED NERVIOSA Y MÚSCULOS).....	107
ANEXO B: INFORMACIÓN OBTENIDA DEL ÁREA DE FISIOTERAPIA.....	109

ANEXO C: TABLAS DE COMPARACIONES.....	110
ANEXO D: CATÁLOGO DE ROTOR CLIP.....	114
ANEXO E: PLANOS EN SOLIDWOKS DE LAS PIEZAS DEL MECANISMO....	115
ANEXO F: IMPRESIONES PREVIAS A LA OBTECIÓN DEL PROTOTIPO FINAL. .....	116
ANEXO G: CILINDROS NEUMÁTICOS DISPONIBLES EN EL MERCADO. ....	118
ANEXO H: PLANOS EN SOLIDWOKS DE LOS ELEMENTOS DEL CILINDRO NEUMÁTICO DE DOBLE EFECTO. ....	120
ANEXO I: CÓDIGOS G PARA EL MECANIZADO DE VÁSTAGO, CULATA ANTERIOR Y CULATA POSTERIOR. ....	121
ANEXO J: HOJAS DE PROCESOS.....	130



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Medidas de muñeca, antebrazo y palma de una mano promedio .....	21
Tabla 2.2: Medidas de los dedos de una mano promedio.....	22
Tabla 2.3: Ángulos máximos de flexión y ángulos determinados para las etapas de rehabilitación .....	28
Tabla 2.4: Medidas para el diseño de piezas del dedo meñique, anular y medio.....	30
Tabla 2.5: Medidas para el diseño de piezas del dedo índice .....	31
Tabla 2.6: Medidas para el diseño de piezas del dedo pulgar .....	32
Tabla 2.7: Datos obtenidos de pruebas de laboratorio.....	35
Tabla 2.8: Datos proporcionados del dedo medio para determinar reacciones mediante sumatoria de fuerzas .....	36
Tabla 2.9. Fuerzas ejercidas en las barras del mecanismo del dedo medio .....	37
Tabla 2.10: Propiedades del plástico PLA .....	38
Tabla 2.11: Asignación de cargas a la barra en V o eslabón ternario .....	39
Tabla 2.12: Cargas asignadas al mecanismo en el ensamblaje de piezas: proximal, medio y distal.....	42
Tabla 2.13 Factor de seguridad generado en el ensamblaje de piezas: proximal, medio y distal.....	44
Tabla 3.1: Medidas para la determinación de la carrera del cilindro .....	54
Tabla 3.2: Diseño en SolidWorks de los elementos del cilindro neumático de doble efecto con sus respectivos materiales .....	55
Tabla 3.3: Resultados de ensayos a la tensión de algunos materiales .....	63
Tabla 3.4: Propiedades físicas de algunos materiales de ingeniería.....	65

Tabla 3.5: Recomendaciones generales para operaciones de torneado .....	73
Tabla 3.6: Intervalo aproximado de requerimientos de energía en las operaciones de corte .....	76
Tabla 3.7: Costo del dispositivo rehabilitador de dedos de la mano desarrollado en el proyecto .....	95

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Guantes de rehabilitación de Panasonic.....	1
Figura 1.2: Guante rehabilitador de mano GLOREHA.....	2
Figura 1.3: Exohand FESTO.....	3
Figura 1.4: Abducción y aducción de los dedos de la mano.....	6
Figura 1.5: Flexión metacarpofalángica (MCF), interfalángica proximal (IFP) e interfalángica distal (IFD) de los dedos de la mano.....	6
Figura 1.6: Flexión metacarpofalángica (MCF) e interfalángica (IF) del pulgar.....	7
Figura 1.7: Extensión metacarpofalángica (MCF), interfalángica proximal (IFP) e interfalángica distal (IFD) de los dedos de la mano.....	7
Figura 1.8: Extensión metacarpofalángica (MCF) e interfalángica (IF) del pulgar...	8
Figura 1.9: Oposición del pulgar.....	8
Figura 1.10: Agarres de fuerza: Flexión de las interfalángicas y pulgar aducido...	11
Figura 1.11: Agarre de precisión: Dedos semiflexionados, pulgar en oposición...	12
Figura 1.12: Aplicación de compresas calientes en la mano afectada.....	16
Figura 1.13: Aplicación de gel previo a la electroterapia.....	16
Figura 1.14: Terapia con ultrasonido.....	17
Figura 1.15: Ejecución del proceso manual de rehabilitación pasiva.....	17
Figura 1.16: Movimiento de pinza bidigital en el proceso de reactivación de la motricidad fina.....	18
Figura 1.17: Ejecución de terapia pasiva asistida para la reactivación de la motricidad gruesa.....	18
Figura 1.18: Rehabilitación activa con una pelota de terapia.....	19
Figura 2.1: Dimensiones promedio de la mano humana.....	22

Figura 2.2: Dimensiones promedio de los dedos de la mano humana.....	23
Figura 2.3: Impresión de piezas en plástico PLA.....	23
Figura 2.4: Guantes ROBESBON.....	24
Figura 2.5: Pasadores con diámetros y tamaños requeridos para la sujeción.....	25
Figura 2.6: Anillos de retención.....	26
Figura 2.7: Horquilla o rótula.....	26
Figura 2.8: Ángulos máximos para el movimiento de flexión del dedo meñique, anular, medio, índice y pulgar.....	28
Figura 2.9: Geometría del mecanismo para el dedo meñique, anular y medio.....	29
Figura 2.10: Geometría del mecanismo para el dedo índice.....	31
Figura 2.11: Geometría del mecanismo para el dedo pulgar.....	32
Figura 2.12: Ensamblaje en SolidWorks del mecanismo.....	33
Figura 2.13: Determinación de la fuerza de oposición que presentan los dedos de la mano.....	34
Figura 2.14: Análisis estático de la barra en V o eslabón ternario del dedo medio.....	35
Figura 2.15: Análisis estático del mecanismo del dedo medio.....	36
Figura 2.16: Análisis de nodos para determinar las fuerzas en las barras o eslabones del dedo medio.....	37
Figura 2.17: Esfuerzos máximo y mínimo ejercidos en la barra en V o eslabón ternario.....	39
Figura 2.18: Análisis de deformaciones unitarias de la barra en V o eslabón ternario.....	40
Figura 2.19: Análisis de desplazamiento de la barra en V o eslabón ternario.....	40

Figura 2.20: Factor de seguridad en la barra en V o eslabón ternario.....	41
Figura 2.21: Esfuerzos máximo y mínimo ejercidos en el ensamblaje de piezas: proximal, medio y distal.....	43
Figura 2.22: Análisis de desplazamiento en el ensamblaje de piezas: proximal, medio y distal.....	43
Figura 2.23: Análisis de deformaciones unitarias en el ensamblaje de piezas: proximal, medio y distal.....	44
Figura 2.24: Impresión 3D de las piezas del mecanismo.....	44
Figura 2.25: Piezas del mecanismo.....	45
Figura 2.26: Ensamblaje del mecanismo.....	45
Figura 2.27: Implementación del mecanismo rehabilitador con el sistema neumático y de control.....	46
Figura 3.1: Cilindro neumático de doble efecto.....	48
Figura 3.2: Estructura y elementos principales de un cilindro neumático de doble efecto.....	50
Figura 3.3: Proceso de ingeniería inversa de un cilindro neumático.....	51
Figura 3.4: Justas del vástago y del émbolo.....	51
Figura 3.5: Émbolo, imán y rosca.....	52
Figura 3.6: Casquillo guía.....	52
Figura 3.7: Posicionamiento inicial del cilindro respecto a la barra en V o eslabón ternario.....	53
Figura 3.8: Geometría para la obtención de la carrera máxima del vástago.....	54
Figura 3.9: Ensamblaje del cilindro neumático de doble efecto.....	57
Figura 3.10: Despiece del cilindro neumático de doble efecto.....	57
Figura 3.11: Cilindro con extremo empotrado y otro libre.....	64

Figura 3.12: Estado tensional (a) y rotura (b).....	67
Figura 3.13: Torno CNC ROMI GL 240.....	68
Figura 3.14: Operaciones de corte en el torno.....	69
Figura 3.15: Designaciones de herramienta de corte derecho.....	70
Figura 3.16: Esquema de la operación básica de torneado.....	70
Figura 3.17: Rectificado de la camisa del cilindro.....	71
Figura 3.18: Sujeción de una pieza de trabajo en un plato de arrastre.....	83
Figura 3.19: Sujeción del tocho de aluminio en el plato de arrastre.....	84
Figura 3.20: Resistencia relativa de los filos y tendencia al astillado de los insertos de diversas formas.....	84
Figura 3.21: Insertos empleados en el mecanizado.....	85
Figura 3.22: Ingreso del código G en la pantalla de programación del Torno CNC.....	85
Figura 3.23: Tronzado de material para vástagos y camisas.....	86
Figura 3.24: Simulación en la plataforma de programación CIMCO de la parte anterior del vástago.....	86
Figura 3.25: Simulación en la plataforma de programación CIMCO de la parte posterior del vástago.....	87
Figura 3.26: Simulación en la plataforma de programación CIMCO de la parte trasera de la culata anterior.....	87
Figura 3.27: Simulación en la plataforma de programación CIMCO de la parte delantera de la culata anterior.....	87
Figura 3.28: Simulación en la plataforma de programación CIMCO de la parte externa de la culata posterior.....	88

Figura 3.29: Simulación en la plataforma de programación CIMCO para la parte interna de la culata posterior.....	88
Figura 3.30: Simulación en la pantalla de programación del torno CNC de la parte anterior del vástago.....	88
Figura 3.31: Simulación en la pantalla de programación del torno CNC de la parte posterior del vástago.....	89
Figura 3.32: Simulación en la pantalla de programación del torno CNC para la parte trasera de la culata anterior.....	89
Figura 3.33: Simulación en la pantalla de programación del torno CNC para la parte delantera de la culata anterior.....	89
Figura 3.34: Simulación en la pantalla de programación del torno CNC para la parte externa de la culata posterior.....	90
Figura 3.35: Simulación en la pantalla de programación del torno CNC para la parte interna de la culata posterior.....	90
Figura 3.36: Mecanizado de la parte anterior del vástago en el torno.....	90
Figura 3.37: Mecanizado de la parte posterior del vástago en el torno.....	91
Figura 3.38: Roscado de la parte posterior del vástago con tarraja.....	91
Figura 3.39: Mecanizado de la parte trasera de la culata anterior en el torno.....	91
Figura 3.40: Mecanizado de la parte delantera de la culata anterior en el torno.....	92
Figura 3.41: Mecanizado de la parte externa de la culata posterior en el torno.....	92
Figura 3.42: Mecanizado de la parte interna de la culata posterior en el torno.....	92
Figura 3.43: Elaboración de agujeros para el ingreso de racores en las culatas...	92
Figura 3.44: Piezas para el ensamblaje de cilindros.....	93
Figura 3.45: Ensamblaje general del cilindro neumático.....	94
Figura 4.1: Prototipo final del mecanismo.....	97

## ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 2.1: Promedio de los datos del dedo meñique.....	21
Ecuación 2.2: Desviación estándar de los datos del dedo meñique.....	21
Ecuación 3.1: Fuerza efectiva de avance.....	58
Ecuación 3.2: Fuerza efectiva de retroceso.....	59
Ecuación 3.3: Relación de compresión.....	60
Ecuación 3.4: Caudal o cantidad de aire consumido por el cilindro.....	60
Ecuación 3.5: Caudal total consumido por el sistema.....	61
Ecuación 3.6: Tensión admisible a tracción o compresión.....	62
Ecuación 3.7: Relación entre tensiones de rotura y fluencia y los coeficientes de seguridad.....	63
Ecuación 3.8: Carga axial permitida sobre el vástago.....	64
Ecuación 3.9: Momento de inercia de la sección del vástago.....	65
Ecuación 3.10: carga sobre el vástago aumentada 50%.....	66
Ecuación 3.11: Tensión admisible del cilindro.....	67
Ecuación 3.12: Volumen de material removido por unidad de tiempo.....	72
Ecuación 3.13: Diámetro promedio de la pieza de trabajo.....	74
Ecuación 3.14: Velocidad del husillo.....	74
Ecuación 3.15: Profundidad de corte.....	74
Ecuación 3.16: Velocidad de avance.....	75
Ecuación 3.17: Tiempo de corte.....	75
Ecuación 3.18: Potencia requerida en la operación de torneado.....	77
Ecuación 3.19: Torque en la operación de torneado.....	77
Ecuación 3.20: Fuerza de corte.....	77



## **INTRODUCCIÓN.**

Un rehabilitador para la mano es un dispositivo que efectúa movimientos de terapia de forma activa, empleando la fuerza misma del paciente, o pasiva, sin emplear la fuerza del paciente. En la actualidad los métodos de rehabilitación pasiva son realizados por especialistas en forma manual, en ocasiones esto provoca agotamiento tanto para el fisioterapeuta como en el paciente, razón por la cual con el desarrollo del presente trabajo se pretende construir un rehabilitador pasivo que pueda ser empleado como ayuda en el área de fisioterapia para ejecutar el proceso de rehabilitación de los dedos de la mano cuando estos hayan perdido su movilidad funcional, esta discapacidad se hace presente cuando se genera parálisis en alguno de los nervios pertenecientes a la mano, así como también por lesiones traumatológicas.

El rehabilitador pasivo está formado por 58 piezas mecánicas ensambladas y sujetas sobre un guante, además consta de un sistema neumático y siete cilindros capaces de accionar de forma contralada, generando así los movimientos deseados. El prototipo como tal será empleado como un exoesqueleto de la mano cumpliendo con las necesidades de ser autónomo, de tal forma que la ejecución constante de movimientos disminuya el tiempo de recuperación del paciente.

## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.**

A partir de datos relevantes del Centro de Rehabilitación Integral Ibarra N° 4 del Ministerio de Salud Pública y además tomando como referencia del Consejo Nacional de Igualdad de Discapacidades, en Ecuador, el 48,99 % de personas con

capacidades diferentes que es equivalente a 3.880 habitantes, sufren algún tipo de discapacidad física alusivas a accidentes de tránsito, de trabajo o problemas congénitos y neurológicos, de los cuales el 0,03% en la Zona 1 corresponden a inhabilidad física por dificultades neurológicas e inmovilización o traumatismo de los dedos de la mano, que disminuye de manera significativa el desempeño de las personas afectadas por esta situación (CONADIS, 2015).

Actualmente hay una gran variedad de aparatos para manos que permiten o facilitan el movimiento o el funcionamiento de ésta para su rehabilitación (PEÑA, TICÓ, LOPEZ, ABENOZA, & ROMERO, 2013), estos dispositivos emplean elementos electrónicos que se encuentran en contacto directo con la persona y un mal funcionamiento de estos podría perjudicar al paciente, por tal motivo se ha visto la necesidad de diseñar y construir un dispositivo rehabilitador pasivo de los dedos de la mano que implique brindar seguridad a los pacientes de acuerdo a las necesidades y exigencias de nuestro entorno (Enríquez, Narváez, & Vivas, 2014).

### **ALCANCE Y LIMITACIONES.**

Con el presente proyecto del dispositivo rehabilitador se realizará los movimientos de reactivación de motricidad fina y gruesa. En motricidad fina se generará el proceso de pinza bidigital de prensión y para reactivar la motricidad gruesa se realizará mediante la ejecución de la etapa media del proceso de rehabilitación seleccionando tres fases, inicial, media y movilidad total, también conocida como rehabilitación de los movimientos de forma precoz.

Se realizará el estudio de actuadores desde el punto de vista mecánico y materiales más adecuados para la construcción del mecanismo prototipo rehabilitador de dedos de la mano.

Para el diseño mecánico del dispositivo rehabilitador y actuador se empleará de un software específico generando así un modelo con todas sus especificaciones que permitirá realizar el análisis y esfuerzos del prototipo. La reactivación de la motricidad fina y gruesa de los dedos de la mano será posible a través del diseño del sistema de control para el dispositivo rehabilitador que se lo desarrollará a la par, pero como caso de estudio de otro trabajo.

### **JUSTIFICACIÓN.**

En nuestro entorno se realiza la rehabilitación de dedos de la mano en forma activa empleando la fuerza misma del paciente y pasiva con ayuda de un fisioterapeuta usando agentes físicos, electroterapia y mecanoterapia, este tipo de rehabilitación es pretendida por pacientes que tienen algún tipo de traumatismo ocasionado por cualquier motivo, refiriendo a este como un accidente de tránsito, de trabajo o a su vez por problemas congénitos y neurológicos, el diseño y construcción de un rehabilitador pasivo de dedos de la mano ayudará a disminuir molestias físicas que se puedan presentar en los fisioterapeutas o pacientes durante el proceso de rehabilitación, se desea reducir el tiempo de recuperación de la movilidad de los dedos de la mano y dicha recuperación será del 70% dependiendo de la patología del paciente para que este pueda reintegrarse de manera más pronta a su vida cotidiana, aplicando el Plan Nacional del Buen Vivir.

El desarrollo de este proyecto se justifica con el número creciente de pacientes entre 16 a 60 años que tienen dificultades de movilidad en los dedos de sus manos, pero sin ningún tipo de amputación y que frecuentemente llegan al Centro de Rehabilitación Integral N° 4 (CRI), correspondiente a la zona 1 de nuestro país, para que puedan acceder e iniciar con el proceso de rehabilitación.

Se desea realizar el diseño y construcción de un rehabilitador pasivo de dedos de la mano que sea capaz de cumplir un trabajo igual a los que se realizan en los centros de rehabilitación contribuyendo con un alcance positivo dentro de la sociedad para su beneficio. El diseño y construcción de un sistema actuador servirá como aporte a la investigación debido que ayudará al manejo de la tecnología en la fabricación de actuadores y se pone en consideración que la construcción del rehabilitador pasivo de dedos de la mano será un dispositivo innovador, diferente, seguro y lo más importante apropiado según los requerimientos de las personas con este tipo de discapacidad.

### **METODOLOGÍA.**

Se describe los procedimientos realizados en la manufactura y construcción del dispositivo rehabilitador pasivo de dedos de la mano.

### **INVESTIGACIÓN DE CAMPO.**

El paso inicial para el desarrollo del proyecto es efectuar una investigación de campo, para determinar la factibilidad de construir un dispositivo de rehabilitación para los dedos de la mano, realizando encuestas a especialistas en fisioterapia,

obteniendo de esta manera información referente a molestias que puede generar en el profesional o paciente al momento de efectuar la terapia, lesiones más comunes que se presentan en la mano limitando su movilidad, así como también los procesos y técnicas de rehabilitación.

### **FUENTES BIBLIOGRÁFICAS.**

Se hace necesario la recopilación de información y datos sobre la movilidad funcional de la mano, su anatomía, biomecánica, patologías, así como su proceso y métodos de rehabilitación, características básicas para el diseño y construcción del mecanismo y cilindros, además en el desarrollo del prototipo del mecanismo rehabilitador pasivo de dedos de la mano se hace énfasis en los movimientos y ángulos máximos a ejecutarse.

### **SELECCIÓN DE MÉTODOS DE REHABILITACIÓN.**

Con la ayuda de especialistas en fisioterapia se determinan los movimientos de rehabilitación que efectuará el mecanismo, entre los que se selecciona: proceso de reactivación de la motricidad gruesa dividida en tres etapas y reactivación de motricidad fina con pinza bidigital; elegidos debido a que con la ejecución de estos métodos el paciente puede recuperar la movilidad funcional de la mano en un alto porcentaje.

### **ESTABLECER CARACTERÍSTICAS DE UN SUJETO DE ESTUDIO.**

Para el dimensionamiento del mecanismo rehabilitador de dedos de la mano se hace indispensable tomar a un sujeto de estudio, delimitando así las

particularidades del diseño prototipo, tomando medidas antropométricas de varias personas según la edad y estatura. Se obtienen las medidas de una mano promedio, siendo seleccionado el Sr. Gabriel Iza, estudiante de la carrera de mecatrónica como parte del proceso de investigación. Las medidas obtenidas se sobredimensionan debido a que la estructura mecánica va sobrepuesta sobre un guante.

### **DISEÑOS PRELIMINARES.**

Mediante la investigación del estado del arte se observa diseños de dispositivos y guantes para la rehabilitación de la mano, los cuales aportan ideas preliminares para el diseño del mecanismo rehabilitador. Se realizan diseños, basándose en los requerimientos especificados por fisioterapeutas, para cumplir con los movimientos determinados para el proceso de rehabilitación.

### **SELECCIÓN DE MATERIAL.**

Con el estudio de materiales requeridos para rehabilitadores de mano, se efectúa el análisis y selección de materiales óptimos, tanto para la construcción del mecanismo rehabilitador como para la manufactura de los cilindros neumáticos de doble efecto, entre los que se encuentran el plástico PLA, acero inoxidable y aleaciones de aluminio.

### **SELECCIÓN DE ELEMENTOS CONSTITUTIVOS.**

Para el mecanismo rehabilitador se selecciona elementos de sujeción y montaje como anillos de retención, pasadores, horquillas y guante. Para el cilindro

neumático se elige elementos estandarizados disponibles en el mercado, en los que se encuentran juntas, émbolo, casquillo guía, principales para el dimensionamiento de las piezas a mecanizar.

### **PROTOTIPADO.**

Se realizan 3 prototipos de rehabilitadores, empleando impresoras 3D, el primero se lo realiza en polvo cerámico, llegando a obtener nitidez en la calidad de impresión, pero frágiles en manipulación, permite ejecutar mejoras en el diseño. La segunda impresión se la realiza en plástico PLA con un relleno al 20% y baja calidad para la verificar la funcionalidad del mecanismo y elaborar las correspondientes correcciones. Finalmente, para la tercera impresión se emplea relleno al 100% para piezas pequeñas y 25% para piezas grandes en calidad estándar, obteniendo el funcionamiento correcto y la dureza deseada, para el acabado se utiliza resina líquida especial para impresión 3D.

### **MECANIZADO.**

Los cilindros neumáticos son diseñados y construidos bajo la metodología de ingeniería inversa, tomando datos y características estándares para su fabricación. La manufactura de culatas, vástago y camisa se rigen al dimensionamiento de los materiales estándares seleccionados, empleando un torno manual y CNC computarizado disponible en los laboratorios de la institución. El mecanizado de los pasadores empleados en toda la estructura se lo realiza con máquinas herramientas poco complejas debido a su sencilla geometría.

## **ENSAMBLAJE DEL MECANISMO.**

Las piezas son montadas en el dedo correspondiente, así como también en la base, donde cada elemento cuenta con su respectiva codificación para facilidad de ensamblaje, son sujetados con pasadores y anillos de retención que le proporcionan al mecanismo la movilidad suficiente. El mecanismo es montado sobre un guante, permitiendo así el fácil ingreso de la mano al dispositivo para generar los movimientos y realizar las respectivas pruebas de funcionamiento.

## **ANTECEDENTES**

Un inconveniente neurológico o traumatológico en los dedos de la mano ocasiona problemas funcionales y estéticos importantes, provocando rigidez articular y atrofia muscular, no sólo en la articulación lesionada, sino también en las de su proximidad.

Un tratamiento funcional precoz puede prevenir estas eventualidades, así como minimizar las posibles secuelas. En buena parte de los casos, la pauta de recuperación es sencilla y factible, siendo necesario un tratamiento con adecuados equipos que mediante terapias se logre recuperar la movilidad funcional de los dedos de la mano en un alto porcentaje (Peiró & Santonja).

## **ESTRUCTURA DEL PROYECTO**

En el desarrollo del presente trabajo se elabora cinco capítulos distribuidos de la siguiente manera:



El primer capítulo hace referencia a guantes que se usan dentro del proceso de rehabilitación, el estudio previo de la mano, enmarcado en la anatomía, osteología, artrología, fisiología y miología, además su biomecánica, patrones funcionales, patologías que pueden presentarse en la misma, así como también las respectivas etapas de rehabilitación para la recuperación de su movilidad funcional.

En el segundo capítulo se muestra la elaboración del mecanismo rehabilitador, considerando medidas de una mano promedio con especificaciones antropométricas de un sujeto de estudio, se detalla la geometría empleada para el diseño de cada componente, diseño, simulación, impresión 3D y ensamblaje.

La construcción e implementación del cilindro neumático de doble efecto se detalla en el capítulo tres, donde se realiza los correspondientes cálculos tanto para el diseño como para la manufactura, igualmente se indica materiales y tolerancias para el mecanizado y el ensamblaje del cilindro.

El análisis de resultados esperados dentro de la ejecución del proyecto se presenta en el capítulo cuatro. Conclusiones y recomendaciones se especifica en el capítulo cinco.

## CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO.

En el siguiente capítulo se describe tipos de guantes empleados para la rehabilitación de los dedos de la mano, así como también las generalidades de la misma, detallando anatomía, osteología, artrología, fisiología, miología, biomecánica, patrones funcionales, patologías y etapas de rehabilitación.

### 1.1 GUANTES DE REHABILITACIÓN DE PANASONIC.

El guante que se observa en la Figura 1.1, hace referencia a la marca Panasonic, empleado en rehabilitación para ayudar a mover la mano afectada por una hemiplejía. Consta de dos tipos de guantes, uno robótico compuesto por músculos artificiales de goma que se coloca en la mano afectada, y otro guante con sensores electrónicos que se pone en la mano sana. La mano afectada imita los gestos y acciones de la mano sana.



Figura 1.1: Guantes de rehabilitación de Panasonic

Fuente: (Panasonic, 2007)

El guante además cuenta con dispositivos lumínicos en la punta de los dedos que sirven para preparar y avisar al paciente de que se va a imitar el movimiento (Panasonic, 2007).

## 1.2 GUANTE REHABILITADOR GLOREHA.

En la Figura 1.2 se muestra el guante GLOREHA, que está diseñado para la rehabilitación neuromotora de la mano, se centra en la articulación metacarpofalángica, la interfalángica proximal y las articulaciones interfalángicas distales. Está especialmente indicada en caso de parálisis parcial de la mano después de las lesiones del sistema nervioso periférico o central.



Figura 1.2: Guante rehabilitador de mano GLOREHA

Fuente: (GLOREHA, s.f.)

El guante GLOREHA mantiene y mejora el rango de movimiento articular en los dedos, se utiliza para alcanzar y agarrar objetos en formación, muy cómodo de usar dónde los movimientos de los dedos son muy naturales, reduce el dolor y mejora del metabolismo de las articulaciones y la circulación sanguínea y linfática (GLOREHA, s.f.).

### 1.3 EXOHAND FESTO.

El ExoHand de Festo es un exoesqueleto que se puede usar como un guante. Los dedos se pueden mover de forma activa amplificado la fuerza; el ExoHand combina la inteligencia humana con las capacidades de un robot. Los objetivos son mejorar la fuerza y la resistencia de la mano humana, para extender el alcance de la acción de los seres humanos y les asegure una vida independiente, incluso a una edad avanzada.

En la rehabilitación o terapia médica se puede utilizar como una ortesis activa manual para ayudar a los pacientes con accidente cerebrovascular que sufren de parálisis, para regenerar la conexión dañada del cerebro a la mano. El deseo del paciente para abrir o cerrar su mano se registra por medio de una señal electroencefalográfica (EEG), que se mide en la cabeza del sujeto como se ilustra en la Figura 1.3 (FESTO, 2012).



Figura 1.3: Exohand FESTO

Fuente: (FESTO, 2012)

## **1.4 ANATOMÍA DE LA MANO**

La mano se puede definir como un órgano prensil o de agarre, formada por una serie de elementos que han evolucionado en forma casi perfecta, convirtiéndose en una herramienta indispensable en los diferentes aspectos de la vida diaria; está formada por un sistema vascular bastante completo, 27 huesos, 35 músculos, 48 nervios, y 123 ligamentos (Quiñonez, 2005).

## **1.5 OSTEOLÓGÍA DE LA MANO.**

En las manos, pueden distinguirse tres zonas:

- Carpo o muñeca conformado por ocho huesos cortos: escafoides, lunado, triquetral, pisiforme, trapecio, trapezoideo, capitado, hamatal.
- Metacarpo que está conformado por cinco huesos metacarpianos.
- Cinco dedos, en cada uno de ellos existen tres falanges; proximal, media y distal a excepción del dedo pulgar que solo presenta falange proximal y una falange distal. (Moore, Dalley, & Agur, 2009)

## **1.6 ARTROLOGÍA DE LA MANO.**

El suministro vascular arterial de la mano viene dado por varios sistemas interconectados de arterias, ramas de la arteria cubital y radial principalmente.

Forman sistemas llamados arcos tanto volares como dorsales, entre los cuales esta:

- Arco palmar superficial, formado principalmente por la arteria cubital.
- Arco palmar profundo, formado principalmente por la arteria radial.
- Arco arterial dorsal, formado por la arteria dorsal del carpo.
- La arteria dorsal del pulgar va del lado radial del dedo pulgar, y la arteria interósea del primer espacio a los lados adyacentes del mismo, y del dedo índice, ambas nacen separadas de la arteria radial (Quiñonez, 2005).

## **1.7 FISIOLÓGÍA DE LA MANO.**

La fisiología de la mano es el estudio de su funcionamiento y movimiento, estos movimientos de abducción, aducción, flexión, extensión y oposición, se realizan mediante los músculos y los nervios que inervan a los dedos.

### **1.7.1 ABDUCCIÓN Y ADUCCIÓN.**

La abducción en el pulgar es el movimiento de alejamiento de la palma de la mano en un plano perpendicular al plano de dicha palma.

La abducción y aducción de los dedos segundo, tercero y cuarto se realiza usando el dedo índice como referencia como se muestra en la Figura 1.4, se separan entre sí 20°.

La abducción en el quinto dedo se realiza mediante el alejamiento de la palma a lo largo de su propio plano (Palacios, Prieto, & Anguiano, 2009).



Figura 1.4: Abducción y aducción de los dedos de la mano

### 1.7.2 FLEXIÓN.

En las siguientes Figuras 1.5 y 1.6 se puede observar el movimiento de flexión que generan los dedos, donde sobre el plano sagital  $0^\circ$  se desplaza una parte de la mano hacia delante de la posición anatómica, registrando un ángulo formado entre la posición 0 y la posición final (Taboadela, 2007).

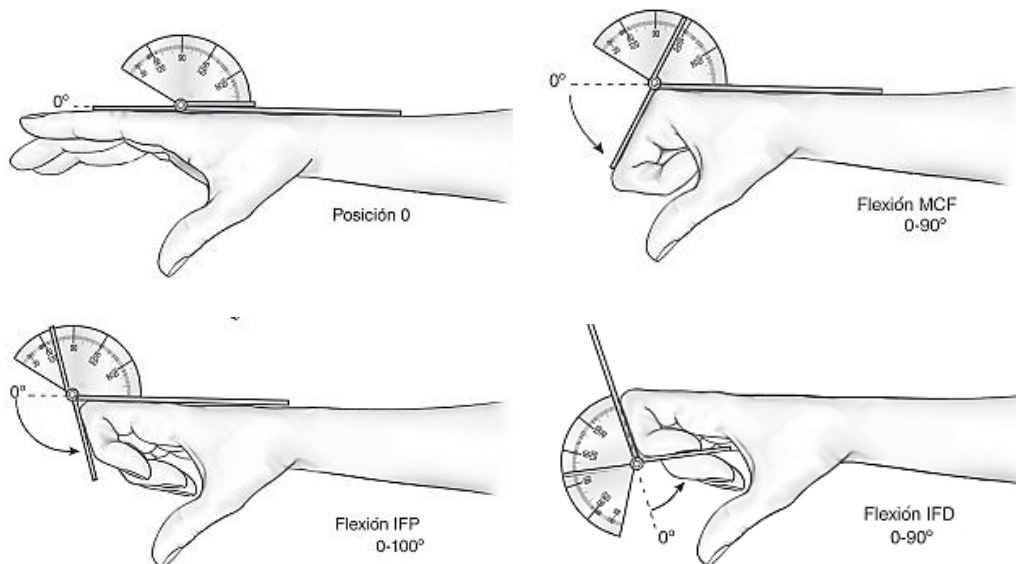


Figura 1.5: Flexión metacarpofalángica (MCF), interfalángica proximal (IFP) e interfalángica distal (IFD)

Fuente: (Taboadela, 2007)

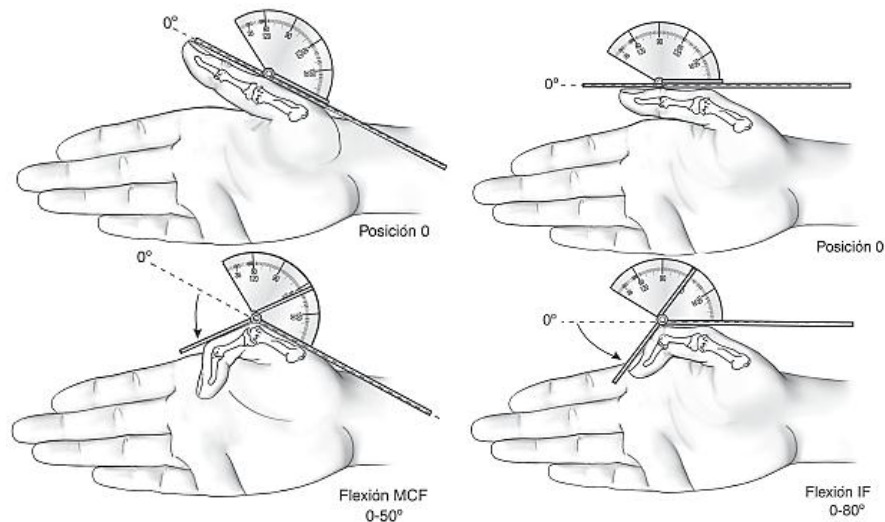


Figura 1.6: Flexión metacarpofalángica (MCF) e interfalángica (IF) del pulgar

Fuente: (Taboadela, 2007)

### 1.7.3 EXTENSIÓN.

En las Figuras 1.7 y 1.8 se indica el movimiento de extensión que generan los dedos, donde sobre el plano sagital  $0^\circ$  se desplaza una parte de la mano hacia atrás de la posición anatómica registrando un ángulo formado entre la posición 0 y la posición final (Taboadela, 2007).

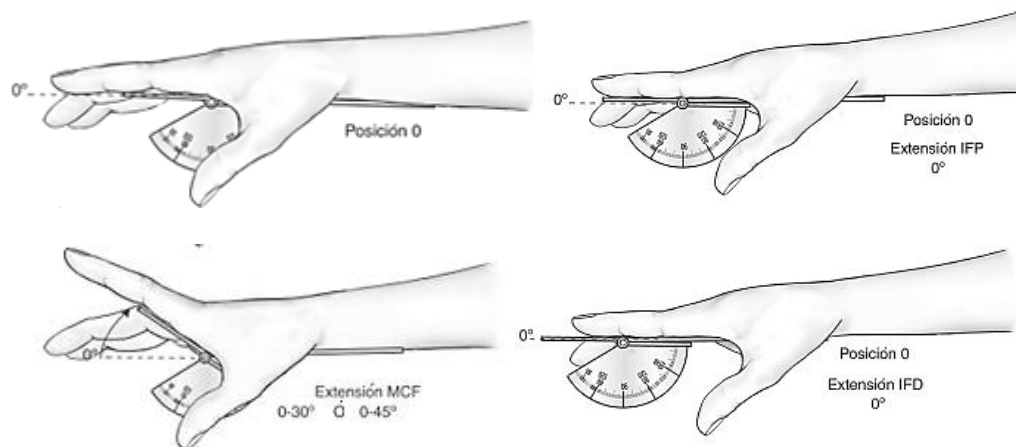


Figura 1.7: Extensión metacarpofalángica (MCF), interfalángica proximal (IFP) e interfalángica distal (IFD) de los dedos de la mano

Fuente: (Taboadela, 2007)



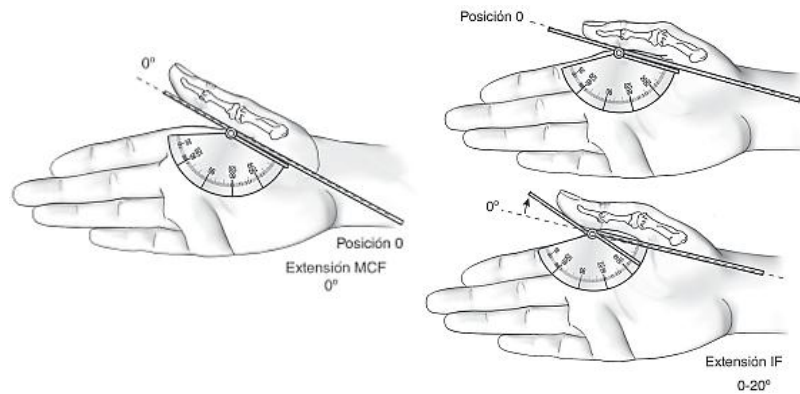


Figura 1.8: Extensión metacarpofalángica (MCF) e interfalángica (IF) del pulgar

Fuente: (Taboadela, 2007)

#### 1.7.4 OPOSICIÓN.

El movimiento por el cual el pulpejo o parte blanda del pulgar alcanza la base del meñique es la oposición, la oposición del pulgar se mide en centímetros como se muestra en la Figura 1.9. La oposición del pulpejo del pulgar se considera normal cuando alcanza la base del meñique y un recorrido menor de 8 cm se considera anormal (Taboadela, 2007).



Figura 1.9: Oposición del pulgar

Fuente: (Taboadela, 2007)

## 1.8 MIOLOGÍA DE LA MANO.

Los músculos de la mano se pueden agrupar en extrínsecos e intrínsecos, dependiendo de su origen e inserción.

Los músculos que se encuentran situados en la región dorsal son:

- Supinador largo.
- Abductor largo del pulgar.
- Extensor corto del pulgar.
- Primer radial externo.
- Segundo radial externo.
- Extensor largo del pulgar.
- Extensor común de los dedos.
- Extensor propio del índice.
- Extensor propio del meñique.
- Cubital posterior.

Los músculos que se encuentran situados en la región palmar son:

- Pronador redondo.
- Pronador cuadrado.
- Palmar mayor.
- Palmar menor.
- Flexor largo del pulgar.
- Flexor superficial de los dedos.
- Flexor profundo de los dedos.
- Cubital anterior.

Los músculos intrínsecos, son los que tienen su origen e inserción dentro de la misma mano son:

- Interóseos dorsales: Son cuatro, su acción es abducir.
- Interóseos palmares: Son tres, su acción es la de producir aducción, moviendo el IV -V metacarpiano hacia el radio y el II hacia el cubito.
- Lumbricales: Son cuatro, su acción es la flexión de la I falange y extensión de las otras dos.

Músculos de la eminencia tenar:

- Abductor corto del pulgar.
- Oponente del pulgar.
- Flexor corto del pulgar.
- Aductor del pulgar.

Músculos de la eminencia hipo tenar:

- Abductor del meñique.
- Flexor corto del meñique.
- Oponente del meñique (Quiñonez, 2005).

## **1.9 BIOMECÁNICA DE LA MANO.**

La mano es un sistema compuesto por segmentos óseos equilibrados por fuerzas tendinosas y musculares y con restricciones articulares, donde la mano por su movilidad, disposición y dimensiones de las estructuras óseas de que está conformada puede adaptarse a la forma de los objetos que sujeta (Comín, 1998).

## 1.10 PATRONES FUNCIONALES DE LA MANO.

Los patrones funcionales de la mano se enmarcan en la función prensil o de agarre de la mano, que depende de la rectitud de la cadena cinética de huesos y articulaciones, que va desde la muñeca hacia las falanges, a continuación, se detallan los tipos de agarres de fuerza y de precisión (López L. A., 2012).

### 1.10.1 AGARRES DE FUERZA.

Los agarres de fuerza son aquellos que se generan por la flexión de las interfalángicas y la aducción del pulgar, es decir, el objeto se encuentra entre los dedos y la palma, obsérvese Figura 1.10 (López L. A., 2012).

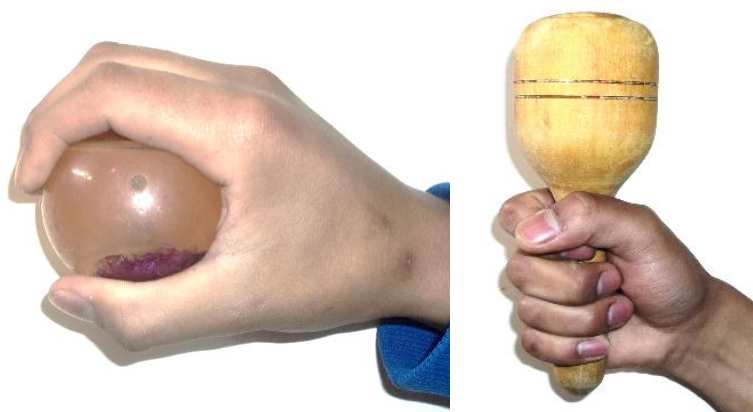


Figura 1.10: Agarres de fuerza: Flexión de las interfalángicas y pulgar aducido

### 1.10.2 AGARRE DE PRECISIÓN.

En la Figura 1.11 se ilustra el agarre de precisión, donde la muñeca reduce su ángulo, obteniendo dedos semiflexionados, pulgar aducido y en oposición (López L. A., 2012).



Figura 1.11: Agarre de precisión: Dedos semiflexionados, pulgar en oposición

### 1.11 MORFOLOGÍA DE LA MANO.

La morfología de la mano es la encargada de estudiar su forma y estructura, en el Anexo A puede observarse el atlas general de la mano describiendo su estructura, como se detalla también a continuación:

Huesos:

- Carpo o muñeca: 8 Huesos
- Metacarpo: 5 huesos.
- Falanges: 14 falanges.
- Cúbito.
- Radio.

Red circulatoria:

- Recorrido por arterias.
- Recorrido por venas.

Red nerviosa:

- Nervio radial.
- Nervio mediano.
- Nervio cubital.

Músculos:

- Palmar corto o palmar cutáneo.
- Abductor corto del pulgar.
- Flexor corto del pulgar.
- Oponente del pulgar.
- Aductor del pulgar.
- Abductor del dedo meñique.
- Flexor corto del dedo meñique.
- Oponente del dedo meñique.
- Lumbricales.
- Interóseos dorsales y palmares.

## **1.12 PATOLOGÍAS DE LA MANO.**

La mano puede presentar ciertas lesiones o patologías provocadas por accidentes en actividades que se realiza diariamente, afectando parcial o totalmente al desempeño funcional de la misma, estas lesiones pueden ser de carácter neurológico y traumatológico.

### **1.12.1. NEUROLÓGICO.**

La mano tiene tres funciones, estas son la flexión y extensión de los dedos, y la oponencia del pulgar. Para cumplir estas funciones necesita un buen motor neurológico que le provea movilidad y sensibilidad adecuada, esto se cumple por la acción de los nervios radial, mediano y cubital y la afección de

alguno de estos como se detalla a continuación, puede disminuir significativamente su cabal funcionamiento (Quiñonez, 2005).

- Parálisis del nervio radial o “mano caída”, se produce por una compresión sobre el nervio radial, donde se presentan los siguientes tipos de pérdidas funcionales: No hay extensión de la muñeca, no hay de la extensión de los dedos y no hay la extensión ni abducción del pulgar (Quiñonez, 2005).
- Parálisis del nervio mediano o “síndrome de túnel carpiano”, provoca pérdida de flexión de muñeca, de los dedos y del pulgar e impide su oposición (Quiñonez, 2005).
- Parálisis del nervio cubital o “síndrome de canal de guyon”, también conocida como la “mano de garra” debido a la pérdida de flexión de la metacarpofalángica de los dedos anular y meñique”, además provoca la pérdida de abducción del índice y del pulgar (Quiñonez, 2005).
- Mano hemipléjica. Es una patología que provoca una parálisis de medio lado y en las manos afecta a la movilidad total de una de ellas.

### **1.12.2 TRAUMATOLÓGICO.**

Las lesiones que ocurren en las manos por casos traumatológicos se refiere a fracturas, luxaciones y esguinces.

- Fracturas. Son lesiones o rupturas de un tejido óseo que se presentan a nivel de las falanges y metacarpianos, ocupan aproximadamente el 10% de todas las fracturas (Quiñonez, 2005).
- Luxaciones dorsales. Produce una fractura en la falange media debido a una fuerza axial, provocando una deformidad con hiperextensión y la cabeza del metacarpiano lesionado se desplaza y crea un abultamiento (Quiñonez, 2005).
- Luxación volar. Esta lesión compromete estructuras de tejido blando cuya magnitud y extensión inicialmente son desconocidas, se caracteriza por la ruptura de ligamentos (Quiñonez, 2005).
- Esguinces. Causados por caídas donde un lado del dedo golpea contra un objeto resistente donde existe un arrancamiento o rotura del ligamento colateral (Palacios, Prieto, & Anguiano, 2009).

### **1.13 ETAPAS DE REHABILITACIÓN DE LOS DEDOS DE LA MANO.**

Cuando se está en presencia de una mano lesionada, se realiza procedimientos terapéuticos, que conlleven a la restauración funcional de la misma, en forma rápida y segura; información que se ha obtenido con especialistas en fisioterapia como se indica en el Anexo B.

Por lo tanto, para el manejo inicial de las lesiones es esencial un conocimiento de anatomía y funcionalidad de ella, lo que servirá para realizar un buen diagnóstico y de allí plantear en forma lógica y eficaz un plan terapéutico (Quiñonez, 2005).



Dentro del proceso de terapia se hace necesario como primer paso bajar la inflamación (100%) y reducir el dolor (50%-60%) de la zona afectada de la mano, mediante el uso de compresas químicas frías o calientes como se observa en la Figura 1.12.



Figura 1.12: Aplicación de compresas calientes en la mano afectada

Posteriormente se emplea electroterapia, que consta de una máquina de ultrasonido, ondas de choque, laserterapia, láser de alta intensidad o magnetoterapia como se observa en las Figuras 1.13 y 1.14.



Figura 1.13: Aplicación de gel previo a la electroterapia



Figura 1.14: Terapia con ultrasonido

Finalizada la operación de preparación del paciente, se ejecuta los procedimientos de rehabilitación pasiva y activa.

#### **1.13.1 REHABILITACIÓN PASIVA.**

La rehabilitación pasiva implica el uso de un equipo, máquina o persona donde el paciente se relaja y no asiste en la actividad de rehabilitación de la mano como ilustra la Figura 1.15, se realiza por medio de la aplicación de una fuerza externa ya sea manual o mecánica (Lopategui, 2012).



Figura 1.15: Ejecución del proceso manual de rehabilitación pasiva

En la rehabilitación pasiva se efectúa ejercicios de reactivación de:

- Motricidad fina. Es el movimiento de pinza bidigital entre el dedo pulgar e índice como se observa en la Figura 1.16, constituye en el proceso de rehabilitación para la adquisición de habilidades y manipulación de objetos (Fonseca, 1988).



Figura 1.16: Movimiento de pinza bidigital en el proceso de reactivación de la motricidad fina

- Motricidad gruesa. Se refiere a realizar movimientos amplios de los dedos de la mano, es decir, ejecutar flexión. En la Figura 1.17 se puede apreciar el proceso de terapia pasiva asistida (Castillo & Pauta, 2011).



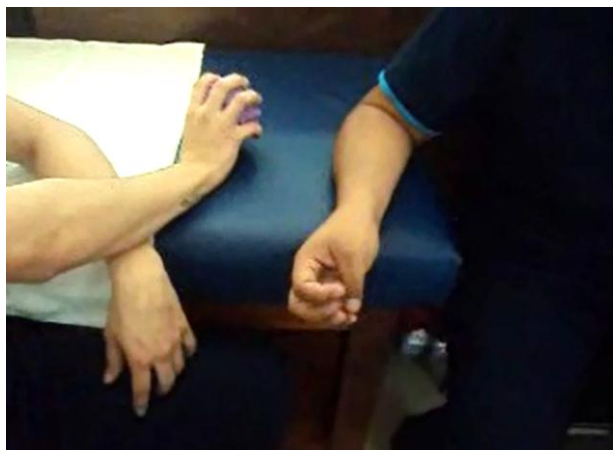
Figura 1.17: Ejecución de terapia pasiva asistida para la reactivación de la motricidad gruesa

La realización del ejercicio de motricidad gruesa se divide en tres grados de movilidad:

- GRADO I: Movimiento pasivo de pequeña amplitud, próximo a la posición de partida del recorrido y alejado de la sintomatología.
- GRADO II: Movimiento pasivo de gran amplitud que puede ocupar cualquier punto del recorrido, siempre que esté libre de la sintomatología.
- GRADO III: Movimiento pasivo de gran amplitud, no debe iniciarse necesariamente desde el punto de partida y puede llevarse a cabo con rigidez y resistencia (del Val, 2010).

### 1.13.2 REHABILITACIÓN ACTIVA.

Los ejercicios de flexibilidad ejecutados en la rehabilitación activa son realizados por el mismo paciente, participando en la maniobra para mejorar el funcionamiento de un músculo tenso o entumecido, en la siguiente Figura 1.18 se puede observar el ejercicio de rehabilitación empleando una pelota para terapia.



1.18: Rehabilitación activa con una pelota de terapia

## **CAPÍTULO II. SISTEMA MECÁNICO.**

El diseño mecánico del dispositivo rehabilitador está basado tanto en el área de la ingeniería como en el área médica, tomando en consideración las medidas antropométricas de un sujeto de estudio y movimientos requeridos para el proceso de rehabilitación. A continuación, en este capítulo, se detalla: conceptos, diseño de cada componente, simulación, ensamblaje y pruebas.

### **2.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO.**

El mecanismo del dispositivo rehabilitador asemeja el movimiento de flexión que realizan los dedos de la mano, por tal motivo el diseño y ensamblaje de las piezas cumple con la ejecución de dichos movimientos con determinadas posiciones y ángulos seleccionados mediante fisioterapeutas requeridos para el proceso de rehabilitación, donde cada dedo es impulsado por cilindros neumáticos que transmiten la energía mecánica entre sus componentes.

### **2.2 DIMENSIONAMIENTO DEL MECANISMO DEL REHABILITADOR.**

Para el dimensionamiento del mecanismo rehabilitador se efectuó un estudio de campo con un muestreo de 12 personas estimadas en rango de edad y estatura, además se realiza el promedio de los datos como se indica en la ecuación 2.1 y la desviación estándar (ecuación 2.2) para su respectivo análisis, determinando el tamaño y características físicas de una mano promedio tomando así a un sujeto de estudio como parte de la investigación.

## Ecuación 2.1: Promedio de los datos del dedo meñique

$$\mu = \frac{\sum X}{N} = \frac{18.54 + 16.50 + 15.38 + 15.54 + 13.94 + 13.16 + 22.48 + 12.44 + 11.25}{9} = 15.47$$

Fuente: (Spiegel, 1991)

## Ecuación 2.2: Desviación estándar de los datos del dedo meñique

$$\sigma = \sqrt{\frac{[\sum((X - \mu)^2)]}{N}} = \sqrt{\frac{[9.42 + 1.06 + 0.0081 + 0.0049 + 2.34 + 5.33 + 49.14 + 9.18 + 17.80]}{9}} = 10.47$$

Fuente: (Spiegel, 1991)

Aplicando la ecuación 2.2 se obtiene la desviación de los datos restantes para:

Dedo Anular

$$\sigma = \sqrt{\frac{[\sum((X - \mu)^2)]}{N}} = 19.65$$

Dedo Índice

$$\sigma = \sqrt{\frac{[\sum((X - \mu)^2)]}{N}} = 14.04$$

Dedo Medio

$$\sigma = \sqrt{\frac{[\sum((X - \mu)^2)]}{N}} = 19.99$$

Dedo Pulgar

$$\sigma = \sqrt{\frac{[\sum((X - \mu)^2)]}{N}} = 43.54$$

En la Tabla 2.1 y 2.2 y en las Figuras 2.1 y 2.2 se muestra las medidas obtenidas de la mano, muñeca, antebrazo y de cada falange respectivamente.

Tabla 2.1: Medidas de muñeca, antebrazo y palma de una mano promedio

Promedio en milímetros (mm) de la muñeca y antebrazo		Promedio en milímetros (mm) de la palma de la mano	
Ancho muñeca	58,64	Largo	100,07
Espesor muñeca	42,46	Ancho con pulgar	95,55
Ancho antebrazo	66,95	Ancho sin pulgar	81,5
Espesor antebrazo	64,72	Espesor lado pulgar	40,71
		Espesor lado opuesto al pulgar	29,84

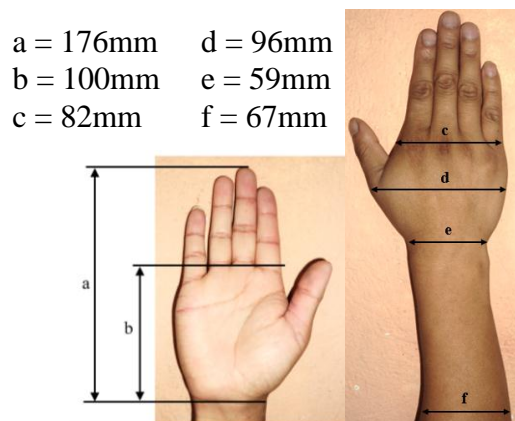


Figura 2.1: Dimensiones promedio de la mano humana

Tabla 2.2: Medidas de los dedos de una mano promedio

Promedio en milímetros (mm) de los dedos de la mano										
<b>Meñique</b>	Falange	Proximal	Largo	18,54	<b>Anular</b>	Falange	Proximal	Largo	22,85	
			Ancho	16,50				Ancho	18,61	
			Espesor	15,38				Espesor	17,66	
		Medial	Largo	15,54			Medial	Largo	24,54	
			Ancho	13,94				Ancho	15,34	
			Espesor	13,16				Espesor	14,29	
		Distal	Largo	22,48			Distal	Largo	24,81	
			Ancho	12,44				Ancho	14,06	
			Espesor	11,25				Espesor	12,69	
<b>Medio</b>	Falange	Proximal	Largo	25,56	<b>Índice</b>	Falange	Proximal	Largo	23,34	
			Ancho	18,88				Ancho	19,54	
			Espesor	19,01				Espesor	18,65	
		Medial	Largo	24,99			Medial	Largo	21,56	
			Ancho	16,55				Ancho	16,45	
			Espesor	15,55				Espesor	15,67	
		Distal	Largo	25,16			Distal	Largo	24,53	
			Ancho	15,11				Ancho	14,78	
			Espesor	13,41				Espesor	13,00	
<b>Pulgar</b>	Falange	Proximal	Largo	33,01				Largo		
			Ancho	20,05				Ancho		
			Espesor	19,00				Espesor		
		Distal	Largo	31,09				Largo		
			Ancho	19,11				Ancho		
			Espesor	15,53				Espesor		

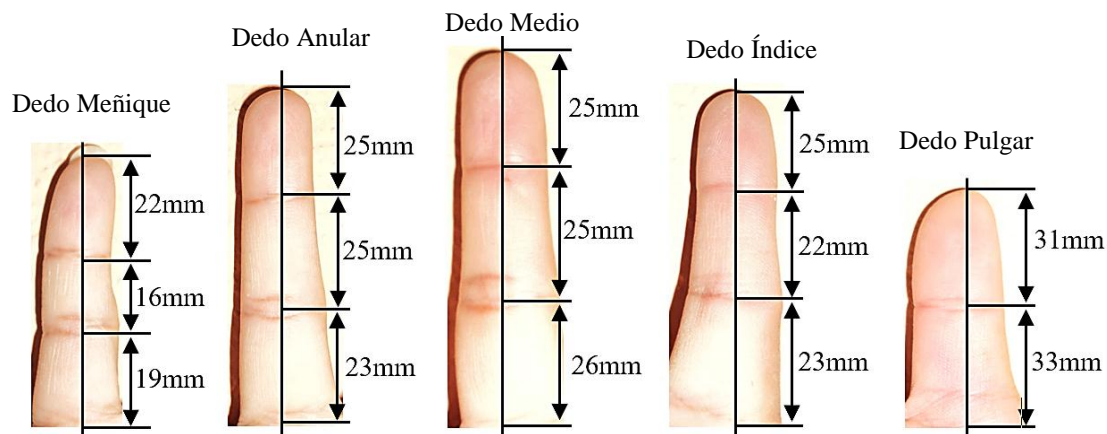


Figura 2.2: Dimensiones promedio de los dedos de la mano humana

Para efectos de diseño se sobredimensionan las medidas obtenidas debido a que el mecanismo del rehabilitador va sobrepuesto en un guante.

### 2.3 ELEMENTOS DEL DISPOSITIVO REHABILITADOR.

Para la construcción del dispositivo rehabilitador se realiza un análisis de varios elementos que brinden al mecanismo ciertas características y especificaciones de ser un dispositivo liviano, ergonómico y resistente, como se describe en el Anexo C, entre los cuales se determinan los siguientes:

#### 2.3.1 POLIÁCIDO LÁCTICO.



Figura 2.3: Impresión de piezas en plástico PLA



El poliácido láctico o PLA es un polímero biodegradable que puede ser moldeado y transformado en diversos objetos con formas diferentes como se observa en la Figura 2.3, siendo el de mayor uso para impresión 3D (López F. C., 2004).

El plástico PLA ha sido empleado para realizar impresión de cada pieza del dispositivo rehabilitador y presenta las siguientes características:

- Peso ligero.
- Alta resistencia al choque y a la vibración.
- Tienden a absorber la vibración y el sonido.
- Alta resistencia a la abrasión y al uso.
- Prelubricados.
- Son flexibles.
- No conducen la electricidad (Díaz del Castillo, 2012).

### 2.3.2 GUANTE ROBESBON.



Figura 2.4: Guantes ROBESBON

Guante con almohadillas 3D de GEL con pliegues para amortiguación y malla de ventilación, utiliza tejido transpirable en la parte posterior para asegurar una ventilación eficaz, está diseñado de poliéster y licra, como se observa en la Figura 2.4, proporciona una excelente protección y confort, además tiene malla transpirable para evitar la generación de sudor (ROBESBON, 2015). (Ver Anexo C).

### 2.3.3 PASADORES.

Los pasadores son fabricados en acero inoxidable, basándose en especificaciones de diseño tomadas del catálogo de Rotor CLIP mostrado en el Anexo D. Dependiendo del diámetro requerido se selecciona el adecuado anillo de retención, los pasadores permiten la sujeción entre cada pieza mediante un orificio en común asegurando su posición relativa (Figura 2.5).



Figura 2.5: Pasadores con diámetros y tamaños requeridos para la sujeción entre las piezas

### 2.3.4 ANILLOS DE RETENCIÓN E.

Permiten simplificar el diseño, disminuyendo el costo de instalación, son eficaces porque sustituyen a sujetadores tradicionales.

Son montados radialmente, sus tres dientes hacen contacto con el fondo de la ranura para lograr la retención del mecanismo (Figura 2.6) (Rotor Clip Company, 2005).



Figura 2.6: Anillos de retención

### 2.3.5 HORQUILLA.

Es un componente mecánico empleado para el acople de los cilindros neumáticos con el mecanismo rehabilitador, se conoce comúnmente como rótula o articulación (Figura 2.7).



Figura 2.7: Horquilla o rótula

## 2.4 DISEÑO MECÁNICO.

La finalidad del diseño mecánico es reproducir el movimiento de flexión de la mano humana que será generado mediante actuadores neumáticos para lo cual debe considerarse los siguientes puntos:

- Obtención de las medidas correspondientes para cada pieza.
- Diseño de un sistema con cinco dedos.
- Integración de los dedos en una estructura rígida (base).
- Colocación adecuada de los actuadores neumáticos dentro de la misma estructura que contiene a los dedos.
- Análisis estático del dispositivo.
- Análisis de elementos finitos.

Después de determinar las medidas de una mano promedio, se procede a realizar el correspondiente diseño de cada pieza para que el mecanismo funcione correctamente y ejecute los movimientos deseados.

La obtención de los datos de las medidas de las piezas se los efectuó tomando en consideración el movimiento que podrá realizar cada elemento, mediante el estudio realizado en el Capítulo I acerca de los ángulos máximos que podrá ejecutar el mecanismo para realizar el proceso de rehabilitación, así como también analizando la anatomía y morfología de la mano para no afectar su movilidad funcionalidad normal, cabe destacar que los ángulos seleccionados

como se detallará a continuación, han sido determinados por un especialista en fisioterapia.

En la siguiente Tabla 2.3, se indican los ángulos máximos de movimiento de flexión para el meñique, anular, medio, índice y pulgar que realiza una mano que se encuentre completamente sana, así como también se especifican los ángulos máximos (Figura 2.8), a los cuales podrá llegar el mecanismo para ejecutar el proceso de rehabilitación en sus diferentes etapas.

Tabla 2.3: Ángulos máximos de flexión y ángulos determinados para las etapas de rehabilitación

Dedo	Movimiento	Ángulos máximos de flexión	Ángulos determinados para las etapas de rehabilitación		
			Inicial	Media	Total
Meñique, Anular, Medio e Índice	MTC	90°	20°	40°	60°
	IFP	100°	15°	25°	40°
	IFD	90°	25°	45°	65°
Pulgar	MTC	50°	10°	20°	30°
	ID	80°	20°	40°	60°

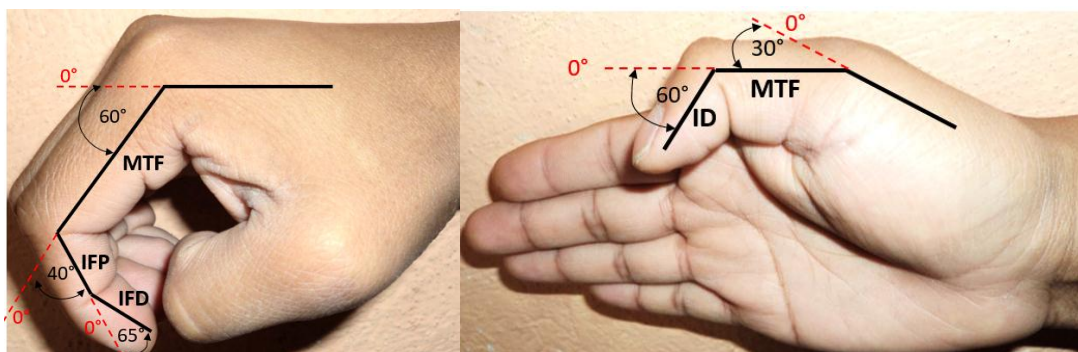


Figura 2.8: Ángulos máximos para el movimiento de flexión del dedo meñique, anular, medio, índice y pulgar para rehabilitación

Determinados los ángulos se procede al dimensionamiento de las piezas para cada dedo de la siguiente manera:

Para el meñique, anular y medio se realiza los respectivos cálculos obteniendo así los datos correspondientes como se muestra en la Figura 2.9 y Tabla 2.4.

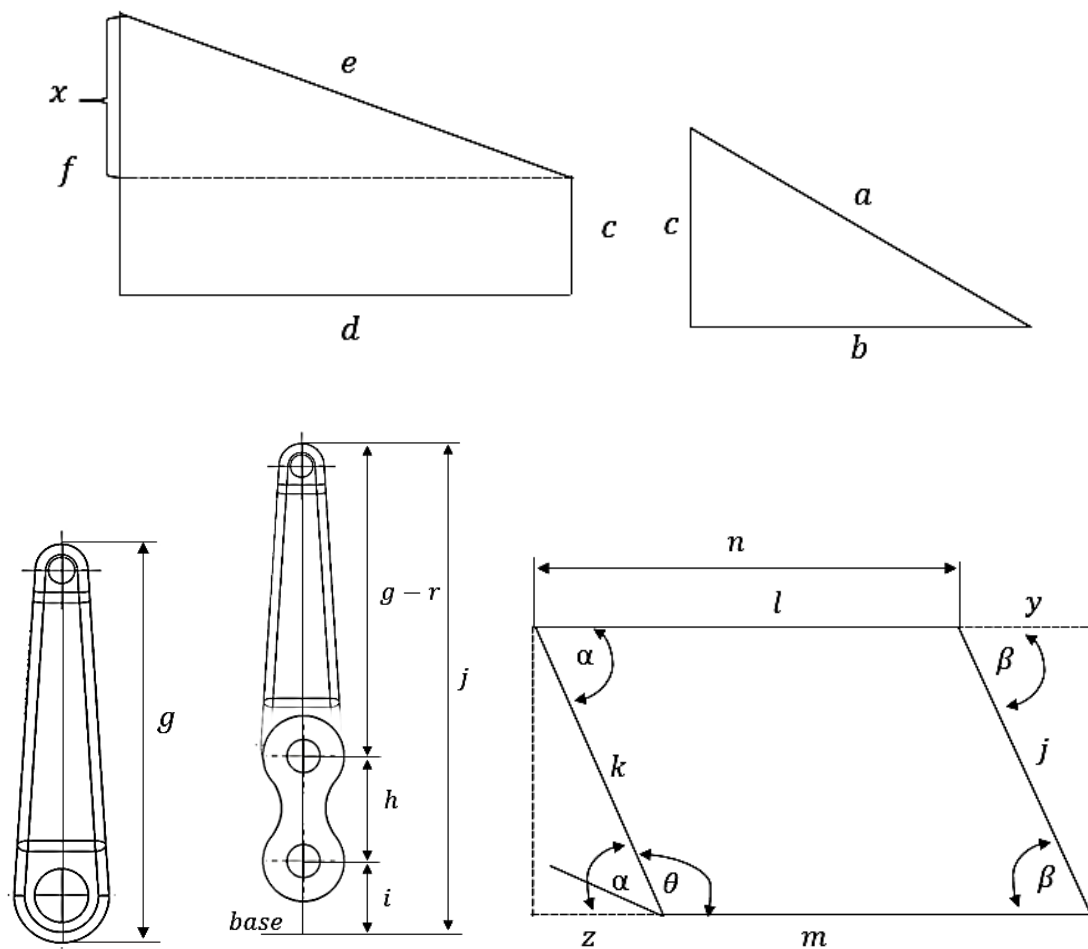


Figura 2.9: Geometría del mecanismo para el dedo meñique, anular y medio

Tabla 2.4: Medidas para el diseño de piezas del dedo meñique, anular y medio

<b>Medidas</b>	<b>Meñique</b>	<b>Anular</b>	<b>Medio</b>
<i>a</i>	29.21 mm	39.05 mm	40.46 mm
<i>b</i>	23.00 mm	30.00 mm	30.00 mm
<i>c</i>	18.00 mm	25.00 mm	27.00 mm
<i>d</i>	32.00 mm	36.00 mm	39.00 mm
<i>e</i>	35.78 mm	38.28 mm	41.44 mm
<i>f</i>	34.00 mm	38.00 mm	41.00 mm
<i>g</i>	34.00 mm	38.00 mm	41.00 mm
<i>h</i>	12.80 mm	12.80 mm	12.80 mm
<i>i</i>	3.50 mm	3.50 mm	3.50 mm
<i>j</i>	45.80 mm	49.80 mm	52.80 mm
<i>k</i>	56.30 mm	60.30 mm	63.30 mm
<i>l</i>	23.02 mm	23.02 mm	23.02 mm
<i>m</i>	41.31 mm	42.51 mm	43.41 mm
<b>Cpm</b>	10.00 mm	10.00 mm	10.00 mm
<i>r</i>	4.50 mm	4.50 mm	4.50 mm
<i>r</i> <sub>1</sub>	5.00 mm	5.00 mm	5.00 mm
<i>r</i> <sub>2</sub>	5.50 mm	5.50 mm	5.50 mm
<i>x</i>	16.00 mm	13.00 mm	14.00 mm
<i>Y</i>	6.07 mm	6.60 mm	7.00 mm
<i>Z</i>	24.36 mm	26.09 mm	27.39 mm
$\alpha$	64.36°	64.36°	64.36°
$\beta$	82.38°	82.38°	82.38°
$\theta$	115.64°	115.64°	115.64°

En la Figura 2.10 y Tabla 2.5 se describen los datos determinados para el dedo índice y de la misma manera se realiza los cálculos correspondientes para el dedo pulgar como se detallan en la Figura 2.11 y Tabla 2.6.

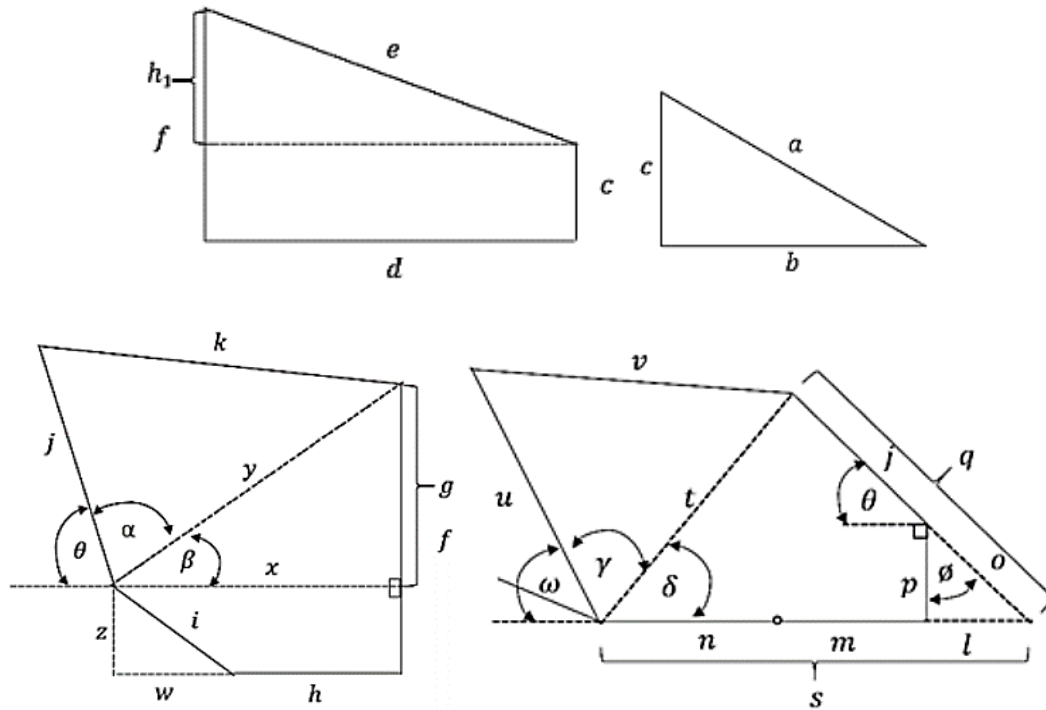


Figura 2.10: Geometría del mecanismo para el dedo índice

Tabla 2.5: Medidas para el diseño de piezas del dedo índice

Medidas dedo índice					
a	36.12 mm	<i>m</i>	11.94 mm	<i>r</i>	2.50 mm
b	27.00 mm	<i>n</i>	16.61 mm	$r_1$	5.00 mm
c	24.00 mm	<i>o</i>	23.56 mm	$r_2$	7.50 mm
d	37.00 mm	<i>p</i>	22.60 mm	<i>cpm</i>	5.00 mm
e	39.92 mm	<i>q</i>	57.56 mm		
f	39.00 mm	<i>s</i>	35.20 mm		
g	27.13 mm	<i>t</i>	58.38 mm	$\theta$	73.6°
h	14.00 mm	<i>u</i>	65.06 mm	$\alpha$	53.21°
$h_1$	15.00 mm	<i>v</i>	47.23 mm	$\beta$	53.19°
<i>i</i>	13.43 mm	<i>w</i>	6.29 mm	$\phi$	16.4°
<i>j</i>	36.50 mm	<i>x</i>	20.29 mm	$\omega$	64.36°
<i>k</i>	31.60 mm	<i>y</i>	33.88 mm	$\delta$	71.06°
<i>l</i>	6.65 mm	<i>z</i>	11.87 mm	$\gamma$	44.58°



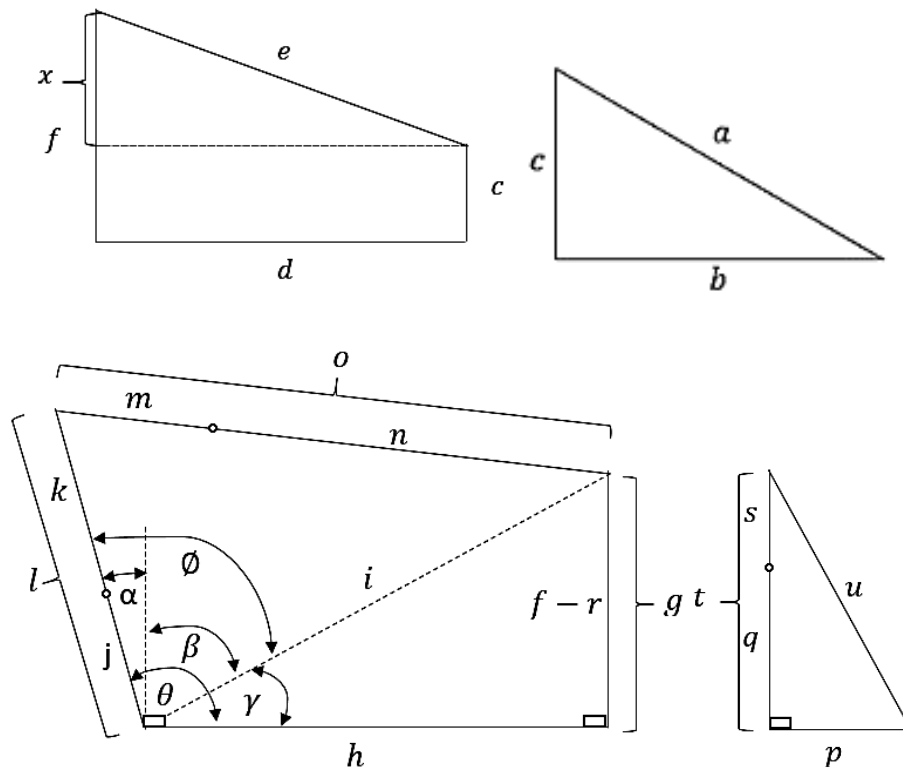


Figura 2.11: Geometría del mecanismo para el dedo pulgar

Tabla 2.6: Medidas para el diseño de piezas del dedo pulgar

Medidas dedo pulgar					
<b>a</b>	33.42 mm	<b>k</b>	30.00 mm	<b>u</b>	69.49 mm
<b>b</b>	26.00 mm	<b>l</b>	49.92 mm	<b>x</b>	17.00 mm
<b>c</b>	21.00 mm	<b>m</b>	24.42 mm	<b>rosca</b>	13.00 mm
<b>d</b>	36.00 mm	<b>n</b>	46.10 mm	<b>AHP</b>	59.10 mm
<b>e</b>	39.81 mm	<b>o</b>	70.50 mm		
<b>f</b>	38.00 mm	<b>p</b>	25.21 mm	<b>α</b>	5°
<b>g</b>	33 mm	<b>q</b>	51.64 mm	<b>β</b>	62.77°
<b>h</b>	64.14 mm	<b>r</b>	2.50 mm	<b>γ</b>	27.23°
<b>i</b>	72.13 mm	<b>s</b>	13.12 mm	<b>θ</b>	95°
<b>j</b>	19.92 mm	<b>t</b>	64.76 mm	<b>∅</b>	67.67°

Se desarrolló el sistema mecánico en un software CAD SolidWorks, en el Anexo E se presenta los planos correspondientes a cada pieza, donde fueron modeladas 57 piezas mecánicas, integradas en 6 ensamblajes principales como se describe a continuación y el ensamblaje total como se muestra en la Figura 2.12.

- Base-antebrazo.
- Dedo pulgar
- Dedo índice
- Dedo medial
- Dedo anular
- Dedo meñique

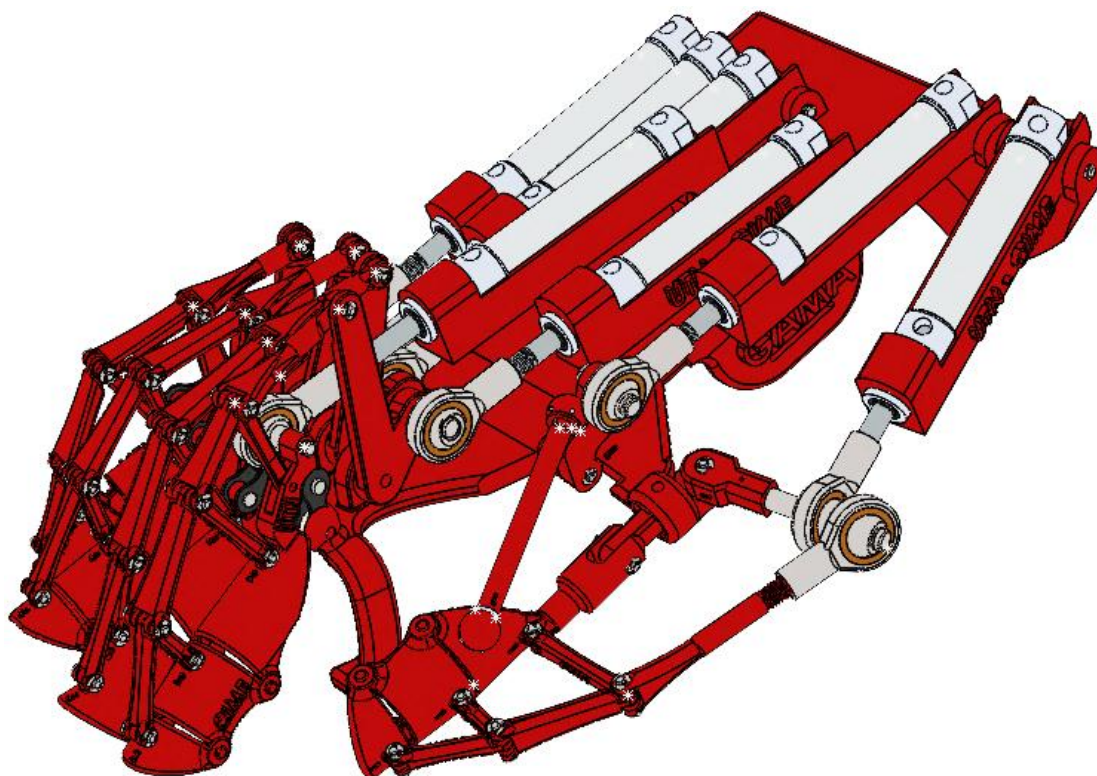


Figura 2.12: Ensamblaje en SolidWorks del mecanismo

## 2.5 CÁLCULOS Y ANÁLISIS ESTÁTICO DEL MECANISMO.

Para el desarrollo de los cálculos, se hace necesario conocer la oposición que presentarían los dedos de la mano hacia el mecanismo, para lo cual se realiza pruebas de laboratorio como se indica en la Figura 2.13.

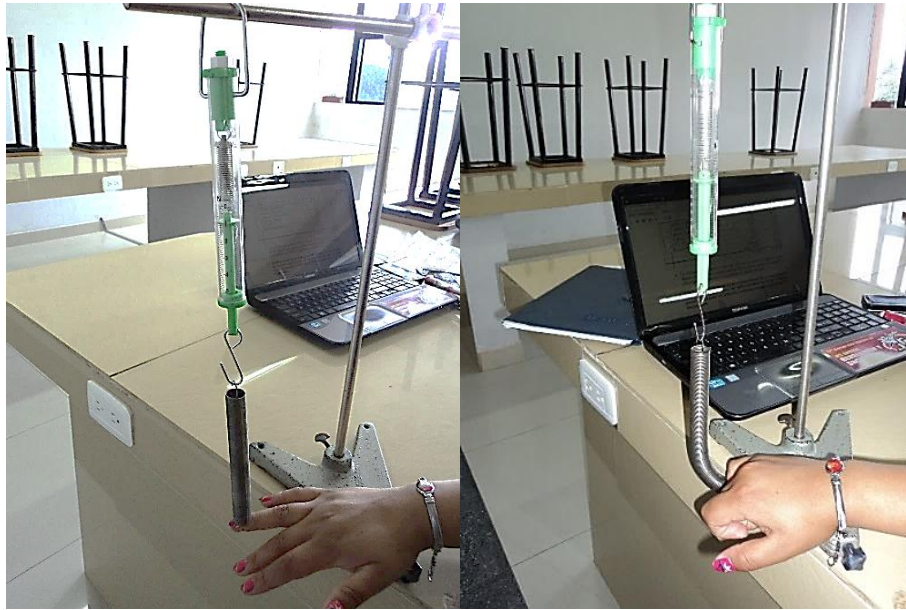


Figura 2.13: Determinación de la fuerza de oposición que presentan los dedos de la mano.

Se emplea un dinamómetro y un resorte para efectuar las pruebas correspondientes a cada dedo, llegando a obtener la fuerza ejercida y masa total del estiramiento máximo del resorte, datos que se indican en la Tabla 2.7; determinando así que la mayor fuerza de oposición al movimiento se presenta en los dedos anular, medio e índice, se toma como referencia al dedo medio para los respectivos cálculos y análisis de elementos finitos.

Tabla 2.7: Datos obtenidos de pruebas de laboratorio

Dedo	Meñique	Anular	Medio	Índice	Pulgar
<b>Datos</b>					
<b>Longitud del resorte</b>	130 mm	130 mm	130 mm	130 mm	130 mm
<b>Masa del resorte</b>	40g	40g	40g	40g	40g
<b>Estiramiento máximo del resorte</b>	16.5 mm	230 mm	230 mm	230 mm	17.5mm
<b>Fuerza ejercida</b>	1.7 N	3 N	3 N	3 N	2 N
<b>Masa total</b>	200 g	310 g	310 g	310 g	210 g
<b>Fuerza del eje de empuje</b>	64.67 N	64.67 N	64.67 N	64.67 N	64.67 N

Se elabora el análisis estático de la barra en V o estabón ternario como se observa en la Figura 2.14 y de todos los eslabones que forman parte del mecanismo del dedo medio como indica la Figura 2.15, para determinar las reacciones respectivas, empleando sumatoria de fuerzas, obteniendo así los datos que se indican en la Tabla 2.8.

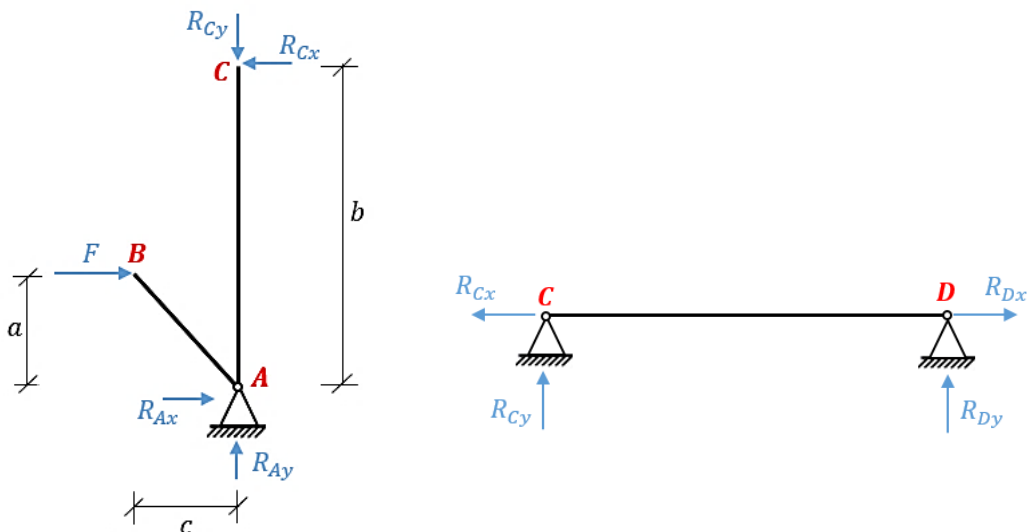


Figura 2.14: Análisis estático de la barra en V o eslabón ternario del dedo medio

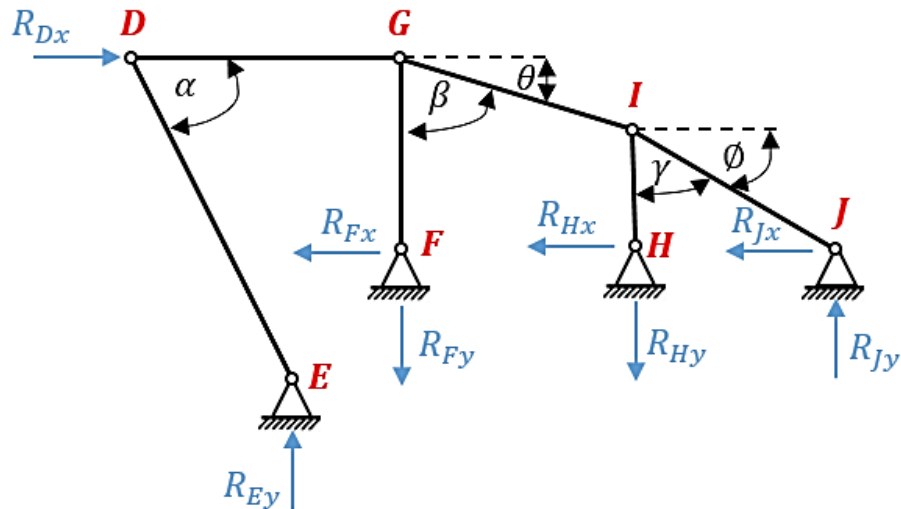


Figura 2.15: Análisis estático del mecanismo del dedo medio

Tabla 2.8: Datos proporcionados del dedo medio para obtención de reacciones mediante sumatoria de fuerzas.

<b>a = 25.18 mm</b>	<b><math>\alpha = 68.25^\circ</math></b>
<b>b = 63.10 mm</b>	<b><math>\beta = 70.25^\circ</math></b>
<b>c = 21.21 mm</b>	<b><math>\gamma = 48^\circ</math></b>
<b>F = 64.67 N</b>	<b><math>\theta = 19.75^\circ</math></b>
<b><math>R_{Cx} = 25.91 \text{ N} \leftarrow</math></b>	<b><math>\phi = 42^\circ</math></b>
<b><math>R_{Ax} = 38.76 \text{ N}</math></b>	<b><math>R_{Fx} = 25.91 \text{ N}</math></b>
<b><math>R_{Dx} = 25.91 \text{ N}</math></b>	<b><math>R_{Hx} = 25.91 \text{ N}</math></b>
<b><math>R_{Jx} = 25.91 \text{ N}</math></b>	<b><math>R_{Gx} = 27.53 \text{ N}</math></b>

Además, se realiza el análisis de nodos como se indica en la Figura 2.16 para determinar la fuerza ejercida en cada uno de los eslabones; los datos obtenidos se indican en la Tabla 2.9.

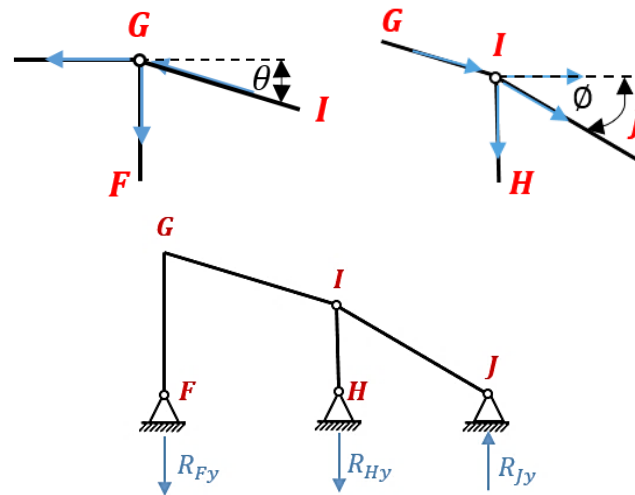


Figura 2.16: Análisis de nodos para determinar las fuerzas en las barras o eslabones del dedo medio

Tabla 2.9. Fuerzas ejercidas en las barras del mecanismo del dedo medio.

$F_{GI} = 27.53 \text{ N}$	$F_{IJ} = 34.86 \text{ N}$	$R_{Jy} = R_{Hy} + R_{Fy}$
$F_{GF} = 8.76 \text{ N} = R_{Fy}$	$F_{HI} = 17.34 \text{ N} = R_{Hy}$	$R_{Jy} = 26.09 \text{ N}$

De esta manera se puede determinar que la fuerza ejercida en la última barra es la necesaria para que el mecanismo efectúe los movimientos requeridos.

## 2.6 ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS.

Mediante el análisis de elementos finitos se puede determinar el esfuerzo que tiene el mecanismo en el dedo medio, así como también el factor de seguridad, fatiga y deformaciones, estableciendo de esta manera donde se genera el mayor esfuerzo al aplicar una fuerza al mecanismo para generar su movimiento.

Se realiza un mallado adecuado para el análisis de elementos finitos, empleando en este caso un mallado fino debido a que proporciona datos cercanos a los reales y también brinda un mayor factor de seguridad, además se realiza un análisis de tensiones de Von Mises, estableciendo inicialmente las propiedades del plástico PLA que será empleado para la fabricación de las piezas como se detalla en la Tabla 2.10; la selección del mismo se lo efectúa mediante comparación de varios materiales como se describe en el Anexo C.

Tabla 2.10: Propiedades del plástico PLA.

<b>Nombre:</b>	<b>PLA</b>
<b>Tipo de modelo:</b>	Isotrópico elástico lineal
<b>Criterio de error predeterminado:</b>	Tensión de von Mises máx.
<b>Límite elástico:</b>	$1.03649e + 008 \text{ N/m}^2$
<b>Límite de tracción:</b>	$3e + 007 \text{ N/m}^2$
<b>Módulo elástico:</b>	0.394
<b>Coefficiente de Poisson:</b>	0.394
<b>Densidad:</b>	$1020 \text{ kg/m}^3$
<b>Módulo cortante:</b>	$3.189e + 008 \text{ N/m}^2$

Se asignan las respectivas cargas obtenidas de la oposición que generan los dedos de la mano al movimiento y de la fuerza ejercida por el cilindro como se muestra en la Tabla 2.11, para determinar dónde se genera el máximo y mínimo esfuerzo de la barra en V o eslabón ternario como se observa en la Figura 2.17.

Tabla 2.11: Asignación de cargas a la barra en V o eslabón ternario

Nombre de carga	Cargar imagen	Detalles de carga
<b>Fuerza-1</b>		Entidades: 1 cara(s) Tipo: Aplicar fuerza normal Valor: 64.67 N
<b>Fuerza-2</b>		Entidades: 2 cara(s) Tipo: Aplicar fuerza normal Valor: 3 N

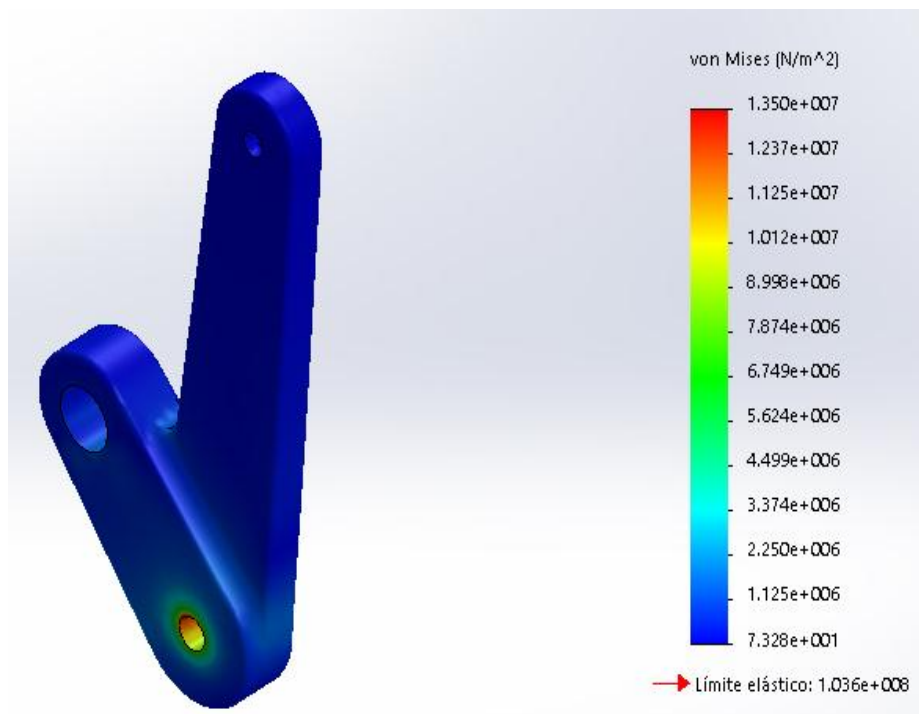


Figura 2.17: Esfuerzos máximo y mínimo ejercidos en la barra en V o eslabón ternario



También se realiza el análisis de deformaciones unitarias (Figura 2.18), análisis de desplazamientos (Figura 2.19) y análisis de factor de seguridad (Figura 2.20).

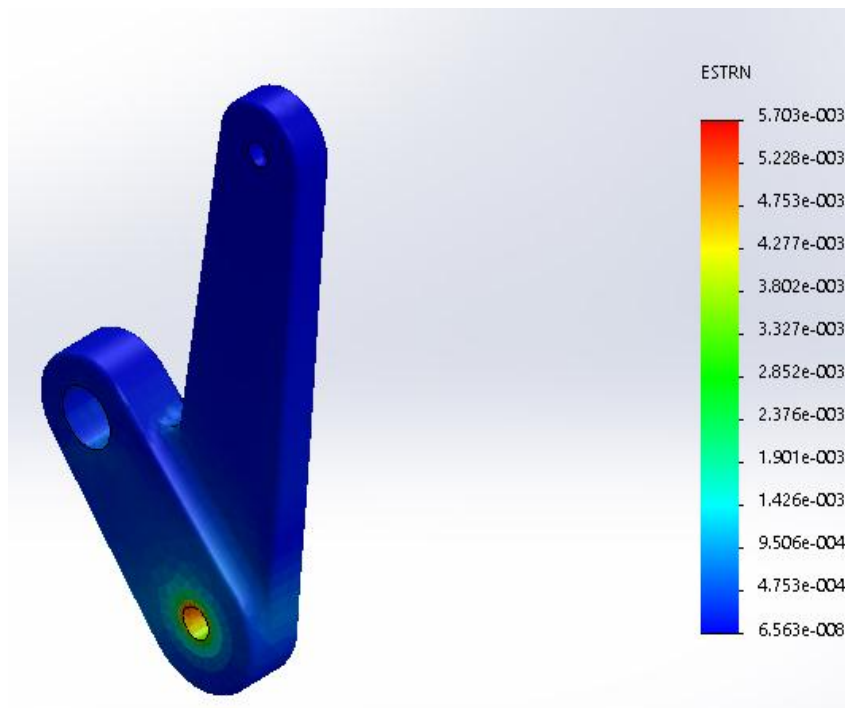


Figura 2.18: Análisis de deformaciones unitarias de la barra en V o eslabón ternario

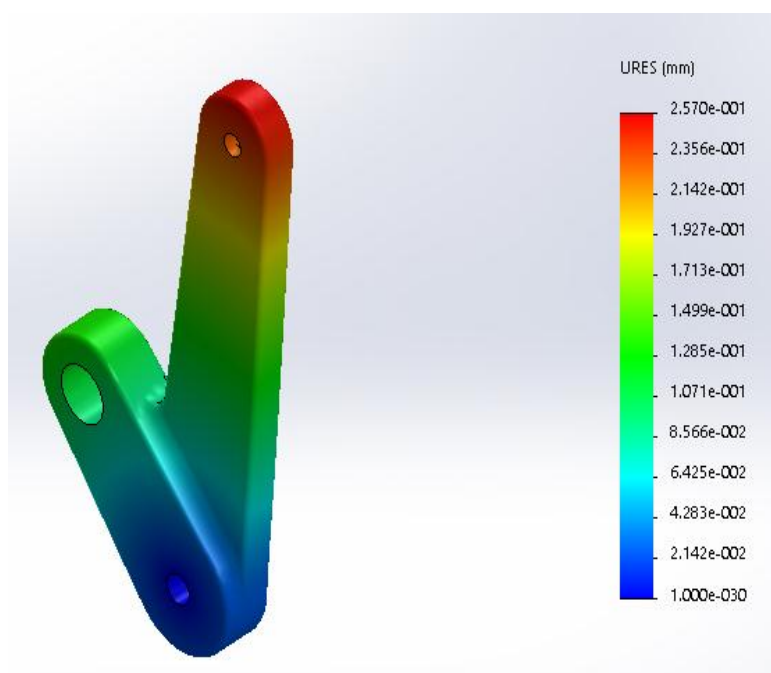


Figura 2.19: Análisis de desplazamiento de la barra en V o eslabón ternario

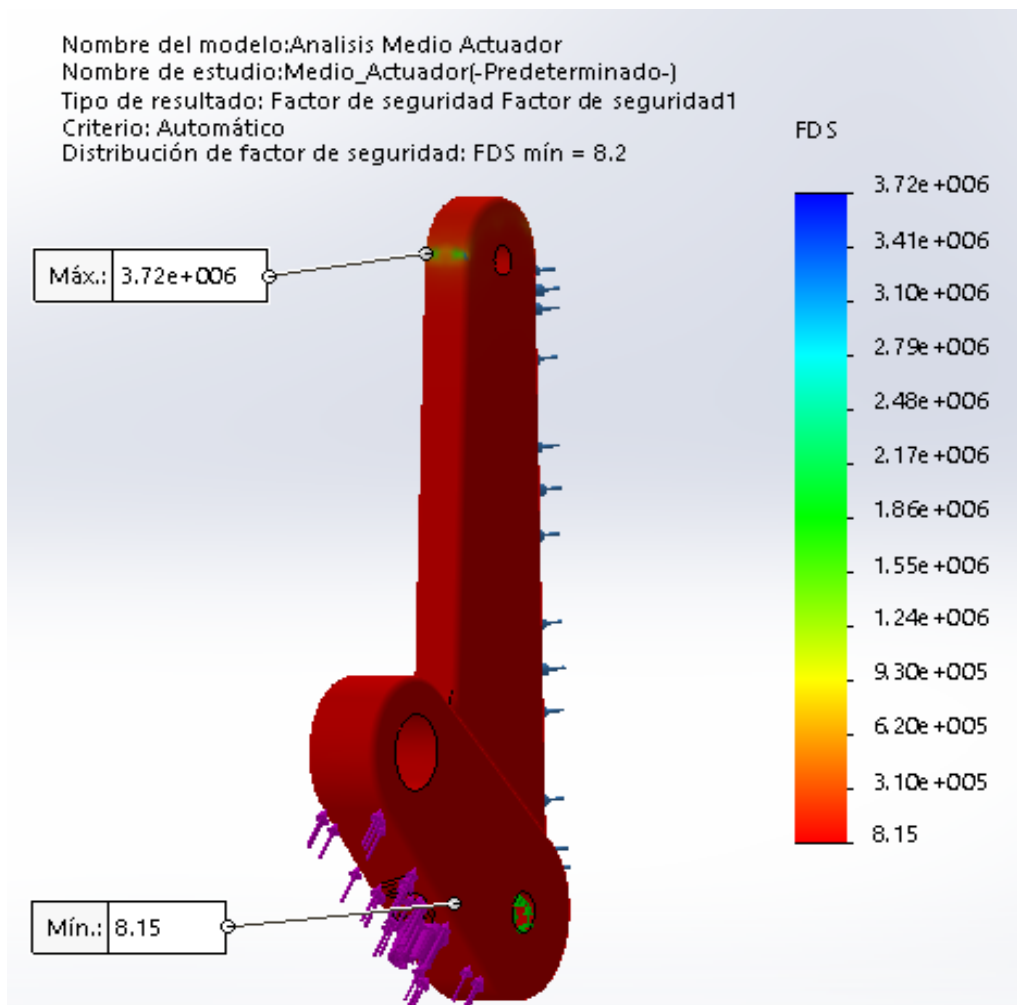
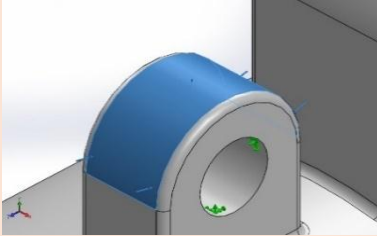
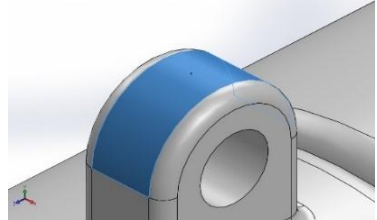
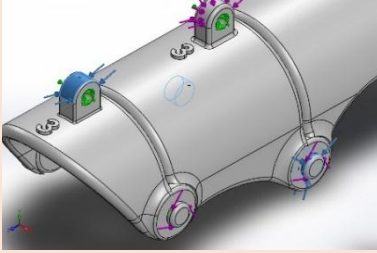
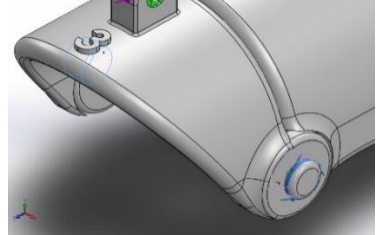
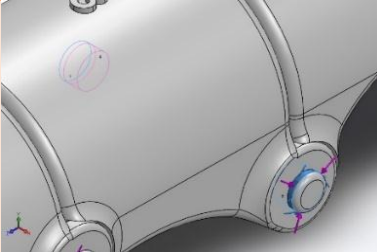


Figura 2.20: Factor de seguridad en la barra en V o eslabón ternario

En la siguiente Tabla 2.12 se detalla las diferentes cargas asignadas al mecanismo (proximal, medio y distal), obtenidas de los cálculos realizados en el análisis estático, determinando el máximo y mínimo esfuerzo como se observa en la Figura 2.21.

Tabla 2.12: Cargas asignadas al mecanismo en el ensamblaje de piezas:  
proximal, medio y distal

Nombre de carga	Nombre de carga	Detalles de carga
<b>Fuerza-1</b>		Entidades: 1 cara(s) Tipo: Aplicar fuerza normal Valor: 8.76 N
<b>Fuerza-2</b>		Entidades: 1 cara(s) Tipo: Aplicar fuerza normal Valor: 17.34 N
<b>Fuerza-3</b>		Entidades: 3 cara(s) Tipo: Aplicar fuerza normal Valor: 34.86 N
<b>Torsión-1</b>		Entidades: 2 cara(s) Referencia: Cara< 1 > Tipo: Aplicar momento torsor Valor: 0.77 N.m
<b>Torsión-2</b>		Entidades: 2 cara(s) Referencia: Cara< 1 > Tipo: Aplicar momento torsor Valor: 0.77 N.m

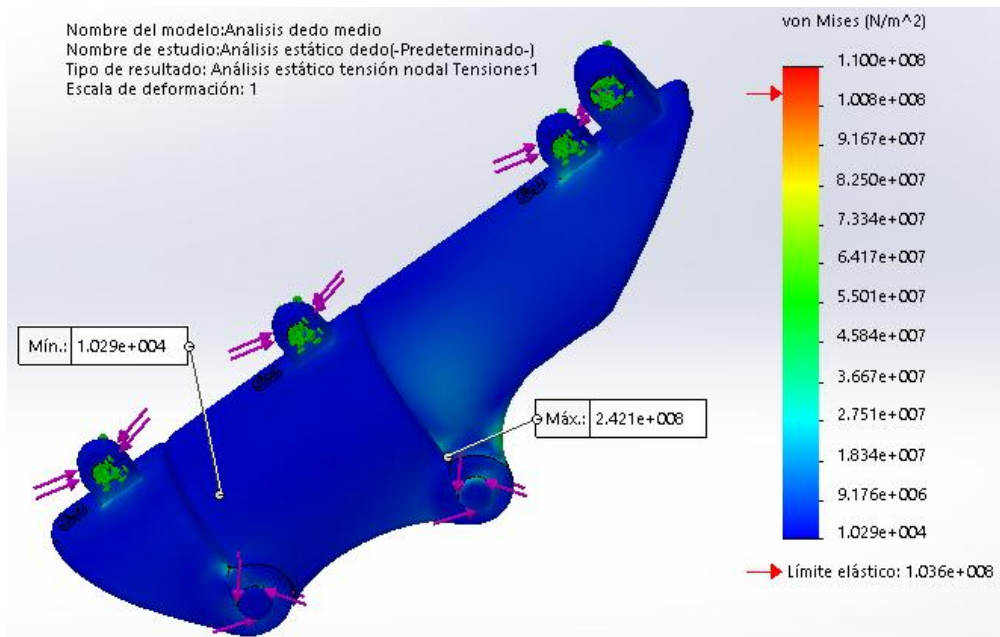


Figura 2.21: Esfuerzos máximo y mínimo ejercidos en el ensamblaje de piezas: proximal, medio y distal

Además, se efectúa el análisis de deformaciones unitarias (Figura 2.22) y análisis de desplazamientos (Figura 2.23), determinando de esta manera que las piezas diseñadas en el mecanismo, aplicando las fuerzas correspondientes, son resistentes y brindan un factor de seguridad lo suficientemente aceptable como se indica en la Tabla 2.13.

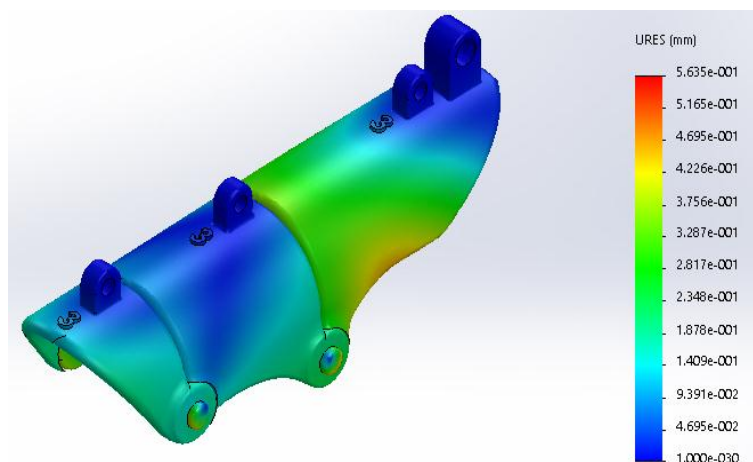


Figura 2.22: Análisis de desplazamiento en el ensamblaje de piezas: proximal, medio y distal

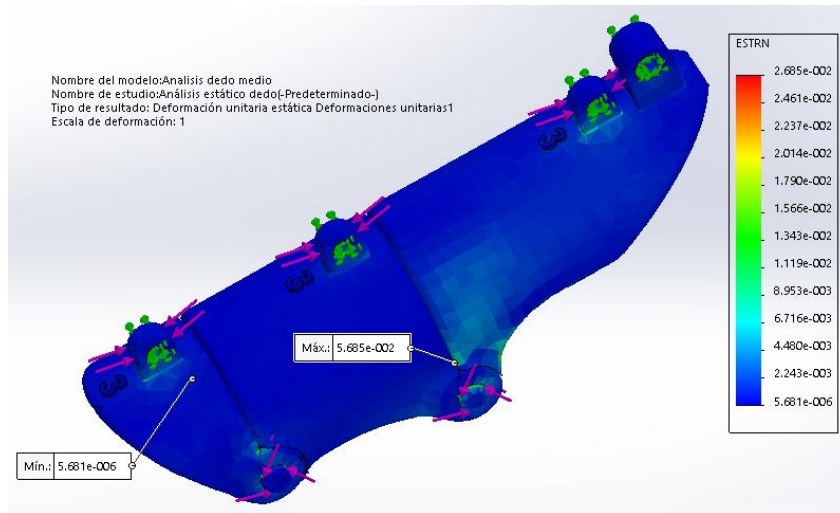


Figura 2.23: Análisis de deformaciones unitarias en el ensamblaje de piezas:  
 proximal, medio y distal

Tabla 2.13: Factor de seguridad generado en el ensamblaje de piezas:  
 proximal, medio y distal

Nombre	Mín.	Máx.
Factor de seguridad	1.6237e-005	0.0925186

## 2.7 IMPRESIÓN Y ENSAMBLAJE DE LOS COMPONENTES.

Se realiza la impresión 3D de cada pieza diseñada en SolidWorks como se muestra en la Figura 2.24 y 2.25; en el Anexo F se puede observar las diferentes impresiones previas a la obtención del prototipo final del mecanismo.

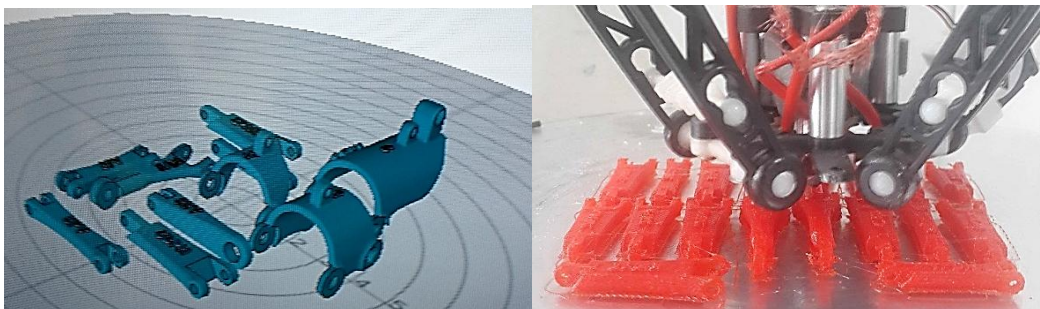


Figura 2.24: Impresión 3D de las piezas del mecanismo



Figura 2.25: Piezas del mecanismo

Para dar el acabado de las piezas se coloca un recubrimiento de XTC\_3D resina líquida Epoxi y se procede al ensamblaje de las mismas como se ilustra en la Figura 2.26, los elementos son sujetos entre sí por pasadores y anillos de retención, dando forma a los dedos en su correcta posición, debido a que son piezas con medidas determinadas, constan de la respectiva codificación para su identificación.

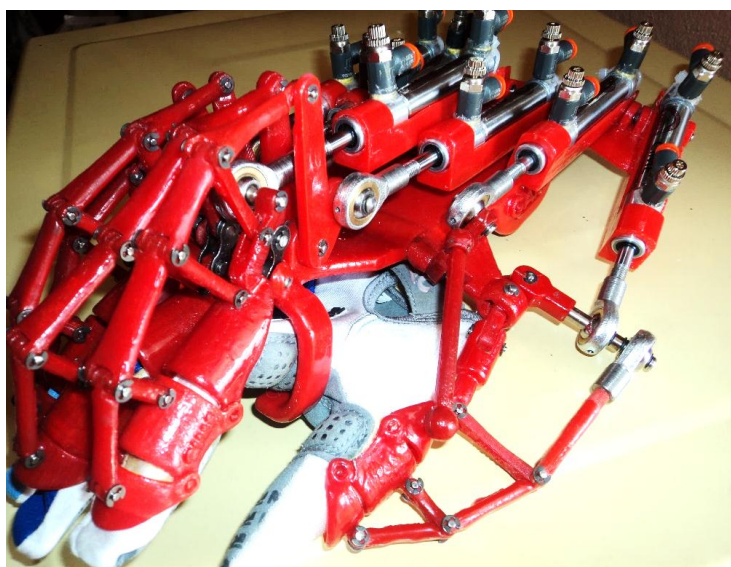


Figura 2.26: Ensamblaje del mecanismo

Posteriormente el mecanismo es sobrepuesto sobre un guante, el que permite generar el movimiento de los dedos de la mano; así como también se efectúa el montaje de los cilindros neumáticos de doble efecto sobre el mecanismo con las rótulas.

Finalmente se realiza el acople del dispositivo mecánico con el correspondiente sistema neumático y de control como se ilustra en la Figura 2.27.

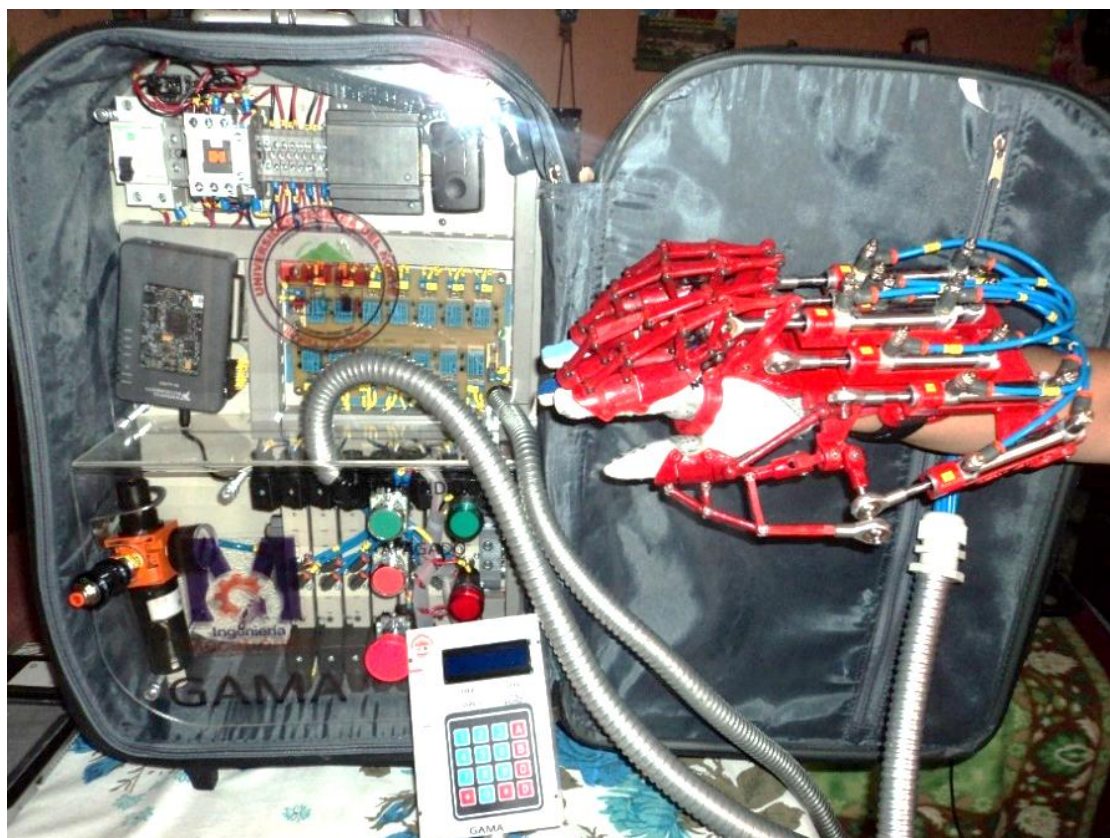


Figura 4.27: Implementación del mecanismo rehabilitador con el sistema neumático y de control

## **CAPITULO III. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL CILINDRO NEUMÁTICO.**

Para la ejecución del movimiento de la estructura del mecanismo se implementa un circuito neumático, para lo cual se realiza el diseño y construcción de cilindros neumáticos de doble efecto, tomando en consideración varios aspectos de suma importancia como es la selección de material para el mecanizado de culatas, camisa y vástago en el torno CNC, así como de elementos constitutivos que forman parte del mismo. En este capítulo se detalla conceptos relacionados a los cilindros, cálculos, mecanizado, construcción, ensamblaje y pruebas.

### **3.1 SISTEMA NEUMÁTICO.**

Se implementa un sistema neumático que consta de cilindros de doble efecto, electroválvulas 5/3 vías, unidad de mantenimiento, compresor, etc., para efectuar el movimiento del mecanismo, este sistema cumple con las siguientes ventajas:

- Abundante: El aire es ilimitado y se encuentra disponible gratuitamente en cualquier lugar.
- Almacenaje: El aire es almacenado y comprimido en acumuladores o tanques, puede ser transportado y utilizado donde y cuando se precise.



- Antideflagrante: El aire está a prueba de explosiones. No hay riesgo de chispas y puede ocuparse en lugares húmedos sin riesgo de electricidad estática.
- Temperatura: El aire es fiable, incluso a temperaturas extremas.
- Limpieza: Cuando se produce escapes de aire no son perjudiciales y pueden colocarse en las líneas, en depuradores o extractores para mantener el aire limpio.
- Elementos: El diseño y constitución de los elementos es fácil y de simple conexión.
- Regulación: Las velocidades y las fuerzas pueden regularse de manera continua y escalonada (Plancarte, Olayo, & Pita, 2013).

### 3.2 CILINDRO NEUMÁTICOS DE DOBLE EFECTO.

Los cilindros neumáticos son componentes que emplean aire comprimido para generar un movimiento rectilíneo de avance y retroceso de un mecanismo, la Figura 3.1 nos indica un cilindro neumático de doble efecto (Serrano, 2009).



Figura 3.1: Cilindro neumático de doble efecto

Al decir doble efecto significa que tanto el movimiento de salida como el de entrada son debidos al aire comprimido que ejerce su acción en las dos cámaras del cilindro, de esta forma puede realizar trabajo en los dos sentidos del movimiento, se construye siempre en forma de cilindro de émbolo y posee dos tomas para el aire comprimido situadas a ambos lados del émbolo(Guillén, 1993).

### **3.3 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO.**

- Cuando se dispone de la vía posterior con entrada de aire comprimido y la vía anterior como escape o fuga, el vástago realiza la carrera de avance.
- Cuando se dispone de la vía anterior de entrada de aire comprimido y la vía posterior como escape o fuga, el vástago realiza la carrera de retroceso.
- La culata anterior y el casquillo guía, se utilizan para evitar el movimiento llamado de pandeo, es decir, la oscilación transversal que puede sufrir el vástago en su desplazamiento.
- Las juntas tienen dos misiones, una la de evitar la fuga de aire, y otra, la de evitar la entrada de suciedad. (Buenache, 2010).

Para una presión determinada en el circuito, el movimiento de retroceso desarrolla menos fuerza que el movimiento de avance, ya que la superficie del émbolo se ve ahora reducida por la sección transversal del vástago (Guillén, 1993).

En la Figura 3.2 podemos observar la estructura del cilindro y los elementos de los cuales está conformado.

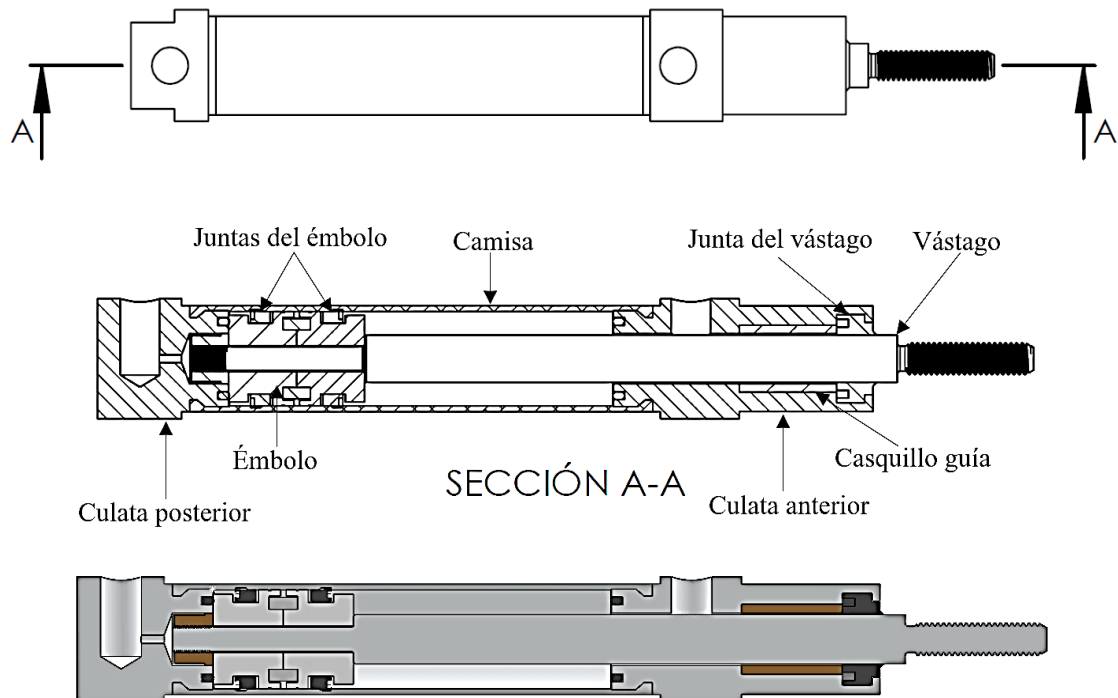


Figura 3.2: Estructura y elementos principales de un cilindro neumático de doble efecto

### 3.4 MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN.

Para la construcción del cilindro neumático, se realiza el proceso de ingeniería inversa, obteniendo un diseño a partir de un cilindro disponible en el mercado, en el Anexo G se muestran cilindro de varias marcas; permitiendo de tal modo ajustarse a las tolerancias predeterminadas para la construcción de cilindros.

En la siguiente Figura 3.3 se puede observar el proceso de ingeniería inversa de un cilindro neumático de doble efecto, donde se aprecia sus componentes y materiales de los cuales está fabricado.

Se establece elementos estandarizados como es el caso de juntas, émbolo y casquillo guía, indicados a continuación; así como también se determina las partes a mecanizar, siendo estas: culata anterior, culata posterior, camisa y vástago.



Figura 3.3: Proceso de ingeniería inversa de un cilindro neumático

- Juntas para cilindros. Uno de los componentes esenciales en la construcción de los cilindros neumáticos son las juntas, Figura 3.4, cuya función es impedir las fugas de aire comprimido entre las piezas mecánicas que configuran el cilindro para que permanezca muy bien sellado, así como también el aro rascado impide el ingreso de impurezas o partículas de polvo cuando el vástago ingrese a la cámara, están fabricadas de caucho NBR (Guillén, 1993).



Figura 3.4: Justas del vástago y del émbolo

- Émbolo. Tiene como finalidad contraer y extraer el aire en ambas direcciones gracias a sus juntas que se encuentran en contacto con la camisa, impidiendo la fuga de aire entre las cámaras, es de material plástico, consta de un imán que sirve para determinar posiciones mediante sensores y rosca de bronce que compacta el émbolo con el imán al eje mecanizado del vástago (Figura 3.5).



Figura 3.5: Émbolo, imán y rosca

- Casquillo guía. Elemento que sirve como guía al vástago para evitar el pandeo (Figura 3.6), siendo éste de plástico metálico.



Figura 3.6: Casquillo guía

### 3.6 DIMENSIONAMIENTO Y MATERIALES PARA EL MECANIZADO.

Determinados los elementos estandarizados que forman parte del cilindro neumático de doble efecto, se procede con el respectivo dimensionamiento y selección de material para el mecanizado del vástago, camisa y culatas, como se describe a continuación:

#### 3.6.1 VÁSTAGO.

Para la manufactura del vástago se emplea una barra de acero inoxidable 303, efectivo para evitar la corrosión y pandeo. La dimensión de la longitud del vástago se lo realiza con la especificación de la carrera máxima que generara el cilindro, medida que ha sido obtenida mediante la geometría que se detallará a continuación en las Figuras 3.7 y 3.8, consiguiendo así los respectivos datos que se indican en la Tabla 3.1, seleccionando de esta manera, la carrera de 30 mm necesaria para generar el movimiento de cada falange del mecanismo, por lo tanto, mediante la descripción de ingeniería inversa se obtiene la longitud total del vástago de 106,10 mm; y la determinación del diámetro se lo efectúa por las juntas y casquillo guía disponibles, siendo este de 6mm.

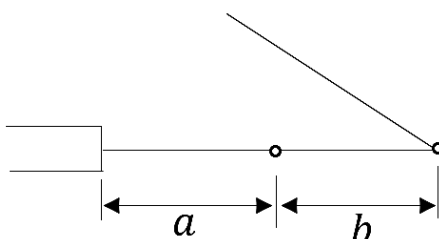


Figura 3.7: Posicionamiento inicial del cilindro respecto a la barra en V o eslabón ternario.

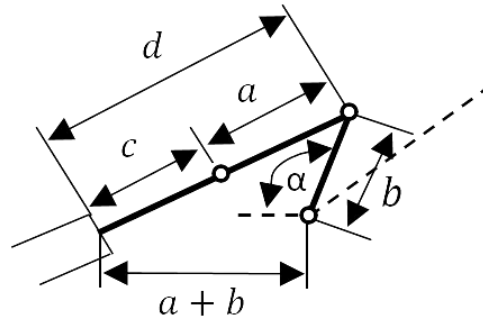


Figura 3.8: Geometría empleada para la obtención de la carrera máxima del vástago.

Tabla 3.1: Medidas para la obtención de la carrera del cilindro

Descripción	Medida
Ángulo de desplazamiento desde $0^\circ$ hasta la posición máxima de la pieza en $V = \alpha$	$110^\circ$
Longitud de roscado y rotula = $a$	$53 \text{ mm}$
Longitud de la pieza en $V = b$	$20 \text{ mm}$
Carrera del cilindro = $c$	$29.02 \text{ mm}$
Longitud de carrera, roscado y rotula = $d$	$73 \text{ mm}$

### 3.6.2 CAMISA.

La camisa es mecanizada en tubo sin costura de aleación de aluminio. Su longitud también se rige al proceso de ingeniería inversa, debido a datos estándares proporcionados para la manufactura de cilindros, por tanto, se obtiene 59 mm de longitud total de la camisa; además su diámetro es determinado por el émbolo de 12 mm disponible para vástagos de 6mm de diámetro.

### 3.6.3 CULATAS ANTERIOR Y POSTERIOR.

Para la fabricación de las culatas anterior y posterior, se emplea aluminio 6061 que cumple con propiedades para el mecanizado. Sus medidas principales se rigen al dimensionamiento obtenido del vástago y la camisa, como también se elige longitudes y diámetros que se acoplen al mecanismo.

### 3.7 DISEÑO EN CAD.

Se utiliza la herramienta SolidWorks para el diseño de cada elemento que forma parte del cilindro neumático de doble efecto, siendo estos personalizados para el mecanismo del rehabilitador de dedos de la mano, en la Tabla 3.2 se puede observar el diseño de todos los componentes.

Tabla 3.2: Diseño en SolidWorks de los elementos del cilindro neumático de doble efecto con sus respectivos materiales

Detalle	Material	Diseño 3D
<b>Camisa</b>	Aleación de Aluminio	
<b>Culata Anterior</b>	Aluminio 6061 T6	



<b>Culata Posterior</b>	Aluminio 6061 T6	
<b>Vástago</b>	Acero Inoxidable 303	
<b>Casquillo Guía</b>	Plástico Metálico	
<b>Empaques de las Culatas</b>	Caucho NBR	
<b>Empaque del Émbolo</b>	Caucho NBR	
<b>Juntas del Émbolo</b>	Caucho NBR	
<b>Aro Rascador</b>	Caucho NBR	
<b>Tuerca</b>	Bronce	
<b>Émbolo</b>	Plástico PA6	
<b>Imán</b>	Hierro Ferrita	

En las Figuras 3.9 y 3.10. se aprecia el respectivo ensamble y despiece del cilindro; en el Anexo H se presenta los planos correspondientes, donde se indica su dimensionamiento con las tolerancias proporcionadas para el mecanizado.

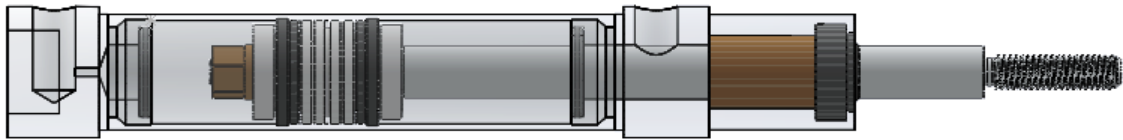


Figura 3.9: Ensamblaje del cilindro neumático de doble efecto

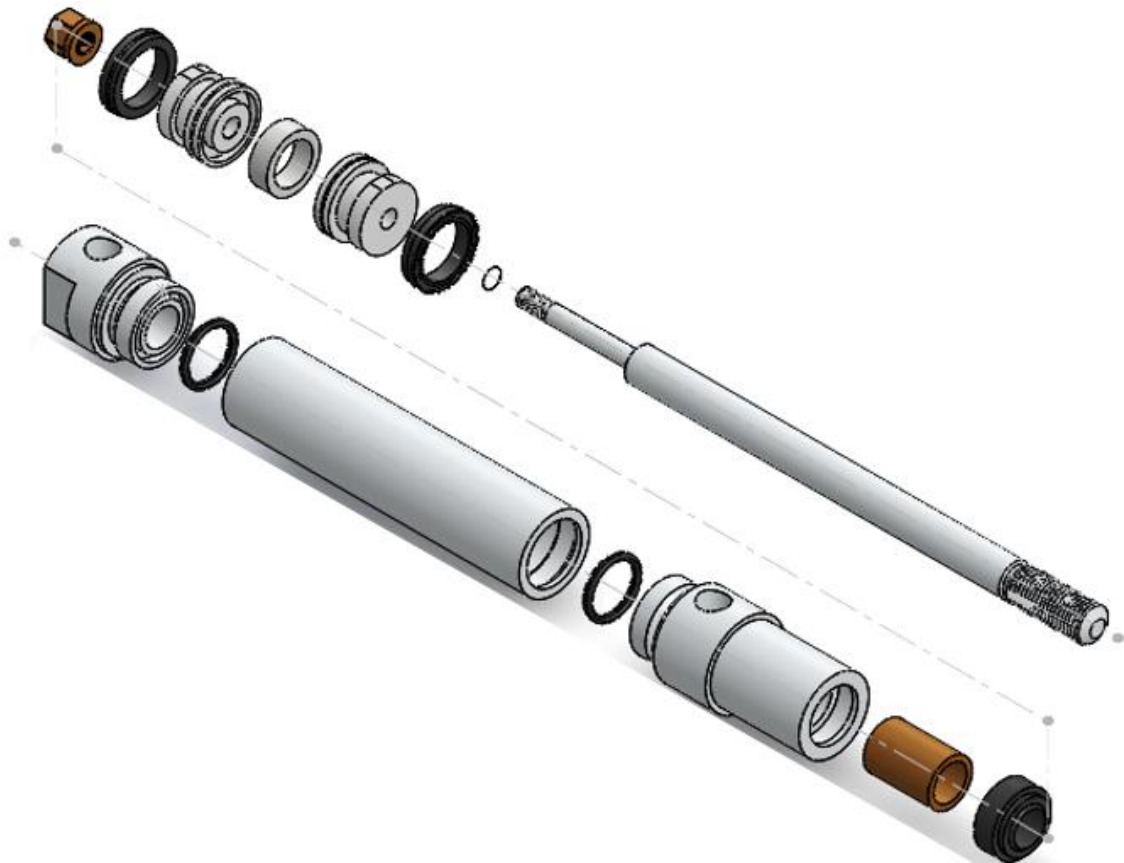


Figura 3.10: Despiece del cilindro neumático de doble efecto

### 3.8 CÁLCULOS.

A continuación, se desarrolla los correspondientes cálculos referentes a cilindros neumáticos de doble efecto.

#### 3.8.1 FUERZA.

La fuerza desarrollada por el cilindro de doble efecto al avanzar el vástago depende de la presión de aire, de la sección del émbolo y del rendimiento o pérdidas por rozamiento en las juntas, en el retroceso será preciso considerar también el diámetro del vástago. Se calcula para una presión de aire de 6 bares, que es la que generalmente garantiza la red de distribución (Serrano, 2009).

En cuanto al rendimiento de los cilindros, hay que considerar:

Para cilindros de hasta  $D = 40 [mm]$   $R = 0.85$

Para cilindros superiores a  $D = 40 [mm]$   $R = 0.95$

La fuerza efectiva de avance y retroceso se calculan con las siguientes ecuaciones 3.1 y 3.2:

Ecuación 3.1: Fuerza efectiva de avance

$$Fa = \frac{\pi}{4} D^2 \cdot p \cdot R$$

Fuente: (Serrano, 2009)

## Ecuación 3.2: Fuerza efectiva de retroceso

$$Fr = \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2) \cdot p \cdot R$$

Fuente: (Serrano, 2009)

Donde:

 $F_a$  = Fuerza de avance del cilindro en [N] (o en [Kg \* mm/min<sup>2</sup>]) $F_r$  = Fuerza de retroceso del cilindro en [N] (o en [Kg \* mm/min<sup>2</sup>]) $D$  = Diámetro del cilindro en [mm] $d$  = Diámetro del vástago en [mm] $p$  = Presión del aire en [bar] (o en [Kp/mm<sup>2</sup>]) $R$  = Rendimiento del cilindro

Tomando en consideración los datos correspondientes de los planos previos del cilindro, se tiene:

$$D = 12 \text{ [mm]}$$

$$d = 6 \text{ [mm]}$$

$$p = 6 \text{ [bar]}$$

$$F_a = 64.47 \text{ [N]}$$

$$F_r = 48.35 \text{ [N]}$$

**3.8.2 VELOCIDAD DEL ÉMBOLO.**

La velocidad media del émbolo en los cilindros estándar está comprendida entre 0.11 y 1.5 [m/s]. Esta velocidad puede verse afectada por válvulas estranguladoras o por válvulas de escape rápido (Ebel, Idler, Prede, & Scholz, 2010)

### 3.8.3 CONSUMO DE AIRE.

El consumo de aire del cilindro es una función de relación de compresión, del área del cilindro y la carrera (Solé, 2011).

La relación de compresión referida al nivel del mar con presión de trabajo 6 bares o 600 Kpa, está dada por la ecuación 3.3:

Ecuación 3.3: Relación de compresión

$$RC = \frac{101.3 + \text{presión de trabajo}}{101.3}$$

Fuente: (Manjarrés, 2009)

$$RC = 6$$

Para cilindros de doble efecto en condiciones normales de presión y temperatura, el caudal se calcula con la ecuación 3.4:

Ecuación 3.4: Caudal o cantidad de aire consumido por el cilindro

$$Q = \left[ \left( C * \frac{D^2 * \pi}{4} \right) + \left( C * \frac{(D^2 - d^2)}{4} * \pi \right) \right] * n * RC$$

Fuente: (Manjarrés, 2009)

Donde:

$Q$  = Caudal o cantidad de aire en [litros/min] a la presión atmosférica

$n$  = Número de [ciclos/minuto]

$C$  = Carrera del vástago del cilindro en  $mm$

$$C = 30 [mm]$$

$$n = \frac{20}{min}$$

$$Q = 0.82 \left[ \frac{\text{litros}}{min} \right]$$

Nota: El número de ciclos por minuto  $n$  indicado, es el valor máximo de repeticiones que cumple el cilindro determinado.

Esta expresión solo indica el caudal consumido por un cilindro, por tanto para el consumo total de aire en el sistema, es necesario multiplicar este valor por la cantidad de cilindros a utilizar, además se debe añadir el consumo de tuberías y el resto de elementos neumáticos, estos consumos adicionales se estiman que pueden estar comprendidos entre el 20 y el 30% del consumo obtenido, por tanto, al valor anterior es preciso sumar ese porcentaje como se indica en la ecuación 3.5 (Serrano, 2009).

Ecuación 3.5: Caudal total consumido por el sistema

$$Q_{Total} = (\# \text{ Cilindros} * Q) + \left[ 25\% * \frac{(\# \text{ Cilindros} * Q)}{100\%} \right]$$

Fuente: (Serrano, 2009).

Obteniendo con 7 cilindros:

$$Q_{Total} = (7 * Q) + \left( 25\% * \frac{7 * Q}{100\%} \right)$$

$$Q_{Total} = 7.19 \left[ \frac{\text{litros}}{min} \right]$$

### 3.8.4 CÁLCULO DEL VÁSTAGO.

El vástago de un cilindro trabaja siempre a tracción, a compresión o a pandeo. Cuando los cilindros son de carrera corta puede calcularse como elementos sometido a tracción o compresión simple como se muestra en la ecuación 3.6.

Ecuación 3.6: Tensión admisible a tracción o compresión

$$\sigma_{adm} = \frac{4 \cdot F}{\pi \cdot d^2}$$

Fuente: (Serrano, 2009)

Donde:

$\sigma_{adm}$  = Tensión admisible a tracción o compresión en el material del vástago en  $[N/mm^2]$  (o en  $[MPa]$ )

$F$  = Fuerza axial sobre el vástago en  $[N]$  (o en  $[Kp]$ )

$F = F_a$

$$\sigma_{adm} = 2.28 [MPa]$$

Para obtener los coeficientes de seguridad se toman los datos de las tensiones de rotura y fluencia de la Tabla 3.3, teniendo en consideración el material a utilizar para el mecanizado del vástago, siendo este el acero inoxidable 303, donde el esfuerzo admisible es igual relación entre dichas tensiones y los coeficientes requeridos como se indica en la ecuación 3.7:

Ecuación 3.7: Relación entre tensiones de rotura y fluencia y los coeficientes de seguridad

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_R}{C_{s1}} = \frac{\sigma_F}{C_{s2}}$$

Fuente: (Serrano, 2009)

Donde:

$\sigma_R$  = Resistencia última a la tensión del material

$\sigma_F$  = Resistencia a la fluencia del material

$C_{s1}$ ,  $C_{s2}$  = Coeficientes de seguridad para la rotura y la fluencia

Tabla 3.3: Resultados de ensayos a la tensión de algunos materiales

Número	Material	Condición	Resistencia (a la tensión)				Resistencia a la deformación, exponente $m$	Resistencia a la fractura $\epsilon_f$
			Fluencia $S_y$ MPa (kpsi)	Última $S_u$ MPa (kpsi)	A la fractura, $\sigma_u$ MPa (kpsi)	Coefficiente $\sigma_o$ MPa (kpsi)		
1018	Acero	Recocido	220 (32.0)	341 (49.5)	628 (91.1) <sup>†</sup>	620 (90.0)	0.25	1.05
1144	Acero	Recocido	358 (52.0)	646 (93.7)	898 (130) <sup>†</sup>	992 (144)	0.14	0.49
1212	Acero	HR	193 (28.0)	424 (61.5)	729 (106) <sup>†</sup>	758 (110)	0.24	0.85
1045	Acero	TyR 600°F	1 520 (220)	1 580 (230)	2 380 (345)	1 880 (273) <sup>†</sup>	0.041	0.81
4142	Acero	TyR 600°F	1 720 (250)	1 930 (210)	2 340 (340)	1 760 (255) <sup>†</sup>	0.048	0.43
→ 303	Acero inoxidable	Recocido	<u>241 (35.0)</u>	<u>601 (87.3)</u>	1 520 (221) <sup>†</sup>	1 410 (205)	0.51	1.16
304	Acero inoxidable	Recocido	276 (40.0)	568 (82.4)	1 600 (233) <sup>†</sup>	1 270 (185)	0.45	1.67
2011	Aleación de aluminio	T6	169 (24.5)	324 (47.0)	325 (47.2) <sup>†</sup>	620 (90)	0.28	0.10
2024	Aleación de aluminio	T4	296 (43.0)	446 (64.8)	533 (77.3) <sup>†</sup>	689 (100)	0.15	0.18
7075	Aleación de aluminio	T6	542 (78.6)	593 (86.0)	706 (102) <sup>†</sup>	882 (128)	0.13	0.18

Fuente: (Shigley, Mischke, & Brown, 2004).

De modo que al realizar el despeje se tendría:

$$\sigma_R = 601 [Mpa]$$

$$\sigma_F = 241 [Mpa]$$



$$C_{s1} = \frac{\sigma_R}{\sigma_{adm}} \qquad C_{s2} = \frac{\sigma_F}{\sigma_{adm}}$$

$$C_{s1} = 263.6 \qquad C_{s2} = 105.7$$

### 3.8.5 CÁLCULO DEL VÁSTAGO A PANDEO.

En el cálculo del vástago a pandeo se emplea las fórmulas de Euler para elementos esbeltos empotrados en un extremo y libres en el otro, (obsérvese ecuación 3.11), donde la longitud de pandeo  $L$  sería igual que la carrera  $C$  del vástago del cilindro como indica la Figura 3.9 (Serrano, 2009).

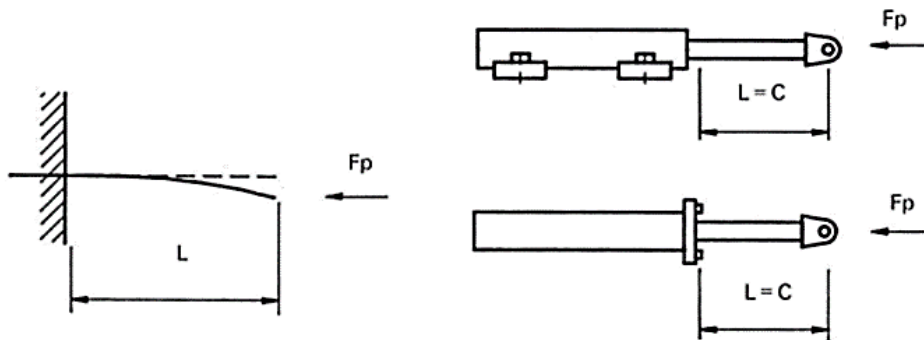


Figura 3.11: Cilindro con extremo empotrado y otro libre

Fuente: (Serrano, 2009)

Ecuación 3.8: Carga axial permitida sobre el vástago

$$Fp = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{4 \cdot L^2}$$

Fuente: (Serrano, 2009)

Donde:

$Fp$  = Carga axial permitida sobre el vástago en [N] (o en [Kp])

$E$  = Módulo de elasticidad del material del vástago en [GPa]

$I =$  Momento de inercia de la sección del vástago en  $[mm^2]$

$L =$  Longitud de pandeo en  $[mm]$

Siendo  $L = C = 30[mm]$  y tomando  $E = 189.6[ GPa]$  de la Tabla 3.9, se determina el momento de inercia como se muestra en la ecuación 3.9 para obtener la carga axial permitida sobre el vástago.

Tabla 3.4: Propiedades físicas de algunos materiales de ingeniería.

Material	Módulo de elasticidad $E$		Módulo de rigidez $G$		Razón de Poisson $\nu$	Densidad de peso $\gamma$	Densidad de masa $\rho$	Gravedad específica
	Mpsi	GPa	Mpsi	GPa		lb/in <sup>3</sup>	Mg/m <sup>3</sup>	
Aleaciones de aluminio	10.4	71.7	3.9	26.8	0.34	0.10	2.8	2.8
Cobre al berilio	18.5	127.6	7.2	49.4	0.29	0.30	8.3	8.3
Latón, bronce	16.0	110.3	6.0	41.5	0.33	0.31	8.6	8.6
Cobre	17.5	120.7	6.5	44.7	0.35	0.32	8.9	8.9
Hierro, fundido, gris	15.0	103.4	5.9	40.4	0.28	0.26	7.2	7.2
Hierro, fundido, dúctil	24.5	168.9	9.4	65.0	0.30	0.25	6.9	6.9
Hierro, fundido, maleable	25.0	172.4	9.6	66.3	0.30	0.26	7.3	7.3
Aleaciones de magnesio	6.5	44.8	2.4	16.8	0.33	0.07	1.8	1.8
Aleaciones de níquel	30.0	206.8	11.5	79.6	0.30	0.30	8.3	8.3
Acero, carbono	30.0	206.8	11.7	80.8	0.28	0.28	7.8	7.8
Acero, aleaciones	30.0	206.8	11.7	80.8	0.28	0.28	7.8	7.8
→ Acero, inoxidable	27.5	<u>189.6</u>	10.7	74.1	0.28	0.28	7.8	7.8
Aleaciones de titanio	16.5	113.8	6.2	42.4	0.34	0.16	4.4	4.4
Aleaciones de zinc	12.0	82.7	4.5	31.1	0.33	0.24	6.6	6.6

Fuente: (Norton, 2014)

Ecuación 3.9: Momento de inercia de la sección del vástago

$$I = \frac{\pi \cdot d^4}{64}$$

Fuente: (Serrano, 2009)

$$I = 63.62 [mm^4]$$

$$Fp = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{4 \cdot C^2}$$

$$Fp = 32963.55 [N]$$

En la práctica puede aumentarse una carga sobre el vástago en un 50% aproximadamente para verificar si se produce pandeo del mismo como se indica en la ecuación 3.10.

Ecuación 3.10: carga sobre el vástago aumentada 50%

$$Fpa = \frac{1.5 \cdot E \cdot I}{4 \cdot C^2 \cdot C_s}$$

Fuente: (Serrano, 2009)

$$Fpa = 183000 [N]$$

Donde:

$Fpa$  = Carga axial permitida sobre el vástago aumentada 50% en [N] (o en [Kp])

$C_s$  = Coeficiente de seguridad en un círculo. Suele tomarse entre 2 y 4

En caso de producirse pandeo, apenas si tiene importancia la calidad del acero empleado, ya que lo que cuenta es la flexión crítica del material que depende del módulo de elasticidad, del diámetro y carrera del vástago.

### 5.8.6 CÁLCULO DE LA CAMISA.

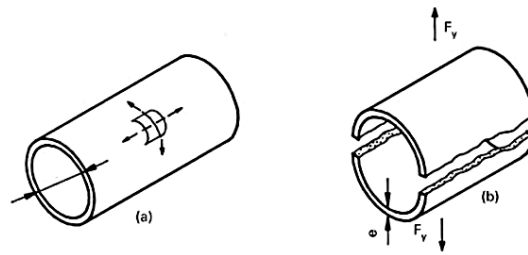


Figura 3.12: Estado tensional (a) y rotura (b)

Fuente: (Serrano, 2009)

La camisa de un cilindro puede calcularse como un cilindro de pared delgada, cerrado herméticamente y sometido a presión en el interior. Aunque la pared está sometida a tensiones en dos direcciones como indica la Figura 3.12 (a), basta con considerar la fuerza  $F_y$  que tiende a romper el cilindro como se muestra en la Figura 3.12 (b). Donde la tensión admisible del cilindro se obtendría con la ecuación 3.11.

Ecuación 3.11: Tensión admisible del cilindro

$$\sigma_{admc} = \frac{p \cdot D}{2 \cdot e}$$

Fuente: (Serrano, 2009)

Así pues:

$\sigma_{admc}$  = Tensión admisible en el material en  $[daN/mm^2]$  (o en  $[Kp/mm^2]$ )

$e$  = Espesor de la pared de la camisa en  $[mm]$

$e = 1.5[mm]$

$$\sigma_{cadm} = 2.4 \left[ \frac{N}{mm^2} \right]$$

### 3.9 MECANIZADO DEL CILINDRO NEUMÁTICO DE DOBLE EFECTO.

Para la manufactura de piezas bajo un diseño personalizado se necesitan de ciertas máquinas herramientas, tal es el caso para la mecanización de componentes que forman parte del cilindro neumático de doble efecto como culatas, vástago y camisa, se hace uso de un Torno CNC computarizado como se observa en la Figura 3.13.



Figura 3.13: Torno CNC ROMI GL 240

Se debe cumplir con determinados parámetros tanto para la fabricación de las piezas como para los respectivos acabados, entre los cuales se tiene: material, velocidades de rotación de la pieza de trabajo sujeta en un husillo, profundidades de corte y avances, herramientas adecuadas para el corte y acabado superficial, dimensiones requeridas, código G, etc.

Además, es necesario conocer varios conceptos referentes a operación y características del torneado, como se describen a continuación:

### 3.9.1 TORNEADO.

Es un proceso de maquinado, en el cual la pieza es la que rota mientras se está maquinando. El material inicial es una pieza de trabajo que se ha fabricado mediante otros procesos, como fundición, forjado, extrusión, estirado o metalurgia de polvos (Kalpakjian & Schmid, 2008).

### 3.9.2 PROCESO DE TORNEADO.

Suelen efectuarse en un torno o máquina herramienta similar, estas máquinas son muy versátiles y tienen la capacidad de producir una amplia variedad de formas, en la Figura 3.14, se puede observar diversas operaciones de corte donde todas las partes son circulares, propiedad a la que se conoce como simetría respecto de un eje.

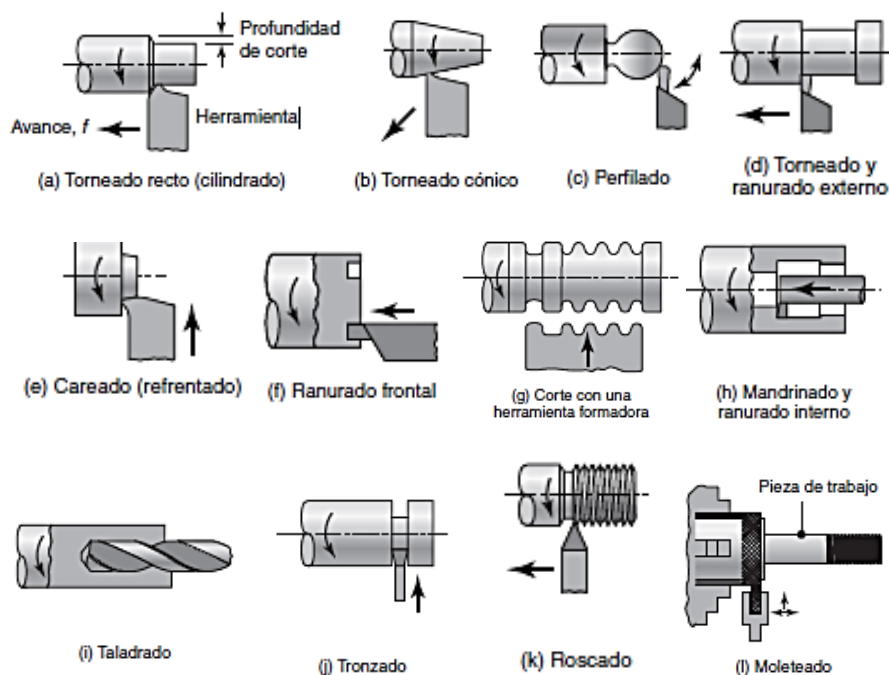


Figura 3.14: Operaciones de corte en el torno

Fuente: (Kalpakjian & Schmid, 2008)

Por lo general, para las operaciones de corte en un torno existen varios diseños, tamaños, capacidades y características controladas por computadora (Kalpakjian & Schmid, 2008).

### 3.9.3 HERRAMIENTAS.

La mayoría de las operaciones de torneado comprende el uso de herramientas de un solo punto de corte, con la geometría de una típica herramienta de corte derecho como se observa en la Figura 3.15, el término derecho se refiere al avance de las herramientas de derecha a izquierda.

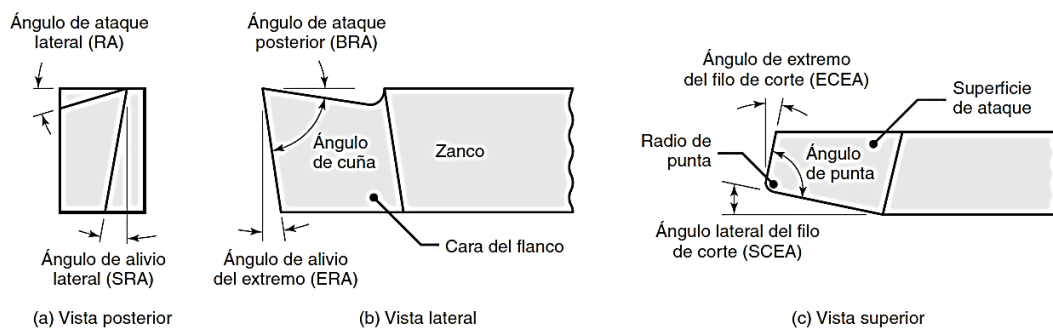


Figura 3.15: Designaciones de herramienta de corte derecho

Fuente: (Kalpakjian & Schmid, 2008)

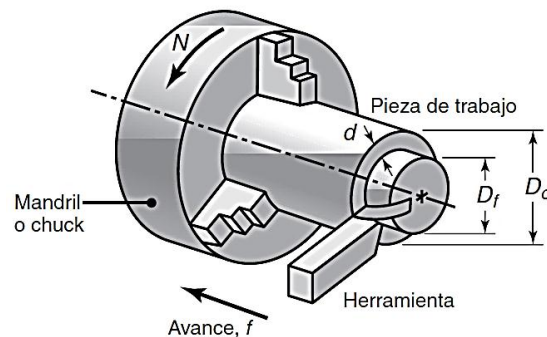


Figura 3.16: Esquema de la operación básica de torneado

Fuente: (Kalpakjian & Schmid, 2008)

La Figura 3.16 indica el esquema de la operación básica de torneado, que muestra la profundidad de corte ( $d$ ), el avance ( $f$ ) y la velocidad rotacional del husillo ( $N$ ) en *rev/min*. La velocidad de corte es la velocidad superficial de la pieza de trabajo en la punta de la herramienta (Kalpakjian & Schmid, 2008).

Para la manufactura de la camisa del cilindro se realiza el corte o tronzado del material con la longitud determinada, se efectúa el desbaste manual o rectificado de la pieza en el torno, como se indica en la siguiente Figura 3.17, ajustándose a las respectivas tolerancias especificadas en el plano, para obtener la medida requerida.

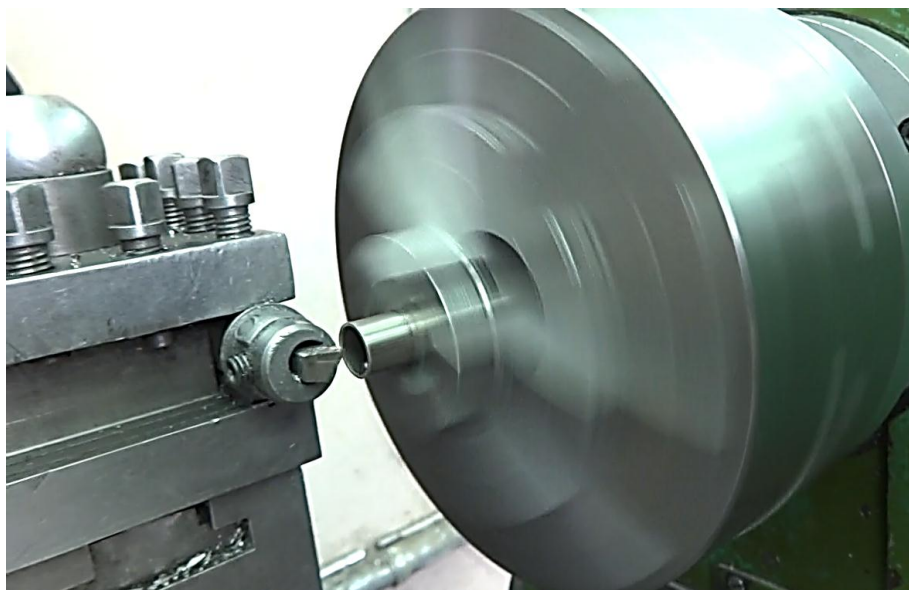


Figura 3.17: Rectificado de la camisa del cilindro

A continuación, se efectúa la resolución de cálculos para el mecanizado del vástago:



### 3.9.4 VELOCIDAD DE REMOCIÓN DE MATERIAL (MRR).

Es el volumen de material removido por unidad de tiempo, con unidades de  $mm^3/min$  que indica que la remoción de material es volumétrica, se calcula con la ecuación 3.12.

Ecuación 3.12: Volumen de material removido por unidad de tiempo

$$MRR = \pi D_{prom} d a N$$

Fuente: (Kalpakjian & Schmid, 2008)

Donde:

$D_{prom}$  = Diámetro promedio de la pieza de trabajo en  $mm$

$d$  = Profundidad de corte [ $mm$ ]

$a$  = Avance en [ $mm/rev$ ]

$N$  = Velocidad de giro del husillo [ $rev/min$ ]

Así pues, por cada revolución de la pieza de trabajo se remueve una capa de material en forma de anillo, donde para sus cálculos, es necesario tomar datos proporcionados por tablas y planos diseñados previamente. La manufactura del vástago se la realiza en acero inoxidable, por consiguiente, de la Tabla 3.5 se toma el valor de la velocidad máxima de corte superficial y el avance para este material, así como también para el mecanizado de culatas se selecciona aleaciones de aluminio.

Tabla 3.5: Recomendaciones generales para operaciones de torneado

Material de la pieza de trabajo	Herramienta de corte	Condiciones iniciales de propósito general			Intervalo para rectificado y acabado		
		Profundidad de corte, mm (pulg)	Avance, mm/rev (pulgadas/rev)	Velocidad de corte, m/min (pies/min)	Profundidad de corte, mm (pulg)	Avance, mm/rev (pulgadas/rev)	Velocidad de corte, m/min (pies/min)
→ Acero inoxidable, austenítico	Carburo con triple recubrimiento	1.5–4.4 (0.06–0.175)	0.35 (0.014)	150 (500)	0.5–12.7 (0.02–0.5)	0.08–0.75 (0.003–0.03)	75–230 (250–750)
	Carburo con recubrimiento de TiN	"	"	85–160 (275–525)	"	"	55–200 (175–650)
	Cermet	"	0.30 (0.012)	185–215 (600–700)	"	"	105–290 (350–950)
Aleaciones para alta temperatura, base níquel	Carburo sin recubrimiento	2.5 (0.10)	0.15 (0.006)	25–45 (75–150)	0.25–6.3 (0.01–0.25)	0.1–0.3 (0.004–0.012)	15–30 (50–100)
	Carburo con recubrimiento de cerámico	"	"	45 (150)	"	"	20–60 (65–200)
	Carburo con recubrimiento de TiN	"	"	30–55 (95–175)	"	"	20–85 (60–275)
	Cerámico de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	"	"	260 (850)	"	"	185–395 (600–1300)
	Cerámico de SiN	"	"	215 (700)	"	"	90–215 (300–700)
	cBN policristalino	"	"	150 (500)	"	"	120–185 (400–600)
Aleaciones de titanio	Carburo sin recubrimiento	1.0–3.8 (0.04–0.15)	0.15 (0.006)	35–60 (120–200)	0.25–6.3 (0.01–0.25)	0.1–0.4 (0.004–0.015)	10–75 (30–250)
	Carburo con recubrimiento de TiN	"	"	30–60 (100–200)	"	"	10–100 (30–325)
→ Aleaciones de aluminio Libre maquinado	Carburo sin recubrimiento	1.5–5.0 (0.06–0.20)	0.45 (0.018)	490 (1600)	0.25–8.8 (0.01–0.35)	0.08–0.62 (0.003–0.025)	200–670 (650–2000)
	Carburo con recubrimiento de TiN	"	"	550 (1800)	"	"	60–915 (200–3000)
	Cermet	"	"	490 (1600)	"	"	215–795 (700–2600)
	Diamante policristalino	"	"	760 (2500)	"	"	305–3050 (1000–10,000)
	Alto silicio	"	"	530 (1700)	"	"	365–915 (1200–3000)

Fuente: (Kalpakjian &amp; Schmid, 2008)

Por tanto, los datos obtenidos son los siguientes:

$$D_o = 6 [mm]$$

$$D_{f1} = 3 [mm]$$

$$D_{f2} = 5.4 [mm]$$

$$V_c = 150000 \left[ \frac{mm}{min} \right]$$

$$a = 0.35 \left[ \frac{mm}{rev} \right]$$

Se encuentra el valor del diámetro promedio de la pieza de trabajo con la ecuación 3.13, velocidad del husillo con la ecuación 3.14 y profundidad de corte con la ecuación 3.15, para determinar el volumen de material removido *MMR*.

Ecuación 3.13: Diámetro promedio de la pieza de trabajo

$$D_{prom} = \frac{D_0 + D_f}{2}$$

Fuente: (Kalpakjian & Schmid, 2008)

$$D_{prom} = 10.2 [mm]$$

Donde:

$D_0$  = Diámetro original de la pieza de trabajo en [mm]

$D_f$  = Diámetro final de la pieza de trabajo en [mm]

$V_c$  = Velocidad de corte en [mm/min]

Ecuación 3.14: Velocidad del husillo

$$N = \frac{V_c}{\pi * D_0}$$

Fuente: (Kalpakjian & Schmid, 2008)

$$N = 1266.51 \left[ \frac{rev}{min} \right]$$

Ecuación 3.15: Profundidad de corte

$$d = \frac{D_0 - D_f}{2}$$

Fuente: (Kalpakjian & Schmid, 2008)

$$d = 1.8 [mm]$$

En consecuencia, el material removido sería:

$$MRR = 1.18 * 10^4 \left[ \frac{mm^3}{min} \right]$$

Además, la velocidad de avance o velocidad lineal de la herramienta a lo largo de la pieza de trabajo se la determina con la siguiente ecuación 3.16:

Ecuación 3.16: Velocidad de avance

$$f = a * N$$

Fuente: (Rubio & Sebastián, 2011)

$$f = 443.28 \left[ \frac{mm}{min} \right]$$

### 3.9.5 TIEMPO DE CORTE.

Para una pieza de trabajo de longitud ( $l_c$  = longitud de corte), se puede calcular con la ecuación 3.17, considerando que la herramienta avanza a una velocidad  $f$ , entonces:

Ecuación 3.17: Tiempo de corte

$$t = \frac{l_c}{f}$$

Fuente: Fuente: (Kalpakjian & Schmid, 2008)

Siendo:

$$l_{c1} = 22.30 [mm]$$

$$l_{c2} = 22.30 [mm]$$

Se tiene que,

$$t = 0.09 \text{ [min]}$$

El tiempo de corte no incluye el tiempo requerido para la aproximación y retracción de la herramienta (Kalpakjian & Schmid, 2008).

### 3.9.6 TORQUE Y POTENCIA.

El producto de la energía específica tomada de la tabla 3.6 del acero inoxidable para el vástago y de las aleaciones de aluminio para las culatas; el volumen de material removido, proporciona la potencia requerida en la operación de torneado como se muestra en la ecuación 3.18.

Tabla 3.6: Intervalo aproximado de requerimientos de energía en las operaciones de corte

Material	Energía específica	
	W · s/mm <sup>3</sup>	hp · min/pulg <sup>3</sup>
→ Aleaciones de aluminio	0.4-1	0.15-0.4
Hierros fundidos	1.1-5.4	0.4-2
Aleaciones de cobre	1.4-3.2	0.5-1.2
Aleaciones de alta temperatura	3.2-8	1.2-3
Aleaciones de magnesio	0.3-0.6	0.1-0.2
Aleaciones de níquel	4.8-6.7	1.8-2.5
Aleaciones refractarias	3-9	1.1-3.5
→ Aceros inoxidables	2-5	0.8-1.9
Aceros	2-9	0.7-3.4
Aleaciones de titanio	2-5	0.7-2

Fuente: (Kalpakjian & Schmid, 2008)

Por tanto, la energía específica sería:

$$Energía = 4 \frac{W * s}{mm^3}$$

Ecuación 3.18: Potencia requerida en la operación de torneado

$$Potencia = Energía * MRR$$

Fuente: (Kalpakjian & Schmid, 2008)

$$Potencia = 785.43 [W]$$

La relación entre la potencia y la velocidad del husillo como se indica en la ecuación 3.19, determina el *Torque*.

Ecuación 3.19: Torque en la operación de torneado

$$Torque = \frac{Potencia}{N}$$

Fuente: (Kalpakjian & Schmid, 2008)

$$Torque = 5.92 [N * m]$$

### 5.9.7 FUERZA DE CORTE.

La fuerza de corte ( $F_c$ ) en *Newton* es la fuerza tangencial ejercida por la herramienta, se obtiene con la ecuación 3.20 y actúa en la dirección de la velocidad de corte ( $V_c$ ).

Ecuación 3.20: Fuerza de corte

$$F_c = \frac{Torque}{\frac{D_{prom}}{2}}$$

Fuente: (Kalpakjian & Schmid, 2008)

$$F_c = 1161.18 [N]$$

Empleando las ecuaciones y tablas anteriores para los respectivos cálculos tanto para la culata anterior como para la posterior se tiene lo siguiente:

➤ Culata anterior

$$D_0 = 20 [mm]$$

$$D_{f3} = 12.20 [mm]$$

$$D_{f1} = 13.40 [mm]$$

$$V_c = 490000 \left[ \frac{mm}{min} \right]$$

$$D_{f2} = 15.23 [mm]$$

$$N = \frac{V_c}{\pi * D_0}$$

$$N = 1241.18 \left[ \frac{rev}{min} \right]$$

$$D_{prom1} = \frac{D_0 + D_{f1}}{2}$$

$$D_{prom2} = \frac{D_0 + D_{f2}}{2}$$

$$D_{prom3} = \frac{D_0 + D_{f3}}{2}$$

$$D_{prom1} = 16.7 [mm]$$

$$D_{prom2} = 17.62 [mm]$$

$$D_{prom1} = 16.1 [mm]$$

$$d_1 = \frac{D_0 - D_{f1}}{2}$$

$$d_2 = \frac{D_0 - D_{f2}}{2}$$

$$d_3 = \frac{D_0 - D_{f3}}{2}$$

$$d_1 = 3.3 [mm]$$

$$d_2 = 2.39 [mm]$$

$$d_3 = 3.3 [mm]$$

$$a = 0.45 \left[ \frac{mm}{rev} \right] \rightarrow \text{Para aleaciones de aluminio}$$

$$MRR_1 = \pi * D_{prom1} * d_1 * a * N$$

$$MRR_1 = 9.67 * 10^4 \left[ \frac{mm^3}{min} \right]$$

$$MRR_2 = \pi * D_{prom2} * d_2 * a * N$$

$$MRR_2 = 7.37 * 10^4 \left[ \frac{mm^3}{min} \right]$$

$$MRR_3 = \pi * D_{prom3} * d_3 * a * N$$

$$MRR_3 = 6.74 * 10^4 \left[ \frac{mm^3}{min} \right]$$

$$MRR = MRR_1 + MRR_2 + MRR_3$$

$$MRR = 2.38 * 10^5 \left[ \frac{mm^3}{min} \right]$$

$$f = a * N$$

$$f = 558.53 \left[ \frac{mm}{min} \right]$$

$$l_{c1} = 17 [mm]$$

$$l_{c2} = 10 [mm]$$

$$l_{c3} = 6 [mm]$$

$$t_1 = \frac{l_{c1}}{a * N}$$

$$t_1 = 0.03 [min]$$

$$t_2 = \frac{l_{c2}}{a * N}$$

$$t_2 = 0.02 [min]$$

$$t_3 = \frac{l_{c3}}{a * N}$$

$$t_3 = 0.01 [min]$$



$$t = t_1 + t_2 + t_3$$

$$t = 0.06 \text{ [min]}$$

$$\text{Energía} = 0.8 \left[ \frac{\text{W} \cdot \text{s}}{\text{mm}^3} \right] \rightarrow \text{Para aleaciones de aluminio}$$

$$\text{Potencia} = \text{Energía} \cdot \text{MRR}$$

$$\text{Potencia} = 3170.6 \text{ [W]}$$

$$\text{Torque} = \frac{\text{Potencia}}{N}$$

$$\text{Torque} = 24.39 \text{ [N} \cdot \text{m]}$$

$$F_{c1} = \frac{\text{Torque}}{\frac{D_{prom1}}{2}}$$

$$F_{c1} = 2921.4 \text{ [N]}$$

$$F_{c2} = \frac{\text{Torque}}{\frac{D_{prom2}}{2}}$$

$$F_{c2} = 2769.65 \text{ [N]}$$

$$F_{c3} = \frac{\text{Torque}}{\frac{D_{prom3}}{2}}$$

$$F_{c3} = 3030.27 \text{ [N]}$$

$$F_c = F_{c1} + F_{c2} + F_{c3}$$

$$F_c = 8721.31 \text{ [N]}$$

➤ Culata posterior

$$D_0 = 20 \text{ [mm]}$$

$$D_{f1} = 12.20 \text{ [mm]}$$

$$D_{f2} = 15.23 \text{ [mm]}$$

$$V_c = 490000 \left[ \frac{\text{mm}}{\text{min}} \right]$$

$$N = \frac{V_c}{\pi * D_0}$$

$$N = 1241.18 \left[ \frac{rev}{min} \right]$$

$$D_{prom1} = \frac{D_0 + D_{f1}}{2}$$

$$D_{prom1} = 16.1 [mm]$$

$$D_{prom2} = \frac{D_0 + D_{f2}}{2}$$

$$D_{prom2} = 17.62 [mm]$$

$$d_1 = \frac{D_0 - D_{f1}}{2}$$

$$d_1 = 3.9 [mm]$$

$$d_2 = \frac{D_0 - D_{f2}}{2}$$

$$d_2 = 2.39 [mm]$$

$$a = 0.45 \left[ \frac{mm}{rev} \right] \rightarrow \text{Para aleaciones de aluminio}$$

$$MRR_1 = \pi * D_{prom1} * d_1 * a * N$$

$$MRR_1 = 1.1 * 10^5 \left[ \frac{mm^3}{min} \right]$$

$$MRR_2 = \pi * D_{prom2} * d_2 * a * N$$

$$MRR_2 = 7.37 * 10^4 \left[ \frac{mm^3}{min} \right]$$

$$MRR = MRR_1 + MRR_2$$

$$MRR = 1.84 * 10^5 \left[ \frac{mm^3}{min} \right]$$

$$f = a * N$$

$$f = 558.53 \left[ \frac{mm}{min} \right]$$

$$l_{c1} = 6 [mm]$$

$$l_{c2} = 10,70 [mm]$$

$$t_1 = \frac{l_{c1}}{a * N}$$

$$t_1 = 0.01 [min]$$

$$t_2 = \frac{l_{c2}}{a * N}$$

$$t_2 = 0.02 [min]$$

$$t = t_1 + t_2$$

$$t = 0.03 [min]$$

$$Energía = 0.8 \left[ \frac{W * s}{mm^3} \right] \rightarrow \text{Para aleaciones de aluminio}$$

$$Potencia = Energía * MRR$$

$$Potencia = 2451.92 [W]$$

$$Torque = \frac{Potencia}{N}$$

$$Torque = 18.86 [N * m]$$

$$F_{c1} = \frac{Torque}{\frac{D_{prom1}}{2}}$$

$$F_{c1} = 2343.39 [N]$$

$$F_{c2} = \frac{Torque}{\frac{D_{prom2}}{2}}$$

$$F_{c2} = 2141.85 [N]$$

$$F_c = F_{c1} + F_{c2}$$

$$F_c = 4485.24 [N]$$

### 3.9.8 CORTES DE DESBASTE Y OPERACIONES DE ACABADO.

El procedimiento en el maquinado consiste primero en efectuar uno o más cortes de desbaste a altas velocidades de avance y grandes profundidades de corte, estos cortes van seguidos de operaciones de acabado, a un avance y profundidad de corte más bajos para producir un buen acabado superficial.

### 3.9.9 DISPOSITIVOS DE SUJECCIÓN E INSERTOS.

Los dispositivos de sujeción del trabajo son importantes, sobre todo en las máquinas herramienta y en operaciones de maquinado, ya que deben sujetar la pieza de trabajo con seguridad como se observa en la Figura 3.18.

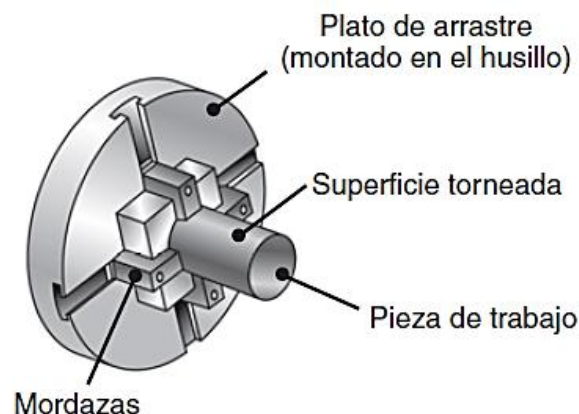


Figura 3.18: Sujeción de una pieza de trabajo en un plato de arrastre.

Fuente: (Kalpakjian & Schmid, 2008)

Para el mecanizado de las piezas del cilindro neumático de doble efecto se realiza la sujeción en el mandril de tres mordazas que tiene un diseño de desplazamiento engranado que hace que las mordazas se centren por sí mismas como se puede apreciar en la Figura 3.19.

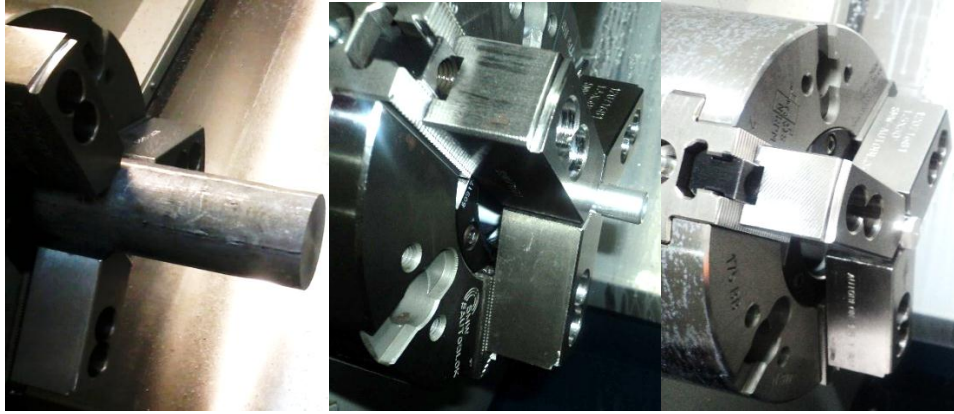


Figura 3.19: Sujeción del tocho de aluminio en el plato de arrastre

Los insertos son herramientas individuales de corte con varios puntos de corte, existen varias formas de insertos como se ilustra en la Figura 3.20, tales como cuadrado, triángulo, diamante y redonda.

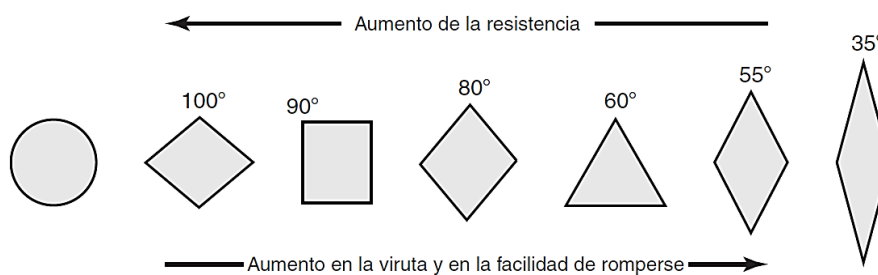


Figura 3.20: Resistencia relativa de los filos y tendencia al astillado de los insertos de diversas formas.

Fuente: (Kalpakjian & Schmid, 2008)

Para el mecanizado de culatas, camisa y vástago, se emplea los insertos en forma de diamante de  $60^\circ$  para desbaste y  $35^\circ$  para el acabado como se observa en la Figura 3.21.

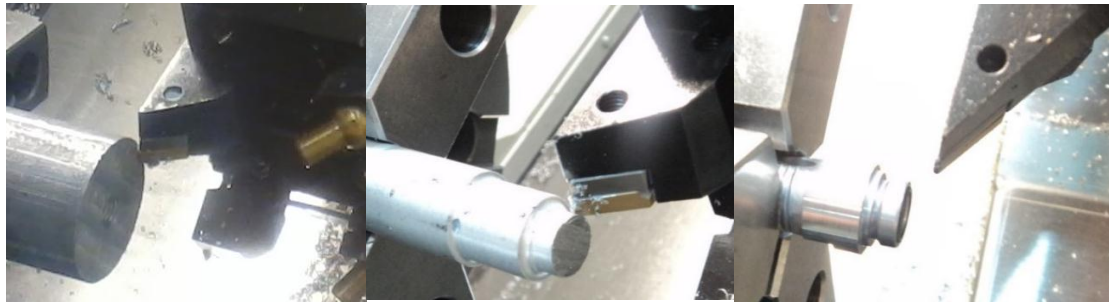


Figura 3.21: Insertos empleados en el mecanizado.

### 3.9.10 CÓDIGOS G.

Los códigos G son instrucciones de programación de control numérico que se ingresan en la memoria de la máquina como se observa en la Figura 3.22, para que el torno ejecute el proceso de trazado siguiendo un orden, de tal manera que se pueda controlar el desplazamiento de la herramienta, la velocidad de giro del husillo, etc.



Figura 3.22: Ingreso del código G en la pantalla de programación del Torno

CNC

### 3.9.11 MECANIZADO DE LAS PIEZAS DEL CILINDRO.

Para efectuar el mecanizado de vástago, camisa y culatas, se efectúa el proceso el tronzado en primer lugar, es decir el corte de material con las respectivas longitudes, ajustándose a las tolerancias de fabricación establecidas en los planos para la manufactura de cilindros como se indica en la Figura 3.23.



Figura 3.23: Tronzado de material para vástagos y camisas

Se realiza los correspondientes código G para mecanizado de vástago y culatas, ingresando los datos proporcionados anteriormente, estos se detallan en el Anexo I.

Se procede a la simulación en la plataforma de programación CIMCO, como se observa en las Figuras 3.24 hasta 3.29.

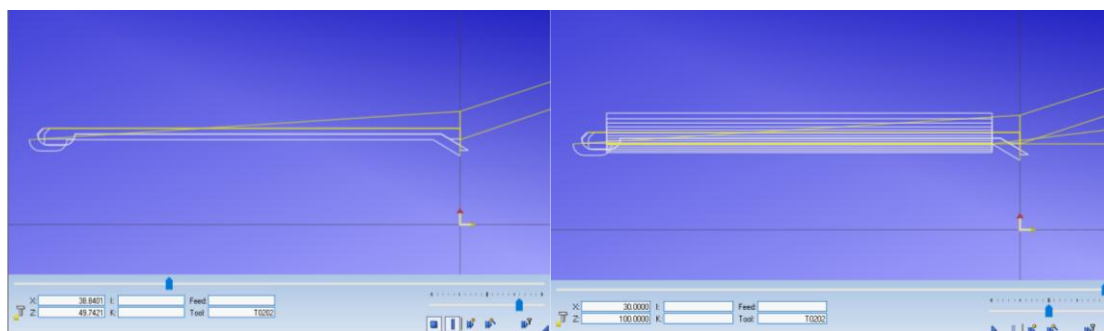


Figura 3.24: Simulación en la plataforma de programación CIMCO de la parte anterior del vástago

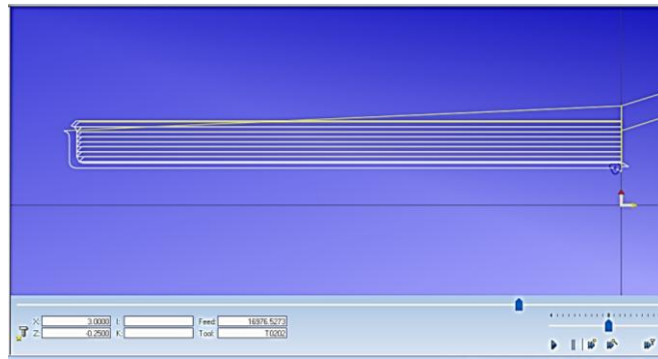


Figura 3.25: Simulación en la plataforma de programación CIMCO para la parte posterior del vástago

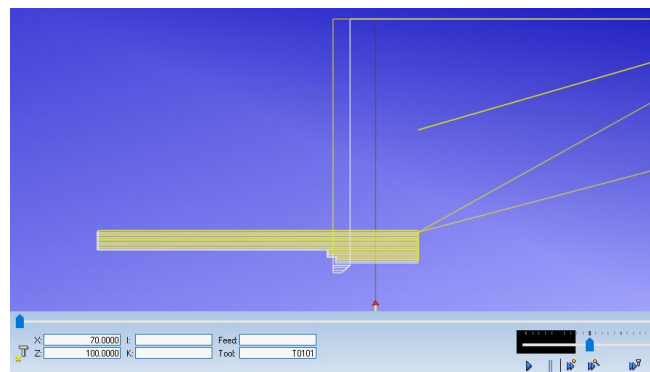


Figura 3.26: Simulación en la plataforma de programación CIMCO para la parte trasera de la culata anterior

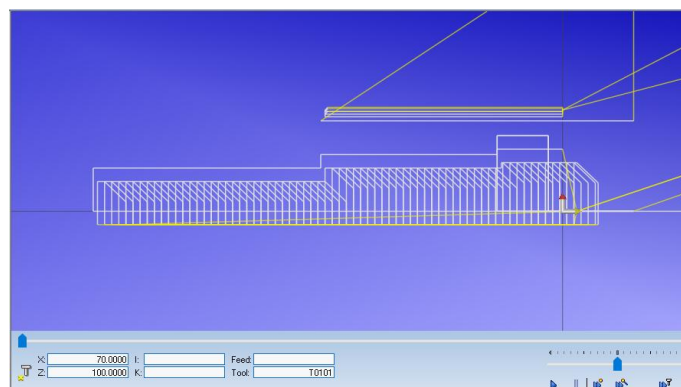


Figura 3.27: Simulación en la plataforma de programación CIMCO para la parte delantera de la culata anterior



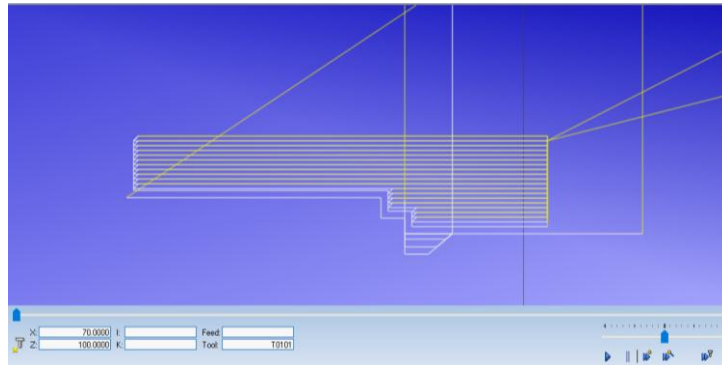


Figura 3.28: Simulación en la plataforma de programación CIMCO para la parte externa de la culata posterior

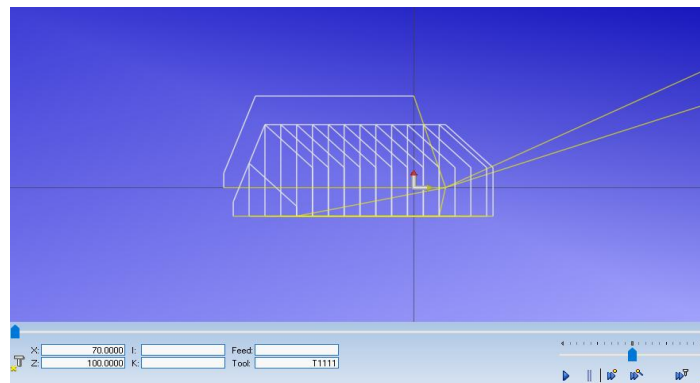


Figura 3.29: Simulación en la plataforma de programación CIMCO para la parte interna de la culata posterior

En las Figuras 3.30 hasta 3.35 se indica la respectiva simulación en la pantalla de programación del torno.

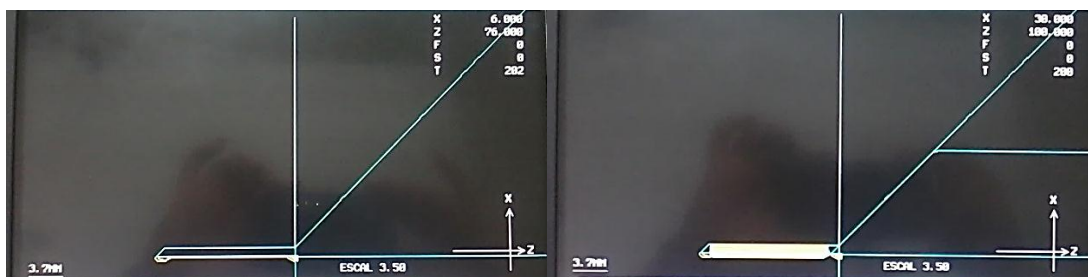


Figura 3.30: Simulación en la pantalla de programación del torno CNC de la parte anterior del vástago

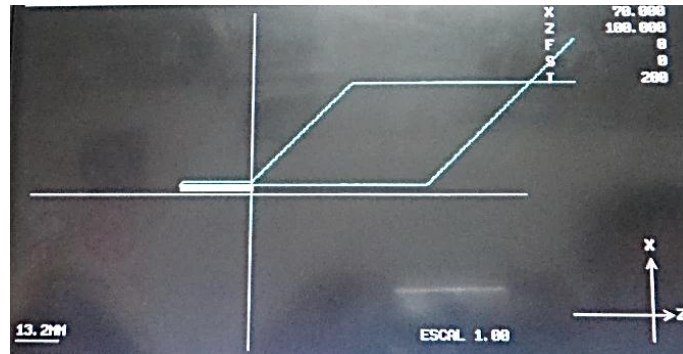


Figura 3.31: Simulación en la pantalla de programación del torno CNC de la parte posterior del vástago

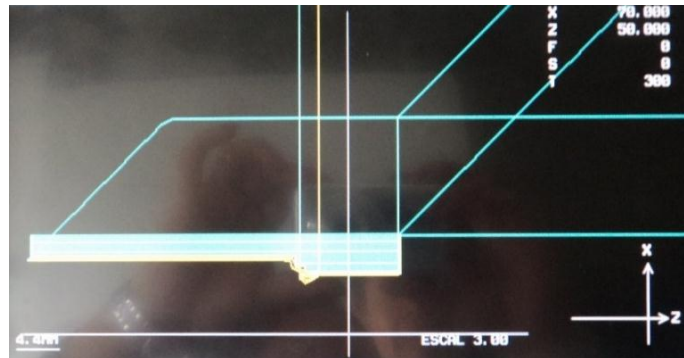


Figura 3.32: Simulación en la pantalla de programación del torno CNC para la parte trasera de la culata anterior

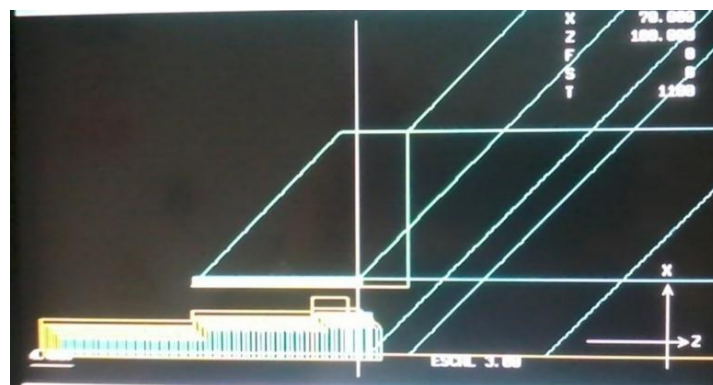


Figura 3.33: Simulación en la pantalla de programación del torno CNC para la parte delantera de la culata anterior

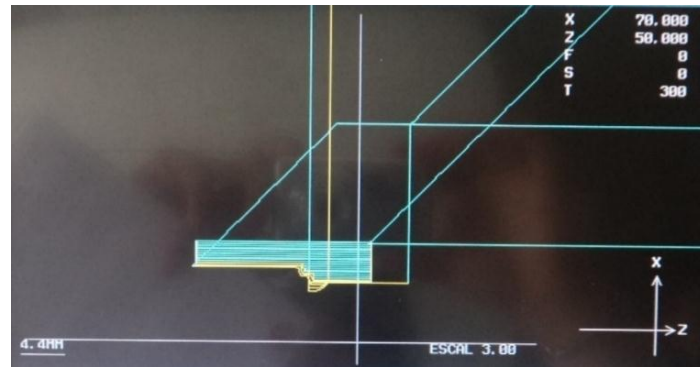


Figura 3.34: Simulación en la pantalla de programación del torno CNC para la parte externa de la culata posterior

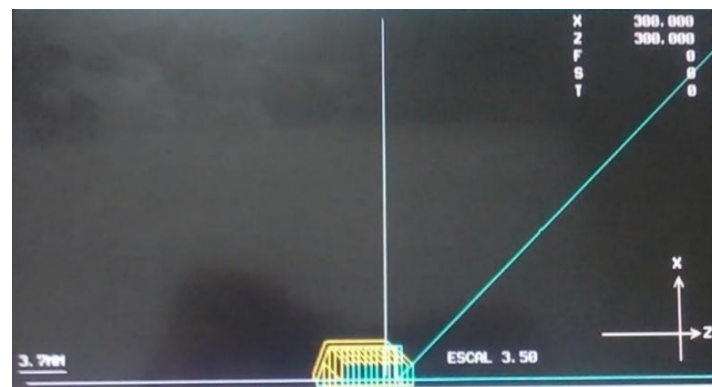


Figura 3.35: Simulación en la pantalla de programación del torno CNC para la parte interna de la culata posterior

En las Figuras 3.36 y 3.37 se muestra el proceso de mecanizado en el torno para el vástago:

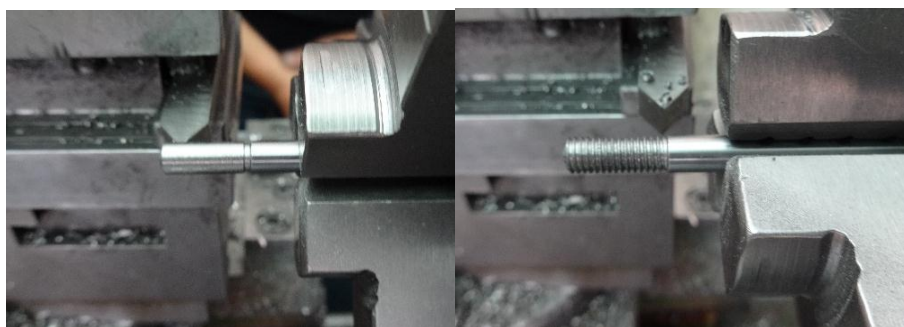


Figura 3.36: Mecanizado de la parte anterior del vástago en el torno

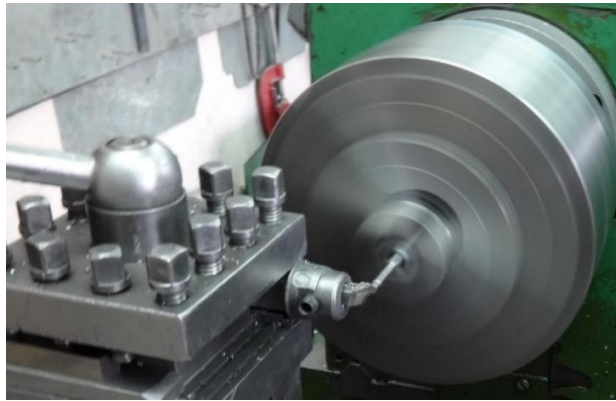


Figura 3.37: Mecanizado de la parte posterior del vástago en el torno

Para el roscado final se lo realiza de forma manual con tarraja (herramienta para labrar roscas) debido a que presenta un diámetro pequeño de 3 mm (Ver Figura 3.38), con una longitud de 5.6 mm.



Figura 3.38: Roscado de la parte posterior del vástago con tarraja

En las Figuras 3.39 hasta 3.42 se observa el proceso de mecanizado en el torno para las culatas:

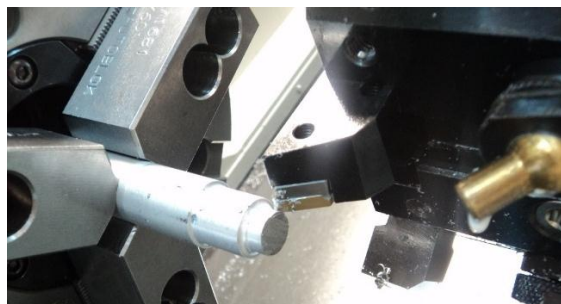


Figura 3.39: Mecanizado de la parte trasera de la culata anterior en el torno



Figura 3.40: Mecanizado de la parte delantera de la culata anterior en el torno



Figura 3.41: Mecanizado de la parte externa de la culata posterior en el torno



Figura 3.42: Mecanizado de la parte interna de la culata posterior en el torno

Se efectúa los agujeros para el ingreso de los racores mediante una fresadora y machuelos como se ilustra en la Figura 3.43.



Figura 3.43: Elaboración de agujeros para el ingreso de racores en las culatas

En el Anexo J se presenta las respectivas hojas de procesos de cada una de las partes manufacturadas del cilindro neumático.

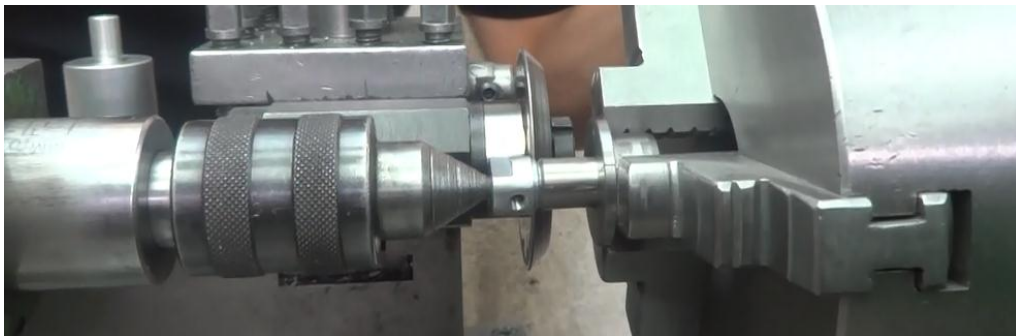
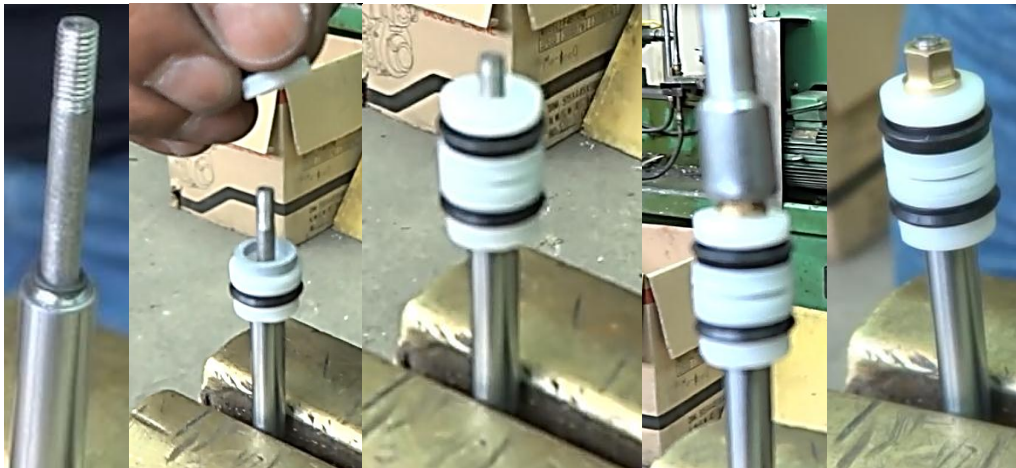
### 3.9.12 ENSAMBLAJE DE COMPONENTES.

Después de mecanizar vástago, camisa y culatas como se observa en la Figura 3.44, se procede a realizar el ensamblaje de cada componente, tanto para el émbolo como para el cilindro en general.



Figura 3.44: Piezas para el ensamblaje de cilindros

En la siguiente Figura 3.45 se observa el ensamblaje final tanto del émbolo con el vástago, como del cilindro; siendo este sellado herméticamente y remachado, obteniendo así el cilindro requerido para la actuación del mecanismo rehabilitador; donde se consigue un peso de 23 g.



3.45: Ensamblaje general del cilindro neumático

### 3.10 ANÁLISIS DE COSTOS.

El costo de guantes rehabilitadores de la mano o dispositivos similares puede llegar a valores de hasta USD \$ 30,000. Por tal motivo se busca implementar en el área de fisioterapia un guante de rehabilitación con un precio accesible.

El costo del dispositivo rehabilitador pasivo de dedos de la mano, desarrollado en el proyecto se describe en la siguiente Tabla 5.7.

Tabla 3.7: Costo del dispositivo rehabilitador de dedos de la mano desarrollada en el proyecto

Descripción	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
Electroválvula 5/3 vías 1/8 RR CC	7	169.64	1187.48
Bobina 22 D8 BA 2W-24VDC	14	17.17	240.38
Ficha de conexión bobina 22	14	6.44	90.16
Accesorio base manifold compatible 1/8	8	30.74	245.92
Accesorio terminal S/ZA OR manifold compatible 1/8	1	22.31	22.31
Accesorio terminal ingreso manifold compatible 1/8	1	28.52	28.52
Tapón BSP 1/4	3	1.42	4.26
Accesorio silenciador MWSFE 1/4 Nich	2	3.09	6.18
FR 1/4 12 Bar RMSA + manómetro	1	79.01	79.01
Racor codo T/P 4 1/8 CC	14	2.85	39.90
Banjo T/P Cil/tuerca 4 M5	14	17.02	238.28
Manguera poliuretano SH. A98.DE, DI:R:Azul D4	30	0.65	19.50



Cilindro doble efecto magnético No. 2	1	76.97	76.97
Accesorio SF 1/4 soporte fijación	1	4.95	4.95
Neplo NPT 1/4-1/4	1	1.56	1.56
Válvula colizante 3/2 1/4 Sil/free	1	48.01	48.01
Racor recto NPT 6 1/4 CC	3	2.13	6.39
Manguera poliuretano SH. A98.DE, DI:R:Azul D6	5	1.22	6.10
Barra tubo	1000	0.05	50.00
Barra redonda D:6MM	1000	0.03	30.00
Kit pistón D12	8	31.65	253.20
Accesorio horquilla con rótula GA-M M6	8	31.89	255.12
Cilindro doble efecto DSNU	1	74.08	74.08
Racor L orientable	2	5.35	10.70
6MM*1/4 rápido	1	1.97	1.97
1/4*1/8 bushing	1	0.89	0.89
Juego de acoples rápidos 1/4"	1	5.23	5.23
Torneado rótulas	8	4.00	32.00
Guante ROBESBON	1	28.00	28.00
Impresión 3D	1	369.05	369.05
3D resina líquida XTC	1	37.65	37.65
Compresor	1	110.00	110.00
Varios	1	100.00	100.00
		Subtotal	3,703.77
		IVA 14%	518.53
		<b>Total \$</b>	<b>4,222.30</b>

## CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

En este capítulo se presenta los resultados obtenidos después de la culminación del proyecto, realizando el respectivo análisis de cada uno de los aspectos establecidos previamente.

### 4.1 DISEÑO CAD.

Después de realizar varias impresiones 3D y las respectivas pruebas de funcionamiento del mecanismo, se efectúa el rediseño de cada elemento que forma parte del dispositivo rehabilitador, para obtener el prototipo final como se observa en la Figura 4.1, capaz de ejecutar los movimientos establecidos. Además, los puntos críticos del mecanismo donde se presente el mayor esfuerzo pueden ser modificados aumentando el relleno en la impresión de las piezas.



Figura 4.1: Prototipo final del mecanismo

Una vez realizado el ensamblaje completo del mecanismo, incluyendo los 7 cilindros neumáticos se obtiene un peso total de 1.06 kg, determinando que el dispositivo se encuentra en un peso admisible, de tal forma que no afecta ni causa daños a la mano.

## **4.2 ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS.**

Al efectuar la simulación del mecanismo del dedo medio se obtienen los esfuerzos combinados de Von Misses, llegando a determinar que el sistema soporta la fuerza ejercida por el cilindro, incluyendo la fuerza de oposición que generan los dedos al movimiento. Además, se puede establecer que es lo suficientemente resistente a pesar de que se presenta una cierta deformación en la sujeción del dedo con la base. Dentro de este análisis se obtiene un factor de seguridad alto que refleja que puede soportar sobrecarga.

## **4.3 MECANIZADO.**

Mediante el proceso de ingeniería inversa se logró construir los cilindros neumáticos de doble efecto, rigiéndose a las tolerancias de diseño para cilindros y seleccionando materiales resistentes y maquinables para manufactura de culatas, vástago y camisa; donde después de realizar el ensamblaje de cilindro con las dimensiones requeridas, se pudo apreciar que al efectuar las pruebas de funcionamiento con presiones bajas los cilindros no funcionan correctamente y estos presentan inestabilidad, por tal motivo se realizan las posteriores pruebas de funcionamiento con presiones más elevadas comprobando así que el cilindro es funcional y más controlable a partir de los 4 bares de presión, debido a que ejerce la fuerza necesaria para generar el movimiento del mecanismo, evitando también los cochones de aire dentro del cilindro.

## CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

### 5.1 CONCLUSIONES.

- Mediante especialistas en el área de fisioterapia se determinó los métodos de rehabilitación pasiva entre los cuales están el proceso de reactivación de motricidad gruesa y fina que cumple el mecanismo para ayudar en el proceso de recuperación de la movilidad de los dedos de la mano.
- Se consiguió el dimensionamiento del mecanismo mediante las medidas antropométricas de una mano promedio obteniendo así a un sujeto de estudio, además se empleó una adecuada geometría para conseguir que el mecanismo genere los movimientos preestablecidos.
- Con el proceso de ingeniería inversa se logró diseñar y manufacturar cilindros neumáticos de doble efecto con características específicas para ser montados sobre el mecanismo, comprobando así la factibilidad de construir los cilindros, abaratando costos y con la carrera requerida para dar la movilidad necesaria.
- Con la construcción y pruebas del mecanismo se puede concluir que cumple con las especificaciones de ser un dispositivo liviano, ergonómico y resistente, debido a la adecuada selección de materiales para impresión de piezas y manufactura tanto de los pasadores para la sujeción como de los cilindros neumáticos, llegando a obtener un peso con todos los implementos de 1.06 Kg.

- El mecanismo cumple con los movimientos máximos especificados por fisioterapeutas para que no exista afectación en la movilidad funcional de los dedos de la mano, así mismo el dispositivo no realiza ejercicios bruscos de rehabilitación y se encuentra delimitado por topes máximos brindados por la sujeción de los cilindros en la parte posterior que permiten que los dedos tomen la posición inicial y dicha posición no sea excedida.
- Con el proyecto realizado se logra construir un rehabilitador pasivo de dedos de la mano a un costo considerablemente menor a dispositivos similares, con características específicas cumpliendo con las necesidades de nuestro entorno.

## **5.2 RECOMENDACIONES.**

- Se recomienda ampliar los conocimientos de rehabilitación con especialistas en fisioterapia, con el fin de determinar los ejercicios adecuados de recuperación de los dedos de la mano sin lesionar a los pacientes.
- Es recomendable elegir a un sujeto de estudio como parte de la investigación, determinarlas medidas antropométricas de varias manos de personas en rangos de edad y de estatura, para poder obtener de este modo un dimensionamiento promedio para el diseño del dispositivo.

- Se debe considerar para la construcción del dispositivo rehabilitador como para el cilindro, materiales que puedan encontrarse dentro del mercado nacional, para que dichos elementos puedan ser reemplazados en caso de que sea necesario.
- Se recomienda utilizar las tolerancias de diseño para la manufactura de los cilindros neumáticos, debido a que cada pieza del cilindro debe encajar de forma exacta y precisa con su elemento correspondiente de ensamblaje, además debe estar sellado herméticamente para evitar las fugas de aire, lo que podría provocar que el cilindro no pueda ser controlado.
- Para el mecanizado de culatas, camisa y vástago, se debe utilizar materiales adecuados para evitar la corrosión y fugas, además que soporten altas presiones de funcionamiento.
- Se recomienda utilizar el dispositivo rehabilitador en el valor de presión admitida, ya que un alto ingreso de flujo de aire podría dañar el mecanismo como también se podrá afectar a la mano si el guante se encuentra en uso.

## Bibliografía

- Buenache, A. J. (2010). *TEORÍA, DISEÑO Y SIMULACIÓN DE COMPONENTES Y CIRCUITOS PARA LA DOCENCIA INTERACTIVA VÍA WEB*. Madrid.
- Castillo, T. D., & Pauta, P. V. (2011). *Guía de Estrategias Metodológicas Dirigida a Docentes para desarrollar la Moricidad Fina en Niños de 4 a 5 años*. Cuenca. Obtenido de <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/2255/1/tps757.pdf>
- Chiriboga, M. V. (2002). *Anatomía Humana Generalidades* (Tercera ed., Vol. 1). Quito: Panorama.
- Comín, M. (1998). *Biomecánica Articular y Sustituciones Protésicas* (1a ed.). Valencia.
- CONADIS. (Abril de 2015). *Registro Nacional de Discapacidades*. Obtenido de Ministerio de Salud Pública.
- De Maquinas y Herramientas*. (11 de septiembre de 2014). Obtenido de Mecanizado: <http://www.demaquinyherramientas.com/mecanizado/machos-de-roscar-tipos-y-aplicaciones#comments>
- del Val, N. S. (2010). *Efectividad de la Movilización Neuromeníngea Frente a la Efectividad del Ejercicio Terapéutico en Pacientes con Lumbociática Crónica*. Alcalá de Henares.
- Díaz del Castillo, F. R. (2012). *Conformado de Materiales Plásticos*. Cuautitlán Izcalli.

- Ebel, F., Idler, S., Prede, G., & Scholz, D. (2010). *FESTO Neumática Electroneumática Fundamentos*. Alemania: Denkendorf.
- Enríquez, S., Narváez, Y., & Vivas, O. (2014). Sistema Róbótico de Tipo Exoesqueleto para Rehabilitación de la Mano. *XXXV Jornadas de Automática*. Valencia. doi:ISBN-13:978-84-697-0589-6
- FESTO. (2012). *EXOHAND*. Germany: Festo AG & Co. KG.
- Fonseca, V. D. (1988). *Ontogénesis de la motricidad*. Madrid.
- GLOREHA. (s.f.). *Anatomical Concepts*. Obtenido de (UK) Limited:  
<http://www.gloreha.co.uk/main-features/>
- Kalpakjian, S., & Schmid, S. R. (2008). *Manufactura, Ingeniería y Tecnología* (Quinta ed.). Mexico: PEARSON.
- Lopategui, E. C. (2012). *EJERCICIOS TERAPÉUTICOS: Movilidad Articular Y Flexibilidad*.
- López, F. C. (2004). *Fundamentos de los Polímeros*. Mérida.
- López, L. A. (2012). Biomecánica y Patrones Funcionales de la Mano. *4(1)*, 22-23. Colombia. Obtenido de  
<http://www.bdigital.unal.edu.co/32030/1/31373-113677-1-PB.pdf>
- López, M. d., Díaz, Á. F., Sánchez, M. A., & Gómez, J. I. (2013). *Fisioterapia y adulto mayor*. Jaen.
- Manjarrés, P. A. (2009). *Diseño y construcción de un sistema de trasportación y clasificación por color y tipo de material*. Quito.
- Moore, K. L., Dalley, A. F., & Agur, A. M. (2009). *Anatomía con Orientación Clínica* (Cuarta ed.). Médica Panamericana.
- Norton, R. L. (2014). *Diseño de máquinas. Un enfoque integrado* (Cuarta ed.). Nueva York: Pearson.



- Palacios, C. G., Prieto, R. P., & Anguiano, A. G. (2009). *Determinación de Contingencia en Patología de Muñeca y Mano*. Barcelona.
- Panasonic. (13 de Noviembre de 2007). XATAKA. Obtenido de <http://www.xataka.com/otros/guantes-de-rehabilitacion-de-panasonic>
- Peiró, M., & Santonja, F. (s.f.). Tratamiento rehabilitador de los procesos traumáticos del miembro superior. *Procedimientos de traumatología, ortopedia, rehabilitación y medicina del deporte en medicina de familia*. Obtenido de <http://www.santonjatrauma.es/wp-content/uploads/2014/11/Rehabilitaci%C3%B3n-del-Miembro-Superior.pdf>
- PEÑA, E., TICÓ, N., LOPEZ, J., ABENOZA, M., & ROMERO, G. (2013). Exoesqueleto para Mano Discapacitada con Movimiento y Sensibilidad, pero sin Fuerza. *Ortopedia Técnica*, (pág. 1). Manresa. Obtenido de [https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/17562/TRABAJO\\_OT.pdf?sequence=1](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/17562/TRABAJO_OT.pdf?sequence=1)
- Plancarte, J., Olayo, E., & Pita, J. (29 de Agosto de 2013). *IEM-CHN*. Obtenido de Ventajas y Desventajas de los Sistemas Hidráulicos y Neumáticos: <http://iem-chn.blogspot.com/2013/08/14-ventajas-y-desventajas-de-los.html>
- Quiñonez, P. G. (2005). *Cirugía de la Mano*. Maracay. Obtenido de [http://www.fundacite-aragua.gob.ve/pdf/cirugia\\_mano1.pdf](http://www.fundacite-aragua.gob.ve/pdf/cirugia_mano1.pdf)
- ROBESBON. (3 de Junio de 2015). *AlliExpress*. Obtenido de [http://es.aliexpress.com/store/product/Robesbon-Men-Warm-MTB-Mountain-Bike-Ciclismo-Guantes-Full-Finger-Bike-Outdoors-Sports-Luvas-Winter-Autumn/1827015\\_32437389545.html?storeId=1827015](http://es.aliexpress.com/store/product/Robesbon-Men-Warm-MTB-Mountain-Bike-Ciclismo-Guantes-Full-Finger-Bike-Outdoors-Sports-Luvas-Winter-Autumn/1827015_32437389545.html?storeId=1827015)

Rotor Clip Company, I. (2005). *Rotor Clip Catalogo de Productos*. Germany.

Rubio, E. M., & Sebastián, M. Á. (2011). *Ejercicios y problemas de mecanizado*.

Madrid: PEARSON. Obtenido de

<https://es.scribd.com/doc/171352240/Ejercicios-y-Problemas-de-Mecanizado>

Santos, L. G., Beltrán, J. A., & Pitarque, C. B. (2013). *Lesiones deportivas de la muñeca y mano*. Valencia.

Serrano, A. S. (2009). *Neumática Práctica* (1ra ed.). Madrid: Paraninfo.

Obtenido de [https://books.google.com.ec/books?id=-](https://books.google.com.ec/books?id=-IUVsZSC6GsC&printsec=frontcover&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false)

[IUVsZSC6GsC&printsec=frontcover&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.ec/books?id=-IUVsZSC6GsC&printsec=frontcover&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false)

Shigley, J. E., Mischke, C. R., & Brown, T. H. (2004). *Standar Handbook of Machine Design* (3a. ed.). Nueva York: McGraw-Hill.

Solé, A. C. (2011). *Neumática e Hidráulica* (2° ed.). Barcelona: MARCOMBO.

Spiegel, M. R. (1991). *ESTADÍSTICA*. McGraw-Hill Interamericana.

Taboadela, C. H. (2007). *Goniometría : una herramienta para la evaluación de las incapacidades* (1a ed.). Autónoma de Buenos Aires: Asociart ART.

Obtenido de <http://amlar-res.com/wp-content/uploads/2012/03/Goniometria.pdf>

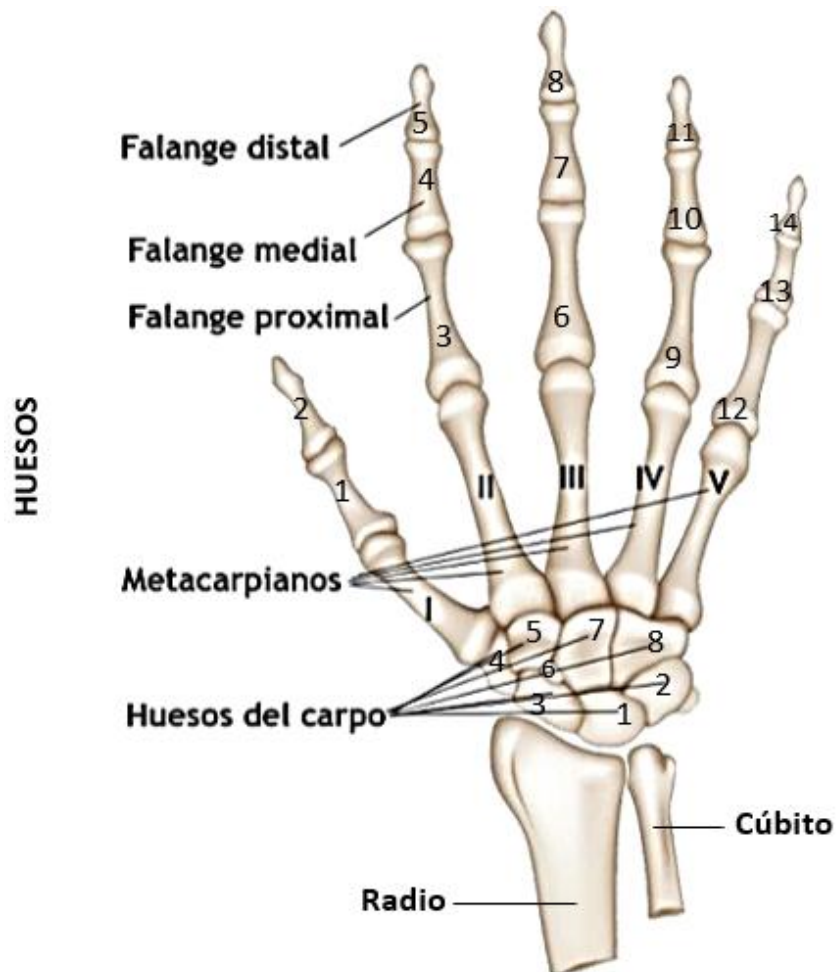
Tortora, D. (2004). *Principios de Anatomía y Fisoplogía* (13a ed.). Argentina:

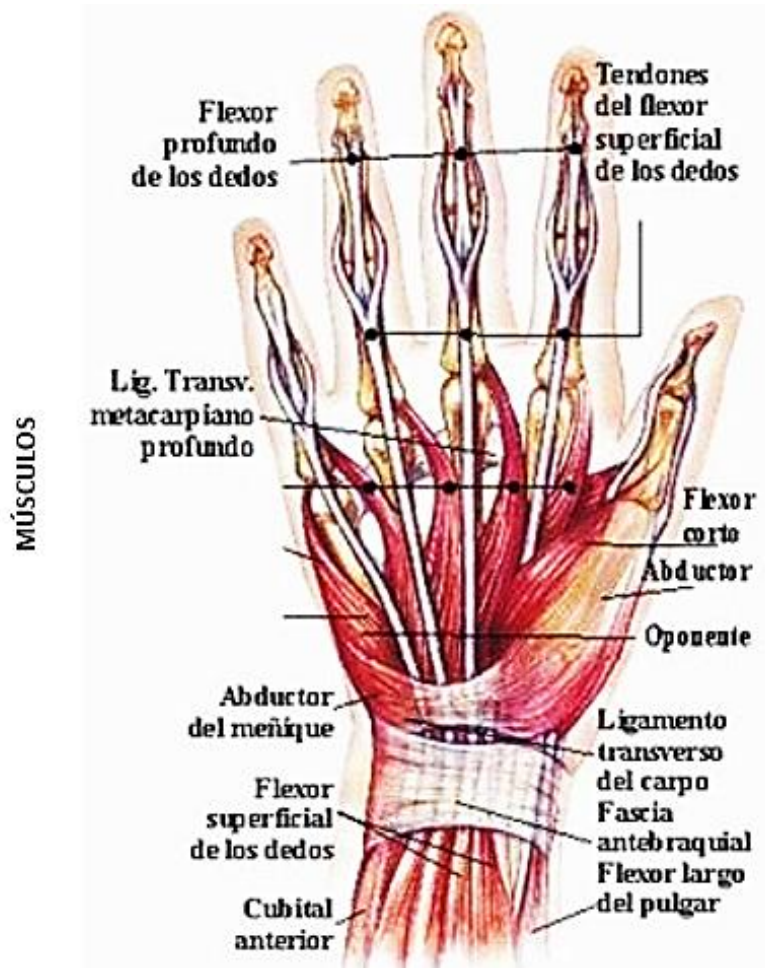
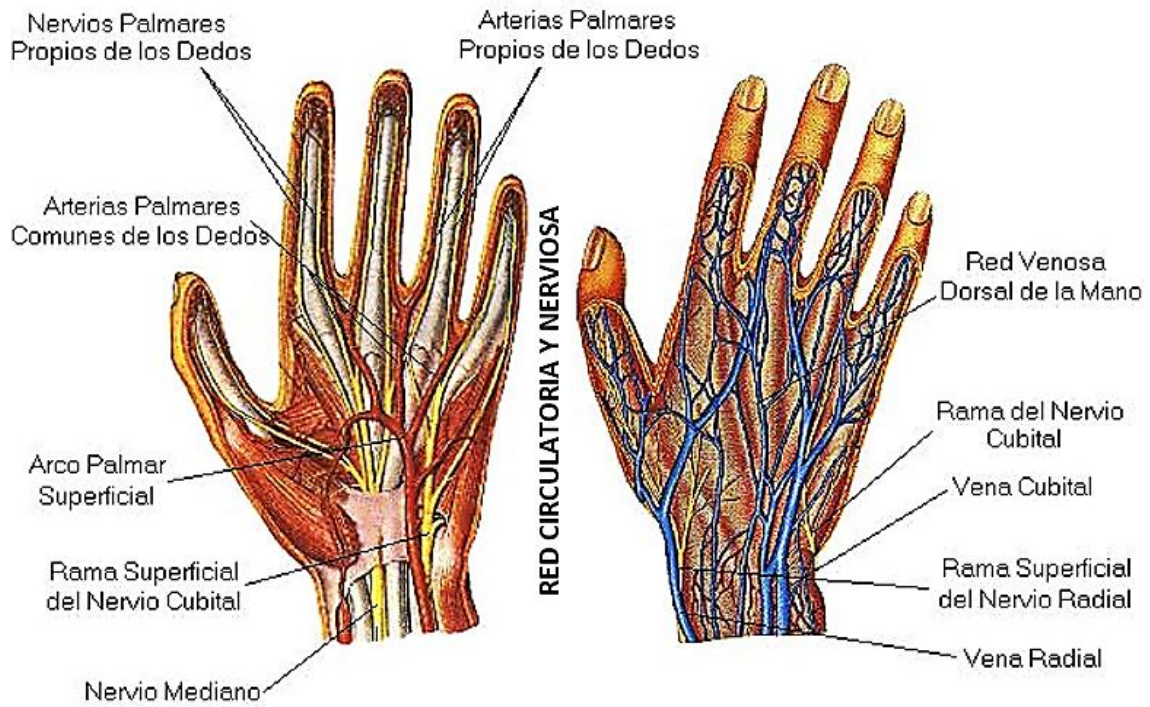
Panamericana. Obtenido de

<http://www.colimdo.org/media/4277966/anatomofisiologia.pdf>

**ANEXOS**

**ANEXO A: ATLAS DE LA MANO (HUESOS, RED CIRCULATORIA, RED NERVIOSA Y MÚSCULOS).**





## ANEXO B: INFORMACIÓN OBTENIDA DEL ÁREA DE FISIOTERAPIA.



### UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

#### CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

#### REHABILITADOR PASIVO DE DEDOS DE LA MANO

FECHA: 21 de octubre del 2015

RAZÓN SOCIAL: Hospital Clínica Metropolitana

#### TEMAS TRATADOS:

- Fisiología y morfología de la mano
- Patologías de la mano más comunes
- Parálisis del nervio radial
- Parálisis del nervio mediano
- Parálisis del nervio cubital
- Patrón flexor de mano hemipléjica
- Tratamientos de rehabilitación de los dedos de la mano.
- Bajar inflamación, reducir el dolor, rehabilitar los movimientos de forma precoz, reactivación de motricidad fina y gruesa.

#### TESISTAS

NOMBRE	C.I.	FIRMA
Andrade Pastas María Eugenia	040142570-7	
Iza Yugsi Pablo Gabriel	100341616-9	

Dr. Irving Gómezjurado  
 COORDINADOR LOCAL DE ÁREA

Irving Gómezjurado S.  
 FISIOTERAPISTA  
 Libro 7 Folio 56 N°. 111  
 SENECYT 1005-09-961911

## ANEXO C: TABLAS DE COMPARACIONES.

### MATERIALES PARA IMPRESIÓN DE PIEZAS DEL MECANISMO

#### REHABILITADOR

	<b>Grilón</b>	<b>Polipropileno</b>	<b>Pilietileno APM</b>
<b>Definición</b>	Es un termoplástico semicristalino que posee buena resistencia mecánica, tenacidad y resistencia al impacto elevadas; tiene buen comportamiento al deslizamiento, también posee buena resistencia al desgaste; por ello es apropiado como plástico de ingeniería de uso universal, en construcciones mecánicas y trabajos de mantenimiento industrial.	El polipropileno (PP) es el polímero termoplástico, parcialmente cristalino, que se obtiene de la polimerización del propileno (o propeno). Pertenece al grupo de las poliolefinas y es utilizado en una amplia variedad de aplicaciones que incluyen empaques para alimentos, tejidos, equipo de laboratorio, componentes automotrices y películas transparentes.	Es una molécula compuesta únicamente de átomos de carbono e hidrógeno que se caracteriza por tener propiedades químicas y mecánicas sobresalientes, destacándose su lubricidad, resistencia al impacto y abrasión, y por ser químicamente inerte.
<b>Aplicaciones</b>	Engranajes	Juguetes;	
	Bujes	Boomerangs;	
	Roldanas	Vasos de plástico;	
	Ruedas	· Tanque y depósitos para químicos	
	Sinfines	· Mobiliario de laboratorio	
	Estrellas distribuidoras	· Placas de presión para filtros	
	Guías	· Componentes para bombas	
	Tornillos	· Prótesis, etc.	
	Arandelas		
	Poleas		
	Rango de temperatura de trabajo -40°C +90°C.	· No mancha	Cristalinidad y transparencia, aunque admite cargas de colorantes
	Alta resistencia mecánica.	No es tóxico	Buen comportamiento




<b>Características</b>			frente a esfuerzos permanentes
	Buena resistencia a la fatiga.	Posee una gran capacidad de recuperación elástica.	Alta resistencia al desgaste
	Alto poder amortiguador.	Tiene una excelente compatibilidad con el medio.	Muy buen coeficiente de deslizamiento
	Buenas propiedades de deslizamiento.	Es un material fácil de reciclar	Buena resistencia química
	Resistencia sobresaliente al desgaste.	Posee alta resistencia al impacto	Buenas propiedades térmicas
	Autoextingible.		Totalmente reciclable
	Maquinable	Maquinable	Aprobado para su uso en productos que deban estar en contacto con productos alimentarios.
			Alta rigidez y dureza.

	<b>Acrílico</b>	<b>Polvo Cerámico</b>	<b>PLA</b>
<b>Definición</b>	El acrílico es material noble, fácil de trabajar, con una transparencia 5% mayor que el vidrio común, buena resistencia al impacto, moldeable por calentamiento y con excelente tolerancia a los rigores de la intemperie y la radiación ultra violeta.	Son sólidos inorgánicos no metálicos producidos mediante tratamiento térmico. Comparados con los metales y plásticos son duros, no combustibles y no oxidables Pueden utilizarse en ambientes con temperatura alta, corrosivos y tribológicos.	Es un polímero que puede ser moldeado y transformado en diversos objetos con formas diferentes
<b>Aplicaciones</b>	Parabrisas de aviones y Ventanas	Fabricación de gres porcelánico	Industria del empaquetado
	Parabrisas de motos	Artefactos sanitarios	Industria textil
	Bañaderas	Esmaltes	Industria médica
	Acuarios		Industria farmacéutica
	Barreras acústicas		Impresiones 3D
	Incubadoras		
	Cunas		



	Camas solares		
	Dispositivos para Laboratorios		
<b>Características</b>	Resistencia a la intemperie	Son duros, no combustibles y no oxidables.	Bajo peso específico comparado con otras fibras naturales
	Claridad		Una tenacidad más alta o lo que es lo mismo una fuerza extensible mayor
	Peso liviano	Gran resistencia a altas temperaturas, con gran poder de aislamiento térmico y, también, eléctrico.	Resistencia UV excepcional comparado con otras fibras.
	Resistencia al impacto	Gran resistencia a la corrosión y a los efectos de la erosión que causan los agentes atmosféricos.	Densidad más baja
		Alta resistencia a casi todos los agentes químicos.	Alta resistencia al moldeado y doblado.
	Transmisión de luz	Una característica fundamental es que pueden fabricarse en formas con dimensiones determinadas	Maquinable
	Propiedad aislante	Los materiales cerámicos son generalmente frágiles o vidriosos. Casi siempre se fracturan ante esfuerzos de tensión y presentan poca elasticidad.	Temperaturas respectivas son fácilmente controlables
	Acabado de alto brillo o con texturas. Buena resistencia mecánica. Excelente transparencia y transmitancia (92%). Excelente resistencia a los agentes atmosféricos. Fácil pulido y maquinado. Buena capacidad de termoformado. Reciclable.		Recuperación de la humedad perceptiblemente más baja con ello se hace un hueco en los tejidos de secado rápido.
	Maquinable	No Maquinable	Biodegradable

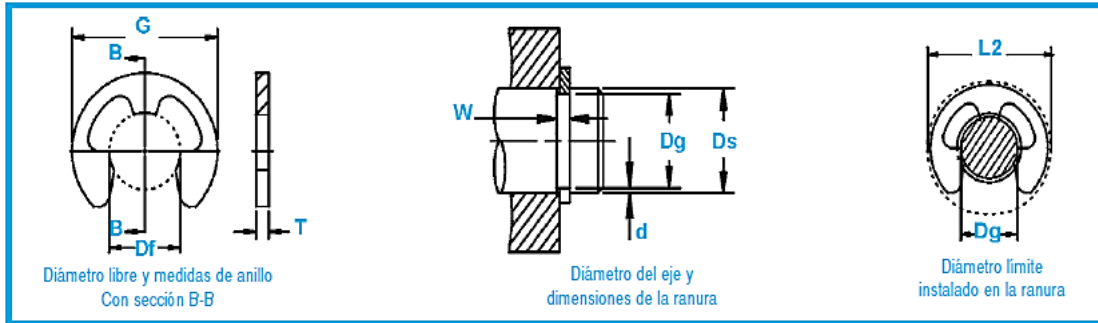
## GUANTES PARA LA SUJECIÓN DEL MECANISMO REHABILITADOR

	<b>Guante anti cortes</b>	<b>Guante G7</b>	<b>Guante ROBESBON</b>
<b>Características</b>	De trabajo	Ideal para trabajar con cuchillos muy filosos	Almohadillas 3D de GEL
	Barnizados con poliuretano	No desprende pelusa	Pliegues para amortiguación
	Para la industria del automóvil	Recomendado para el manipuleo de carnes y alimentos	Malla de ventilación
	Extraordinaria resistencia a desgarros	Utilizado para la manipulación de hojas de aluminio, chapas, vidrios, corte de rebabas, etc	Tejido transpirable en la parte posterior para asegurar una ventilación eficaz
	Sin costuras		Diseñado de poliéster y licra
	Magnífico ajuste, destreza y flexibilidad.		Excelente protección y confort
	Excelente transpirabilidad y sensación de frescor.		Evita la generación de sudor
	Confort		
			

ANEXO D: CATÁLOGO DE ROTOR CLIP.



# Anillos de retención E



NO. DE ANILLO	EJE			TAMANO DE RANURA				TAMANO Y PESO DEL ANILLO				DIAM. LIMITE			CARGA DE EMPUJE (lb)		
	DIAMETRO			DIAMETRO	ANCHURA	PROFUN- DIDAD	DIAMETRO LIBRE		ESPEJOR***		Peso por 1000 piezas	Diámetro externo REF.	Instalado en la ranura	Límites de esquinas rectas	Factor de seguridad del anillo de 3 Anillo	Factor de seguridad del anillo de 2 Tuerca	
	Ds DEC	Ds FRAC	Ds mm				Dg	Tol.	d	Df							Tol.
**E-4	.040	-	1.0	.026		.012	.007	.025	+ .001		.010	lbs. .009	G .079	L2 .090	Pr 13	Pg 6	
E-6	.062	1/16	1.6	.052	+ .002	.012	.005	.051	- .003		.010	±.001	.030	.156	.165	20	7
SE-6	.062	1/16	1.6	.052	- .000	.012	.005	.051			.010		.028	.140	.150	20	7
YE-6	.062	1/16	1.6	.052	*.0015	.023	.005	.051			.020		.094	.187	.200	41	7
SE-9	.094	3/32	2.4	.074		.020	.010	.069	+ .002-.003		.015		.10	.230	.245	46	20
E-9	.094	3/32	2.4	.074		.020	.010	.073			.015		.058	.187	.200	46	20
SE-11	.110	7/64	2.8	.079		.020	.015	.076			.015		.31	.375	.390	61	40
SE-12	.125	1/8	3.2	.095		.029	.015	.094			.025		.12	.214	.225	110	45
E-12	.125	1/8	3.2	.095		.020	.015	.094			.015		.087	.230	.240	66	45
SE-14	.140	9/64	3.6	.102		.020	.019	.100			.015		.060	.203	.215	76	60
YE-14	.140	9/64	3.6	.110		.020	.015	.108			.015		.10	.250	.265	76	45
E-14	.140	9/64	3.6	.105	+ .002	.029	.017	.102	+ .001		.025	±.002	.21	.270	.285	173	60
SE-15	.156	5/32	4.0	.118	- .000	.046	.019	.116	- .003		.042		.76	.375	.390	300	70
E-15	.156	5/32	4.0	.116	*.002	.029	.020	.114			.025		.21	.282	.295	178	75
SE-17	.172	11/64	4.4	.127		.029	.022	.125			.025		.24	.312	.325	183	90
SE-18	.188	3/16	4.8	.125		.029	.031	.122			.025		.45	.375	.39	203	136
YE-18	.188	3/16	4.8	.147		.029	.020	.145			.025		.70	.470	.485	193	90
ZE-18	.188	3/16	4.8	.125		.029	.031	.122			.025		1.05	.550	.565	203	136
E-18	.188	3/16	4.8	.147		.029	.020	.145			.025		.29	.335	.35	193	90
SE-21	.219	7/32	5.6	.188		.029	.015	.185			.025		.47	.437	.45	228	75
E-25	.250	1/4	6.3	.210		.029	.020	.207			.025		.76	.527	.54	259	115
SE-31	.312	5/16	7.9	.250	+ .003	.029	.031	.243	+ .002		.025		.57	.500	.52	330	225
YE-31	.312	5/16	7.9	.250	- .000	.029	.031	.243	- .004		.025		1.220	.670	.685	325	220
SE-37	.375	3/8	9.5	.306	*.004	.039	.034	.303			.035		1.050	.567	.587	680	300
E-37	.375	3/8	9.5	.303		.039	.036	.300			.035		1.5	.660	.68	700	315
E-43	.438	7/16	11.1	.343		.039	.047	.337			.035		1.5	.687	.71	842	480
SE-43	.438	7/16	11.1	.380		.039	.029	.375			.035		1.0	.600	.62	812	280
E-50	.500	1/2	12.7	.396		.046	.062	.392			.042		2.5	.800	.82	1127	600
E-62	.625	5/8	15.9	.485		.046	.070	.480			.042		3.2	.940	.96	1441	1050
SE-74	.750	3/4	19.0	.625		.056	.062	.616	+ .003		.050		4.3	1.000	1.02	1979	1100
E-75	.750	3/4	19.0	.580		.056	.085	.574	- .005		.050		5.8	1.120	1.14	2030	1500
E-87	.875	7/8	22.2	.675		.056	.100	.668			.050		7.6	1.300	1.32	2385	2050
SE-98	.984	63/64	25.0	.835		.056	.074	.822			.050		9.2	1.500	1.53	2639	1750
E-98	1.000	1	25.4	.835		.056	.082	.822			.050		9.2	1.500	1.53	2690	1900
SE-118	1.188	1-3/16	30.2	1.079	+ .005	.068	.054	1.066	+ .006		.062	±.003	11.3	1.626	1.67	3501	1500
SE-137	1.375	1-3/8	34.9	1.230	- .000 + .005	.068	.072	1.213	- .010		.062		15.4	1.875	1.92	4162	2350

ANCHURA (W) MÍNIMA DE RANURA LISTADA.

\* F.I.M. (MOVIMIENTO TOTAL DE INDICADOR)- DESVIACIÓN MÁXIMA PERMITIDA DE CONCENTRICIDAD ENTRE RANURA Y EJE.

\*\* SÓLO DISPONIBLE EN COBRE DE BERILIO. IBASADO EN LAS RANURAS FABRICADAS CON ACERO LAMINADO EN FRÍO. PARA UNA EXPLICACIÓN DE LAS FÓRMULAS APLICADAS PARA DERIVAR LAS CARGAS DE EMPUJE Y OTROS DATOS DEL RENDIMIENTO, PÓNGASE EN CONTACTO CON EL DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE ROTOR CLIP.

\*\*\*PARA LOS ANILLOS DE RETENCIÓN CON RECUBRIMIENTO ELECTROLÍTICO, AÑADA 0.002" AL ESPESOR MÁXIMO INDICADO.

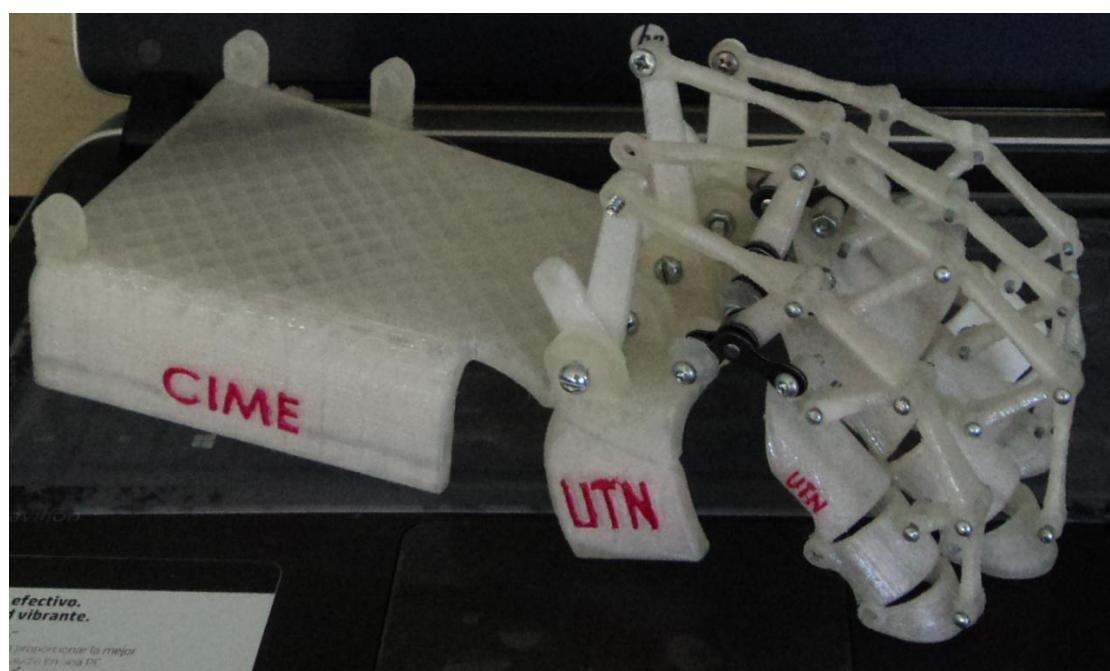
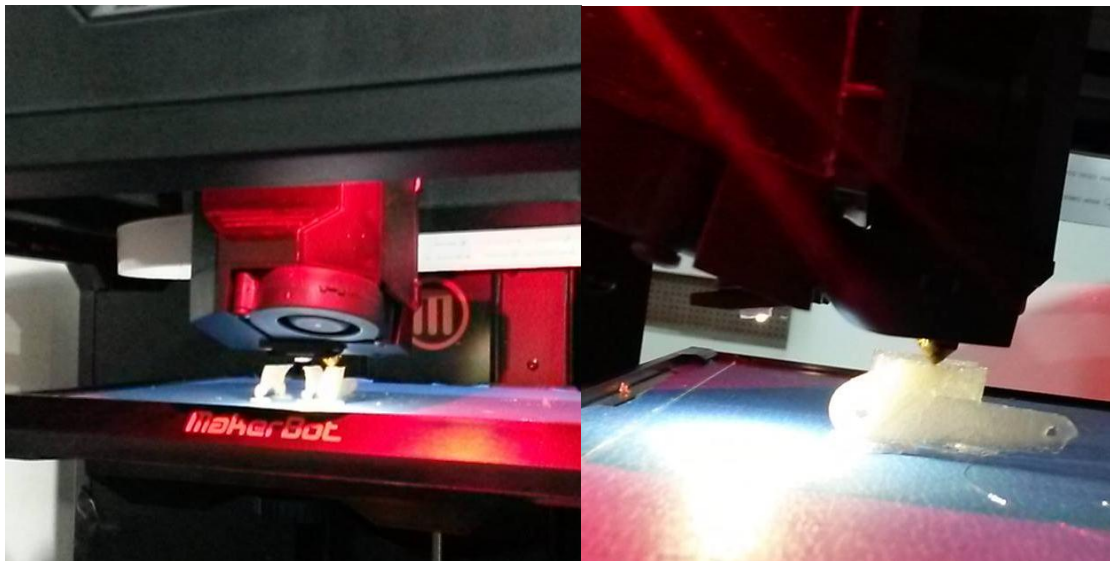
EL ESPESOR MÁXIMO SERÁ UN MÍNIMO DE 0.0002" MENOR QUE LA ANCHURA (W) DE RANURA INDICADA.

**ANEXO E: PLANOS EN SOLIDWOKS DE LAS PIEZAS DEL  
MECANISMO.**

**ANEXO F: IMPRESIONES PREVIAS A LA OBTENCIÓN DEL PROTOTIPO  
FINAL.**

**IMPRESIÓN 3D EN POLVO CERÁMICO.**



**IMPRESIÓN 3D EN PLÁSTICO PLA – 20% RELLENO Y CALIDAD BAJA.**

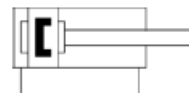
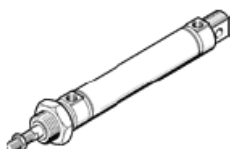
## ANEXO G: CILINDROS NEUMÁTICOS DISPONIBLES EN EL MERCADO.

### Cilindros normalizados DSNU-10-50-P-A

Número de artículo: 19186

FESTO

según DIN ISO 6432 para detección sin contacto. Diferentes posibilidades de fijación, con y sin elementos de sujeción adicionales. Con anillos amortiguadores elásticos en los fines de carrera.



### Hoja de datos

Característica	Propiedades
Carrera	50 mm
Diámetro del émbolo	10 mm
Rosca del vástago	M4
Amortiguación	P: amortiguación por tope elástico/placa a ambos lados
Posición de montaje	indistinto
Corresponde a la norma	CETOP RP 52 P ISO 6432
Extremo del vástago	Rosca exterior
Construcción	Émbolo Vástago Camisa del cilindro
Detección de la posición	para sensores de proximidad
Variantes	vástago simple
Presión de funcionamiento	1,5 ... 10 bar
Modo de funcionamiento	de doble efecto
Fluido	Aire comprimido según ISO 8573-1:2010 [7:4:4]
Indicación sobre los fluidos de funcionamiento y de mando	Opción de funcionamiento con lubricación (necesaria en otro modo de funcionamiento)
Clase de resistencia a la corrosión KBK	2
Temperatura ambiente	-20 ... 80 °C
Homologación	Germanischer Lloyd
Energía del impacto en las posiciones finales	0,05 J
Fuerza teórica con 6 bar, retroceso	39,6 N
Fuerza teórica con 6 bar, avance	47,1 N
Masa móvil con carrera de 0 mm	8,5 g
Peso adicional por 10 mm de carrera	2,7 g
Peso básico con carrera de 0 mm	37,3 g
Masa adicional por 10 mm de carrera	1 g
Tipo de fijación	con accesorios
Conexión neumática	M5
Indicación sobre el material	Conforme con RoHS
Información sobre el material de la tapa	Anodizado incoloro Aleación forjable de aluminio
Información sobre el material de las juntas	TPE-U(PU) NBR
Información sobre el material del vástago	Acero inoxidable de aleación fina
Información sobre el material de la camisa del cilindro	Acero inoxidable de aleación fina

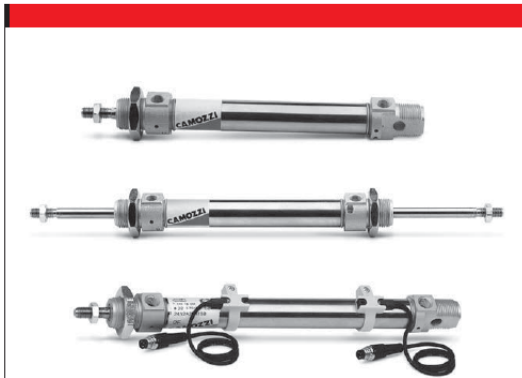


1

MOVIMIENTO

# Minicilindros Serie 16, 24 y 25

Serie 16: ø8, 10, 12 mm  
 Serie 24: ø16, 20, 25 mm - magnéticos  
 Serie 25: ø16, 20, 25 mm - magnéticos amortiguados



- » Simple y doble efecto
- » Cetop RP52-P DIN/ISO 6432
- » Vástago y camisa en inox
- » Cabezales en aluminio anodizado

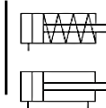
## CARACTERÍSTICAS GENERALES

<b>Tipo de construcción</b>	Compacto Sellado
<b>Funcionamiento</b>	simple y doble efecto
<b>Materiales</b>	cabezales AL anodizado - vástago y camisa inox - pistón AL - juntas NBR - PU - otros ver codificación
<b>Sujeción</b>	tuerca - brida - pies - Basculante
<b>Careras min - max</b>	Serie 16 ø 8 + ø 10: 10 - 250 mm - Serie 16: ø 12: 10 - 300 mm - Serie 24 ø 25 ø 16: 10 - 600 mm; ø 20 - ø 25: 10 - 1000 mm
<b>Díámetro</b>	Serie 16: ø 8, 10, 12 - Serie 24 e 25: ø 16, 20, 25
<b>Temperatura de trabajo</b>	0°C + 80°C (con aire seco -20°C)
<b>Presión de trabajo</b>	1 + 10 bar (doble efecto); 2 + 10 bar (simple efecto)
<b>Fluido</b>	aire filtrado, sin lubricación. En caso de utilizar aire lubricado se a conseja aceite ISOVG32 y no interrumpir nunca la lubricación
<b>Velocidad</b>	10 + 1000 mm/sec (sin carga)

## JOUCOMATIC MICRO-CILINDRO Ø 2,5 a 6 mm - simple y doble efecto

## NEUMATICS

Serie  
**435**  
Tipo  
**MICRO 10**



### INFORMACIÓN GENERAL

**Fluido**  
**Presión de utilización** Aire o gas neutro, filtrado a 5µm, lubricado o no min. 3,5 bar (3 bar para Ø 6 mm) máx. 8 bar  
**Temperatura ambiente** + 5 °C a +60 C

### CONSTRUCCIÓN

**Tubo** Latón niquelado  
**Junta de pistón** NBR (nitrilo)  
**Vástago** Acero inoxidable  
**Resorte (simple efecto)** Acero  
**Suministrados con 2 tuercas de vástago**



Ø (mm)	carerra (mm)	peso (kg)	Ø roscado	presión de utilización (bar)		fuerza mín. a 8 bar (N)	esfuerzo de retorno (N)		código
				mín.	máx.		mín.	máx.	
	5	0,0015	cánula para tubo Ø 2 mm int.	3,5	8	2,5	0,65	1,2	43500460
	10	0,0019					0,65	1,2	43500461
	5	0,0034	cánula para tubo Ø 2 mm int.	3,5	8	7	1,5	2,9	43500462
	10	0,0044					1,5	2,9	43500463
	15	0,0052					1,5	2,9	43500464
	20	0,0061					1,5	2,9	43500465
	25	0,0061					3,0	5,3	43500466
	5	0,010	roscado Ø M3	3	8	17	2,9	5,3	43500467
	10	0,012					2,9	5,3	43500468
	15	0,015					2,9	5,3	43500469
	20	0,018					2,9	5,3	43500470
	25	0,021					3,0	5,3	43500470
	5	0,010	roscado Ø M3	3	8	22	-	-	43500500
	10	0,012					-	-	43500501
	15	0,015					-	-	43500502
	20	0,018					-	-	43500503
	25	0,021					-	-	43500504



**ANEXO H: PLANOS EN SOLIDWOKS DE LOS ELEMENTOS DEL  
CILINDRO NEUMÁTICO DE DOBLE EFECTO.**

## ANEXO I: CÓDIGOS G PARA EL MECANIZADO DE VÁSTAGO, CULATA ANTERIOR Y CULATA POSTERIOR.

### ➤ Vástago

Código G para el mecanizado de la parte delantera:

O0001	Numeración del programa
N10 G21 G90 G40 G95;	Parámetros iniciales para el mecanizado
N20 G54 G00 X70 Z100;	Posicionamiento de la herramienta
N30 T0101;	Selección para la herramienta de desbaste
N40 G92 S1267;	Velocidad del husillo
N50 G96 S443 M3;	Velocidad de avance y encendido
N60 G00 X6 Z0;	Posicionamiento cero pieza
N70 G71 U0.2 R0.2;	Desbaste longitudinal, profundidad de corte
N80 G71 P90 Q170 U0.2 W0.3 F0.2;	Parámetros inicio y fin de ciclo de corte.
N90 G00 X4.85;	Avance rápido a posición en X
N100 G01 Z0;	Avance controlado hacia posición en Z.
N110 X6 Z-1;	Corte longitudinal diagonal
N120 Z-14.60;	Avance desbaste en eje Z
N130 G2 X5.2 Z-15 R0.4;	Función, desbaste circular con R=0.4
N140 G01 X5.20 Z-15.6;	Avance controlado en eje X y Z
N150 G2 X6 Z-16 R0.4;	Función, desbaste circular inverso
N160 G01 X6;	Desbaste controlado en eje X
N170 Z-16;	Desbaste controlado en eje Z
N180 T0202;	Cambio de herramienta para acabado
N190 G92 S1300;	Velocidad del husillo para acabado
N200 G96 S500 M3;	Velocidad de avance para acabado

N210 G00 X8 Z0;	Posicionamiento rápido en coordenadas XZ
N220 G70 P90 Q170;	Ciclo de inicio y fin para acabado
N230 G00 X70 Z100;	Posicionamiento del porta herramienta en XZ
N240 G21 G00 G90 G95;	
N250 G54 G00 X70 Z100;	
N260 T0202;	Cambio de herramienta para roscado
N270 G54;	Traslado de origen
N280 G97 S1267 M3;	Velocidad de avance y encendido
N290 G00 X6;	Posicionamiento rápido en X
N300 Z-1;	Avance en eje z
N310 G76 X5.4 Z-14.8 P1913 Q479;	Parámetros de ciclo automático de roscado
N320 R-0.778 F2.209;	Parámetros de roscado
N330 G54 G00 X30 Z100;	Traslado de origen y posicionamiento porta herramientas
N340 M30;	Finalización del proceso
%	

Código G para el mecanizado de la parte trasera:

O0002	Numeración del programa
N10 G21 G90 G40 G95;	Parámetros iniciales para el mecanizado
N20 G54 G00 X70 Z100;	Posicionamiento de la herramienta
N30 T0101;	Selección de herramienta para desbaste
N40 G92 S1267;	Velocidad del husillo
N50 G96 S443 M3;	Velocidad de avance y encendido
N60 G00 X6 Z0;	Posicionamiento cero piezas
N70 G71 U0.2 R0.2;	Desbaste longitudinal, profundidad de corte
N80 G71 P90 Q170 U0.2 W0.3 F0.2;	Parámetros inicio y fin de ciclo de corte.
N90 G00 X2.71;	Avance rápido a posición en X.

N100 G01 Z0;	Avance controlado hacia posición en Z.
N110 X3 Z-0.25;	Corte longitudinal diagonal
N120 Z-22.05;	Avance desbaste en eje Z
N130 G2 X3.50 Z-22.30 R0.25;	Función, desbaste circular con R=0.25
N140 G01 X5.50 Z-22.30;	Avance controlado en eje X y Z
N150 G3 X6 Z-22.52 R0.25;	Función, desbaste circular inverso.
N160 G01 X6;	Desbaste controlado en eje X.
N170 Z-22.52;	Desbaste controlado en eje Z.
N180 T0202;	Cambio de herramienta para acabado
N190 G92 S1300;	Velocidad del husillo para acabado
N200 G96 S500 M3;	Velocidad de avance para acabado
N210 G00 X8 Z0;	Posicionamiento rápido en coordenadas XZ
N220 G70 P90 Q170;	Ciclo de inicio y fin para acabado
N230 G00 X70 Z100;	Posicionamiento del porta herramienta en XZ
N240 M30;	Finalización del proceso
%	

➤ Culata Anterior

Código G para el mecanizado de la parte trasera:

O0003	Numeración del programa
N10 G21 G90 G40 G95;	Parámetros iniciales para el mecanizado
N20 G54 G00 X70 Z100;	Posicionamiento de la porta herramienta
N30 T0101;	Selección de la herramienta para desbaste
N40 G92 S1241;	Velocidad del husillo
N50 G96 S559 M3;	Velocidad de avance y encendido
N60 G00 X20 Z5;	Posicionamiento cero pieza

N70 G71 U0.2 R0.2;	Parámetros, ciclo automático de desbaste longitudinal
N80 G71 P90 Q160 U0.3 W0.3 F0.2;	Parámetros inicio, fin, acabado y profundidad interna en ciclo de corte
N90 G00 X12.20;	Avance rápido a posición en X
N100 G01 Z0;	Inicio ciclo controlado desbaste en eje Z
N110 X12.20;	Desbaste longitudinal en eje X
N120 Z-5;	Desbaste longitudinal en eje Z
N130 X13.50;	Desbaste longitudinal en eje X
N140 Z-6;	Desbaste longitudinal en eje Z
N150 X15.23;	Desbaste longitudinal en eje X
N160 Z-33;	Desbaste longitudinal en eje Z
N190 G00 X70 Z50;	Fin de ciclo de desbaste
N200 T0202;	Posicionamiento rápido a coordenadas XZ
N210 S1300;	Cambio de herramienta para acabado
N220 G96 S600 M3;	Velocidad del husillo para acabado
N230 G00 X44 Z5;	Velocidad de avance para acabado
N240 G70 P90 Q180 F0.3;	Posicionamiento rápido a coordenadas XZ
N250 G00 X70 Z50;	Parámetros ciclo de inicio y fin para acabado
N260 T0303	Posicionamiento del porta herramienta
N270 G01 Z-3;	Cambio de herramienta para ranurado
N280 X12.20;	Inicio ciclo controlado, desbaste en eje Z
N290 X11.75 Z-3.265;	Desbaste en eje X
N300 Z-5;	Corte Longitudinal diagonal en eje XZ
N310 X12.20;	Avance desbaste en eje Z
N320 Z-3;	Desbaste en eje X
N330 X11.1 Z-3.65;	Desbaste en eje Z
N340 Z-5;	Corte longitudinal diagonal en eje XZ
N350 X12.20;	Desbaste en eje Z
N360 Z-3;	Desbaste en eje X
	Desbaste en eje Z

N370 X10.50 Z-4;	Corte Longitudinal diagonal en eje XZ
N380 Z-5;	Desbaste en eje Z
N390 X15;	Desbaste en eje X
	Fin ciclo de desbaste
N400 G00 X70;	Posicionamiento rápido en X
N410 G00 Z50;	Posicionamiento rápido en Z
N420 M30;	Finalización del proceso
%	

Código G para el mecanizado de la parte delantera:

O0004	Numeración del programa
N10 G21 G90 G40 G95;	Parámetros iniciales para el mecanizado
N20 G54 G00 X70 Z100;	Posicionamiento de la herramienta
N30 T0101;	Selección de herramienta para desbaste
N40 G92 S1241;	Velocidad del husillo
N50 G96 S559 M3;	Velocidad de avance y encendido
N60 G00 X15 Z0;	Posicionamiento cero pieza
N70 G71 U0.2 R0.2;	Parámetros desbaste longitudinal, profundidad de corte
N80 G71 P90 Q110 U0.3 W0.3 F0.2;	Parámetros inicio, fin, acabado y profundidad interna en ciclo de corte
N90 G00 X13.40;	Avance rápido a posición en X
N100 G01 Z-17;	Inicio ciclo controlado desbaste en eje Z
N110 X13.40;	Desbaste en eje X
N120 G00 X70 Z50;	Posicionamiento rápido en coordenadas XZ
N130 T0202;	Cambio de herramienta para acabado
N140 G92 S1300;	Velocidad del husillo para acabado
N150 G96 S600 M3;	Velocidad de avance para acabado
N160 G00 X44 Z5;	Posicionamiento rápido a coordenadas XZ

N170 G70 P90 Q110 F0.3;	Parámetros de inicio y fin de ciclo de acabado
N180 G00 X70 Z50;	Posicionamiento rápido del porta herramienta en XZ
N190 G54 G00 X70 Z100;	Posicionamiento de la herramienta traslado desde origen a XZ
N200 T1111;	Cambio de herramienta para desbaste interno
N210 G96 S559;	Velocidad de avance
N220 G92 S1241 M3;	Velocidad del husillo y encendido
N230 G00 X0 Z1;	Posicionamiento rápido en coordenadas XZ
N240 G72 W0.5 R1.5;	Parámetros ciclo automático de desbaste transversal
N250 G72 P260 Q360 U-1 W0.3 F0.2;	Parámetros inicio, fin, acabado y profundidad interna en ciclo de corte
N260 G01 Z-33;	Inicio Ciclo controlado desbaste en eje Z
N270 G01 X0 F0.2;	Desbaste y penetración en eje X
N280 G01 Z-33;	Desbaste en eje Z
N290 G01 X0 F0.2;	Desbaste y penetración en eje X
N300 X6.40;	Avance desbaste en eje X
N310 Z-17;	Avance desbaste en eje Z
N320 X8.4;	Avance desbaste en eje X
N340 Z-4.6;	Avance desbaste en eje Z
N350 X9.20;	Avance desbaste en eje X
N360 Z0;	Avance desbaste en eje Z
	Fin de ciclo de desbaste
N370 G42;	Compensación de radio a la derecha
N380 G70 P260 Q360 F0.3;	Parámetros de inicio y fin de ciclo de acabado
N390 G54 G00 X70 Z100;	Posicionamiento de la herramienta traslado desde origen a XZ
N400 G00 X0;	Posicionamiento rápido en eje x
N410 G01 Z-4.6;	Inicio ciclo controlado desbaste en eje Z

N420 G01 X1;	Avance controlado de desbaste en eje X
N430 X11.20;	Avance desbaste en eje X
N440 Z-1;	Avance desbaste en eje Z
N450 X0;	Avance desbaste en eje X
N460 Z5;	Avance desbaste en eje Z
	Fin de ciclo de desbaste
N480 G70 P400 Q460 F0.3;	Parámetros de inicio y fin de ciclo de acabado
N490 G00 X70 Z100;	Posicionamiento de porta herramientas en XZ
N500 M30;	Finalización del proceso
%	

➤ Culata posterior

Código G para el mecanizado de la parte externa:

O0005	Numeración del programa
N10 G21 G90 G40 G95;	Parámetros iniciales para el mecanizado
N20 G54 G00 X70 Z100;	Posicionamiento de la herramienta traslado desde origen a XZ
N30 T0101;	Selección de herramienta para desbaste
N40 G92 S1241;	Velocidad del husillo
N50 G96 S559 M3;	Velocidad de avance y encendido
N60 G00 X20 Z1;	Posicionamiento rápido de cero pieza
N70 G71 U0.2 R0.2;	Parámetros desbaste longitudinal, profundidad de corte
N80 G71 P90 Q160 U0.3 W0.3 F0.2;	Parámetros inicio, fin, acabado y profundidad interna en ciclo de corte
N90 G00 X12.20;	Posicionamiento rápido en eje X
N100 G01 Z0;	Inicio ciclo controlado desbaste en eje Z



N110 X12.20;	Avance desbaste en eje X
N120 Z-5;	Avance desbaste en eje Z
N130 X13.50;	Avance desbaste en eje X
N140 Z-6;	Avance desbaste en eje Z
N150 X15.23;	Avance desbaste en eje X
N160 Z-16.70;	Avance desbaste en eje Z
	Fin de ciclo de desbaste
N170 G00 X70 Z50;	Posicionamiento rápido del porta herramienta en coordenadas XZ
N180 T0202;	Cambio de herramienta para acabado
N190 G92 S1300;	Velocidad del husillo para acabado
N200 G96 S600 M3;	Velocidad de avance para acabado
N210 G00 X44 Z5;	Posicionamiento rápido en coordenadas XZ
N220 G70 P90 Q160 F0.3;	Parámetros de inicio y fin de ciclo de acabado
N230 G00 X70 Z50;	Avance rápido a posición en XZ
N240 T0303	Cambio de herramienta para ranurado
N250 G01 Z-3;	Inicio ciclo controlado, desbaste en eje Z
N260 X12.20;	Avance desbaste en eje X
N270 X11.75 Z-3.265;	Corte longitudinal diagonal en XZ
N280 Z-5;	Avance desbaste en eje Z
N290 X12.20;	Avance desbaste en eje X
N300 Z-3;	Avance desbaste en eje Z
N310 X11.1 Z-3.65;	Corte longitudinal diagonal
N320 Z-5;	Avance desbaste en eje Z
N330 X12.20;	Avance desbaste en eje X
N340 Z-3;	Avance desbaste en eje Z
N350 X10.50 Z-4;	Corte longitudinal diagonal en XZ
N360 Z-5;	Avance desbaste en eje Z
N370 X15;	Avance desbaste en eje X
	Fin de ciclo de desbaste
N380 G00 X70;	Posicionamiento rápido en eje X
N390 G00 Z50;	Posicionamiento rápido en eje Z




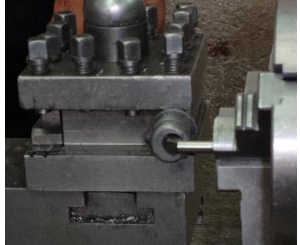

N400 M30;  
% Finalización del proceso

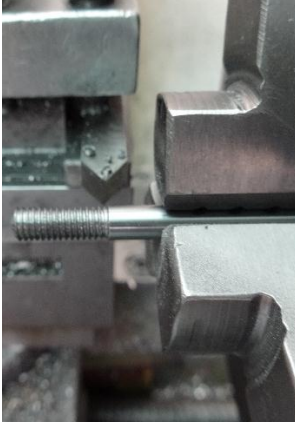

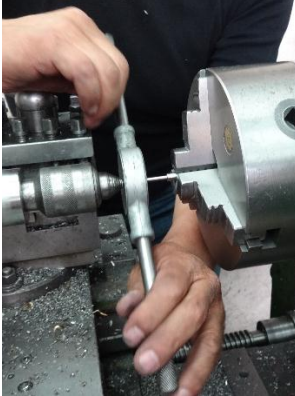
Código G para el mecanizado de la parte interior:

O0006	Numeración del programa
N10 G21 G90 G40 G95;	Parámetros iniciales para el mecanizado
N20 G54 G00 X70 Z100 T00;	Posicionamiento de la porta herramienta
N30 T1111;	Selección de la herramienta para desbaste interno
N40 G96 S559;	Velocidad de avance
N50 G92 S1241 M3;	Velocidad del husillo y encendido
N60 G00 X0 Z1;	Posicionamiento cero pieza
N70 G72 W0.5 R1.5;	Ciclo de desbaste transversal, profundidad de corte
N80 G72 P90 Q120 U-1 W0.3 F0.2;	Parámetros inicio, fin, acabado y profundidad interna en ciclo de corte
N90 G00 Z-6;	Avance rápido a posición en Z
N100 G01 X1 F0.2;	Avance controlado de desbaste interno hacia posición en X
N110 X6.4 Z-5;	Desbaste transversal en eje XZ
N120 Z0;	Desbaste en eje Z
N130 G42;	Compensación de radio a la derecha
N140 G70 P90 Q120;	Parámetros de inicio y fin de ciclo de acabado
N150 G40	Anulación de compensación de radio
N160 G54 G0 X300 Z300 T00;	Traslado de origen y posicionamiento del porta herramientas
N170 M30;	Finalización del proceso
%	


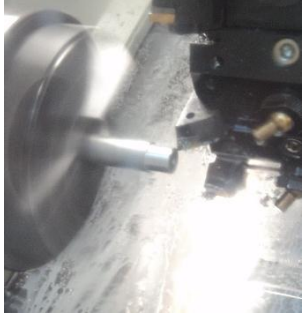
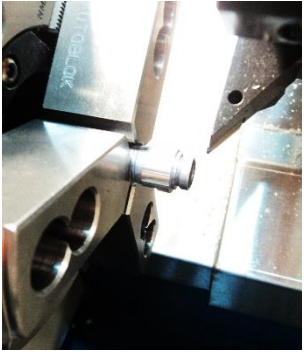
## ANEXO J: HOJAS DE PROCESOS



HOJA DE PROCESOS			
<b>Nombre del proceso:</b> Torneado		<b>Revisa:</b> Ing. Washington Mosquera	
<b>HOJA N°:</b> 1 de 4		<b>Autoriza:</b> Ing. Washington Mosquera	
<b>RESPONSABLE:</b> MARÍA ANDRADE		 <p>Diámetro: 13.50 mm Longitud: 59 mm</p>	
<b>DEPARTAMENTO:</b> Laboratorio de Mecatrónica			
OPERACIONES			
OPERACIÓN	PARÁMETROS	HERRAMIENTAS	OPERACIÓN
Sujeción		Entenalla de banco	
Corte o tronzado		Sierra para hierro Disco de corte	
Rectificado	$V_c = 150000 \left[ \frac{mm}{min} \right]$ $a = 0.35 \left[ \frac{mm}{rev} \right]$ $N = 1266.51 \left[ \frac{rev}{min} \right]$	Buril derecho de 60°	

HOJA DE PROCESOS			
Nombre del proceso: Torneado		Revisa: Ing. Washington Mosquera	
HOJA N°: 2 de 4		Autoriza: Ing. Washington Mosquera	
RESPONSABLE: MARÍA ANDRADE		 <p>Diámetro: 6 mm Longitud: 106.10 mm</p>	
DEPARTAMENTO: Laboratorio de Mecatrónica			
OPERACIONES			
OPERACIÓN	PARÁMETROS	HERRAMIENTAS	OPERACIÓN
Sujeción		Entenalla de banco	
Corte o tronzado		Sierra para hierro Disco de corte	
Rectificado	$V_c = 150000 \left[ \frac{mm}{min} \right]$ $a = 0.35 \left[ \frac{mm}{rev} \right]$ $N = 1266.51 \left[ \frac{rev}{min} \right]$	Buril derecho de 60°	
Desbaste anterior	$V_c = 150000 \left[ \frac{mm}{min} \right]$ $a = 0.35 \left[ \frac{mm}{rev} \right]$ $N = 1266.51 \left[ \frac{rev}{min} \right]$ $d = 1.5 \text{ mm}$ $MRR = 9.4 * 10^3 \left[ \frac{mm^3}{min} \right]$ $f = 443.28 \left[ \frac{mm}{min} \right]$ $Potencia = 785.43 \text{ W}$ $Torque = 5.92 \text{ [N * m]}$ $F_c = 1161.18 \text{ N}$	Buril derecho de 60°	

Roscado externo	<p>Diámetro 6 mm  Paso 1 mm  ARW3</p>	Butil derecho de 60°	
Desbaste posterior	$V_c = 150000 \left[ \frac{mm}{min} \right]$ $a = 0.35 \left[ \frac{mm}{rev} \right]$ $N = 1266.51 \left[ \frac{rev}{min} \right]$ $d = 0.3 \text{ mm}$ $MRR = 2.28 * 10^3 \left[ \frac{mm^3}{min} \right]$ $f = 443.28 \left[ \frac{mm}{min} \right]$ <p>Potencia = 785.43 W</p> <p>Torque = 5.92 [N * m]</p> $F_c = 1161.18 \text{ N}$	Butil derecho de 60°	
Roscado externo		Tarraja Diámetro: 3 mm	

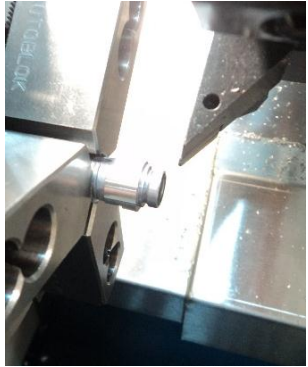
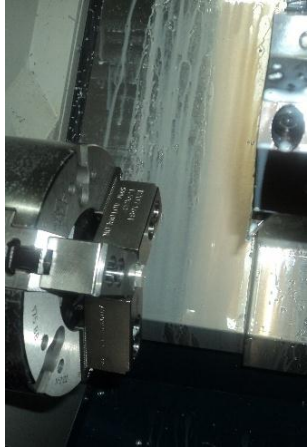
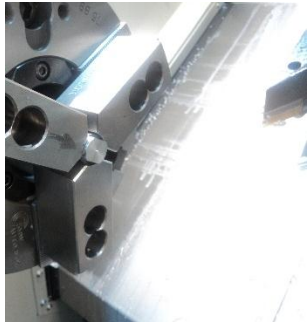
HOJA DE PROCESOS			
<b>Nombre del proceso:</b> Torneado		<b>Revisa:</b> Ing. Washington Mosquera	
<b>HOJA N°:</b> 3 de 4		<b>Autoriza:</b> Ing. Washington Mosquera	
<b>RESPONSABLE:</b> MARÍA ANDRADE		 <p>Diámetro: 15.23 mm Longitud: 33 mm</p>	
<b>DEPARTAMENTO:</b> Laboratorio de Mecatrónica			
OPERACIONES			
OPERACIÓN	PARÁMETROS	HERRAMIENTAS	OPERACIÓN
Sujeción		Mandril de tres mordazas	
Desbaste anterior	$V_c = 490000 \frac{mm}{min}$ $a = 0.45 \left[ \frac{mm}{rev} \right]$ $N = 1241.18 \left[ \frac{rev}{min} \right]$ $d = 3.3 mm$ $MRR = 9.67 * 10^4 \left[ \frac{mm^3}{min} \right]$ $f = 558.53 \left[ \frac{mm}{min} \right]$ $Potencia = 3170.6 W$ $Torque = 24.39 [N * m]$ $F_c = 2921.4 N$	Insertos en forma de diamante de 60°	


Acabado anterior	$V_c = 490000 \frac{mm}{min}$ $a = 0.45 \left[ \frac{mm}{rev} \right]$ $N = 1300 \left[ \frac{rev}{min} \right]$ $d = 3.3 mm$ $MRR = 9.67 * 10^4 \left[ \frac{mm^3}{min} \right]$ $f = 600 \left[ \frac{mm}{min} \right]$ $Potencia = 3170.6 W$ $Torque = 24.39 [N * m]$ $F_c = 2921.4 N$	Insertos en forma de diamante de 35°	
Desbaste posterior	$V_c = 490000 \frac{mm}{min}$ $a = 0.45 \left[ \frac{mm}{rev} \right]$ $N = 1241.18 \left[ \frac{rev}{min} \right]$ $d = 2.39 mm$ $MRR = 7.37 * 10^4 \left[ \frac{mm^3}{min} \right]$ $f = 558.53 \left[ \frac{mm}{min} \right]$ $Potencia = 3170.6 W$ $Torque = 24.39 [N * m]$ $F_{c2} = 2769.65 N$	Insertos en forma de diamante de 60°	
Acabado posterior	$V_c = 490000 \frac{mm}{min}$ $a = 0.45 \left[ \frac{mm}{rev} \right]$ $N = 1300 \left[ \frac{rev}{min} \right]$ $d = 2.39 mm$ $MRR = 7.37 * 10^4 \left[ \frac{mm^3}{min} \right]$ $f = 600 \left[ \frac{mm}{min} \right]$ $Potencia = 3170.6 W$ $Torque = 24.39 [N * m]$ $F_c = 2769.65 N$	Insertos en forma de diamante de 35°	

Desbaste interno	$V_c = 80 \text{ mm/min}$ <i>Diámetro 6 mm</i> <i>Paso 1 mm</i>	Marca: Makita Fresa: Punta plana Diámetro: 5mm	
Roscado interno		Marca: Hanson Machuelo: 5mm- 0.90	



HOJA DE PROCESOS			
Nombre del proceso: Torneado		Revisa: Ing. Washington Mosquera	
HOJA N°: 4 de 4		Autoriza: Ing. Washington Mosquera	
RESPONSABLE: MARÍA ANDRADE		 <p>Diámetro: 15.23 mm Longitud: 16.70 mm</p>	
DEPARTAMENTO: Laboratorio de Mecatrónica			
OPERACIONES			
OPERACIÓN	PARÁMETROS	HERRAMIENTAS	OPERACIÓN
Sujeción		Mandril de tres mordazas	
Desbaste anterior	$V = 490000 \frac{mm}{min}$ $a = 0.45 \left[ \frac{mm}{rev} \right]$ $N = 1241.18 \left[ \frac{rev}{min} \right]$ $d = 3.9 mm$ $MRR = 1.1 * 10^5 \left[ \frac{mm^3}{min} \right]$ $f = 558.53 \left[ \frac{mm}{min} \right]$ $Potencia = 2451.92 W$ $Torque = 18.86 [N * m]$ $F_c = 2343.39 N$	Insertos en forma de diamante de 60°	

Acabado anterior	$V = 490000 \frac{mm}{min}$ $a = 0.45 \left[ \frac{mm}{rev} \right]$ $N = 1300 \left[ \frac{rev}{min} \right]$ $d = 3.9 mm$ $MRR = 1.1 * 10^5 \left[ \frac{mm^3}{min} \right]$ $f = 600 \left[ \frac{mm}{min} \right]$ $Potencia = 2451.92 W$ $Torque = 18.86 [N * m]$ $F_c = 2343.39 N$	Insertos en forma de diamante de 35°	
Desbaste posterior	$V = 490000 \frac{mm}{min}$ $a = 0.45 \left[ \frac{mm}{rev} \right]$ $N = 1241.18 \left[ \frac{rev}{min} \right]$ $d = 2.39 mm$ $MRR = 7.37 * 10^4 \left[ \frac{mm^3}{min} \right]$ $f = 558.53 \left[ \frac{mm}{min} \right]$ $Potencia = 2451.92 W$ $Torque = 18.86 [N * m]$ $F_c = 2141.85 N$	Insertos en forma de diamante de 60°	
Acabado posterior	$V = 490000 \frac{mm}{min}$ $a = 0.45 \left[ \frac{mm}{rev} \right]$ $N = 1300 \left[ \frac{rev}{min} \right]$ $d = 2.39 mm$ $MRR = 7.37 * 10^4 \left[ \frac{mm^3}{min} \right]$ $f = 600 \left[ \frac{mm}{min} \right]$ $Potencia = 2451.92 W$ $Torque = 18.86 [N * m]$ $F_c = 2141.85 N$	Insertos en forma de diamante de 35°	

Desbaste interno		Marca: Makita Fresa: Punta plana Diámetro: 5mm	
Roscado interno		Marca: Hanson Machuelo: 5mm- 0.90	