

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA,
ELECTRÓNICA, INFORMÁTICA Y MECÁNICA.
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA



TESIS FINANCIADA POR LA UNSAAC

DISEÑO Y ANÁLISIS DE UN PROTOTIPO DE UNA MANO ROBÓTICA ANTROPOMÉTRICA

Presentado por:

GUEVARA VÁSQUEZ, Oscar
BACHILLER EN INGENIERÍA MECÁNICA

Asesor:

Ing. MACEDO SILVA, Arturo

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

CUSCO – PERÚ

2016



RESUMEN

La tesis presentada en estas páginas, consiste en el diseño mecánico de un prototipo de una mano robótica antropométrica, que puede ser usada como una prótesis pensada para personas que han perdido alguna de sus manos, se presenta una recopilación de trabajos más resaltantes, se abordó después un estudio de la anatómica y la biomecánica de la mano para entender las funciones prensiles de la misma, todo esto para poder decidir los parámetros y requerimientos de diseño del prototipo, todo el cálculo se hará considerando un agarre máximo de objetos de no más de 1/2 [kg] de peso como máximo.

Para generar el movimiento de flexión y extensión de los dedos del prototipo, se propone un mecanismo de doble manivela de 6 barras para el dedo índice y para el dedo pulgar un mecanismo de doble balancín de 4 barras, para resolver las ecuaciones cinemáticas y cinéticas se hizo uso del método de Newton Rapshon en el software Matlab®, luego se procedió a comprobar estos resultados con ayuda de los software de simulación SAM® y Autodesk Inventor®. A continuación se procedió a hacer el cálculo por resistencia de materiales de cada una de las falanges, pasadores y eslabones del prototipo. Para el accionamiento de cada uno de las falanges se usó servomotores, luego se construyó el prototipo en una impresora 3d.

Finalmente se presenta las conclusiones referentes al desarrollo de la Tesis, con propuestas y recomendaciones para futuros trabajos subsecuentes a la investigación.

PALABRAS CLAVE

Biomecánica, prótesis, mecanismo, antropométrico, mano, robótica, diseño Mecánico, Mecatrónica.



Dedicatoria

A Dios por darme la oportunidad de tener esta vida y darme las fuerzas necesarias para seguir, a pesar de las barreras que se presentaron.

Esta tesis está dedicada a la Mujer que más amo en este mundo: Mi Mamá Bertha sin tu infinito amor y comprensión jamás lo hubiera hecho, ojala tuviera las palabras adecuadas para describir todo el apoyo y la motivación que siempre me diste para cumplir mis sueños.

A mi Padre Jesús. Aunque hemos pasado momentos difíciles siempre has estado apoyándome y brindándome tus consejos.

A mi hermana Grecia, gracias por ser la compañera de muchas noches de desvelo y varias tazas de café, gracias por todo tu apoyo incondicional.

Agradecimiento:

A los docentes de la escuela profesional de Ingeniería Mecánica que participaron durante toda mi formación académica y personal con todos sus conocimientos y experiencias propias, me inculcaron el amor por esta increíble Profesión.

A todas las personas que estuvieron involucradas directa e indirectamente con esta tesis apostando por ella.

A todos mis compañeros y amigos de la universidad, fue una gran dicha conocerlos, el tiempo que pasamos juntos fue el mejor de todos.

Oscar Guevara Vásquez



ÍNDICE DE CONTENIDO.

| | |
|---|-----|
| PALABRAS CLAVE | i |
| ÍNDICE DE CONTENIDO..... | iii |
| ÍNDICE DE FIGURAS..... | vi |
| ÍNDICE DE TABLAS..... | x |
| GLOSARIO DE TÉRMINOS..... | xii |
| INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| CAPÍTULO I..... | 3 |
| 1 GENERALIDADES..... | 3 |
| 1.1 TÍTULO..... | 3 |
| 1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA..... | 3 |
| 1.2.1 Situación problemática..... | 3 |
| 1.2.2 Descripción del problema..... | 3 |
| 1.2.3 Formulación del problema..... | 4 |
| 1.3 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN..... | 4 |
| 1.3.1 Objetivo general..... | 4 |
| 1.3.2 Objetivos específicos..... | 4 |
| 1.4 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN..... | 5 |
| 1.5 HIPÓTESIS..... | 5 |
| 1.6 VARIABLES..... | 5 |
| 1.6.1 Variables Independientes..... | 5 |
| 1.6.2 Dependiente..... | 5 |
| 1.7 LIMITACIONES..... | 6 |
| 1.8 METODOLOGÍA..... | 6 |
| 1.8.1 Procedimiento De La Investigación..... | 6 |
| 1.8.2 Fases del método de la investigación..... | 7 |
| CAPÍTULO II:..... | 8 |
| 2 MARCO TEÓRICO..... | 8 |
| 2.1 ANTECEDENTES..... | 8 |
| 2.1.1 Primeros hallazgos históricos..... | 8 |
| 2.1.2 Mano UTAH/MIT..... | 9 |
| 2.1.3 Mano Ultraligh..... | 9 |
| 2.1.4 Mano MA-I (Mano artificial inteligente)..... | 10 |
| 2.1.5 Diseño y construcción de un dedo para grippers robóticos..... | 11 |
| 2.2 BIOMECÁNICA DE LA MANO HUMANA..... | 11 |
| 2.2.1 La mano humana..... | 11 |
| 2.2.2 Huesos..... | 12 |
| 2.2.5 Movilidad de las uniones del dedo y de la muñeca..... | 14 |
| 2.2.6 Movimientos de la mano humana..... | 15 |



| | | |
|--------------------|--|-----|
| 2.2.7 | Sujeción cilíndrica. | 16 |
| 2.2.8 | Modelo biomecánico. | 17 |
| 2.3 | ESTADÍSTICA DISCAPACITADOS EN EL PERÚ..... | 18 |
| 2.4 | PACIENTES AMPUTADO POR ACCIDENTES EN EL TRABAJO..... | 21 |
| 2.5 | NORMA DIN 33.402..... | 22 |
| 2.6 | MECANISMO DE CUATRO BARRAS. | 22 |
| 2.6.1 | Grado de libertad (GDL) o movilidad. | 22 |
| 2.6.2 | Inversión de mecanismos. | 22 |
| 2.6.3 | Lazo vectorial. | 22 |
| 2.7 | NÚMEROS COMPLEJOS..... | 23 |
| 2.7.1 | Identidad Euler. | 23 |
| 2.7.2 | Newton Raphoson..... | 24 |
| 2.7.3 | Sistema de Ecuaciones no lineales. | 25 |
| 2.8 | CINEMÁTICA Y CINÉTICA. | 25 |
| 2.8.1 | Segunda ley de newton (lineal y rotacional). | 25 |
| 2.9 | ESFUERZO..... | 26 |
| 2.9.1 | Esfuerzos: principales, equivalente (Von Misess)..... | 26 |
| 2.10 | SAM 6.1..... | 27 |
| 2.11 | AUTODESK INVENTOR® 2015 MODULO DE SIMULACIÓN DINÁMICA..... | 27 |
| 2.12 | IMPRESORAS 3D..... | 28 |
| 2.13 | ABS (ACRILONITRILO BUTADIENO ESTIRENO)..... | 28 |
| CAPÍTULO III:..... | | 30 |
| 3 | DETERMINACIÓN DEL PROYECTO PRELIMINAR. | 30 |
| 3.1 | DISEÑO DE LA MAQUINA | 30 |
| 3.1.1 | Estructura de funciones. | 30 |
| 3.1.2 | Selección de tecnología y descripción del proyecto óptimo..... | 31 |
| 3.2 | REQUERIMIENTOS Y PARÁMETROS DE DISEÑO. | 36 |
| 3.2.1 | Especificaciones de diseño..... | 37 |
| 3.2.2 | Determinación del rango de agarre del prototipo..... | 37 |
| 3.2.3 | Determinación de la fuerza de agarre del prototipo. | 38 |
| CAPÍTULO IV: | | 41 |
| 4 | CÁLCULO Y DISEÑO DE LOS MECANISMOS DEL PROTOTIPO. | 41 |
| 4.1 | DISEÑO DEL DEDO ÍNDICE. | 41 |
| 4.1.1 | Cinemática del mecanismo. | 42 |
| 4.1.2 | Cinética del mecanismo. Análisis cinético del mecanismo. | 83 |
| 4.2 | DISEÑO DEL DEDO PULGAR. | 119 |
| 4.2.1 | Cinemática del mecanismo. | 119 |
| 4.2.2 | Cinética del mecanismo. | 141 |
| CAPÍTULO V | | 162 |



| | | |
|----------------------|---|-----|
| 5 | DISEÑO DEL SISTEMA DE GENERACIÓN DE FUERZA. | 162 |
| 5.1 | CÁLCULO DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN..... | 162 |
| 5.2 | SELECCIÓN DEL SERVOMOTOR..... | 165 |
| 5.3 | SELECCIÓN DEL CORREA DE TRANSMISIÓN. | 165 |
| CAPÍTULO VI | | 167 |
| 6 | DISEÑO DEL SISTEMA ELECTRÓNICO DEL PROTOTIPO..... | 167 |
| 6.1 | ELECTRÓNICA DE CONTROL. | 167 |
| 6.1.1 | Señales mioelectricas. | 167 |
| 6.1.2 | Electrodos. | 168 |
| 6.1.3 | Rectificación de la señal. | 168 |
| 6.1.4 | Arduino..... | 169 |
| 6.2 | CONTROL DE UN SERVOMOTOR..... | 169 |
| 6.3 | PLACA CONTROL DE POTENCIA..... | 170 |
| CAPITULO VII | | 172 |
| 7 | CONSTRUCCIÓN Y COSTOS..... | 172 |
| 7.1 | Fabricación del prototipo..... | 172 |
| 7.2 | Costo de fabricación del prototipo..... | 174 |
| 7.2.1 | Presupuesto de ingeniería. | 174 |
| 7.2.2 | Presupuesto del prototipo. | 175 |
| 7.2.3 | Resumen final. | 175 |
| CONCLUSIONES | | 176 |
| RECOMENDACIONES..... | | 178 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | | 179 |
| ANEXOS..... | | 182 |
| Anexo A | | 183 |
| Anexo B | | 185 |
| Anexo C | | 186 |
| Anexo D | | 187 |
| Anexo E | | 188 |
| PLANOS..... | | 197 |



ÍNDICE DE FIGURAS.

| | |
|---|----|
| Figura 2.1 Mano de Alt-Ruppin. | 9 |
| Figura 2.2 Mano UTAH/MIT..... | 9 |
| Figura 2.3 Mano Ultraligh..... | 10 |
| Figura 2.4 Mano Ma-I. | 10 |
| Figura 2.5 Modelo conceptual y mecanismos. | 11 |
| Figura 2.6 Fuente huesos de la mano. | 12 |
| Figura 2.7 Articulación de la mano. | 13 |
| Figura 2.8 Ligamentos y tendones. | 13 |
| Figura 2.9 Músculos de la mano. | 14 |
| Figura 2.10 Abducción y aducción de los dedos..... | 15 |
| Figura 2.11 Taxonomía de la mano..... | 16 |
| Figura 2.12 Agarre cilíndrico. | 16 |
| Figura 2.13 Modelo mecánico mano. | 17 |
| Figura 2.14 Persona con alguna discapacidad..... | 18 |
| Figura 2.15 Tipo de limitaciones en las personas. | 19 |
| Figura 2.16 Lazo vectorial. | 23 |
| Figura 2.17 Identidad de Euler..... | 24 |
| Figura 2.18 Newton Raphson..... | 24 |
| Figura 2.19 Esfuerzos principales Fuente. | 26 |
| Figura 2.20 Entorno SAM..... | 27 |
| Figura 2.21 Entorno simulación dinámica | 28 |
| Figura 2.22 Impresora 3d básica | 28 |
| Figura 2.23 Hilos de Acrilonitrilo butadieno estireno..... | 29 |
| Figura 3.1 Diagrama de flujo para el diseño. | 30 |
| Figura 3.2 Black –box. | 31 |
| Figura 3.3 Proyectos solución. | 33 |
| Figura 3.4 Selección de proyecto óptimo..... | 35 |
| Figura 3.5 Modelo conceptual prototipo. | 36 |
| Figura 3.6 Articulaciones del dedo índice y pulgar..... | 38 |
| Figura 3.7 Fuerza de agarre en el prototipo, Fuente propia..... | 39 |
| Figura 3.8 Agarre de objetos. | 39 |
| Figura 4.1 Diagrama de flujo diseño dedo índice. | 41 |
| Figura 4.2 Movimiento de las falanges del dedo índice..... | 42 |
| Figura 4.3 Movimiento de las falanges. | 43 |
| Figura 4.4 Posiciones de la falange media. | 43 |
| Figura 4.5 Inversión del mecanismo. | 44 |
| Figura 4.6 Generación de rotopolos G y H. | 44 |
| Figura 4.7 Configuraciones mecanismo base..... | 45 |
| Figura 4.8 Movimiento Falange media y distal..... | 46 |
| Figura 4.9 Movimiento relativo de la falange media y proximal respecto a la proximal..... | 46 |
| Figura 4.10 Posiciones de la falange proximal..... | 47 |
| Figura 4.11 Inversión del mecanismo. | 47 |
| Figura 4.12 Reinversión del mecanismo. | 48 |
| Figura 4.13 Mecanismo del dedo índice. | 49 |
| Figura 4.14 Desarrollo del movimiento del mecanismo. | 49 |
| Figura 4.15 Lazo vectorial mecanismo. | 51 |



| | |
|--|-----|
| Figura 4.16 Nodos del mecanismo..... | 51 |
| Figura 4.17 Cognado del eslabón 02..... | 52 |
| Figura 4.18 Dimensionamiento del nodo 01..... | 55 |
| Figura 4.19 Dimensionamiento de eslabones nodo 02..... | 57 |
| Figura 4.20 Variación angular..... | 59 |
| Figura 4.21 Modelado del mecanismo en SAM 6.1 trayectoria del dedo índice..... | 60 |
| Figura 4.22 Resultado variación angular Simulado en SAM 6.1..... | 60 |
| Figura 4.23 Velocidades angulares..... | 65 |
| Figura 4.24 Velocidades angulares..... | 66 |
| Figura 4.25 Aceleraciones angulares..... | 71 |
| Figura 4.26 Aceleraciones Angulares..... | 72 |
| Figura 4.27 Ubicación de CG para 2, 3,8..... | 73 |
| Figura 4.28 Ubicación de CG para 4,9..... | 73 |
| Figura 4.29 Vectores de posición..... | 75 |
| Figura 4.30 Vectores de posición..... | 75 |
| Figura 4.31 Mecanismo del dedo índice..... | 84 |
| Figura 4.32 D. C.L. Mecanismo..... | 85 |
| Figura 4.33 Fuerza en pasadores del mecanismo..... | 91 |
| Figura 4.34 Par torsor en 2..... | 92 |
| Figura 4.35 Mecanismos Modelado en Autodesk Inventor 2015..... | 92 |
| Figura 4.36 Fuerzas en el mecanismo simulación Autodesk Inventor 2015..... | 93 |
| Figura 4.37 Par torsor en el Eslabón 2 del mecanismo simulado en Autodesk Inventor 2015..... | 93 |
| Figura 4.38 DCL Fuerzas máximas [Newton] en el mecanismo para $T_2=90^\circ$ | 94 |
| Figura 4.39 Pasador cilíndrico DIN 7..... | 95 |
| Figura 4.40 Ubicación del Pasador O2..... | 96 |
| Figura 4.41 Diagrama de cuerpo libre Pasador O2..... | 96 |
| Figura 4.42 Ubicación del Pasador A..... | 97 |
| Figura 4.43 Diagrama de cuerpo libre Pasador A..... | 97 |
| Figura 4.44 Ubicación del Pasador D..... | 98 |
| Figura 4.45 Diagrama de cuerpo libre Pasador D..... | 98 |
| Figura 4.46 Ubicación del Pasador O4..... | 98 |
| Figura 4.47 Diagrama de cuerpo libre Pasador O4..... | 99 |
| Figura 4.48 Ubicación del Pasador D..... | 99 |
| Figura 4.49 Diagrama de cuerpo libre Pasador B..... | 100 |
| Figura 4.50 Ubicación del Pasador C..... | 100 |
| Figura 4.51 Diagrama de cuerpo libre Pasador C..... | 101 |
| Figura 4.52 Ubicación del Pasador E..... | 101 |
| Figura 4.53 Diagrama de cuerpo libre Pasador C..... | 102 |
| Figura 4.54 Diámetros mínimos en pasadores..... | 104 |
| Figura 4.55 D.C.L. del mecanismo..... | 105 |
| Figura 4.56 Diagrama cuerpo libre Eslabón 2..... | 107 |
| Figura 4.57 Fuerzas y momento flector internos..... | 107 |
| Figura 4.58 Aplicación de Fuerza Max. Y Momento Max..... | 108 |
| Figura 4.59 Distribución de esfuerzos..... | 108 |
| Figura 4.60 Diagrama cuerpo libre Eslabón 3..... | 109 |
| Figura 4.61 Fuerzas y momento flector internos..... | 110 |
| Figura 4.62 Aplicación de Fuerza Max. y Momento Max..... | 110 |



| | |
|---|-----|
| Figura 4.63 Distribución de esfuerzos..... | 111 |
| Figura 4.64 Diagrama cuerpo libre Eslabón 8..... | 112 |
| Figura 4.65 Fuerzas y momento flector internos..... | 113 |
| Figura 4.66 Aplicación de Fuerza Max. y Momento Max. | 113 |
| Figura 4.67 Distribución de esfuerzos..... | 114 |
| Figura 4.68 Diagrama cuerpo libre Eslabón 4..... | 115 |
| Figura 4.69 Aplicación de Fuerza Max. | 115 |
| Figura 4.70 Diagrama cuerpo libre Eslabón 9..... | 116 |
| Figura 4.71 Aplicación de Fuerza Max. | 116 |
| Figura 4.72 Diagrama de flujo Diseño dedo pulgar. | 119 |
| Figura 4.73 Movimiento. De las falanges. | 119 |
| Figura 4.74 Posiciones de la falange media. | 120 |
| Figura 4.75 Inversión del mecanismo. | 120 |
| Figura 4.76 Rotopolos G y H..... | 121 |
| Figura 4.77 Configuración mecanismo. | 121 |
| Figura 4.78 Lazo vectorial mecanismo. | 122 |
| Figura 4.79 Dimensionamiento del mecanismo. | 124 |
| Figura 4.80 Variación angular..... | 125 |
| Figura 4.81 Modelado del mecanismo. | 126 |
| Figura 4.82 Resultado variación angular..... | 126 |
| Figura 4.83 Variación de la velocidad angular..... | 129 |
| Figura 4.84 Variación de la velocidad angular..... | 130 |
| Figura 4.85 Aceleraciones angulares. | 132 |
| Figura 4.86 Aceleraciones Angulares Simulación Sam 6.1. | 133 |
| Figura 4.87 Ubicación de CG para 2,3,8..... | 134 |
| Figura 4.88 Vectores de posición. | 135 |
| Figura 4.89 Mecanismo del dedo índice. | 141 |
| Figura 4.90 D.C.L. mecanismo. | 141 |
| Figura 4.91 Fuerza en el mecanismo..... | 145 |
| Figura 4.92 Par torsor eslabón 2..... | 145 |
| Figura 4.93 Modelado en Inventor. | 146 |
| Figura 4.94 Fuerzas en el mecanismo. | 146 |
| Figura 4.95 Par torsor en el Eslabón 2 del mecanismo. | 147 |
| Figura 4.96 DCL Fuerzas en el mecanismo [Newton] T2=90°. | 147 |
| Figura 4.97 Ubicación del Pasador O2..... | 148 |
| Figura 4.98 Diagrama de cuerpo libre Pasador O2. | 148 |
| Figura 4.99 Ubicación del Pasador A..... | 149 |
| Figura 4.100 Diagrama de cuerpo libre Pasador A. | 149 |
| Figura 4.101 Ubicación del Pasador O4..... | 150 |
| Figura 4.102 Diagrama de cuerpo libre Pasador O4. | 150 |
| Figura 4.103 Ubicación del Pasador B..... | 151 |
| Figura 4.104 Diagrama de cuerpo libre Pasador B. | 151 |
| Figura 4.105 Diámetros mínimos en pasadores. | 153 |
| Figura 4.106 D.C.L. del Mecanismo. | 154 |
| Figura 4.107 Diagrama cuerpo libre Eslabón 2..... | 155 |
| Figura 4.108 Fuerzas y momento flector internos..... | 155 |
| Figura 4.109 Aplicación de Fuerza Max. y Momento Max. | 156 |



| | |
|---|-----|
| Figura 4.110 Distribución de esfuerzos..... | 156 |
| Figura 4.111 Diagrama cuerpo libre Eslabón 3..... | 157 |
| Figura 4.112 Fuerzas y momento flector internos..... | 158 |
| Figura 4.113 Aplicación de Fuerza Max. y Momento Max. | 158 |
| Figura 4.114 Distribución de esfuerzos..... | 159 |
| Figura 4.115 Diagrama cuerpo libre Eslabón 4..... | 160 |
| Figura 4.116 Aplicación de Fuerza Max. | 160 |
| Figura 5.1 Sistema de transmisión. | 162 |
| Figura 5.2 Sistema de transmisión. | 163 |
| Figura 5.3 Transmisión de fuerza en las falanges. | 164 |
| Figura 5.4 Servomotor 9g..... | 165 |
| Figura 5.5 DCL Fuerza en el cable de transmisión | 165 |
| Figura 6.1 Diagrama de flujo diseño electrónico | 167 |
| Figura 6.2 señales eléctricas captadas en musculo bíceps..... | 168 |
| Figura 6.3 circuito equivalente electrodo sobre piel. | 168 |
| Figura 6.4 Arduino uno | 169 |
| Figura 6.5 Partes servomotor | 170 |
| Figura 6.6 Fuente de alimentación | 170 |
| Figura 6.7 Esquema de conexión electrónica..... | 170 |
| Figura 6.8 tarjeta construida en baquelita | 171 |
| Figura 6.9 Diseño electrónico del prototipo..... | 171 |
| Figura 7.1 Piezas del prototipo..... | 172 |
| Figura 7.2 Proceso de Ensamble. | 172 |
| Figura 7.3 Prototipo ensamblado. | 173 |
| Figura 7.4 Microcontrolador Arduino y tarjeta de control..... | 173 |
| Figura 7.5 Sujeción Cilíndrica. | 173 |



ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|-----|
| Tabla 2.1 Rango de movimiento. | 14 |
| Tabla 2.2 Número de pacientes con discapacidad atendidos en el INR. | 19 |
| Tabla 2.3 Número de atenciones realizadas en el Hogar Clínica San Juan De Dios. | 20 |
| Tabla 2.4 Porcentaje de amputaciones en accidentes laborales 2004. | 21 |
| Tabla 3.1 Matriz morfológica. | 32 |
| Tabla 3.2 Evaluación de proyectos de solución- valor técnico. | 34 |
| Tabla 3.3 Evaluación de proyectos de solución- valor económico. | 34 |
| Tabla 3.4 Evaluación técnica economía. | 35 |
| Tabla 3.5 Matriz de requerimientos. | 37 |
| Tabla 3.6 Angulo de amplitud articulaciones. | 38 |
| Tabla 3.7 Longitud de las falanges. | 38 |
| Tabla 4.1 Dimensiones de los eslabones. | 54 |
| Tabla 4.2 Dimensiones de los eslabones. | 56 |
| Tabla 4.3 Posiciones angulares. | 58 |
| Tabla 4.4 Velocidades angulares. | 64 |
| Tabla 4.5 Aceleraciones angulares. | 70 |
| Tabla 4.6 Masa, segundo momento de inercia, para los eslabones. | 73 |
| Tabla 4.7 Ubicación de los centros de gravedad respecto al origen de coordenadas. | 74 |
| Tabla 4.8 Ecuaciones vectores de posicionamiento. | 76 |
| Tabla 4.9 Vectores de posicionamiento eslabón 2. | 76 |
| Tabla 4.10 Vectores de posicionamiento eslabón 3. | 77 |
| Tabla 4.11 Vectores de posicionamiento eslabón 8. | 77 |
| Tabla 4.12 Vectores de posicionamiento eslabón 1-4. | 78 |
| Tabla 4.13 Velocidades de Cg de los eslabones. | 81 |
| Tabla 4.14 Aceleraciones de Cg de los eslabones [mm/s ²]. | 82 |
| Tabla 4.15 Aceleraciones de Cg de los eslabones [mm/s ²]. | 82 |
| Tabla 4.16 Fuerzas aplicadas en eslabón 2 (Newton). | 88 |
| Tabla 4.17 Fuerzas aplicadas en eslabón 3 (Newton). | 88 |
| Tabla 4.18 Fuerzas aplicadas en eslabón 4 (Newton). | 89 |
| Tabla 4.19 Fuerzas aplicadas en eslabón 8 (Newton) | 89 |
| Tabla 4.20 Fuerzas aplicadas en eslabón 9 (Newton). | 90 |
| Tabla 4.21 Propiedades Mecánicas acero seccionado para los pasadores. | 95 |
| Tabla 4.22 Esfuerzos en pasadores. | 102 |
| Tabla 4.23 Diámetros mínimos. | 103 |
| Tabla 4.24 Selección de pasadores para el dedo índice. | 104 |
| Tabla 4.25 Propiedades mecánicas A.B.S. | 105 |
| Tabla 4.26 Distribución de los esfuerzos normales. | 109 |
| Tabla 4.27 Distribución de esfuerzos normal en los sectores 1, 2, 3, 4. | 112 |
| Tabla 4.28 Distribución de esfuerzo en las zonas 1, 2,3 y 4. | 114 |
| Tabla 4.29 Resumen de la distribución de esfuerzos. | 118 |
| Tabla 4.30 Dimensiones de los eslabones. | 123 |
| Tabla 4.31 Posiciones angulares. | 125 |
| Tabla 4.32 Variación de la velocidad angular. | 128 |
| Tabla 4.33 Aceleraciones angulares. | 131 |
| Tabla 4.34 Masa, segundo momento de Inercia, para los eslabones. | 134 |
| Tabla 4.35 Ubicación de los centros de gravedad respecto al origen de coordenadas. | 134 |



| | |
|--|-----|
| Tabla 4.36 Ecuaciones vectores de posicionamiento. | 136 |
| Tabla 4.37 Vectores de posicionamiento eslabón 2. | 136 |
| Tabla 4.38 Vectores de posicionamiento eslabón 3. | 137 |
| Tabla 4.39 Vectores de posicionamiento eslabón 1,4. | 137 |
| Tabla 4.40 Velocidad de Cg de los eslabones. | 139 |
| Tabla 4.41 Aceleración Cg [mm/s ²]. | 140 |
| Tabla 4.42 Aceleración Cg [mm/s ²]. | 140 |
| Tabla 4.43 Fuerzas aplicadas en eslabón 2 (Newton). | 143 |
| Tabla 4.44 Fuerzas aplicadas en eslabón 3 (Newton). | 144 |
| Tabla 4.45 Fuerzas aplicadas en eslabón 4 (Newton). | 144 |
| Tabla 4.46 Esfuerzos en pasadores. | 152 |
| Tabla 4.47 Diámetros mínimos. | 152 |
| Tabla 4.48 Selección de pasadores. | 153 |
| Tabla 4.49 Distribución de los esfuerzos normales, en cada uno de los sectores. | 157 |
| Tabla 4.50 Distribución de esfuerzo en las zonas 1,2, 3 y 4. | 159 |
| Tabla 4.51 Esfuerzos principales esfuerzos equivalentes. | 161 |
| Tabla 7.1 Presupuesto ingeniería (recursos humanos). | 174 |
| Tabla 7.2 Presupuesto ingeniería (Software). | 174 |
| Tabla 7.3 Presupuesto ingeniería (Equipos). | 174 |
| Tabla 7.4 Presupuesto ingeniería (Materiales). | 174 |
| Tabla 7.5 Presupuesto ingeniería (Resumen). | 175 |
| Tabla 7.6 Presupuesto Prototipo (Resumen). | 175 |
| Tabla 7.7 Presupuesto Resumen final. | 175 |



GLOSARIO DE TÉRMINOS.

- μ_k . Coeficiente de fricción cinético.
- **A.B.S.:** El acrilonitrilo butadieno estireno o ABS es un plástico muy resistente al impacto (golpes) muy utilizado en automoción y otros usos tanto industriales como domésticos.
- **Agarre (fuerza):** La fuerza de agarre es la fuerza utilizada con la mano para apretar o suspender objetos en el aire.
- **AISI SAE:** La norma AISI/ (también conocida por ser una clasificación de aceros y aleaciones de materiales no ferrosos. Es la más común en los Estados Unidos. AISI es el acrónimo en inglés de American Iron and Steel Institute (Instituto americano del hierro y el acero), y SAE es el acrónimo en inglés de Society of Automotive Engineers (Sociedad de Ingenieros Automotores).
- **Antropometría:** (De Idioma griego άνθρωπος hombre, humano; y μέτρον: medida, lo que viene a significar "la medida del hombre "), es la sub-rama de la antropología o física que estudia las medidas del cuerpo del hombre.
- **Aprehensión:** Tener encima o sujeta una cosa de manera que no se caiga o se tambalee.
- **Biomecánica:** Ciencia que estudia las fuerzas y las aceleraciones que actúan sobre los organismos vivos.
- **Black Box:** En este tipo de método, se considera que el diseñador es capaz de producir resultados en los que confía y que a menudo tienen éxito más no es capaz de explicar cómo llegó a tal resultado.
- **C.G.:** El centro de gravedad de un sistema de partículas es un punto que, a muchos efectos, se mueve como si fuera una partícula de masa igual a la masa total del sistema sometida a la resultante de las fuerzas que actúan sobre el mismo.
- **Cinemática:** Parte de la mecánica que trata del movimiento en sus condiciones de espacio y tiempo, sin tener en cuenta las causas que lo producen.



- **Cinética:** Parte de la física que estudia los sistemas estáticos o en movimiento mediante el empleo de los conceptos de longitud, tiempo y masa.
- **DIN:** Es el acrónimo de Deutsches Institut für Normung (Instituto Alemán de Normalización) El Deutsches Institut für Normung e.V. (su marca empresarial es DIN), con sede en Berlín, es el organismo nacional de normalización de Alemania. Elabora, en cooperación con el comercio, la industria, la ciencia, los consumidores e instituciones públicas, estándares técnicos (normas) para la racionalización y el aseguramiento de la calidad.
- **Eslabón:** Es un cuerpo rígido que posee al menos dos nodos, que son los puntos de unión con otros eslabones.
- **G.D.L.:** El número de grados de libertad en ingeniería se refiere al número mínimo de parámetros que necesitamos especificar para determinar completamente la velocidad de un mecanismo o el número de reacciones de una estructura.
- **Grippers:** Son actuadores finales que usa un robot para poder interactuar en su entorno físico.
- **INEI:** El Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) es el Órgano Rector de los Sistemas Nacionales de Estadística e Informática en el Perú.
- **O.M.S.:** La Organización mundial de salud es la autoridad directiva y coordinadora de la acción sanitaria en el sistema de las Naciones Unidas.
- **Pasador:** Un pasador es un elemento de fijación mecánica desmontable, de forma cilíndrica o cónica, cuyos extremos pueden variar en función de la aplicación.
- **Prototipo:** Primer ejemplar que se fabrica de una figura, un invento u otra cosa, y que sirve de modelo para fabricar otras iguales, o molde original con el que se fabrica.
- **Servomotor:** Un servomotor (también llamado servo) es un dispositivo similar a un motor de corriente continua que tiene la capacidad de ubicarse en cualquier posición dentro de su rango de operación, y mantenerse estable en dicha posición.
- **VDI:** Verein Deutscher Ingenieure (Asociación alemana de ingenieros).



INTRODUCCIÓN.

“La discapacidad no debería ser un obstáculo para el éxito. Yo mismo he sufrido una neuropatía motora durante prácticamente la totalidad de mi vida adulta, y no por ello he dejado de desarrollar una destacada carrera profesional como astrofísico y de tener una feliz vida familiar. ” (Hawking, 2014).

Las manos han sido y son un pilar importante en la evolución y el desarrollo de nuestra especie, permitiéndonos realizar tareas que otros seres no pueden, esto ha marcado la diferencia evolutiva con otras especies en la tierra, las manos humanas poseen una sorprendente flexibilidad e incomparable destreza pudiendo hacer las veces de una delicada pinza y a la vez un herramienta fuerte.

Los diferentes movimientos y acciones de la mano están dictados por estímulos eléctricos en los músculos, estos se generan en el cerebro, y permite interactuar en el medio, uno de los atributos más deseables al investigar robots es el antropomorfismo según (RAE, 2001). Se define como la tendencia a dar rasgos y cualidades humanas a los prototipos desarrollados.

La mano humana como tal posee un sorprendente grado de flexibilidad y destreza con 27 huesos, 40 músculos y 20 grados de libertad, la pérdida de alguna de las manos ya sea por enfermedad o accidente afecta de manera física y psicológica al individuo, haciéndole perder la destreza natural y creando sentimientos de rechazo de parte de la sociedad.

La tesis expuesta en estas páginas intenta desarrollar el análisis cinético, cinemático y el diseño mecánico de un prototipo, y dar el diseño mecánico de un prototipo funcional de una mano robótica que puede ser usado como una prótesis.

La mano es estudio de investigación de muchos científicos e instituciones en el mundo, que como resultado ha llegado a la construcción de innovadores y complejas prótesis, para ser usadas como sistemas funcionales, estos tienen un numero alto de grados de libertad (G.D.L.) complicando el control de los mismos y elevando los costos de manufactura, además de que las investigaciones en este en este campo son escasas y poco difundidas en el ámbito académico.



El fin de esta investigación es el diseño mecánico de un prototipo funcional de una mano robótica para su uso como prótesis, que pueda realizar el movimiento básico prensil de una mano, todo ello con mecanismos que copien la trayectoria de los dedos, reduciendo los grados de libertad en cada uno de los ellos, y que sea capaz de sostener objetos de un peso promedio de 0.5 Kg.



CAPÍTULO I

1 GENERALIDADES.

1.1 TÍTULO.

“DISEÑO Y ANÁLISIS DE UN PROTOTIPO DE UNA MANO ROBÓTICA ANTROPOMÉTRICA”.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

1.2.1 Situación problemática.

La pérdida de alguna de las manos trae el concepto de discapacidad. La O.M.S. define a la discapacidad como: “Es toda restricción o ausencia (debida a una deficiencia) de la capacidad de realizar una actividad en la forma o dentro del margen que se considera normal para un ser humano”. (REBAZA FLORES, 2007) Define a los Discapacitados como aquellos miembros de la sociedad cuya autonomía se ve afectada, en diferente grado y con diversas implicancias.

El Instituto nacional de estadística e informática (INEI) realizó la primera encuesta sobre discapacidad (INEI, 2012, págs. 9-15) obteniendo los siguientes resultados:

- El 5,2% de la población nacional (1 millón 575 mil 402 personas) padecen de algún tipo de discapacidad o limitación física y/o mental. Esta condición afecta, en mayor proporción, a la población de 65 y más años (50,4%) y de 15 a 64 años (41,3%).
- Los tipos de limitación más frecuentes en la población con discapacidad son las dificultades para moverse caminar y/o para usar brazos o piernas (59,2%) y las de tipo visual (50,9%).

1.2.2 Descripción del problema.

Existe un porcentaje de personas en la población Peruana, que presentan una discapacidad en alguna de las extremidades superiores y necesita de una prótesis



a nivel de sus manos, si es que la tienen la mayoría son prótesis estéticas no funcionales o mecánicas con pocos grados de libertad, pesadas e incómodas, esto genera a lo largo del tiempo de vida la paciente inconformidad y abandono en el uso de sus prótesis.

La carencia de prótesis funcionales, exige un estudio del diseño de un prototipo de una mano robótica, que cumpla y equilibre la parte estética y funcional de la prótesis, para mejorar la calidad de vida del individuo.

Con lo anterior planteado la investigación es viable, pues responde una necesidad de la sociedad, se cuenta con la información, tecnología necesaria y suficiente para resolver el problema planteado.

1.2.3 Formulación del problema.

Por las consideraciones anteriores, la presente investigación pretenderá responder a la siguiente interrogante:

¿Cómo diseñar un prototipo de sujeción cilíndrica de objetos para personas discapacitadas?

1.3 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.

1.3.1 Objetivo general.

Diseñar un prototipo de una mano robótica antropométrica para la sujeción cilíndrica de objetos.

1.3.2 Objetivos específicos.

- Estudiar y analizar la biomecánica de la mano.
- Diseñar el prototipo más óptimo.
- Diseñar el posicionamiento y trayectoria de los mecanismos.
- Calcular la cinemática del prototipo.
- Calcular la cinética del prototipo
- Diseñar por resistencia el mecanismo del prototipo.
- Diseñar el sistema de generación de fuerzas.



- Diseñar la electrónica y control del prototipo.
- Construir la mecánica del prototipo y calcular el costo de fabricación.

1.4 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

La presente investigación reviste importancia por las razones siguientes:

- Brindar una solución a uno de los problemas encontrados en la sociedad: La carencia de prótesis funcionales para personas con discapacidad a la altura de las extremidades superiores.
- Mejorar la calidad de vida de las personas con discapacidad a nivel estético y a nivel funcional.
- Generar y sembrar las bases en futuras investigaciones en el área de la biomecánica y robótica, ya que trabajos de investigación como estos son pocos en la escuela profesional de ingeniería Mecánica de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.
- Existen prótesis funcionales con un alto costo, que hace en muchos casos no accesibles a pacientes, se tratara de dar una solución a esto.

1.5 HIPÓTESIS.

Es posible diseñar un prototipo de una mano robótica antropométrica para la sujeción básica de objetos.

1.6 VARIABLES

1.6.1 Variables Independientes

- Sujeción Cilíndrica.
- Cinemática del mecanismo.
- Dinámica del mecanismo.

1.6.2 Dependiente

- Prototipo.



1.7 LIMITACIONES.

- El tipo de agarre será limitado al movimiento básico prensil cilíndrico de una mano humana.
- El pesos máximo de los objetos a sujetar por el prototipo será de 0.5 kg.
- Las dimensiones y movimiento del prototipo estarán restringidas por la norma DIN 33 402 (dimensiones de la mano para el diseño de herramienta).
- Se limitará el rango de movimiento a movimientos naturales.
- El material a usar será: ABS (ACRILONITRILO-BUTADIENO-ESTIRENO).
- Se hará solo el diseño del dedo índice y pulgar, el diseño de los otros tres dedos será semejante al dedo índice.

1.8 METODOLOGÍA.

1.8.1 Procedimiento De La Investigación.

Para el desarrollo de la presente tesis se tendrá en cuenta el siguiente procedimiento:

- **Recopilación de la información.-** Se realizará la revisión bibliográfica necesaria, así como la búsqueda de información y antecedentes de todas las investigaciones previas involucradas con el cálculo, diseño, construcción y evaluación de este sistema.
- **Definición de los Parámetros.-** Después de la obtención de toda la información acerca del tema a tratar se hará un estudio de la Dinámica y Cinemática de la Mano para poder determinar los parámetros de diseño del prototipo.
- **Dimensionamiento del prototipo.-** Se calculará y dimensionará la estructura y geometría del prototipo, así como la elección del mecanismo.
- **Cálculo de la cinética y cinemática.-** Se harán los cálculos de cinemática y cinética.



- **Diseño por resistencia.-** Se hará un diseño de cada elemento por resistencia.
- **Modelamiento Computacional.-** A continuación se realizará una simulación dinámica del prototipo con herramientas computacionales de elementos finitos, para entender el comportamiento dinámico del prototipo.
- **Elaboración de planos-** Se procederá a la elaboración de los planos necesarios para la construcción del prototipo.
- **Fabricación del prototipo.-** Finalmente se construirá el prototipo siguiendo los planos anterior mente desarrollada.
- **Estimación de costos.-** Luego se realizará una estimación de costos del prototipo y finalmente se elaborarán las conclusiones y recomendaciones de la tesis.

1.8.2 Fases del método de la investigación.

- **DELIMITACIÓN:** El estudio tendrá como fin la mejora de la calidad de vida de la población con alguna incapacidad.
- **IDENTIFICACIÓN:** Existe un porcentaje de la población con alguna discapacidad, que no cuenta con una prótesis funcional.
- **RESULTADOS DE INVESTIGACIÓN:** Diseñar una mano robótica antropométrica que pueda copiar el movimiento básico prensil cilíndrico de una mano humana estándar.



CAPÍTULO II:

2 MARCO TEÓRICO.

En este capítulo se hará un estudio de trabajos similares alrededor del mundo destacando los más importantes y relevantes que ayuden al desarrollo de ciertos conceptos. Así mismo se hará un estudio de la biomecánica de la mano prestando especial atención a aquellos datos que puedan ayudar a la toma de decisiones para la selección de los parámetros iniciales como: Geometría, fuerza, rango de movimiento para cada componente, para ser usados en el diseño del prototipo en mención. También se abordó conceptos de como velocidad, fuerza, actuadores, entre otros.

2.1 ANTECEDENTES.

Las investigaciones realizadas en manipuladores antropomorfos (manos robot) de uso no solo como prótesis sino en también por su contenido científico y su uso en aplicaciones robóticas, han sido estudiadas dando luces y conceptos muy útiles, pero aún hay una larga brecha de conocimientos que faltan por desarrollar. (Velázquez-Sánchez A. T., Merchán-Cruz, E. A., y Ramírez-Gordillo, J., 2005, págs. 1-9) Con la anterior conjetura podemos definir que una prótesis es una extensión artificial dotada de elementos mecánicos, electrónicos, y actuadores, dotado de un control, y una autonomía para devolver al individuo la funcionalidad perdida.

2.1.1 Primeros hallazgos históricos.

La primera prótesis de miembro superior registrada data del año 2000 a.C., fue encontrada en una momia egipcia, la misma estaba sujeta al antebrazo por medio de un cartucho adaptado.

218-202 a. C: Durante la Segunda Guerra Púnica, el general romano Marcus Sergius, fabricó una mano de hierro para él, con la cual portaba su espada. Es la primera mano de hierro registrada.



En el año de 1400 se fabricó la mano de alt-Ruppin, construida también en hierro, constaba de un pulgar rígido en oposición y dedos flexibles, los cuales eran flexionados pasivamente y además tenía una muñeca movable.



Figura 2.1 Mano de Alt-Ruppin.

Fuente: (Velázquez-Sánchez A. T., Merchán-Cruz, E. A., y Ramírez-Gordillo, J., 2005).

2.1.2 Mano UTAH/MIT.

(S.C. Jacobsen, 1986) En el Instituto Tecnológico de Massachusetts se diseñó este prototipo contando con 16 G.D.L. con cuatro dedos y cuatro G.D.L. por cada uno de ellos, cuenta con actuadores neumáticos y un sistema de transmisión de cuerdas y poleas (Figura 2.2).

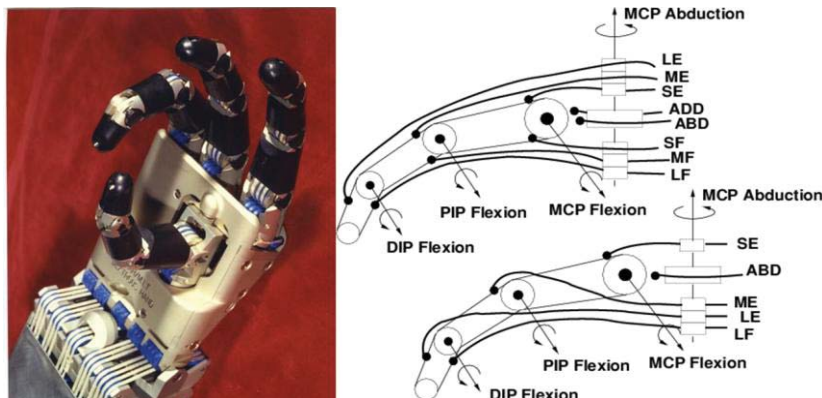


Figura 2.2 Mano UTAH/MIT.

Fuente MIT (INSTITUTO TECNOLÓGICO DE MASSACHUSETTS).

2.1.3 Mano Ultraligh.

(S. SCHULZ, 2001) En el centro de investigasen de Karlshuere, Alemania, se diseñó una mano de bajo peso y amplitud de movimiento semejante a la mano humana con cinco dedos, cada uno de los dedos es un actuador hidráulico flexible esto hace que se pueda reducir su tamaño (Figura2.3).

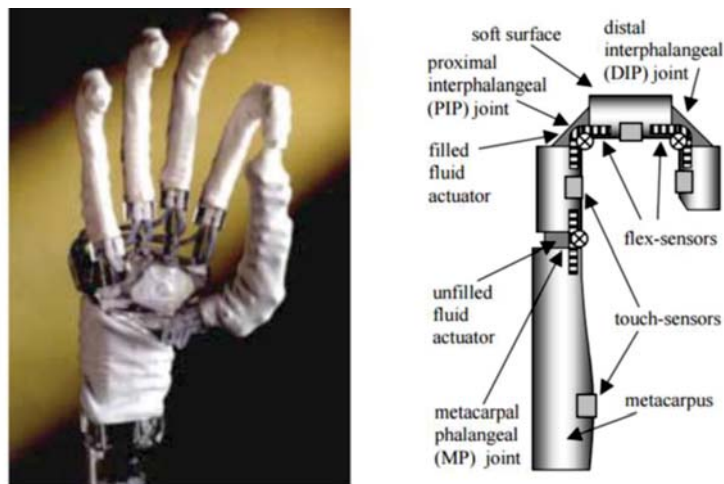


Figura 2.3 Mano Ultralight.
Fuente: RESEARCH CENTER OF KARLSRUHE, GERMANY.

2.1.4 Mano MA-I (Mano artificial inteligente).

(Suarez & Patrick, 2001) En la Universidad Politécnica de Cataluña se desarrolló este prototipo denominado MA-I diseñado en el instituto de organización y control de sistemas industriales (IOC) la configuración de esta mano cuenta con cuatro dedos cada una de ellas con cuatro G.D.L, el diseño cuenta con hardware y software propio, así como también tiene incluidos los aspectos de electrónica eléctrica y control, fue pensada para estar en la parte final de manipuladores robóticos (Figura 2.4).

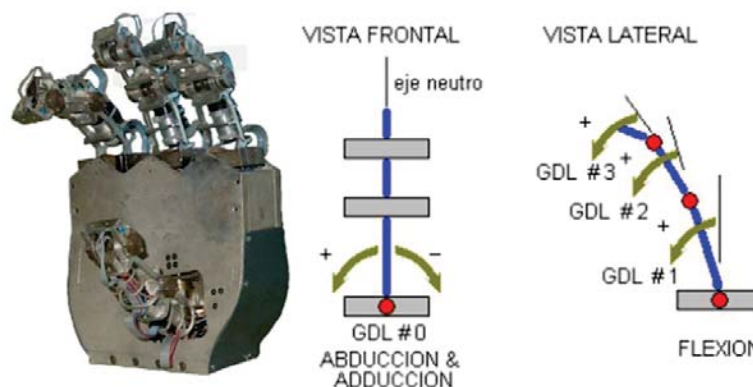


Figura 2.4 Mano Ma-I.
Fuente Universidad Politécnica de Cataluña.



2.1.5 Diseño y construcción de un dedo para grippers robóticos.

Este trabajo muestra el diseño de un dedo robótico para ser usados en manipuladores robóticos, el mecanismo implementado es un sistema de barras y palancas donde la entrada es un tornillo sin fin, para la conversión del movimiento rotatorio en lineal, usándose como materia prima el aluminio en su mayor parte (Figura 2.5).

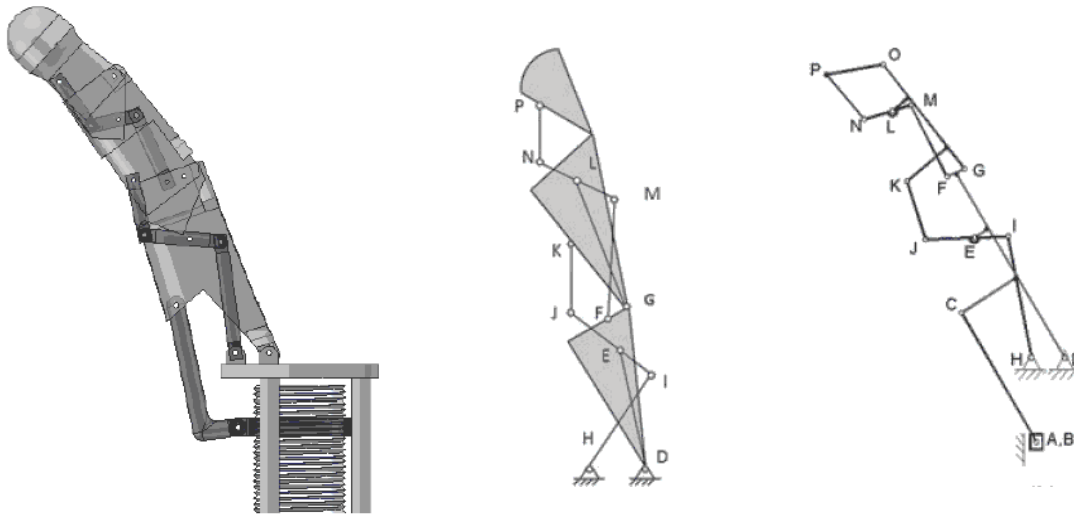


Figura 2.5 Modelo conceptual y mecanismos.
Fuente (AVILES, SIMANCA, & NINO, 2007).

2.2 BIOMECÁNICA DE LA MANO HUMANA.

2.2.1 La mano humana.

La mano es el órgano terminal de las extremidades superiores, que en el ser humano es una de las partes más importantes del cuerpo, posee un gran flexibilidad, destreza y sensibilidad, lo cual permite realizar un sin número de actividades y el poder adaptarnos a la supervivencia en el ambiente en el cual nos encontremos, gracias a su principal función la presión de objetos. Cabe recalcar que este órgano no es exclusivo de la especie humana, pero si el hecho de tener un dedo pulgar que es oponible al resto de dedos en especial al pulgar, eso ha llevado a tener una ventaja sustancial en comparación con otras especies, a excepción de los simios cuyo pulgar también es oponible, pero no alcanza la amplitud del pulgar humano.



La principal función de la mano humana es la aprehensión, los dedos que intervienen en esta función son el pulgar y el índice principalmente, por eso este diseño se basara en ellos, el pulgar tiene una funcionabilidad mayor que el del resto de los dedos puesto que este es oponible en relación con los otros cuatro.

2.2.2 Huesos.

La mano humana tiene cinco dedos y está formada por 27 huesos clasificados en tres grupos: el Carpo, le Metacarpo y las falanges, unidos a la muñeca en la palma. Este es un sistema articulado que consta de 20 Grados de libertad a (G.D.L.) con un aproximado de 40 músculos, en la Figura 2.6 puede verse la ubicación exacta de cada uno del hueso, (CAILLET, 2005).

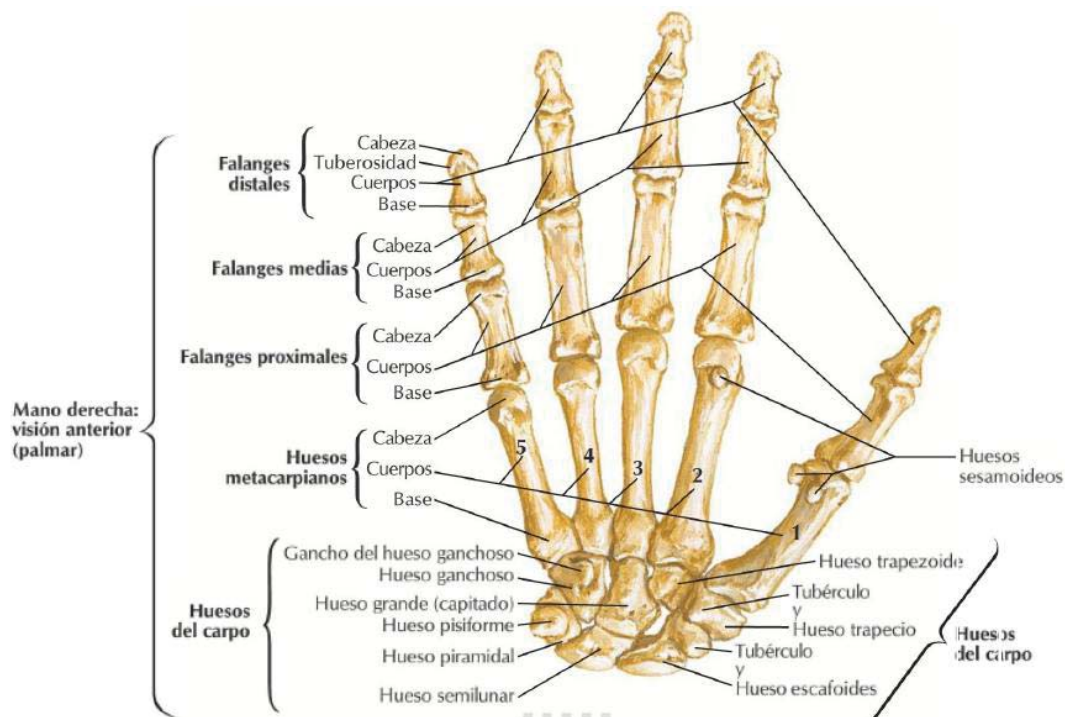


Figura 2.6 Fuente huesos de la mano.
Fuente (NETTER, 2015, pág. 443).

2.2.3 Sistema articular, ligamentos y tendones.

(Vásquez Sanchez, 2008) Define como flexión a la curva o la reducción de los ángulos que forman partes del cuerpo, y el caso contrario como extensión, en caso de la mano estos movimientos se dan en las articulaciones denominada Articulación Distal Intertfalangial (DIF), Proximal Intertfalangial (PIF), Metacarpofalangial (MCF) y Carpometarpiana (CMC), como se ven en la Figura 2.7,



cada uno de los dedos cuentan con tres falanges a excepción del pulgar que cuenta solo con dos (proximal y distal).

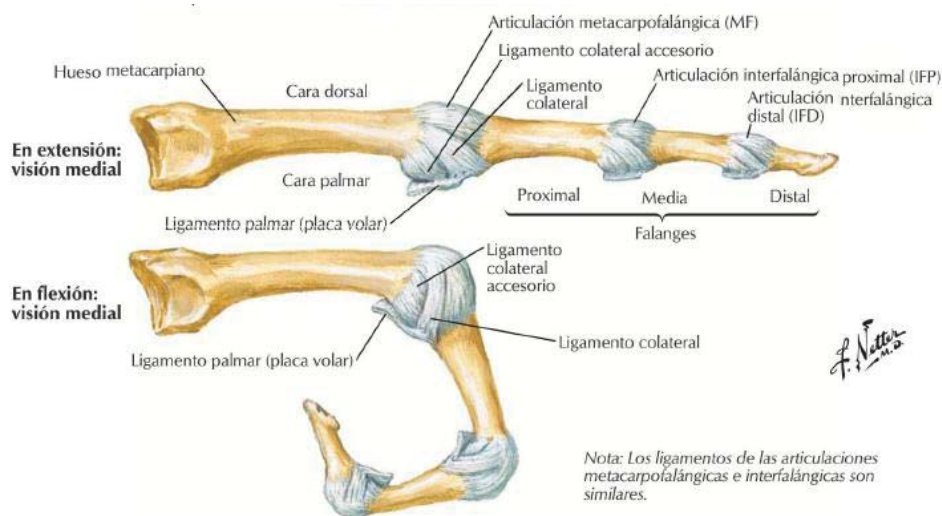


Figura 2.7 Articulación de la mano.
Fuente: (NETTER, 2015, pág. 445).

Los ligamentos están hechos de tejido fibroso que unen a los huesos entre sí, manteniendo estable las estructuras óseas, los tendones cumplen la función de conectar los huesos con los músculos, esto sirve para dar la fuerza motriz al sistema óseo, en la Figura 2.8 puede verse la ubicación de cada uno de los ligamentos y tendones. (Vásquez Sanchez, 2008).

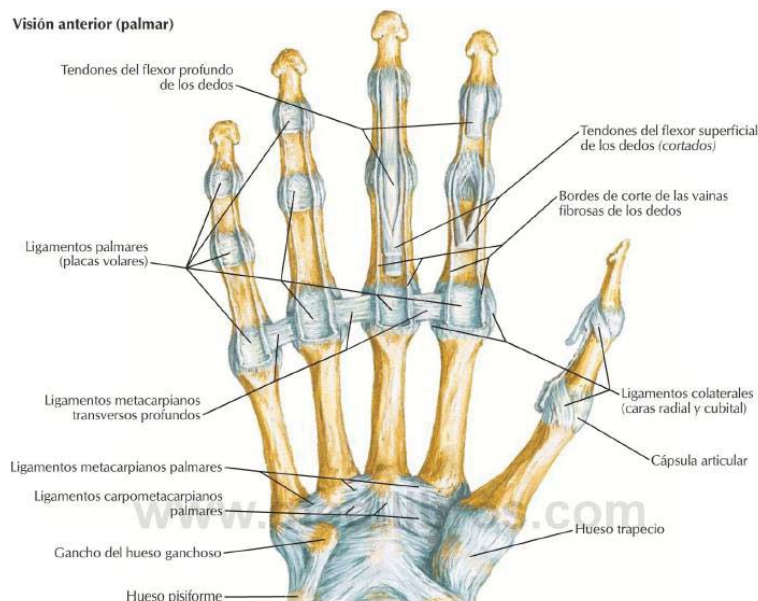


Figura 2.8 Ligamentos y tendones.
Fuente: (NETTER, 2015, pág. 445).



2.2.4 Sistema Muscular.

Básicamente hay dos tipos de músculos que controlan los movimientos de la mano los intrínsecos y extrínsecos los primeros están alojados en la mano, mientras que los extrínsecos se ubican en el antebrazo siendo de mayor tamaño que los primeros, como se ve en Figura 2.9.

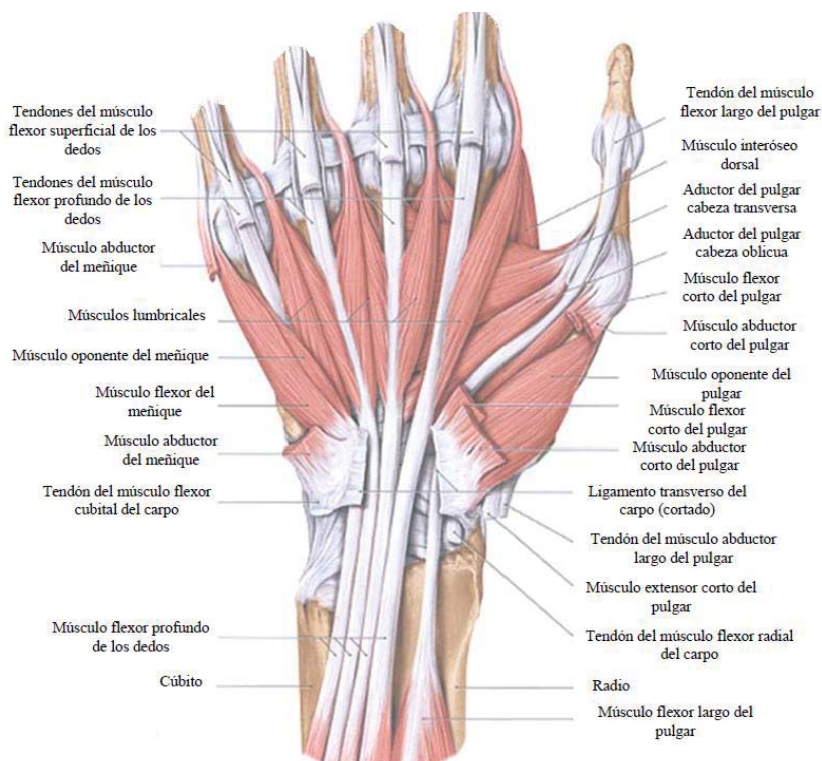


Figura 2.9 Músculos de la mano.
Fuente (NETTER, 2015).

2.2.5 Movilidad de las uniones del dedo y de la muñeca.

La movilidad desarrollada por los dedos se da en la articulaciones mencionadas anteriormente, mide el máximo grado de extensión hasta el máximo de flexión, (Lauren Banks, 2001), definió los movimientos de la muñeca y de cada falange del dedo índice y pulgar según puede verse en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Rango de movimiento.

| Articulación | Movimiento | Rango de movimiento |
|--------------|------------|---------------------|
| Muñeca. | Flexión. | 0°-80° |
| | Extensión. | 0°-60° |
| | Radial. | 0°-20° |
| | Cubital. | 0°-40° |



| | | | |
|------------------|--|-------------------|----------|
| Índice. | MCP (Articulación Metacarpofalángica) | Flexión/extensión | 0°-90° |
| | PIP (Articulación Interfalángial Proximal) | Flexión/extensión | 0°-100° |
| | DIP (Articulación Interfalángial Distar) | Flexión/extensión | 0°-90° |
| Pulgar. | Metacarpofalángica. | Flexión/extensión | 0°-50° |
| | Interfalángica. | Flexión/extensión | 0°-90° |
| | Carpometacarpiana. | Aducción Palmar | 0° |
| | | Abducción Palmar | 0° - 45° |
| | | Aducción Radial | 0° |
| Abducción Radial | | 0° - 60° | |

Fuente: (Lauren Banks, 2001).

La abducción es el movimiento de un segmento del cuerpo más allá de su eje medio de éste o a la parte a la que va unido, y la aducción es el movimiento de un segmento o combinación de segmentos del cuerpo hacia su eje medio o a la parte a la que está o están unidos (Figura 2.10). Los movimientos de abducción y aducción de los dedos están fuera de los objetivos de este trabajo, por lo que no se implementarán en el análisis matemático, pero se dejará listo el prototipo para realizar dichos movimientos en trabajos futuros.

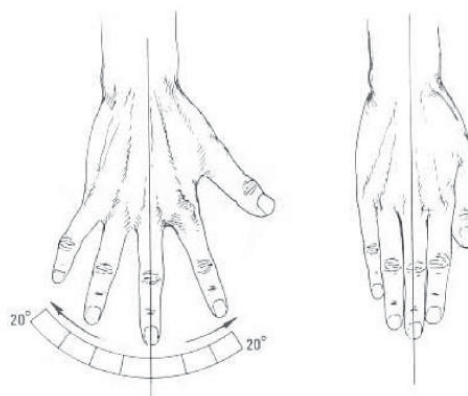


Figura 2.10 Abducción y aducción de los dedos.
Fuente (Vásquez Sanchez, 2008)

2.2.6 Movimientos de la mano humana.

Por la gran cantidad de articulaciones y músculos descritos la mano posee la facultada de tener un variado número de movimientos, (Schlesinger, 1919) desarrollo un clasificación de la taxonomía para el estudio de la destreza de las



manos huinas, las agrupo en seis categorías: A) Cilíndrico, (B) Punta, (C) de Gancho, (D) palmar, (E) Esférico, (F) Tarjeta, según la Figura 2.11.

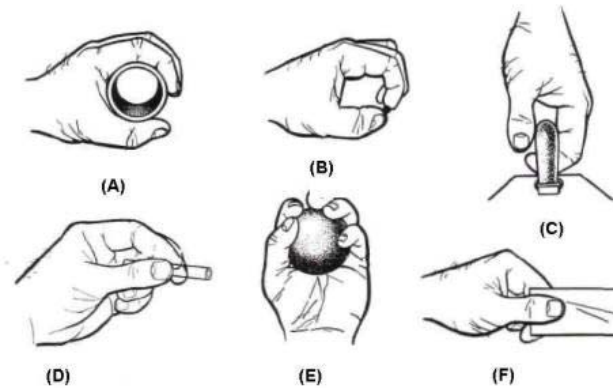


Figura 2.11 Taxonomía de la mano.
Fuente: (Schlesinger, 1919)

2.2.7 Sujeción cilíndrica.

La sujeción cilíndrica, en el que se usan los dedos para envolverse alrededor del objeto, por ejemplo al coger un vaso, la presión en Puno en la cual la mano rodea un objeto angosto. (Salinas Durán & Lugo Agudelo, 2008).



Cilíndrico

Figura 2.12 Agarre cilíndrico.
Fuente (Salinas Durán & Lugo Agudelo, 2008).



2.2.8 Modelo biomecánico.

Con la base biomecánica acerca de la de la mano es posible construir un modelo mecánico que servirá como inicio para la construcción de un modelo matemático que represente al prototipo. Se usará este sistema para poder definir la orientación de las articulaciones y la selección de los actuadores (Figura 2.13).

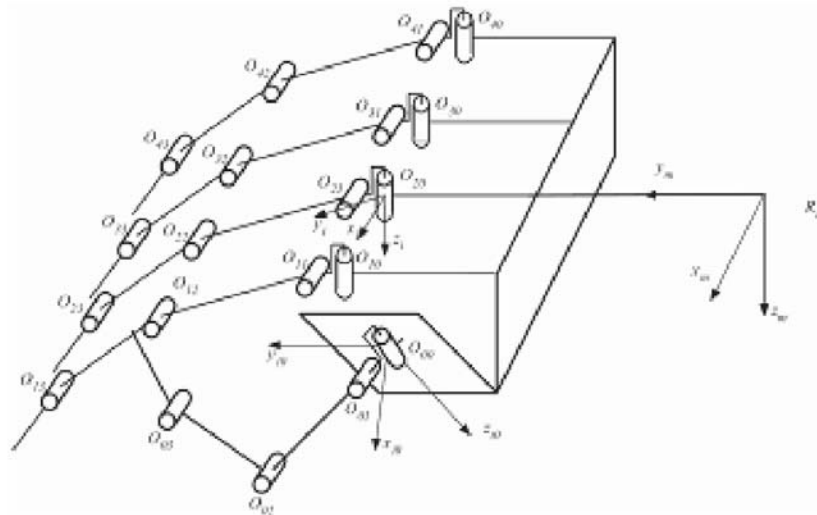


Figura 2.13 Modelo mecánico mano.
Fuente: *Biomechanics of the hand* (Chao, 1989).

(Chao, 1989) Define su modelo mecánico: El eje Y se proyecta a lo largo del eje de las falanges y del metacarpiano, pasando desde el centro de rotación al centro de la superficie cóncava articular en el extremo proximal. El eje X se proyecta dorsalmente, y el eje Z se proyecta hacia el cuerpo.

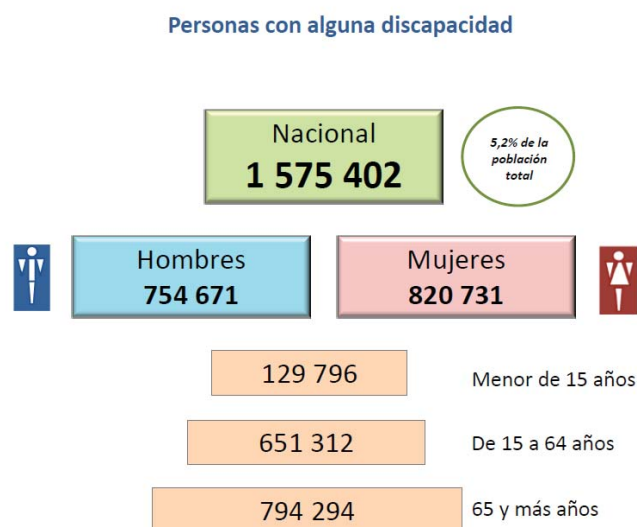
Por medio de este sistema de referencia se puede determinar la posición de los dedos en un espacio de tres dimensiones. Cada par de puntos se expresa con respecto a los sistemas de referencia distal y proximal de cada articulación. Se supone que los tendones se contraen permaneciendo constantes con respecto a los sistemas de coordenadas distal y proximal.



2.3 ESTADÍSTICA DISCAPACITADOS EN EL PERÚ.

El Instituto Nacional de estadística e informática (INEI, 2012), realizó la primera encuesta Nacional especializada sobre la discapacidad en el año 2012, obteniéndose los siguientes resultados:

- El 5,2% de la población nacional (1 millón 575 mil 402 personas) padecen de algún tipo de discapacidad o limitación física y/o mental (Figura 2.14). Esta condición afecta, en mayor proporción, a la población de 65 y más años (50,4%) y de 15 a 64 años (41,3%).



*Figura 2.14 Persona con alguna discapacidad.
Fuente: INEI - Primera Encuesta Nacional Especializada sobre Discapacidad, 2012.*

- Los tipos de limitación más frecuentes en la población con discapacidad son las dificultades para moverse caminar y/o para usar brazos o piernas (59,2%) y las de tipo visual (50,9%) (Figura 2.15).



Tipo de limitación

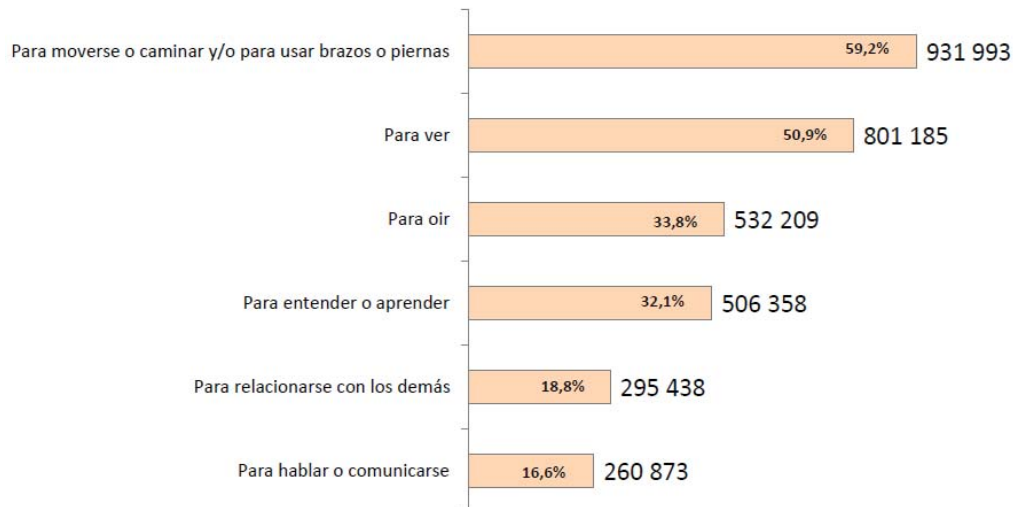


Figura 2.15 Tipo de limitaciones en las personas.

Fuente: INEI - Primera Encuesta Nacional Especializada sobre Discapacidad, 2012.

- La Tabla 2.2, muestra los diferentes tipos de pacientes con discapacidad motora atendidos en el Instituto Nacional De Rehabilitación en diferentes años. Se puede apreciar los datos obtenidos entre los años 2004 y 2012 con un promedio de **399** atenciones de año de pacientes discapacitados con amputaciones en el Instituto Nacional de Rehabilitación.

Tabla 2.2 Número de pacientes con discapacidad atendidos en el INR.

| PROGRAMA DE ATENCIÓN PARA LA POBLACIÓN CON DISCAPACIDAD PACIENTES ATENDIDOS EN EL INSTITUTO NACIONAL DE REHABILITACIÓN "DRA. ADRIANA REBAZA FLORES", SEGÚN TIPOS DE DISCAPACIDAD Y DIAGNÓSTICOS, 2004 – 2012 | | | | | | | | | |
|---|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Tipos de discapacidad y diagnósticos | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 |
| Total | 25 555 | 22 343 | 21 399 | 19 915 | 20 741 | 20 751 | 19 190 | 21 160 | 19 315 |
| Discapacidad del aparato locomotor | 14 348 | 12 107 | 10 852 | 10 037 | 9 881 | 9 847 | 10 347 | 11 467 | 9 885 |
| Defectos posturales | 6 579 | 4 774 | 4 296 | 4 229 | 4 156 | 4 110 | 4 596 | 4 676 | 3 794 |
| Reumatismo extra auricular | 2 755 | 2 500 | 2 263 | 1 837 | 1 622 | 1 893 | 1 861 | 2 297 | 1 964 |
| Secuelas traumáticas (fracturas) | 677 | 601 | 485 | 436 | 524 | 465 | 347 | 418 | 367 |
| Enfermedades reumáticas articulares | 1 296 | 1 233 | 1 137 | 1 086 | 1 076 | 1 017 | 1 129 | 1 533 | 1 458 |
| Amputados | 355 | 342 | 361 | 387 | 462 | 391 | 456 | 432 | 401 |
| Trastorno sistema nervio periférico | 524 | 462 | 412 | 334 | 294 | 320 | 354 | 379 | 272 |
| Secuelas de polio | 140 | 169 | 130 | 105 | 99 | 121 | 76 | 121 | 46 |
| Lesiones centrales encefálicas | 908 | 899 | 939 | 852 | 821 | 730 | 711 | 793 | 807 |
| Lesiones medulares | 455 | 489 | 382 | 409 | 463 | 475 | 451 | 469 | 464 |
| Pacientes sanos | 284 | 257 | 78 | 23 | 20 | 50 | 66 | 51 | 35 |
| Otros | 375 | 381 | 369 | 339 | 344 | 275 | 300 | 298 | 277 |

Fuente: Instituto nacional de estadística e informática "Compendio Estadístico Perú 2013".



- La tabla 2.3, muestra el número de atenciones entre los años 2004 y 2013 en la Clínica San Juan De Dios, uno de los principales centros de atención de ortopedia del país, el área que nos interesa es el de ortopedia y traumatología, que representan un alto número de las atenciones totales en la institución mencionada con un promedio de 10.93% del total.

Tabla 2.3 Número de atenciones realizadas en el Hogar Clínica San Juan De Dios.

| NÚMERO DE ATENCIONES REALIZADAS EN EL HOGAR CLÍNICA SAN JUAN DE DIOS, SEGÚN TIPO DE ATENCIÓN, 2004 - 2013 | | | | | | | | | | |
|---|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Tipo de atención | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 |
| Total | 250.693 | 256.054 | 250.174 | 248.824 | 232.861 | 195.313 | 251.763 | 283.095 | 297.315 | 412.463 |
| Consulta por primera vez | 13.153 | 14.245 | 14.777 | 14.209 | 12.746 | 13.418 | 14.207 | 17.037 | 14.364 | 27.863 |
| Consultas externas | 75.784 | 76.544 | 66.073 | 61.173 | 56.542 | 46.069 | 51.147 | 50.740 | 49.939 | 92.866 |
| Ortopedia y traumatología | 35.869 | 37.329 | 35.470 | 31.810 | 28.719 | 22.364 | 23.305 | 26.039 | 24.307 | 27.756 |
| Cirugía pediátrica 1/ | 99 | 71 | - | - | - | - | - | - | - | 74 |
| Neurología | 3.205 | 3.324 | 3.035 | 2.597 | 2.474 | 2.202 | 2.092 | 1.838 | 1.496 | 1.729 |
| Medicina física y rehabilitación | 8.431 | 8.795 | 8.764 | 9.263 | 8.376 | 7.697 | 9.585 | 10.019 | 11.353 | 11.534 |
| Cardiología | 1.773 | 1.734 | 1.664 | 1.617 | 1.450 | 958 | 1.254 | 1.239 | 1.140 | 1.631 |
| Neumología | 2.189 | 1.620 | 627 | 642 | 534 | 311 | 367 | 315 | 329 | 1.486 |
| Oftalmología | 1.026 | 1.190 | 1.192 | 1.155 | 1.090 | 784 | 743 | 551 | 140 | 583 |
| Pediatría | 7.460 | 6.808 | 6.651 | 5.713 | 5.547 | 4.402 | 4.569 | 3.464 | 3.405 | 8.758 |
| Odontología | 1.348 | 1.145 | 1.608 | 1.296 | 1.488 | 1.848 | 2.385 | 2.217 | 1.863 | 2.476 |
| Cirugía plástica | 1.812 | 1.848 | 1.707 | 1.483 | 1.368 | 158 | 1.171 | 1.053 | 1.018 | 710 |
| Urología | 736 | 614 | 674 | 713 | 670 | 657 | 571 | 572 | 417 | 864 |
| Psicología 2/ | 10.310 | 10.322 | 2.914 | 3.054 | 2.889 | 3.139 | 3.547 | 1.460 | 1.242 | 3.182 |
| Cirugía de tórax y cardiovascular | 543 | 416 | 443 | 436 | 412 | 383 | 336 | 299 | 289 | 358 |
| Otorrinolaringología | 983 | 1.328 | 1.324 | 1.133 | 1.259 | 811 | 864 | 755 | 607 | 1.112 |
| Genética 3/ | - | - | - | 261 | 266 | 355 | 262 | 332 | 336 | 355 |
| Neuropediatría | - | - | - | - | - | - | 46 | 482 | 725 | 570 |
| Nutrición | - | - | - | - | - | - | 50 | 105 | 87 | 968 |
| Obstetricia | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 1.975 |
| Medicina General | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 18.025 |
| Endocrinología | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 429 |
| Ginecología | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 4.940 |
| Gastroenterología | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 297 |
| Geriatría | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 286 |
| Neurocirugía | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 242 |
| Cirugía Cabeza y Cuello | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 130 |
| Cirugía General | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 936 |
| Cirugía Plástica | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 710 |
| Dermatología | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 355 |
| Atenciones de otras especialidades de consultorio externo | - | - | - | - | - | - | - | - | 1.185 | 395 |

Fuente: clínica San Juan de Dios.



2.4 PACIENTES AMPUTADO POR ACCIDENTES EN EL TRABAJO.

El trabajo es una actividad que dignifica al hombre, satisface sus necesidades y permite su desarrollo, en condiciones que pueden causar daño a su integridad física y a su salud, se producen accidentes y enfermedades (Normas Técnicas del Seguro Complementario de Trabajo de riesgo, Decreto Supremo N° 003-98-SA. El Peruano, N° 6502, (14-04-1998).) (PERUANO, 2006).

En el 2004. Es Salud reporta cerca de 1900 casos de accidentes laborales en el sector formal, si a esto le sumamos el 60% que representa el sector informal, esta cifra llegaría a los 60 000 casos año, 135 casos diarios. (Dirección de Salud Lima Ciudad. Análisis de la Situación de Salud DISA Lima Ciudad 2005. Perú: Ministerio de salud; 2005).

De todos estos accidentes laborales 1290 pacientes presentaron algún tipo de amputación, podemos hacer la estadística respectiva para ver el porcentaje respectivo.

La suma de personas con amputación en dedos, debajo del codo y arriba de este da un total de 40.7% del total de personas amputadas, que han perdido parte de sus extremidades superiores esas son 525.03 personas al año.

Tabla 2.4 Porcentaje de amputaciones en accidentes laborales 2004.

| Nivel de Amputación | % |
|--------------------------|------|
| Debajo de rodilla. | 27.8 |
| Dedos de la mano. | 22.2 |
| Arriba de rodilla. | 12.9 |
| Debajo del codo. | 11.1 |
| Arriba del codo. | 7.4 |
| Combinado. | 5.6 |
| Tarso. | 2.8 |
| Transmetacarpiano. | 1.9 |
| Metatarsfalángica. | 1.9 |
| Metacarpo. | 1.9 |
| Desarticulado de codo. | 0.9 |
| Hemipelvectomía. | 0.9 |
| Desarticulado de hombro. | 0.9 |
| Desarticulado de cadera. | 0.9 |
| Dedos del pie. | 0.9 |
| Total. | 100 |

Fuente: Pacientes amputados por accidentes de trabajo.

Fuente: .N.R.Herminio T. Camacho Conchucos.



2.5 NORMA DIN 33.402.

Las dimensiones de las manos humanas son muy diferentes de una persona a otra. Se usó como referencia la norma antropométrica DIN 33.402, que define las dimensiones de la mano de personas estándar (Anexo A).

2.6 MECANISMO DE CUATRO BARRAS.

Un mecanismo es un dispositivo mecánico que tiene como propósito transferir el movimiento y/o fuerza de una fuente a una salida. Un eslabonamiento consiste en eslabonamientos o barras, generalmente rígidos, conectados por juntas como: pasadores o juntas. (ERDMAN, 1997).

2.6.1 Grado de libertad (GDL) o movilidad.

La movilidad de un sistema mecánico, se puede clasificar de acuerdo con el número de grados de libertad que posee. El GDL del sistema es igual al número de parámetros independientes que se requiere para definir de manera única su posición en el espacio en cualquier instante de tiempo. (L.Norton, 2005).

2.6.2 Inversión de mecanismos.

Se denomina inversión cinemática de un mecanismo a la obtención de un mecanismo diferente a partir de otro dado sin cambiar su número y tipo de pares cinemáticos, sino únicamente cambiando el eslabón que actúa como eslabón fijo o tierra del mecanismo. (Mecapedia, 2016).

2.6.3 Lazo vectorial.

El método de lazo vectorial para el análisis de posiciones de mecanismos, consiste en crear un lazo vectorial alrededor del mecanismo, las direcciones de los vectores se eligen de modo que defina sus ángulos en donde se desee medirlos. Por definición, el Ángulo de un vector siempre se mide en su raíz, no en su cabeza, según se puede ver en la Figura 2.16 (Macedo Silva, 2010, pág. 34).

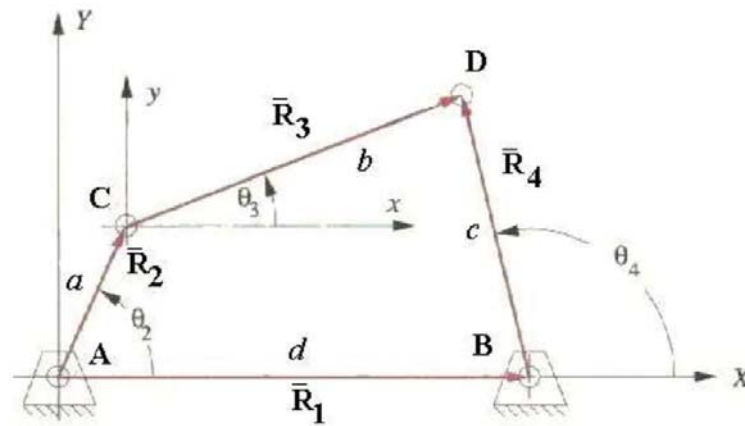


Figura 2.16 Lazo vectorial.
Fuente (Macedo Silva, 2010, pág. 34).

2.7 NÚMEROS COMPLEJOS.

Es una entidad matemática que viene dada por un par de números reales, el primero se denomina la parte real X y al segundo Y la parte imaginaria. Los números complejos se presentan en la forma usual de “ $x+yi$ ”.

2.7.1 Identidad Euler.

La identidad de Euler es un caso especial de la fórmula de Euler (Figura 2.17), para todo número real x , que representa un ángulo en el plano complejo. (Macedo Silva, 2010).

Donde:

e = base del logaritmo natural.

i = la unidad imaginaria.

$\sin(x)$, $\cos(y)$ = funciones trigonométricas seno y coseno.

$$e = \cos x + i \sin x \quad (2.1)$$

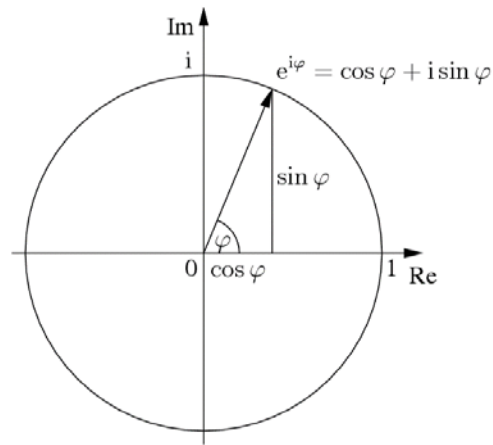


Figura 2.17 Identidad de Euler.
Fuente propia.

2.7.2 Newton Raphson.

El método de Newton-Raphson o el método de Newton-Fourier descrito por Isaac Newton, es un método interactivo que permite aproximar una ecuación de tipo $f(x) = 0$. Partiendo de una estimación inicial x_0 y construyendo una sucesión de aproximaciones de forma recurrente mediante la fórmula (2.3).

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \quad (2.3)$$

Donde $f'(x_j)$ es la derivada de $f(x_j)$

Supóngase que se desea calcular las raíces de $f(x)$, se evalúa el valor cercano x_1 a la raíz de la función, trazando una tangente al punto x_1 se obtiene el punto x_2 que estará más cerca a la raíz x_3 (Figura 2.18). Esto se hará hasta que se consiga un resultado con la tolerancia deseada. (Reyes Salazar , 2016).

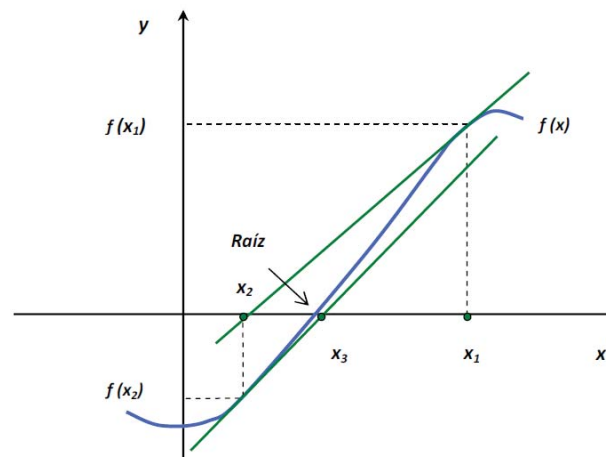


Figura 2.18 Newton Raphson.
Fuente (Reyes Salazar , 2016).



2.7.3 Sistema de Ecuaciones no lineales.

Un sistema de ecuaciones es no lineal, cuando al menos una de sus ecuaciones no es de primer grado. Y requiere de una resolución no convencional como por ejemplo el método de Newton Raphson.

Por ejemplo:

$$x^2 = 8x$$

$$2x - \sin(y) = 8$$

2.8 CINEMÁTICA Y CINÉTICA.

(L.Norton, 2005) Define Estos dos conceptos no se pueden separar al hacer una análisis óptimo de un mecanismo.

Cinemática, es el estudio del movimiento sin considerar las fuerzas y Cinética es el estudio de las fuerzas sobre el sistema en movimiento

- Cinemática:

El objetivo fundamental es el de diseñar los movimientos deseados de las partes mecánicas, y luego calcular matemáticamente la posiciones, velocidades y aceleraciones.

- Cinética:

Teniendo la información necesaria de la parte cinética, se pueden a calcular las fuerzas dinámicas que se presentan en el mecanismo y que generan los esfuerzos, con esto se puede crear sistemas libres de falla durante la vida de servicio.

2.8.1 Segunda ley de newton (lineal y rotacional).

La aceleración de un objeto es directamente proporcional a la fuerza neta que actúa sobre él, e inversamente proporcional a su masa. La dirección de la aceleración es la misma de la fuerza aplicada.

La relación entre el par neto externo y la aceleración angular es de la misma forma que en la segunda ley de Newton y se llama algunas veces segunda ley de Newton para la rotación.



$$\tau = I * \alpha \quad (2.4)$$

Donde:

τ = Par torsor.

I = Segundo momento de inercia.

α = Aceleración angular.

2.9 ESFUERZO.

Es la distribución de fuerza actuante en un punto sobre una superficie.

2.9.1 Esfuerzos: principales, equivalente (Von Mises).

- Los esfuerzos principales representan el esfuerzo normal máximo y mínimo en un punto, combinando el esfuerzo normal y cortante actuante sobre ese punto. Figura 2.19, la ecuación (2.5) define los esfuerzos principales.

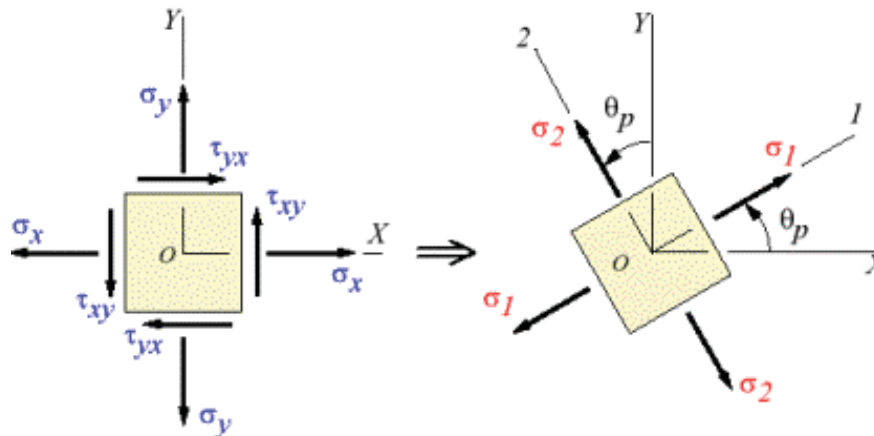


Figura 2.19 Esfuerzos principales Fuente. (Hibbeler, 2006).

$$\sigma_{max} = \sigma_{1,2} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (2.5)$$

- Criterio de la energía de distorsión o de Von Mises. Según este criterio, solamente parte de la energía de deformación, la debida al cambio de forma, determina la aparición de deformaciones plásticas. Se establece como tensión equivalente la ecuación (2.6).

$$\sigma_{equiv.} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (2.6)$$



2.10 SAM 6.1.

SAM (Síntesis y Análisis de Mecanismos) es un paquete interactivo de software para PC, para el diseño, análisis (movimiento y fuerza) y optimización de mecanismos planares arbitrarios. SAM integra análisis numérico de pre-procesamiento y pos-procesamiento, como animación y diagramas x-y, con un entorno fácil de usar ofreciendo menús desplegables, soporte para el ratón y recursos de ayuda (Figura 2.20).

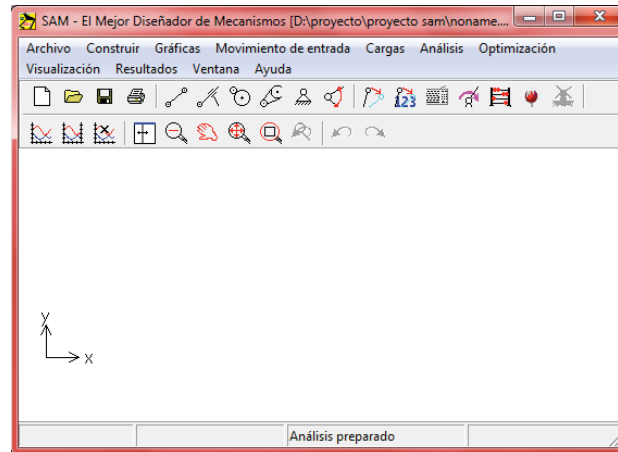


Figura 2.20 Entorno SAM.
Fuente SAM 6.1.

2.11 AUTODESK INVENTOR® 2015 MODULO DE SIMULACIÓN DINÁMICA.

El software de diseño mecánico y CAD 3D Inventor® incluye: Opciones de modelado, herramientas de automatización del diseño y herramientas de visualización y simulación avanzadas.

El módulo de simulación dinámica evalúa el movimiento, la velocidad y la aceleración del diseño a medida que se le aplican fuerzas. Calcula las fuerzas resultantes generadas a través de los movimientos que el diseño experimentaría en el mundo real (Figura 2.21).

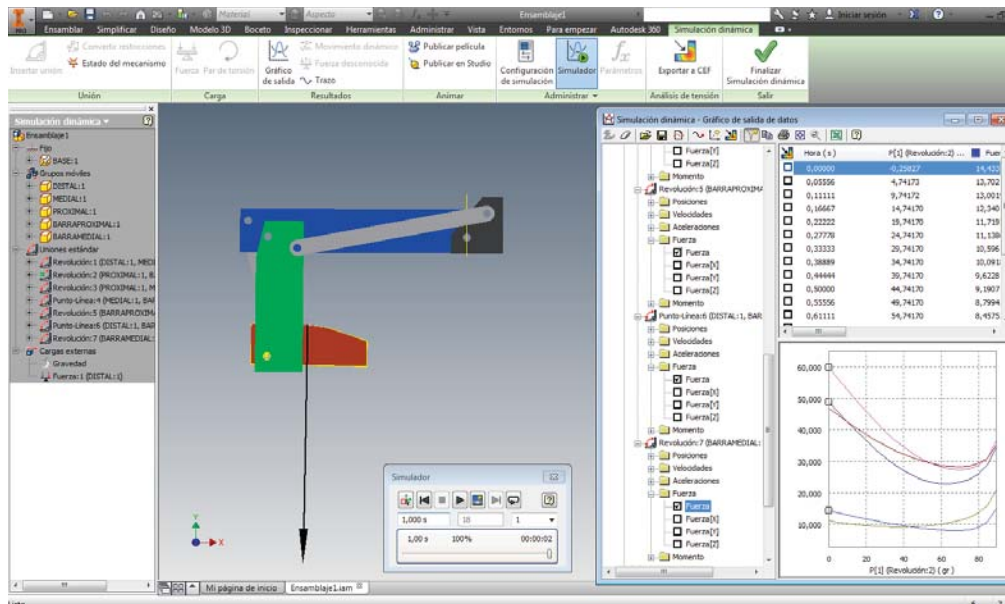


Figura 2.21 Entorno simulación dinámica
Fuente: Autodesk Inventor2015

2.12 IMPRESORAS 3D.

Una impresora 3D es un dispositivo capaz de generar un objeto sólido tridimensional mediante (y ahí radica la principal diferencia con los sistemas de producción tradicionales) la adición de material. Los métodos de producción tradicionales son sustractivos, es decir, generan formas a partir de la eliminación de exceso de material. Las impresoras 3D se basan en modelos 3D para definir qué se va a imprimir. Un modelo no es sino la representación digital de lo que vamos a imprimir mediante algún software de modelado (Figura 2.22).

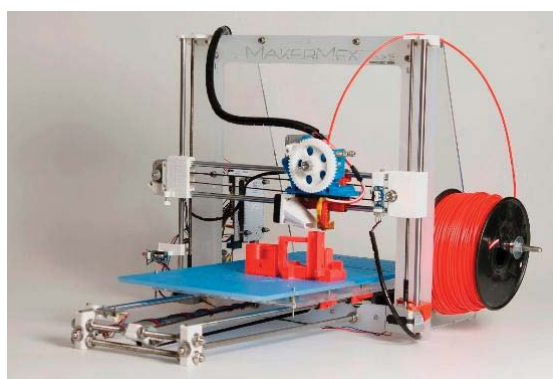


Figura 2.22 Impresora 3d básica
Fuente: (Azorín, 2016)

2.13 ABS (ACRILONITRILO BUTADIENO ESTIRENO).

El acrilonitrilo butadieno estireno es un termoplástico utilizado habitualmente en la impresión 3D (impresoras 3D de plástico). De superficie rugosa y con similitudes



con el plástico en términos de textura, durabilidad y funcionalidad, se funde a aproximadamente 200°C. Es resistente y está disponible en varios colores. La impresión 3D de ABS implica el uso de impresoras 3D de plástico ABS y se utiliza para crear objetos de uso diario, tales como juguetes (el famoso fabricante de juguetes Lego las utiliza para sus juguetes) (Figura 2.23).



*Figura 2.23 Hilos de Acrilonitrilo butadieno estireno.
Fuente (Formizable, 2016)*



CAPÍTULO III:

3 DETERMINACIÓN DEL PROYECTO PRELIMINAR.

3.1 DISEÑO DE LA MAQUINA

Este capítulo tiene por objeto fundamentar las bases del diseño, por medio del análisis de la estructura de funciones, la elaboración de la matriz morfológica y los conceptos de solución para encontrar la solución óptima, para luego realizar los cálculos y selección de componentes principales, para definir el concepto del diseño del prototipo haremos uso del diagrama de flujos para diseño (Figura 3.1)

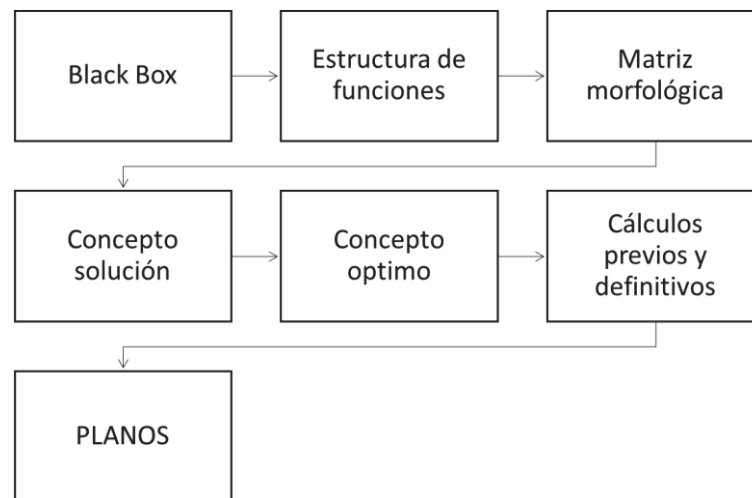


Figura 3.1 Diagrama de flujo para el diseño.
Fuente propia.

3.1.1 Estructura de funciones.

A continuación se presenta la abstracción de caja negra (Black-Box.), con lo cual se definen para unas entradas específicas se obtendrán procesos aún desconocidos.

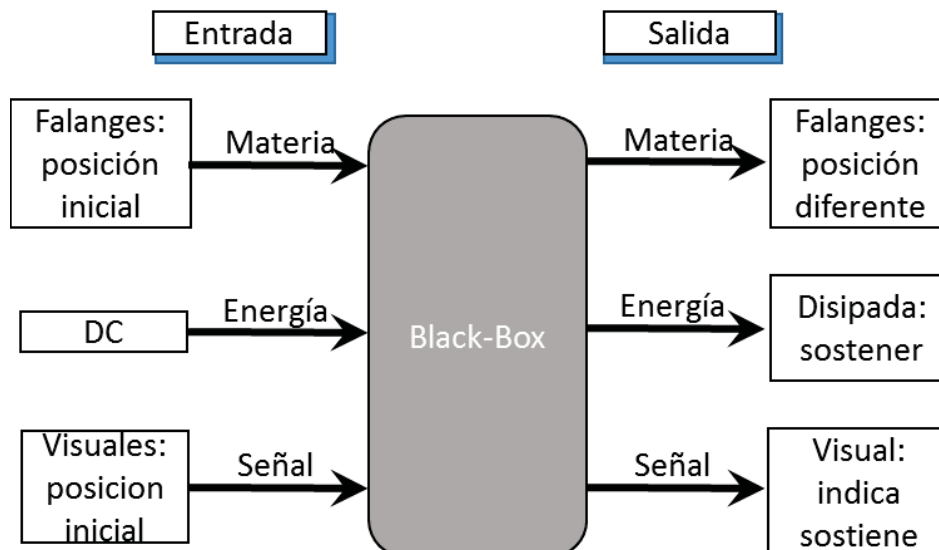


Figura 3.2 Black –box.
Fuente propia.

Entradas:

- Materiales: Falanges.
- Energía : Energía requerida para mover el prototipo mediante, motor dc, hidráulica, neumática, etc.
- Señal : Visuales de las falanges.

Salidas:

- Materiales: Falanges en diferente posición.
- Energía : Como calor disipado y desgaste, fuerza para sostener los objetos.
- Señal : Visuales de las falanges que indican que está sosteniendo un objeto.

3.1.2 Selección de tecnología y descripción del proyecto óptimo.

Se elaboró una matriz de funciones para la selección del diseño óptimo haciendo uso de la metodología de diseño VDI 2221 descrita en “Métodos de Diseño en Ingeniería Mecánica” (BARRIGA GAMARRA , 2006), teniendo en cuenta cada una de las siguientes funciones parciales descritas a continuación.



Funciones parciales:

- Sujetar por fricción.
- Sujetar por forma.
- Mover falanges
- Transmisión de potencia
- Generación de potencia
- Mover el sistema (Fuente de energía)

La matriz morfológica de funciones se muestra en la Tabla 3.1

Tabla 3.1 Matriz morfológica.

| | | Matriz morfológica | | | | |
|---|--------------------------------------|----------------------|---------------------|----------------|-----------------------|-------------------|
| | Función parcial | Soluciones parciales | | | | |
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1 | Sujetar por fricción | Falange rugosa | Superficie Rugosa | | | |
| 2 | Sujetar por forma (Falanges) | fijas | Móviles | | | |
| 3 | Mover falanges | poleas | Mecanismo | Sin movimiento | Movimiento individual | |
| 4 | Transmisión de potencia | Engranajes | Mecanismo corredera | Cuerda polea | | |
| 5 | Generación de potencia | Neumático | Hidráulico | Servomotor dc | Motor lineal | Musculo Neumático |
| 6 | Mover el sistema (fuente de energía) | DC | Neumático | Hidráulico | | |

P1
P2
P3
P4

Fuente propia.

Para la elección del diseño óptimo se consideró la tecnología más adecuada, realizado un análisis técnico y económico de cada uno de los proyectos solución P1, P2, P3, P4 (Figura 3.3), según el formato y escala de la metodología DVI 2225



(BARRIGA GAMARRA , 2006), los resultados se pueden ver en la Tabla 3.2, y Tabla 3.3.

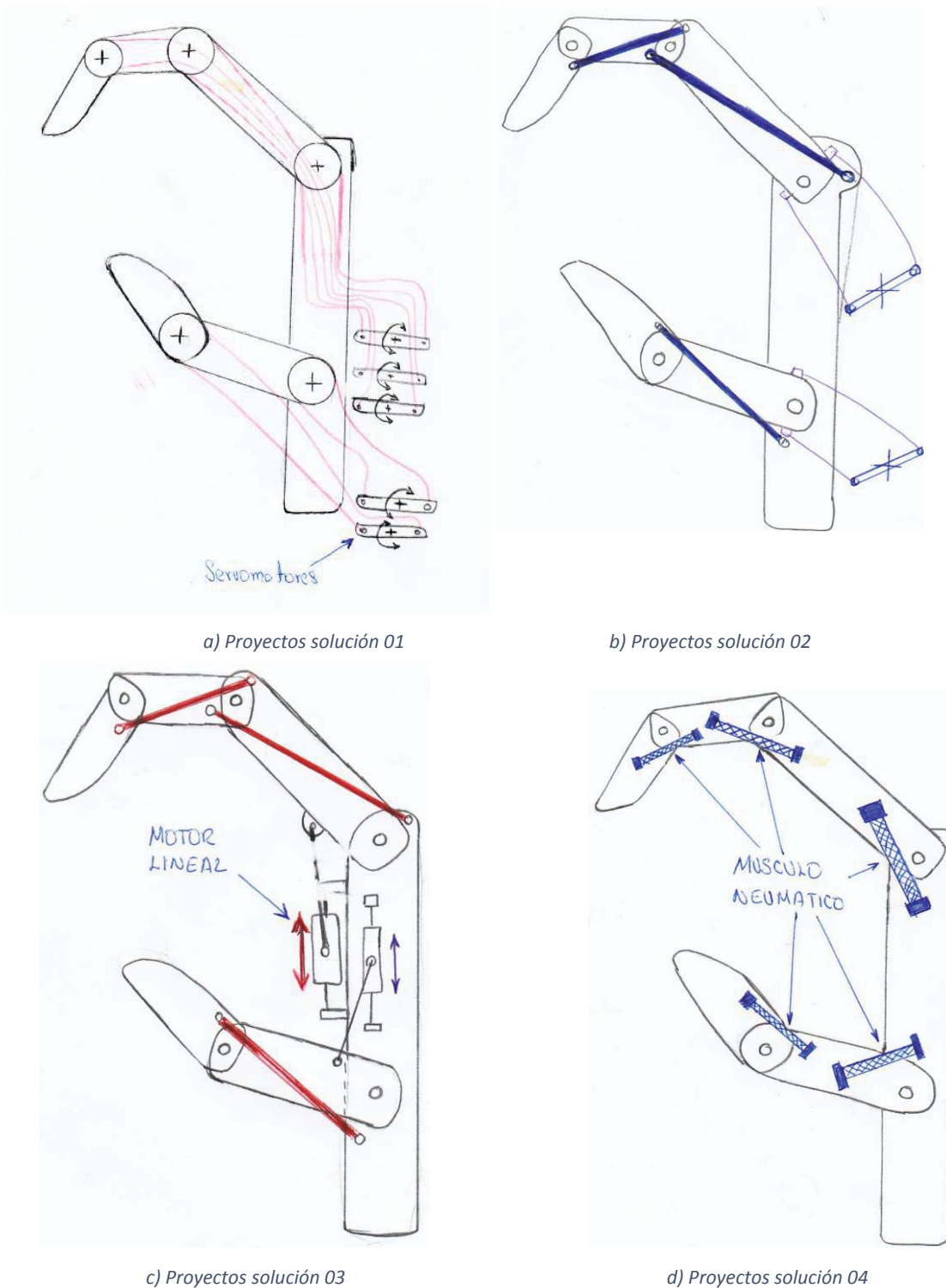


Figura 3.3 Proyectos solución.
Fuente propia.



Tabla 3.2 Evaluación de proyectos de solución- valor técnico.

| Evaluación técnica de proyecto (x) | | | | | | | | | | | | |
|---|-------------------------|----|-------------|----|-------------|----|-------------|----|-------------|----|------------|----|
| Proyecto: Diseño de una mano robótica antropométrica | | | | | | | | | | | | |
| <i>p: puntaje de 0 a 4 (escala VDI 2225)</i> | | | | | | | | | | | | |
| <i>0: No satisface, 1: aceptable a las justas, 2: Suficiente, 3: Bien, 4: Muy bien</i> | | | | | | | | | | | | |
| <i>g: peso ponderado y se da en función a la importancia de los criterios de evaluación</i> | | | | | | | | | | | | |
| Criterio de evaluación para diseños en fase de concepto para proyecto | | | | | | | | | | | | |
| Variantes de concepto | | | S1 | | S2 | | S3 | | S4 | | Sol. Ideal | |
| Nº | Criterios de evaluación | g | p | gp | p | gp | p | gp | p | gp | p | gp |
| 1 | Función. | 8 | 3 | 24 | 3 | 24 | 3 | 24 | 3 | 24 | 4 | 32 |
| 2 | Geometría. | 9 | 3 | 27 | 3 | 27 | 3 | 27 | 3 | 27 | 4 | 36 |
| 3 | Ergonomía. | 10 | 3 | 30 | 3 | 30 | 2 | 20 | 1 | 10 | 4 | 40 |
| 4 | Peso. | 9 | 3 | 27 | 3 | 27 | 3 | 27 | 2 | 18 | 4 | 36 |
| 5 | Rapidez. | 3 | 4 | 12 | 3 | 9 | 3 | 9 | 3 | 9 | 4 | 12 |
| 6 | Fabricación. | 7 | 3 | 21 | 3 | 21 | 3 | 21 | 2 | 14 | 4 | 28 |
| 7 | Montaje. | 7 | 2 | 14 | 3 | 21 | 3 | 21 | 2 | 14 | 4 | 28 |
| 8 | Fuerza prensora. | 9 | 3 | 27 | 3 | 27 | 4 | 36 | 2 | 18 | 4 | 36 |
| 9 | Seguridad. | 3 | 2 | 6 | 3 | 9 | 2 | 6 | 2 | 6 | 4 | 12 |
| 10 | Mantenimiento. | 4 | 2 | 8 | 2 | 8 | 2 | 8 | 2 | 8 | 4 | 16 |
| 11 | Control. | 8 | 2 | 16 | 3 | 24 | 3 | 24 | 1 | 8 | 4 | 32 |
| 12 | Complejidad. | 8 | 2 | 16 | 3 | 24 | 2 | 16 | 1 | 8 | 4 | 32 |
| 13 | Uso de energía. | 7 | 3 | 21 | 3 | 21 | 3 | 21 | 2 | 14 | 4 | 28 |
| Puntaje Máximo. | | | 249 | | 272 | | 260 | | 178.00 | | 368 | |
| Valor técnico. xi | | | 0.68 | | 0.74 | | 0.71 | | 0.64 | | 1 | |
| $xi = \frac{g_1 * p_1 + g_2 * p_2 + \dots + g_n * p_n}{(g_1 + g_2 \dots + g_n)} \leq 1$ | | | | | | | | | | | | |

Fuente propia.

Tabla 3.3 Evaluación de proyectos de solución- valor económico.

| Evaluación económica de proyecto (y) | | | | | | | | | | | | |
|---|----------------------------------|---|----|----|----|----|----|----|----|----|------------|----|
| Proyecto: Diseño de una mano robótica antropométrica | | | | | | | | | | | | |
| <i>p: puntaje de 0 a 4 (escala VDI 2225)</i> | | | | | | | | | | | | |
| <i>0: No satisface, 1: aceptable a las justas, 2: Suficiente, 3: Bien, 4: Muy bien</i> | | | | | | | | | | | | |
| <i>g: peso ponderado y se da en función a la importancia de los criterios de evaluación</i> | | | | | | | | | | | | |
| Criterio de evaluación para diseños en fase de concepto para proyecto | | | | | | | | | | | | |
| Variantes de concepto | | | S1 | | S2 | | S3 | | S4 | | Sol. Ideal | |
| Nº | Criterios de evaluación. | g | p | gp | p | gp | p | gp | p | gp | p | gp |
| 1 | Número de piezas. | 8 | 2 | 16 | 3 | 24 | 3 | 24 | 2 | 16 | 4 | 32 |
| 2 | Costo de materiales. | 9 | 3 | 27 | 3 | 27 | 2 | 18 | 2 | 18 | 4 | 36 |
| 3 | Fácil adquisición de Materiales. | 9 | 2 | 18 | 4 | 36 | 2 | 18 | 2 | 18 | 4 | 36 |
| 4 | Fácil Montaje. | 7 | 3 | 21 | 3 | 21 | 3 | 21 | 3 | 21 | 4 | 28 |



| | | | | | |
|---|-------------|-------------|-------------|-------------|----------|
| Puntaje Máximo. | 82 | 108 | 81 | 73 | 132 |
| Valor económico yi. | 0.62 | 0.82 | 0.61 | 0.55 | 1 |
| $xi = \frac{g_1 * p_1 + g_2 * p_2 + \dots + g_n * p_n}{(g_1 + g_2 \dots + g_n)} \leq 1$ | | | | | |

Fuente propia

De la tabla 02 y tabla 03 obtenemos los valores de evaluación técnicos y económicos (Tabla 3.4) y los resultados de ellos en la Figura 3.4, que muestra los proyectos solución a nivel económico y técnico.

Tabla 3.4 Evaluación técnica economía.

| | V. técnico | V. Económico |
|-----------|------------|--------------|
| proyecto1 | 0.68 | 0.62 |
| proyecto2 | 0.74 | 0.82 |
| proyecto3 | 0.71 | 0.61 |
| proyecto4 | 0.64 | 0.55 |

Fuente propia.

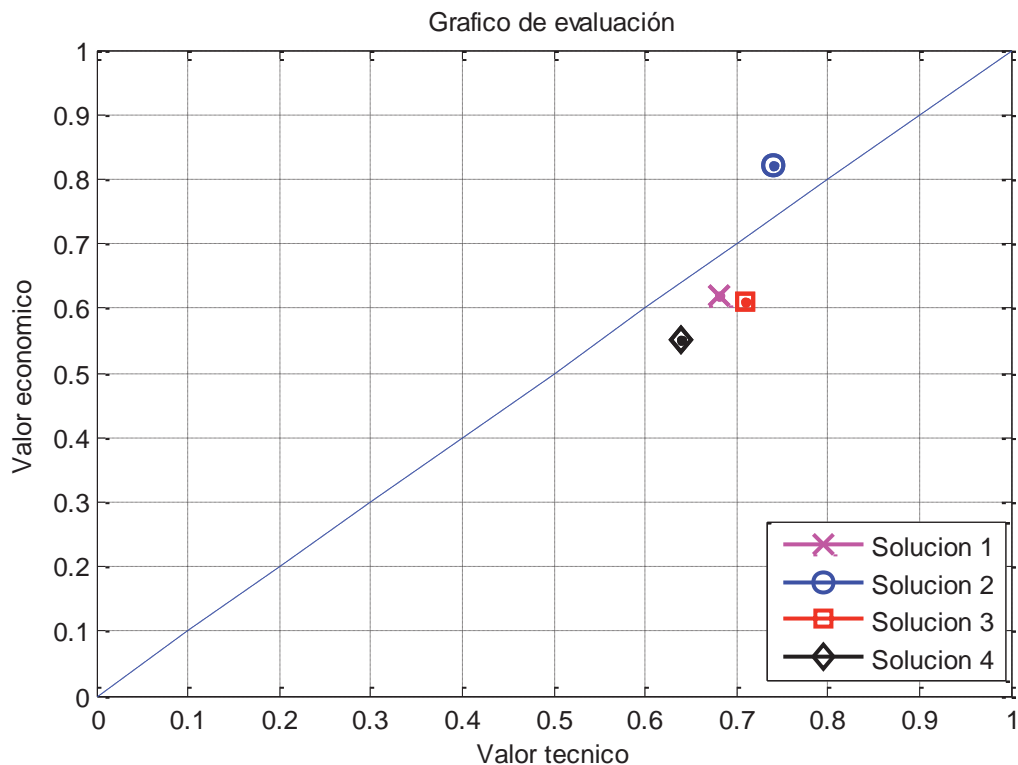


Figura 3.4 Selección de proyecto óptimo.

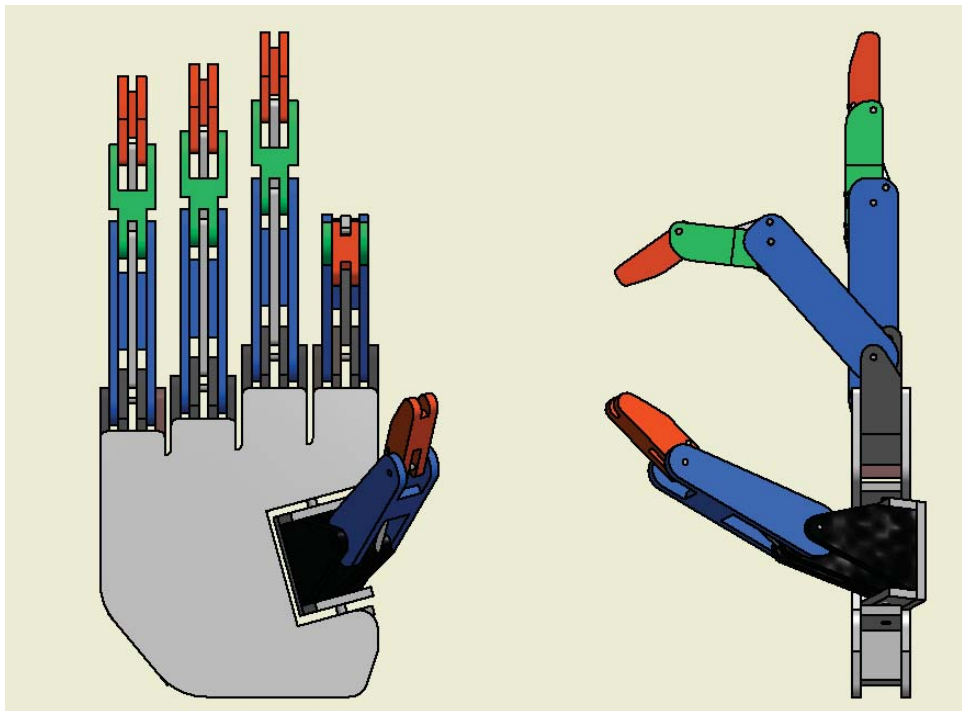
Fuente propia



Por lo tanto se concluyó que el proyecto 2 es el más óptimo, por estar más cerca a la recta y al punto (1,1).

Según se estableció en la limitaciones el diseño solo tomo en cuenta los diseños de los dedos índice y pulgar, el resto de los 3 dedos pueden ser tomados a escala del dedo índice.

Para copiar el movimiento de los falanges de los dedos se tomará como base el funcionamiento de un mecanismo de cuatro barras de doble balancín, el sistema de generación de fuerzas estar dado por un actuador eléctrico en este caso un servomotor, el material propuesto para la construcción del prototipo es acrilonitrilo butadieno estireno (plástico ABS), a excepción de los pasadores que serán de acero.



*Figura 3.5 Modelo conceptual prototipo.
Fuente propia.*

3.2 REQUERIMIENTOS Y PARÁMETROS DE DISEÑO.

El prototipo debe de tener características físicas y geométricas similares a la de la mano humana, debe de ser funcional a partir de un sistema de mecanismos para



cada uno de los dedos, reduciendo los grados de libertad de cada dedo a uno solo.

3.2.1 Especificaciones de diseño.

Tabla 3.5 Matriz de requerimientos.

| | Especificaciones | Requerida | Deseada |
|----------------------------|---|-----------|---------|
| Características generales. | 5 dedos | | X |
| | 14 articulaciones | X | |
| | Tipo de sujeción : cilíndrica | X | |
| | Tiempo de cierre de los falanges (2 segundos) | X | |
| Dimensiones | Long de mano Max: 200mm (Din 33.402) Anexo A | | X |
| | Ancho de mano: 140mm (Din 33.402) Anexo A | | X |
| | Long. De dedos (tabla 3.2 y 3.3) | X | |
| Peso. | Peso máximo 500 gr (McConville, 1981) | | X |
| | Capacidad de carga 0.5 Kg | X | |
| Características mecánicas. | Cumplir con la trayectoria deseada | X | |
| | 3 articulaciones por dedos (2 en el Pulgar) | X | |
| Seguridad. | Tanta como sea posible | X | |
| Estética. | Antropomórfica | | X |

Fuente: Elaboración propia.

3.2.2 Determinación del rango de agarre del prototipo.

Para el diseño del prototipo solo se tomó en cuenta los movimientos de extensión flexión de los dedos índice y pulgar, más no los de aducción y abducción, puestos que estos no son importantes en el agarre de objetos.

En el Marco Teórico, se hizo referencia al rango de movimiento de cada uno de los falanges del dedo índice, para fines prácticos del prototipo se tomó valores iguales en todas las articulaciones, en la Figura 3.6 y en las Tablas (3.6) y (3.7) se pueden apreciar estos valores.

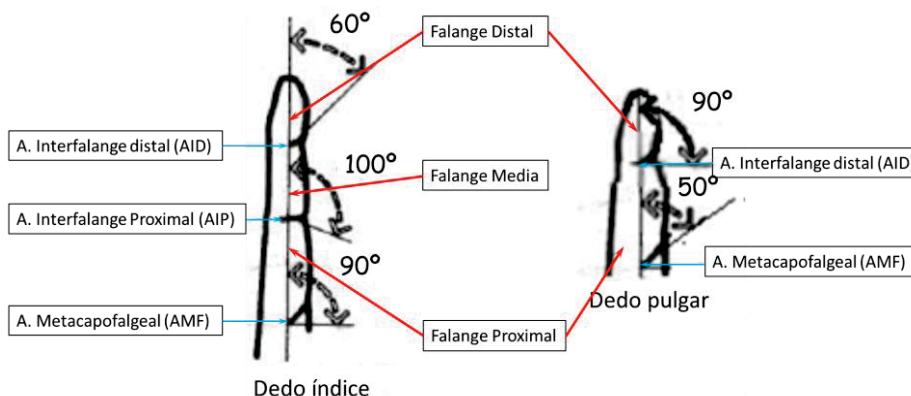


Figura 3.6 Articulaciones del dedo índice y pulgar.
Fuente: (Brizuela Mendoza, 2010).

Tabla 3.6 Angulo de amplitud articulaciones.

| Dedo | Articulación | Humano estándar | Prototipo |
|--------|-----------------------------|-----------------|-----------|
| Índice | Metacarpofalgeal (AMF) | 90° | 90° |
| | Interfalange Proximal (AIP) | 110° | 90° |
| | Interfalange distal (AID) | 60°-70° | 90° |
| Pulgar | Metacarpofalgeal (AMF) | 90° | 90° |
| | Interfalange distal (AID) | 50° | 90° |

Fuente: (Lauren Banks, 2001).

Tabla 3.7 Longitud de las falanges.

| Dedo | Falanges | Humano estándar | Prototipo |
|--------|------------------|-----------------|-----------|
| Índice | Falange proximal | 45[mm] | 50[mm] |
| | Falange media | 30[mm] | 30[mm] |
| | Falange distal | 20[mm] | 20[mm] |
| Pulgar | Falange proximal | 45[mm] | 50[mm] |
| | Falange distal | 20[mm] | 20[mm] |

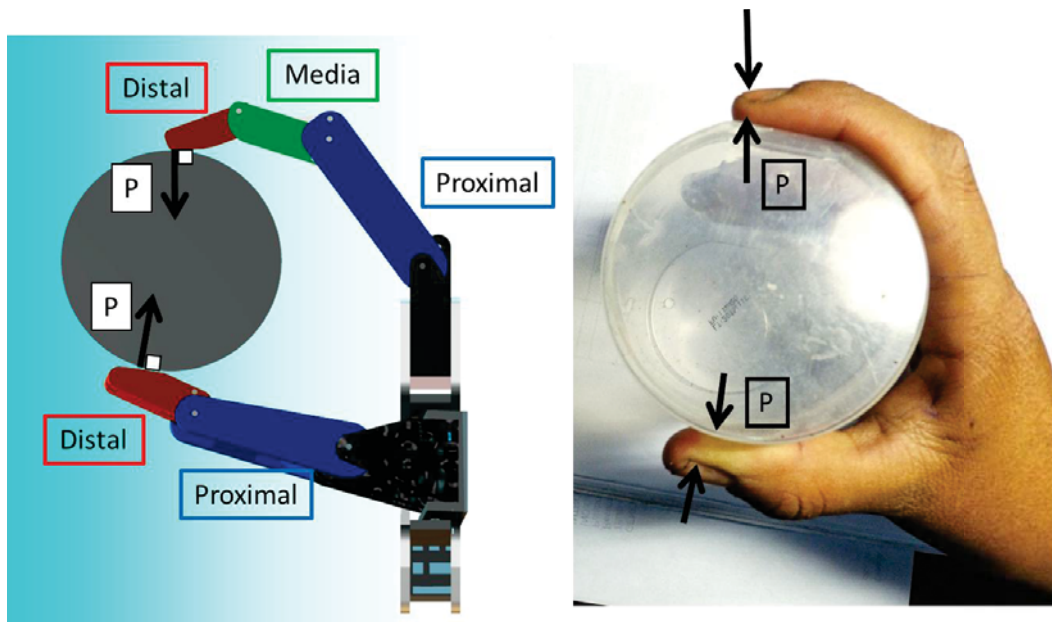
Fuente: (Din 33.402). Anexo A

3.2.3 Determinación de la fuerza de agarre del prototipo.

El prototipo está pensado para interactuar con diversos objetos de diferente tamaño y peso máximo de 0.5 [kg], según las limitaciones definidas, por consiguiente para realizar la acción de sujeción se necesita de una fuerza, los extremos de los dedos



pulgar e índice serán los puntos donde habrá contacto y se generara la fuerza, en la Figura. 3.7, se puede apreciar el diagrama conceptual para realizar esta acción.

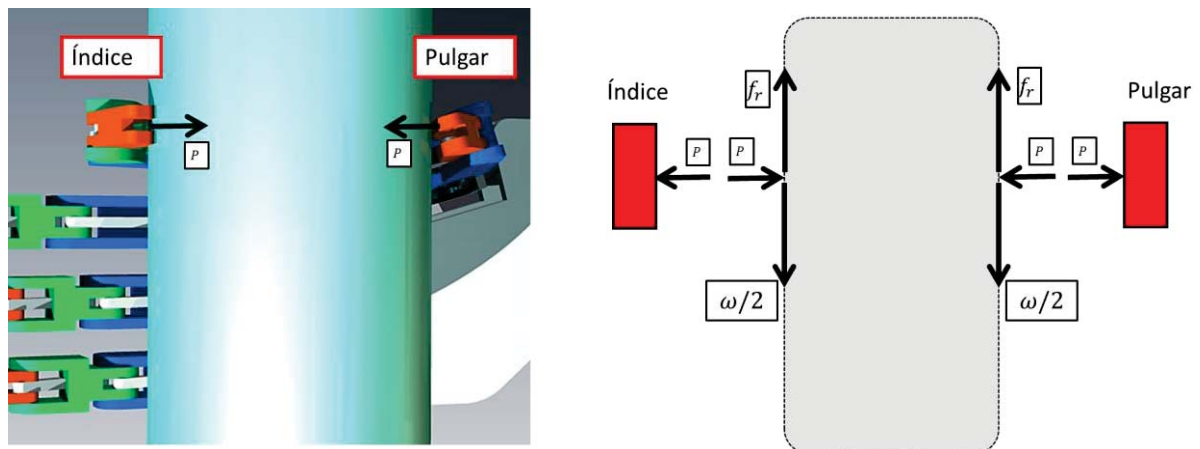


a) Modelo conceptual de agarre

b) Forma de agarre real de objetos

Figura 3.7 Fuerza de agarre en el prototipo, Fuente propia.

La Figura 3.8 muestra el D.C.L. del proceso de agarre del prototipo, la fuerza P ejercida por los dedos índice y pulgar será siempre perpendicular a las falanges distales de cada dedo, el coeficiente de fricción estático del plástico ABS es $\mu_k = 0.5$, para que objeto no se deslice la fuerza f_r (fuerza de fricción) deberá de ser igual al peso generado por el peso del objeto.



a) Sistema de agarre real.

b) Dcl del agarre.

Figura 3.8 Agarre de objetos.
Fuente propia.



Donde:

μ_k = Coeficiente de fricción estático plástico.

f_r = Fuerza de fricción.

ω = Peso del objeto.

P = Fuerza de sujeción del objeto.

g = Gravedad.

$$\mu_k = 0.5 \text{ (plástico ABS)} \quad (3.1)$$

$$\omega = 0.5[\text{Kg}] * 9.81[\text{m/seg}^2] = 4.98[\text{N}] \quad (3.2)$$

$$F_r = \mu_k * P \quad (3.3)$$

Reemplazando (3.1) en (3.3).

$$f_r = 0.5 * P \quad (3.5)$$

$$\sum F = 0 \Rightarrow f_r - \omega/2 = 0 \quad (3.6)$$

Reemplazando (3.2) y (3.5) en (3.6)

$$0.5 * P - \frac{4.98[\text{N}]}{2} = 0$$

Despejando P

$$P = 4.98[\text{N}] \quad (3.7)$$

Se puede concluir que la fuerza de agarre necesaria será de 4.98[N] para asegurar un agarre firme de objetos de 0.5 kg como máximo usaremos una aproximación, quedando como fuerza necesaria para el diseño del prototipo 6 [N].

$$P = 4.9 [\text{N}] \approx 6,00 [\text{N}] \quad (3.8)$$



CAPÍTULO IV:

4 CÁLCULO Y DISEÑO DE LOS MECANISMOS DEL PROTOTIPO.

En este capítulo se hará el cálculo y diseño de los mecanismos que copie el movimiento de los dedos índice y pulgar de la prótesis, puede dividirse en dos partes: Diseño del dedo índice, diseño del dedo pulgar.

4.1 DISEÑO DEL DEDO ÍNDICE.

Esta sección abordo el diseño del dedo índice, inicialmente se hizo un diseño de la síntesis del mecanismo (trayectoria), luego un análisis de la cinética y cinemática, finalizando con el diseño por resistencia de los juntas (pasadores) y eslabones del mecanismo, el movimiento requerido del dedo será un movimiento envolvente, es decir que mientras la falange distal se cierre las demás falanges también lo harán.

El diagrama de flujo mostrado en la Figura 4.1 fue útil para guiar el proceso de diseño a lo largo desarrollo.

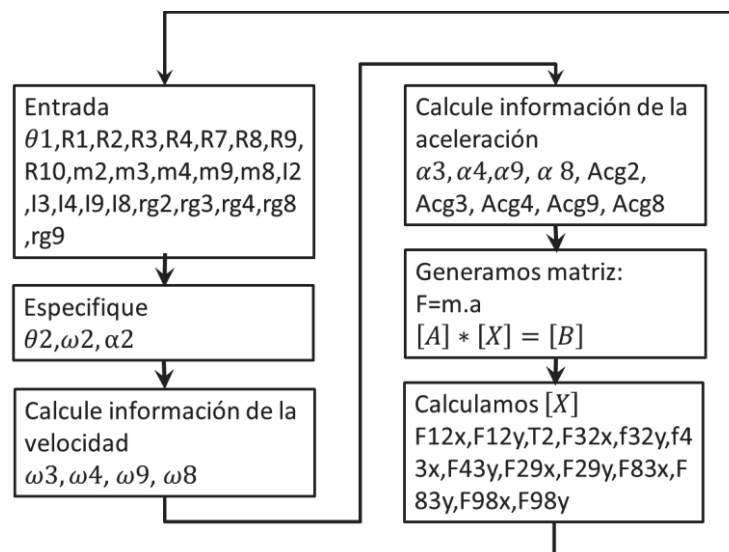


Figura 4.1 Diagrama de flujo diseño dedo índice.
Fuente propia.



4.1.1 Cinemática del mecanismo.

4.1.1.1 Síntesis del mecanismo.

Una vez decidido y definido el rango de movimiento y la longitud de las falanges del dedo índice. Se procedió al diseño geométrico o síntesis del mecanismo que se encarga de copiar el movimiento de agarre cilíndrico envolvente de los dedos humanos.

Se usó el método descrito por (L.Norton, 2005, pág. 89), identificado primero los pivotes o bancadas del mecanismos y las tres posiciones a las que queremos llegar con este mecanismo.

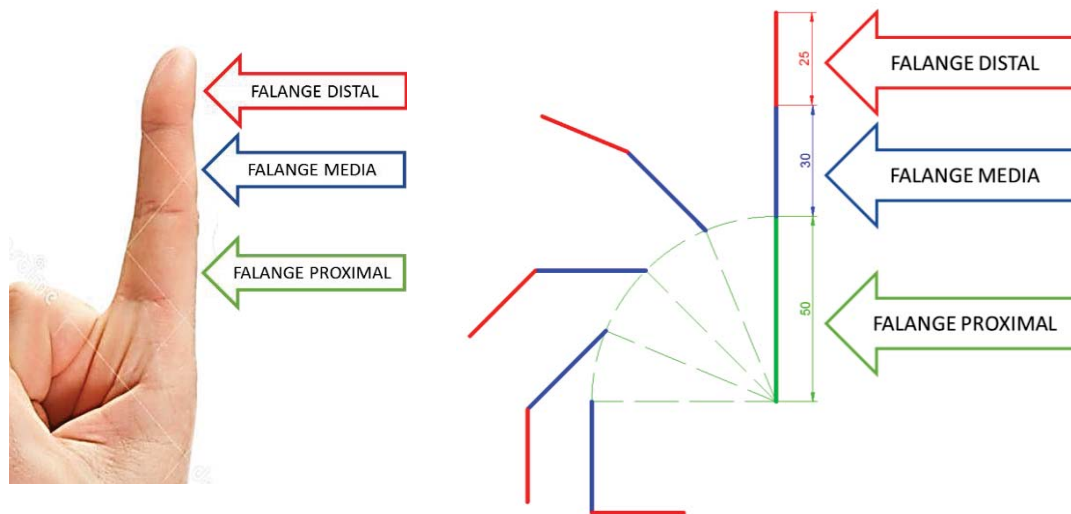


Figura 4.2 Movimiento de las falanges del dedo índice.
Fuente propia.

4.1.1.1.1 Falange proximal y media.

La primera parte del diseño geométrico es de la falange proximal y el de la falange media, como se describió en los parámetros de diseño. Se requiere que ambas falanges tengan un rango de movimiento de 90° sexagesimales (Figura. 4.3).

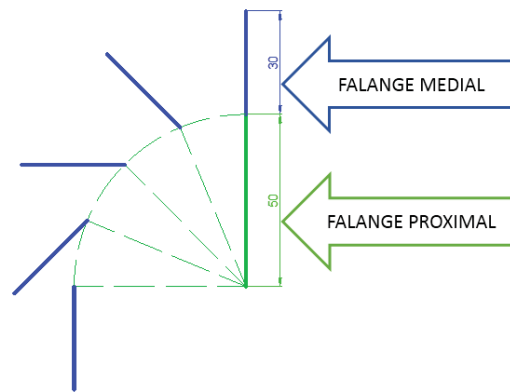


Figura 4.3 Movimiento de las falanges.
Fuente propia.

Se ubica las dos bancadas principales para el mecanismos (Figura 4.4), en este caso O2 y O4, O2 estará ubicado en el origen de coordenadas en decir en (0;0) y O4 está en (5, 6) es decir 5 mm en el eje X y 6mm en el eje Y (esta elección se dio por las limitaciones antropométricas del diseño), ubicadas las tres posiciones del acoplado para este caso: $\overline{C1, D1}$; $\overline{C2, D2}$; $\overline{C3, D3}$.

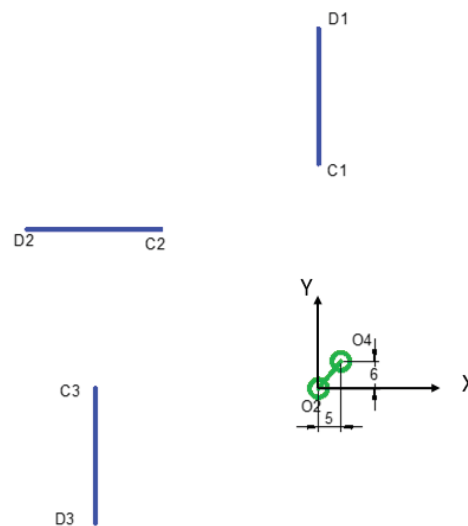


Figura 4.4 Posiciones de la falange media.
Fuente propia.

Se trazó las posiciones del plano fijo con respectos a la segunda y tercera posición (Figura 4.5-a). Trasladas la segunda y tercera posición respecto a la primera posición del acoplado como se puede ver en la Figura. 4.5-b esto se conoce como inversión de mecanismos, nótese que el acoplado $\overline{C1, D1}$ permanece fijo y es la



bancada. $\overline{O2, O4}$ Es quien describe el movimiento, esto genera los nuevos puntos ($O2', O4'$; $O2'', O4''$).

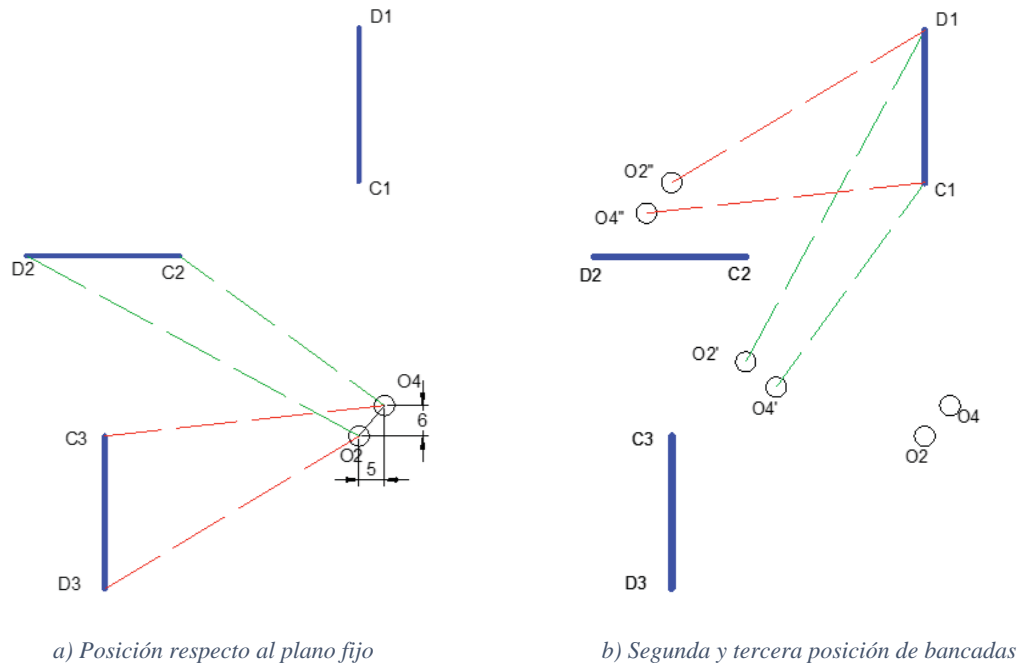
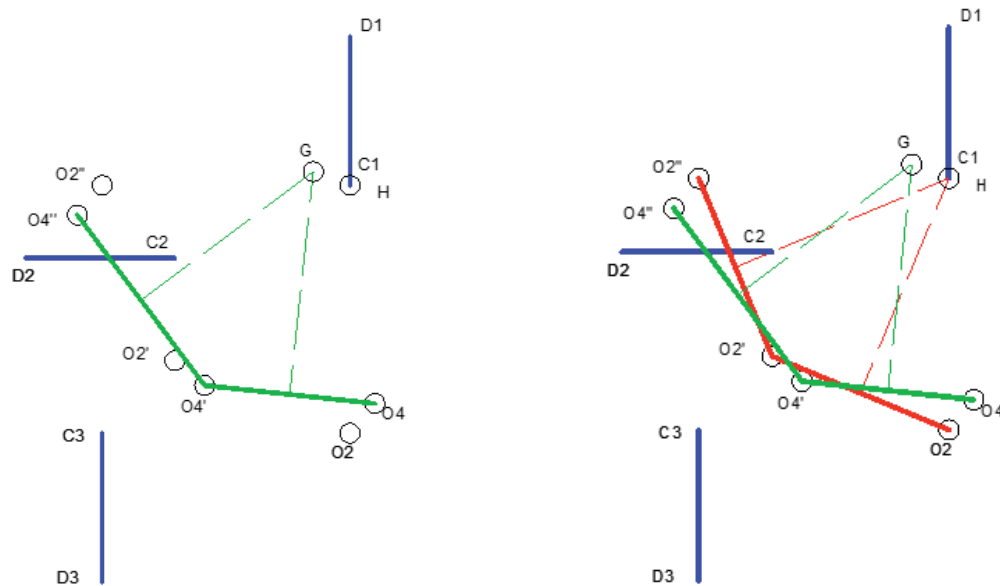


Figura 4.5 Inversión del mecanismo.
Fuente propia.

Se crearon las líneas $\overline{O4''O4'}$, $\overline{O4'O4}$ y se generaron las bisectrices de dichas líneas que se intersectaran en el punto G (Figura 4.6-a). Lo mismo para las líneas $\overline{O2''O2'}$, $\overline{O2'O2}$ la intersecciones sus bisectrices da el punto H (Figura 4.6-b).



a) Generación rotopolo G

b) Generación rotopolo G

Figura 4.6 Generación de rotopolos G y H.
Fuente propia.



Se reinvertió el mecanismo para regresar a la posición original quedando como bancada los puntos (O2, O4), portador de energía $\overline{O2A}$, acoplado \overline{AB} y como oscilador $\overline{B04}$, como se puede apreciar en la Figura 4.7. Este mecanismo cumple con la condición de hacer que el oscilador con un cognado describa las trayectorias de la falange medial.

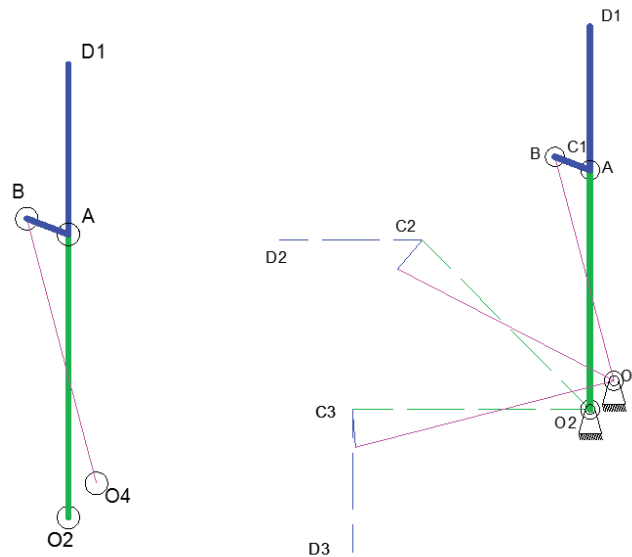


Figura 4.7 Configuraciones mecanismo base.
Fuente propia.

4.1.1.1.2 Falanges media y distal.

El movimiento de la falange distal es relativo al de la falange media, es decir que tomara como nueva tierra a la falange proximal, como se ve en la Figura 4.8 y Figura. 4.9.

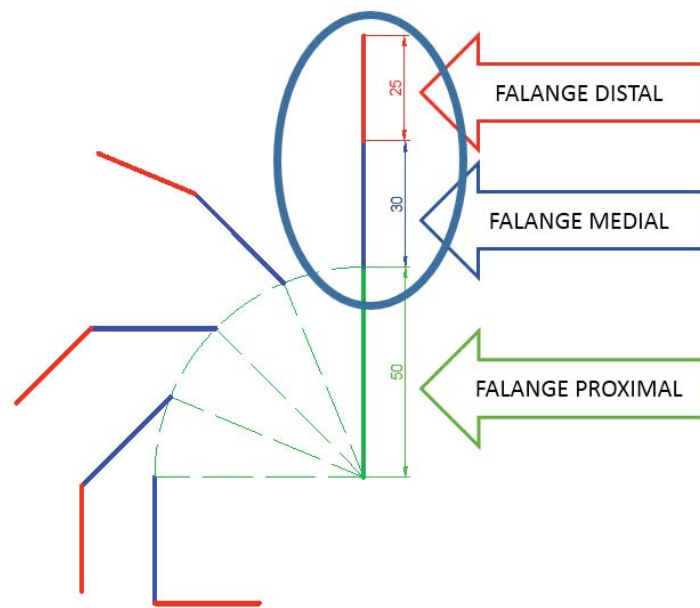


Figura 4.8 Movimiento Falange media y distal.
Fuente propia.

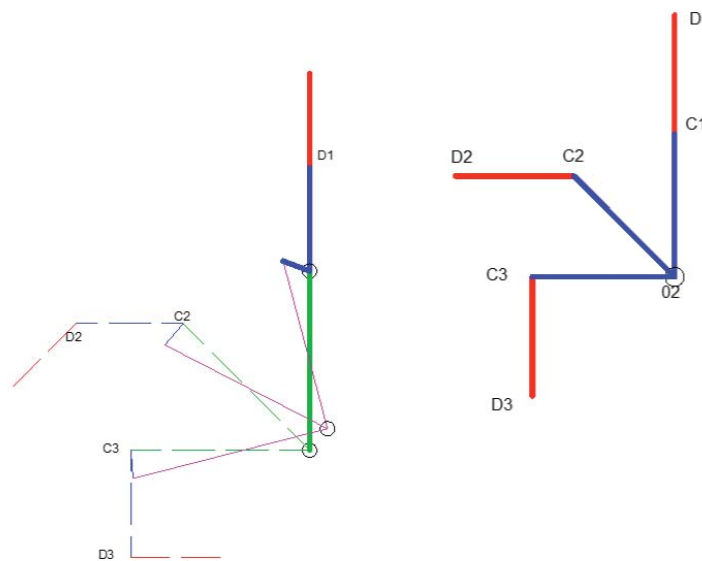


Figura 4.9 Movimiento relativo de la falange media y proximal respecto a la proximal.
Fuente propia.

La síntesis de este mecanismo será similar al del anterior, como primer paso se ubicó las nuevas bancadas O2 y O4 y las tres posiciones del acoplado respecto a las bancadas $\overline{C1, D1}$; $\overline{C2, D2}$; $\overline{C3, D3}$. (Figura 4.10).

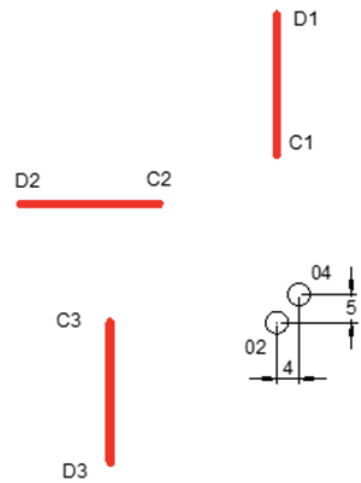
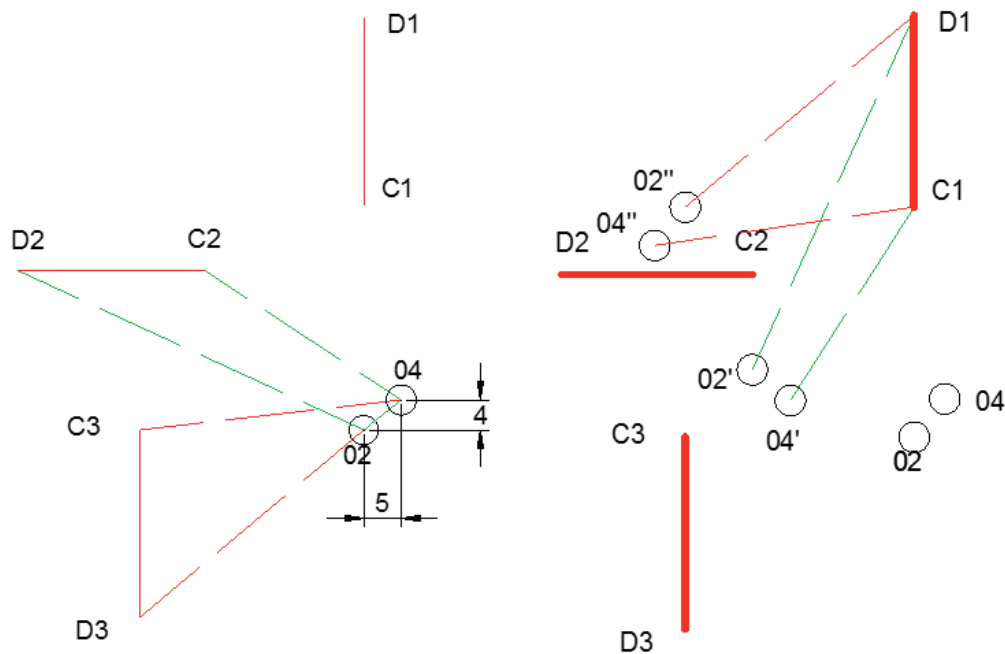


Figura 4.10 Posiciones de la falange proximal.
Fuente propia.

Se trazó las posiciones del plano fijo con respecto a la segunda y tercera posición (Figura 4.11-a). Se reinvirtió el mecanismo trasladadas la segunda y tercera posición respecto a la primera posición del acoplado como se puede ver en la (Figura 4.11-b). Nótese que el acoplado $\overline{C1, D1}$ permanece fijo y es la bancada $\overline{O2, O4}$, quién describe el movimiento, esto genera los nuevos puntos ($O2', O4'$; $O2'', O4''$).



a) Posición respecto al plano fijo b) Inversión del mecanismo

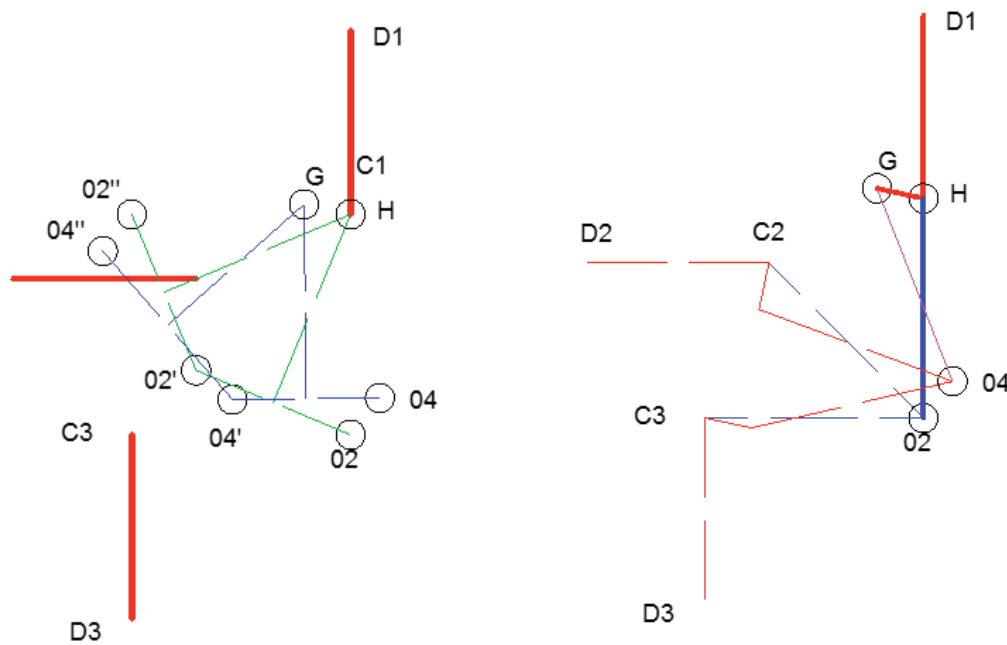
Figura 4.11 Inversión del mecanismo.

Fuente propia.



Se crearon las líneas $\overline{04''04'}$, $\overline{04'04}$ y se generaron las bisectrices de dichas líneas que se intersectaran en el punto G, lo mismo para las líneas $\overline{02''02'}$, $\overline{02'02}$, la intersecciones sus bisectrices da el punto H (Figura 4.12-a).

Se reinvertió el mecanismo para regresar a la posición original quedando como bancada los puntos (O2, O4), portador de energía $\overline{02 A}$, acoplado \overline{AB} y como oscilador B, O4, como se puede apreciar en la Figura 4.12-b. Este mecanismo cumple con la condición de hacer que el oscilador con un cognado describa las trayectorias de la falange distal.



a) Generación de rotopolos G y H

b) Reversión del mecanismo

Figura 4.12 Reversión del mecanismo.

Fuente propia.

Este nuevo mecanismo tiene como bancadas fijas los puntos O2 y O4 estos puntos deben de estar a su vez ubicados en la falange media, quien será el que cumpla la función de portador de energía. Se puede apreciar en la Figura.4.13, los dos mecanismos unidos para generar el movimiento flector de agarre cilíndrico del dedo índice, (los eslabones del mismo color son en realidad un solo), se muestra en la misma figura un desarrollo de movimiento de mecanismo, por conveniencia a partir de ahora ubicaremos los puntos de los eslabones con letras del alfabeto para referirnos a ellos en el estudio cinemático y cinético.



Se hizo uso del software de simulación de mecanismos SAM 6.1, para simular la trayectoria de dicho mecanismo (Figura 4.14).

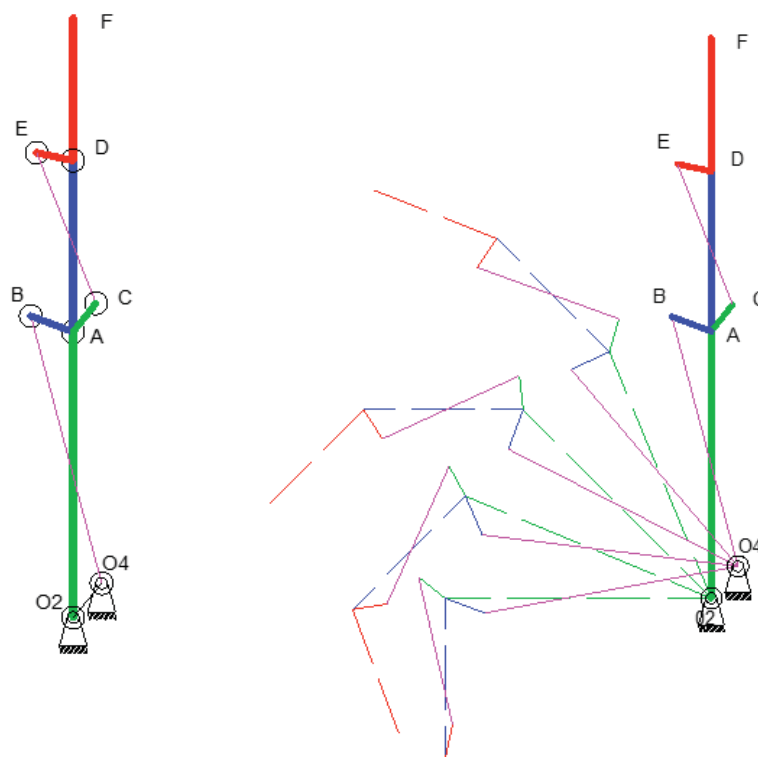


Figura 4.13 Mecanismo del dedo índice.
Fuente propia.

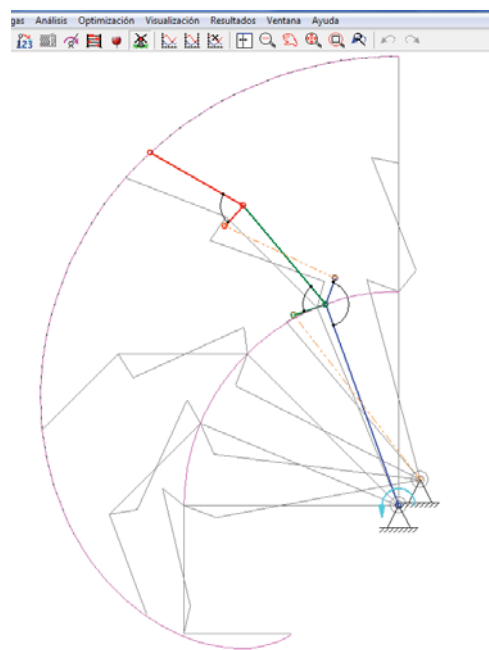


Figura 4.14 Desarrollo del movimiento del mecanismo.
Fuente: propia, simulación SAM 6.1.



4.1.1.2 Cálculo de las posiciones angulares del mecanismo.

Una vez diseñada la síntesis del mecanismo, toco hacer un análisis de las posiciones angulares, al tratarse de un mecanismo de un grado de libertad se tendrá los demás ángulos en función de la posición angular del portador de energía θ_2 .

Para validar el hecho que el mecanismo solo posee un grado de libertad se hizo uso de la ecuación de GRUEBLER (L.Norton, 2005, pág. 27).

$$M = 3(L - 1) - 2J \quad (4.1)$$

Donde:

M = Grados de libertad.

L = Número de eslabones.

J = Número de juntas.

Resolviendo (3.9)

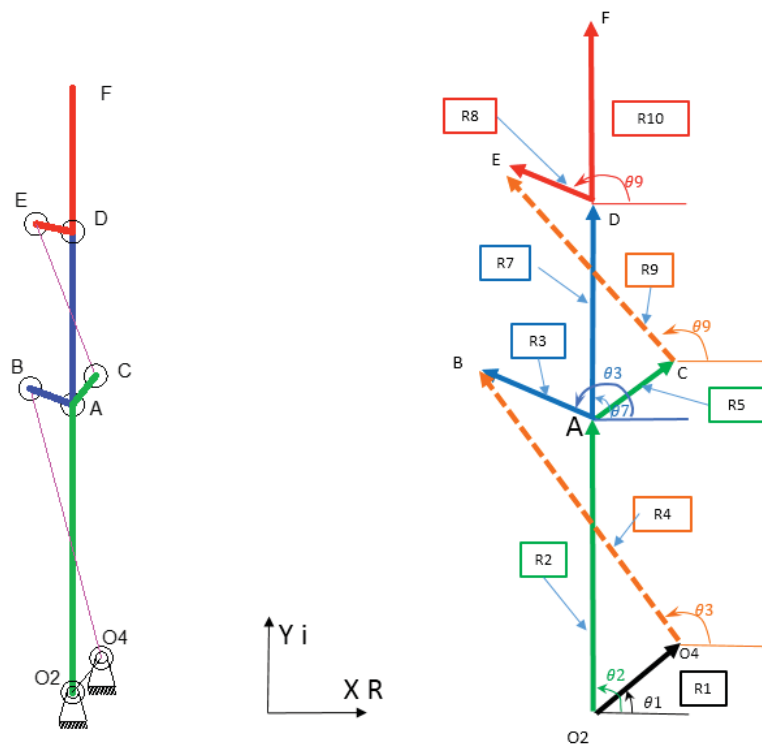
$$M = 3(6 - 1) - 2(7) = 1$$

Entonces se concluye que el mecanismo tiene un solo grado de libertad.

Para resolver el mecanismo se hizo uso del método de NEWTON RAPSHON, descrito en el libro Cinemática de Mecanismo Por métodos Numéricos (Macedo Silva, 2010, pág. 33) .

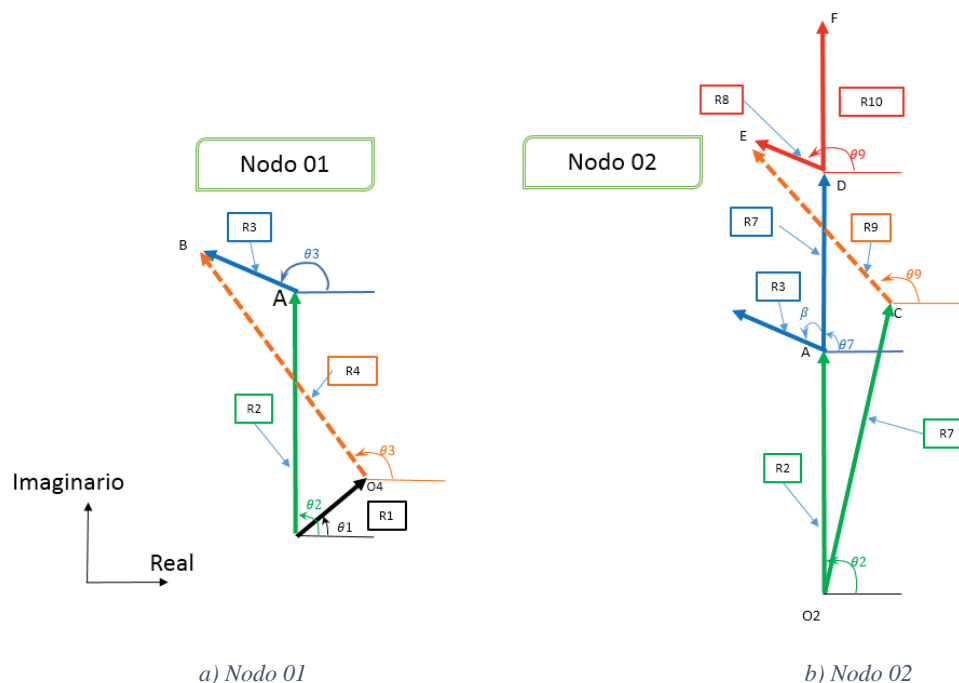
4.1.1.2.1 Lazo vectorial del mecanismo.

Lo primero fue configurar el lazo vectorial del mecanismo, esto para poder ubicar el desplazamiento de los puntos de los pivotes en este. En la Figura 4.15-a se puede ver el mecanismo de seis barras diseñando, solo se tiene información precisa de la longitud de los eslabones y los ángulos, como objetivo tenemos el de hallar la variación angular para todos los instantes de movimiento. Se procedió a trazar el lazo vectorial del sistema (Figura. 4.15-b).



a) Modelado del mecanismo b) lazo vectorial del mecanismo
 Figura 4.15 Lazo vectorial mecanismo.
 Fuente propia.

Como se puede ver en total hay 11 vectores, se puede agrupar en dos nodos, estos representan a los dos mecanismos antes diseñados quedando como se puede ver en (Fig. 4.16).



a) Nodo 01 b) Nodo 02
 Figura 4.16 Nodos del mecanismo.
 Fuente propia.



Las direcciones de los vectores se eligieron de acuerdo al ángulo que se desea medir, quedando de manera que la suma de cada uno de los vectores de cada lazo sea igual a cero.

A continuación se procedió a identificar la dirección de números reales que será en la dirección X, y la de los números irreales o imaginarios será en dirección Y. Se generaron las ecuaciones de los dos lazos vectoriales (4.2-a) y (4.2-b).

$$R2 + R3 - R4 - R1 = 0 \quad (\text{Nodo 01}) \quad (4.2-a)$$

$$R2 + R7 + R8 - RC - R9 = 0 \quad (\text{Nodo 02}) \quad (4.2-b)$$

El vector RC puede definirse como un cognado del eslabón dos (R2) es decir tendrá la misma velocidad angular y aceleración angular que (R2), para hallar el valor de RC usaremos los vectores R5 y R6 según la ecuación (4.3) y la Figura 4.17.

$$R5 + R6 = RC \quad (4.3)$$

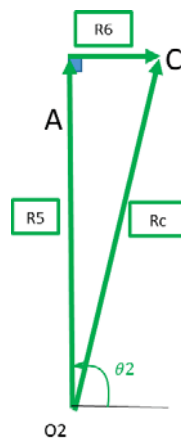


Figura 4.17 Cognado del eslabón 02.
Fuente propia.

Se sustituye en la notación de números complejos para cada vector de posicionamiento (4.2-a) y (4.2-b).

$$R2 \cdot e^{i\theta_2} + R3 \cdot e^{i\theta_3} - R4e^{i\theta_4} - R1e^{i\theta_1} = 0 \quad (\text{Nodo 01})(4.4)$$

$$R2 \cdot e^{i\theta_2} + R7 \cdot e^{i(\theta_3-\beta)} + R8e^{i\theta_8} - (R5e^{i\theta_2} + R6e^{i(\theta_5-90)}) - R9e^{i\theta_9} = 0(\text{Nodo 02})(4.5)$$

Para cada ecuación hay 4 variables, para el Nodo 01 ($\theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_1$) y para el Nodo 02 ($\theta_2, \theta_3, \theta_8, \theta_9$), las longitudes de los vectores R son constantes, además de que



el ángulo θ_1 es fijo a las bancadas y el ángulo β es constante ya que es un cognado del eslabon 2, a la vez que la variable θ_2 esta restringido a un movimiento de 90° empezando en 90° y terminado en 180° dado por un motor o en este caso un servomotor.

Para resolver estas ecuaciones se hizo usos de la equivalencia de Euler (4.6), para luego dividir la forma cartesiana de las ecuaciones vectoriales (4.7) y (4.8) en ecuaciones escalares.

$$R. e^{i\theta} = R(\cos \theta + i \sin \theta) \quad (4.6)$$

Al sustituir (4.6) en las ecuaciones (4.4) (4.5) se obtiene:

$$R2. (\cos \theta_2 + i \sin \theta_2) + R3(\cos \theta_3 + i \sin \theta_3) - R4(\cos \theta_4 + i \sin \theta_4) - R1(\cos \theta_1 + i \sin \theta_1) = 0 \quad (\text{Nodo 01}) \quad (4.7)$$

$$R2. (\cos \theta_2 + i \sin \theta_2) + R7(\cos(\theta_3 - \beta) + i \sin(\theta_3 - \beta)) + R8(\cos \theta_8 + i \sin \theta_8) - R5(\cos \theta_2 + i \sin \theta_2) - R6(\cos(\theta_2 - 90) + i \sin(\theta_2 - 90)) - R9(\cos \theta_9 + i \sin \theta_9) = 0 \quad (\text{Nodo 02}) \quad (4.8)$$

Estas ecuaciones se pueden dividir en sus partes real e imaginaria, la parte real estará en dirección horizontal X y la parte imaginaria en dirección vertical Y.

- Nodo 01.

Parte real (dirección X)

$$f1 = R2 * \cos(\theta_2) + R3 * \cos(\theta_3) - R4 * \cos(\theta_4) - R1 * \cos(\theta_1) = 0 \quad (4.9-a)$$

Parte imaginaria (dirección Y)

$$f2 = R2 * \sin(\theta_2) + R3 * \sin(\theta_3) - R4 * \sin(\theta_4) - R1 * \sin(\theta_1) = 0 \quad (4.9-b)$$

- Nodo 02.

Parte real (dirección X)

$$f3 = R2 * \cos(\theta_2) + R7 * \cos(\theta_7 - \beta) + R8 * \cos(\theta_8) - R5 * \cos(\theta_2) - R6 * \cos(\theta_2 - 90) - R9 * \cos(\theta_9) = 0 \quad (4.9-c)$$

Parte imaginaria (dirección Y)



$$f_4 = R_2 * \sin(\theta_2) + R_7 * \sin(\theta_7 - \beta) + R_8 * \sin(\theta_8) - R_5 * \sin(\theta_2) - R_6 * \sin(\theta_2 - 90) - R_9 * \sin(\theta_9) = 0 \quad (4.9-d)$$

Este nuevo sistema de ecuaciones es producto de los lazos vectoriales.

4.1.1.2.2 Newton -Raphson.

El objetivo es hallar los ángulos θ_3, θ_4 en el primer nodo y θ_8, θ_9 en el segundo nodo. Las ecuaciones (4.9-a), (4.9-b), (4.9-c) y (4.9-d) son conocidas como ecuaciones trascendentales

En el marco teórico se habló de este método para resolver ecuaciones no lineales.

- Nodo 01

$[B] = \text{Conjunto de ecuaciones } f.$

$[A] = \text{Jacobiano de } B.$

$[X] = \text{Terminos de error.}$

$$[A][X] = -[B] \quad (4.10)$$

Resolviendo cada elemento de la matriz (4.10).

$$[B] = \begin{bmatrix} R_2 * \cos(\theta_2) + R_3 * \cos(\theta_3) - R_4 * \cos(\theta_4) - R_1 * \cos(\theta_1) \\ R_2 * \sin(\theta_2) + R_3 * \sin(\theta_3) - R_4 * \sin(\theta_4) - R_1 * \sin(\theta_1) \end{bmatrix}$$

$$[A] = \begin{bmatrix} \frac{\delta f_1}{\delta \theta_3} & \frac{\delta f_1}{\delta \theta_4} \\ \frac{\delta f_2}{\delta \theta_3} & \frac{\delta f_2}{\delta \theta_4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_3 * \sin.\theta_3 & R_4 * \sin.\theta_4 \\ R_3 * \cos.\theta_3 & -R_4 * \cos.\theta_4 \end{bmatrix}$$

$$[X] = \begin{bmatrix} \Delta\theta_3 \\ \Delta\theta_4 \end{bmatrix}$$

Donde:

Tabla 4.1 Dimensiones de los eslabones

| | |
|------------|--------------|
| R1x | 5 [mm] |
| R1y | 6 [mm] |
| R2 | 50.000 [mm] |
| R3 | 7.9143 [mm] |
| R4 | 48.3981 [mm] |
| θ_2 | 90°-180° |

Fuente propia.

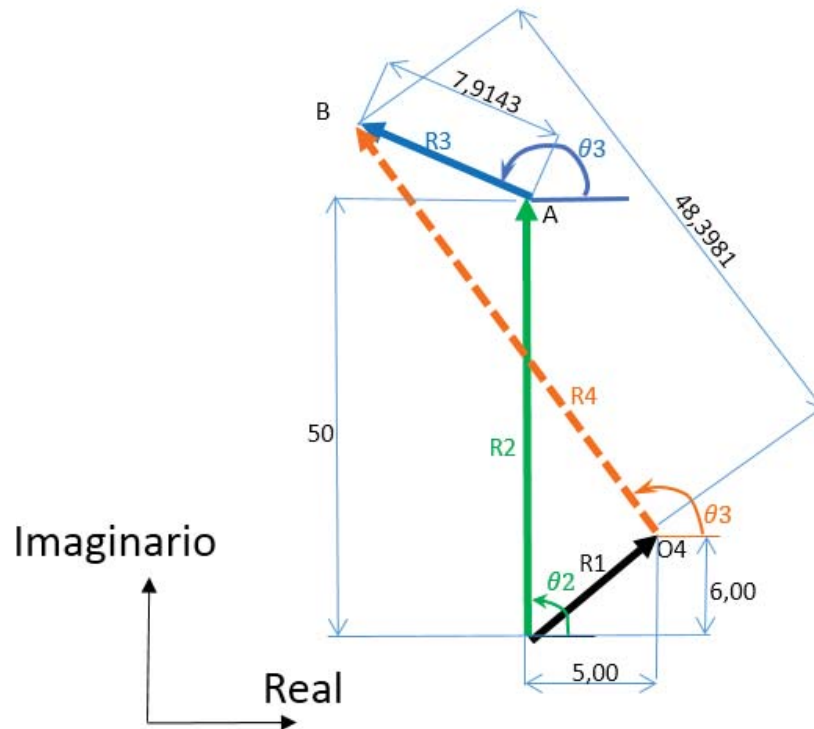


Figura 4.18 Dimensionamiento del nodo 01
Fuente propia

Para hallar el vector de error $[X]$ se reduce la ecuación (4.10)

$$[A][X] = -[B]$$

$$[A]^{-1} * [A] * [X] = -[B] * [A]^{-1}$$

$$[X] = -[B] * [A]^{-1} \tag{4.11}$$

Reemplazando los valores de las matrices $[B]$ $[A]$ y $[X]$ en (4.11).

$$\begin{bmatrix} \Delta\theta_3 \\ \Delta\theta_4 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} R2 * \cos(\theta_2) + R3 * \cos(\theta_3) - R4 * \cos(\theta_4) - R1 * \cos(\theta_1) \\ R2 * \sin(\theta_2) + R3 * \sin(\theta_3) - R4 * \sin(\theta_4) - R1 * \sin(\theta_1) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} -R3 * \sin.\theta_3 & R4 * \sin.\theta_4 \\ R3 * \cos.\theta_3 & -R4 * \cos.\theta_4 \end{bmatrix}^{-1} \tag{4.12}$$

La idea para resolver este sistema de ecuaciones no lineales con NEWTON RAPHSON es; para un determinado valor de θ_2 (que va desde 90° a 180°) usando diferentes valores para θ_3 y θ_4 hasta que la matriz error $[X]$ sea lo más cercana a 0, es decir $\Delta\theta_3 \approx 0.0000$, $\Delta\theta_4 \approx 0.0000$. Se usó del programa MATLAB®R2013b (Anexo F), para solucionar esta ecuaciones, como primera restricción del programa tendremos un tolerancia de 0.00001, es



decir que el programa dará los valores de θ_3 y θ_4 cuando la matriz error llegue a dicha tolerancia.

- Nodo 02.

Procederemos de la misma forma usando el método Newton-Raphson,

$[D]$ = Conjunto de ecuaciones f .

$[C]$ = Jacobiano de $[D]$

$[Y]$ = terminos de error

$$[C] * [Y] = -[D] \quad (4.13)$$

Resolviendo cada elemento de (4.13).

$[D]$ =

$$\begin{bmatrix} R2\cos(\theta_2) + R7\cos(\theta_7 - \beta) + R8\cos(\theta_8) - R5\cos(\theta_2) - R6\cos(\theta_2 - 90) - R9\cos(\theta_9) \\ R2\sin(\theta_2) + R7\sin(\theta_7 - \beta) + R8\sin(\theta_8) - R5\sin(\theta_2) - R6\sin(\theta_2 - 90) - R9\sin(\theta_9) \end{bmatrix}$$

$$[C] = \begin{bmatrix} \frac{\delta f3}{\delta \theta 8} & \frac{\delta f3}{\delta \theta 9} \\ \frac{\delta f4}{\delta \theta 8} & \frac{\delta f4}{\delta \theta 9} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R8 * \sin.\theta 8 & R9 * \sin.\theta 9 \\ R8 * \cos.\theta 8 & -R9 * \cos.\theta 9 \end{bmatrix}$$

$$[Y] = \begin{bmatrix} \Delta\theta_8 \\ \Delta\theta_9 \end{bmatrix}$$

Donde:

Tabla 4.2 Dimensiones de los eslabones.

| | |
|---------|-----------|
| R2 | 50.00[mm] |
| R7 | 30.00[mm] |
| R8 | 6.53[mm] |
| R5 | 55.00[mm] |
| R6 | 4.00[mm] |
| R9 | 28.34[mm] |
| β | 69.43° |

Fuente propia

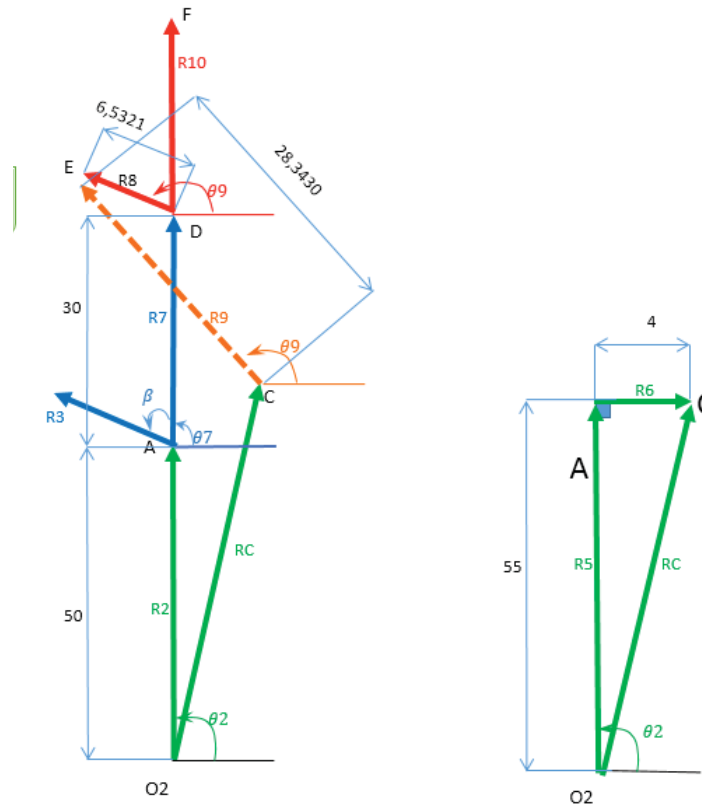


Figura 4.19 Dimensionamiento de eslabones nodo O2.
Fuente propia.

Para hallar el vector de error $[y]$ debemos de reducir la ecuación (4.13).

$$[C][Y] = -[D]$$

$$[C]^{-1} * [C] * [Y] = -[D] * [C]^{-1}$$

$$[Y] = -[D] * [C]^{-1} \tag{4.14}$$

Remplazando los valores de las matrices $[D]$ $[C]$ y $[Y]$ en (4.14).

$$\begin{bmatrix} \Delta\theta_8 \\ \Delta\theta_9 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} R2\cos(\theta_2) + R7\cos(\theta_7 - \beta) + R8\cos(\theta_8) - R5\cos(\theta_2) - R6\cos(\theta_2 - 90) - R9\cos(\theta_9) \\ R2\sin(\theta_2) + R7\sin(\theta_7 - \beta) + R8\sin(\theta_8) - R5\sin(\theta_2) - R6\sin(\theta_2 - 90) - R9\sin(\theta_9) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} -R8 * \sin.\theta_8 & R9 * \sin.\theta_9 \\ R8 * \cos.\theta_8 & -R9 * \cos.\theta_9 \end{bmatrix}^{-1} \tag{4.15}$$



De igual forma, que en el nodo 01 estas ecuaciones no lineales se resuelven para el mismo valor de θ_2 (que va desde 90° a 180°) usando diferentes valores para θ_8 y θ_9 hasta que el valor de la matriz error sea cercana a 0 es decir $\Delta\theta_3 \approx 0.0000$, $\Delta\theta_4 \approx 0.0000$.

Una vez echa las interacciones en MATLAB®R2013b, podemos obtener los resultados de los demás ángulos del mecanismo en la Tabla 4.3, para fines prácticos usaremos una variación de θ_2 cada 5° .

Tabla 4.3 Posiciones angulares.

| θ_2° | θ_3° | θ_4° | θ_7° | θ_8° | θ_9° | θ_{10}° |
|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|---------------------|
| 90 | 159.4354 | 104.8574 | 90.0004 | 167.8999 | 111.5053 | 90.0087 |
| 95 | 169.4241 | 110.7382 | 99.9891 | 183.0125 | 122.6207 | 105.1213 |
| 100 | 179.478 | 116.5017 | 110.043 | 198.2871 | 133.6335 | 120.3959 |
| 105 | 189.5569 | 122.1374 | 120.1219 | 213.5975 | 144.4784 | 135.7063 |
| 110 | 199.6311 | 127.638 | 130.1961 | 228.8514 | 155.113 | 150.9602 |
| 115 | 209.6798 | 132.9992 | 140.2448 | 243.9861 | 165.5133 | 166.0949 |
| 120 | 219.689 | 138.2189 | 150.254 | 258.9638 | 175.6695 | 181.0726 |
| 125 | 229.651 | 143.297 | 160.216 | 273.7667 | 185.5819 | 195.8755 |
| 130 | 239.5629 | 148.2349 | 170.1279 | 288.3934 | 195.2586 | 210.5022 |
| 135 | 249.4264 | 153.0352 | 179.9914 | 302.8563 | 204.7125 | 224.9651 |
| 140 | 259.2475 | 157.7012 | 189.8125 | 317.1798 | 213.96 | 239.2886 |
| 145 | 269.0364 | 162.2366 | 199.6014 | 331.4006 | 223.0196 | 253.5094 |
| 150 | 278.8085 | 166.6452 | 209.3735 | 345.5691 | 231.9118 | 267.6779 |
| 155 | 288.5852 | 170.9303 | 219.1502 | 359.7542 | 240.6583 | 281.863 |
| 160 | 298.3967 | 175.0941 | 228.9617 | 374.052 | 249.282 | 296.1608 |
| 165 | 308.2866 | 179.1371 | 238.8516 | 388.6056 | 257.8078 | 310.7144 |
| 170 | 318.3216 | 183.056 | 248.8866 | 403.6474 | 266.2614 | 325.7562 |
| 175 | 328.6118 | 186.8402 | 259.1768 | 419.6166 | 274.6635 | 341.7254 |
| 180 | 339.3658 | 190.4629 | 269.9308 | 437.5718 | 282.9885 | 359.6806 |

Fuente propia.

Estos datos se grafican en funciona a θ_2 para poder visualizar la variación angular de cada uno de los ángulos de los eslabones del mecanismo (Figura. 4.20).

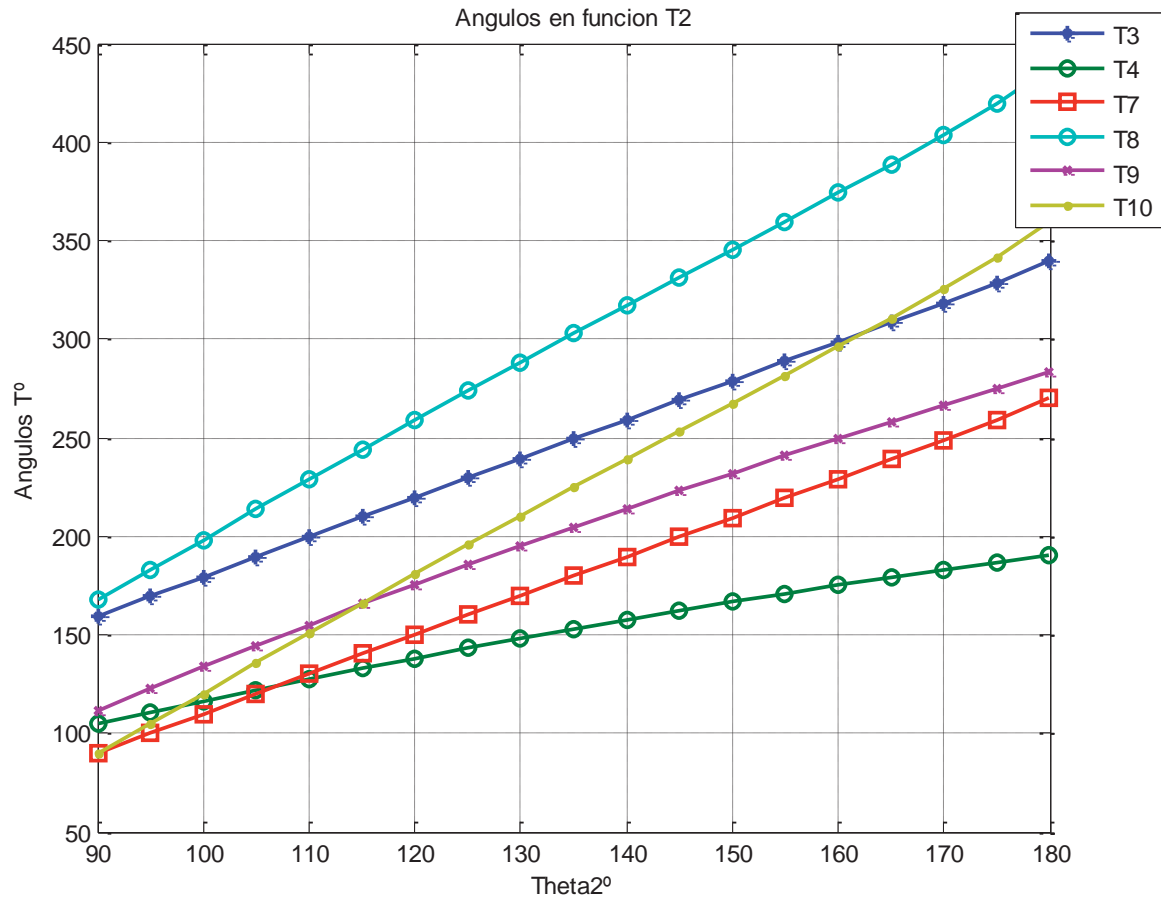


Figura 4.20 Variación angular.
Fuente propia.

Para comprobar la validez del programa diseñado, se utilizó el software SAM 6.1, primero se modeló el mecanismo (Figura. 4.21), después se generan las gráficas que concuerdan con los resultados obtenidos en MATLAB®R2013b (Figura. 4.20), se puede ver los resultados en la (Fig. 4.22).

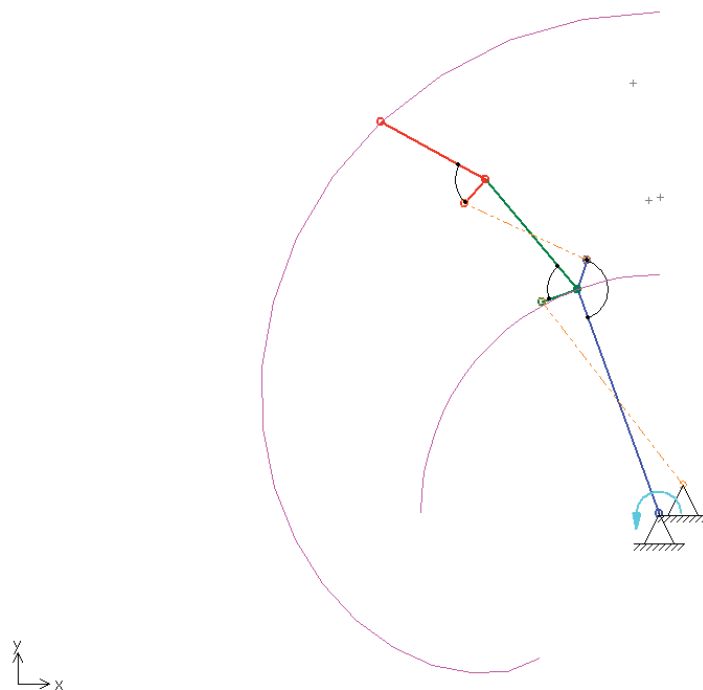


Figura 4.21 Modelado del mecanismo en SAM 6.1 trayectoria del dedo índice
Fuente: propia

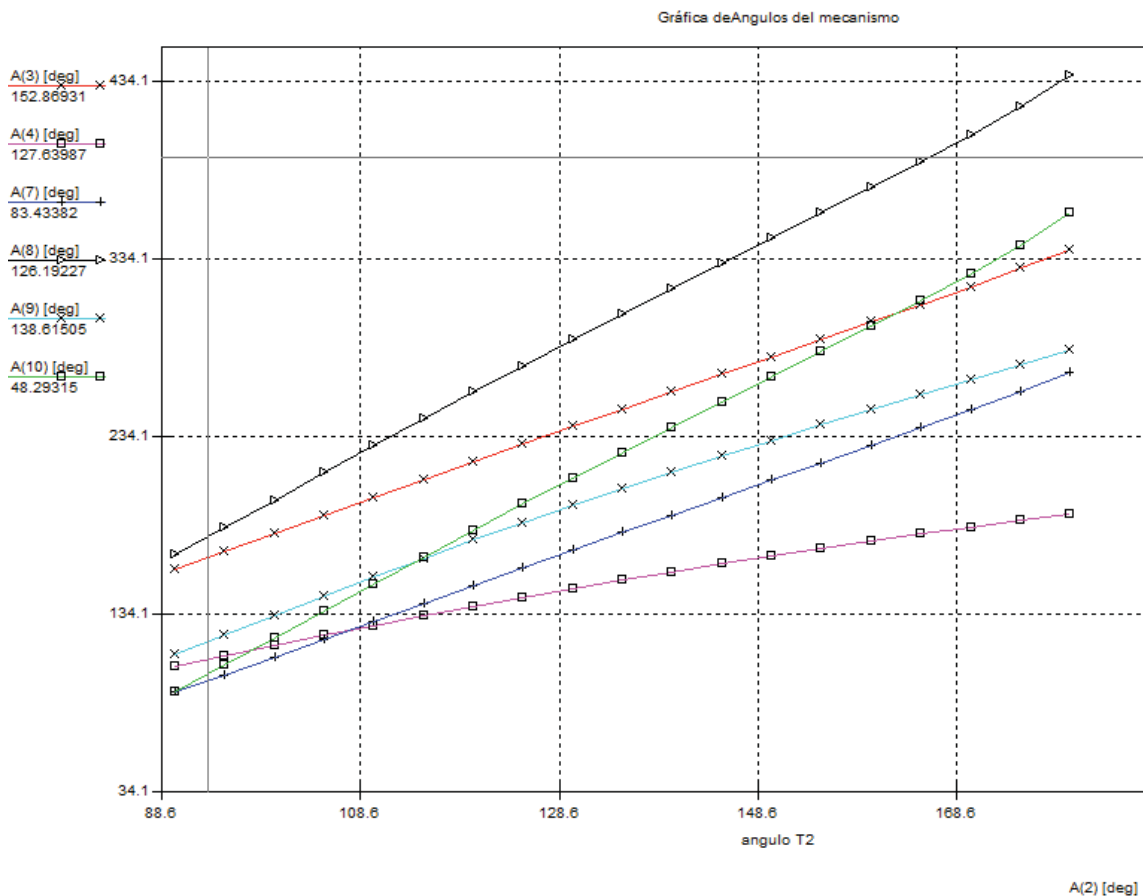


Figura 4.22 Resultado variación angular Simulado en SAM 6.1.
Fuente propia,



4.1.1.3 Cálculo de la velocidad angular del mecanismo.

Calculadas las posiciones angulares, el paso siguiente fue determinar las velocidades angulares de los eslabones, es necesario calcular todas estas velocidades en el mecanismo, para poder determinar las aceleraciones angulares.

La velocidad es definida como la magnitud física que muestra y expresa la variación en cuanto a posición de un objeto y en función del tiempo (L.Norton, 2005). Al tener el problema una gran número de posiciones (θ_2), se usó un método analítico generalizado. Las ecuaciones (4.4) y (4.5) que representan los lazos vectoriales en números complejos para cada nodo, estas fueron derivadas respecto al tiempo para poder hallar las relaciones de velocidad en el mecanismo.

En los requerimientos (Tabla 3.5), se especificó que el tiempo de cierre de las falanges será de 2 segundos, entonces:

$$t = 2[\text{seg}] \quad (\text{tiempo de cierre de las falanges}) \quad (4.16)$$

$$\theta_2 = \pi/2[\text{rad}] \quad (\text{angulo de giro parapara el eslabon 2 } 90^\circ) \quad (4.17)$$

$$\omega_2 = \frac{\theta_2}{t} \left[\frac{\text{rad}}{\text{seg}} \right] \quad (\text{Velocidad angular}) \quad (4.18)$$

Reemplazando (4.16) y (4.17) en (4.18).

$$\omega_2 = \frac{\theta_2}{t} = \frac{\pi/2}{2} = 0.7854 \text{ rad/s}$$

Nodo 01 (derivando (4.4) respecto a t)

$$\frac{\sigma}{\sigma t} (R2. e^{i\theta_2} + R3. e^{i\theta_3} - R4e^{i\theta_4} - R1e^{i\theta_1} = 0) \quad (4.19)$$

Nodo 02 (derivando (4.5) respecto a t)

$$\frac{\sigma}{\sigma t} (R2. e^{i\theta_2} + R7. e^{i(\theta_3-\beta)} + R8e^{i\theta_8} - (R5e^{i\theta_2} + R6e^{i(\theta_5-90)}) - R9e^{i\theta_9}) \quad (4.20)$$

Derivadas las ecuaciones (4.19) y (4.20) (para el vector R1 la derivada es 0) puesto que no tiende a cambiar su posición en el tiempo.



(Nodo 01)

$$R2.i.\omega_2.e^{i\theta_2} + R3.i.\omega_3.e^{i\theta_3} - R4.i.\omega_4.e^{i\theta_4} = 0 \quad (4.21)$$

(Nodo 02)

$$R2.i.\omega_2.e^{i\theta_2} + R7.i.\omega_3.e^{i(\theta_3-\beta)} + R8.i.\omega_8.e^{i\theta_8} - R5.i.\omega_2.e^{i\theta_2} - \\ R6.i.\omega_2.e^{i(\theta_2-90)} - R9.i.\omega_9.e^{i\theta_9} = 0 \quad (4.22)$$

Al sustituir estas ecuaciones (4.21), (4.22) en la equivalencia de Euler (4.5), obtenemos las ecuaciones cartesianas de velocidad para cada uno de los nodos del mecanismo.

Nodo 01

$$R2.i.\omega_2.(\cos \theta_2 + i \sin \theta_2) + R3i.\omega_3(\cos \theta_3 + i \sin \theta_3) - R4i.\omega_4(\cos \theta_4 + i \sin \theta_4) = 0$$

Despejando

$$R2.\omega_2.(-\sin \theta_2 + i \cos \theta_2) + R3.\omega_3(-\sin \theta_3 + i \cos \theta_3) - \\ R4.\omega_4(-\sin \theta_4 + i \cos \theta_4) = 0 \quad (4.23)$$

Nodo 02

$$R2.i.\omega_2.(\cos \theta_2 + i \sin \theta_2) + R7.i.\omega_3.(\cos(\theta_3 - \beta) + i \sin(\theta_3 - \beta)) + \\ R8.i.\omega_8.(\cos \theta_8 + i \sin \theta_8) - R5.i.\omega_2.(\cos \theta_2 + i \sin \theta_2) - R6.i.\omega_2.(\cos(\theta_2 - 90) + \\ i \sin(\theta_2 - 90)) - R9.i.\omega_9.(\cos \theta_9 + i \sin \theta_9) = 0$$

Despejando

$$R2.\omega_2.(-\sin \theta_2 + i \cos \theta_2) + R7.\omega_3.(-\sin(\theta_3 - \beta) + i \cos(\theta_3 - \beta)) + \\ R8.\omega_8.(-\sin \theta_8 + i \cos \theta_8) - R5.\omega_2.(-\sin \theta_2 + i \cos \theta_2) - R6.\omega_2.(-\sin(\theta_2 - 90) + \\ i \cos(\theta_2 - 90)) - R9.\omega_9.(-\sin \theta_9 + i \cos \theta_9) = 0 \quad (4.24)$$

Las ecuaciones (4.23) y (4.24) se dividen en sus partes real e imaginaria:

- Nodo 01

Parte real (dirección x)

$$f5 = -R2 * \omega_2 * \sin(\theta_2) - R3 * \omega_3 * \sin(\theta_3) + R4 * \omega_4 * \sin(\theta_4) = 0 \quad (4.25)$$



Parte imaginaria (dirección y)

$$f6 = R2 * \omega_2 * \cos(\theta_2) + R3 * \omega_3 * \cos(\theta_3) - R4 * \omega_4 * \cos(\theta_4) = 0 \quad (4.26)$$

- Nodo 02

Parte real (dirección x)

$$f7 = -R2. \omega_2. \sin(\theta_2) - R7. \omega_3. \sin(\theta_3 - \beta) - R8. \omega_8. \sin(\theta_8) + R5. \omega_2. \sin(\theta_2) + R6. \omega_2. \sin(\theta_2 - 90) + R9. \omega_2. \sin(\theta_9) = 0 \quad (4.27)$$

Parte imaginaria (dirección y)

$$f8 = R2. \omega_2. \cos(\theta_2) + R7. \omega_3. \cos(\theta_3 - \beta) + R8. \omega_8. \cos(\theta_8) - R5. \omega_8. \cos(\theta_2) - R6. \omega_2. \cos(\theta_2 - 90) - R9. \omega_9. \cos(\theta_9) = 0 \quad (4.28)$$

Estos dos de sistemas de ecuaciones, uno para cada uno de los nodos del mecanismo, se resolvieron usando un sistema de matrices para cada una de ellas.

- Nodo 01

Como incógnitas: ω_3 y ω_4 y dos ecuaciones f5 (4.25) y f6 (4.26) que se ordenaron matricialmente, definimos en (4.18) la velocidad angular del eslabón dos $\omega_2 = 0.7854 \text{ rad/s}$.

$$\begin{bmatrix} -R3 * \sin(\theta_3) & +R4 * \sin(\theta_4) \\ +R3 * \cos(\theta_3) & -R4 * \cos(\theta_4) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \omega_3 \\ \omega_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_2 * R2 * \sin(\theta_2) \\ -\omega_2 * R2 * \cos(\theta_2) \end{bmatrix} \quad (4.29)$$

Esta matriz es de la forma

$$[A] * [X] = [B]$$

Que puede despejarse

$$[A]^{-1} * [A] * [X] = [B] * [A]^{-1}$$

$$[X] = [B] * [A]^{-1} \quad (4.30)$$

- Nodo 02

Como incógnitas ω_8 y ω_9 y dos ecuaciones f7 (4.27) y f8 (4.28) que las se ordenaron matricialmente.



$$\begin{bmatrix} -R8 * \sin(\theta_8) & +R9 * \sin(\theta_9) \\ +R8 * \cos(\theta_8) & -R9 * \cos(\theta_9) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \omega_8 \\ \omega_9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_2 * R2 * \sin(\theta_2) + \omega_3 * R7 * \sin(\theta_3 - \beta) - \omega_2 * R5 * \sin(\theta_2) - \omega_2 * R6 * \sin(\theta_2 - 90) \\ -\omega_2 * R2 * \cos(\theta_2) - \omega_3 * R7 * \cos(\theta_3 - \beta) + \omega_2 * R5 * \cos(\theta_2) + \omega_2 * R6 * \cos(\theta_2 - 90) \end{bmatrix} \quad (4.31)$$

Esta matriz es de la forma

$$[C] * [XX] = [D]$$

Que puede despejarse

$$[C]^{-1} * [C] * [XX] = [D] * [C]^{-1}$$

$$[XX] = [D] * [C]^{-1} \quad (4.32)$$

Se hizo uso del software; MATLAB®R2013b, para obtener los resultados de las matrices [X] y [XX] que están en función al Angulo θ2 que tiene una variación de (90° a 180°) cada 5°, Tabla 4.4.

Tabla 4.4 Velocidades angulares.

| θ2(°) | ω2(rad/s) | ω3(rad/s) | ω4 (rad/s) | ω7(rad/s) | ω8(rad/s) | ω9(rad/s) | ω10(rad/s) |
|-------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|-----------|------------|
| 90.0 | 0.7854 | 1.5613 | 0.9322 | 1.5613 | 2.3531 | 1.7495 | 2.3531 |
| 95.0 | 0.7854 | 1.5754 | 0.9149 | 1.5754 | 2.3904 | 1.740 | 2.3904 |
| 100.0 | 0.7854 | 1.5821 | 0.8955 | 1.5821 | 2.405 | 1.7181 | 2.405 |
| 105.0 | 0.7854 | 1.5835 | 0.8748 | 1.5835 | 2.4025 | 1.6879 | 2.4025 |
| 110.0 | 0.7854 | 1.5809 | 0.8532 | 1.5809 | 2.388 | 1.6525 | 2.388 |
| 115.0 | 0.7854 | 1.5756 | 0.831 | 1.5756 | 2.3657 | 1.6146 | 2.3657 |
| 120.0 | 0.7854 | 1.5687 | 0.8088 | 1.5687 | 2.3392 | 1.5761 | 2.3392 |
| 125.0 | 0.7854 | 1.5609 | 0.7866 | 1.5609 | 2.3113 | 1.5382 | 2.3113 |
| 130.0 | 0.7854 | 1.5531 | 0.7648 | 1.5531 | 2.2842 | 1.5021 | 2.2842 |
| 135.0 | 0.7854 | 1.5458 | 0.7434 | 1.5458 | 2.2601 | 1.4683 | 2.2601 |
| 140.0 | 0.7854 | 1.5398 | 0.7226 | 1.5398 | 2.2407 | 1.4373 | 2.2407 |
| 145.0 | 0.7854 | 1.5358 | 0.7024 | 1.5358 | 2.2282 | 1.4094 | 2.2282 |
| 150.0 | 0.7854 | 1.5347 | 0.6827 | 1.5347 | 2.2248 | 1.3848 | 2.2248 |
| 155.0 | 0.7854 | 1.5375 | 0.6635 | 1.5375 | 2.2341 | 1.3636 | 2.2341 |
| 160.0 | 0.7854 | 1.546 | 0.6446 | 1.546 | 2.2614 | 1.3463 | 2.2614 |
| 165.0 | 0.7854 | 1.5627 | 0.6255 | 1.5627 | 2.3166 | 1.3329 | 2.3166 |
| 170.0 | 0.7854 | 1.5926 | 0.6054 | 1.5926 | 2.4197 | 1.3235 | 2.4197 |
| 175.0 | 0.7854 | 1.6453 | 0.5828 | 1.6453 | 2.6208 | 1.316 | 2.6208 |
| 180.0 | 0.7854 | 1.7446 | 0.5536 | 1.7446 | 3.1033 | 1.2917 | 3.1033 |

Fuente: propia



Se graficó estos datos en función a θ_2 para poder visualizar la variación de la velocidad angular de cada uno de los eslabones del mecanismo. Fig. (4.23).

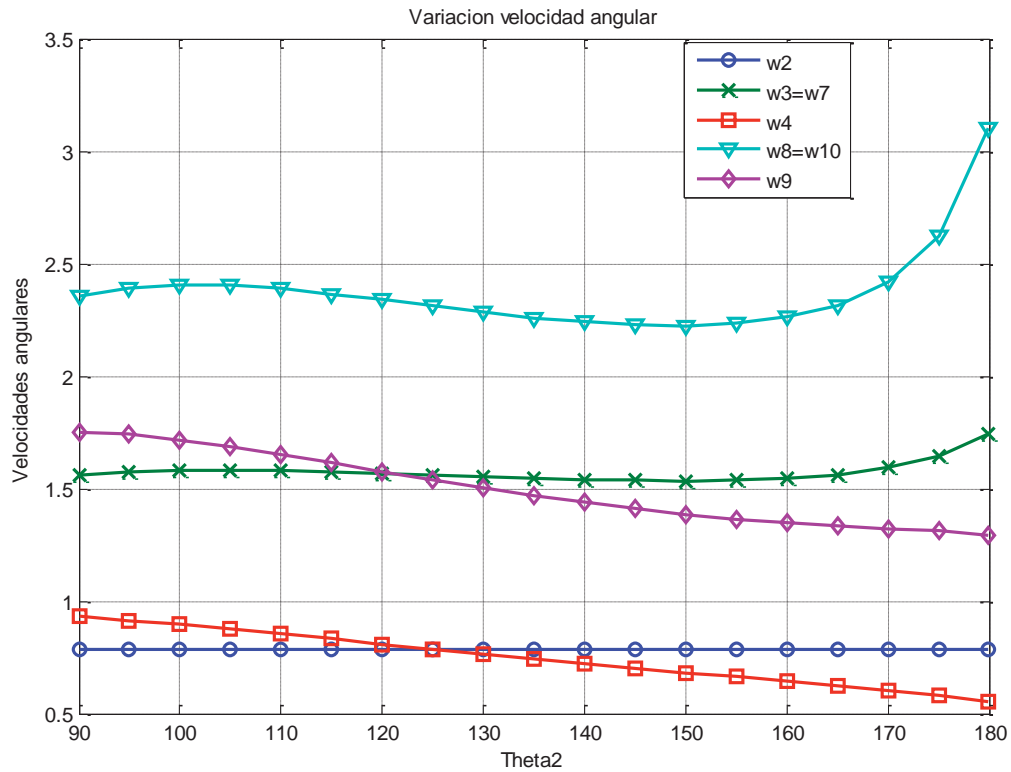


Figura 4.23 Velocidades angulares.
Fuente propia

Para comprobar la validez de los datos obtenidos usaremos el programa SAM 6.1, el mecanismo ya fue modelado, luego se generan las gráficas que concuerdan con los resultados obtenidos en MATLAB®R2013b, se puede ver los resultados de la simulación en SAM 6.1 en la (Fig. 4.24).

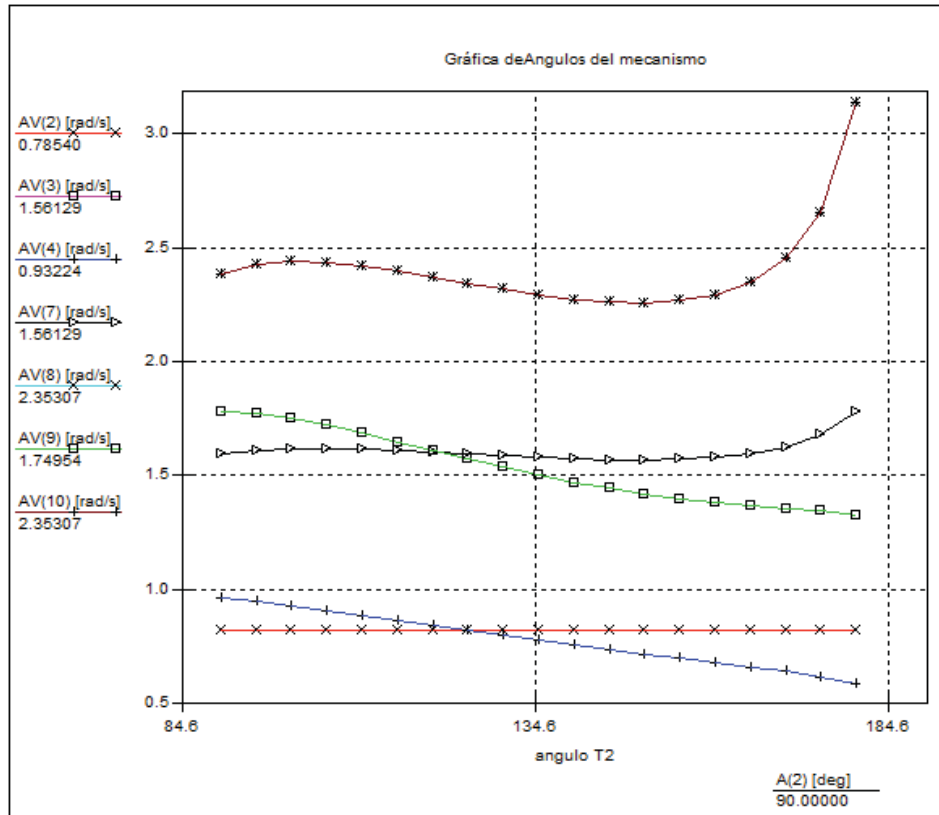


Figura 4.24 Velocidades angulares.
Fuente: Propia, simulado en SAM6.1

4.1.1.4 Cálculo de la aceleración angular del mecanismo.

Una vez calculada las velocidades, lo siguiente será determinar las aceleraciones angulares de cada eslabón.

La aceleración se define como la magnitud física que mide la tasa de variación de la velocidad respecto del tiempo (L.Norton, 2005). De las ecuaciones (4.4) y (4.5) que representan los lazos vectoriales para cada nodo habrá que derivarlas dos veces respecto al tiempo para poder hallar las relaciones de aceleración en el mecanismo.

Nodo 01

$$\frac{\sigma}{\sigma t} \left(\frac{\sigma}{\sigma t} (R2 \cdot e^{i\theta_2} + R3 \cdot e^{i\theta_3} - R4e^{i\theta_4} - R1e^{i\theta_1}) \right) \quad (4.33)$$

Nodo 02

$$\frac{\sigma}{\sigma t} \left(\frac{\sigma}{\sigma t} (R2 \cdot e^{i\theta_2} + R7 \cdot e^{i(\theta_3-\beta)} + R8e^{i\theta_8} - (R5e^{i\theta_2} + R6e^{i(\theta_5-90)}) - R9e^{i\theta_9}) \right) \quad (4.34)$$



Derivando las ecuaciones (4.33) y (4.34)

Nodo 01

$$R2. i. \alpha_2. e^{i\theta_2} + R2. (i^2). (\omega_2)^2. e^{i\theta_2} + R3. i. \alpha_3. e^{i\theta_3} + R3. (i^2). (\omega_3)^2. e^{i\theta_3} - \\ R4. i. \alpha_4. e^{i\theta_4} - R4. (i^2). (\omega_4)^2. e^{i\theta_4} = 0$$

Despejando

$$R2. i. \alpha_2. e^{i\theta_2} - R2. (\omega_2)^2. e^{i\theta_2} + R3. i. \alpha_3. e^{i\theta_3} - R3. (\omega_3)^2. e^{i\theta_3} - R4. i. \alpha_4. e^{i\theta_4} + \\ R4. (\omega_4)^2. e^{i\theta_4} = 0 \quad (4.35)$$

Nodo 02

$$R2. i. \alpha_2. e^{i\theta_2} + R2. (i^2). (\omega_2)^2. e^{i\theta_2} + R7. i. \alpha_3. e^{i(\theta_3-\beta)} + R7. (i^2). (\omega_3)^2. e^{i(\theta_3-\beta)} + \\ R8. i. \alpha_8. e^{i\theta_8} + R8. (i^2). (\omega_8)^2. e^{i\theta_8} - R5. i. \alpha_2. e^{i\theta_2} - R5. (i^2). (\omega_2)^2. e^{i\theta_2} - \\ R6. i. \alpha_2. e^{i(\theta_2-90)} - R6. (i^2). (\omega_2)^2. e^{i(\theta_2-90)} - R9. i. \alpha_9. e^{i\theta_9} - R9. (i^2). (\omega_9)^2. e^{i\theta_9} = \\ 0$$

Despejando

$$R2. i. \alpha_2. e^{i\theta_2} - R2. (\omega_2)^2. e^{i\theta_2} + R7. i. \alpha_3. e^{i(\theta_3-\beta)} - R7. (\omega_3)^2. e^{i(\theta_3-\beta)} + \\ R8. i. \alpha_8. e^{i\theta_8} - R8. (\omega_8)^2. e^{i\theta_8} - R5. i. \alpha_2. e^{i\theta_2} + R5. (\omega_2)^2. e^{i\theta_2} - R6. i. \alpha_2. e^{i(\theta_2-90)} + \\ R6. (\omega_2)^2. e^{i(\theta_2-90)} - R9. i. \alpha_9. e^{i\theta_9} + R9. (\omega_9)^2. e^{i\theta_9} = 0 \quad (4.36)$$

Al sustituir las ecuaciones (4.35) y (4.36) en la equivalencia de Euler (4.5), se obtiene las ecuaciones cartesianas para cada uno de los nodos del mecanismo.

Nodo01

$$R2. i. \alpha_2. (\cos \theta_2 + i \sin \theta_2) - R2. (\omega_2)^2. (\cos \theta_2 + i \sin \theta_2) + R3. i. \alpha_3. (\cos \theta_3 + \\ i \sin \theta_3) - R3. (\omega_3)^2. (\cos \theta_3 + i \sin \theta_3) - R4. i. \alpha_4. (\cos \theta_4 + i \sin \theta_4) + \\ R4. (\omega_4)^2. (\cos \theta_4 + i \sin \theta_4) = 0$$

Despejando

$$R2. \alpha_2(-\sin \theta_2 + i \cos \theta_2) - R2. (\omega_2)^2 (\cos \theta_2 + i \sin \theta_2) + R3. \alpha_3(\cos(\theta_3 - \beta) + \\ i \sin(\theta_3 - \beta)) + R3. (\omega_3)^2 (\cos \theta_3 + i \sin \theta_3) - R4. \alpha_4(-\sin \theta_4 + i \cos \theta_4) + \\ R4. (\omega_4)^2 (\cos \theta_4 + i \sin \theta_4) = 0 \quad (4.37)$$



Nodo 02

$$\begin{aligned}
 &R2. i. \alpha_2. (\cos \theta_2 + i \sin \theta_2) - R2. (\omega_2)^2. (\cos \theta_2 + i \sin \theta_2) + R7. i. \alpha_3 (\cos(\theta_3 - \beta) + \\
 &i \sin(\theta_3 - \beta)) - R7. (\omega_3)^2 (\cos(\theta_3 - \beta) + i \sin(\theta_3 - \beta)) + R8. i. \alpha_8. (\cos \theta_8 + \\
 &i \sin \theta_8) - R8. (\omega_8)^2 (\cos \theta_8 + i \sin \theta_8) - R5. i. \alpha_2. (\cos \theta_2 + i \sin \theta_2) + \\
 &R5. (\omega_2)^2. (\cos \theta_2 + i \sin \theta_2) - R6. \alpha_2 (\cos(\theta_2 - 90) + i \sin(\theta_2 - 90)) + \\
 &R6. (\omega_2)^2. (\cos(\theta_2 - 90) + i \sin(\theta_2 - 90)) - R9. i. \alpha_9. (\cos \theta_9 + i \sin \theta_9) + \\
 &R9. (\omega_9)^2. (\cos \theta_9 + i \sin \theta_9) = 0 .
 \end{aligned}$$

Despejando

$$\begin{aligned}
 &R2. i. \alpha_2. (-\sin \theta_2 + i \cos \theta_2) - R2. (\omega_2)^2. (\cos \theta_2 + i \sin \theta_2) + \\
 &R7. \alpha_3 (-\sin(\theta_3 - \beta) + i \cos(\theta_3 - \beta)) - R7. (\omega_3)^2 (\cos(\theta_3 - \beta) + i \sin(\theta_3 - \beta)) + \\
 &R8. \alpha_8. (-\sin \theta_8 + i \cos \theta_8) - R8. (\omega_8)^2 (\cos \theta_8 + i \sin \theta_8) - R5. \alpha_2 (-\sin \theta_2 + \\
 &i \cos \theta_2) + R5. (\omega_2)^2 (\cos \theta_2 + i \sin \theta_2) - R6. \alpha_2 (-\sin(\theta_2 - 90) + i \cos(\theta_2 - 90)) + \\
 &R6. (\omega_2)^2 (\cos(\theta_2 - 90) + i \sin(\theta_2 - 90)) - R9. \alpha_9 (-\sin \theta_9 + i \cos \theta_9) + \\
 &R9. (\omega_9)^2 (\cos \theta_9 + i \sin \theta_9) = 0 \tag{4.38}
 \end{aligned}$$

Las ecuaciones (4.37) y (4.38) se dividen en sus partes real e imaginaria.

- **Nodo 01**

Parte real (dirección X)

$$\begin{aligned}
 f9 = &-R2. \alpha_2. \sin(\theta_2) - R2(\omega_2)^2 \cos(\theta_2) - R3. \alpha_3. \sin(\theta_3) - R3(\omega_3)^2 \cos(\theta_3) + \\
 &R4. \alpha_2. \sin(\theta_4) + R4(\omega_4)^2 \cos(\theta_4) = 0 \tag{4.39}
 \end{aligned}$$

Parte imaginaria (dirección Y)

$$\begin{aligned}
 f10 = &R2. \alpha_2. \cos(\theta_2) - R2(\omega_2)^2 \sin(\theta_2) + R3. \alpha_3. \cos(\theta_3) - R3(\omega_3)^2 \sin(\theta_3) - \\
 &R4. \alpha_2. \cos(\theta_4) + R4(\omega_4)^2 \sin(\theta_4) = 0 \tag{4.40}
 \end{aligned}$$

- **Nodo 02**

Parte real (dirección X)

$$\begin{aligned}
 f11 = &-R2. \alpha_2. \sin(\theta_2) - R2(\omega_2)^2 \cos(\theta_2) - R7. \alpha_3. \sin(\theta_3 - \beta) - \\
 &R7(\omega_3)^2 \cos(\theta_3 - \beta) - R8. \alpha_8. \sin(\theta_8) - R8(\omega_8)^2 \cos(\theta_8) + R5. \alpha_2. \sin(\theta_2) +
 \end{aligned}$$



$$R5(\omega_2)^2 \cos(\theta_2) + R6 \cdot \alpha_2 \cdot \sin(\theta_2 - 90) + R6(\omega_2)^2 \cos(\theta_2 - 90) + R9 \cdot \alpha_9 \cdot \sin(\theta_9) + R9(\omega_9)^2 \cos(\theta_9) = 0 \quad (4.41)$$

Parte imaginaria (dirección Y)

$$f_{12} = R2 \cdot \alpha_2 \cdot \cos(\theta_2) - R2(\omega_2)^2 \sin(\theta_2) + R7 \cdot \alpha_3 \cdot \cos(\theta_3 - \beta) - R7(\omega_3)^2 \sin(\theta_3 - \beta) + R8 \cdot \alpha_8 \cdot \cos(\theta_8) - R8(\omega_8)^2 \sin(\theta_8) - R5 \cdot \alpha_2 \cdot \cos(\theta_2) + R5(\omega_2)^2 \sin(\theta_2) - R6 \cdot \alpha_2 \cdot \cos(\theta_2 - 90) + R6(\omega_2)^2 \sin(\theta_2 - 90) - R9 \cdot \alpha_9 \cdot \cos(\theta_9) + R9(\omega_9)^2 \sin(\theta_9) = 0 \quad (4.42)$$

Estos dos sistemas de ecuaciones, uno para cada uno de los nodos del mecanismo, se resolvieron usando un sistema de matrices para cada una de ellas.

Nodo 01

Como incógnitas: α_3 y α_4 y dos ecuaciones f9 (4.39) y f10 (4.40) que se ordenaron matricialmente, la velocidad angular es constante por consiguiente

$$\alpha_2 = 0.00 \text{ rad/s}^2 \quad (4.43)$$

$$\begin{bmatrix} -R3 * \sin(\theta_3) & +R4 * \sin(\theta_4) \\ +R3 * \cos(\theta_3) & -R4 * \cos(\theta_4) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \alpha_3 \\ \alpha_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R2 \cdot \alpha_2 \cdot \sin(\theta_2) + R2(\omega_2)^2 \cos(\theta_2) + R3(\omega_3)^2 \cos(\theta_3) - R4(\omega_4)^2 \cos(\theta_4) \\ -R2 \cdot \alpha_2 \cdot \cos(\theta_2) + R2(\omega_2)^2 \sin(\theta_2) + R3(\omega_3)^2 \sin(\theta_3) - R4(\omega_4)^2 \sin(\theta_4) \end{bmatrix} \quad (4.44)$$

Esta matriz es de la forma

$$[A] * [X] = [B]$$

Que puede despejarse

$$[A]^{-1} * [A] * [X] = [B] * [A]^{-1}$$

$$[X] = [B] * [A]^{-1} \quad (4.45)$$

Nodo 02

Como incógnita α_8 y α_9 y dos ecuaciones f11 (3.41) y f12 (3.42) que se ordenaron matricialmente.



$$\begin{bmatrix} -R8 * \sin(\theta_8) & +R9 * \sin(\theta_9) \\ +R8 * \cos(\theta_8) & -R9 * \cos(\theta_9) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \alpha_8 \\ \alpha_9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} +R2. \alpha_2. \sin(\theta_2) + R2(\omega_2)^2 \cos(\theta_2) + R7. \alpha_3. \sin(\theta_3 - \beta) + R7(\omega_3)^2 \cos(\theta_3 - \beta) + R8(\omega_8)^2 \cos(\theta_8) \\ -R2. \alpha_2. \cos(\theta_2) + R2(\omega_2)^2 \sin(\theta_2) - R7. \alpha_3. \cos(\theta_3 - \beta) + R7(\omega_3)^2 \sin(\theta_3 - \beta) + R8(\omega_8)^2 \sin(\theta_8) \\ -R5. \alpha_2. \sin(\theta_2) - R5(\omega_2)^2 \cos(\theta_2) - R6. \alpha_2. \sin(\theta_2 - 90) - R6(\omega_2)^2 \cos(\theta_2 - 90) - R9(\omega_9)^2 \cos(\theta_9) \\ +R5. \alpha_2. \cos(\theta_2) - R5(\omega_2)^2 \sin(\theta_2) + R6. \alpha_2. \cos(\theta_2 - 90) - R6(\omega_2)^2 \sin(\theta_2 - 90) - R9(\omega_9)^2 \sin(\theta_9) \end{bmatrix}$$

(4.46)

Esta matriz es de la forma

$$[A] * [XX] = [B]$$

Que puede despejarse

$$[A]^{-1} * [A] * [XX] = [B] * [A]^{-1}$$

$$[XX] = [B] * [A]^{-1} \tag{4.47}$$

Se hizo uso del software MATLAB®R2013b, para obtener los resultados de las matrices [X] y [XX] (4.44) y (4.46) que estará en función al ángulo θ_2 quien posee una variación de (90° a 180°) cada 5°, Tabla 4.5.

Tabla 4.5 Aceleraciones angulares.

| θ_2 | Aceleraciones Angulares (rad/seg ²) | | | | | | |
|------------|---|------------|------------|------------|------------|------------|---------------|
| | α_2 | α_3 | α_4 | α_7 | α_8 | α_9 | α_{10} |
| 90.0 | 0 | 0.1657 | -0.1457 | 0.1657 | 0.4551 | -0.0171 | 0.4551 |
| 95.00 | 0 | 0.0907 | -0.1661 | 0.0907 | 0.225 | -0.1479 | 0.225 |
| 100.00 | 0 | 0.0341 | -0.1811 | 0.0341 | 0.0466 | -0.2401 | 0.0466 |
| 105.00 | 0 | -0.0076 | -0.1913 | -0.0076 | -0.0834 | -0.2995 | -0.0834 |
| 110.00 | 0 | -0.037 | -0.1974 | -0.037 | -0.1714 | -0.3329 | -0.1714 |
| 115.00 | 0 | -0.0564 | -0.2003 | -0.0564 | -0.2244 | -0.3464 | -0.2244 |
| 120.00 | 0 | -0.0674 | -0.2003 | -0.0674 | -0.249 | -0.3453 | -0.249 |
| 125.00 | 0 | -0.0713 | -0.1983 | -0.0713 | -0.2506 | -0.3339 | -0.2506 |
| 130.00 | 0 | -0.0689 | -0.1946 | -0.0689 | -0.2331 | -0.3154 | -0.2331 |
| 135.00 | 0 | -0.0605 | -0.1899 | -0.0605 | -0.1984 | -0.2921 | -0.1984 |
| 140.00 | 0 | -0.046 | -0.1846 | -0.046 | -0.1468 | -0.2656 | -0.1468 |
| 145.00 | 0 | -0.0246 | -0.1793 | -0.0246 | -0.0759 | -0.2369 | -0.0759 |
| 150.00 | 0 | 0.0055 | -0.1745 | 0.0055 | 0.0203 | -0.2063 | 0.0203 |
| 155.00 | 0 | 0.0477 | -0.1711 | 0.0477 | 0.1544 | -0.1736 | 0.1544 |
| 160.00 | 0 | 0.1084 | -0.1704 | 0.1084 | 0.352 | -0.1387 | 0.352 |
| 165.00 | 0 | 0.2002 | -0.1747 | 0.2002 | 0.6698 | -0.102 | 0.6698 |



| | | | | | | | |
|--------|---|--------|---------|--------|--------|---------|--------|
| 170.00 | 0 | 0.3508 | -0.1887 | 0.3508 | 1.252 | -0.0692 | 1.252 |
| 175.00 | 0 | 0.629 | -0.224 | 0.629 | 2.5759 | -0.0817 | 2.5759 |
| 180.00 | 0 | 1.2551 | -0.3171 | 1.2551 | 7.3432 | -0.5468 | 7.3432 |

Fuente: propia

Estos datos se grafican en función a θ_2 para poder visualizar la variación de la aceleración angular de cada uno de los eslabones del mecanismo fig. (4.25).

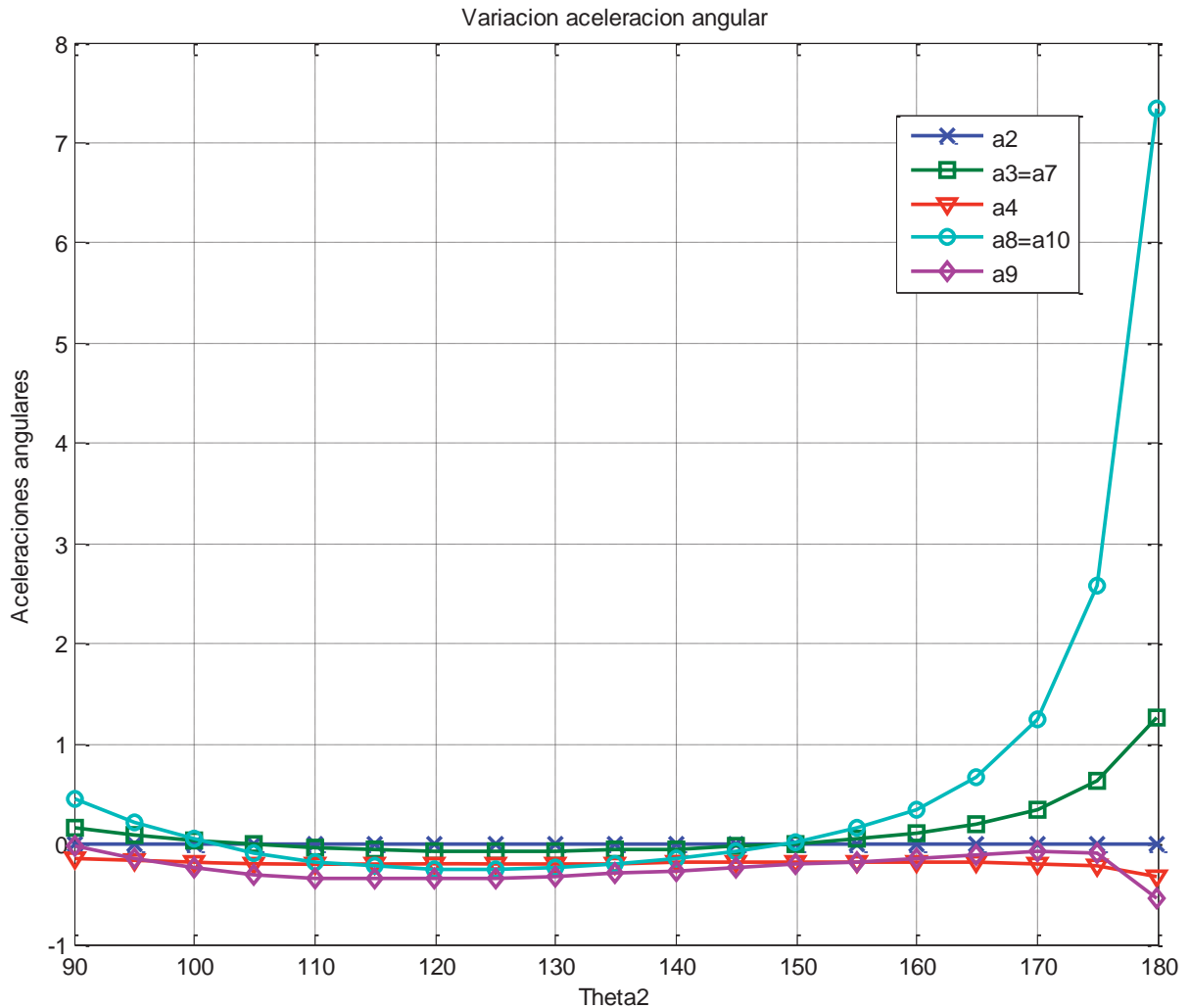


Figura 4.25 Aceleraciones angulares.
Fuente propia

Para comprobar la validez de los datos obtenidos se usó SAM 6.1, esta gráfica concuerda con la gráfica anterior obtenida en el software MATLAB®R2013b se puede ver los resultados en la Figura. (4.26).

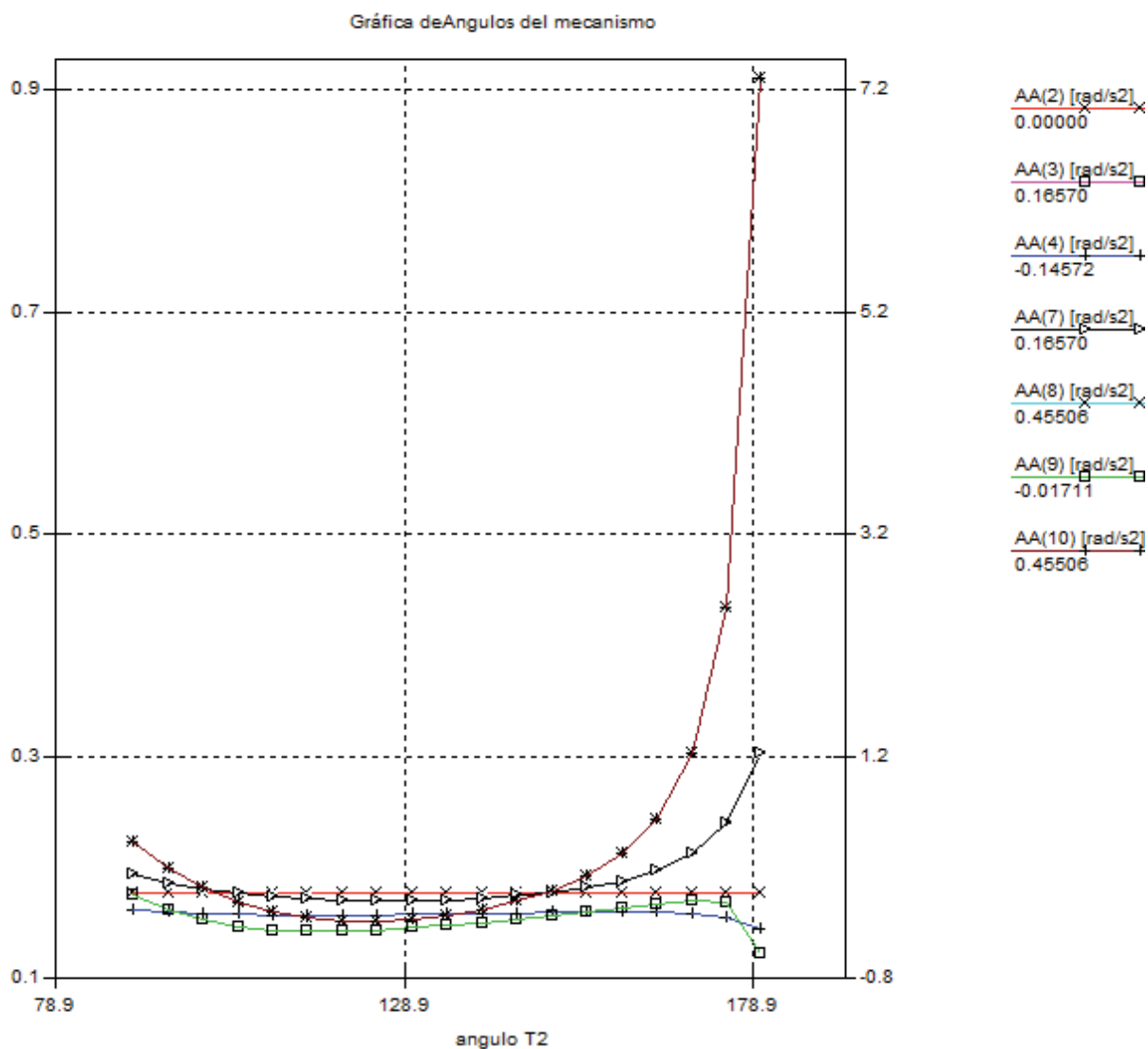


Figura 4.26 Aceleraciones Angulares.
Fuente: Propia simulación en SAM6.1

4.1.1.5 Centro de masa, cálculo de posición, velocidad y aceleración.

Cuando un cuerpo se encuentra en movimiento, todas sus partículas se mueven a la vez, aunque con distintas trayectorias. Para caracterizar la traslación, nos basta con estudiar qué ocurre en un solo punto del mismo: su centro de masas. Este será el que determine su trayectoria, velocidad y aceleración.

Es necesario saber la ubicación del centro de masa y la masa de cada eslabón, así como la aceleración de los centro de gravedad de cada elemento del mecanismo.



4.1.1.5.1 Posiciones de los centro de masa, Momento de inercia, masa de los eslabones.

Se hizo usos del software: Autodesk Inventor 2015 para modelar los eslabones (Figura 4.27 y Figura 4.28) y obtener; su masa, momento de inercia y la ubicación de los centro de gravedad (Tabla 4.6) que están en función a un eje de coordenadas para cada uno de los elementos (Tabla 4.7).

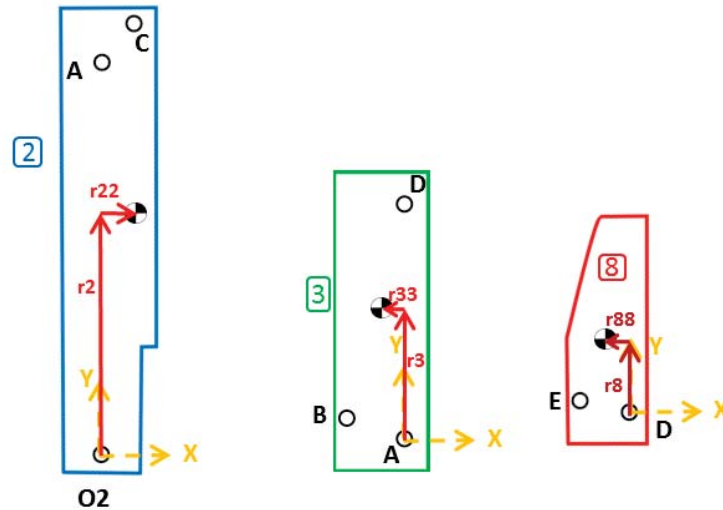


Figura 4.27 Ubicación de CG para 2, 3,8
Fuente propia.

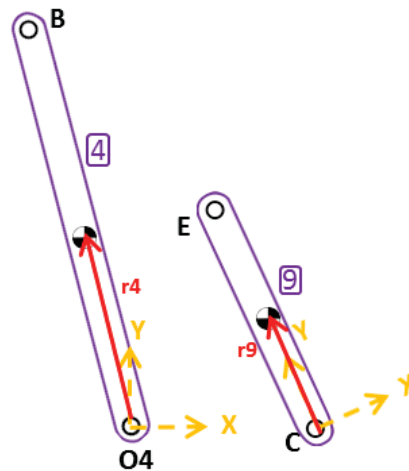


Figura 4.28 Ubicación de CG para 4,9
Fuente propia.

Tabla 4.6 Masa, segundo momento de inercia, para los eslabones.

| Eslabón | 2 | 3 | 4 | 8 | 9 |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Masa(Kg) | 0,005 | 0,003 | 0,001 | 0,002 | 0,001 |
| $I_{zz}[Kg - mm^2]$ | 1,455 | 0,335 | 0,029 | 0,125 | 0,029 |
| Origen coordenadas | O2 | A | D | O4 | C |

Fuente: Modelado en Autodesk inventor 2015.



Tabla 4.7 Ubicación de los centros de gravedad respecto al origen de coordenadas.

| Centro de masa | CG2 | | CG3 | | CG4 | | CG8 | | CG9 | |
|----------------|------|--------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|
| [mm] | r2= | 0,027 | r3= | 0,015 | r4= | 0,048 | r8= | 0,010 | r9= | 0,014 |
| | r22= | 0,0027 | rr3= | 0,003 | r44= | 0,000 | r88= | 0,002 | rr9= | 0,00 |

Fuente: Modelado en Autodesk inventor 2015.

La ubicación de los centros de masas puede ser generalizada para todo el recorrido, es decir que estén en función de T2, estas ecuaciones de posicionamiento de los C.G generadas son útiles para los siguientes análisis de velocidad y aceleración.

Centro de gravedad Eslabón 2

$$Rcg2x = r2 * \cos(\theta_2) + r22 * \cos(\theta_2 - 90) \quad (4.48-a)$$

$$Rcg2y = r2 * \sin(\theta_2) + r22 * \sin(\theta_2 - 90) \quad (4.48-b)$$

$$Rcg2 = (Rcg2x^2 + Rcg2y^2)^{1/2} \quad (4.48-c)$$

Centro de gravedad Eslabón 3

$$Rcg3x = r3 * \cos(\theta_7) + r33 * \cos(\theta_7 + 90) \quad (4.49-a)$$

$$Rcg3y = r3 * \sin(\theta_7) + r33 * \sin(\theta_7 + 90) \quad (4.49-b)$$

$$Rcg3 = (Rcg3x^2 + Rcg3y^2)^{1/2} \quad (4.49-c)$$

Centro de gravedad Eslabón 4

$$Rcg4x = r4 * \cos(\theta_4) + r44 * \cos(\theta_4 + 90) \quad (4.50-a)$$

$$Rcg4y = r4 * \sin(\theta_4) + r44 * \sin(\theta_4 + 90) \quad (4.50-b)$$

$$Rcg4 = (Rcg4x^2 + Rcg4y^2)^{1/2} \quad (4.50-c)$$

Centro de gravedad Eslabón 8

$$Rcg8x = r4 * \cos(\theta_{10}) + r88 * \cos(\theta_{10} + 90) \quad (4.51-a)$$

$$Rcg8y = r4 * \sin(\theta_{10}) + r88 * \sin(\theta_{10} + 90) \quad (4.51-b)$$

$$Rcg8 = (Rcg8x^2 + Rcg8y^2)^{1/2} \quad (4.51-c)$$



Centro de gravedad Eslabón 9

$$Rcg9x = r9 * \cos(\theta_{10}) + r99 * \cos(\theta_9 + 90) \tag{4.52-a}$$

$$Rcg9y = r9 * \sin(\theta_{10}) + r99 * \sin(\theta_9 + 90) \tag{4.52-b}$$

$$Rcg9 = (Rcg9x^2 + Rcg9y^2)^{1/2} \tag{4.52-c}$$

4.1.1.5.2 Cálculo de Vectores de posición

Será necesario antes de iniciar el análisis de fuerzas dinámicas, se hace uso de un sistema de coordenadas no rotacionales ubicadas en el c.g de cada eslabón, según puede verse en las (Fig. 4.29) y (Fig. 4.30).

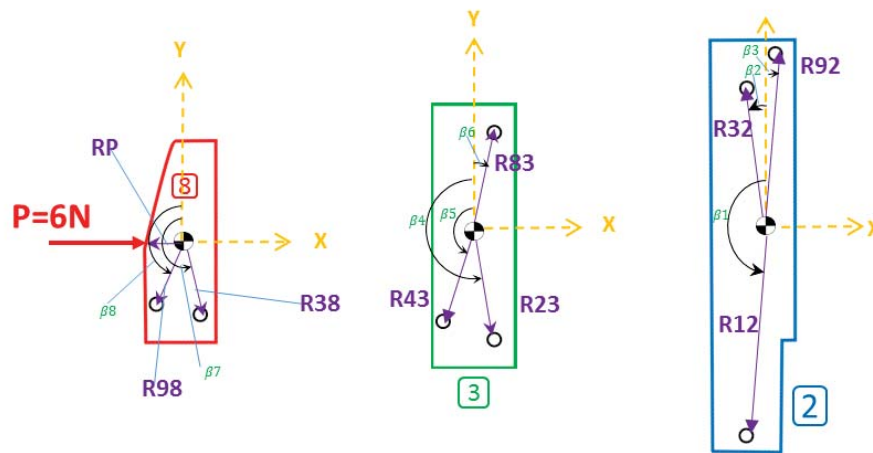


Figura 4.29 Vectores de posición.
Fuente propia

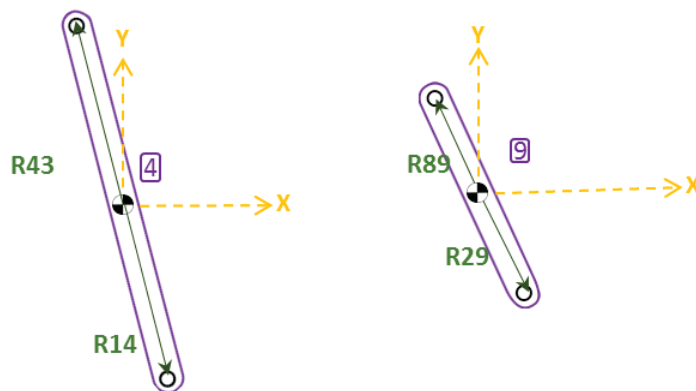


Figura 4.30 Vectores de posición.
Fuente propia

En la Tabla 4.1, se generalizo las fórmulas de los vectores de posicionamiento, estos están en función a T2, en todo el recorrido, las distancias de los vectores serán constante en todo momento.



Las Tablas (4.9), (4.10), (4.11), (4.12) muestran los resultados de los vectores de posicionamiento en función a T2

Tabla 4.8 Ecuaciones vectores de posicionamiento.

| Eslabón | Elementos constantes | Ecuaciones vectores |
|---------|---------------------------|--------------------------------------|
| 2 | R12 = 27.547 | $R12x=R12*\cos(\theta_2+\beta_1)$ |
| | R32 = 22.743 | $R12y=R12*\sin(\theta_2+\beta_1)$ |
| | R92 = 27.615 | $R32x=R32*\cos(\theta_2+\beta_2)$ |
| | $\beta_1 = 174.41^\circ$ | $R32y=R32*\sin(\theta_2+\beta_2)$ |
| | $\beta_2 = 6.780^\circ$ | $R92x=R92*\cos(\theta_2-\beta_3)$ |
| | $\beta_3 = 2.729^\circ$ | $R92y=R92*\sin(\theta_2-\beta_3)$ |
| 3 | R23 = 15.256 | $R23x=R23*\cos(\theta_7+\beta_4)$ |
| | R43 = 12.823 | $R23y=R23*\sin(\theta_7+\beta_4)$ |
| | R83 = 15.440 | $R43x=R43*\cos(\theta_7+\beta_5)$ |
| | $\beta_4 = 192.300^\circ$ | $R43y=R43*\sin(\theta_7+\beta_5)$ |
| | $\beta_5 = 161.065^\circ$ | $R83x=R83*\cos(\theta_7-\beta_6)$ |
| | $\beta_6 = 12.151^\circ$ | $R83y=R83*\sin(\theta_7-\beta_6)$ |
| 8 | R38 = 10.322 | $R38x=R38*\cos(\theta_{10}+\beta_7)$ |
| | R98 = 9.533 | $R38y=R38*\sin(\theta_{10}+\beta_7)$ |
| | Rp = 5.566 | $R98x=R98*\cos(\theta_{10}+\beta_8)$ |
| | $\beta_7 = 193.501^\circ$ | $R98y=R98*\sin(\theta_{10}+\beta_8)$ |
| | $\beta_8 = 155.375^\circ$ | $Rpx=Rp*\cos(\theta_{10}-90)$ |
| | | $Rpy=Rp*\sin(\theta_{10}-90)$ |
| 4 | R14 = 42.200 | $R14x=R14*\cos(\theta_4+180)$ |
| | R34 = 42.200 | $R14y=R14*\sin(\theta_4+180)$ |
| | | $R34x=R34*\cos(\theta_4)$ |
| | | $R34y=R34*\sin(\theta_4)$ |
| 9 | R29 = 14.1715 | $R29x=R29*\cos(\theta_9+180)$ |
| | R89 = 14.1715 | $R29y=R29*\sin(\theta_9+180)$ |
| | | $R89x=R89*\cos(\theta_9)$ |
| | | $R89y=R89*\sin(\theta_9)$ |

Fuente propia

Tabla 4.9 Vectores de posicionamiento eslabón 2.

| theta | [mm] | | | | | |
|-------|--------|---------|---------|--------|---------|--------|
| | r12x | r12y | r32x | r32y | r92x | r92y |
| 90.0 | -2.685 | -27.416 | -2.685 | 22.584 | 1.315 | 27.584 |
| 95.0 | -0.285 | -27.546 | -4.643 | 22.264 | -1.094 | 27.594 |
| 100.0 | 2.117 | -27.466 | -6.566 | 21.775 | -3.495 | 27.393 |
| 105.0 | 4.502 | -27.177 | -8.439 | 21.119 | -5.869 | 26.984 |
| 110.0 | 6.854 | -26.681 | -10.247 | 20.304 | -8.199 | 26.370 |
| 115.0 | 9.153 | -25.982 | -11.978 | 19.333 | -10.466 | 25.555 |
| 120.0 | 11.383 | -25.086 | -13.617 | 18.216 | -12.653 | 24.546 |
| 125.0 | 13.526 | -23.998 | -15.153 | 16.960 | -14.744 | 23.350 |



| | | | | | | |
|-------|--------|---------|---------|--------|---------|--------|
| 130.0 | 15.566 | -22.728 | -16.574 | 15.574 | -16.723 | 21.976 |
| 135.0 | 17.488 | -21.285 | -17.868 | 14.071 | -18.575 | 20.435 |
| 140.0 | 19.276 | -19.680 | -19.026 | 12.460 | -20.285 | 18.738 |
| 145.0 | 20.918 | -17.925 | -20.040 | 10.754 | -21.841 | 16.899 |
| 150.0 | 22.401 | -16.033 | -20.901 | 8.967 | -23.231 | 14.931 |
| 155.0 | 23.713 | -14.020 | -21.603 | 7.111 | -24.444 | 12.849 |
| 160.0 | 24.844 | -11.900 | -22.140 | 5.201 | -25.471 | 10.670 |
| 165.0 | 25.787 | -9.689 | -22.509 | 3.252 | -26.304 | 8.409 |
| 170.0 | 26.533 | -7.405 | -22.707 | 1.277 | -26.937 | 6.085 |
| 175.0 | 27.078 | -5.064 | -22.732 | -0.707 | -27.364 | 3.714 |
| 180.0 | 27.416 | -2.685 | -22.584 | -2.685 | -27.584 | 1.315 |

Fuente propia

Tabla 4.10 Vectores de posicionamiento eslabón 3.

| | [mm] | | | | | |
|--------|--------|---------|--------|---------|---------|---------|
| Theta2 | r23x | r23y | r43x | r43y | r83x | r83y |
| 90.0 | 3.250 | -14.906 | -4.161 | -12.129 | 3.250 | 15.094 |
| 95.0 | 5.786 | -14.116 | -1.994 | -12.667 | 0.583 | 15.429 |
| 100.0 | 8.162 | -12.889 | 0.248 | -12.821 | -2.120 | 15.294 |
| 105.0 | 10.292 | -11.262 | 2.488 | -12.579 | -4.764 | 14.687 |
| 110.0 | 12.103 | -9.288 | 4.650 | -11.950 | -7.259 | 13.627 |
| 115.0 | 13.538 | -7.034 | 6.664 | -10.956 | -9.526 | 12.151 |
| 120.0 | 14.554 | -4.574 | 8.466 | -9.631 | -11.493 | 10.311 |
| 125.0 | 15.126 | -1.987 | 10.005 | -8.021 | -13.103 | 8.167 |
| 130.0 | 15.243 | 0.646 | 11.236 | -6.179 | -14.313 | 5.790 |
| 135.0 | 14.907 | 3.248 | 12.129 | -4.163 | -15.094 | 3.252 |
| 140.0 | 14.134 | 5.743 | 12.661 | -2.033 | -15.427 | 0.630 |
| 145.0 | 12.952 | 8.062 | 12.822 | 0.149 | -15.310 | -2.002 |
| 150.0 | 11.396 | 10.144 | 12.611 | 2.323 | -14.748 | -4.571 |
| 155.0 | 9.508 | 11.931 | 12.033 | 4.431 | -13.757 | -7.009 |
| 160.0 | 7.335 | 13.377 | 11.102 | 6.417 | -12.362 | -9.251 |
| 165.0 | 4.929 | 14.438 | 9.835 | 8.228 | -10.589 | -11.237 |
| 170.0 | 2.338 | 15.076 | 8.251 | 9.816 | -8.469 | -12.910 |
| 175.0 | -0.393 | 15.251 | 6.365 | 11.132 | -6.027 | -14.215 |
| 180.0 | -3.232 | 14.910 | 4.176 | 12.124 | -3.268 | -15.090 |

Fuente propia

Tabla 4.11 Vectores de posicionamiento eslabón 8.

| | [mm] | | | | | |
|-------|-------|---------|--------|--------|--------|--------|
| theta | r38x | r38y | r98x | r98y | rpx | rpy |
| 90.0 | 2.413 | -10.036 | -3.977 | -8.664 | -5.566 | 0.000 |
| 95.0 | 4.946 | -9.060 | -1.580 | -9.401 | -5.374 | -1.451 |
| 100.0 | 7.158 | -7.437 | 0.952 | -9.485 | -4.801 | -2.816 |
| 105.0 | 8.867 | -5.283 | 3.423 | -8.897 | -3.888 | -3.983 |
| 110.0 | 9.945 | -2.764 | 5.643 | -7.683 | -2.703 | -4.866 |



| | | | | | | |
|-------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 115.0 | 10.321 | -0.072 | 7.454 | -5.943 | -1.338 | -5.403 |
| 120.0 | 9.989 | 2.598 | 8.736 | -3.815 | 0.103 | -5.565 |
| 125.0 | 8.994 | 5.064 | 9.421 | -1.456 | 1.522 | -5.354 |
| 130.0 | 7.423 | 7.171 | 9.483 | 0.970 | 2.825 | -4.796 |
| 135.0 | 5.397 | 8.798 | 8.941 | 3.308 | 3.933 | -3.939 |
| 140.0 | 3.053 | 9.860 | 7.844 | 5.417 | 4.785 | -2.843 |
| 145.0 | 0.537 | 10.308 | 6.273 | 7.178 | 5.337 | -1.581 |
| 150.0 | -2.002 | 10.125 | 4.326 | 8.495 | 5.561 | -0.226 |
| 155.0 | -4.423 | 9.326 | 2.112 | 9.296 | 5.447 | 1.144 |
| 160.0 | -6.589 | 7.945 | -0.249 | 9.530 | 4.996 | 2.453 |
| 165.0 | -8.374 | 6.034 | -2.636 | 9.161 | 4.219 | 3.630 |
| 170.0 | -9.653 | 3.654 | -4.923 | 8.163 | 3.133 | 4.601 |
| 175.0 | -10.286 | 0.858 | -6.979 | 6.494 | 1.746 | 5.285 |
| 180.0 | -10.049 | -2.355 | -8.641 | 4.026 | 0.032 | 5.566 |

Fuente propia

Tabla 4.12 Vectores de posicionamiento eslabón 1-4.

| Theta 2 | [mm] | | | | | | | |
|---------|--------|---------|---------|--------|--------|---------|---------|---------|
| | r14x | r14y | r34x | r34y | r29x | r29y | r89x | r89y |
| 90.0 | 6.205 | -23.390 | -6.205 | 23.390 | 5.195 | -13.185 | -5.195 | 13.185 |
| 95.0 | 8.569 | -22.631 | -8.569 | 22.631 | 7.640 | -11.936 | -7.640 | 11.936 |
| 100.0 | 10.798 | -21.656 | -10.798 | 21.656 | 9.779 | -10.257 | -9.779 | 10.257 |
| 105.0 | 12.873 | -20.491 | -12.873 | 20.491 | 11.534 | -8.234 | -11.534 | 8.234 |
| 110.0 | 14.778 | -19.163 | -14.778 | 19.163 | 12.856 | -5.964 | -12.856 | 5.964 |
| 115.0 | 16.504 | -17.698 | -16.504 | 17.698 | 13.721 | -3.545 | -13.721 | 3.545 |
| 120.0 | 18.045 | -16.124 | -18.045 | 16.124 | 14.131 | -1.070 | -14.131 | 1.070 |
| 125.0 | 19.401 | -14.463 | -19.401 | 14.463 | 14.104 | 1.379 | -14.104 | -1.379 |
| 130.0 | 20.574 | -12.739 | -20.574 | 12.739 | 13.672 | 3.730 | -13.672 | -3.730 |
| 135.0 | 21.568 | -10.973 | -21.568 | 10.973 | 12.874 | 5.925 | -12.874 | -5.925 |
| 140.0 | 22.389 | -9.182 | -22.389 | 9.182 | 11.754 | 7.916 | -11.754 | -7.916 |
| 145.0 | 23.045 | -7.383 | -23.045 | 7.383 | 10.361 | 9.669 | -10.361 | -9.669 |
| 150.0 | 23.545 | -5.590 | -23.545 | 5.590 | 8.742 | 11.154 | -8.742 | -11.154 |
| 155.0 | 23.897 | -3.815 | -23.897 | 3.815 | 6.944 | 12.354 | -6.944 | -12.354 |
| 160.0 | 24.110 | -2.070 | -24.110 | 2.070 | 5.013 | 13.255 | -5.013 | -13.255 |
| 165.0 | 24.196 | -0.364 | -24.196 | 0.364 | 2.993 | 13.852 | -2.993 | -13.852 |
| 170.0 | 24.165 | 1.290 | -24.165 | -1.290 | 0.924 | 14.141 | -0.924 | -14.141 |
| 175.0 | 24.027 | 2.882 | -24.027 | -2.882 | -1.152 | 14.125 | 1.152 | -14.125 |
| 180.0 | 23.797 | 4.395 | -23.797 | -4.395 | -3.185 | 13.809 | 3.185 | -13.809 |

Fuente propia



4.1.1.5.3 Velocidad de los centro de masa.

La velocidades serán absolutas es decir tendrán como punto de referencia O2, derivando respecto al tiempo las ecuaciones (4.48), (4.49), (4.50), (4.51), y (4.52)

Velocidad centro de gravedad eslabón 2.

$$V_{cg2x} = -r_2 * \omega_2 * \sin(\theta_2) - r_{22} * \omega_2 * \sin(\theta_2 + 90) \quad (4.53-a)$$

$$V_{cg2y} = +r_2 * \omega_2 * \cos(\theta_2) + r_{22} * \omega_2 * \cos(\theta_2 + 90) \quad (4.53-b)$$

$$V_{cg2} = (V_{cg2x}^2 + V_{cg2y}^2)^{1/2} \quad (4.53-c)$$

Velocidad centro de gravedad Eslabón 3.

$$V_{Ax} = -R_2 * \omega_2 * \sin(\theta_2) \quad (4.54-a)$$

$$V_{Ay} = +R_2 * \omega_2 * \cos(\theta_2) \quad (4.54-b)$$

$$V_{cg3x} = V_{Ax} - r_3 * \omega_3 * \sin(\theta_7) - r_{33} * \omega_3 * \sin(\theta_7 + 90) \quad (4.54-c)$$

$$V_{cg3y} = V_{Ay} + r_3 * \omega_3 * \cos(\theta_7) + r_{33} * \omega_3 * \cos(\theta_7 + 90) \quad (4.54-d)$$

$$V_{cg3} = (V_{cg3x}^2 + V_{cg3y}^2)^{1/2} \quad (4.54-e)$$

Velocidad centro de gravedad Eslabón 4.

$$V_{cg4x} = -r_3 * \omega_3 * \sin(\theta_4) \quad (4.55-a)$$

$$V_{cg4y} = +r_4 * \omega_4 * \cos(\theta_4) \quad (4.55-b)$$

$$V_{cg4} = (V_{cg4x}^2 + V_{cg4y}^2)^{1/2} \quad (4.56-c)$$

Velocidad centro de gravedad Eslabón 8.

$$V_{Dx} = -R_2 * \omega_2 * \sin(\theta_2) - R_7 * \omega_3 * \sin(\theta_7) \quad (4.57-a)$$

$$V_{Dy} = +R_2 * \omega_2 * \cos(\theta_2) + R_7 * \omega_3 * \cos(\theta_7) \quad (4.57-b)$$

$$V_{cg8x} = V_{Dx} - r_8 * \omega_8 * \sin(\theta_{10}) - r_{88} * \omega_8 * \sin(\theta_{10} + 90) \quad (4.57-c)$$

$$V_{cg8y} = V_{Dy} + r_8 * \omega_8 * \cos(\theta_{10}) + r_{88} * \omega_8 * \cos(\theta_{10} + 90) \quad (4.57-d)$$

$$V_{cg8} = (V_{cg8x}^2 + V_{cg8y}^2)^{1/2} \quad (4.57-e)$$



Velocidad Centro de gravedad Eslabón 9.

$$VDx = -R5 * \omega_2 * \sin(\theta_2) - R6 * \omega_2 * \sin(\theta_2 - 90) \quad (4.58-a)$$

$$VDy = +R5 * \omega_2 * \cos(\theta_2) + R6 * \omega_2 * \cos(\theta_2 - 90) \quad (4.58-b)$$

$$Vcg9x = VCx - r9 * \omega_9 * \sin(\theta_9) - r99 * \omega_9 * \sin(\theta_9 - 90) \quad (4.58-c)$$

$$Vcg9y = VCy + r8 * \omega_8 * \cos(\theta_9) + r99 * \omega_9 * \cos(\theta_{10} - 90) \quad (4.58-d)$$

$$Vcg9 = (Vcg9x^2 + Vcg9y^2)^{1/2} \quad (4.58-e)$$

4.1.1.5.4 Aceleraciones de los centro de masa.

Las aceleraciones serán absolutas es decir que tendrán como punto de referencia O2. Derivando dos veces respecto al tiempo las ecuaciones (4.48), (4.49), (4.50), (4.51), y (4.52)

Aceleración centro de gravedad eslabón 2.

$$Acg2x = -r2 * a_2 * \sin(\theta_2) - r2 * \omega_2^2 * \cos(\theta_2) - r22 * a_2 * \sin(\theta_2 - 90) - r22 * \omega_2^2 * \cos(\theta_2 + 90). \quad (4.59-a)$$

$$Acg2y = +r2 * a_2 * \cos(\theta_2) - r2 * \omega_2^2 * \sin(\theta_2) + r22 * a_2 * \cos(\theta_2 - 90) - r22 * \omega_2^2 * \sin(\theta_2 + 90). \quad (4.59-b)$$

$$Acg2 = (Acg2x^2 + Acg2y^2)^{1/2} \quad (4.59-c)$$

Aceleración centro de gravedad Eslabón 3.

$$Aax = -R2 * a_2 * \sin(\theta_2) - R2 * \omega_2^2 * \cos(\theta_2) \quad (4.60-a)$$

$$Aay = +R2 * a_2 * \cos(\theta_2) + R2 * \omega_2^2 * \sin(\theta_2) \quad (4.60-b)$$

$$Acg3x = Aax - r3 * a_3 * \sin(\theta_7) - r3 * \omega_3^2 * \cos(\theta_7) - r33 * a_3 * \sin(\theta_7 + 90) - r33 * \omega_3^2 * \cos(\theta_7 + 90). \quad (4.60-c)$$

$$Acg3y = Aay + r3 * a_3 * \cos(\theta_7) - r3 * \omega_3^2 * \sin(\theta_7) + r33 * a_3 * \cos(\theta_7 + 90) - r33 * \omega_3^2 * \sin(\theta_7 + 90). \quad (4.60-d)$$

$$Acg3 = (Acg3x^2 + Acg3y^2)^{1/2} \quad (4.60-e)$$

Aceleración centro de gravedad Eslabón 4.

$$Acg4x = -r4 * a_4 * \sin(\theta_4) - r4 * \omega_4^2 * \cos(\theta_4) \quad (4.61-a)$$

$$Acg4y = +r2 * a_4 * \cos(\theta_4) - r4 * \omega_4^2 * \sin(\theta_4) \quad (4.61-b)$$

$$Acg4 = (Acg4x^2 + Acg4y^2)^{1/2} \quad (4.61-c)$$

Aceleración centro de gravedad Eslabón 8.

$$Adx = -R2 * a_2 * \sin(\theta_2) - R2 * \omega_2^2 * \cos(\theta_2) - R7 * a_2 * \sin(\theta_7) - R7 * \omega_3^2 * \cos(\theta_7). \quad (4.62-a)$$



$$A_{dy} = +R2 * a_2 * \cos(\theta_2) + R2 * \omega_2^2 * \sin(\theta_2) + R7 * a_2 * \cos(\theta_7) + R7 * \omega_3^2 * \sin(\theta_7). \tag{4.62-b}$$

$$A_{cg8x} = A_{dx} - r8 * a_8 * \sin(\theta_{10}) - r8 * \omega_8^2 * \cos(\theta_{10}) - r88 * a_8 * \sin(\theta_{10} + 90) - r88 * \omega_8^2 * \cos(\theta_{10} + 90). \tag{4.62-c}$$

$$A_{cg8y} = A_{dy} + r8 * a_8 * \cos(\theta_{10}) - r8 * \omega_8^2 * \sin(\theta_{10}) + r88 * a_8 * \cos(\theta_{10} + 90) - r88 * \omega_8^2 * \sin(\theta_{10} + 90). \tag{4.62-d}$$

$$A_{cg8} = (A_{cg8x}^2 + A_{cg8y}^2)^{1/2} \tag{4.62-e}$$

Aceleración centro de gravedad Eslabón 9.

$$A_{cx} = -R2 * a_2 * \sin(\theta_2) - R2 * \omega_2^2 * \cos(\theta_2) - R7 * a_2 * \sin(\theta_7) - R7 * \omega_3^2 * \cos(\theta_7). \tag{4.63-a}$$

$$A_{cy} = +R2 * a_2 * \cos(\theta_2) + R2 * \omega_2^2 * \sin(\theta_2) + R7 * a_2 * \cos(\theta_7) + R7 * \omega_3^2 * \sin(\theta_7). \tag{4.63-b}$$

$$A_{cg9x} = A_{cx} - r9 * a_9 * \sin(\theta_9) - r9 * \omega_9^2 * \cos(\theta_9) - r99 * a_9 * \sin(\theta_9 + 90) - r99 * \omega_9^2 * \cos(\theta_9 - 90). \tag{4.63-c}$$

$$A_{cg9y} = A_{cy} + r9 * a_9 * \cos(\theta_{10}) - r9 * \omega_9^2 * \sin(\theta_9) + r99 * a_9 * \cos(\theta_9 + 90) - r99 * \omega_9^2 * \sin(\theta_9 - 90). \tag{4.63-d}$$

$$A_{cg9} = (A_{cg9x}^2 + A_{cg9y}^2)^{1/2} \tag{4.63-e}$$

La Tabla 4.13, muestra los resultados de la velocidad de los centros de gravedad, la Tabla 4.14, muestra la aceleración de los centro de gravedad en función a X i Y, y la Tabla 4.15 muestra las aceleraciones absolutas de cada centro de gravedad.

Tabla 4.13 Velocidades de Cg de los eslabones.

| T2° | Vcg2[mm/s2] | Vcg3[mm/s2] | Vcg4[mm/s2] | Vcg8[mm/s2] | Vcg9[mm/s2] |
|-------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 90.0 | 21.636 | 62.748 | 22.559 | 109.870 | 66.531 |
| 95.0 | 21.636 | 62.627 | 22.139 | 109.851 | 65.571 |
| 100.0 | 21.636 | 62.275 | 21.671 | 108.881 | 64.307 |
| 105.0 | 21.636 | 61.724 | 21.169 | 107.099 | 62.829 |
| 110.0 | 21.636 | 61.004 | 20.646 | 104.651 | 61.220 |
| 115.0 | 21.636 | 60.140 | 20.111 | 101.676 | 59.544 |
| 120.0 | 21.636 | 59.156 | 19.571 | 98.297 | 57.854 |
| 125.0 | 21.636 | 58.072 | 19.035 | 94.620 | 56.186 |
| 130.0 | 21.636 | 56.906 | 18.507 | 90.731 | 54.564 |
| 135.0 | 21.636 | 55.670 | 17.989 | 86.700 | 53.005 |
| 140.0 | 21.636 | 54.379 | 17.486 | 82.577 | 51.517 |
| 145.0 | 21.636 | 53.039 | 16.997 | 78.399 | 50.102 |
| 150.0 | 21.636 | 51.658 | 16.521 | 74.187 | 48.759 |
| 155.0 | 21.636 | 50.239 | 16.057 | 69.948 | 47.483 |
| 160.0 | 21.636 | 48.784 | 15.599 | 65.673 | 46.267 |
| 165.0 | 21.636 | 47.289 | 15.136 | 61.327 | 45.102 |
| 170.0 | 21.636 | 45.749 | 14.651 | 56.824 | 43.975 |



| | | | | | |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 175.0 | 21.636 | 44.157 | 14.103 | 51.934 | 42.868 |
| 180.0 | 21.636 | 42.517 | 13.397 | 45.761 | 41.754 |

Fuente propia

Tabla 4.14 Aceleraciones de Cg de los eslabones [mm/s²].

| T2° | [mm/s ²] | | | | | | | | | |
|--------|----------------------|---------|--------|---------|--------|---------|---------|----------|--------|---------|
| | Acg2x | Acg2y | Ag3x | Acg3y | Acg4x | Acg4y | Acg8x | Acg8y | Acg9x | Acg9y |
| 90.00 | -1.656 | -16.912 | 5.452 | -67.716 | 8.801 | -19.424 | 3.820 | -160.635 | 13.660 | -74.196 |
| 95.00 | -0.176 | -16.992 | 15.767 | -66.283 | 10.932 | -17.518 | 39.142 | -157.399 | 25.394 | -69.020 |
| 100.00 | 1.306 | -16.942 | 25.347 | -62.916 | 12.582 | -15.412 | 71.185 | -144.618 | 34.790 | -61.770 |
| 105.00 | 2.777 | -16.764 | 33.873 | -57.952 | 13.771 | -13.219 | 97.552 | -124.495 | 41.723 | -53.412 |
| 110.00 | 4.228 | -16.458 | 41.141 | -51.748 | 14.540 | -11.031 | 116.972 | -99.593 | 46.376 | -44.731 |
| 115.00 | 5.646 | -16.027 | 47.040 | -44.652 | 14.942 | -8.918 | 129.155 | -72.366 | 49.100 | -36.280 |
| 120.00 | 7.022 | -15.474 | 51.544 | -36.985 | 15.034 | -6.931 | 134.532 | -44.876 | 50.297 | -28.394 |
| 125.00 | 8.343 | -14.803 | 54.686 | -29.027 | 14.872 | -5.102 | 133.967 | -18.684 | 50.352 | -21.235 |
| 130.00 | 9.602 | -14.020 | 56.546 | -21.018 | 14.513 | -3.446 | 128.529 | 5.151 | 49.591 | -14.848 |
| 135.00 | 10.787 | -13.130 | 57.232 | -13.147 | 14.003 | -1.968 | 119.318 | 26.007 | 48.270 | -9.201 |
| 140.00 | 11.891 | -12.139 | 56.876 | -5.559 | 13.385 | -0.661 | 107.364 | 43.611 | 46.584 | -4.221 |
| 145.00 | 12.903 | -11.057 | 55.618 | 1.645 | 12.692 | 0.489 | 93.565 | 57.959 | 44.667 | 0.179 |
| 150.00 | 13.818 | -9.890 | 53.607 | 8.407 | 11.950 | 1.503 | 78.661 | 69.251 | 42.611 | 4.091 |
| 155.00 | 14.627 | -8.648 | 50.998 | 14.717 | 11.174 | 2.410 | 63.220 | 77.860 | 40.473 | 7.603 |
| 160.00 | 15.325 | -7.341 | 47.964 | 20.628 | 10.371 | 3.249 | 47.613 | 84.349 | 38.284 | 10.797 |
| 165.00 | 15.907 | -5.977 | 44.719 | 26.291 | 9.530 | 4.085 | 31.930 | 89.607 | 36.037 | 13.750 |
| 170.00 | 16.367 | -4.568 | 41.591 | 32.063 | 8.614 | 5.033 | 15.656 | 95.320 | 33.624 | 16.513 |
| 175.00 | 16.703 | -3.124 | 39.255 | 38.843 | 7.515 | 6.360 | -3.931 | 105.918 | 30.434 | 18.954 |
| 180.00 | 16.912 | -1.656 | 39.719 | 49.437 | 5.900 | 8.892 | -45.467 | 142.379 | 21.061 | 18.831 |

Fuente propia

Tabla 4.15 Aceleraciones de Cg de los eslabones [mm/s²].

| T2° | [mm/s ²] | | | | |
|--------|----------------------|--------|--------|---------|--------|
| | Acg2 | Acg3 | Acg4 | Acg8 | Acg9 |
| 90.00 | 16.993 | 67.935 | 21.325 | 160.681 | 75.442 |
| 95.00 | 16.993 | 68.133 | 20.649 | 162.193 | 73.543 |
| 100.00 | 16.993 | 67.830 | 19.896 | 161.188 | 70.893 |
| 105.00 | 16.993 | 67.126 | 19.089 | 158.162 | 67.776 |
| 110.00 | 16.993 | 66.109 | 18.251 | 153.627 | 64.433 |
| 115.00 | 16.993 | 64.858 | 17.401 | 148.047 | 61.049 |
| 120.00 | 16.993 | 63.440 | 16.555 | 141.819 | 57.758 |
| 125.00 | 16.993 | 61.913 | 15.723 | 135.264 | 54.647 |
| 130.00 | 16.993 | 60.325 | 14.916 | 128.632 | 51.766 |
| 135.00 | 16.993 | 58.723 | 14.141 | 122.119 | 49.139 |
| 140.00 | 16.993 | 57.147 | 13.401 | 115.883 | 46.775 |
| 145.00 | 16.993 | 55.642 | 12.702 | 110.062 | 44.667 |
| 150.00 | 16.993 | 54.262 | 12.044 | 104.801 | 42.807 |
| 155.00 | 16.993 | 53.079 | 11.431 | 100.294 | 41.181 |



| | | | | | |
|--------|--------|--------|--------|---------|--------|
| 160.00 | 16.993 | 52.212 | 10.868 | 96.860 | 39.778 |
| 165.00 | 16.993 | 51.875 | 10.369 | 95.126 | 38.571 |
| 170.00 | 16.993 | 52.515 | 9.976 | 96.597 | 37.460 |
| 175.00 | 16.993 | 55.224 | 9.845 | 105.991 | 35.853 |
| 180.00 | 16.993 | 63.416 | 10.672 | 149.462 | 28.252 |

Fuente propia

4.1.2 Cinética del mecanismo. Análisis cinético del mecanismo.

Una vez calculada la cinemática del mecanismo es conveniente una solución cinética, para determinar las fuerzas y pares torsionales del mecanismo.

4.1.2.1 Análisis de fuerzas dinámicas.

Para calcular las fuerzas implícitas, se hizo uso de la segunda ley de Newton en su forma lineal y rotacional, Estas se describe como: Cualquier cambio del movimiento implica una aceleración.

$$\sum F = m \cdot a \quad (4.64-a)$$

$$\sum T = I_G \cdot \alpha \quad (4.64-b)$$

Para fines prácticos se separaron las fuerzas en función de los ejes X,Y, todos los pares torsionales del sistema estarán en dirección Z.

$$\sum F_x = m \cdot a_x \quad (4.65.a)$$

$$\sum F_y = m \cdot a_y \quad (4.65.b)$$

$$\sum T = I_G \cdot \alpha \quad (4.65.c)$$

Estas tres ecuaciones (3.66) describen el movimiento para cada cuerpo del sistema (no consideramos la fuerzas gravitacionales).

Como primer punto fue útil hacer un Diagrama conceptual del mecanismo (Figura 4.31).

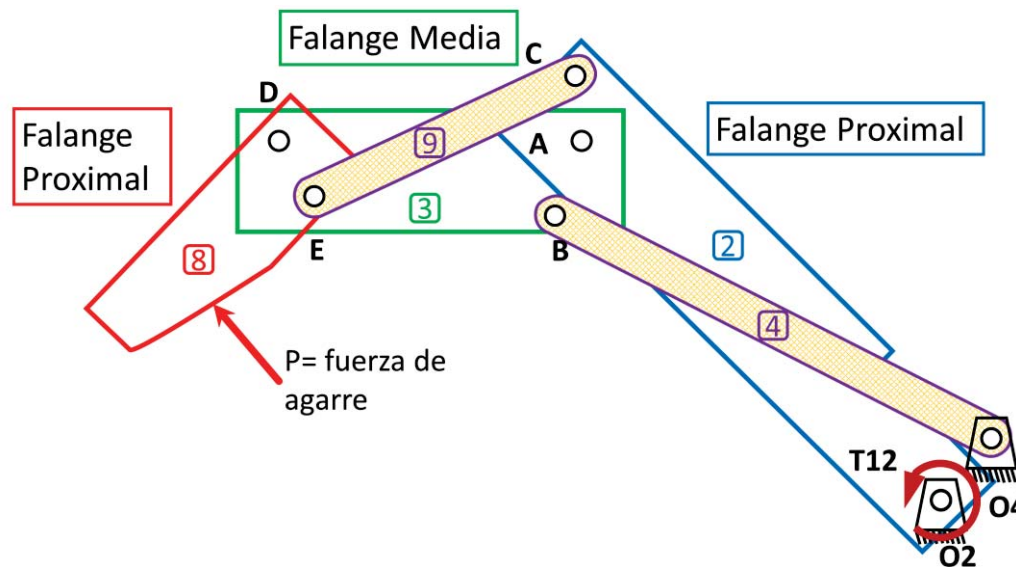


Figura 4.31 Mecanismo del dedo índice.
Fuente propia.

En las especificaciones de diseño, se estableció como requisito que el sistema tenga una fuerza de agarre de 6N, esta fuerza será dada por un actuador ubicado en O2 en forma de par torsor que será una de la incógnitas, las fuerzas resultantes de la fuerza de agarre P se ubican en las juntas (pasadores) O2, O4, A, B, C, D, E, y cambiarán según esta fuerza aumente o disminuya, el estudio se hará con una fuerza constante de 6N ya que esta representa la fuerza máxima de agarre del prototipo, también se considerará hacer el análisis para todo el movimiento del dedo es decir cuando T2 va desde 90° a 180° .

Para hacer el D.G.L. del mecanismo Figura 4.32 se tuvo ciertas consideraciones:

- Cada uno de los eslabones del mecanismo tiene un sistema de coordenadas no rotativas localizadas en su C.G.
- Las fuerzas aplicadas en cada eslabón están en función al sistema de coordenadas del eslabón correspondiente.
- Existe un par torsor T12.
- La fuerza de reacción por agarre $P=6\text{N}$ es siempre en la misma dirección, es decir será siempre perpendicular al eslabón 8.

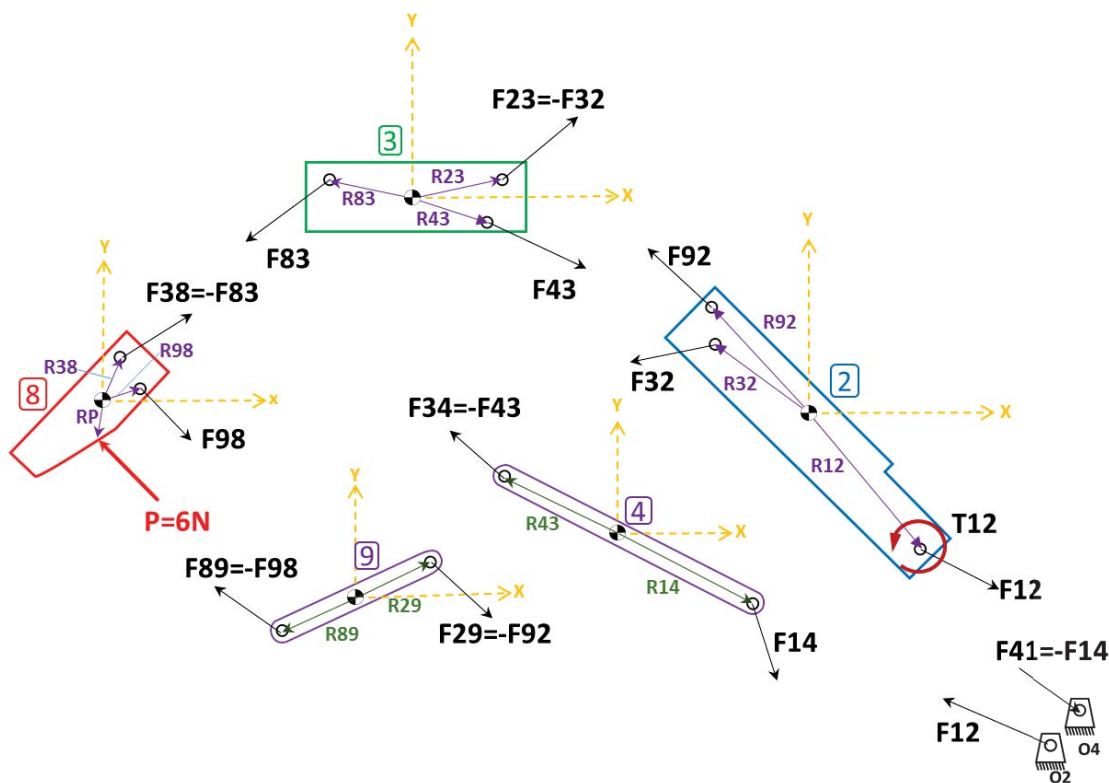


Figura 4.32 D. C.L. Mecanismo.
Fuente propia.

Una vez definidos las fuerzas resultantes de las cargas los eslabones, se usó las ecuaciones (4.65.a), (4.65.b) y (4.65.c) para definir las relaciones de fuerza, en cada uno de los eslabones del mecanismo.

Eslabón 2.

$$F_{12x} + F_{32x} + F_{92x} = m_2 * (acg)_{2x} \tag{4.66-a}$$

$$F_{12y} + F_{32y} + F_{92y} = m_2 * (acg)_{2y} \tag{4.66-b}$$

$$T_{12} + (R_{12x} * F_{12y} - R_{12y} * F_{12x}) + (R_{32x} * F_{32y} - R_{32y} * F_{32x}) + (R_{92x} * F_{92y} - R_{92y} * F_{92x}) = I_{G2} * \alpha_2. \tag{4.66-c}$$

Eslabón 3.

$$F_{43x} - F_{32x} + F_{83x} = m_3 * (acg)_{3x} \tag{4.67-a}$$

$$F_{43y} - F_{32y} + F_{83y} = m_3 * (acg)_{3y} \tag{4.67-b}$$



$$(R43x * F43y - R43y * F43x) - (R23x * F32y - R23y * F32x) + (R83x * F83y - R83y * F83x) = I_{G3} * \alpha_3. \quad (4.67-c)$$

Eslabón 4.

$$F14x - F43x = m_4 * (acg)_{4x} \quad (4.68-a)$$

$$F14y - F43y = m_4 * (acg)_{4y} \quad (4.68-b)$$

$$(R14x * F14y - R14y * F14x) - (R34x * F43y - R34y * F43x) = I_{G4} * \alpha_4. \quad (4.68-c)$$

Eslabón 8.

$$-F83x + F98x + Px = m_8 * (acg)_{8x} \quad (4.69-a)$$

$$-F83y + F98y + Py = m_8 * (acg)_{8y} \quad (4.69-b)$$

$$-(R38x * F83y - R38y * F83x) + (R98x * F98y - R98y * F98x) + (Rpx * Py - Rpy * Px) = I_{G8} * \alpha_8. \quad (4.70-c)$$

Eslabón 9.

$$-F92x - F98x = m_9 * (acg)_{9x} \quad (4.70-a)$$

$$-F92y - F98y = m_9 * (acg)_{9y} \quad (4.70-b)$$

$$-(R29x * F92y - R29y * F92x) - (R89x * F98y - R89y * F98x) = I_{G9} * \alpha_9. \quad (4.70-c)$$

Donde:

Fx = Fuerza en dirección x.

Fy = Fuerza en dirección y.

m_n = Masa del eslabón n.

$(acg)_n$ = Aceleración lineal del eslabón n.

I_{cg} = Segundo momento de Inercia eslabón n.

α_9 = Aceleración angular.



Para estas 15 ecuaciones ((3.67),(3.68),(3.69),(3.70),(3.71)). Existen 15 incógnitas: $F_{12x}, F_{12y}, F_{32x}, F_{32y}, F_{43x}, F_{43y}, F_{14x}, F_{14y}, F_{83x}, F_{83y}, F_{98x}, F_{92x}, F_{92y}, T_{12}$, que se resolvieron simultáneamente, se reordenan, poniendo los términos constantes a la derecha y luego de forma matricial según (4.71).

$$\begin{bmatrix}
 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\
 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\
 -R_{12y} & R_{12x} & -R_{32y} & R_{32x} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -R_{29y} & R_{92x} & 1 \\
 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & R_{23x} & R_{23x} & -R_{43y} & R_{43x} & 0 & 0 & -R_{83y} & R_{83x} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & R_{34y} & -R_{34x} & -R_{14y} & R_{14x} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_{38y} & -R_{38x} & -R_{98y} & R_{98x} & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_{89t} & -R_{89x} & R_{29y} & R_{29x} & 0
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 F_{12x} \\
 F_{12y} \\
 F_{32x} \\
 F_{32y} \\
 F_{43x} \\
 F_{43y} \\
 F_{14x} \\
 F_{14y} \\
 F_{83x} \\
 F_{83y} \\
 F_{98x} \\
 F_{98y} \\
 F_{92x} \\
 F_{92y} \\
 T_{12}
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 m_2 * (acg)_{2x} \\
 m_2 * (acg)_{2y} \\
 I_{G2} * \alpha_2 \\
 m_3 * (acg)_{3x} \\
 m_3 * (acg)_{3y} \\
 I_{G3} * \alpha_3 \\
 m_4 * (acg)_{4x} \\
 m_4 * (acg)_{4y} \\
 I_{G4} * \alpha_4 \\
 m_8 * (acg)_{8x} - Px \\
 m_8 * (acg)_{8y} - Py \\
 I_{G8} * \alpha_8 - (Rpx * Py - Rpy * Px) \\
 F_{98y}m_9 * (acg)_{9x} \\
 F_{92x}m_2 * (acg)_{2y} \\
 I_{G9} * \alpha_9
 \end{bmatrix}
 \tag{4.71}$$

Este sistema de matrices se resolvió usando el software MATLAB®R2013b, las Tablas (4.16),(4.17),(4.18),(4.19),(4.20) muestran el resultado de las fuerzas en el mecanismo y el par torsos al resolver el sistema matricial de la ecuación (4.71), en función T2.



Tabla 4.16 Fuerzas aplicadas en eslabón 2 (Newton).

| θ_2 | f12[N] | f32[N] | f92[N] | f12x[N] | f12y[N] | f32x[N] | f32y[N] | f92x[N] | f92y[N] | T2 par [N-mm] |
|------------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------------|
| 90 | 48.65 | 59.72 | 11.07 | -17.99 | 45.20 | 22.05 | -55.50 | -4.06 | 10.30 | 838.10 |
| 95 | 45.58 | 56.16 | 10.60 | -21.59 | 40.15 | 27.30 | -49.08 | -5.72 | 8.93 | 822.20 |
| 100 | 42.49 | 52.59 | 10.20 | -24.13 | 34.98 | 31.17 | -42.36 | -7.04 | 7.38 | 791.64 |
| 105 | 39.45 | 49.08 | 9.86 | -25.69 | 29.93 | 33.72 | -35.66 | -8.03 | 5.73 | 748.38 |
| 110 | 36.52 | 45.71 | 9.60 | -26.41 | 25.22 | 35.12 | -29.27 | -8.71 | 4.04 | 694.74 |
| 115 | 33.77 | 42.54 | 9.41 | -26.45 | 21.00 | 35.56 | -23.35 | -9.11 | 2.35 | 633.20 |
| 120 | 31.24 | 39.59 | 9.28 | -26.00 | 17.33 | 35.25 | -18.03 | -9.25 | 0.00 | 566.15 |
| 125 | 28.98 | 36.91 | 9.22 | -25.23 | 14.26 | 34.41 | -13.37 | -9.18 | 0.00 | 495.81 |
| 130 | 27.03 | 34.52 | 9.23 | -24.33 | 11.78 | 33.23 | -9.35 | -8.90 | -2.43 | 424.12 |
| 135 | 25.41 | 32.43 | 9.31 | -23.43 | 9.83 | 31.88 | -5.94 | -8.46 | -3.89 | 352.73 |
| 140 | 24.15 | 30.67 | 9.47 | -22.66 | 8.34 | 30.51 | -3.06 | -7.85 | -5.29 | 283.00 |
| 145 | 23.28 | 29.24 | 9.71 | -22.13 | 7.23 | 29.23 | 0.00 | -7.10 | -6.63 | 216.09 |
| 150 | 22.83 | 28.17 | 10.06 | -21.92 | 6.38 | 28.13 | 1.53 | -6.21 | -7.92 | 152.94 |
| 155 | 22.82 | 27.49 | 10.55 | -22.10 | 5.70 | 27.26 | 3.49 | -5.17 | -9.19 | 94.39 |
| 160 | 23.29 | 27.25 | 11.22 | -22.73 | 5.06 | 26.70 | 5.43 | -3.97 | -10.49 | 41.33 |
| 165 | 24.30 | 27.54 | 12.17 | -23.91 | 4.34 | 26.48 | 7.55 | -2.57 | -11.90 | -5.00 |
| 170 | 26.04 | 28.58 | 13.61 | -25.82 | 3.40 | 26.71 | 10.18 | 0.00 | -13.58 | -42.04 |
| 175 | 28.99 | 30.96 | 16.04 | -28.92 | 2.00 | 27.62 | 13.99 | 1.30 | -15.99 | -60.21 |
| 180 | 35.18 | 37.14 | 21.46 | -35.17 | 0.00 | 30.35 | 21.41 | 4.82 | -20.91 | 838.10 |

Fuente: propia

Tabla 4.17 Fuerzas aplicadas en eslabón 3 (Newton).

| θ_2° | f23[N] | f43[N] | f83[N] | f23x[N] | f23y[N] | f43x[N] | f43y[N] | f83x[N] | f83y[N] |
|------------------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 90.00 | 59.72 | 46.77 | 14.39 | -22.05 | 55.50 | 11.99 | -45.20 | 10.06 | -10.30 |
| 95.00 | 56.16 | 44.60 | 13.66 | -27.30 | 49.08 | 15.79 | -41.71 | 11.51 | -7.36 |
| 100.00 | 52.59 | 42.47 | 12.96 | -31.17 | 42.36 | 18.95 | -38.01 | 12.21 | -4.35 |
| 105.00 | 49.08 | 40.42 | 12.30 | -33.72 | 35.66 | 21.50 | -34.23 | 12.22 | -1.44 |
| 110.00 | 45.71 | 38.48 | 11.68 | -35.12 | 29.27 | 23.50 | -30.47 | 11.62 | 1.21 |
| 115.00 | 42.54 | 36.67 | 11.11 | -35.56 | 23.35 | 25.01 | -26.82 | 10.55 | 3.47 |
| 120.00 | 39.59 | 35.01 | 10.57 | -35.25 | 18.03 | 26.11 | -23.33 | 9.14 | 5.30 |
| 125.00 | 36.91 | 33.52 | 10.06 | -34.41 | 13.37 | 26.87 | -20.03 | 7.54 | 6.67 |
| 130.00 | 34.52 | 32.19 | 9.59 | -33.23 | 9.35 | 27.37 | -16.95 | 5.86 | 7.60 |
| 135.00 | 32.43 | 31.04 | 9.16 | -31.88 | 5.94 | 27.67 | -14.08 | 4.22 | 8.14 |
| 140.00 | 30.67 | 30.07 | 8.78 | -30.51 | 3.06 | 27.82 | -11.41 | 2.69 | 8.35 |
| 145.00 | 29.24 | 29.28 | 8.44 | -29.23 | 0.00 | 27.88 | -8.93 | 1.35 | 8.33 |
| 150.00 | 28.17 | 28.69 | 8.16 | -28.13 | -1.53 | 27.92 | -6.63 | 0.00 | 8.16 |
| 155.00 | 27.49 | 28.32 | 7.99 | -27.26 | -3.49 | 27.97 | -4.46 | 0.00 | 7.96 |
| 160.00 | 27.25 | 28.22 | 7.97 | -26.70 | -5.43 | 28.12 | -2.41 | -1.42 | 7.85 |
| 165.00 | 27.54 | 28.46 | 8.22 | -26.48 | -7.55 | 28.46 | 0.00 | -1.98 | 7.98 |
| 170.00 | 28.58 | 29.24 | 8.97 | -26.71 | -10.18 | 29.20 | 1.56 | -2.49 | 8.62 |



| | | | | | | | | | |
|--------|-------|-------|-------|--------|--------|-------|------|-------|-------|
| 175.00 | 30.96 | 31.02 | 10.77 | -27.62 | -13.99 | 30.80 | 3.69 | -3.19 | 10.29 |
| 180.00 | 37.14 | 35.80 | 15.68 | -30.35 | -21.41 | 35.21 | 6.50 | -4.86 | 14.91 |

Fuente: propia

Tabla 4.18 Fuerzas aplicadas en eslabón 4 (Newton).

| θ° | f14[N] | f34[N] | f14x[N] | f14y[N] | f34x[N] | f34y[N] |
|------------------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|
| 90.00 | 46.77 | 46.77 | 11.99 | -45.20 | -11.99 | 45.20 |
| 95.00 | 44.60 | 44.60 | 15.79 | -41.71 | -15.79 | 41.71 |
| 100.00 | 42.47 | 42.47 | 18.95 | -38.01 | -18.95 | 38.01 |
| 105.00 | 40.42 | 40.42 | 21.50 | -34.23 | -21.50 | 34.23 |
| 110.00 | 38.48 | 38.48 | 23.50 | -30.47 | -23.50 | 30.47 |
| 115.00 | 36.67 | 36.67 | 25.01 | -26.82 | -25.01 | 26.82 |
| 120.00 | 35.01 | 35.01 | 26.11 | -23.33 | -26.11 | 23.33 |
| 125.00 | 33.52 | 33.52 | 26.87 | -20.03 | -26.87 | 20.03 |
| 130.00 | 32.19 | 32.19 | 27.37 | -16.95 | -27.37 | 16.95 |
| 135.00 | 31.04 | 31.04 | 27.67 | -14.08 | -27.67 | 14.08 |
| 140.00 | 30.07 | 30.07 | 27.82 | -11.41 | -27.82 | 11.41 |
| 145.00 | 29.28 | 29.28 | 27.88 | -8.93 | -27.88 | 8.93 |
| 150.00 | 28.69 | 28.69 | 27.92 | -6.63 | -27.92 | 6.63 |
| 155.00 | 28.32 | 28.32 | 27.97 | -4.46 | -27.97 | 4.46 |
| 160.00 | 28.22 | 28.22 | 28.12 | -2.41 | -28.12 | 2.41 |
| 165.00 | 28.47 | 28.46 | 28.46 | 0.00 | -28.46 | 0.00 |
| 170.00 | 29.24 | 29.24 | 29.20 | 1.56 | -29.20 | -1.56 |
| 175.00 | 31.02 | 31.02 | 30.80 | 3.69 | -30.80 | -3.69 |
| 180.00 | 35.80 | 35.80 | 35.21 | 6.50 | -35.21 | -6.50 |

Fuente: propia

Tabla 4.19 Fuerzas aplicadas en eslabón 8 (Newton)

| θ° | f38[N] | f98[N] | P[N] | f38x[N] | f38y[N] | f98x[N] | f98y[N] | Px[N] | Py[N] |
|------------------|--------|--------|------|---------|---------|---------|---------|-------|-------|
| 90.00 | 14.39 | 11.07 | 6.00 | -10.06 | 10.30 | 4.06 | -10.30 | 6.00 | 0.00 |
| 95.00 | 13.66 | 10.60 | 6.00 | -11.51 | 7.36 | 5.72 | -8.93 | 5.79 | 1.57 |
| 100.00 | 12.96 | 10.20 | 6.00 | -12.21 | 4.35 | 7.04 | -7.38 | 5.18 | 3.04 |
| 105.00 | 12.30 | 9.86 | 6.00 | -12.22 | 1.44 | 8.03 | -5.73 | 4.19 | 4.29 |
| 110.00 | 11.68 | 9.60 | 6.00 | -11.62 | -1.21 | 8.71 | -4.04 | 2.91 | 5.25 |
| 115.00 | 11.11 | 9.41 | 6.00 | -10.55 | -3.47 | 9.11 | -2.35 | 1.44 | 5.82 |
| 120.00 | 10.57 | 9.28 | 6.00 | -9.14 | -5.30 | 9.25 | 0.00 | 0.00 | 6.00 |
| 125.00 | 10.06 | 9.22 | 6.00 | -7.54 | -6.67 | 9.18 | 0.00 | -1.64 | 5.77 |
| 130.00 | 9.59 | 9.23 | 6.00 | -5.86 | -7.60 | 8.90 | 2.43 | -3.05 | 5.17 |
| 135.00 | 9.16 | 9.31 | 6.00 | -4.22 | -8.14 | 8.46 | 3.89 | -4.24 | 4.25 |
| 140.00 | 8.78 | 9.47 | 6.00 | -2.69 | -8.35 | 7.85 | 5.29 | -5.16 | 3.06 |
| 145.00 | 8.44 | 9.71 | 6.00 | -1.35 | -8.33 | 7.10 | 6.63 | -5.75 | 1.70 |
| 150.00 | 8.16 | 10.06 | 6.00 | 0.00 | -8.16 | 6.21 | 7.92 | -6.00 | 0.00 |
| 155.00 | 7.99 | 10.55 | 6.00 | 0.00 | -7.96 | 5.17 | 9.19 | -5.87 | -1.23 |
| 160.00 | 7.97 | 11.22 | 6.00 | 1.42 | -7.85 | 3.97 | 10.49 | -5.39 | -2.65 |



| | | | | | | | | | |
|--------|-------|-------|------|------|--------|-------|-------|-------|-------|
| 165.00 | 8.22 | 12.17 | 6.00 | 1.98 | -7.98 | 2.57 | 11.90 | -4.55 | -3.91 |
| 170.00 | 8.97 | 13.61 | 6.00 | 2.49 | -8.62 | 0.00 | 13.58 | -3.38 | -4.96 |
| 175.00 | 10.77 | 16.04 | 6.00 | 3.19 | -10.29 | -1.30 | 15.99 | -1.88 | -5.70 |
| 180.00 | 15.68 | 21.46 | 6.00 | 4.86 | -14.91 | -4.82 | 20.91 | 0.00 | -6.00 |

Fuente: propia

Tabla 4.20 Fuerzas aplicadas en eslabón 9 (Newton).

| θ° | f98[N] | f29[N] | f89x[N] | f89y[N] | f29x[N] | f29y[N] |
|------------------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|
| 90.00 | 11.07 | 11.07 | -4.06 | 10.30 | 4.06 | -10.30 |
| 95.00 | 10.60 | 10.60 | -5.72 | 8.93 | 5.72 | -8.93 |
| 100.00 | 10.20 | 10.20 | -7.04 | 7.38 | 7.04 | -7.38 |
| 105.00 | 9.86 | 9.86 | -8.03 | 5.73 | 8.03 | -5.73 |
| 110.00 | 9.60 | 9.60 | -8.71 | 4.04 | 8.71 | -4.04 |
| 115.00 | 9.41 | 9.41 | -9.11 | 2.35 | 9.11 | -2.35 |
| 120.00 | 9.28 | 9.28 | -9.25 | 0.00 | 9.25 | 0.00 |
| 125.00 | 9.22 | 9.22 | -9.18 | 0.00 | 9.18 | 0.00 |
| 130.00 | 9.23 | 9.23 | -8.90 | -2.43 | 8.90 | 2.43 |
| 135.00 | 9.31 | 9.31 | -8.46 | -3.89 | 8.46 | 3.89 |
| 140.00 | 9.47 | 9.47 | -7.85 | -5.29 | 7.85 | 5.29 |
| 145.00 | 9.71 | 9.71 | -7.10 | -6.63 | 7.10 | 6.63 |
| 150.00 | 10.06 | 10.06 | -6.21 | -7.92 | 6.21 | 7.92 |
| 155.00 | 10.55 | 10.55 | -5.17 | -9.19 | 5.17 | 9.19 |
| 160.00 | 11.22 | 11.22 | -3.97 | -10.49 | 3.97 | 10.49 |
| 165.00 | 12.17 | 12.17 | -2.57 | -11.90 | 2.57 | 11.90 |
| 170.00 | 13.61 | 13.61 | 0.00 | -13.58 | 0.00 | 13.58 |
| 175.00 | 16.04 | 16.04 | 1.30 | -15.99 | -1.30 | 15.99 |
| 180.00 | 21.46 | 21.46 | 4.82 | -20.91 | -4.82 | 20.91 |

Fuente: propia



Estas fuerzas son graficadas, en la Figura 4.33 se puede ver la variación de la fuerzas absolutas en función a T2 (θ_2). El par torsos o Momento requerido que genero estas fuerzas se puede ver en la Figura. 4.34.

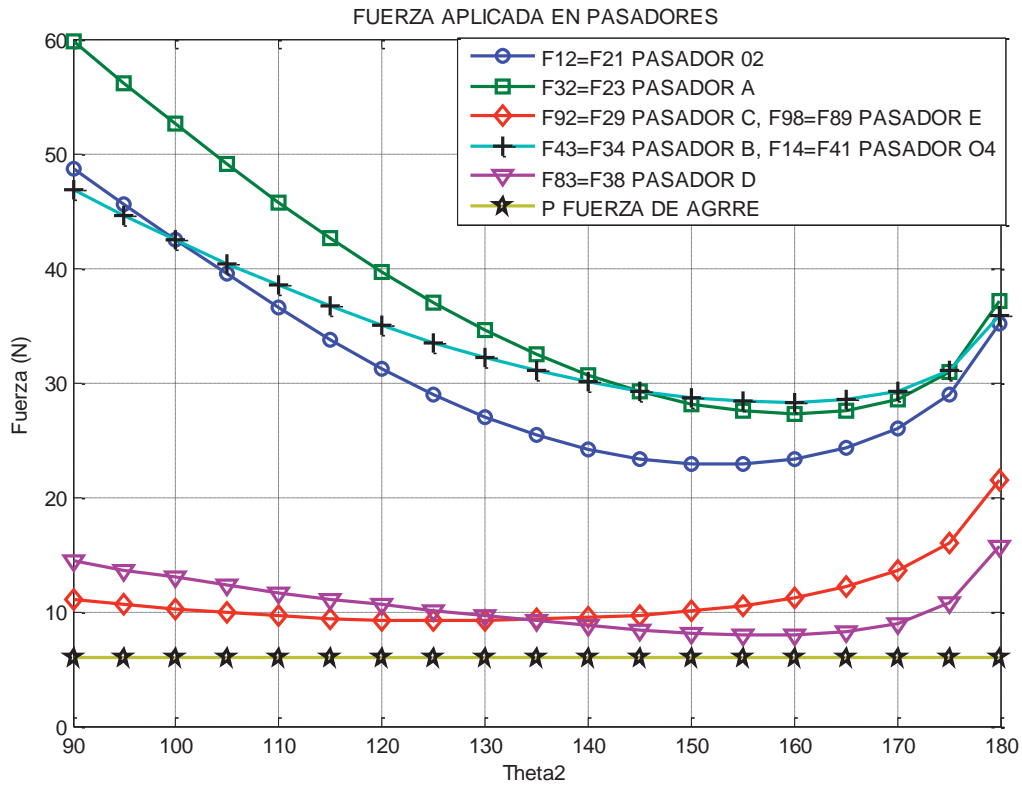


Figura 4.33 Fuerza en pasadores del mecanismo.
Fuente propia.

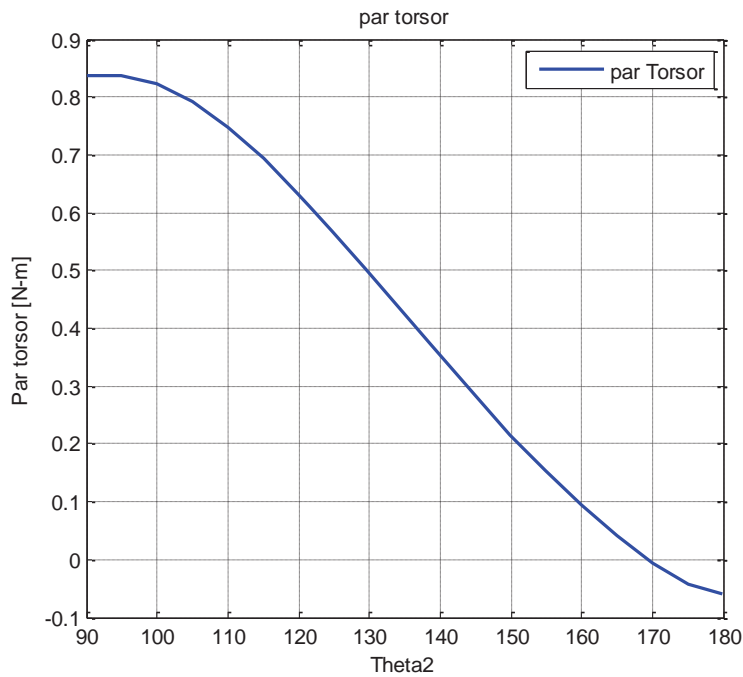


Figura 4.34 Par torsor en 2.
Fuente propia.

Según estos resultados, será necesario un actuador ubicado en O2 que dé el *Torque mínimo 838.10 [N-mm]* en el portador falange proximal (eslabón 2) para poder efectuar el movimiento de agarre máximo.

Para validar los datos obtenidos, se hizo uso del módulo de simulación dinámica del software Autodesk Inventor 2015, primero se modeló el mecanismo y se dio una rotación angular ($\omega_2 = 0.7854 \text{ rad/s}$), y una fuerza en agarre de 6N constante en todo el recorrido (Figura 4.35).

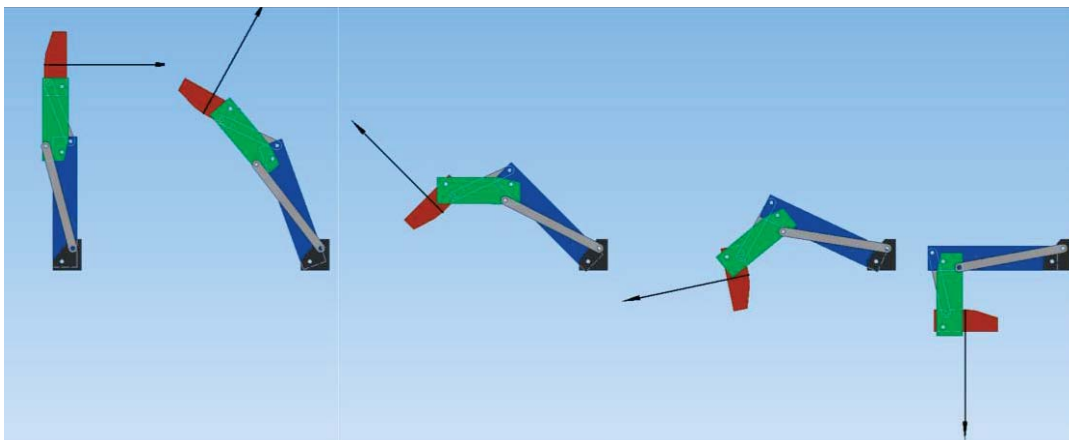


Figura 4.35 Mecanismos Modelado en Autodesk Inventor 2015.
Fuente: propia.



Luego se obtuvo las gráficas de los fuerzas absolutas en las juntas del mecanismo y el par torsor en el portador o falange distal, estos son los mismos resultados obtenidos en MATLAB®R2013b, se puede ver los resultados de fuerza en la Figura. 4.36 y el torque requerido en Figura. 4.37.

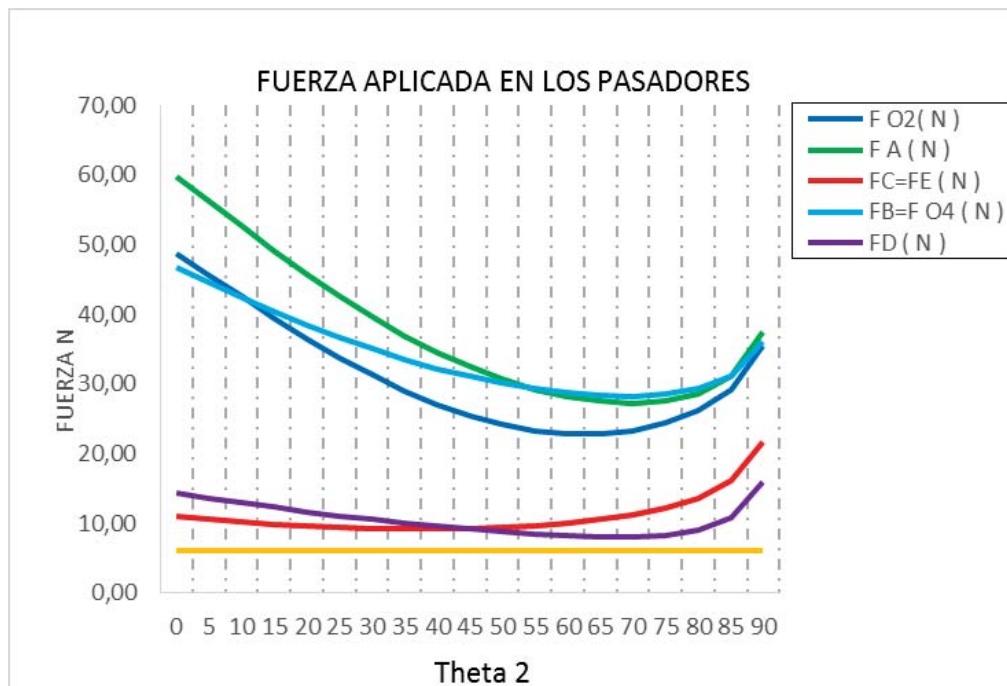


Figura 4.36 Fuerzas en el mecanismo simulación Autodesk Inventor 2015.
Fuente: Propia.

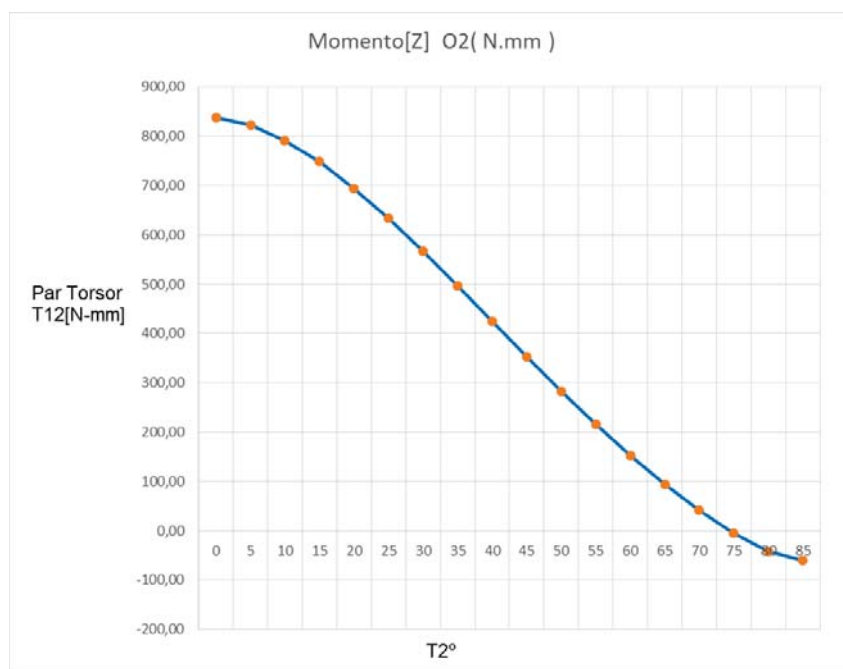


Figura 4.37 Par torsor en el Eslabón 2 del mecanismo simulado en Autodesk Inventor 2015.
Fuente: Propia.



Las fuerzas máximas se dan al inicio del recorrido es decir cuando $\theta_2 = 90^\circ$, y será este el instante en donde haremos el diseño de los pasadores y el diseño por resistencia de los eslabones del mecanismo.

La distribución de fuerzas máximas en el instante $\theta_2 = 90^\circ$ Se puede apreciar en la Figura. 4.38.

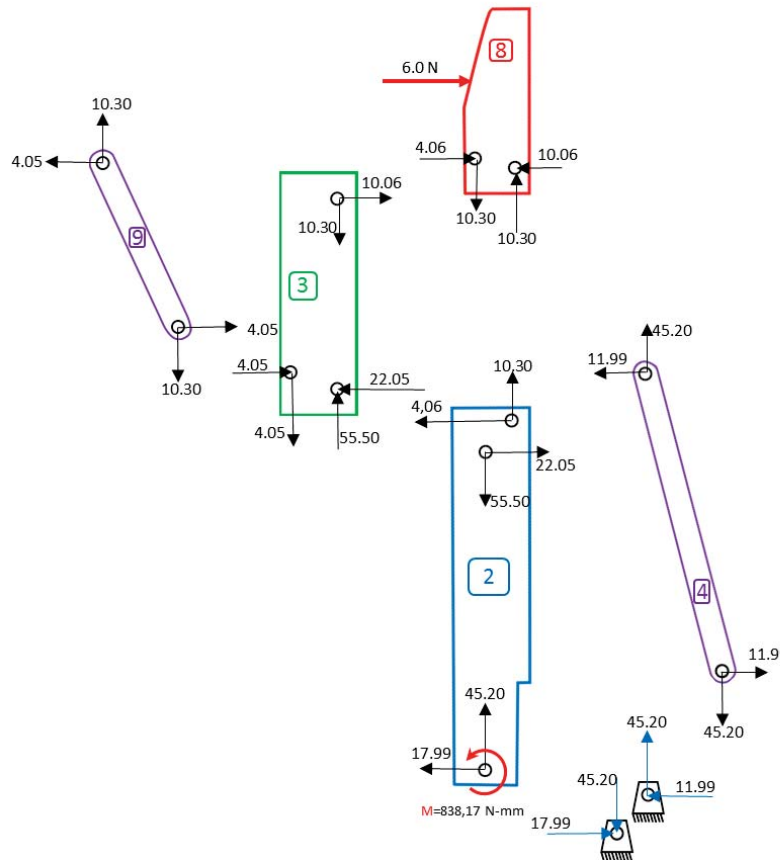


Figura 4.38 DCL Fuerzas máximas [Newton] en el mecanismo para $T_2=90^\circ$.
Fuente propia.

4.1.2.2 Cálculo y selección de pasadores.

Se usó pasadores cilíndricos de la marca OPAC Figura 4.39, con una tolerancia $m6$, estos pasadores se construyen según la norma DIN 7 (APÉNDICE B) El material usado en su construcción es DIN 9SMnpob28k (AISE/SAE 1213), que es un acero al azufre más plomo, de fácil mecanizado idóneo para la fabricación de piezas en grandes series a altas velocidades por su alta maquinabilidad (OPAC, 2016) las propiedades mecánicas para este tipo de acero se ven en la tabla 4.21.

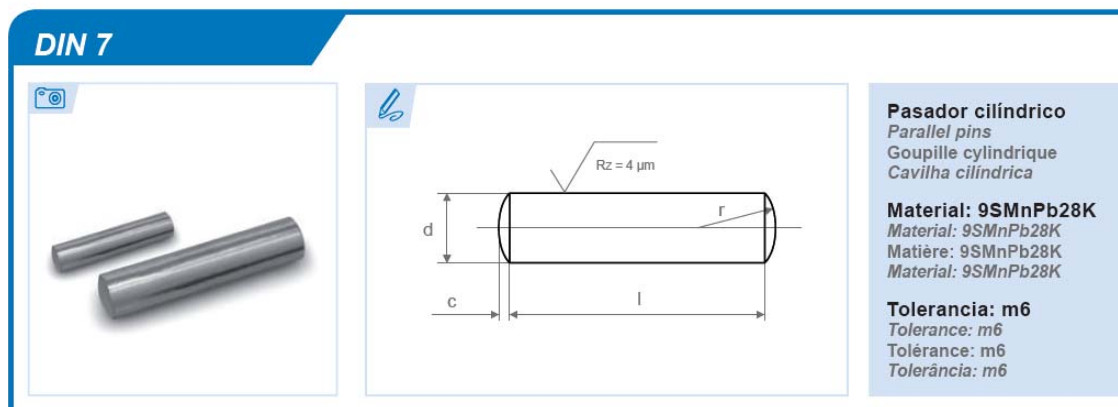


Figura 4.39 Pasador cilíndrico DIN 7.
Fuente: OPAC.

Tabla 4.21 Propiedades Mecánicas acero seccionado para los pasadores.

| Mechanical properties / Mechanische Eigenschaften / Caracteristiques mechaniques of grade SAE 1213 | | | | | |
|---|---------------------------|------------------------|---------------------|---|------------------------------|
| Yield $R_{p0.2}$ (MPa) | Tensile R_m (MPa) | Impact KV/Ku (J) | Elongation A (%) | Reduction in cross section on fracture Z (%) | Brinell hardness (HBW) |
| 535 (≥) | 524 (≥) | 12 | 41 | 44 | 141 |

Fuente: (Grades, 2016)

El esfuerzo de fluencia es $S_y = 535 \text{ N/mm}^2$. Según la teoría de esfuerzo cortante máximo del libro Diseño en Ingeniería Mecánica de Shyglyy (Shyglyy & Budynas, 2008, pág. 211). Se define a la resistencia por fluencia en cortante como $S_{s_y} = 0.5 * S_y$.

$$S_y = 535 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{Normal})$$

$$S_{s_y} = 267.5 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{Cortante})$$

Bajo estas consideraciones se procedió a generar a graficar los D.C.L. de cada pasador

- Pasador O2.

Es la junta ubicada en O2 que une la base del mecanismo (tierra) con la falange proximal como se muestra en la Figura. 4.40, esta unión será en dos



lugares por consiguiente la fuerza en O2 será dividida en dos, uno para cada uno de los segmentos la falange.

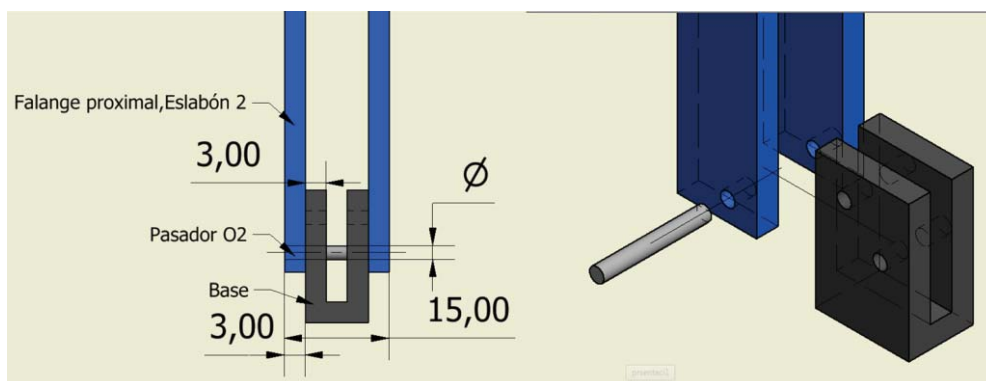


Figura 4.40 Ubicación del Pasador O2.
Fuente propia.

En la Figura. 4.41 se puede ver el D.C.L. así como también los diagramas de fuerza cortante y momento, donde $L=3\text{mm}$, $H=15\text{mm}$

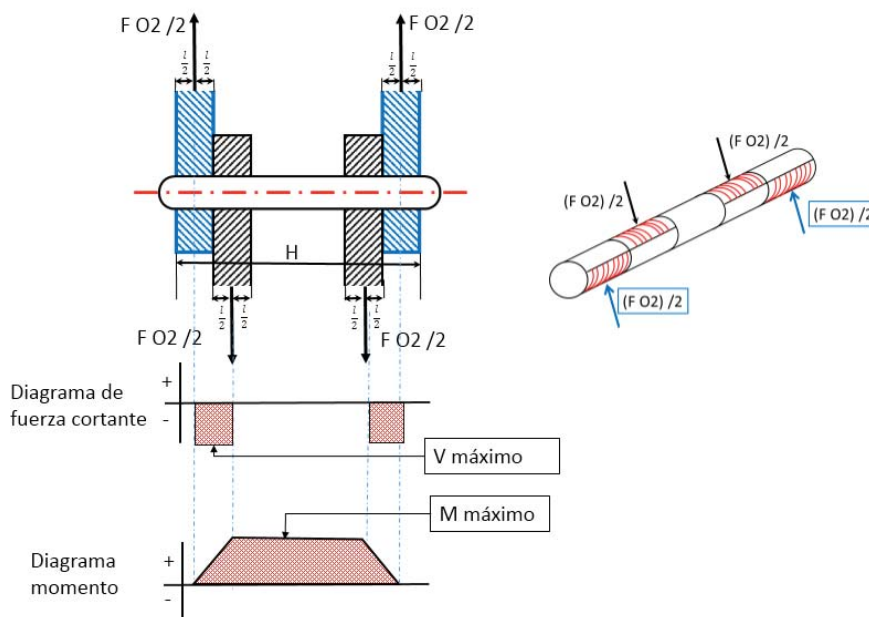


Figura 4.41 Diagrama de cuerpo libre Pasador O2.
Fuente propia.

- Pasador A.

Es la junta ubicada en A que une las falanges media y proximal como se muestra en la Figura 4.42, esta unión será en dos lugares por consiguiente la fuerza en A será dividida en dos, uno para cada uno de los segmentos de la falange.

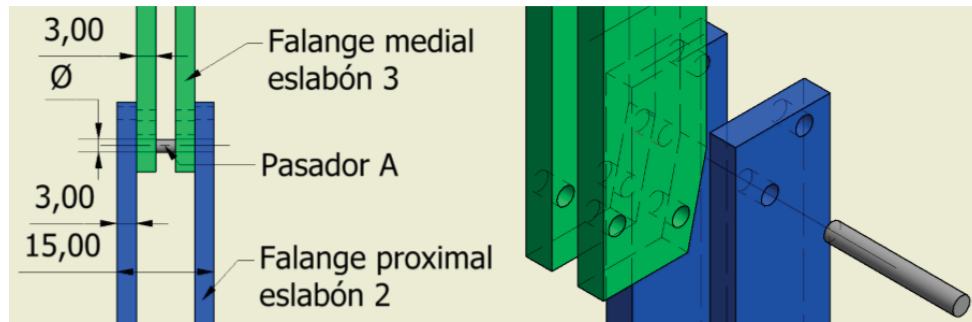


Figura 4.42 Ubicación del Pasador A.
Fuente propia.

En la Figura.4.43 se puede ver el D.C.L. así como también los diagramas de fuerza cortante y momento, donde $L=3\text{mm}$, $H=15\text{mm}$.

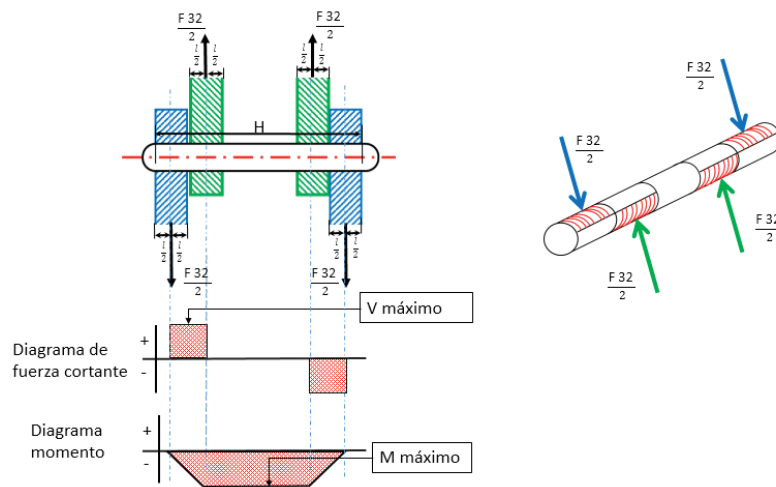


Figura 4.43 Diagrama de cuerpo libre Pasador A.
Fuente propia.

- Pasador D.

Es la junta ubicada en D que une las falanges media y distal como se ve en la Figura. 4.44, esta unión se dio en dos lugares, por consiguiente la fuerza en D será dividida en dos, uno para cada uno de los segmentos la falange.

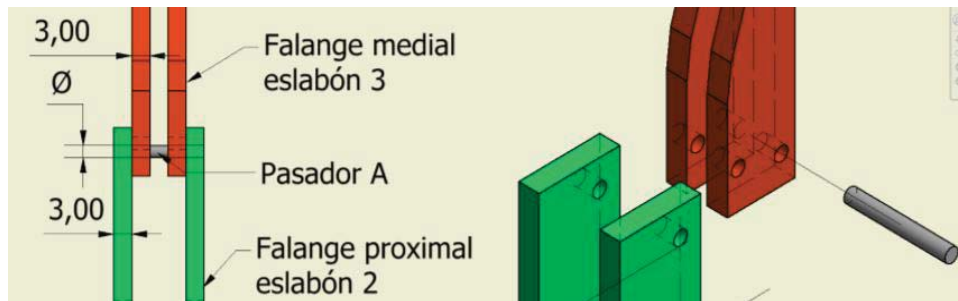


Figura 4.44 Ubicación del Pasador D.
Fuente propia.

En la Figura 4.45 se puede apreciar el D.C.L. así como también los diagramas de fuerza cortante y momento, donde $L=3\text{mm}$, $H=15\text{mm}$.

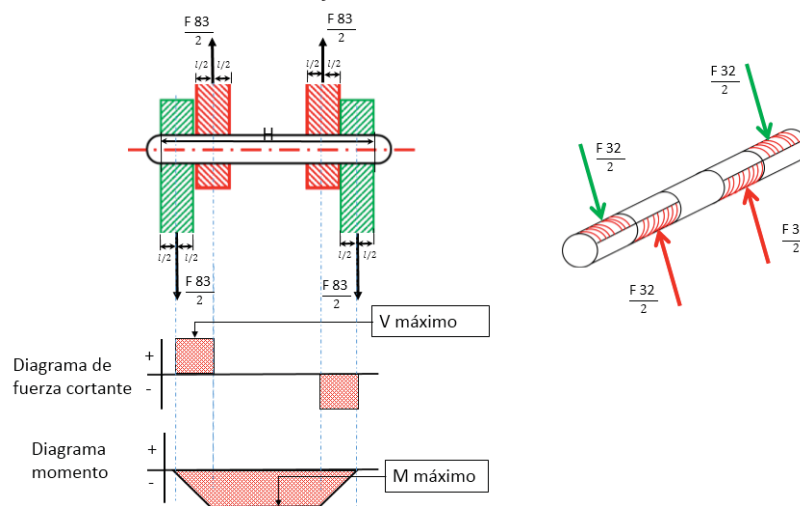


Figura 4.45 Diagrama de cuerpo libre Pasador D.
Fuente propia.

- Pasador O4.

Es la junta ubicada en O4 que une la barra proximal con la base como se ve en la Figura. 4.46.



Figura 4.46 Ubicación del Pasador O4.
Fuente propia.



En la Figura. 4.47 se puede ver el D.C.L. así como también los diagramas de fuerza cortante y momento, donde $L=3\text{mm}$.

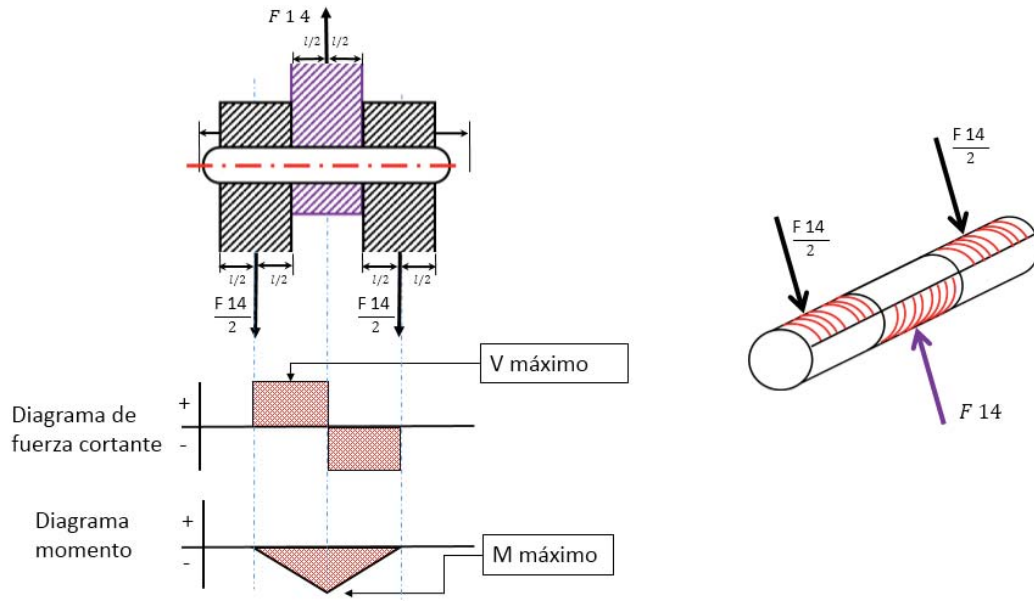


Figura 4.47 Diagrama de cuerpo libre Pasador O4.
Fuente propia.

- Pasador B.

Es la junta ubicada en B que une la barra proximal la falange media, como se ve en la Figur 4.48.

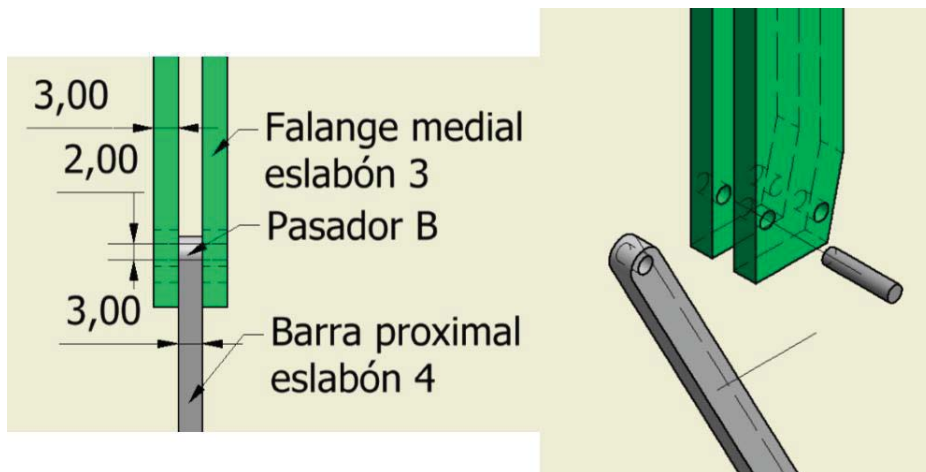


Figura 4.48 Ubicación del Pasador D.
Fuente propia.



En la Figura.4.49 se puede apreciar el D.C.L. así como también los diagramas de fuerza cortante y momento, donde $L=3\text{mm}$.

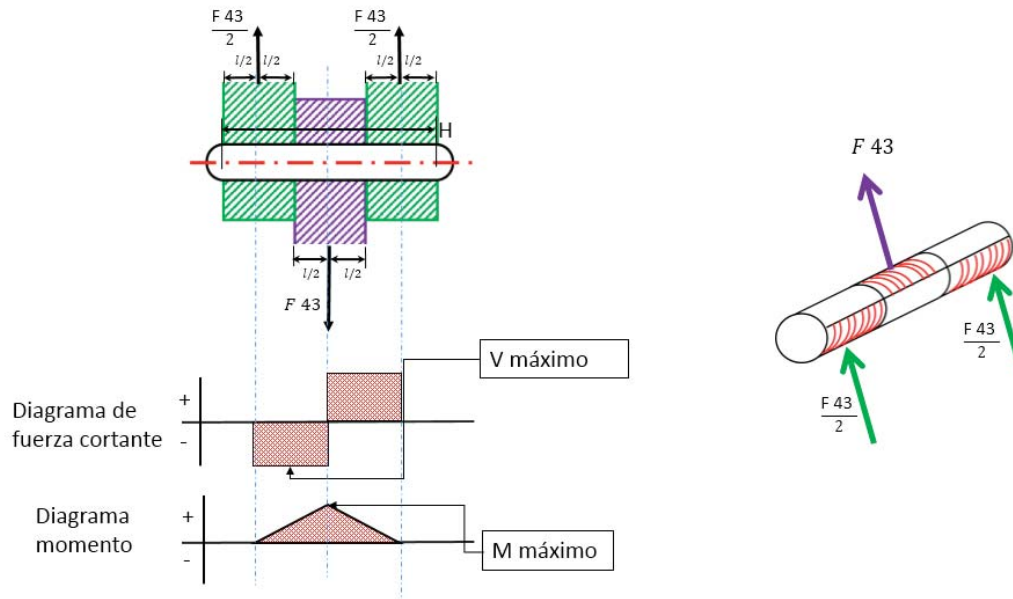


Figura 4.49 Diagrama de cuerpo libre Pasador B.
Fuente propia.

- Pasador C.

Será la junta ubicada en C que unirá la barra media la falange proximal, como se muestra en la Ffigura 4.50.



Figura 4.50 Ubicación del Pasador C.
Fuente propia.

En la Figura.4.51 se puede ver el D.C.L. así como también los diagramas de fuerza cortante y momento, donde $L=6\text{mm}$.

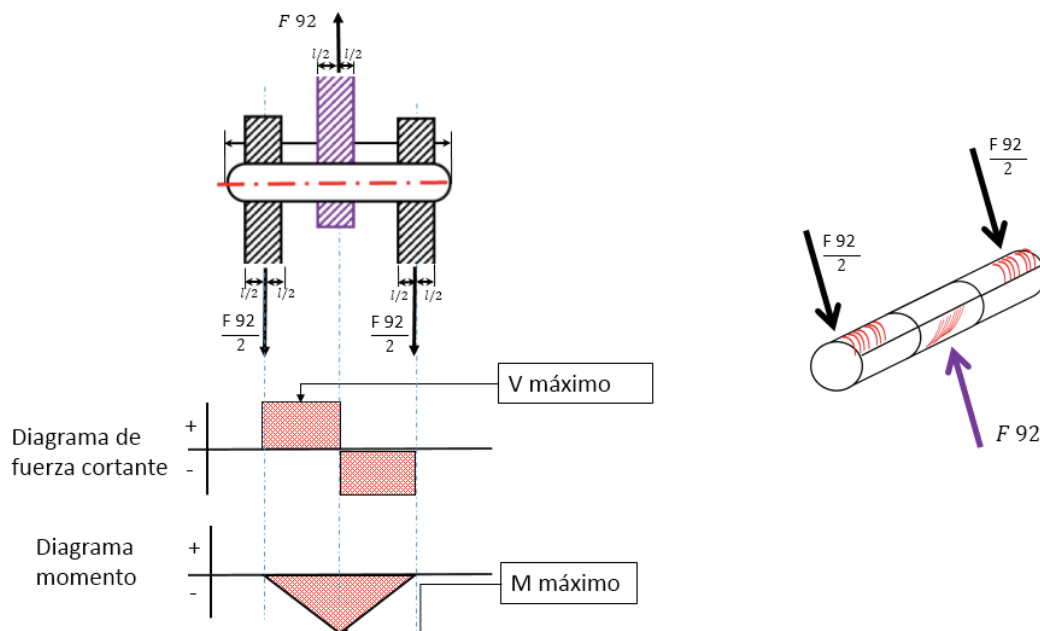


Figura 4.51 Diagrama de cuerpo libre Pasador C.
Fuente propia.

- Pasador E.

Es la junta ubicada en E que une la barra media y la falange Distal, como se muestra en la Figura. 4.52.

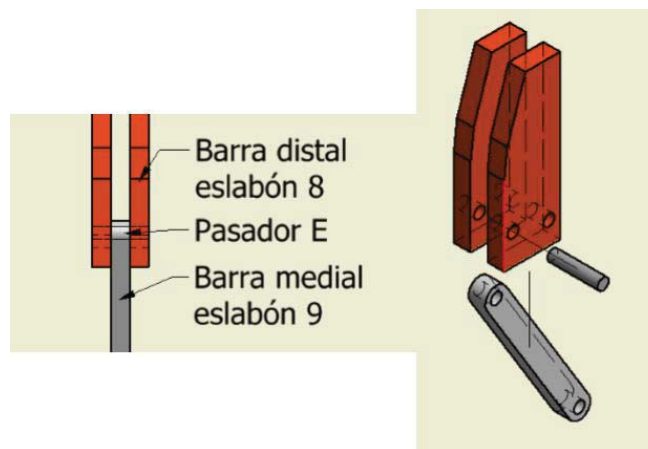


Figura 4.52 Ubicación del Pasador E.
Fuente propia.

En la Figura.4.53 se puede apreciar el D.C.L. Así como también los diagramas de fuerza cortante y momento, donde $L=3\text{mm}$.

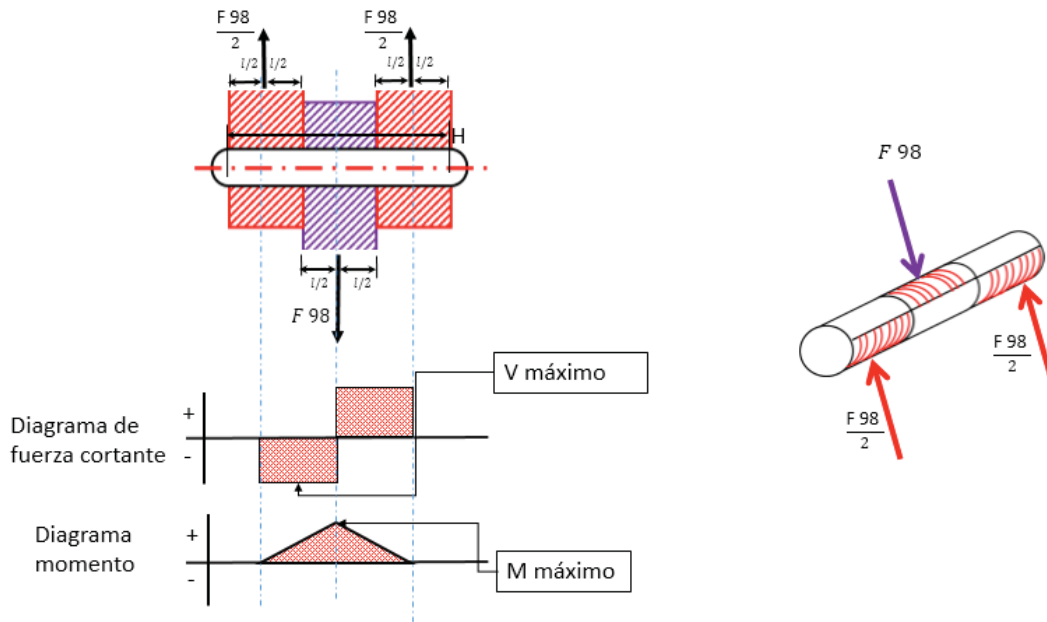


Figura 4.53 Diagrama de cuerpo libre Pasador C.
Fuente propia.

Las propiedades geométricas de los pasadores que tendrá un perfil de forma circular.

El primer momento de inercia es: $Q = \frac{2}{3} * r^3$ (4.72-a)

El segundo momento de inercia es: $I = \frac{\pi * r^4}{4}$ (4.72-b)

Donde:

r=Radios de los pasadores.

Los pasadores se diseñaron bajo tres criterios: máximo cortante, máximo flector y por aplastamiento, se generalizó las ecuación para cada uno de los casos como se en la Tabla (4.22),

Tabla 4.22 Esfuerzos en pasadores.

| Cortante máximo | Máximo flector | Esfuerzo por aplastamiento |
|---|--|--|
| $\frac{Ss_y}{f.s} = \frac{V \max * Q}{I * T}$ | $\frac{S_y}{f.s} = \frac{M \max * L}{I}$ | $\frac{S_y}{f.s} = \frac{V}{d * l}$ |
| $d = \left(\frac{16 * V \max}{3 * \pi * \frac{Ss_y}{f.s}} \right)^{1/2}$ | $d = \left(\frac{32 * V \max * L}{\pi * \frac{S_y}{f.s}} \right)^{1/3}$ | $d = \frac{V}{l * \left(\frac{S_y}{f.s} \right)}$ |

Fuente propia



Donde:

d = Diámetro.

V = Fuerza cortante.

M = Momento flector.

$f.s$ = Factor de seguridad.

S_y = Esfuerzo fluencia normal.

S_{sy} = Esfuerzo fluencia cortante.

Se consideró un $f.s$ (*factor de seguridad*) de 4 En la Tabla 4.23 se puede apreciar los resultados los obtenidos para cada uno de los pasadores.

Tabla 4.23 Diámetros mínimos.

| | V Max [N] | M Max [N-mm] | d(Cortante máximo) [mm] | d(Máximo Flector) [mm] | d(Esfuerzo por aplastamiento) [mm] |
|----|--------------|-----------------|-------------------------------|------------------------------|--|
| O2 | 24.33 | 72.98 | 0.7858 | 1.7713 | 0.0606 |
| A | 29.86 | 89.56 | 0.8706 | 1.8966 | 0.0744 |
| D | 7.20 | 21.59 | 0.4274 | 1.1803 | 0.0179 |
| O4 | 23.38 | 70.15 | 0.7705 | 1.7482 | 0.0583 |
| B | 23.38 | 70.15 | 0.7705 | 1.7482 | 0.0583 |
| C | 5.53 | 33.18 | 0.3748 | 1.3624 | 0.0138 |
| E | 5.53 | 16.59 | 0.3748 | 1.0813 | 0.0138 |

Fuente propia

Los resultados anteriores son hallados para el instante $T_2=90^\circ$, cuando las fuerzas son máximas, según lo visto en el análisis de fuerzas, se puede generalizar las ecuaciones de la Tabla (4.42) y ver la variación del diámetro mínimo en función de t_2 , en la Figura. 4.54 se muestra esta función. Se Puede decidir entonces que el diámetro usado para todos los pasadores será de: $2.00 [mm]$.

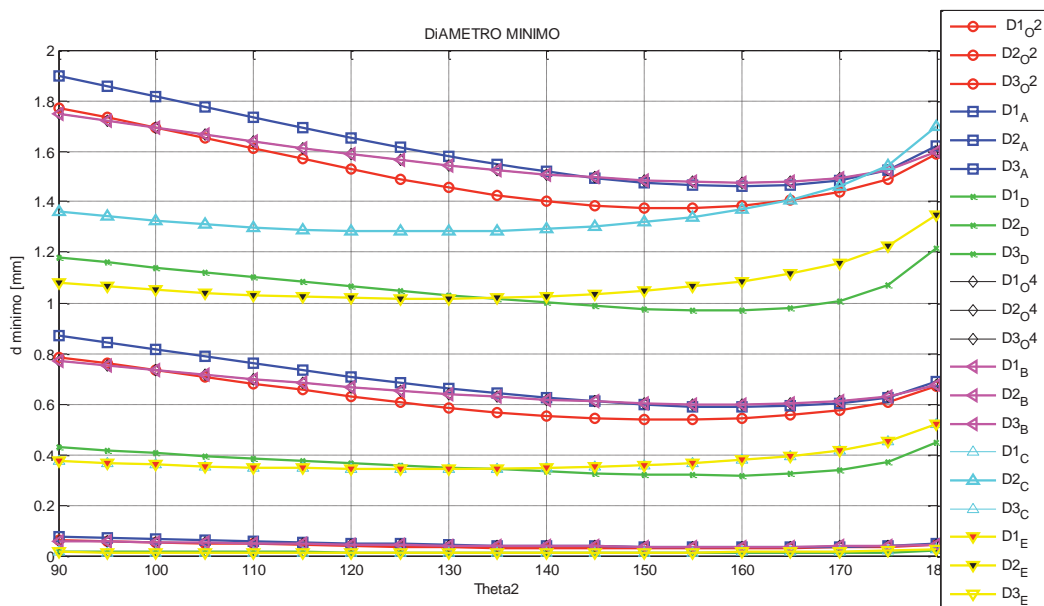


Figura 4.54 Diámetros mínimos en pasadores.
Fuente propia.

Entonces se seleccionó los pasadores de acuerdo al requerimiento quedando como se en la Tabla 4.24.

Tabla 4.24 Selección de pasadores para el dedo índice.

| Ubicación | Pasador seleccionado |
|-----------|----------------------|
| O2 | D70-2-16 |
| A | D70-2-16 |
| D | D71-2-16 |
| O4 | D70-2-10 |
| B | D70-2-10 |
| C | D70-2-10 |
| E | D70-2-10 |

Fuente propia.

4.1.2.3 Diseño por resistencia del mecanismo.

En esta sección se hizo el cálculo de resistencia de los eslabones del mecanismo del dedo índice del prototipo, como se puede ver en el diagrama de cuerpo libre la Figura.4.55, cada uno de los eslabones está sometido distintas fuerzas que son variables en función a T2, el cálculo se hará, en el instante T2=90°, es decir cuando empieza el movimiento y la fuerza de interacción entre elementos es máxima.

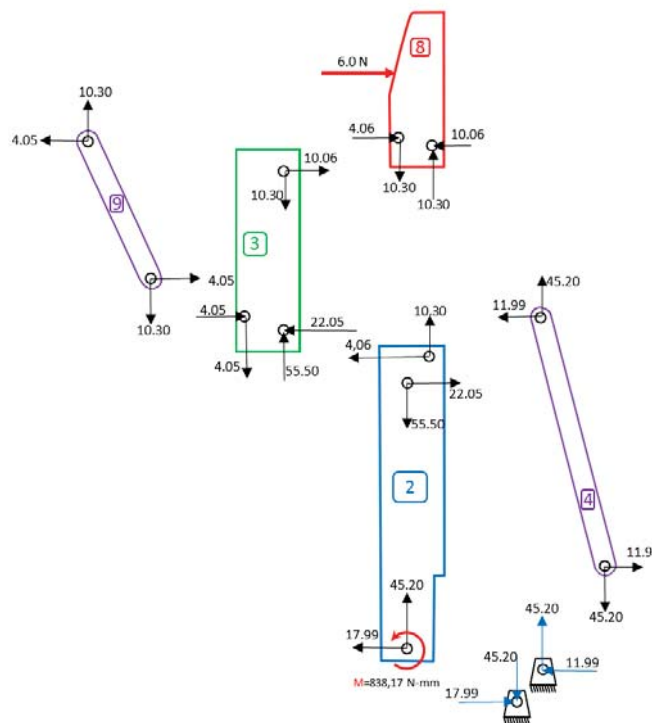


Figura 4.55 D.C.L. del mecanismo.
Fuente propia.

4.1.2.3.1 Material de las falanges.

El material elegido para los eslabones fue definido en las limitaciones, es ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno), ideal para la construcción del prototipo en impresora 3D. Los valores para este tipo de material son dados en la Tabla (4.25).

Tabla 4.25 Propiedades mecánicas A.B.S.

| PROPIEDADES Mecánicas | MÉTRICO | INGLÉS | COMENTARIOS |
|--|-----------|--------------|-------------|
| Límite de fluencia | 20,00 MPa | psi | ASTM D638 |
| Límite de elasticidad | 29,60MPa | psi | ASTM D638 |
| Alargamiento | 3 % | 3% | ASTM D638 |
| Impacto IZOD, con muesca (método A,23°C) | 106 J/m | 2.0 ft-lb/in | ASTM D256 |

Fuente: (Stratasys, 2016).

El límite de fluencia es $S_y = 20 \text{ N/mm}^2$, Según la teoría de esfuerzo cortante máximo del libro Diseño en Ingeniería Mecánica de Shyglye (Shyglye & Budynas, 2008, pág. 211). Podemos definir a la resistencia por fluencia en cortante como $S_{s_y} = 0.5 * S_y$.

$$S_y = 20.00 \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right] \quad (\text{Normal})$$



$$S_{s_y} = 10.00 \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad (\text{Cortante})$$

Propiedades geométricas de la sección (rectangulares)

$$I = \frac{1}{12} bh^3 \quad (4.73-a)$$

$$Q = \bar{y}A \quad (4.73-b)$$

Donde:

I = Segundo momento de inercia.

Q = Primer momento de inercia.

b = Base de la sección.

h = Altura de la sección.

A = Área de la porción superior del área transversal del miembro.

\bar{y} = Distancia al centroide de A.

Esfuerzos en la sección.

$$\sigma_{max} = \frac{M \cdot C}{I} \quad (\text{Esfuerzo máximo por momento flexionante}) \quad (4.74-a)$$

$$\sigma = \frac{q}{A} \quad (\text{Esfuerzo normal}) \quad (4.74-b)$$

$$\tau_{prom} = \frac{V}{A} \quad (\text{Esfuerzo Cortante}) \quad (4.74-c)$$

Donde:

M= Momento resistente en la sección.

C=Distancia a su perfil Neutral.

I=Segundo momento de área.

q=Carga interna normal en la sección.

A=Área de la sección.

V=Carga interna cortante de la sección.



4.1.2.3.2 Falange proximal, eslabón 02.

La Figura. 4.56 muestra el D.C.L de este eslabón y las fuerzas que interactúan en él. Los diagramas de Fuerza Normal, cortante y Momento se muestran en la Figura. 4.57.

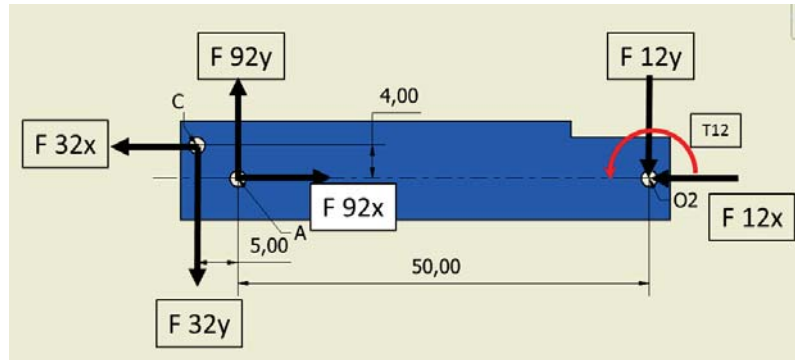


Figura 4.56 Diagrama cuerpo libre Eslabón 2.
Fuente Propia.

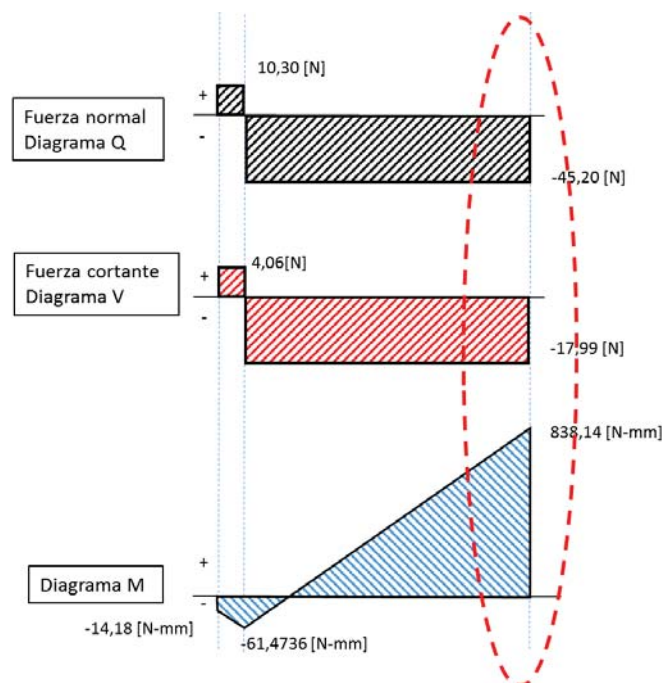


Figura 4.57 Fuerzas y momento flector internos.
Fuente propia.

Estos diagramas (Figura 4.57) muestran que el lugar donde se producirá el mayor esfuerzo que es en las sección O2 de la falange proximal (eslabón 2), se usaron dos perfiles para esta falange por consiguiente la fuerza normal, fuerza cortante y momento flexionante internos, serán divididas en dos una para cada sección (Figura 4.58).

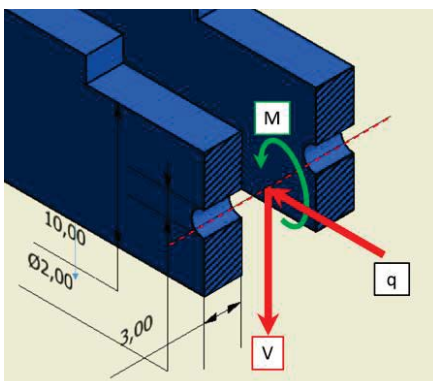


Figura 4.58 Aplicación de Fuerza Max. Y Momento Max.
Fuente propia.

Propiedades geométricas, O2.

$$I = \frac{1}{12} b * h^3 = \frac{1}{12} (3) * (10^3 - 2^3) = 248 [mm^4] \quad (4.75)$$

En la Figura.4.59 se presenta la distribución de esfuerzos debido a: Momento flexor, Fuerza Normal y Fuerza cortante.

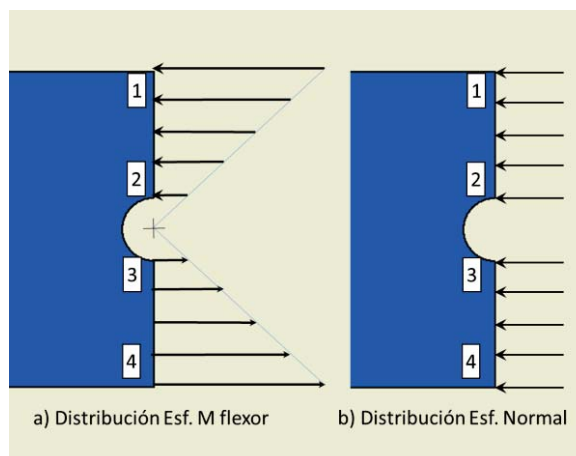


Figura 4.59 Distribución de esfuerzos.
Fuente: propia.

- Momento flexionante. De (4.74-a).

$$\sigma_{max}(1) = \frac{M * C}{I} = \frac{(838,17/2) * 5}{248} = 8,45 [N/mm^2] \leftarrow \quad (4.76-a)$$

$$\sigma_{max}(2) = \frac{M * C}{I} = \frac{(838,17/2) * 1}{248} = 1,69 [N/mm^2] \leftarrow \quad (4.76-b)$$

$$\sigma_{max}(3) = \frac{M * C}{I} = \frac{(838,17/2) * 1}{248} = 1,69 [N/mm^2] \rightarrow \quad (4.76-c)$$

$$\sigma_{max}(4) = \frac{M * C}{I} = \frac{(838,17/2) * 5}{248} = 8,45 [N/mm^2] \rightarrow \quad (4.76-d)$$



- Fuerza normal.

$$\sigma = \frac{q}{A} = \frac{(45.20/2)}{(10-2)*3} = 0.941 \text{ [N/mm}^2\text{]} \leftarrow \tag{4.77}$$

- Esfuerzo normal. La suma de los esfuerzos por flexión y por fuerza normal, en cada uno de los sectores 1, 2, 3,4 en el perfil del eslabón 2 Tabla (4.26).

Tabla 4.26 Distribución de los esfuerzos normales.

| Sectores | σ_{max} | σ | $=\sigma(Total)[N/mm^2]$ |
|-------------|----------------|----------|--------------------------|
| $\sigma(1)$ | -8,45 | -0.941 | -9.39 |
| $\sigma(2)$ | -1.69 | -0.941 | -2.63 |
| $\sigma(3)$ | +1.69 | -0.941 | +0.75 |
| $\sigma(4)$ | +8.45 | -0.941 | +7.509 |

Fuente: propia.

El esfuerzo normal máximo será en el sector 1

- Esfuerzo máximo por fuerza cortante.

$$\tau_{prom} = \frac{V}{A} = \frac{(17.9929/2)}{(10-2)*3} = 0.374 \text{ [N/mm}^2\text{]} \tag{4.78}$$

4.1.2.3.3 Falange media, eslabón 03.

En la Figura. 4.60 se muestra el D.C.L de la falange media y las fuerzas que interactúan en él. Los diagramas de Fuerza Normal, cortante y Momento se muestran en la Figura. 4.61.

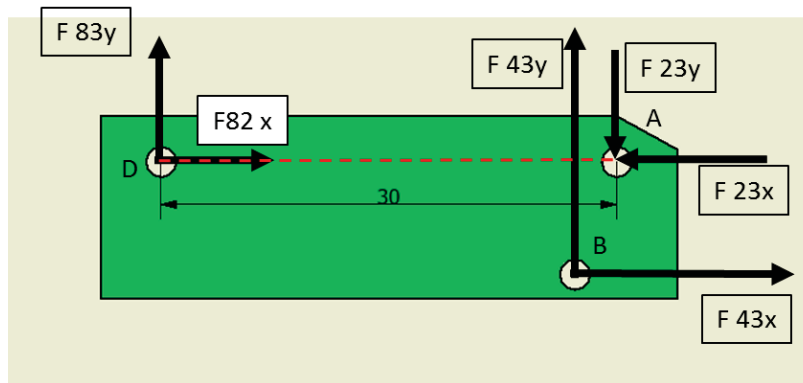


Figura 4.60 Diagrama cuerpo libre Eslabón 3.
Fuente: propia.

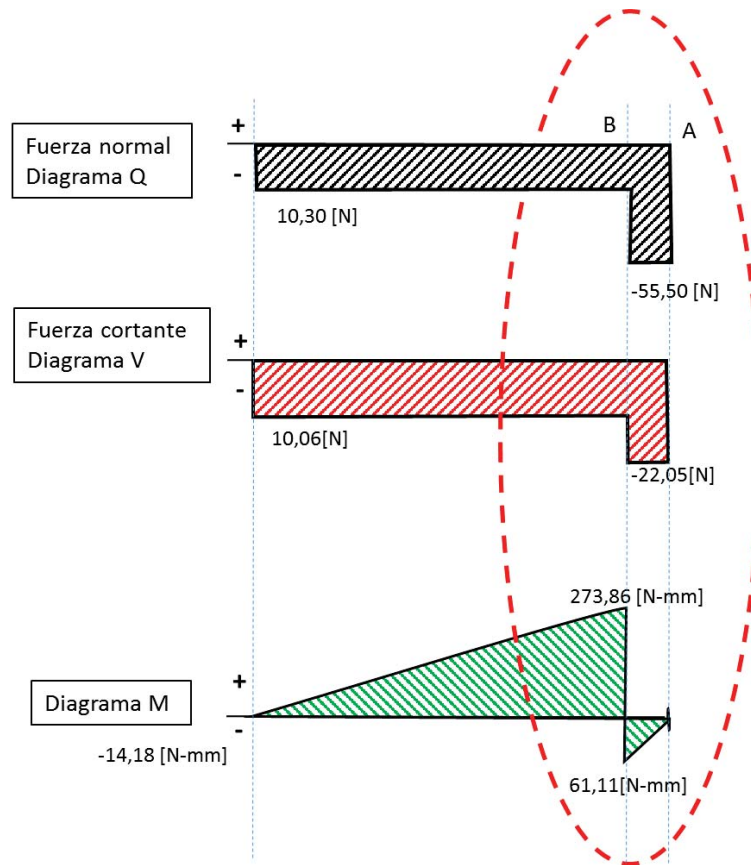


Figura 4.61 Fuerzas y momento flector internos.
Fuente: propia.

Estos diagramas muestran que el lugar donde se producirá el mayor esfuerzo que es en la sección B de la falange media (eslabón 3), se usaron dos perfiles para esta falange por consiguiente la fuerza normal, fuerza cortante y momento flexionante internos, serán dividieron en dos una para cada sección (Figura. 4.62).

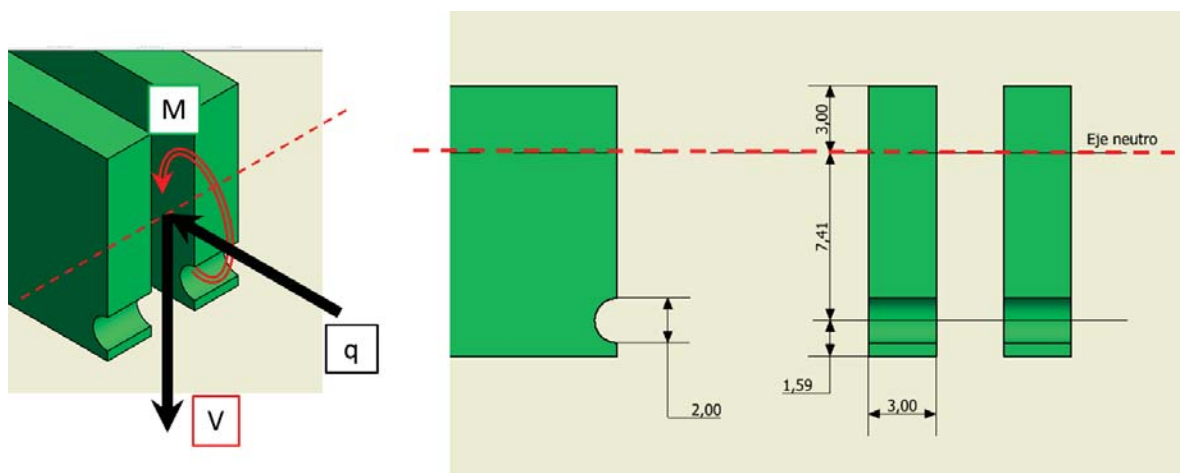


Figura 4.62 Aplicación de Fuerza Max. y Momento Max.
Fuente: propia.



Propiedades geométricas, B.

$$I = \sum \left[\frac{1}{12} b * h^3 \right] = \left[\frac{1}{12} (3)(3^3) + (3 * 3) * (1,5^2) \right] + \left[\frac{1}{12} (3)(9^3) + (3 * 9) * (4,5^2) \right] - \left[\frac{1}{12} (3)(2^3) + (3 * 2) * (7,41^2) \right] = 424,55 \text{ [mm}^4\text{]}. \quad (4.79)$$

La Figura 4.63 presenta la distribución de esfuerzos debido a: momento flexor, Fuerza Normal, Fuerza cortante.

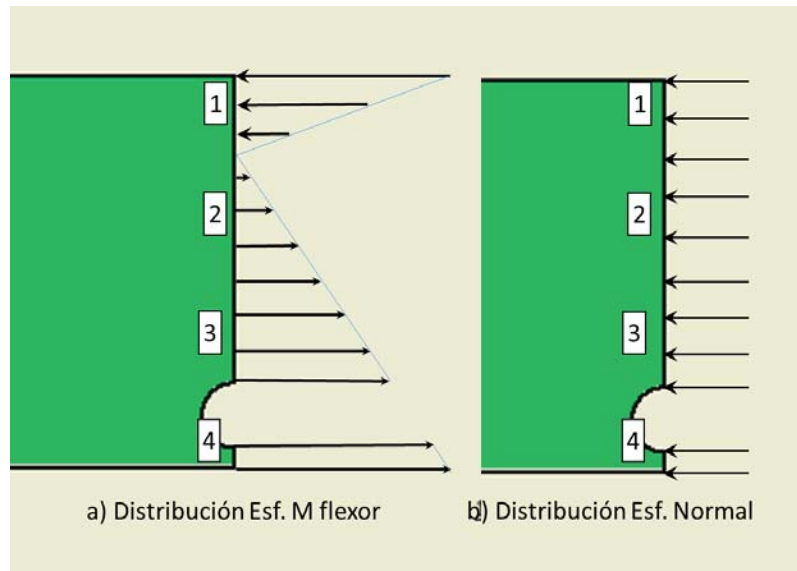


Figura 4.63 Distribución de esfuerzos.
Fuente: propia.

- Momento flexionante.

$$\sigma_{max}(1) = \frac{M * C}{I} = \frac{(212,75/2) * 3,00}{424,55} = 0,525 \text{ [N/mm}^2\text{]} \leftarrow \quad (4.80\text{-a})$$

$$\sigma_{max}(2) = \frac{M * C}{I} = \frac{(212,75/2) * 6,41}{424,55} = 1,606 \text{ [N/mm}^2\text{]} \rightarrow \quad (4.80\text{-b})$$

$$\sigma_{max}(3) = \frac{M * C}{I} = \frac{(212,75/2) * 8,41}{424,55} = 2,107 \text{ [N/mm}^2\text{]} \rightarrow \quad (4.80\text{-c})$$

$$\sigma_{max}(4) = \frac{M * C}{I} = \frac{(212,75/2) * 9,00}{424,55} = 2,255 \text{ [N/mm}^2\text{]} \rightarrow \quad (4.80\text{-d})$$

- Fuerza normal.

$$\sigma = \frac{q}{A} = \frac{(55,499/2)}{(12-2) * 3} = 0,925 \text{ [N/mm}^2\text{]} \leftarrow \quad (4.80.)$$

- Esfuerzo normal.



Tabla 4.27 Distribución de esfuerzos normal en los sectores 1, 2, 3, 4.

| | σ_{max} | σ | $=\sigma(Total) [N/mm^2]$ |
|-------------|----------------|----------|---------------------------|
| $\sigma(1)$ | -0.525 | -0.925 | -1,45 |
| $\sigma(2)$ | +1.606 | -0.925 | +0.68 |
| $\sigma(3)$ | +2.107 | -0.925 | +1.18 |
| $\sigma(4)$ | +2.255 | -0.925 | +1.33 |

Fuente propia.

- Fuerza cortante.

$$\tau_{prom} = \frac{V}{A} = \frac{(22,05/2)}{10*3} = 0.37 [N/mm^2] \tag{4.81}$$

4.1.2.3.4 Falange distal, eslabón 08.

La Figura. 4.64 muestra el D.C.L de la falange distal y las fuerzas que interactúan en él. Los diagramas de Fuerza Normal, Cortante y Momento se muestran en la Figura. 4.65.

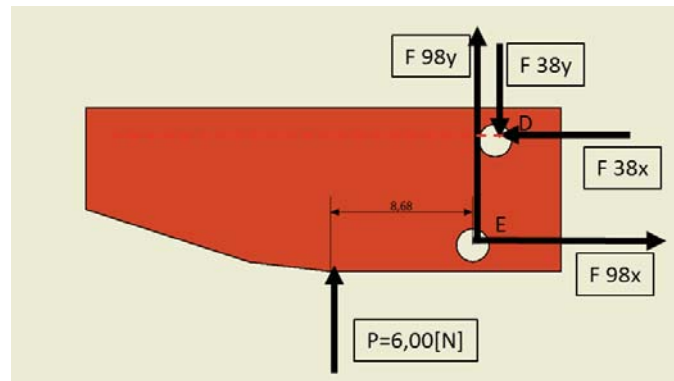


Figura 4.64 Diagrama cuerpo libre Eslabón 8.
Fuente propia.

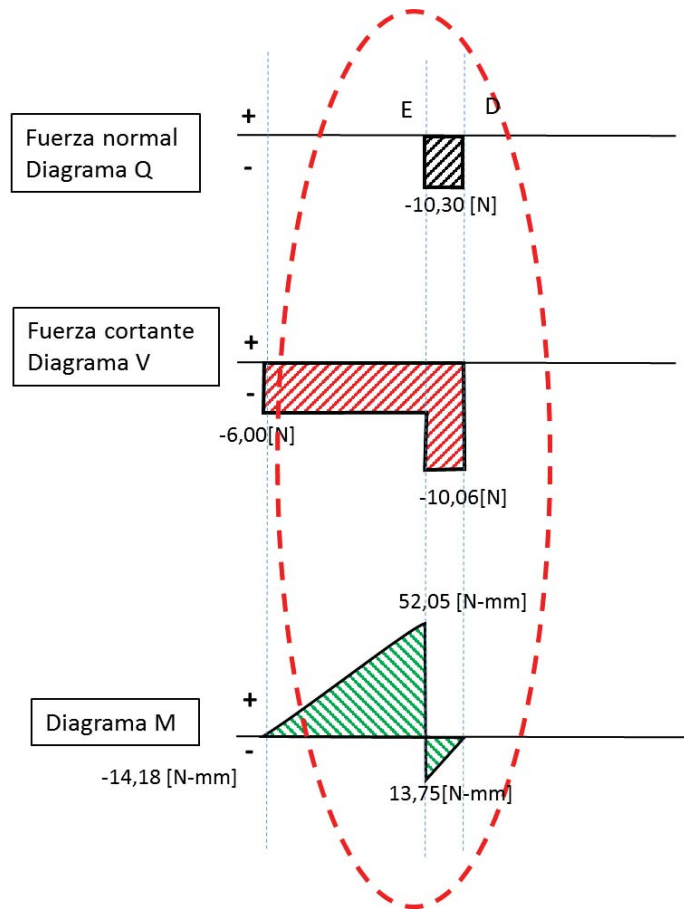


Figura 4.65 Fuerzas y momento flector internos.
Fuente: propia.

El lugar donde se produce el mayor esfuerzo es en la sección E de la falange distal (eslabón 8). Se usó dos perfiles para esta falange por consiguiente la fuerza normal, fuerza cortante y momento flexionante internos, son divididos en dos una para cada sección (Figura. 4.66).

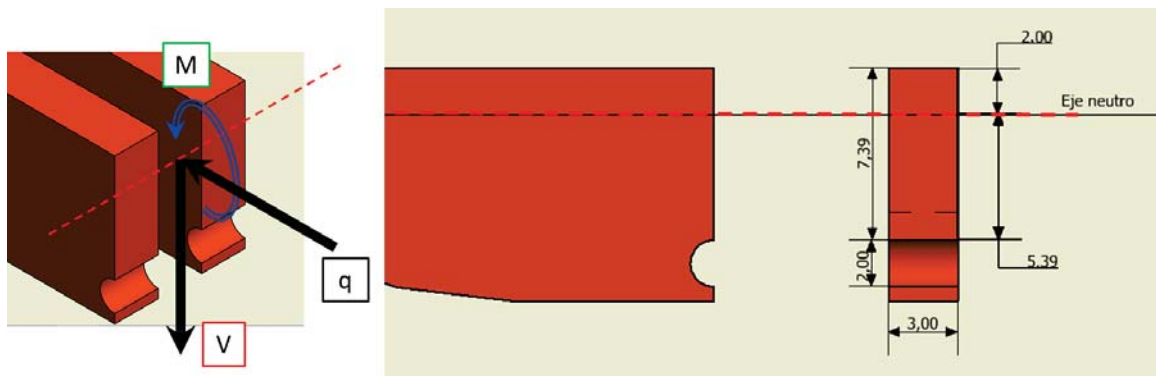


Figura 4.66 Aplicación de Fuerza Max. y Momento Max.
Fuente: propia.



Propiedades geométricas.

$$I = \sum \left[\frac{1}{12} b * h^3 \right] = \left[\frac{1}{12} (3)(2^3) + (2 * 3) * (1^2) \right] + \left[\frac{1}{12} (3)(8^3) + (3 * 8) * (4^2) \right] - \left[\frac{1}{12} (3)(2^3) + (3 * 2) * (6,39^2) \right] = 273,00 \text{ [mm}^4\text{]}. \tag{4.82-a}$$

En la Figura. 4.67 se presenta la distribución de esfuerzos debido a: momento flexor, Fuerza Normal, Fuerza cortante.

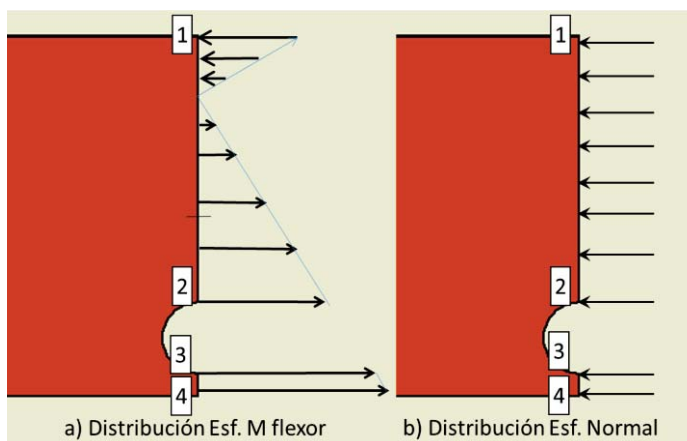


Figura 4.67 Distribución de esfuerzos.
Fuente propia.

- Momento flexionante.

$$\sigma_{max}(1) = \frac{M * C}{I} = \frac{(38,298/2) * 2}{273,00} = 0,1403 \text{ [N/mm}^2\text{]} \leftarrow \tag{4.84-a}$$

$$\sigma_{max}(2) = \frac{M * C}{I} = \frac{(38,298/2) * 2}{273,00} = 0,378 \text{ [N/mm}^2\text{]} \rightarrow \tag{4.84-b}$$

$$\sigma_{max}(3) = \frac{M * C}{I} = \frac{(38,298/2) * 2}{273,00} = 0,518 \text{ [N/mm}^2\text{]} \rightarrow \tag{4.84-c}$$

$$\sigma_{max}(4) = \frac{M * C}{I} = \frac{(38,298/2) * 2}{273,00} = 0,561 \text{ [N/mm}^2\text{]} \rightarrow \tag{4.84-d}$$

- Fuerza normal.

$$\sigma = \frac{q}{A} = \frac{(10,298/2)}{(10-2) * 3} = 0,215 \text{ [N/mm}^2\text{]} \leftarrow \tag{4.85}$$

- Esfuerzo normal.

Tabla 4.28 Distribución de esfuerzo en las zonas 1, 2,3 y 4.

| | σ_{max} | σ | $=\sigma(Total) \text{ [N/mm}^2\text{]}$ |
|-------------|----------------|----------|--|
| $\sigma(1)$ | -0,1403 | -0,215 | -0,355 |
| $\sigma(2)$ | +0,378 | -0,215 | +0.163 |
| $\sigma(3)$ | +0,518 | -0,215 | +0.303 |
| $\sigma(4)$ | +0,561 | -0,215 | +0.346 |

Fuente propia.



- Fuerza cortante.

$$\tau_{prom} = \frac{V}{A} = \frac{(10.055/2)}{8*3} = 0.209 [N/mm^2] \tag{4.86}$$

4.1.2.3.5 Barra proximal, Eslabón 04.

La Figura. 4.68 muestra el D.C.L de la barra proximal y las fuerzas que interactúan en él. Solo existe una fuerza normal actuando sobre la barra 4.

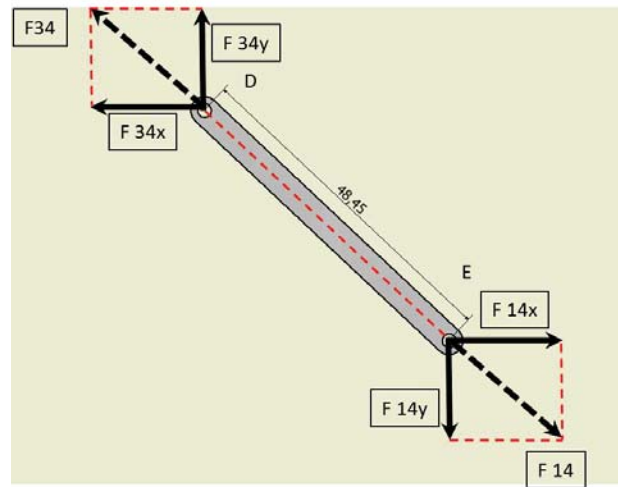


Figura 4.68 Diagrama cuerpo libre Eslabón 4.
Fuente propia.

El lugar donde se producirá el mayor esfuerzo es en la sección E (Figura. 4.69).

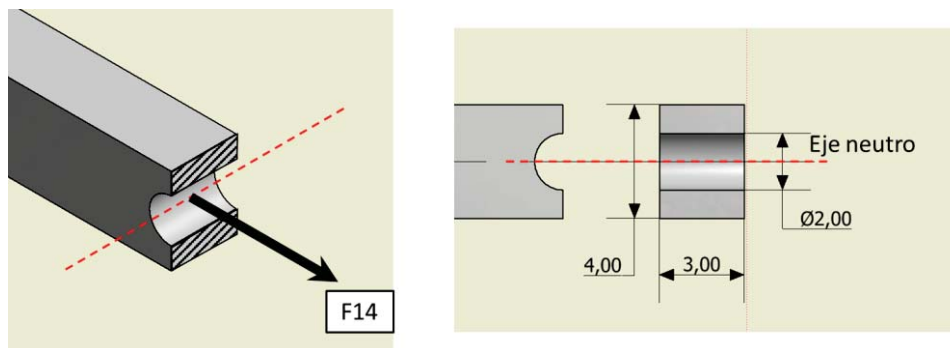


Figura 4.69 Aplicación de Fuerza Max.
Fuente: propia.

El elemento está sometido solo a tensión, por consiguiente solo habrá esfuerzo normal,



- Fuerza normal.

$$\sigma = \frac{q}{A} = \frac{(46,768)}{(4-2)*3} = 7,95 \text{ [N/mm}^2\text{]} \rightarrow \quad (4.87)$$

4.1.2.3.6 Barra Medial, Eslabón 09.

La (Figura. 4.70) muestra el D.C.L de la barra media y las fuerzas que interactúan en él. Solo existe una fuerza normal actuando sobre la barra 9.

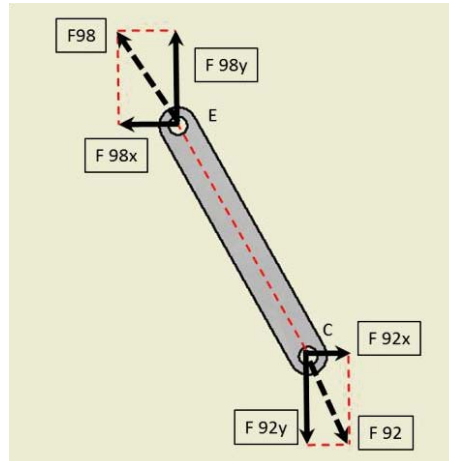


Figura 4.70 Diagrama cuerpo libre Eslabón 9.
Fuente propia.

El lugar donde se producirá el mayor esfuerzo es en la sección C (Figura. 4.71).

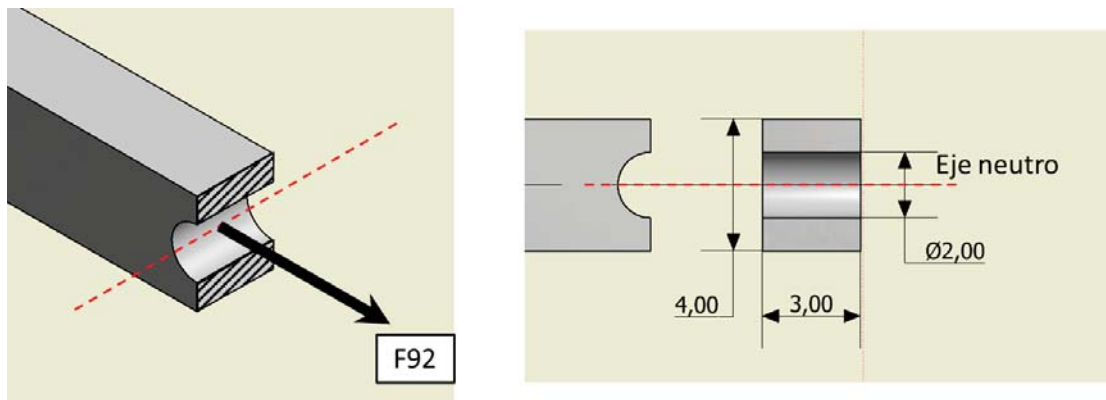


Figura 4.71 Aplicación de Fuerza Max.
Fuente propia.

El elemento está sometido a tensión, por consiguiente solo habrá esfuerzo normal.



- Fuerza normal.

$$\sigma = \frac{q}{A} = \frac{(11,047)}{(4-2)*3} = 1,841 \text{ [N/mm}^2\text{]} \rightarrow \quad (4.88)$$

4.1.2.3.7 Cálculo de esfuerzos.

Cálculo de esfuerzos principales

$$\sigma_{max} = \sigma_{1,2} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (4.89)$$

Criterio de la energía de distorsión o de Von Mises.

$$\sigma_{equiv.} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (4.90)$$

Factor de seguridad.

$$f.s = \frac{S_y}{\sigma_{equiv.}} \quad (4.91)$$

Donde:

σ_x = Esfuerzo normal.

τ_{xy} = Esfuerzo cortante.

S_y = Esfuerzo de fluencia material.

La tabla 4.29 muestra los resultados del esfuerzo equivalente para cada eslabón del mecanismo, el esfuerzo de fluencia del material es 20 [N/mm²] según la tabla 4.25.



Tabla 4.29 Resumen de la distribución de esfuerzos.

| Eslabón | Esf. Normal, Cortante [N/mm ²] | | σ Principales | | | σ Equiv. [N/mm ²] | σ Fluencia. [N/mm ²] | f.s. |
|---------|---|--------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|--|---|------|
| | | | Esf1 [N/mm ²] | Esf2 [N/mm ²] | Esf3 [N/mm ²] | | | |
| 2 | σ | -9.390 | 0.015 | -9.405 | 0 | 9.412 | 20 | 2 |
| | τ_{xy} | 0.374 | | | | | | |
| 3 | σ | -1.450 | 0.089 | -1.539 | 0 | 1.585 | 20 | 13 |
| | τ_{xy} | 0.370 | | | | | | |
| 4 | σ | 7.950 | 7.950 | 0.000 | 0 | 7.950 | 20 | 3 |
| | τ_{xy} | 0.000 | | | | | | |
| 8 | σ | -0.355 | 0.097 | -0.452 | 0 | 0.507 | 20 | 39 |
| | τ_{xy} | 0.209 | | | | | | |
| 9 | σ | 1.841 | 1.841 | 0.000 | 0 | 1.841 | 20 | 11 |
| | τ_{xy} | 0.000 | | | | | | |

Fuente propia.

El mínimo factor de seguridad es 2, con lo cual se asegura que el sistema no fallara por resistencia.



4.2 DISEÑO DEL DEDO PULGAR.

Se hizo uso de un diagrama de flujo para guiarnos a lo largo del proceso de desarrollo. Figura 4.72.

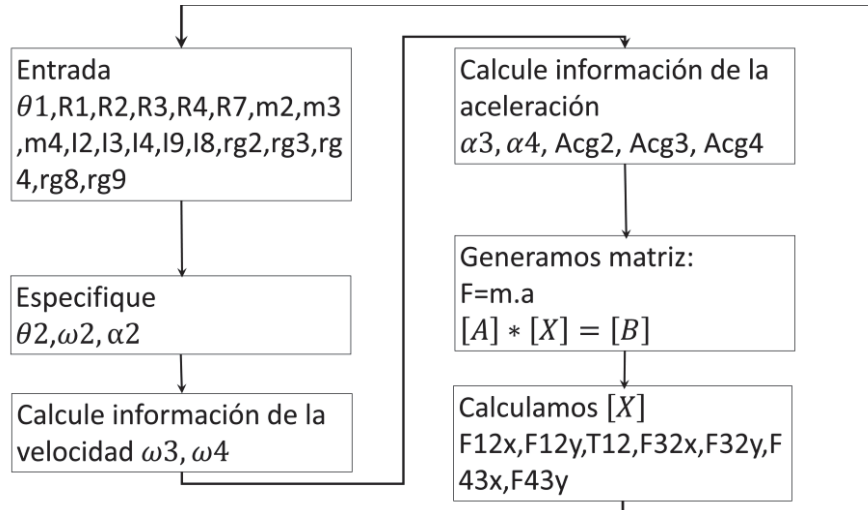
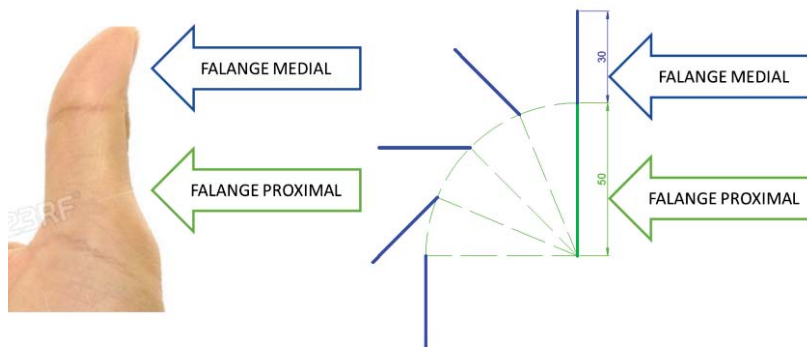


Figura 4.72 Diagrama de flujo Diseño dedo pulgar.
Fuente propia.

4.2.1 Cinemática del mecanismo.

4.2.1.1 Síntesis del mecanismo.

Se usó el mismo procedimiento que el dedo índice. En los parámetro de diseño, se requiere que ambas falanges tengan un rango de movimiento de 90° sexagesimales Figura 4.73.



a) Dedo pulgar

b) Modelo conceptual

Figura 4.73 Movimiento. De las falanges.

Fuente propia.



Las dos bancadas del mecanismos están ubicadas una O_2 en el origen de coordenadas en decir en $(0;0)$ y O_4 estará en $(5; 6)$ es decir 5 mm en el eje X y 6mm en el eje Y, ubicando las tres pociones del acoplado $\overline{C_1,D_1}$; $\overline{C_2,D_2}$; $\overline{C_3,D_3}$

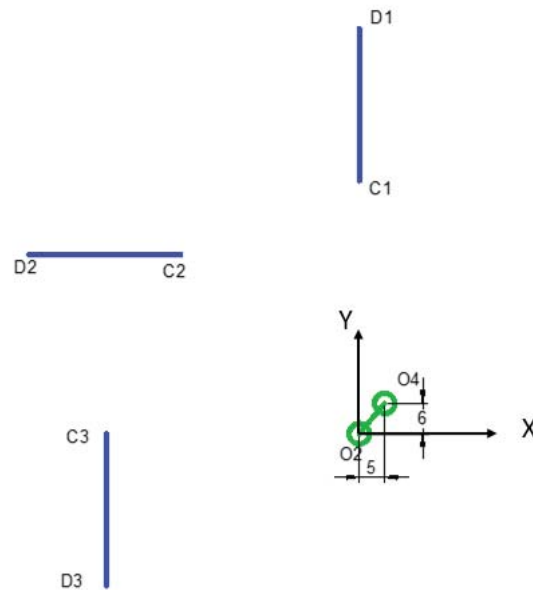
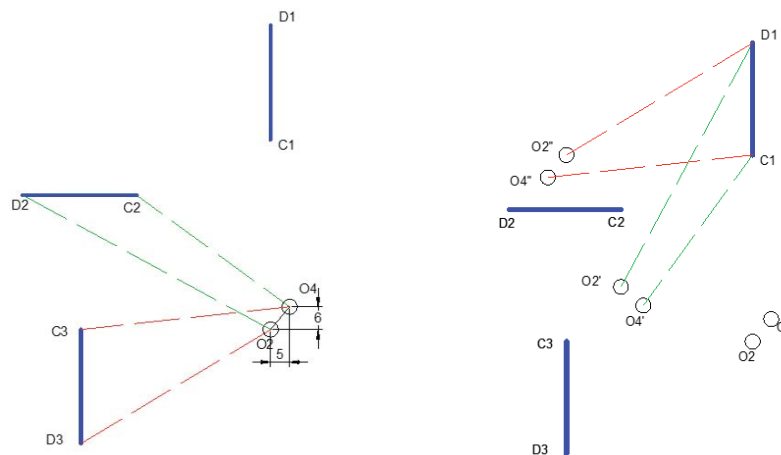


Figura 4.74 Posiciones de la falange media.
Fuente propia.

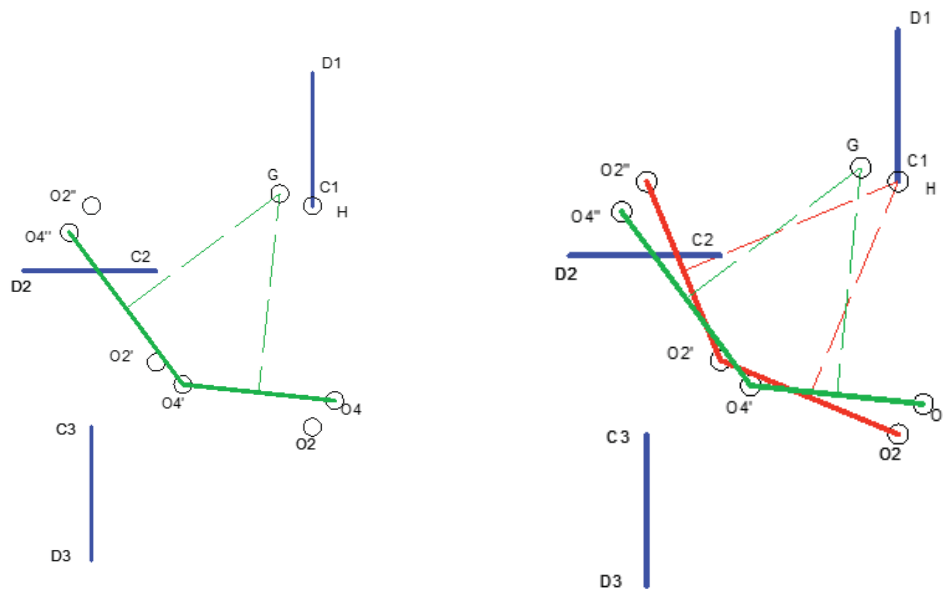
En la Figuras 4.75-a y 4.75-b se ve la inversión del mecanismo.



a) Posición respecto al plano fijo b) segunda y tercera posición de bancadas

Figura 4.75 Inversión del mecanismo.
Fuente propia.

De las líneas $O_4''O_4'$, $O_4'O_4$ y $O_2''O_2'$, $O_2'O_2$ se crearon bisectrices que se intersectaran en G (Figura. 4.76-a) y H (Figura. 4.76-b).

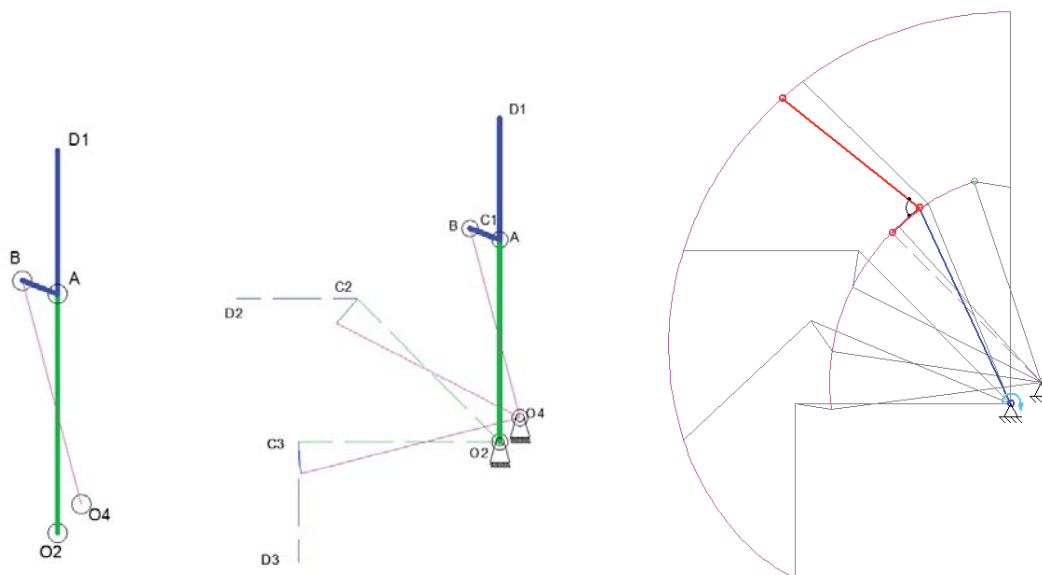


a) Generación del rotapolo G

b) Generación del rotapolo H

Figura 4.76 Rotopolos G y H
Fuente propia.

Se reinvertió el mecanismo a la posición original quedando como bancada los puntos (O2,O4), portador de energía $\overline{O2,A}$, acoplado \overline{AB} y como oscilador $\overline{BO4}$,



a) Generación del Mecanismo

b) Movimiento del mecanismo Simulación SAM

Figura 4.77 Configuración mecanismo.
Fuente propia.



4.2.1.2 Cálculo de las posiciones angulares del mecanismo.

Se usó de la ecuación de GRUEBLER ecuación (4.1)

$$M = 3(4 - 1) - 2(4) = 1$$

Entonces el mecanismo tiene un solo grado de libertad.

4.2.1.2.1 Lazo vectorial del mecanismo.

En la Figura. 4.78-a muestra el mecanismo de cuatro barras diseñando. La Figura 4.78-b muestra el lazo vectorial del mecanismo

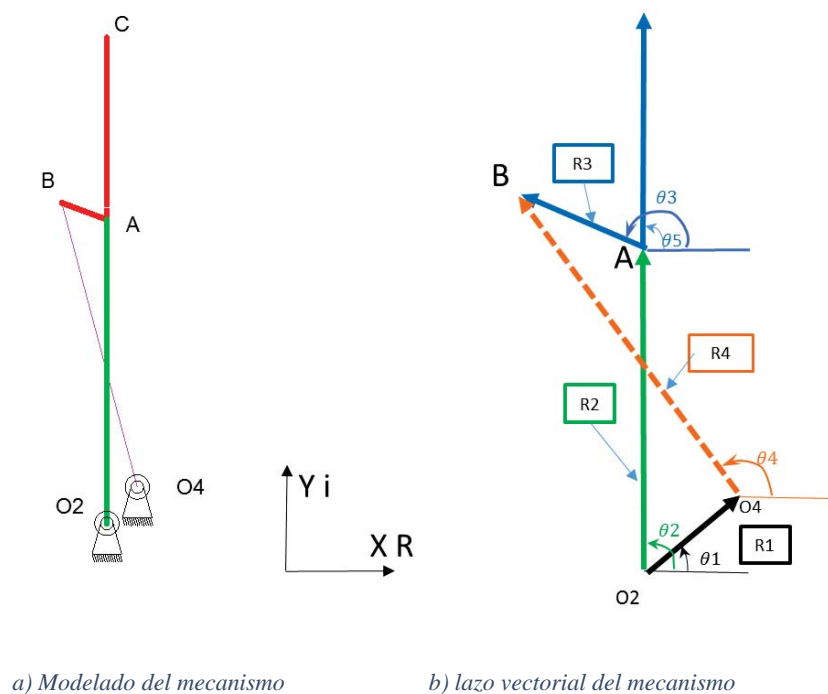


Figura 4.78 Lazo vectorial mecanismo.
Fuente propia.

Hay cuatro vectores. La dirección de números reales que será en la dirección X, i la de los números irreales o imaginarios será en dirección Y.

Las ecuaciones que describen el lazo vectorial.

$$R2 + R3 - R4 - R1 = 0 \tag{4.92}$$

(3.95) en la notación de números complejos para cada vector de posicionamiento.

$$R2 \cdot e^{i\theta_2} + R3 \cdot e^{i\theta_3} - R4 e^{i\theta_4} - R1 e^{i\theta_1} = 0 \tag{4.93}$$

Reemplazando (4.93) en la equivalencia de Euler (3.14).



$$R2. (\cos \theta_2 + i \sin \theta_2) + R3(\cos \theta_3 + i \sin \theta_3) - R4(\cos \theta_4 + i \sin \theta_4) - R1(\cos \theta_1 + i \sin \theta_1) = 0 \tag{4.94}$$

Parte real (dirección x)

$$f1 = R2 * \cos(\theta_2) + R3 * \cos(\theta_3) - R4 * \cos(\theta_4) - R1 * \cos(\theta_1) = 0 \tag{4.95-a}$$

Parte imaginaria (dirección y)

$$f2 = R2 * \sin(\theta_2) + R3 * \sin(\theta_3) - R4 * \sin(\theta_4) - R1 * \sin(\theta_1) = 0 \tag{4.95-b}$$

4.2.1.2.2 Newton-Raphson.

El objetivo es hallar los ángulos θ_3, θ_4 . Las ecuaciones (4.95-a), (4.95-b) son conocidas como ecuaciones trascendentales.

$[B] = \text{Conjunto de ecuaciones } f((3.98 - a)y(3.98 - b)).$

$[A] = \text{Jacobiano de } B$

$[X] = \text{Terminos de error}$

$$[A][X] = -[B] \tag{4.96}$$

$$[B] = \begin{bmatrix} R2 * \cos(\theta_2) + R3 * \cos(\theta_3) - R4 * \cos(\theta_4) - R1 * \cos(\theta_1) \\ R2 * \sin(\theta_2) + R3 * \sin(\theta_3) - R4 * \sin(\theta_4) - R1 * \sin(\theta_1) \end{bmatrix}$$

$$[A] = \begin{bmatrix} \frac{\partial f1}{\partial \theta 3} & \frac{\partial f1}{\partial \theta 4} \\ \frac{\partial f2}{\partial \theta 3} & \frac{\partial f2}{\partial \theta 4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R3 * \sin. \theta 3 & R4 * \sin. \theta 4 \\ R3 * \cos. \theta 3 & -R4 * \cos. \theta 4 \end{bmatrix}$$

$$[X] = \begin{bmatrix} \Delta \theta_3 \\ \Delta \theta_4 \end{bmatrix}$$

Donde:

Tabla 4.30 Dimensiones de los eslabones.

| | |
|------------|--------------|
| R1x | 5 [mm] |
| R1y | 6 [mm] |
| R2 | 50.000 [mm] |
| R3 | 7.916 [mm] |
| R4 | 48.3981 [mm] |
| R7 | 30.00 |
| $\theta 2$ | 90°-180° |

Fuente propia.

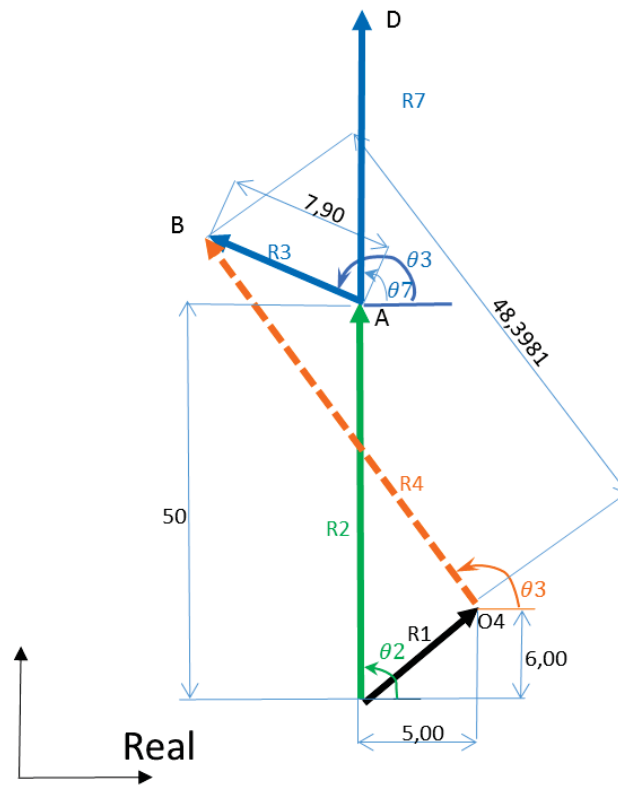


Figura 4.79 Dimensionamiento del mecanismo.
Fuente propia.

Para hallar el vector de error $[X]$ debemos de reducir la ecuación (4.96)

$$[A][X] = -[B]$$

$$[A]^{-1} * [A] * [X] = -[B] * [A]^{-1}$$

$$[X] = -[B] * [A]^{-1} \tag{4.97}$$

Remplazando los valores de las matrices $[B]$ $[A]$ y $[X]$ en (4.97)

$$\begin{bmatrix} \Delta\theta_3 \\ \Delta\theta_4 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} R2 * \cos(\theta_2) + R3 * \cos(\theta_3) - R4 * \cos(\theta_4) - R1 * \cos(\theta_1) \\ R2 * \sin(\theta_2) + R3 * \sin(\theta_3) - R4 * \sin(\theta_4) - R1 * \sin(\theta_1) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} -R3 * \sin.\theta_3 & R4 * \sin.\theta_4 \\ R3 * \cos.\theta_3 & -R4 * \cos.\theta_4 \end{bmatrix}^{-1} \tag{4.98}$$

Se resolvió el sistema en MATLAB®R2013b (Anexo F). se obtuvo los resultados de la variación angular del mecanismo, Tabla 4.31, la Figura 4.80 muestra estos resultados en funciona T2.



Tabla 4.31 Posiciones angulares.

| θ_2 [°] | θ_3 [°] | θ_4 [°] | θ_7 [°] |
|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 90.00 | 159.4355 | 104.8575 | 90.0000 |
| 95.00 | 169.4241 | 110.7382 | 99.9886 |
| 100.00 | 179.4780 | 116.5017 | 110.0425 |
| 105.00 | 189.5569 | 122.1374 | 120.1214 |
| 110.00 | 199.6311 | 127.6380 | 130.1957 |
| 115.00 | 209.6798 | 132.9992 | 140.2443 |
| 120.00 | 219.6890 | 138.2189 | 150.2535 |
| 125.00 | 229.6510 | 143.2970 | 160.2155 |
| 130.00 | 239.5629 | 148.2349 | 170.1274 |
| 135.00 | 249.4264 | 153.0352 | 179.9909 |
| 140.00 | 259.2475 | 157.7012 | 189.8120 |
| 145.00 | 269.0364 | 162.2366 | 199.6009 |
| 150.00 | 278.8085 | 166.6452 | 209.3730 |
| 155.00 | 288.5852 | 170.9303 | 219.1497 |
| 160.00 | 298.3967 | 175.0941 | 228.9612 |
| 165.00 | 308.2866 | 179.1371 | 238.8511 |
| 170.00 | 318.3216 | 183.0560 | 248.8861 |
| 175.00 | 328.6118 | 186.8402 | 259.1763 |
| 180.00 | 339.3658 | 190.4629 | 269.9303 |

Fuente: propia.

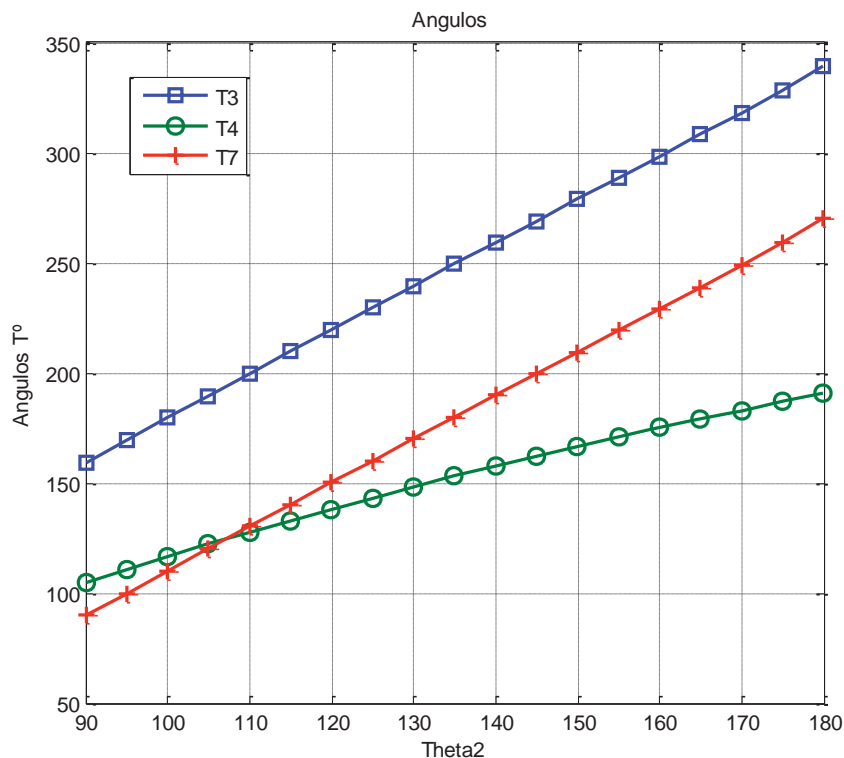


Figura 4.80 Variación angular.
Fuente propia.



Para validar estos resultados, se hizo uso del software SAM 6.1, primero se modelo el mecanismo Figura. 4.81, y se generaron las gráficas Figura 4.82 que concuerdan con las obtenidas en la Figura 4.80.

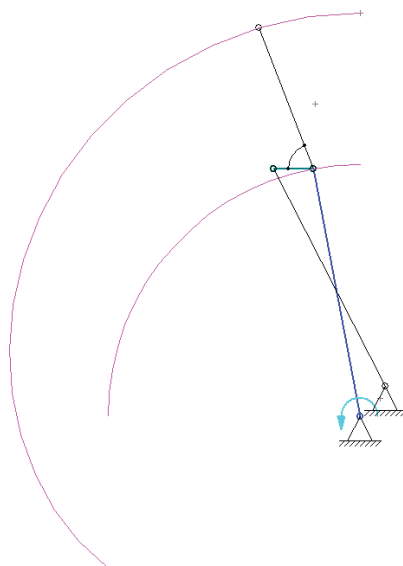


Figura 4.81 Modelado del mecanismo.
Fuente: Propia, simulación SAM6.1.

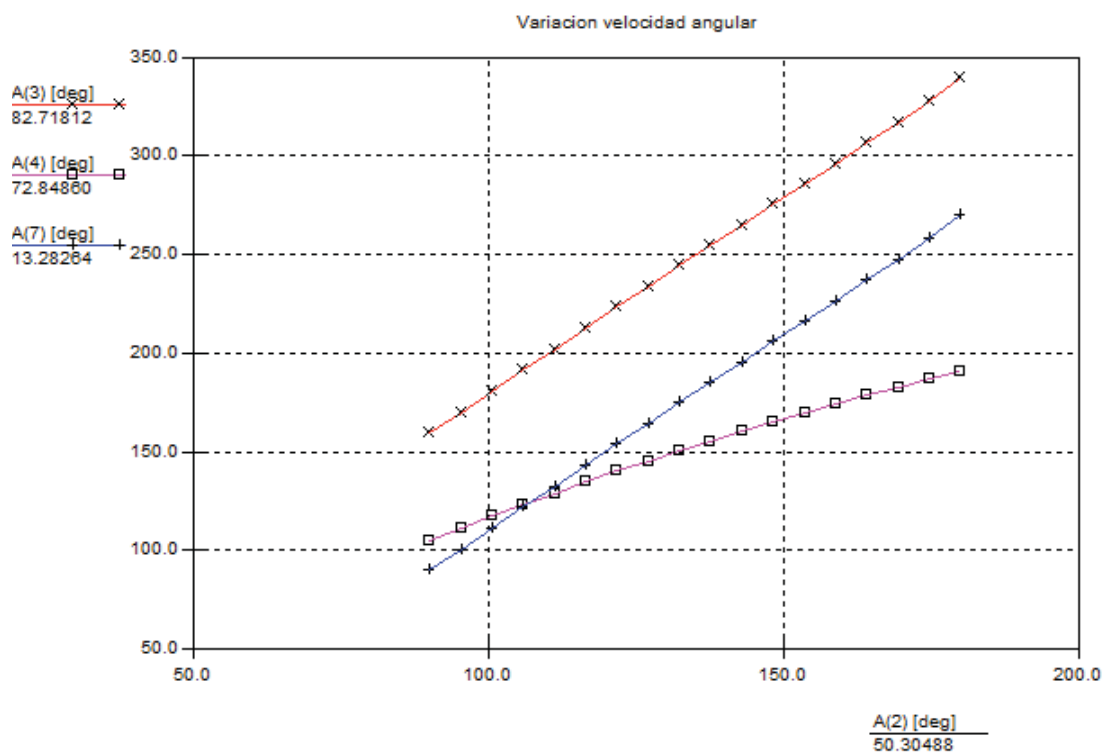


Figura 4.82 Resultado variación angular.
Fuente: Propia, simulación SAM6.1.



4.2.1.3 Cálculo de la velocidad angular del mecanismo.

La ecuación (4.93) que representa el lazo vectorial, se derivó respecto al tiempo para hallar las relaciones de velocidad angular en el mecanismo.

$$\frac{\sigma}{\sigma t} (R2 \cdot e^{i\theta_2} + R3 \cdot e^{i\theta_3} - R4e^{i\theta_4} - R1e^{i\theta_1}) \quad (4.99)$$

Derivando la ecuación (4.99).

$$R2 \cdot i \cdot \omega_2 \cdot e^{i\theta_2} + R3 \cdot i \cdot \omega_3 \cdot e^{i\theta_3} - R4 \cdot i \cdot \omega_4 \cdot e^{i\theta_4} = 0 \quad (4.100)$$

Al sustituir la ecuación (4.100) en la equivalencia de Euler (4.5), obtenemos las ecuaciones cartesianas para el mecanismo.

$$\begin{aligned} R2 \cdot \omega_2 \cdot (-\sin \theta_2 + i \cos \theta_2) + R3 \cdot \omega_3 (-\sin \theta_3 + i \cos \theta_3) - \\ R4 \cdot \omega_4 (-\sin \theta_4 + i \cos \theta_4) = 0 \end{aligned} \quad (4.101)$$

La ecuación (4.101), puede dividirse en sus partes real e imaginaria.

Parte real (dirección X)

$$f3 = -R2 * \omega_2 * \sin(\theta_2) - R3 * \omega_3 * \sin(\theta_3) + R4 * \omega_4 * \sin(\theta_4) = 0 \quad (4.102-a)$$

Parte imaginaria (dirección Y)

$$f4 = R2 * \omega_2 * \cos(\theta_2) + R3 * \omega_3 * \cos(\theta_3) - R4 * \omega_4 * \cos(\theta_4) = 0 \quad (4.102-b)$$

Como incógnitas ω_3 y ω_4 y dos ecuaciones f3 (4.102-a) y f4 (4.102-b) que las ordenaremos matricialmente, $\omega_2 = 0.7854$ rad/s (según (4.18)).

$$\begin{bmatrix} -R3 * \sin(\theta_3) & +R4 * \sin(\theta_4) \\ +R3 * \cos(\theta_3) & -R4 * \cos(\theta_4) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \omega_3 \\ \omega_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_2 * R2 * \sin(\theta_2) \\ -\omega_2 * R2 * \cos(\theta_2) \end{bmatrix} \quad (4.103)$$

Esta matriz es de la forma

$$[A] * [X] = [B]$$

Despejando:

$$[A]^{-1} * [A] * [X] = [B] * [A]^{-1}$$

$$[X] = [B] * [A]^{-1}$$



Se usó el software MATLAB®R2013b, para obtener los resultados de la matriz [X] que estará en función al ángulo θ_2 que tiene una variación de (90° a 180°) cada 5°, tabla 4.32.

Tabla 4.32 Variación de la velocidad angular.

| θ_2 [Rad/s] | ω_2 [Rad/s] | ω_3 [Rad/s] | ω_4 [Rad/s] | ω_7 [Rad/s] |
|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 90.00 | 0.7854 | 1.5613 | 0.9322 | 1.5613 |
| 95.00 | 0.7854 | 1.5754 | 0.9149 | 1.5754 |
| 100.00 | 0.7854 | 1.5821 | 0.8955 | 1.5821 |
| 105.00 | 0.7854 | 1.5835 | 0.8748 | 1.5835 |
| 110.00 | 0.7854 | 1.5809 | 0.8532 | 1.5809 |
| 115.00 | 0.7854 | 1.5756 | 0.831 | 1.5756 |
| 120.00 | 0.7854 | 1.5687 | 0.8088 | 1.5687 |
| 125.00 | 0.7854 | 1.5609 | 0.7866 | 1.5609 |
| 130.00 | 0.7854 | 1.5531 | 0.7648 | 1.5531 |
| 135.00 | 0.7854 | 1.5458 | 0.7434 | 1.5458 |
| 140.00 | 0.7854 | 1.5398 | 0.7226 | 1.5398 |
| 145.00 | 0.7854 | 1.5358 | 0.7024 | 1.5358 |
| 150.00 | 0.7854 | 1.5347 | 0.6827 | 1.5347 |
| 155.00 | 0.7854 | 1.5375 | 0.6635 | 1.5375 |
| 160.00 | 0.7854 | 1.546 | 0.6446 | 1.546 |
| 165.00 | 0.7854 | 1.5627 | 0.6255 | 1.5627 |
| 170.00 | 0.7854 | 1.5926 | 0.6054 | 1.5926 |
| 175.00 | 0.7854 | 1.6453 | 0.5828 | 1.6453 |
| 180.00 | 0.7854 | 1.7446 | 0.5536 | 1.7446 |

Fuente propia.

La Figura 4.83, muestra los resultados de la variación de la velocidad angular en función a t_2 .

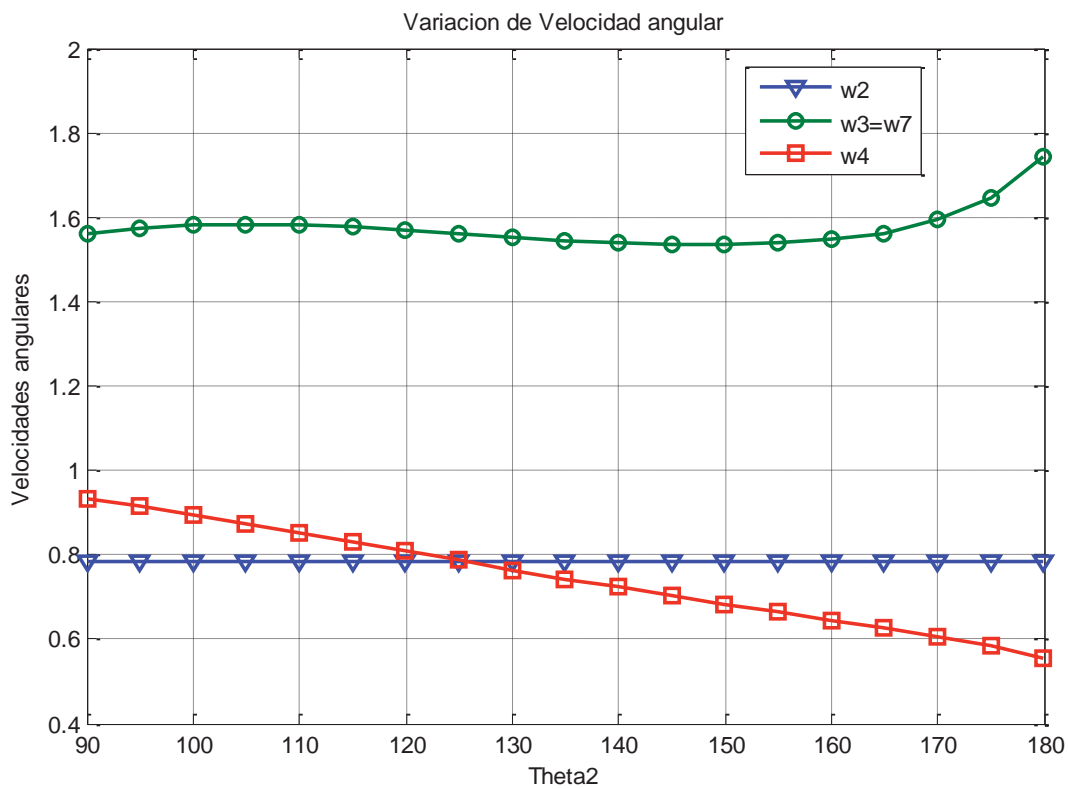


Figura 4.83 Variación de la velocidad angular.
Fuente propia.

Para validar los datos se hizo uso del software SAM 6.1. Se generaron las gráficas que concuerdan con los resultados obtenidos en MATLAB®R2013b, se puede ver los resultados en la Figura. 4.84.

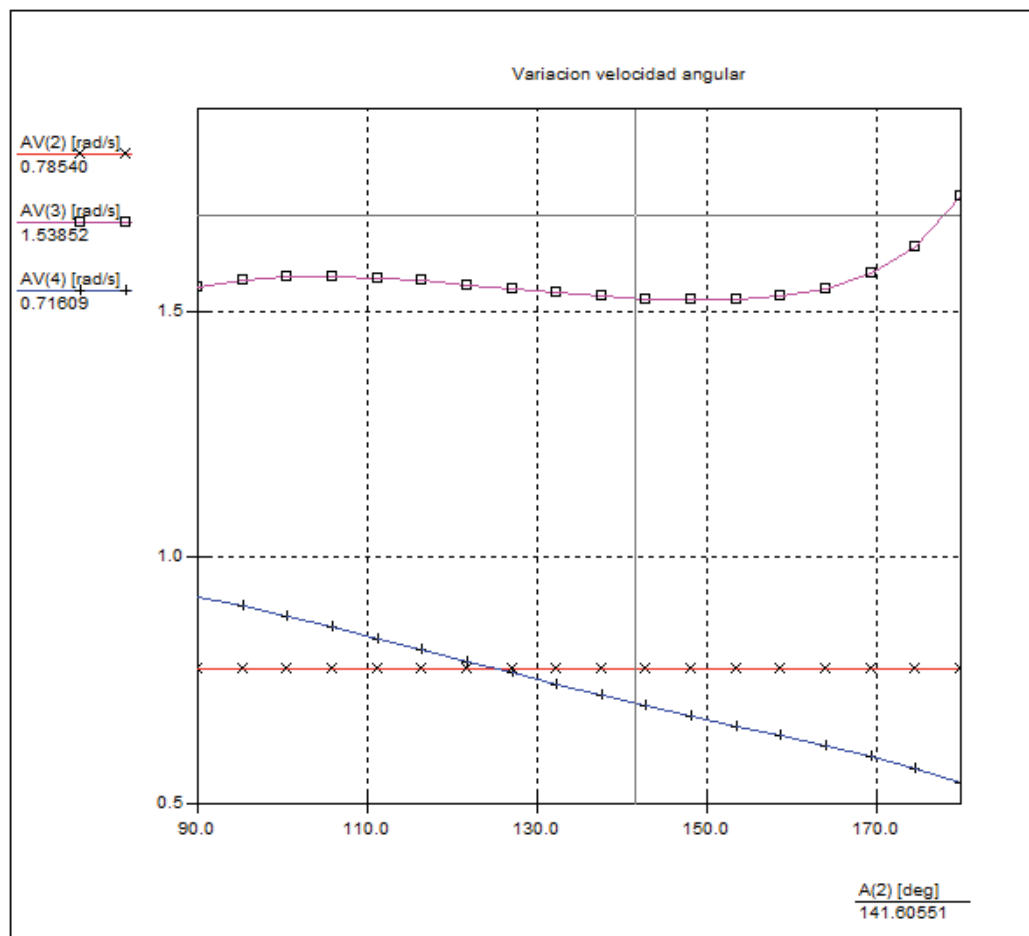


Figura 4.84 Variación de la velocidad angular.
Fuente Propia, simulación SAM.6.1.

4.2.1.4 Cálculo de las aceleraciones angulares del mecanismo.

De la ecuación (4.93). Se derivó dos veces respecto al tiempo para encontrar las relaciones de aceleración angular del mecanismo.

$$\frac{\sigma}{\sigma t} \left(\frac{\sigma}{\sigma t} (R2 \cdot e^{i\theta_2} + R3 \cdot e^{i\theta_3} - R4 e^{i\theta_4} - R1 e^{i\theta_1}) \right) \quad (4.104)$$

Derivando la ecuación.

$$R2 \cdot i \cdot \alpha_2 \cdot e^{i\theta_2} - R2 \cdot (\omega_2)^2 \cdot e^{i\theta_2} + R3 \cdot i \cdot \alpha_3 \cdot e^{i\theta_3} - R3 \cdot (\omega_3)^2 \cdot e^{i\theta_3} - R4 \cdot i \cdot \alpha_4 \cdot e^{i\theta_4} + R4 \cdot (\omega_4)^2 \cdot e^{i\theta_4} = 0 \quad (4.105)$$

Al sustituir (4.105) en la equivalencia de Euler (4.5), obtenemos las ecuaciones cartesianas para el mecanismo.



$$\begin{aligned}
 &R2. \alpha_2(-\text{Sin}\theta_2 + i \text{cos}\theta_2) - R2. (\omega_2)^2 (\text{cos}\theta_2 + i \text{Sin}\theta_2) + R3. \alpha_3(\text{cos}(\theta_3 - \beta) + \\
 &i \text{sen}(\theta_3 - \beta)) + R3. (\omega_3)^2 (\text{cos}\theta_3 + i \text{Sin}\theta_3) - R4. \alpha_4(-\text{Sin}\theta_4 + i \text{cos}\theta_4) + \\
 &R4. (\omega_4)^2 (\text{cos}\theta_4 + i \text{Sin}\theta_4) = 0
 \end{aligned} \tag{4.105}$$

La ecuación (4.105) puede dividirse en sus partes real e imaginaria.

Parte real (dirección x)

$$\begin{aligned}
 f5 = &-R2. \alpha_2. \text{Sin}(\theta_2) - R2(\omega_2)^2 \text{cos}(\theta_2) - R3. \alpha_3. \text{Sin}(\theta_3) - R3(\omega_3)^2 \text{cos}(\theta_3) + \\
 &R4. \alpha_2. \text{Sin}(\theta_4) + R4(\omega_4)^2 \text{cos}(\theta_4) = 0
 \end{aligned} \tag{4.106-a}$$

Parte imaginaria (dirección y)

$$\begin{aligned}
 f6 = &R2. \alpha_2. \text{Cos}(\theta_2) - R2(\omega_2)^2 \text{Sin}(\theta_2) + R3. \alpha_3. \text{cos}(\theta_3) - R3(\omega_3)^2 \text{Sin}(\theta_3) - \\
 &R4. \alpha_2. \text{cos}(\theta_4) + R4(\omega_4)^2 \text{Sin}(\theta_4) = 0
 \end{aligned} \tag{4.106-b}$$

De las ecuaciones f5 (4.106-a) y f6 (4.106-b), como incógnitas están α_3 y α_4 ω_2 es constante por consiguiente $\alpha_2 = 0.00 \text{ rad/s}^2$

$$\begin{aligned}
 &\begin{bmatrix} -R3 * \text{Sin}(\theta_3) & +R4 * \text{Sin}(\theta_4) \\ +R3 * \text{cos}(\theta_3) & -R4 * \text{cos}(\theta_4) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \alpha_3 \\ \alpha_4 \end{bmatrix} = \\
 &\begin{bmatrix} R2. \alpha_2. \text{Sin}(\theta_2) + R2(\omega_2)^2 \text{cos}(\theta_2) + R3(\omega_3)^2 \text{cos}(\theta_3) - R4(\omega_4)^2 \text{cos}(\theta_4) \\ -R2. \alpha_2. \text{Cos}(\theta_2) + R2(\omega_2)^2 \text{Sin}(\theta_2) + R3(\omega_3)^2 \text{Sin}(\theta_3) - R4(\omega_4)^2 \text{Sin}(\theta_4) \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{4.107}$$

Esta matriz es de la forma:

$$[A] * [X] = [B]$$

Que puede despejarse.

$$[A]^{-1} * [A] * [X] = [B] * [A]^{-1}$$

$$[X] = [B] * [A]^{-1}$$

Con el software MATLAB®R2013b, se obtuvo los resultados de la matriz $[X]$ que esta en función al ángulo θ_2 , Tabla (4-33).

Tabla 4.33 Aceleraciones angulares.

| | Aceleraciones Angulares (rad/seg ²) | | | |
|------------|---|------------|------------|------------|
| θ_2 | α_2 | α_3 | α_4 | α_7 |
| 90.0 | 0 | 0.1657 | -0.1457 | 0.1657 |



| | | | | |
|--------|---|---------|---------|---------|
| 95.00 | 0 | 0.0907 | -0.1661 | 0.0907 |
| 100.00 | 0 | 0.0341 | -0.1811 | 0.0341 |
| 105.00 | 0 | -0.0076 | -0.1913 | -0.0076 |
| 110.00 | 0 | -0.037 | -0.1974 | -0.037 |
| 115.00 | 0 | -0.0564 | -0.2003 | -0.0564 |
| 120.00 | 0 | -0.0674 | -0.2003 | -0.0674 |
| 125.00 | 0 | -0.0713 | -0.1983 | -0.0713 |
| 130.00 | 0 | -0.0689 | -0.1946 | -0.0689 |
| 135.00 | 0 | -0.0605 | -0.1899 | -0.0605 |
| 140.00 | 0 | -0.046 | -0.1846 | -0.046 |
| 145.00 | 0 | -0.0246 | -0.1793 | -0.0246 |
| 150.00 | 0 | 0.0055 | -0.1745 | 0.0055 |
| 155.00 | 0 | 0.0477 | -0.1711 | 0.0477 |
| 160.00 | 0 | 0.1084 | -0.1704 | 0.1084 |
| 165.00 | 0 | 0.2002 | -0.1747 | 0.2002 |
| 170.00 | 0 | 0.3508 | -0.1887 | 0.3508 |
| 175.00 | 0 | 0.629 | -0.224 | 0.629 |
| 180.00 | 0 | 1.2551 | -0.3171 | 1.2551 |

Fuente propia.

La Figura 4.85, muestra la variación de la aceleración angular en función a t2.

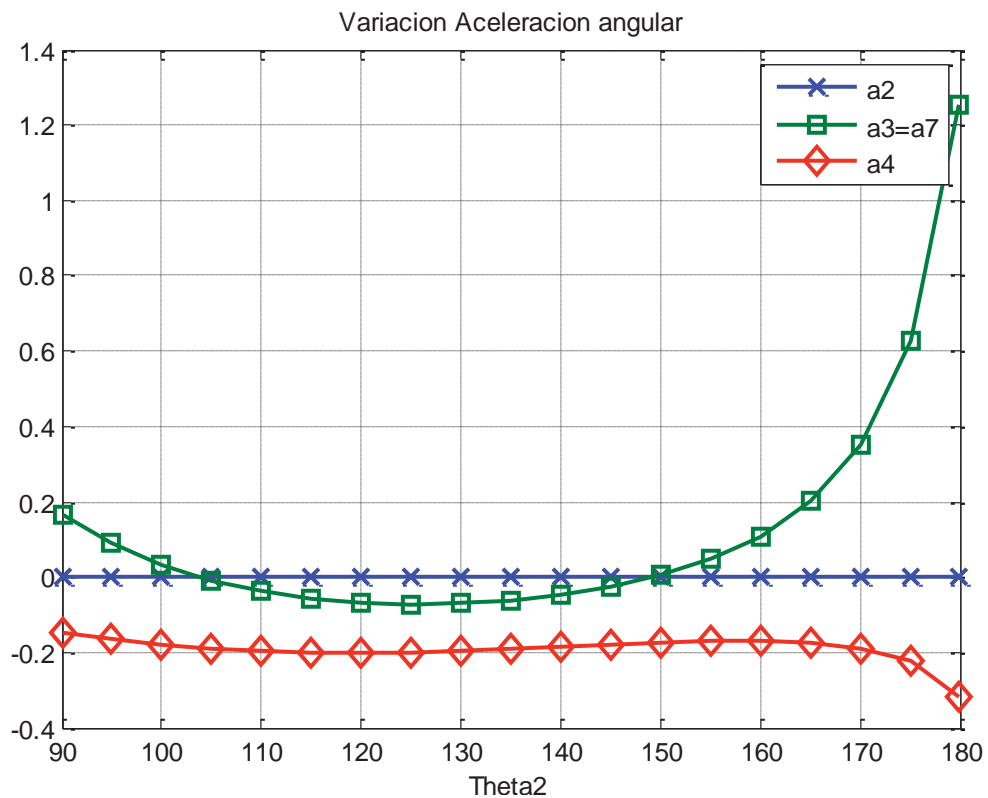


Figura 4.85 Aceleraciones angulares.
Fuente propia.



Para validar los datos se usó el software SAM 6.1. Se generaron las gráficas que concuerdan con los resultados obtenidos en MATLAB®R2013b, se puede ver los resultados en la Figura. 3.87.

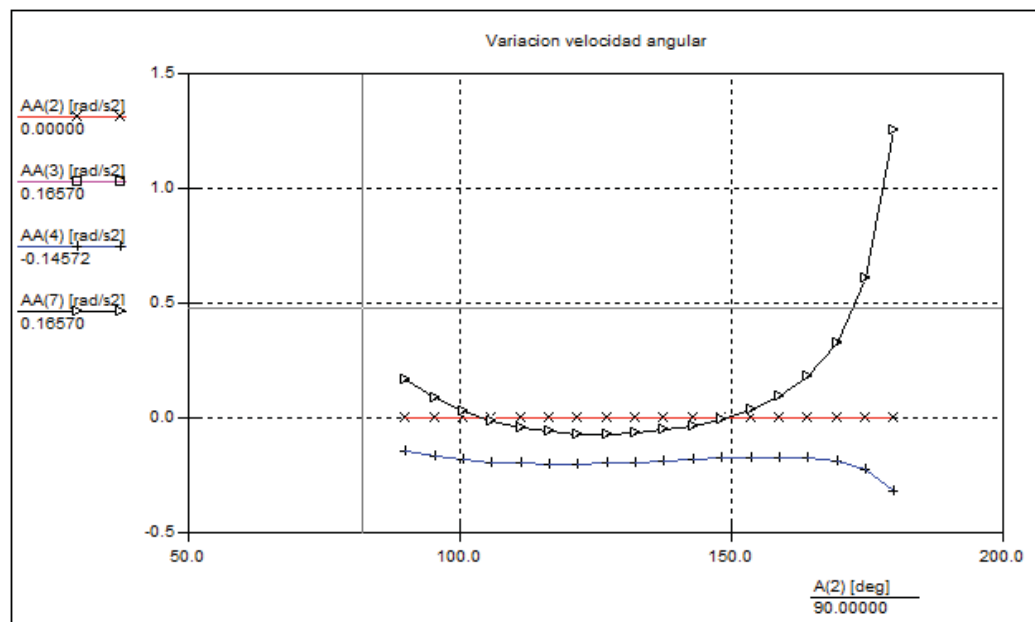


Figura 4.86 Aceleraciones Angulares Simulación Sam 6.1.
Fuente: Propia.

4.2.1.1 Centro de masa, cálculo de posición, velocidad y aceleración

4.2.1.1.1 Posiciones de los centro de masa, Momento de inercia, masa de los eslabones.

Con el software Autodesk Inventor 2015 se modeló los eslabones, Figura 4.87, y se obtuvo: la masa, los momentos de inercia y la ubicación de los centros de gravedad que estarán en función a un eje de coordenadas para cada uno de los elementos (Tabla 4-34, 4-35).

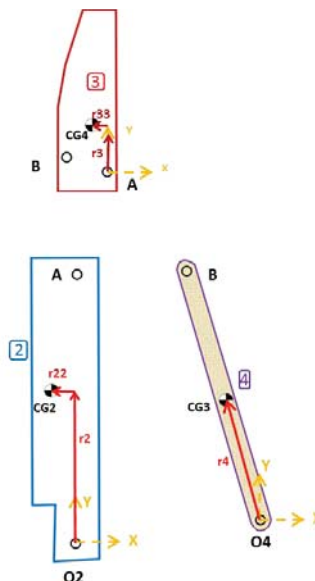


Figura 4.87 Ubicación de CG para 2,3,8.
Fuente propia.

Tabla 4.34 Masa, segundo momento de Inecia, para los eslabones.

| Eslabón | 2 | 3 | 4 |
|----------------------------------|-------|-------|-------|
| Masa(Kg) | 0,005 | 0,003 | 0,001 |
| I_{zz} [Kg – mm ²] | 1,455 | 0,335 | 0,029 |
| Origen coordenadas | O2 | A | O4 |

Fuente propia, Modelado Autodesk Inventor.

Tabla 4.35 Ubicación de los centros de gravedad respecto al origen de coordenadas.

| Centro de masa | CG2[mm] | | CG3[mm] | | CG4[mm] | |
|----------------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|
| [mm] | r2= | 25,00 | r3= | 11,93 | r4= | 24,20 |
| | r22= | 2,02 | rr3= | 3,00 | r44= | 0,000 |

Fuente propia.

Centro de gravedad Eslabón 2.

$$Rcg2x = r2 * \cos(\theta_2) + r22 * \cos(\theta_2 - 90) \tag{4.108-a}$$

$$Rcg2y = r2 * \sin(\theta_2) + r22 * \sin(\theta_2 - 90) \tag{4.108-b}$$

$$Rcg2 = (Rcg2x^2 + Rcg2y^2)^{1/2} \tag{4.108-c}$$

Centro de gravedad Eslabón 3.

$$Rcg3x = r3 * \cos(\theta_7) + r33 * \cos(\theta_7 + 90) \tag{4.109-a}$$

$$Rcg3y = r3 * \sin(\theta_7) + r33 * \sin(\theta_7 + 90) \tag{4.109-b}$$



$$Rcg3 = (Rcg3x^2 + Rcg3y^2)^{1/2} \tag{4.109-c}$$

Centro de gravedad Eslabón 4.

$$Rcg4x = r4 * \cos(\theta_4) + r44 * \cos(\theta_4 + 90) \tag{4.110-a}$$

$$Rcg4y = r4 * \sin(\theta_4) + r44 * \sin(\theta_4 + 90) \tag{4.110-b}$$

$$Rcg4 = (Rcg4x^2 + Rcg4y^2)^{1/2} \tag{4.110-c}$$

4.2.1.1.2 Cálculo de vectores de posición.

Se hace uso de un sistema de coordenadas no rotacionales ubicadas en el cg de cada eslabón, según puede verse en la Figura 4.88.

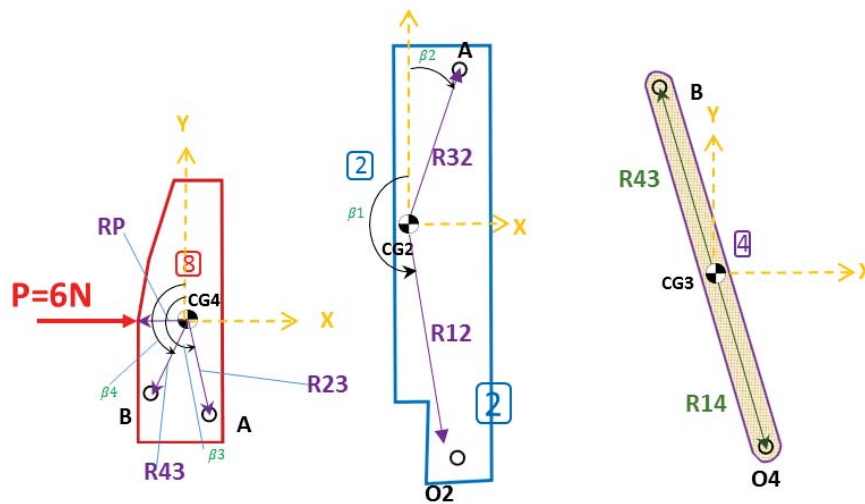


Figura 4.88 Vectores de posición.
Fuente propia.

En la Tabla 4.36 se generalizar las fórmulas de los vectores de posicionamiento.

Las Tablas (4.37.), (4.38), (4.39); muestran los resultados de los vectores de posicionamiento en función a T2.



Tabla 4.36 Ecuaciones vectores de posicionamiento.

| Eslabón | Elementos constantes | Ecuaciones vectores |
|---------|----------------------------|---------------------------------|
| 2 | R12 = 25,081 | $R12x=R12*\cos(\theta2+\beta1)$ |
| | R32 = 25,081 | $R12y=R12*\sin(\theta2+\beta1)$ |
| | $\beta1 = 184,617$ | $R32x=R32*\cos(\theta2+\beta2)$ |
| | $\beta2 = 4,647$ | $R32y=R32*\sin(\theta2+\beta2)$ |
| 3 | R23 = 12,301 | $R23x=R23*\cos(\theta7+\beta4)$ |
| | R43 = 10,155 | $R23y=R23*\sin(\theta7+\beta4)$ |
| | Rp = 5,906 | $R43x=R43*\cos(\theta7+\beta5)$ |
| | $\beta4 = 154,280$ | $R43y=R43*\sin(\theta7+\beta5)$ |
| | | $Rpx=Rp*\cos(\theta10-90)$ |
| | $Rpy=Rp*\sin(\theta10-90)$ | |
| 4 | R14 = 24,196 | $R14x=R14*\cos(\theta4+180)$ |
| | | $R14y=R14*\sin(\theta4+180)$ |
| | | $R34x=R34*\cos(\theta4)$ |
| | | $R34y=R34*\sin(\theta4)$ |

Fuente: propia.

Tabla 4.37 Vectores de posicionamiento eslabón 2.

| Theta 2 | r12x[mm] | r12y[mm] | r32x[mm] | r32y[mm] |
|---------|----------|----------|----------|----------|
| 90.00 | 2.019 | -25.000 | 2.032 | 24.999 |
| 95.00 | 4.190 | -24.729 | -0.154 | 25.081 |
| 100.00 | 6.330 | -24.270 | -2.340 | 24.972 |
| 105.00 | 8.421 | -23.626 | -4.507 | 24.673 |
| 110.00 | 10.448 | -22.802 | -6.641 | 24.186 |
| 115.00 | 12.395 | -21.804 | -8.723 | 23.515 |
| 120.00 | 14.249 | -20.641 | -10.740 | 22.665 |
| 125.00 | 15.993 | -19.321 | -12.674 | 21.643 |
| 130.00 | 17.616 | -17.853 | -14.512 | 20.456 |
| 135.00 | 19.105 | -16.250 | -16.240 | 19.114 |
| 140.00 | 20.449 | -14.523 | -17.844 | 17.625 |
| 145.00 | 21.637 | -12.686 | -19.312 | 16.003 |
| 150.00 | 22.660 | -10.752 | -20.633 | 14.259 |
| 155.00 | 23.511 | -8.736 | -21.798 | 12.407 |
| 160.00 | 24.183 | -6.653 | -22.796 | 10.460 |
| 165.00 | 24.671 | -4.520 | -23.621 | 8.433 |
| 170.00 | 24.971 | -2.353 | -24.266 | 6.342 |
| 175.00 | 25.081 | -0.168 | -24.726 | 4.203 |
| 180.00 | 25.000 | 2.019 | -24.999 | 2.032 |

Fuente: propia.



Tabla 4.38 Vectores de posicionamiento eslabón 3.

| | [mm] | | | | | |
|---------|--------|---------|--------|---------|-------|--------|
| Theta 2 | r23x | r23y | r43x | r43y | rpx | rpy |
| 90.0 | 3.003 | -11.929 | -4.407 | -9.149 | -5.91 | 0.000 |
| 95.0 | 5.027 | -11.227 | -2.753 | -9.775 | -5.82 | -1.024 |
| 100.0 | 6.909 | -10.177 | -1.005 | -10.105 | -5.55 | -2.024 |
| 105.0 | 8.584 | -8.811 | 0.779 | -10.125 | -5.11 | -2.964 |
| 110.0 | 9.993 | -7.174 | 2.539 | -9.833 | -4.51 | -3.812 |
| 115.0 | 11.091 | -5.320 | 4.215 | -9.239 | -3.78 | -4.540 |
| 120.0 | 11.847 | -3.311 | 5.757 | -8.366 | -2.93 | -5.128 |
| 125.0 | 12.241 | -1.212 | 7.117 | -7.244 | -2.00 | -5.557 |
| 130.0 | 12.267 | 0.913 | 8.258 | -5.910 | -1.01 | -5.819 |
| 135.0 | 11.930 | 3.001 | 9.148 | -4.409 | 0.00 | -5.906 |
| 140.0 | 11.243 | 4.992 | 9.766 | -2.783 | 1.01 | -5.820 |
| 145.0 | 10.230 | 6.831 | 10.097 | -1.082 | 1.98 | -5.564 |
| 150.0 | 8.923 | 8.468 | 10.135 | 0.647 | 2.90 | -5.147 |
| 155.0 | 7.355 | 9.860 | 9.877 | 2.359 | 3.73 | -4.580 |
| 160.0 | 5.567 | 10.969 | 9.331 | 4.007 | 4.45 | -3.878 |
| 165.0 | 3.600 | 11.763 | 8.504 | 5.550 | 5.05 | -3.055 |
| 170.0 | 1.496 | 12.210 | 7.407 | 6.947 | 5.51 | -2.128 |
| 175.0 | -0.710 | 12.281 | 6.047 | 8.159 | 5.80 | -1.109 |
| 180.0 | -2.989 | 11.933 | 4.418 | 9.144 | 5.91 | -0.007 |

Fuente: propia.

Tabla 4.39 Vectores de posicionamiento eslabón 1,4.

| | [mm] | | | |
|--------|--------|---------|---------|--------|
| Theta2 | r14x | r14y | r34x | r34y |
| 90.0 | 6.205 | -23.390 | -6.205 | 23.390 |
| 95.0 | 8.569 | -22.631 | -8.569 | 22.631 |
| 100.0 | 10.798 | -21.656 | -10.798 | 21.656 |
| 105.0 | 12.873 | -20.491 | -12.873 | 20.491 |
| 110.0 | 14.778 | -19.163 | -14.778 | 19.163 |
| 115.0 | 16.504 | -17.698 | -16.504 | 17.698 |
| 120.0 | 18.045 | -16.124 | -18.045 | 16.124 |
| 125.0 | 19.401 | -14.463 | -19.401 | 14.463 |
| 130.0 | 20.574 | -12.739 | -20.574 | 12.739 |
| 135.0 | 21.568 | -10.973 | -21.568 | 10.973 |
| 140.0 | 22.389 | -9.182 | -22.389 | 9.182 |
| 145.0 | 23.045 | -7.383 | -23.045 | 7.383 |
| 150.0 | 23.545 | -5.590 | -23.545 | 5.590 |
| 155.0 | 23.897 | -3.815 | -23.897 | 3.815 |
| 160.0 | 24.110 | -2.070 | -24.110 | 2.070 |
| 165.0 | 24.196 | -0.364 | -24.196 | 0.364 |



| | | | | |
|-------|--------|-------|---------|--------|
| 170.0 | 24.165 | 1.290 | -24.165 | -1.290 |
| 175.0 | 24.027 | 2.882 | -24.027 | -2.882 |
| 180.0 | 23.797 | 4.395 | -23.797 | -4.395 |

Fuente: propia.

4.2.1.1.3 Velocidad de los centro de masa.

La velocidades serán absolutas tendrán como punto de referencia O2,

Velocidad centro de gravedad Eslabón 2.

$$V_{cg2x} = -r2 * \omega_2 * \sin(\theta_2) - r22 * \omega_2 * \sin(\theta_2 + 90) \quad (4.111-a)$$

$$V_{cg2y} = +r2 * \omega_2 * \cos(\theta_2) + r22 * \omega_2 * \cos(\theta_2 + 90) \quad (4.111-b)$$

$$V_{cg2} = (V_{cg2x}^2 + V_{cg2y}^2)^{1/2} \quad (4.111-c)$$

Velocidad centro de gravedad Eslabón 3.

$$V_{Ax} = -R2 * \omega_2 * \sin(\theta_2) \quad (4.112-a)$$

$$V_{Ay} = +R2 * \omega_2 * \cos(\theta_2) \quad (4.112-b)$$

$$V_{cg3x} = V_{Ax} - r3 * \omega_3 * \sin(\theta_7) - r33 * \omega_3 * \sin(\theta_7 + 90) \quad (4.113-a)$$

$$V_{cg3y} = V_{Ay} + r3 * \omega_3 * \cos(\theta_7) + r33 * \omega_3 * \cos(\theta_7 + 90) \quad (4.113-b)$$

$$V_{cg3} = (V_{cg3x}^2 + V_{cg3y}^2)^{1/2} \quad (4.113-c)$$

Velocidad centro de gravedad Eslabón 4.

$$V_{cg4x} = -r3 * \omega_3 * \sin(\theta_4) \quad (4.114-a)$$

$$V_{cg4y} = +r4 * \omega_4 * \cos(\theta_4) \quad (4.114-b)$$

$$V_{cg4} = (V_{cg4x}^2 + V_{cg4y}^2)^{1/2} \quad (4.114-c)$$

4.2.1.1.4 Aceleraciones de los centro de masa.

Aceleración centro de gravedad Eslabón 2

$$A_{cg2x} = -r2 * a_2 * \sin(\theta_2) - r2 * \omega_2^2 * \cos(\theta_2) - r22 * a_2 * \sin(\theta_2 - 90) - r22 * \omega_2^2 * \cos(\theta_2 + 90). \quad (4.115-a)$$

$$A_{cg2y} = +r2 * a_2 * \cos(\theta_2) - r2 * \omega_2^2 * \sin(\theta_2) + r22 * a_2 * \cos(\theta_2 - 90) - r22 * \omega_2^2 * \sin(\theta_2 + 90). \quad (4.115-b)$$

$$A_{cg2} = (A_{cg2x}^2 + A_{cg2y}^2)^{1/2}. \quad (4.115-c)$$



Aceleración centro de gravedad Eslabón 3.

$$Aax = -R2 * a_2 * \sin(\theta_2) - R2 * \omega_2^2 * \cos(\theta_2) \quad (4.116-a)$$

$$Aay = +R2 * a_2 * \cos(\theta_2) + R2 * \omega_2^2 * \sin(\theta_2) \quad (4.116-b)$$

$$Acg3x = Aax - r3 * a_3 * \sin(\theta_7) - r3 * \omega_3^2 * \cos(\theta_7) - r33 * a_3 * \sin(\theta_7 + 90) - r33 * \omega_3^2 * \cos(\theta_7 + 90). \quad (4.116-c)$$

$$Acg3y = Aay + r3 * a_3 * \cos(\theta_7) - r3 * \omega_3^2 * \sin(\theta_7) + r33 * a_3 * \cos(\theta_7 + 90) - r33 * \omega_3^2 * \sin(\theta_7 + 90). \quad (4.116-d)$$

$$Acg3 = (Acg3x^2 + Acg3y^2)^{1/2}. \quad (4.116-e)$$

Aceleración centro de gravedad Eslabón 4

$$Acg4x = -r4 * a_4 * \sin(\theta_4) - r4 * \omega_4^2 * \cos(\theta_4). \quad (4.117-a)$$

$$Acg4y = +r2 * a_4 * \cos(\theta_4) - r4 * \omega_4^2 * \sin(\theta_4). \quad (4.117-b)$$

$$Acg4 = (Acg4x^2 + Acg4y^2)^{1/2}. \quad (4.117-c)$$

La tabla 4.40; muestra las velocidad absolutas de los C.g. las tablas 4.41 y 4.42 muestra las aceleraciones absolutas de los C.g. de cada eslabón.

Tabla 4.40 Velocidad de Cg de los eslabones.

| T2° | Vcg2[mm/s2] | Vcg3[mm/s2] | Vcg4[mm/s2] |
|-------|-------------|-------------|-------------|
| 90.0 | 19.6989 | 58.0842 | 22.5594 |
| 95.0 | 19.699 | 57.929 | 22.139 |
| 100.0 | 19.699 | 57.580 | 21.671 |
| 105.0 | 19.699 | 57.064 | 21.169 |
| 110.0 | 19.699 | 56.406 | 20.646 |
| 115.0 | 19.699 | 55.629 | 20.111 |
| 120.0 | 19.699 | 54.751 | 19.571 |
| 125.0 | 19.699 | 53.789 | 19.035 |
| 130.0 | 19.699 | 52.760 | 18.507 |
| 135.0 | 19.699 | 51.674 | 17.989 |
| 140.0 | 19.699 | 50.542 | 17.486 |
| 145.0 | 19.699 | 49.369 | 16.997 |
| 150.0 | 19.699 | 48.162 | 16.521 |
| 155.0 | 19.699 | 46.921 | 16.057 |
| 160.0 | 19.699 | 45.645 | 15.599 |
| 165.0 | 19.699 | 44.327 | 15.136 |
| 170.0 | 19.699 | 42.953 | 14.651 |
| 175.0 | 19.699 | 41.498 | 14.103 |
| 180.0 | 19.699 | 39.915 | 13.397 |

Fuente propia.

Tabla 4.41 Aceleración Cg [mm/s²].

| T2° | Acg2x | Acg2y | Ag3x | Acg3y | Acg4x | Acg4y |
|--------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|
| 90.00 | 1.245 | -15.421 | 5.344 | -60.419 | 8.801 | -19.424 |
| 95.00 | 2.585 | -15.254 | 14.144 | -59.045 | 10.932 | -17.518 |
| 100.00 | 3.904 | -14.971 | 22.304 | -56.085 | 12.582 | -15.412 |
| 105.00 | 5.194 | -14.574 | 29.573 | -51.820 | 13.771 | -13.219 |
| 110.00 | 6.445 | -14.065 | 35.789 | -46.542 | 14.540 | -11.031 |
| 115.00 | 7.646 | -13.450 | 40.870 | -40.535 | 14.942 | -8.918 |
| 120.00 | 8.789 | -12.733 | 44.797 | -34.060 | 15.034 | -6.931 |
| 125.00 | 9.866 | -11.918 | 47.602 | -27.345 | 14.872 | -5.102 |
| 130.00 | 10.867 | -11.013 | 49.351 | -20.579 | 14.513 | -3.446 |
| 135.00 | 11.785 | -10.024 | 50.134 | -13.916 | 14.003 | -1.968 |
| 140.00 | 12.614 | -8.959 | 50.055 | -7.472 | 13.385 | -0.661 |
| 145.00 | 13.347 | -7.825 | 49.229 | -1.327 | 12.692 | 0.489 |
| 150.00 | 13.978 | -6.632 | 47.773 | 4.474 | 11.950 | 1.503 |
| 155.00 | 14.503 | -5.389 | 45.810 | 9.924 | 11.174 | 2.410 |
| 160.00 | 14.917 | -4.104 | 43.477 | 15.065 | 10.371 | 3.249 |
| 165.00 | 15.218 | -2.788 | 40.940 | 20.023 | 9.530 | 4.085 |
| 170.00 | 15.403 | -1.451 | 38.451 | 25.089 | 8.614 | 5.033 |
| 175.00 | 15.471 | -0.103 | 36.530 | 31.001 | 7.515 | 6.360 |
| 180.00 | 15.421 | 1.245 | 36.723 | 40.070 | 5.900 | 8.892 |

Fuente propia.

Tabla 4.42 Aceleración Cg [mm/s²].

| T2° | Acg2 [mm/s ²] | Acg3 [mm/s ²] | Acg4 [mm/s ²] |
|--------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 90.00 | 15.472 | 60.655 | 21.325 |
| 95.00 | 15.472 | 60.715 | 20.649 |
| 100.00 | 15.472 | 60.357 | 19.896 |
| 105.00 | 15.472 | 59.664 | 19.089 |
| 110.00 | 15.472 | 58.711 | 18.251 |
| 115.00 | 15.472 | 57.563 | 17.401 |
| 120.00 | 15.472 | 56.275 | 16.555 |
| 125.00 | 15.472 | 54.897 | 15.723 |
| 130.00 | 15.472 | 53.470 | 14.916 |
| 135.00 | 15.472 | 52.029 | 14.141 |
| 140.00 | 15.472 | 50.610 | 13.401 |
| 145.00 | 15.472 | 49.247 | 12.702 |
| 150.00 | 15.472 | 47.982 | 12.044 |
| 155.00 | 15.472 | 46.873 | 11.431 |
| 160.00 | 15.472 | 46.013 | 10.868 |
| 165.00 | 15.472 | 45.574 | 10.369 |
| 170.00 | 15.472 | 45.912 | 9.976 |
| 175.00 | 15.472 | 47.912 | 9.845 |
| 180.00 | 15.472 | 54.353 | 10.672 |

Fuente propia.



4.2.2 Cinética del mecanismo.

4.2.2.1 Análisis de fuerzas en el mecanismo.

Al igual que el diseño del dedo índice haremos uso de la segunda ley de Newton, ecuaciones (4.65-a), (4.65-b), (4.65-c). La Figura 4.89, muestra el D.C.L. del mecanismo.

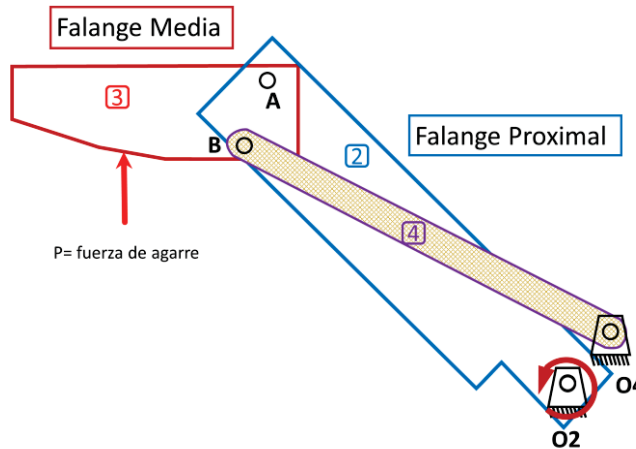


Figura 4.89 Mecanismo del dedo índice.
Fuente propia.

De las consideraciones de diseño, fuerza de agarre de 6N, esta fuerza será dada por un actuador ubicado en O2, T2 tendrá un movimiento de 90° es decir que hará un recorrido desde 90° hasta 180° , la Figura 4.90, muestra el D.C.L. del mecanismo.

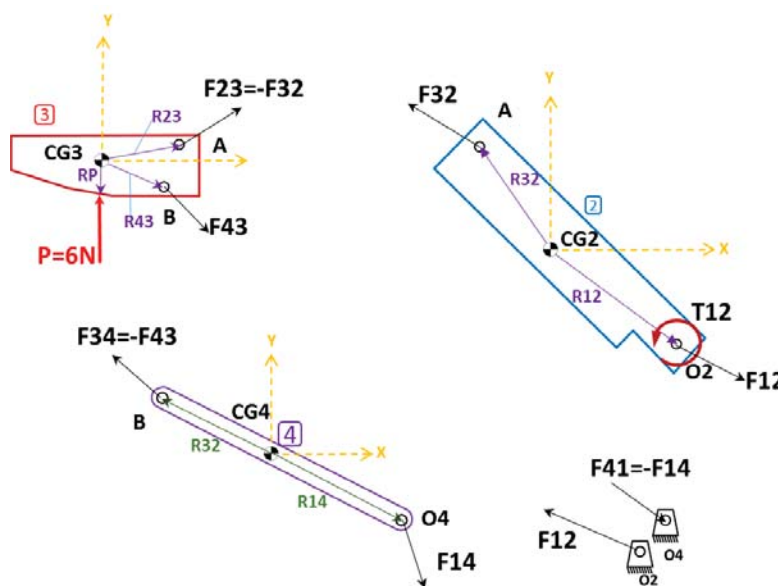


Figura 4.90 D.C.L. mecanismo.
Fuente propia.



Definido los vectores de fuerza se usara las ecuaciones: (4.65.a), (4.65.b) y (4.65.c) para cada uno de los eslabones del mecanismo.

Eslabón 2.

$$F_{12x} + F_{32x} = m_2 * (acg)_{2x}. \quad (4.118-a)$$

$$F_{12y} + F_{32y} = m_2 * (acg)_{2y}. \quad (4.118-b)$$

$$T_{12} + (R_{12x} * F_{12y} - R_{12y} * F_{12x}) + (R_{32x} * F_{32y} - R_{32y} * F_{32x}) = I_{G2} * \alpha_2. \quad (4.118-c)$$

Eslabón 3.

$$F_{43x} - F_{32x} + P_x = m_3 * (acg)_{3x}. \quad (4.119-a)$$

$$F_{43y} - F_{32y} - P_y = m_3 * (acg)_{3y}. \quad (4.119-b)$$

$$(R_{43x} * F_{43y} - R_{43y} * F_{43x}) - (R_{23x} * F_{32y} - R_{23y} * F_{32x}) + (R_{px} * P_y - R_{py} * P_x) = I_{G3} * \alpha_3. \quad (4.119c)$$

Eslabón 4.

$$F_{14x} - F_{43x} = m_4 * (acg)_{4x}. \quad (4.120-a)$$

$$F_{14y} - F_{43y} = m_4 * (acg)_{4y}. \quad (4.120-b)$$

$$(R_{14x} * F_{14y} - R_{14y} * F_{14x}) - (R_{34x} * F_{43y} - R_{34y} * F_{43x}) = I_{G4} * \alpha_4. \quad (4.120-c)$$

Donde:

F_x = Fuerza en dirección x.

F_y = Fuerza en dirección y.

m_n = Masa del eslabón n.

$(acg)_n$ = Aceleración lineal del eslabón n.

I_{cg} = Segundo momento de Inercia eslabón n.

α = Aceleración angular.

Para estas 9 ecuaciones existen 9 incógnitas:

$F_{12x}, F_{12y}, F_{32x}, F_{32y}, F_{43x}, F_{43y}, F_{14x}, F_{14y}, F_{83x}, F_{83y}, F_{98x}, F_{92x}, F_{92y}, T_{12},$



Se reordena, poniendo los términos constantes a la derecha y luego de forma matricial.

$$\begin{bmatrix}
 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 -R12y & R12x & -R32y & R32x & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\
 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & R23x & R23x & -R43y & R43x & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & R34y & -R34x & -R14y & R14x & 0
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 F12x \\
 F12y \\
 F32x \\
 F32y \\
 F43x \\
 F43y \\
 F14x \\
 F14y \\
 T12
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 m_2 * (acg)_{2x} \\
 m_2 * (acg)_{2y} \\
 I_{G2} * \alpha_2 \\
 m_3 * (acg)_{3x} - Px \\
 m_3 * (acg)_{3y} - Py \\
 I_{G3} * \alpha_3 - (Rpx * Py - Rpy * Px) \\
 m_4 * (acg)_{4x} \\
 m_4 * (acg)_{4y} \\
 I_{G4} * \alpha_4
 \end{bmatrix}
 \tag{4.121}$$

Las Tablas (4.43), (4.45), (4.46); muestran el resultado de las fuerzas en el mecanismo y el par torsos al resolver el sistema.

Tabla 4.43 Fuerzas aplicadas en eslabón 2 (Newton).

| θ2 | f12[N] | f32[N] | f12x[N] | f12y[N] | f32x[N] | f32y[N] | T2 par[N-mm] |
|-------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|--------------|
| 90.0 | 13.903 | 13.903 | -8.846 | 10.727 | 8.846 | -10.727 | 442.410 |
| 95.0 | 13.105 | 13.105 | -9.657 | 8.859 | 9.657 | -8.859 | 442.540 |
| 100.0 | 12.360 | 12.360 | -10.167 | 7.029 | 10.167 | -7.029 | 439.680 |
| 105.0 | 11.665 | 11.665 | -10.400 | 5.283 | 10.400 | -5.283 | 434.000 |
| 110.0 | 11.015 | 11.015 | -10.390 | 3.658 | 10.390 | -3.658 | 425.700 |
| 115.0 | 10.407 | 10.407 | -10.175 | 2.184 | 10.175 | -2.184 | 415.010 |
| 120.0 | 9.836 | 9.836 | -9.796 | 0.884 | 9.796 | -0.884 | 402.160 |
| 125.0 | 9.299 | 9.299 | -9.296 | -0.230 | 9.296 | 0.230 | 387.400 |
| 130.0 | 8.795 | 8.795 | -8.720 | -1.149 | 8.720 | 1.149 | 370.960 |
| 135.0 | 8.325 | 8.325 | -8.112 | -1.874 | 8.112 | 1.874 | 353.080 |
| 140.0 | 7.894 | 7.894 | -7.518 | -2.410 | 7.518 | 2.410 | 333.960 |
| 145.0 | 7.513 | 7.513 | -6.984 | -2.770 | 6.984 | 2.770 | 313.790 |
| 150.0 | 7.201 | 7.201 | -6.558 | -2.973 | 6.558 | 2.973 | 292.740 |
| 155.0 | 6.991 | 6.992 | -6.294 | -3.044 | 6.294 | 3.044 | 270.970 |
| 160.0 | 6.944 | 6.944 | -6.255 | -3.014 | 6.255 | 3.014 | 248.640 |
| 165.0 | 7.152 | 7.152 | -6.525 | -2.928 | 6.525 | 2.928 | 225.920 |
| 170.0 | 7.774 | 7.774 | -7.234 | -2.846 | 7.234 | 2.846 | 203.040 |
| 175.0 | 9.082 | 9.082 | -8.618 | -2.867 | 8.618 | 2.867 | 180.480 |
| 180.0 | 11.663 | 11.663 | -11.219 | -3.187 | 11.219 | 3.187 | 159.490 |

Fuente propia.



Tabla 4.44 Fuerzas aplicadas en eslabón 3 (Newton).

| $\theta 2$ | f23[N] | f43[N] | P | f23x[N] | f23y[N] | f43x[N] | f43y[N] | Px | Py |
|------------|--------|--------|-------|---------|---------|---------|---------|--------|-------|
| 90.00 | 13.903 | 11.098 | 6.000 | -8.846 | 10.727 | 2.846 | -10.727 | 6.000 | 0.000 |
| 95.00 | 13.105 | 10.586 | 6.000 | -9.657 | 8.859 | 3.748 | -9.900 | 5.909 | 1.041 |
| 100.00 | 12.360 | 10.152 | 6.000 | -10.167 | 7.029 | 4.530 | -9.085 | 5.637 | 2.056 |
| 105.00 | 11.665 | 9.795 | 6.000 | -10.400 | 5.283 | 5.210 | -8.294 | 5.190 | 3.011 |
| 110.00 | 11.015 | 9.509 | 6.000 | -10.390 | 3.658 | 5.807 | -7.530 | 4.583 | 3.872 |
| 115.00 | 10.407 | 9.294 | 6.000 | -10.175 | 2.184 | 6.338 | -6.797 | 3.837 | 4.613 |
| 120.00 | 9.836 | 9.145 | 6.000 | -9.796 | 0.884 | 6.819 | -6.093 | 2.977 | 5.209 |
| 125.00 | 9.299 | 9.062 | 6.000 | -9.296 | -0.230 | 7.265 | -5.416 | 2.031 | 5.646 |
| 130.00 | 8.795 | 9.046 | 6.000 | -8.720 | -1.149 | 7.691 | -4.762 | 1.029 | 5.911 |
| 135.00 | 8.325 | 9.100 | 6.000 | -8.112 | -1.874 | 8.111 | -4.126 | 0.001 | 6.000 |
| 140.00 | 7.894 | 9.231 | 6.000 | -7.518 | -2.410 | 8.540 | -3.502 | -1.023 | 5.912 |
| 145.00 | 7.513 | 9.447 | 6.000 | -6.984 | -2.770 | 8.997 | -2.882 | -2.013 | 5.652 |
| 150.00 | 7.201 | 9.765 | 6.000 | -6.558 | -2.973 | 9.501 | -2.256 | -2.943 | 5.229 |
| 155.00 | 6.992 | 10.210 | 6.000 | -6.294 | -3.044 | 10.083 | -1.610 | -3.788 | 4.653 |
| 160.00 | 6.944 | 10.821 | 6.000 | -6.255 | -3.014 | 10.781 | -0.925 | -4.526 | 3.939 |
| 165.00 | 7.152 | 11.662 | 6.000 | -6.525 | -2.928 | 11.660 | -0.176 | -5.135 | 3.104 |
| 170.00 | 7.774 | 12.849 | 6.000 | -7.234 | -2.846 | 12.831 | 0.685 | -5.597 | 2.161 |
| 175.00 | 9.082 | 14.615 | 6.000 | -8.618 | -2.867 | 14.511 | 1.741 | -5.893 | 1.127 |
| 180.00 | 11.663 | 17.510 | 6.000 | -11.219 | -3.187 | 17.219 | 3.180 | -6.000 | 0.007 |

Fuente propia.

Tabla 4.45 Fuerzas aplicadas en eslabón 4 (Newton).

| $\theta 2$ | f14[N] | f34[N] | f14x[N] | f14y[N] | f34x[N] | f34y[N] |
|------------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|
| 90.00 | 11.098 | 11.098 | 2.846 | -10.727 | -2.846 | 10.727 |
| 95.00 | 10.586 | 10.586 | 3.748 | -9.900 | -3.748 | 9.900 |
| 100.00 | 10.152 | 10.152 | 4.530 | -9.085 | -4.530 | 9.085 |
| 105.00 | 9.795 | 9.795 | 5.210 | -8.294 | -5.210 | 8.294 |
| 110.00 | 9.510 | 9.509 | 5.807 | -7.530 | -5.807 | 7.530 |
| 115.00 | 9.294 | 9.294 | 6.338 | -6.797 | -6.338 | 6.797 |
| 120.00 | 9.145 | 9.145 | 6.819 | -6.093 | -6.819 | 6.093 |
| 125.00 | 9.062 | 9.062 | 7.265 | -5.416 | -7.265 | 5.416 |
| 130.00 | 9.046 | 9.046 | 7.691 | -4.762 | -7.691 | 4.762 |
| 135.00 | 9.100 | 9.100 | 8.111 | -4.126 | -8.111 | 4.126 |
| 140.00 | 9.231 | 9.231 | 8.540 | -3.502 | -8.540 | 3.502 |
| 145.00 | 9.447 | 9.447 | 8.997 | -2.882 | -8.997 | 2.882 |
| 150.00 | 9.765 | 9.765 | 9.501 | -2.256 | -9.501 | 2.256 |
| 155.00 | 10.210 | 10.210 | 10.083 | -1.610 | -10.083 | 1.610 |
| 160.00 | 10.821 | 10.821 | 10.781 | -0.925 | -10.781 | 0.925 |
| 165.00 | 11.662 | 11.662 | 11.660 | -0.176 | -11.660 | 0.176 |
| 170.00 | 12.850 | 12.849 | 12.831 | 0.685 | -12.831 | -0.685 |
| 175.00 | 14.615 | 14.615 | 14.511 | 1.741 | -14.511 | -1.741 |
| 180.00 | 17.510 | 17.510 | 17.219 | 3.180 | -17.219 | -3.180 |

Fuente Propia.



La Figura 4.91 muestra la variación de las fuerzas en función a t_2 , y la Figura 4.92 muestra la variación del Par Torsor necesario para generar estas fuerzas.

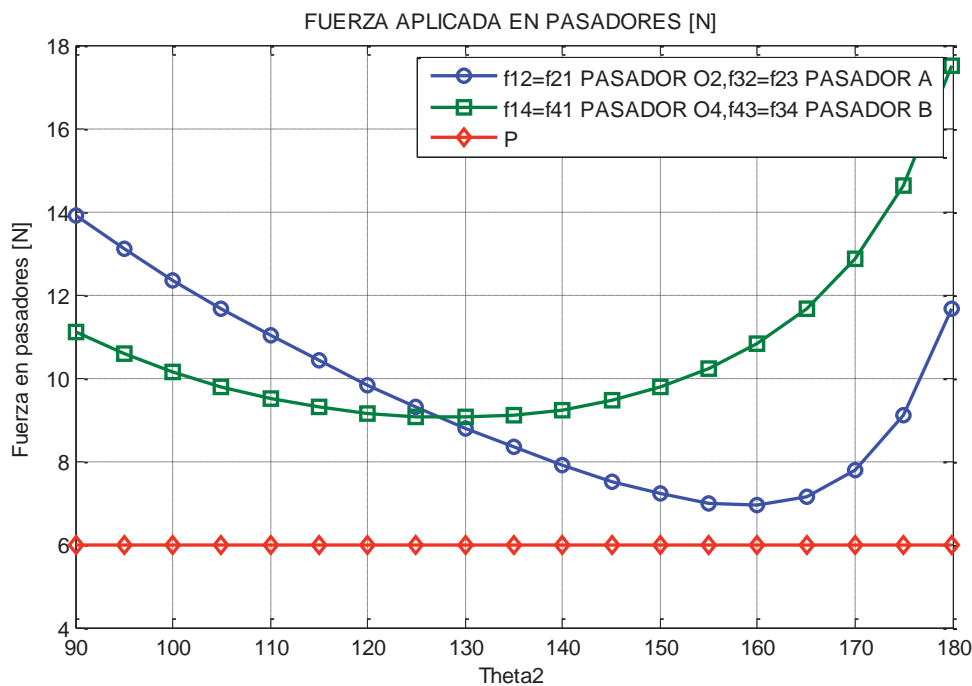


Figura 4.91 Fuerza en el mecanismo
Fuente propia

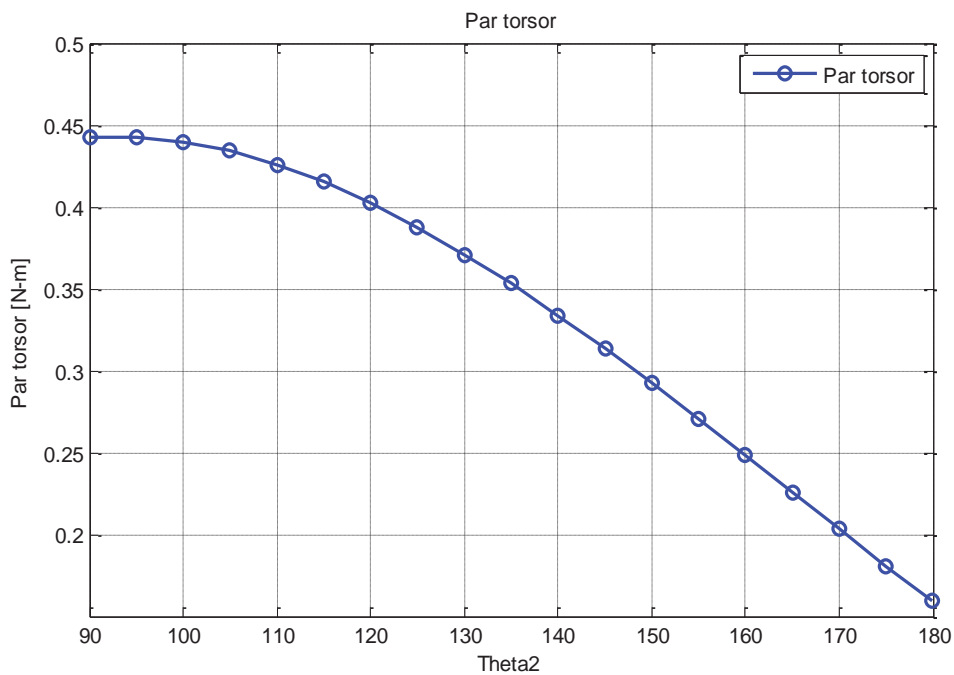
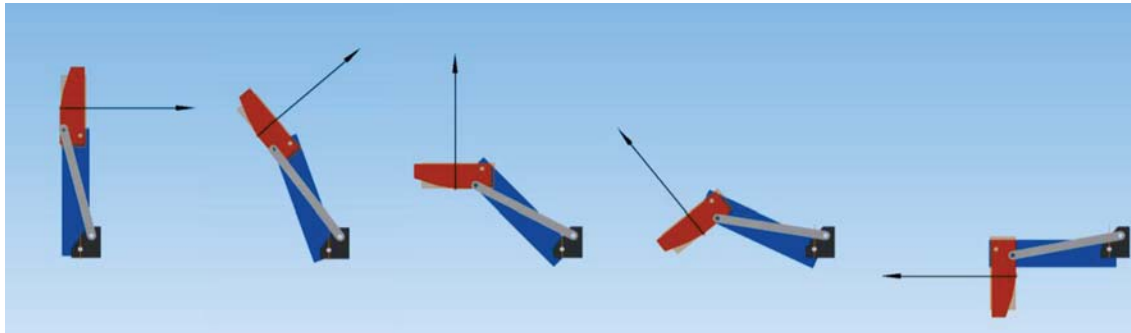


Figura 4.92 Par torsor eslabón 2.
Fuente propia.



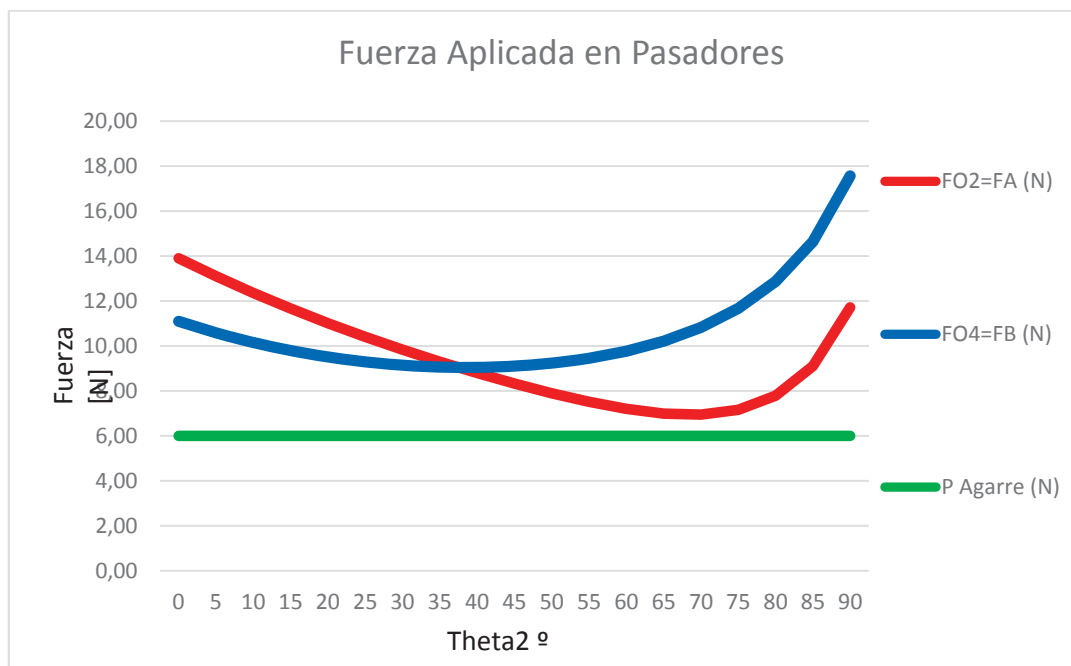
Según estos resultados, *Torque mínimo 442.410 [N-mm]* en O2 (portador de energía) para poder efectuar el movimiento de agarre máximo.

Se usó el módulo de simulación dinámica del software *Autodesk Inventor 2015*, para validar los datos, con una rotación angular de 90° a ($\omega_2 = 0.7854 \text{ rad/s}$), y una fuerza de agarre P de 6 [N] constante en todo el recorrido.



*Figura 4.93 Modelado en Inventor.
Fuente: propia, simulación en Autodesk Inventor 2015.*

Las gráficas de los fuerzas absolutas en las juntas del mecanismo, son los mismos resultados obtenidos en MATLAB®R2013b, se puede ver los resultados de fuerza en la Figura. 4.94 y el torque mínimo requerido en la Figura 4.95.



*Figura 4.94 Fuerzas en el mecanismo.
Fuente: propia, simulación Autodesk Inventor 2015.*



Figura 4.95 Par torsor en el Eslabón 2 del mecanismo.
Fuente: propia, simulación Autodesk Inventor 2015.

Las fuerzas máximas se dan al inicio del recorrido es decir cuándo $\theta_2 = 90^\circ$. El D.C.L., se puede apreciar en Figura. 4.96.

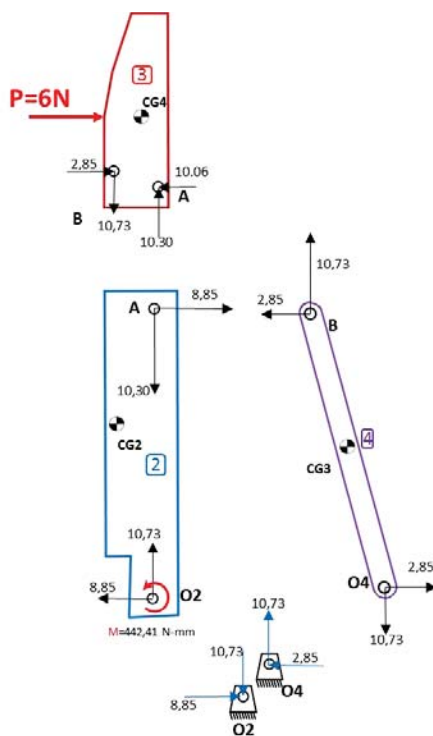


Figura 4.96 DCL Fuerzas en el mecanismo [Newton] $T_2=90^\circ$.
Fuente propia.



4.2.2.2 Diseño y cálculo de pasadores.

Se usaron pasadores cilíndricos de la marca OPAC como se ve en la Figura 4.39, con una tolerancia m6, estos pasadores se construyen según la norma DIN 7 (APÉNDICE B) El material usado en su construcción es DIN 9SMnpob28k (AISE/SAE 1213) (OPAC, 2016) las propiedades mecánicas para este tipo de acero se ven en la tabla 4.21.

$$S_y = 535.00 \text{ N/mm}^2. \quad (\text{Normal})$$

$$S_{s_y} = 267.50 \text{ N/mm}^2. \quad (\text{Cortante})$$

- Pasador O2.

Ubicado en O2 una la base del mecanismo (tierra) con la falange proximal (Figura. 4.97).

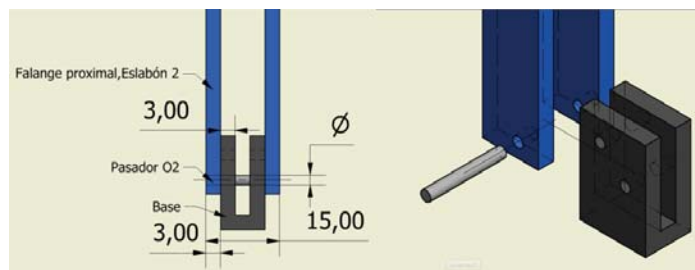


Figura 4.97 Ubicación del Pasador O2.
Fuente propia.

En la Figura. 4.98 se ver el D.C.L. así como también los diagramas de fuerza cortante y momento, donde $L=3\text{mm}$, $H=15\text{mm}$.

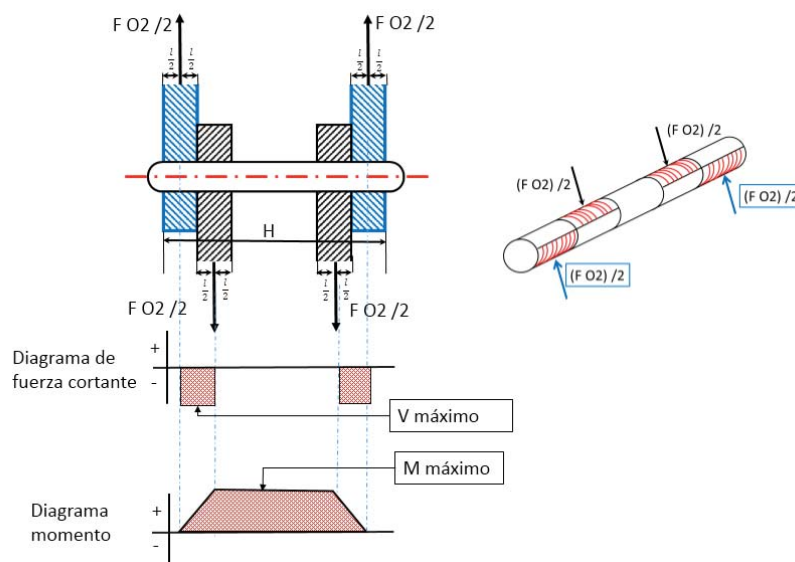


Figura 4.98 Diagrama de cuerpo libre Pasador O2.
Fuente propia.



- Pasador A.
Ubicado en A que une las falanges medial y proximal (Figura. 4.99).

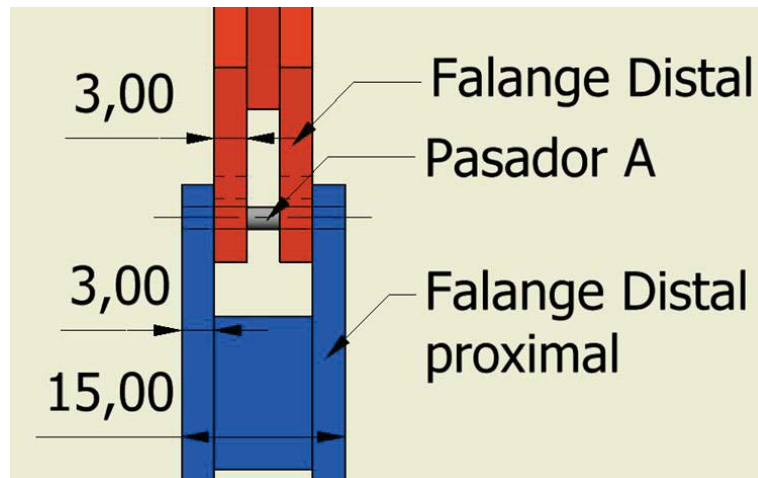


Figura 4.99 Ubicación del Pasador A.
Fuente propia.

En la Figura. 4.100 se ver el D.C.L. así como también los diagramas de fuerza cortante y momento, donde $L=3\text{mm}$, $H=15\text{mm}$.

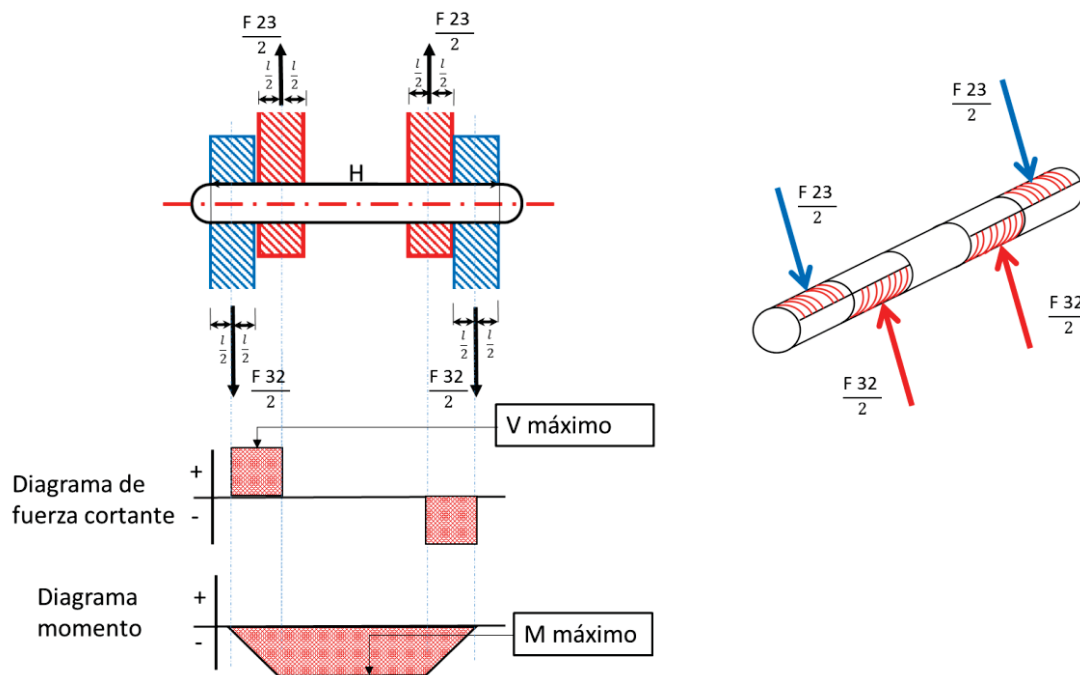


Figura 4.100 Diagrama de cuerpo libre Pasador A.
Fuente propia

Donde $L=3\text{mm}$, $H=15\text{mm}$.



- Pasador O4.

Ubicado en O4 que une la barra proximal con la base (Figura. 4.101).



Figura 4.101 Ubicación del Pasador O4.
Fuente propia.

En la Figura. 4.102 se puede ver el D.C.L. así como también los diagramas de fuerza cortante y momento, donde $L=3\text{mm}$.

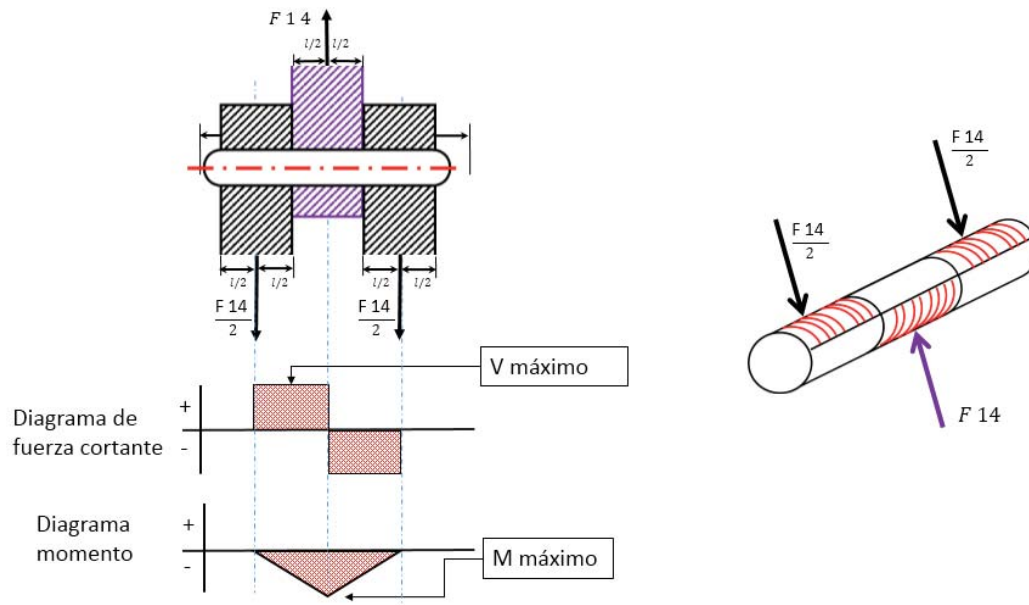


Figura 4.102 Diagrama de cuerpo libre Pasador O4.
Fuente propia.



- Pasador B.

Ubicado en B que une la barra proximal con la falange media (Figura. 4.103).

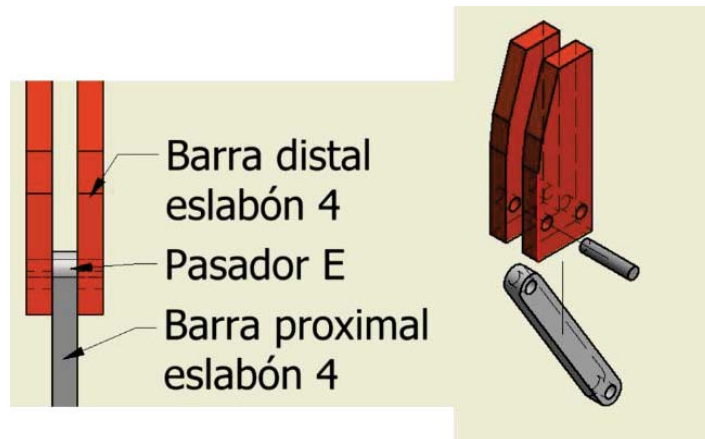


Figura 4.103 Ubicación del Pasador B.
Fuente propia.

En la Figura. 4.104 se ver el D.C.L. así como también los diagramas de fuerza cortante y momento, donde $L=3\text{mm}$, $H=15\text{mm}$.

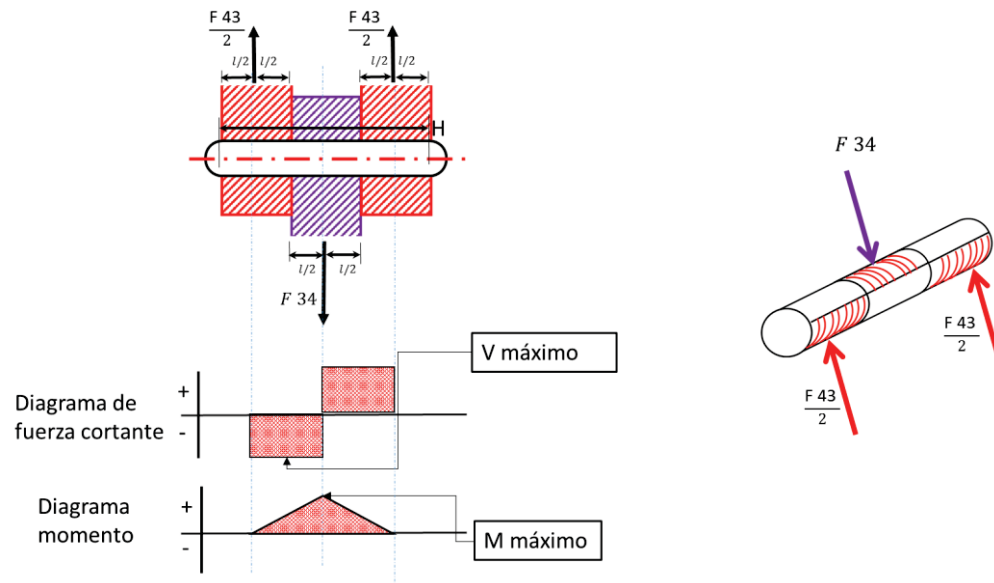


Figura 4.104 Diagrama de cuerpo libre Pasador B.
Fuente propia.

Donde $L=3\text{mm}$.

Los pasadores que tendrá un perfil de forma circular al igual que los pasadores del dedo índice.



Los pasadores se diseñaron bajo tres criterios: Máximo cortante, Máximo flector y por aplastamiento, se generalizo las ecuación para cada uno de los casos como se en la Tabla (4.46).

Tabla 4.46 Esfuerzos en pasadores.

| Cortante máximo | Máximo flector | Esfuerzo por aplastamiento |
|--|---|--|
| $\frac{S_{S_y}}{f.s} = \frac{V \max * Q}{I * T}$ | $\frac{S_y}{f.s} = \frac{M \max * L}{I}$ | $\frac{S_y}{f.s} = \frac{V}{d * l}$ |
| $d = \left(\frac{16 * v \max}{3 * \pi * \frac{S_{S_y}}{f.s}} \right)^{1/2}$ | $d = \left(\frac{32 * V * L}{\pi * \frac{S_y}{f.s}} \right)^{1/3}$ | $d = \frac{V}{l * \left(\frac{S_y}{f.s} \right)}$ |

Fuente propia.

Donde:

d = Diámetro.

V = Fuerza cortante.

M = Momento flector.

F.S = Factor de seguridad.

Sy =Esfuerzo fluencia normal.

Ssy =Esfuerzo fluencia cortante.

Se consideró un f.s. de 4 en la tabla 4.47 se puede apreciar los resultados obtenidos para cada uno de los pasadores en cada uno de los criterios.

Tabla 4.47 Diámetros mínimos.

| | V Max [N] | L [mm] | M Max [N-mm] | D (Cortante máximo) [mm] | D (Máximo Flector) [mm] | D (Esf. Por aplastamiento) [mm] |
|----|-----------|--------|--------------|--------------------------|-------------------------|---------------------------------|
| O2 | 13.90 | 3 | 41.70 | 0.4201 | 1.1667 | 0.0173 |
| A | 13.90 | 3 | 41.70 | 0.4201 | 1.1667 | 0.0173 |
| O4 | 11.10 | 3 | 33.30 | 0.3753 | 1.0823 | 0.0138 |
| B | 11.10 | 3 | 33.30 | 0.3753 | 1.0823 | 0.0138 |

Fuente propia.

Los resultados anteriores son hallados para el instante T2=90°, cuando las fuerzas son máximas, se generaliza las ecuaciones de la tabla 4.46 para el diámetro mínimo en función de t2, (Figura. 4.105). Se puede concluir entonces que el diámetro usado para todos los pasadores será de: **2.00 [mm]**

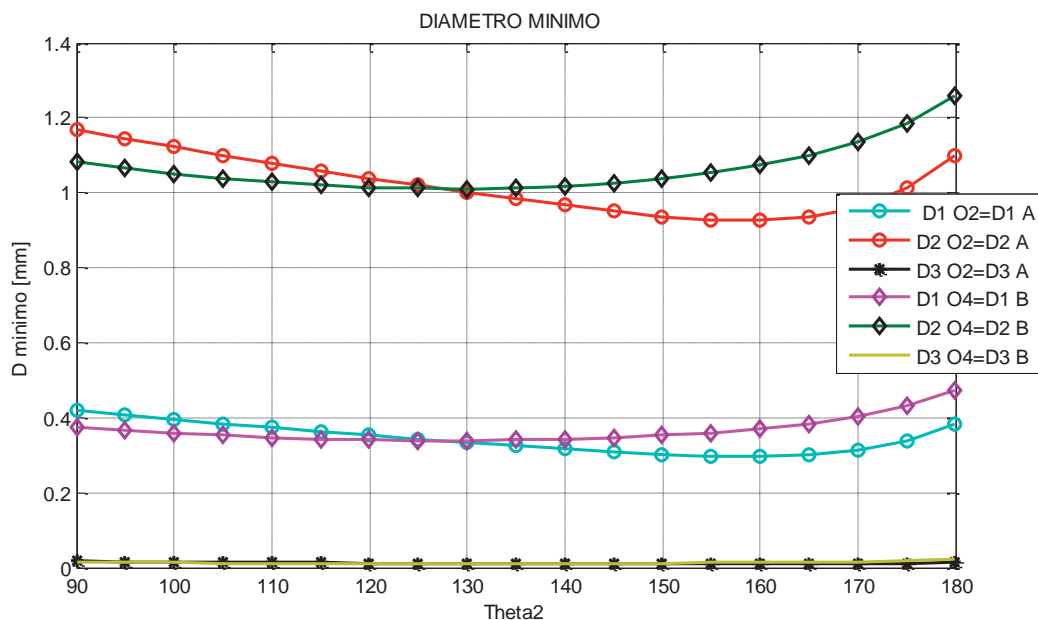


Figura 4.105 Diámetros mínimos en pasadores.
Fuente propia.

Entonces se seleccionó los pasadores de acuerdo al requerimiento quedando como se ve en la Tabla 4.48

Tabla 4.48 Selección de pasadores.

| Ubicación | Pasador seleccionado |
|-----------|----------------------|
| O2 | D70-2-16 |
| A | D70-2-16 |
| O4 | D70-2-10 |
| B | D70-2-10 |

Fuente propia.

4.2.2.3 Diseño por resistencia del mecanismo.

Como se puede ver en el D.C.L. en la Figura. 4.106, cada uno de los eslabones está sometido distintas fuerzas que son variables en función a T2, el cálculo se hará en el instante T2=90°, cuando la fuerza de interacción entre elementos es máxima.

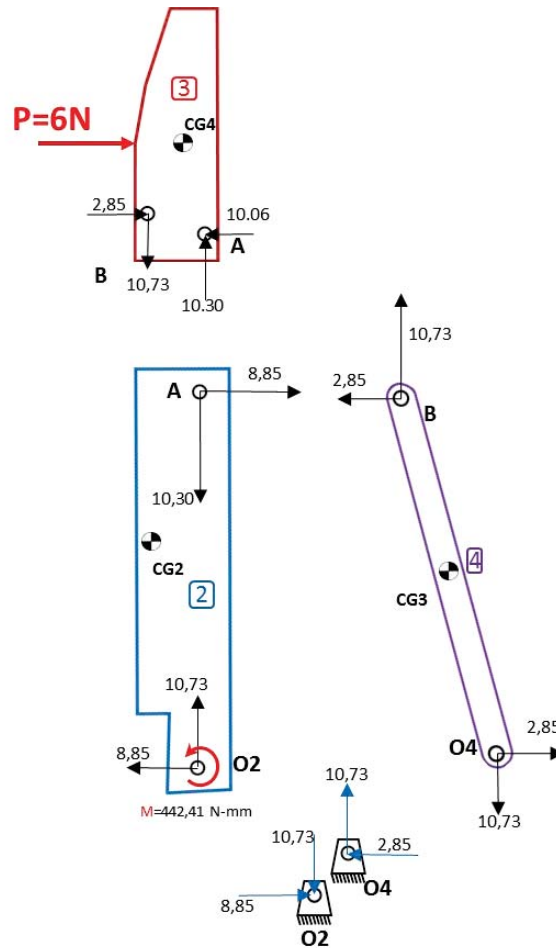


Figura 4.106 D.C.L. del Mecanismo.
Fuente propia.

4.2.2.3.1 Material de las falanges.

Del mismo modo que las falanges del dedo índice, se usará ABS (acrilonitrilo butadieno estireno), cuyos valores fueron definidos en la Tabla 4.25.

El límite de fluencia es:

$$S_y = 20.00 \left[\frac{N}{mm^2} \right] \tag{4.122}$$

4.2.2.3.2 Falange proximal, eslabón 02.

La Figura. 4.107 muestra el D.C.L de este eslabón y las fuerzas que interactúan en él. Los diagramas de Fuerza Normal, cortante y Momento se ven en la Figura. 4.108.

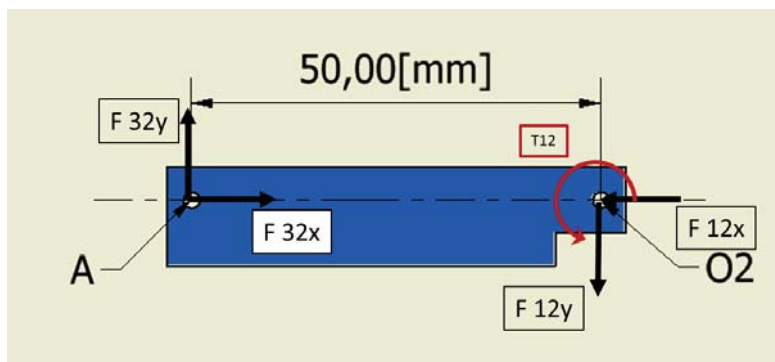


Figura 4.107 Diagrama cuerpo libre Eslabón 2.
Fuente propia.

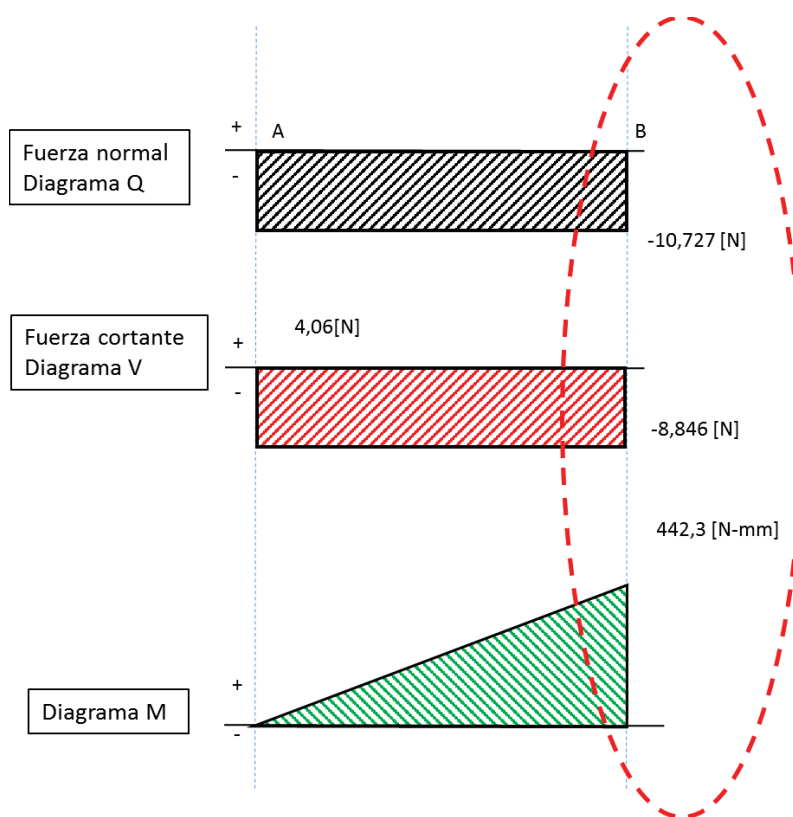


Figura 4.108 Fuerzas y momento flector internos.
fuente propia.

Se produce el mayor esfuerzo es en las sección O2 de la falange proximal, (Figura. 4.109).

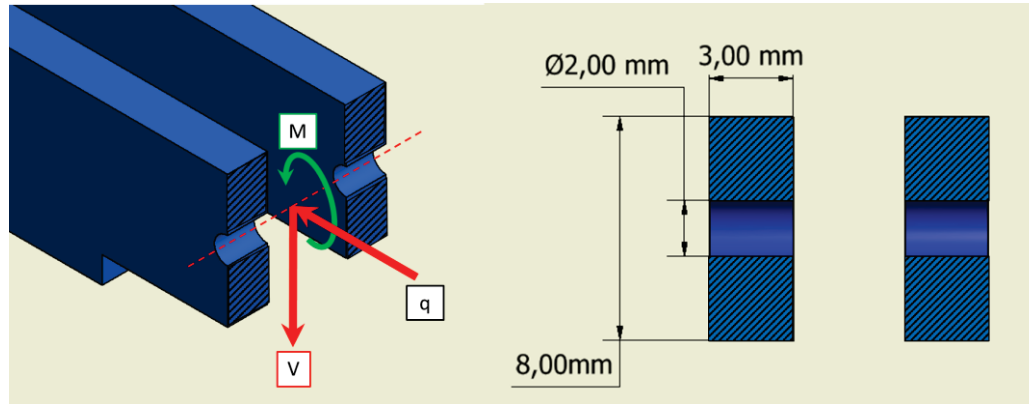


Figura 4.109 Aplicación de Fuerza Max. y Momento Max.
Fuente propia.

Propiedades geométricas, O2.

$$I = \frac{1}{12} b * h^3 = \frac{1}{12} (3) * (8^3 - 2^3) = 126.00 [mm^4] \quad (4.123-a)$$

En la Figura 4.110 se presenta la distribución de esfuerzos debido a: Momento flexor, Fuerza Normal y Fuerza cortante.

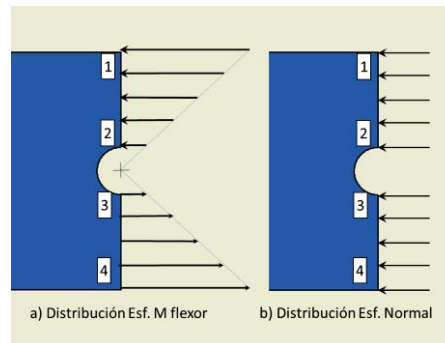


Figura 4.110 Distribución de esfuerzos.
Fuente propia.

- Momento flexionante.

$$\sigma_{max}(1) = \frac{M * C}{I} = \frac{(442.41/2) * 4}{126.00} = 7.022 [N/mm^2] \leftarrow \quad (4.124-a)$$

$$\sigma_{max}(2) = \frac{M * C}{I} = \frac{(442.41/2) * 1}{126.00} = 1.755 [N/mm^2] \leftarrow \quad (4.124-b)$$

$$\sigma_{max}(3) = \frac{M * C}{I} = \frac{(442.41/2) * 1}{126.00} = 1.755 [N/mm^2] \rightarrow \quad (4.124-c)$$

$$\sigma_{max}(4) = \frac{M * C}{I} = \frac{(442.21/2) * 4}{126.00} = 7.022 [N/mm^2] \rightarrow \quad (4.124-d)$$

- Fuerza normal.



$$\sigma = \frac{q}{A} = \frac{(10.7227/2)}{(6)*3} = 0.2974 \text{ [N/mm}^2\text{]} \leftarrow \tag{4.125}$$

- Esfuerzo normal: La suma de los esfuerzos por flexión y por fuerza normal, en cada uno de los sectores Tabla 4.49.

Tabla 4.49 Distribución de los esfuerzos normales, en cada uno de los sectores.

| | σ_{max} | σ | $=\sigma(Total)$ |
|-------------|----------------|----------|------------------|
| $\sigma(1)$ | -7.022 | -0.2974 | -7.3194 |
| $\sigma(2)$ | -1.755 | -0.2974 | -2.0524 |
| $\sigma(3)$ | +1.755 | -0.2974 | +1.4576 |
| $\sigma(4)$ | +7.022 | -0.2974 | +6.7246 |

Fuente propia.

- Esfuerzo máximo por fuerza cortante.

$$\tau_{prom} = \frac{V}{A} = \frac{(8.846/2)}{(8-2)*3} = 0.2457 \text{ [N/mm}^2\text{]} \tag{4.126}$$

El esfuerzo normal máximo será en el sector 1 y también existirá un esfuerzo cortante máximo.

4.2.2.3.3 Falange distal, eslabón 03.

La Figura. 4.111 muestra el D.C.L de este eslabón y las fuerzas que interactúan en él. Los diagramas de fuerza normal, cortante y momento se muestran en la Figura. 4.112.

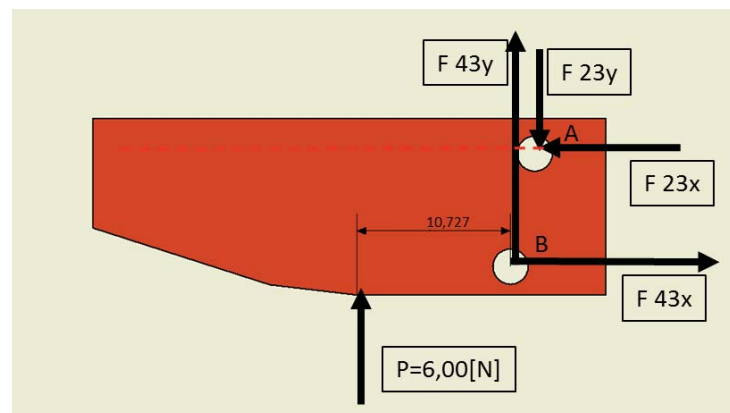


Figura 4.111 Diagrama cuerpo libre Eslabón 3.
Fuente propia.

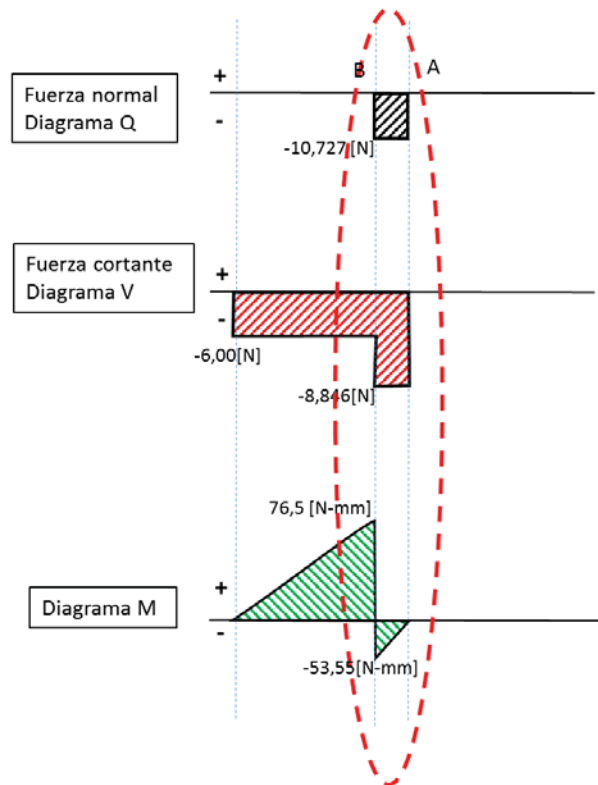


Figura 4.112 Fuerzas y momento flector internos.
Fuente propia.

El lugar donde se producirá el mayor esfuerzo es en las sección B de la falange proximal (eslabón 3), (Figura. 4.113).

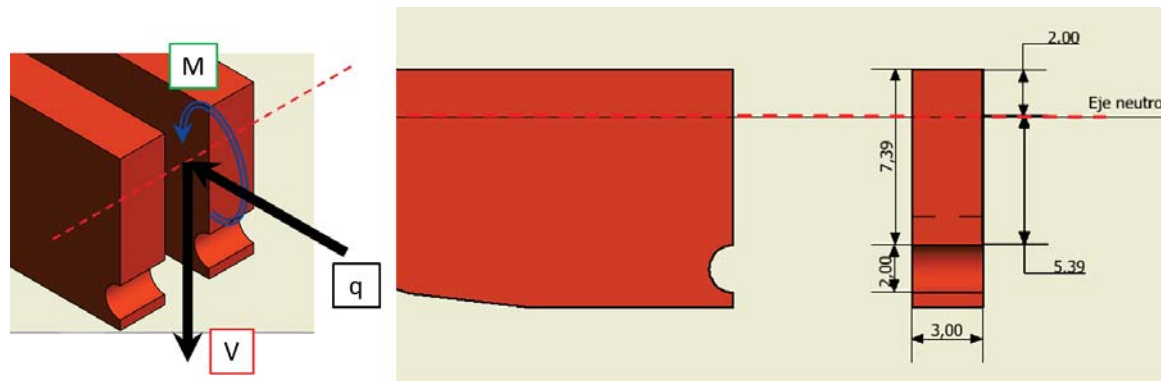


Figura 4.113 Aplicación de Fuerza Max. y Momento Max.
Fuente propia.

Propiedades geométricas, O2.

$$I = \sum \left[\frac{1}{12} b * h^3 \right] = \left[\frac{1}{12} (3)(2^3) + (2 * 3) * (1^2) \right] + \left[\frac{1}{12} (3)(10.409^3) + (10.409 * 3) * 5.2045^2 \right] - \left[\frac{1}{12} (3)(2^3) + (2 * 3) * (8.409^3) \right] = 709.52 [mm^4]. \quad (4.127-a)$$



En la Figura. 4.114 se presenta la distribución de esfuerzos debido a: El momento flexor, Fuerza Normal y Fuerza cortante.

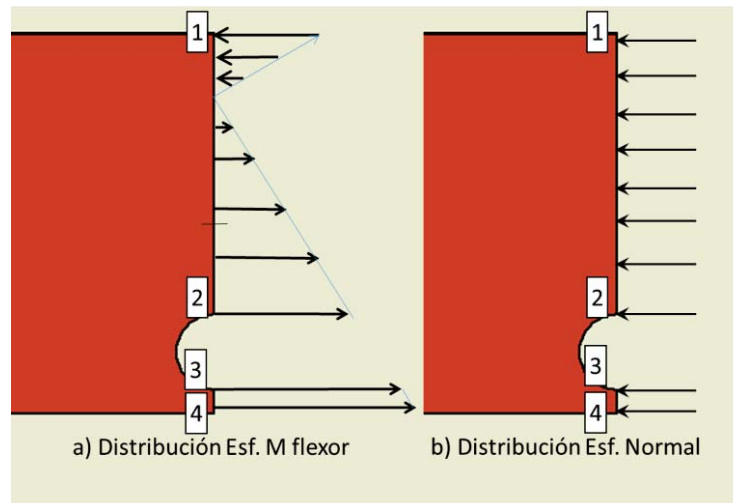


Figura 4.114 Distribución de esfuerzos.
Fuente propia.

- Momento flexionante.

$$\sigma_{max}(1) = \frac{M \cdot C}{I} = \frac{(22.95/2) \cdot 2}{709.519} = 0.0323 [N/mm^2] \leftarrow \quad (4.128-a)$$

$$\sigma_{max}(2) = \frac{M \cdot C}{I} = \frac{(22.95/2) \cdot 7.409}{709.519} = 0.1198 [N/mm^2] \rightarrow \quad (4.128-b)$$

$$\sigma_{max}(3) = \frac{M \cdot C}{I} = \frac{(22.95/2) \cdot 9.409}{709.519} = 0.1521 [N/mm^2] \rightarrow \quad (4.128-c)$$

$$\sigma_{max}(4) = \frac{M \cdot C}{I} = \frac{(22.95/2) \cdot 10.409}{709.519} = 0.1684 [N/mm^2] \rightarrow \quad (4.128-d)$$

- Fuerza normal.

$$\sigma = \frac{q}{A} = \frac{(10.727/2)}{(12.409-2) \cdot 3} = 0.17175 [N/mm^2] \leftarrow \quad (4.129)$$

- Esfuerzo normal.

Tabla 4.50 Distribución de esfuerzo en las zonas 1, 2, 3 y 4.

| | σ_{max} [N/mm] | σ [N/mm] | $=\sigma(Total)$ [N/mm] |
|-------------|-----------------------|-----------------|-------------------------|
| $\sigma(1)$ | -0.0323 | -0.17175 | -0.20405 |
| $\sigma(2)$ | +0.1198 | -0.17175 | -0.05195 |
| $\sigma(3)$ | +0.1521 | -0.17175 | -0.01965 |
| $\sigma(4)$ | +0.1684 | -0.17175 | -0.00335 |

Fuente propia.

- Fuerza cortante.

$$\tau_{prom} = \frac{V}{A} = \frac{(8.846/2)}{(2+7.409+1) \cdot 3} = 0.14 [N/mm^2] \quad (4.130)$$



4.2.2.3.4 Barra proximal, Eslabón 04.

La Figura. 4.115 muestra el D.C.L de la barra proximal y las fuerzas que interactúan en él. Solo existe una fuerza normal actuando sobre la barra 4.

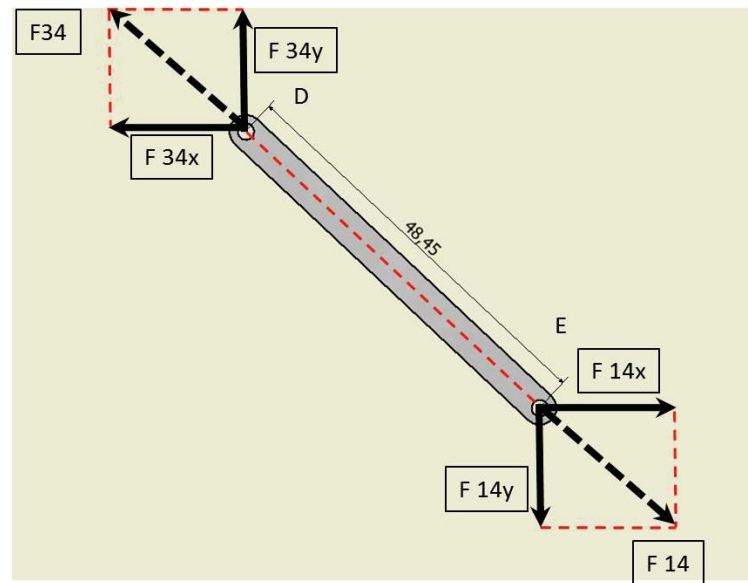


Figura 4.115 Diagrama cuerpo libre Eslabón 4.
Fuente propia.

El lugar donde se producirá el mayor esfuerzo es en la sección E (Fig. 4.116).

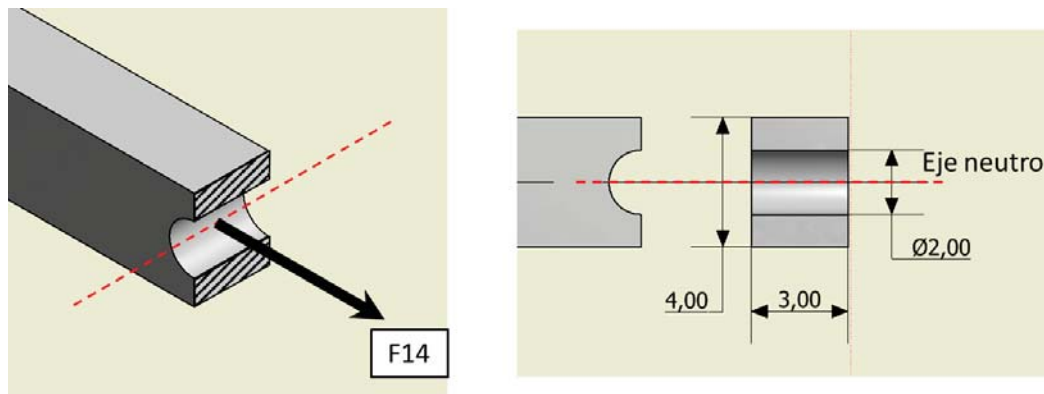


Figura 4.116 Aplicación de Fuerza Max.
Fuente propia.

El elemento está sometido a tensión, por consiguiente solo habrá esfuerzo normal.

- Fuerza normal.

$$\sigma = \frac{q}{A} = \frac{(11,098)}{(4-2)*3} = 1,8497 \text{ [N/mm}^2\text{]} \rightarrow \quad (4.131)$$



4.2.2.3.5 Cálculo de esfuerzos

La tabla 4.51 muestra los resultados del esfuerzo equivalente para cada eslabón del mecanismo, el esfuerzo de fluencia del material es 20 [N/mm²] según la tabla 4.25

Tabla 4.51 Esfuerzos principales esfuerzos equivalentes.

| Eslabón | Esf. Normal, Cortante [N/mm ²] | | σ Principales | | | σ Equiv. [N/m ²] | σ Fluencia. [N/mm ²] | f.s. |
|---------|--|--------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|---|---|------|
| | | | Esf1 [N/mm ²] | Esf2 [N/mm ²] | Esf3 [N/mm ²] | | | |
| 2 | σ | -7.319 | 0.008 | -7.328 | 0 | 7.332 | 20 | 3 |
| | τ_{xy} | 0.246 | | | | | | |
| 3 | σ | -0.204 | 0.071 | -0.275 | 0 | 0.317 | 20 | 63 |
| | τ_{xy} | 0.140 | | | | | | |
| 4 | σ | 1.850 | 1.850 | 0.000 | 0 | 1.850 | 20 | 11 |
| | τ_{xy} | 0.000 | | | | | | |

Fuente propia

De la tabla 4.51: El mínimo factor de seguridad es 2, con lo cual se asegura que el sistema no fallara por resistencia.

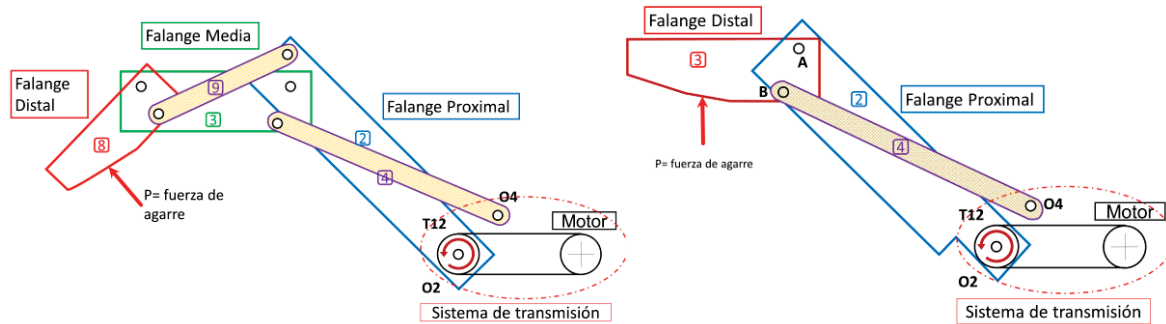


CAPÍTULO V

5 DISEÑO DEL SISTEMA DE GENERACIÓN DE FUERZA.

Este capítulo trata del diseño del sistema de transmisión para cada una de las falanges del prototipo.

El sistema de transmisión y generación de fuerza consiste, en un sistema de poleas cada uno, como se ve en la figura 5.1-a y 5.1-b.



a) Sistema de transmisión índice

b) Sistema de transmisión pulgar

Figura 5.1 Sistema de transmisión.
Fuente propia.

Segundo lo visto en el diseño de ambos dedos, el torque mínimo requerido para poder efectuar el movimiento de los mecanismos con una fuerza $P=6[N]$, es:

$$T_{12} = 838.10 \text{ [N-mm]} \text{ (Torque mínimo requerido dedo índice).} \quad (5.1-a)$$

$$T_{12} = 442.41 \text{ [N-mm]} \text{ (Torque mínimo requerido dedo pulgar).} \quad (5.1-b)$$

5.1 CÁLCULO DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN.

Para ambos mecanismos se usó un sistema de poleas para la transmisión del torque y de movimiento, se trabajó con un torque máximo requerido es decir el torque del dedo índice.

$$T_{12} = 838.10 \text{ [N-mm]} \text{ (Torque mínimo requerido de índice)} \quad (5.2)$$

El la Figura 5.2 se puede ver el modelo conceptual de este sistema de polea

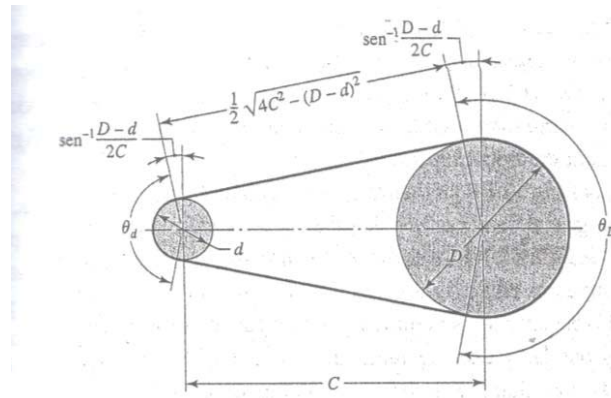


Figura 5.2 Sistema de transmisión.
Fuente: (Shygly & Budynas, 2008).

Donde:

C = Distancia entre centros.

d = Diámetro de la polea menor (motriz).

D = Diámetro de la polea mayor (Falanges).

\emptyset = Angulo de contacto.

La distancia entre centros es C=400 [mm]. Y las polea tendrán un diámetro, D=20.00 [mm] y d=30.00 [mm].

Los ángulos de contacto son:

$$\emptyset d = \pi - 2 \text{sen}^{-1} \left(\frac{D-d}{2 \cdot c} \right) = 3.17 [\text{Rad}] \quad (5.3-a)$$

$$\emptyset D = \pi + 2 \text{sen}^{-1} \left(\frac{D-d}{2 \cdot c} \right) = 3.12 [\text{Rad}] \quad (5.3-b)$$

La longitud de la faja circular:

$$L = [4c^2 - (D - d)^2]^{1/2} + \frac{1}{2}(D * \emptyset D - d * \emptyset d) = 878.60 [\text{mm}] \quad (5.4)$$

La velocidad angular de la falange es de 0.7854 rad/s. El diámetro de las poleas es de 20 y 30 [mm] para las poleas motriz y falange.

$$i = \frac{n_2}{n_1} = \frac{d}{D} = 1.5 \quad (5.6)$$

Donde:

i = Relación de transmisión.



n_1 = Velocidad angular salida.

n_2 = Velocidad angular entrada.

Entonces

$i=1.5$ y $n_1= 0.526$ [Rad/seg].

Se calculó el torque requerido por un actuador (motor) según el método descrito en (Shyglyy & Budynas, 2008, pág. 871).

$$T = \frac{H_{nom} * K_s * n_d}{n_2} \quad (5.8)$$

Donde:

T = Torque mínimo requerido las falanges.

H_{nom} = Potencia de motor.

K_s = 1.00 Factor de servicio (HORI, 2002).

n_d = 1.10 Factor de seguridad (HORI, 2002).

n_2 = 0.7854 [Rad/seg] Velocidad angular,

Remplazando en (5.8).

$$838.10 \text{ [N – mm]} = \frac{H_{nom} * 1.00 * 1.10}{0.7854 [\text{rad/seg}]} \quad (5.9)$$

Despejando (5.9). La potencia y el torque requerido por el sistema son:

$$H_{nom} = 598.40 \left[\frac{\text{N-mm}}{\text{seg}} \right] = 0.60 \text{ [W]} \quad (5.10-a)$$

$$T_{nom} = 1142.86 \text{ [N-mm]}. \quad (5.10-b)$$

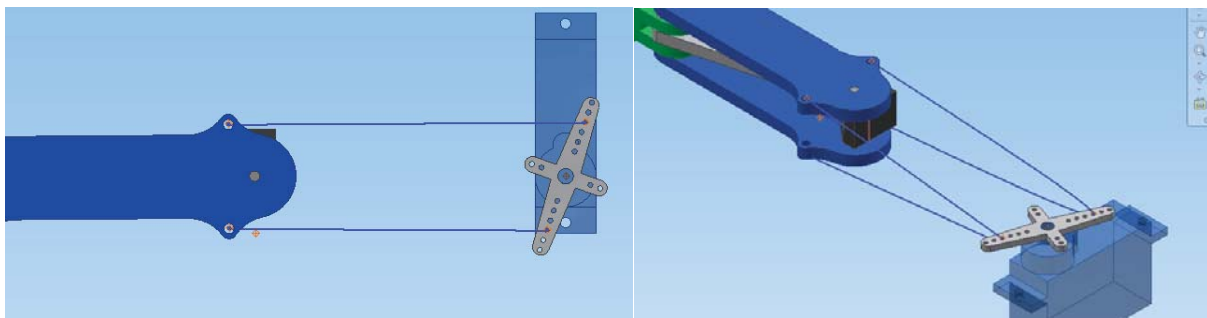


Figura 5.3 Transmisión de fuerza en las falanges.
Fuente propia.



5.2 SELECCIÓN DEL SERVOMOTOR.

Se requiere según el cálculo: $T_{nom} = 1142.86$ [N-mm].

Se seleccionó el servomotor *SG90 9g micro servo* (figura 5.4), que cumple con estas características (Anexo C) cuyo torque de trabajo es 1.85 [kgf*cm] (DF Robot).



Figura 5.4 Servomotor 9g.
Fuente: DATA SHEET DF Robot.

$$\text{Torque servomotor} = 1.85 \text{ kgf} \cdot \text{cm} = 1765.20 \text{ [N-mm]} \quad (5.16)$$

El torque del actuador (5.16) es menor al torque requerido (5.10-a). La selección es adecuada. Para controlar este servomotor se uno una microposegador arduino AnexoD

5.3 SELECCIÓN DEL CORREA DE TRANSMISIÓN.

La selección de la correa depende del esfuerzo interno, generado por la fuerza derivada de la potencia (máxima) del motor. El material de la correa es poliuretano termosoldable que tiene una resistencia a la fluencia de 33.40 [N/mm²] (OPTIBELT, 2016).

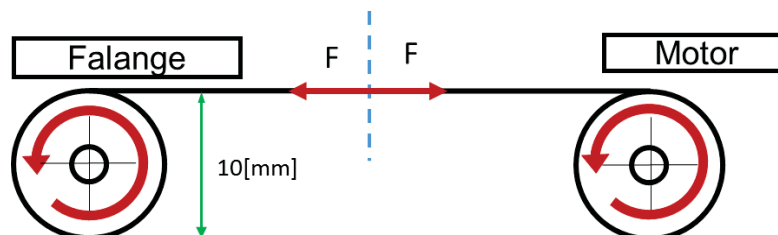


Figura 5.5 DCL Fuerza en el cable de transmisión
Fuente: DATA SHEET DF Robot.



El cable de transmisión trabaja solo a tensión.

$$F = \frac{T_{mot}}{r} = \frac{1142.86 \text{ [N-mm]}}{15 \text{ [mm]}} = 76.20 \text{ [N]} \quad (5.11-a)$$

$$S_y = 33.40 \left[\frac{N}{mm^2} \right] \text{ (Esfuerzo fluencia Poliuretano Termosoldable)} \quad (5.11-b)$$

Se eligió como factor de seguridad 1.5.

$$\frac{S_y}{f.s} = \frac{F}{A} \quad (5.12)$$

Donde

f.s = Factor de seguridad.

F = Fuerza de tensión máxima en el cable

$$A = \text{Área de perfil del cable} \left(\frac{\pi * d^2}{4} \right) \quad (5.13)$$

Despejando (5.13)

$$d = \sqrt{\frac{4 * F * f.s}{\pi * S_y}} = \sqrt{\frac{4 * 76.20 \text{ [N]} * 1.5}{\pi * 33.40 \text{ [N/mm}^2\text{]}}} = 2.00 \text{ [mm]} \quad (5.14)$$

El diámetro del cable que es usado en la polea es de 2[mm]. Por consiguiente se usará una correa circular de poliuretano termosoldado de 2 [mm] de diámetro y 878.61 [mm] de longitud.



CAPÍTULO VI

6 DISEÑO DEL SISTEMA ELECTRÓNICO DEL PROTOTIPO.

Diseñado y validado la mecánica del prototipo, lo siguiente fue el diseño de la parte electrónica, para automatizar el prototipo.

En el capítulo pasado se definió como generación de potencia, los servomotores SG90 9g, el prototipo tiene 5 G.D.L eso significa que existen 5 servomotores (actuadores) en la figura 6.1 se puede ver el diagrama de flujo del sistema electrónico.

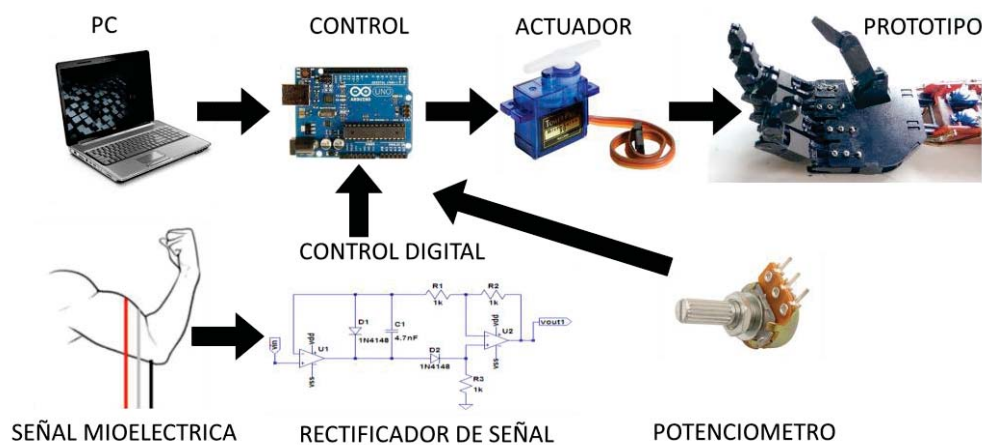


Figura 6.1 Diagrama de flujo diseño electrónico
Fuente propia

6.1 ELECTRÓNICA DE CONTROL.

El prototipo consta de 5 motores, 5 señales análogas, y 5 señales digitales, la administración de estas señales se por parte de una placa Arduino , donde se conectan las señales de entrada y salida.

6.1.1 Señales mioeléctricas.

La señal mioeléctrica (EMG) representa la actividad eléctrica resultante de la excitabilidad de las fibras musculares, debido a la contracción muscular, para fines de la investigación usaremos las señales generadas por el musculo bíceps, la figura 6.2 muestra la recolección de estas señales (Brazeiro & Petraccia, 2015).

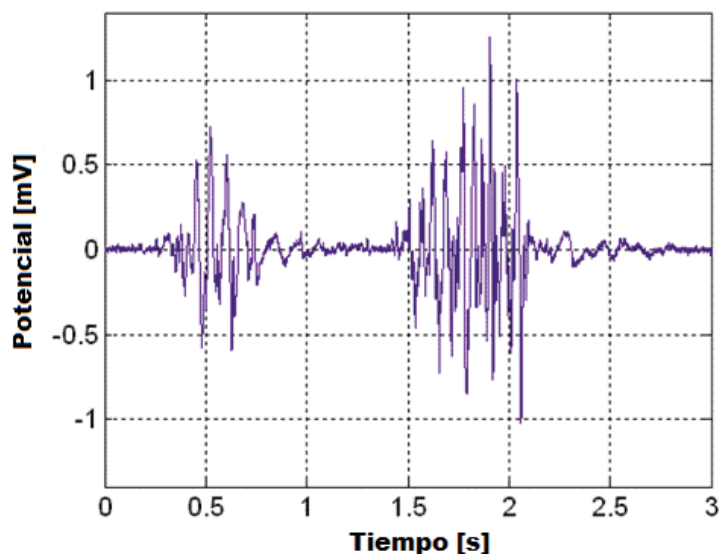


Figura 6.2 señales eléctricas captadas en musculo bíceps
Fuente: (Brazeiro & Petracchia, 2015)

6.1.2 Electrodo.

Los electrodos electrocardiográficos se usan para transformar en corriente eléctrica, las señales iónicas presentadas en los músculos. Suelen ser de ranura, con gel electrolítico para aumentar el contacto con la piel (figura.6.3).

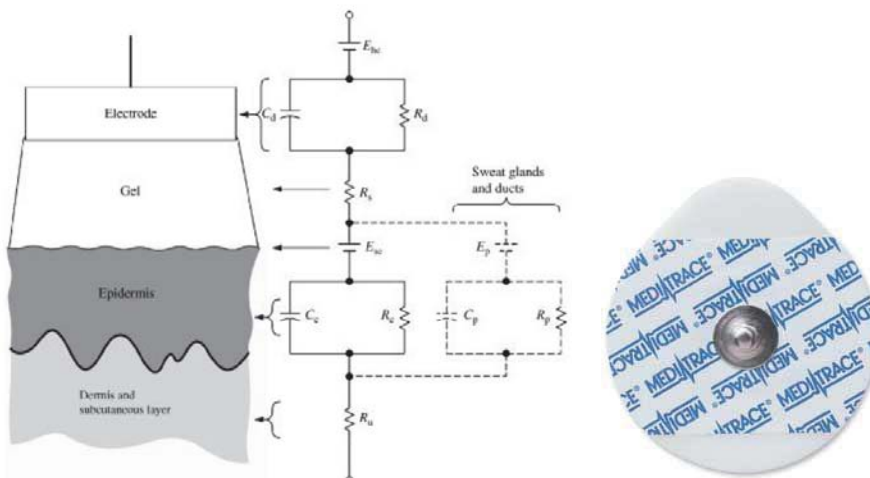


Figura 6.3 circuito equivalente electrodo sobre piel.
Fuente: (Brazeiro & Petracchia, 2015)

6.1.3 Rectificación de la señal.

Lo ideal es convertir la señal EMG en una señal PWM para ser usada por el microprocesador Arduino.



6.1.4 Arduino.

Arduino Uno es una placa basada en el microcontrolador ATmega328P. Tiene 14 pines digitales de entrada / salida (de los cuales 6 se pueden utilizar como salidas PWM), 6 entradas analógicas, un cristal de cuarzo de 16 MHz, una conexión USB, un conector de alimentación, una cabecera ICSP y un botón de reinicio. (Arduino, 2016)

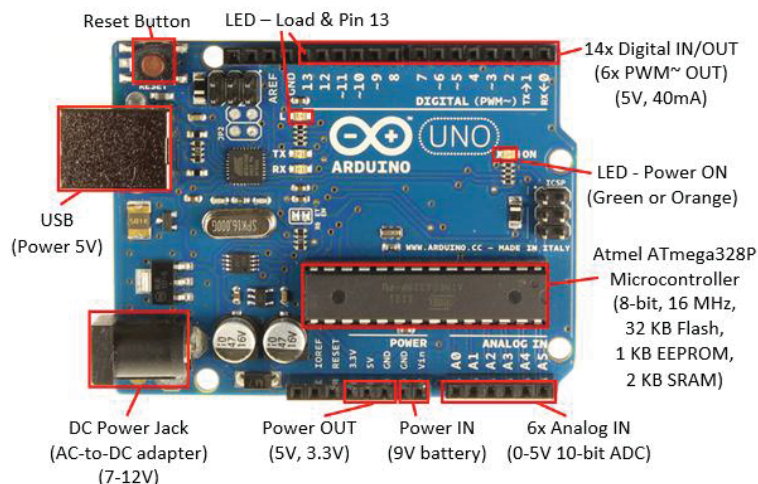


Figura 6.4 Arduino uno
fuente: (PANAMAHITEK, 2016)

6.2 CONTROL DE UN SERVOMOTOR.

Un servomotor es básicamente un motor eléctrico que sólo se puede girar en un ángulo de aproximadamente de 180 grados. De los tres cables que salen de su cubierta. El cable amarillo es el cable por el cual se le instruye al servomotor en qué posición ubicarse (entre 0 grados y 180).

Dentro del servomotor, una tarjeta controladora le dice a un pequeño motor de corriente directa cuántas vueltas girar para acomodar la flecha (el eje de plástico que sale al exterior) en la posición que se le ha pedido (figura 6.5).

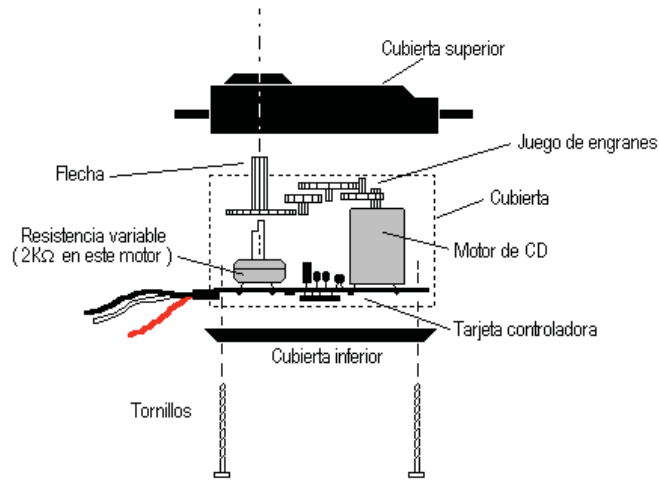


Figura 6.5 Partes servomotor
Fuente: (naylorpmchatronics, 2016)

6.3 PLACA CONTROL DE POTENCIA.

Los servomotores funcionan a 5 [V] y consumen 1 [mA]. Para alimentar se requiere de un fuente de alimentación de 5 [V] a 5 [A] (figura 2.3)



Figura 6.6 Fuente de alimentación
Fuente propia

Se diseñó una tarjeta de control según el esquema en la figura 6.7 y se construyó esta tarjeta en baquelita (figura 6.8)

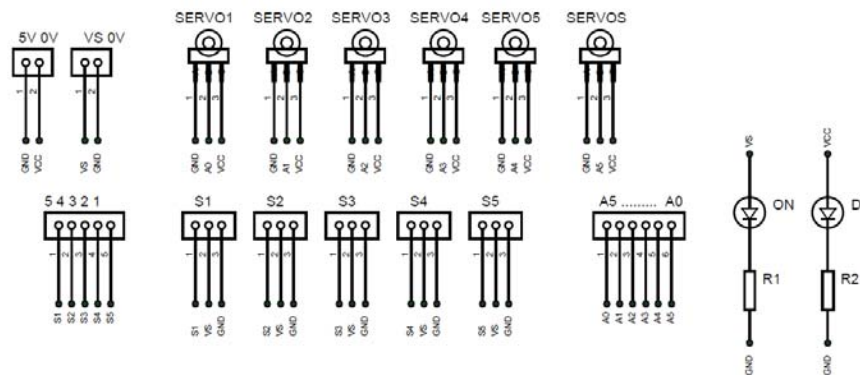


Figura 6.7 Esquema de conexión electrónica
Fuente propia

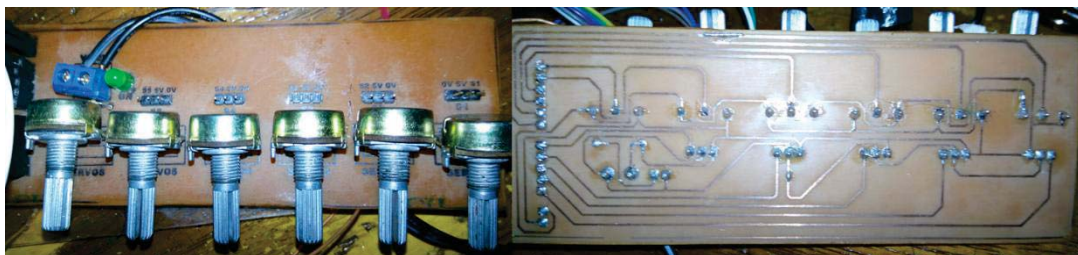


Figura 6.8 tarjeta construida en baquelita
Fuente propia

Finalmente se ensambló todo el sistema electrónico según el diseño de la figura 6.9.

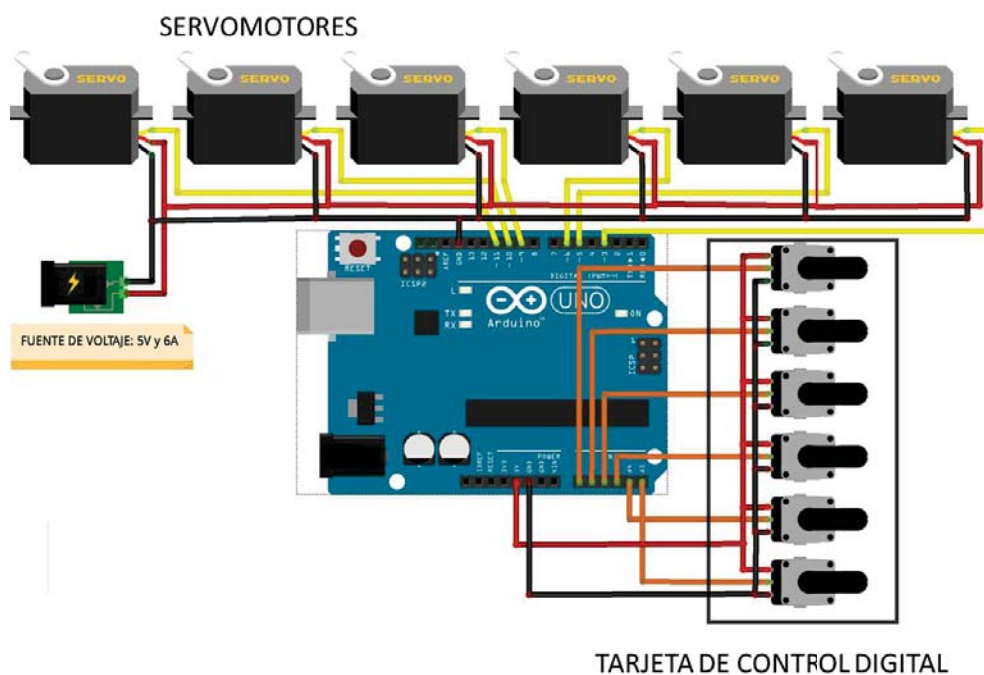


Figura 6.9 Diseño electrónico del prototipo
Fuente propia, esquema en software "fritzing"



CAPITULO VII

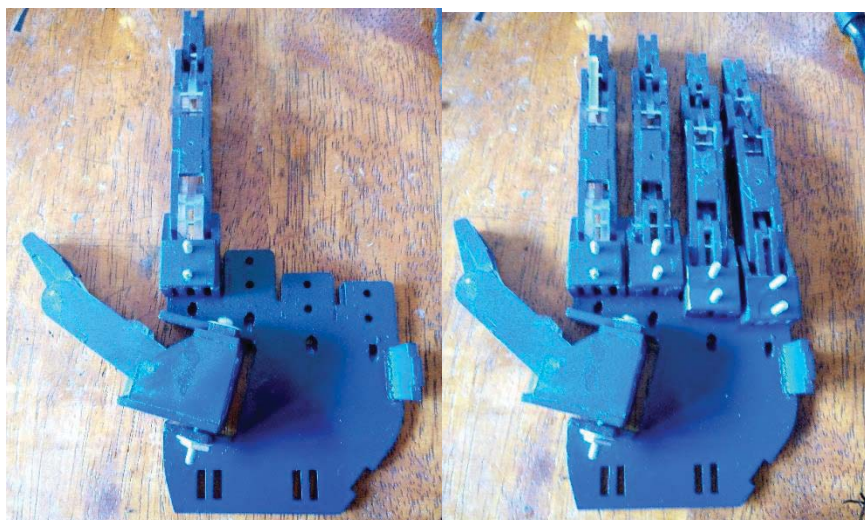
7 CONSTRUCCIÓN Y COSTOS.

7.1 Fabricación del prototipo.

El diseño presentado en esta tesis, se construyó, según los planos generados, como se ve en las Figuras 6,1; 6,2; 6,3; 6,4.



*Figura 7.1 Piezas del prototipo.
Fuente propia.*



*Figura 7.2 Proceso de Ensamble.
Fuente propia.*

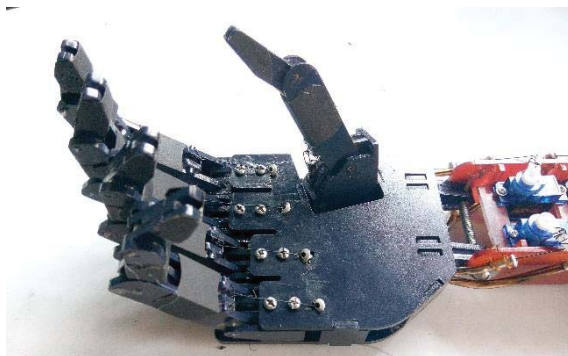


Figura 7.3 Prototipo ensamblado.
Fuente propia.

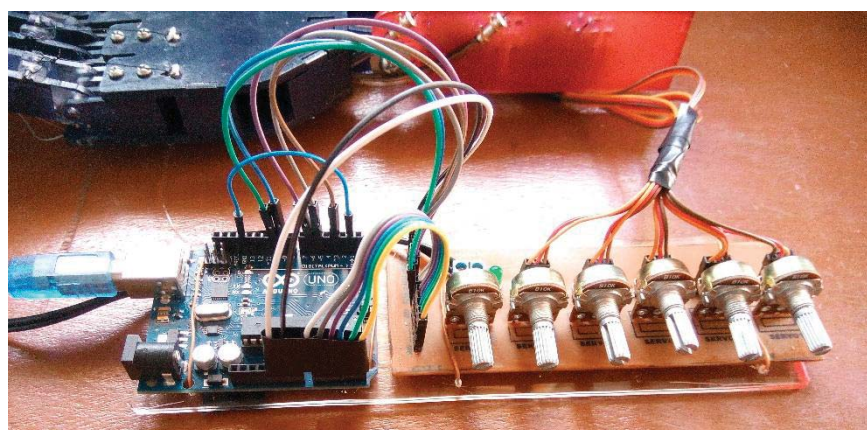


Figura 7.4 Microcontrolador Arduino y tarjeta de control..
Fuente propia.



Figura 7.5 Sujeción Cilíndrica.
Fuente propia.



7.2 Costo de fabricación del prototipo.

7.2.1 Presupuesto de ingeniería.

Tabla 7.1 Presupuesto ingeniería (recursos humanos).

| RECURSOS HUMANOS | | | |
|----------------------------|-------|---------|-------------|
| Tarea | Horas | S./Hora | Costo final |
| Estudios previos | 60 | 100.00 | 6000.00 |
| Asesoramiento mecánico | 25 | 120.00 | 3000.00 |
| Asesoramiento Biomecánico | 15 | 120.00 | 1800.00 |
| Diseño mecánico | 150 | 80.00 | 12000.00 |
| Diseño electrónico | 50 | 80.00 | 4000.00 |
| Modelamiento 3D | 20 | 90.00 | 1800.00 |
| Simulación | 40 | 90.00 | 3600.00 |
| Realización de planos | 40 | 90.00 | 3600.00 |
| Comprobación de las piezas | 10 | 90.00 | 900.00 |
| Documentación | 100 | 30.00 | 3000.00 |
| Montaje | 30 | 20.00 | 600.00 |
| Verificación | 3 | 15.00 | 45.00 |
| Total S/. | | | 40345.00 |

Fuente propia.

Tabla 7.2 Presupuesto ingeniería (Software).

| SOFTWARE EMPLEADO | | | |
|-------------------------------------|---------|----------------|-------------|
| Software | T(Años) | Costo/licencia | Costo Final |
| Windows 7 profesional | 1 | 130.00 | 130.00 |
| Microsoft Office 2013 | 1 | 220.00 | 220.00 |
| Autodesk Inventor profesional 2015. | 1 | 330.00 | 330.00 |
| Matlab 2015 | 1 | 330.00 | 330.00 |
| Sam 6.1 | 1 | 200.00 | 200.00 |
| Total S/. | | | 1210.00 |

Fuente propia.

Tabla 7.3 Presupuesto ingeniería (Equipos).

| EQUIPOS | | | |
|--------------------------|-------|---------|-------------|
| Equipos | Horas | Costo/h | Costo final |
| Laptop Hp Pavilion dv-7' | 200 | 15.00 | 3000.00 |
| Impresora | 20 | 5.00 | 100.00 |
| Total S/. | | | 3100.00 |

Fuente propia.

Tabla 7.4 Presupuesto ingeniería (Materiales).

| MATERIALES | | | |
|----------------------|--------------|---------------|-------------|
| Materiales | Und.(ciento) | P.unitario S/ | Costo final |
| Papel Din-A4 | 3 | 9.00 | 27.00 |
| Útiles de escritorio | | 1 | 500.00 |
| Total S/. | | | 527.00 |

Fuente propia.



Tabla 7.5 Presupuesto ingeniería (Resumen).

| RESUMEN COSTO INGENIERÍA | |
|---------------------------------|-----------------|
| Recursos humanos | 40345.00 |
| Software | 1210.00 |
| Equipo | 3100.00 |
| Materiales | 527.00 |
| Total S/. | 45182.00 |

Fuente propia.

7.2.2 Presupuesto del prototipo.

Tabla 7.6 Presupuesto Prototipo (Resumen).

| PRESUPUESTO PROTOTIPO | | | | | |
|------------------------------|----------------|----------|------|-----------------|----------------|
| Componente | Especificación | Cantidad | Und. | P. unitario S/. | P. total S/. |
| ACTUADORES | | | | | |
| Microservo | SG90 9 g | 5 | und | 15.00 | 75.00 |
| FABRICACIÓN | | | | | |
| Impresión 3d | ABS | 264 | Gr | 2.50 | 660.00 |
| MATERIALES | | | | | |
| Poliuretano termosoldable | Ø2mm | 4 | mt | 3.00 | 12.00 |
| COMPONENTES MECÁNICOS | | | | | |
| Pasadores | D70-3-16 | 26 | Und. | 1.50 | 39.00 |
| Pasadores | D70-2-16 | 16 | Und. | 2.00 | 32.00 |
| Pasadores | D70-2-10 | 12 | Und. | 2.00 | 24.00 |
| Pasadores | D70-3-45 | 1 | Und. | 2.50 | 2.50 |
| ELECTRÓNICA | | | | | |
| Arduino | Uno | 1 | Und. | 80.00 | 80.00 |
| Tarjeta de control | Fabricado | 1 | Und. | 50.00 | 50.00 |
| Potenciómetro | 100K Ohm | 6 | Und. | 1.00 | 6.00 |
| Fuente de alimentación | 5[V], 5[A] | 1 | Und. | 20.00 | 20.00 |
| RECURSO HUMANO | | | | | |
| Ensamble | Propia | 10 | Hr | 30.00 | 300.00 |
| tarjeta de control | Fabricado | 5 | Hr | 30.00 | 150.00 |
| Programación Electrónica | Propia | 5 | Hr | 30.00 | 150.00 |
| Total S/. | | | | | 1600.50 |

Fuente propia.

7.2.3 Resumen final.

Tabla 7.7 Presupuesto Resumen final.

| RESUMEN TOTAL | |
|------------------------------|-----------------|
| Costo Ingeniería | 45182.00 |
| Presupuesto prototipo | 1600.00 |
| Costos indirectos (10%) | 7017.38 |
| PRESUPUESTO TOTAL S/. | 53799.88 |

Fuente propia.

Finalmente el costo de la investigación es de **S/. 53799.88**.



CONCLUSIONES

- Se Diseñó un prototipo de una mano robótica antropométrica.
- El tipo de sujeción seleccionada para el diseño será la cilíndrica, se diseñaron los dedos índice y pulgar para el prototipo según la norma DIN 33.402, los otros tres dedos fueron tomados de igual medida que el dedo índice.
- Para el dedo índice y dedo pulgar se usaron mecanismos de 1G.D.L. de doble balancín de 6 y 4 barras respectivamente. y un servomotor para generar movimiento.
- La trayectoria y movimiento efectuado por las falanges del prototipo son similares a las desarrolladas por los dedos índice y pulgar de una mano humana, siendo 90° el rango extensión y flexión de cada una de las articulaciones de las falanges del dedo índice y pulgar del prototipo.
- La máxima aceleración de Centro de gravedad se encontrara en la falange Distal del dedo índice, con un valor absoluto de $a_8=162.14$ [mm/s²], y en la falange Distal del dedo pulgar con un valor absoluto de $a_3=60.72$ [mm/s²].
- La máxima fuerza en el dedo índice se encuentra en la junta del pasador O2, con un valor absoluto de $V_{max}=24.33$ [N], y en el dedo pulgar se encuentra en la junta del pasador O2, con un valor absoluto de $V_{max}=13.90$ [N].
- El material usado para los pasadores es Acero AISI/SAE 4340 H y para construir las falanges es ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno). Con un factor de seguridad mínimo de 8 y 2 respectivamente. Los pasadores tendrán 2 [mm] de diámetro y las falanges se construirán con un espesor de 3 [mm]. Cada uno de los valores calculados (Cinemáticos y Cinéticos) Fueron validados con los software de simulación: SAM 6.1, y el módulo de simulación dinámica Autodesk Inventor 2015.
- Se seleccionó el servomotor SG90 9g micro servo, con un torque de $T=1765.20$ [N-mm] Que satisface el requerimiento, para generar una fuerza de 6[N] en el dedo índice es $T_{12}= 838.10$ [N-mm] y dedo pulgar es $T_{12}= 442.41$ [N-mm] respectivamente.
- Se construyó y diseño la parte electrónica, se usó un microcontralador Arduino uno, y un control de los actuadores con una resistencia variable.



- Se construyó el prototipo y se hicieron las pruebas necesarias. El costo de la investigación, diseño, construcción y pruebas asciende a **S/. 53799.88**.



RECOMENDACIONES.

- Se recomienda un estudio adicional de la parte de control electrónico, para que el diseño sea funcional, así como también la incorporación de sensores de fuerza en las falanges.
- Se recomienda otro estudio que abarque el diseño de los otros tres dedos que pueden ser diseñados, con la metodología de dedo índice presentada en esta investigación.
- Se recomienda el estudio con otro sistema de transmisión de fuerza, como motores lineales.
- Se recomienda modificar el diseño de las falanges utilizando formas cilíndricas, para mejorar la estética del diseño.



BIBLIOGRAFÍA.

- DF Robot. (n.d.). *Data sheet*. Retrieved from <http://abc-rc.pl/templates/images/files/995/1428085018-sg-90-tower.pdf>
- Reyes Salazar , A. M. (2016, junio 01). *Algebra superior*. Retrieved from <http://gliptal.tripod.com/sitebuildercontent/sitebuilderfiles/Newton-raphson.pdf>
- Arduino. (2016, Junio 22). Retrieved from http://www.arduino.org/products/boards/arduino-uno#tab_4111
- AVILES , O. O., SIMANCA, P. L., & NINO, P. A. (2007, Octubre). Diseño y construcción de un dedo para grippers robóticos / Design and construcción of finger for robotic. España: Universidad Militar Nueva Granada.
- Azorín. (2016, Julio 10). *Azorín Servision Gráficos integrales*. Retrieved from <http://blog.graficasazorin.es/impresoras-3d-el-poder-infinito-de-la-impresion/>
- BARRIGA GAMARRA , B. (2006). *Metodos de Diseño en Ingenieria Mecánica*. Lima: PUCP.
- Bohler. (2014, Diciembre). *Manual de aceros especiales*. Retrieved 02 12, 2016, from Bohler.
- Brazeiro, J., & Petraccia, S. (2015, setiembre 6). Mano controlada por señales musculares. Montevideo, Uruguay.
- Brizuela Mendoza, J. A. (2010, Diciembre 10). Diseño de un Equipo Auxiliar en Terapias de Rehabilitación de Extremidades de Miembro Superior a Nivel de Dedos. Cuernavaca, Morelos, México: Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico.
- CAILLET, R. (2005). *ANATOMIA FUNCIONAL BIOMECANICA*. España: MARBÁN.
- Chao, E. Y. (1989). *Biomechanics of the Hand A Basic Research Study*. Minnesota: World Scientific.
- Din 33.402. (n.d.). *Instituto Alemán de Normalizacion*.
- DIRECCIÓN DE SALUD V LIMA CIUDAD . (2012). *MINSA*. Retrieved from <http://bvs.minsa.gob.pe/local/MINSA/2966.pdf>
- Dorador Gonzáles, J. M. (2016, Marzo 05). *Revista Digital Universitaria UAM*. Retrieved from <http://www.revista.unam.mx/vol.6/num1/art01/art01-1a.htm>
- Egea Garcia, C., & Sarabia Sanchez, A. (2010). Clasificacion de la Oms sobre Discapacidad. *Discatif UM*, 16.
- ERDMAN, A. G. (1997). *MECHANISM DESIGN: Analysis and Synthesis*. Mexico d.f.: PRENTICE HALL.
- *Formizable*. (2016, Mayo 3). Retrieved from <http://formizable.com/guia-de-plasticos-y-otros-materiales-para-impresion-3d/>
- Grades, S. (2016, Julio 20). *Steel-grades*. Retrieved from <http://www.steel-grades.com/Steel-Grades/Carbon-Steel/SAE-1213.html>



- Hawking, S. (2014, 05 26). *eldeber*. Retrieved from eldeber.:
<http://www.eldeber.com.bo/santacruz/stephen-hawking-no-pasemos-alto.html>
- Hlbbeler, R. C. (2006). *MECÁNICA DE MATERIALES*. Mexico: PEARSON EDUCACION.
- HORI, J. J. (2002). *DISEÑO DE ELEMENTOS DE MAQUINAS*. LIMA: UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA .
- INEI. (2012, 12). *PRIMERA ENCUESTA NACIONAL ESPECIALIZADA SOBRE DISCAPACIDAD*. Retrieved from INEI WED SITE:
https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1171/ENEDI S%202012%20-%20COMPLETO.pdf
- L.Norton, R. (2005). *Diseño de Maquinaria*. Mexico: McGrew-Hill.
- Lauren Banks, J. (2001). Design and control of a Anthropomorphic Robotic Finger whitkh Multi .point. Massachusetts Institute of tecnology.
- Macedo Silva, A. (2010). *Cinematica de Mecanismos por metodos Numericos*. Cusco: Unsaac.
- McConville, J. (1981). *Anthropometric relationships of body and body segment moments of inertia*. Texas: Air Force Aerospace Medical Research Laboratory, Aerospace Medical Division, Air Force Systems Command.
- Mecapedia. (2016, Junio 12). *Mecapedia*. Retrieved from Mecapedia:
http://www.mecapedia.uji.es/inversion_cinematica.htm
- naylampmechatronics. (2016, Diciembre 10). *naylamp*. Retrieved from
http://www.naylampmechatronics.com/blog/33_Tutorial-uso-de-servomotores-con-arduino-.html
- NETTER, F. H. (2015). Atlas de anatomía humana. BARCELONA: ELSEVIER MASSON.
- OIHAN ELESGARAY, S. (2014). *DISEÑO Y MONTAJE DE UN BRAZO ROBÓTICO MÓVIL Y PLACA DEEXTENSIÓN DE PINES DE ARDUINO MINI*. VALENCIA: UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA.
- OPAC. (2016, MAYO 12). *Opac elemntos normalizados*. Retrieved from
<http://www.opac.net/pdf/catalog/00completo.pdf>
- OPTIBELT. (2016, 06 12). *Catalogo correas circulares poliuretano*. Retrieved from
<http://www.optibelt.net/05/images/01%20manual%20cordon%20cilindrico%20PU.pdf>
- Orthopaedic, A. (2016, 02 15). *¿Que son las protesis?* Retrieved from
<http://www.aofas.org/footcaremd/espanol/Pages/Qu%C3%A9-Son-Las-Pr%C3%B3tesis.aspx>
- PANAMAHITEK. (2016, Nobiembre 10). *panamahitek*. Retrieved from panamahitek:
<http://panamahitek.com/especificaciones-tecnicas-del-arduino/>
- PERUANO, E. (2006, NOVIEMBRE 16). *Instituto nacional de salud*. Retrieved from
http://www.ins.gob.pe/repositorioaps/0/0/jer/comite_sst/DS%20003-98-SA%20Normas%20T%C3%A9cnicas%20del%20Seguro%20Complementario%20de%20Trabajo%20de%20Riesgo.pdf
- Quinayás Burgos , C. A. (2010). *Diseño y construccion de una protesis robotica de mano*.



- RAE. (2001). *Diccionario de la lengua española [Dictionary of the Spanish Language]*. Madrid: DRAE.
- REBAZA FLORES, A. (2007). *Análisis de la situación de la discapacidad en el Perú 2007*. Lima: MINSa.
- *Robot Argentina*. (2016, 02 10). Retrieved from Robot Argentina: http://robots-argentina.com.ar/Actuadores_manos.htm
- S. SCHULZ, C. P. (2001). A New Ultralight Anthropomorphic Hand. *Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics & Automation*. Seoul, Korea: IEEE Robotics and Automation Society.
- S.C. Jacobsen, J. S. (1986). Design of a the Utah/MIT dexterus hand. 1520-1532.
- Salinas Durán, F., & Lugo Agudelo, I. H. (2008). *Rehabilitación en salud, 2da edición*. Colombia: Universidad de Antioquia.
- Schlesinger, G. (1919). *Der mechanische Aufbau der kunstlichen Glieder in Ersatzglieder und Arbeitshilfen* Springer. Berlin,, Alemania: Springer Berlin Heidelberg.
- Shyglyy, & Budynas, R. G. (2008). *Diseño en ingeniería Mecánica De Shigley*. Mexico: McGraw-Hill.
- Stratasys. (2016, MAYO 20). *Stratasys*. Retrieved from <[http://www.stratasys.com/~media/Main/Secure/Material%](http://www.stratasys.com/~media/Main/Secure/Material%20)
- Suarez, R., & Patrick, G. (2001). MANO MECÁNICA MA-I. *Instituto de Organización y Sistemas Industriales*. Barcelona, España.
- Vásquez Sanchez, A. (2008). Caracterización cinemática e implementación de una mano robótica multiarticulada. Zacatenc, Distrito Federal, México: ESIME-IPN.
- Velázquez-Sánchez A. T., Merchán-Cruz, E. A., y Ramírez-Gordillo, J. (2005). De los grippers de pinzas a las manos robóticas multiarticuladas: La evolución de los efectores finales,. 4° *Congreso Internacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas*.



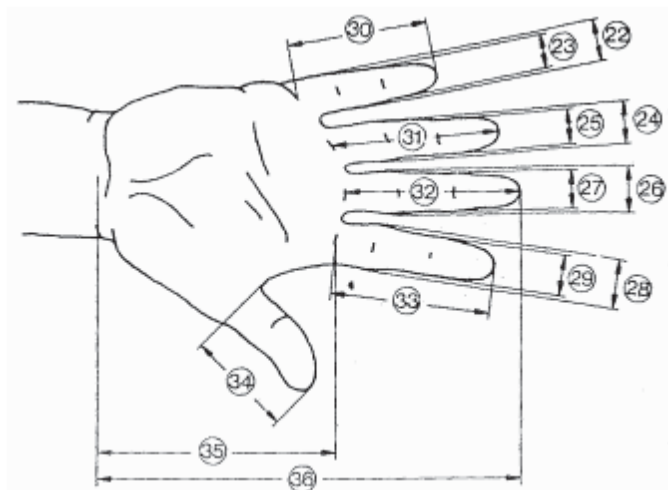
ANEXOS



Anexo A

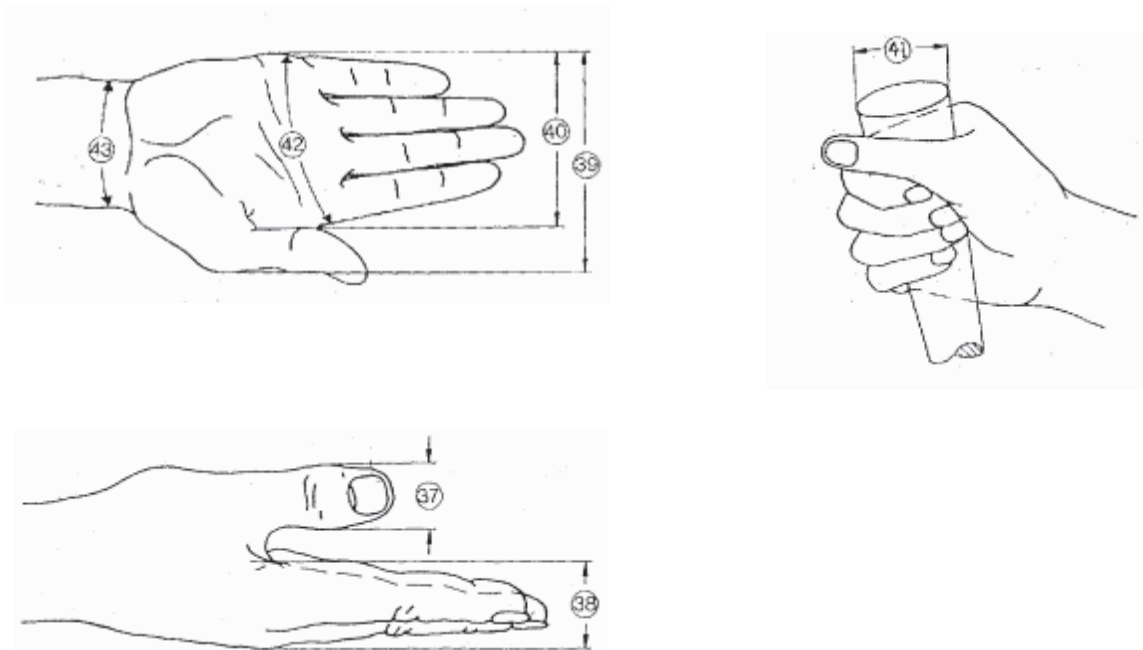
Norma DIN 33 402

Las dimensiones de las manos tienen una gran importancia para el diseño de herramientas, utillaje y mandos. Ante tal necesidad se estableció la norma DIN 33 402 con el fin de estandarizar estas medidas y poder ser utilizadas en la industria. A continuación se muestran las medidas para las manos que esta norma dicta.



| Dimensiones En cm. | PERCENTIL | | | | | | |
|--------------------|--|------|------|---------|------|------|------|
| | Hombres | | | Mujeres | | | |
| | 5 % | 50 % | 95 % | 5 % | 50 % | 95 % | |
| 22 | Ancho del meñique en la palma de la mano | 1,8 | 1,7 | 1,8 | 1,2 | 1,5 | 1,7 |
| 23 | Ancho del meñique próximo de la yema | 1,4 | 1,5 | 1,7 | 1,1 | 1,3 | 1,5 |
| 24 | Ancho del dedo anular en la palma de la mano | 1,8 | 2,0 | 2,1 | 1,5 | 1,6 | 1,8 |
| 25 | Ancho del dedo anular próximo a la yema | 1,5 | 1,7 | 1,9 | 1,3 | 1,4 | 1,6 |
| 26 | Ancho del dedo mayor en la palma de la mano | 1,9 | 2,1 | 2,3 | 1,6 | 1,8 | 2,0 |
| 27 | Ancho del dedo mayor próximo a la yema | 1,7 | 1,8 | 2,0 | 1,4 | 1,5 | 1,7 |
| 28 | Ancho del dedo índice en la palma de la mano | 1,9 | 2,1 | 2,3 | 1,6 | 1,8 | 2,0 |
| 29 | Ancho del dedo índice próximo a la yema | 1,7 | 1,8 | 2,0 | 1,3 | 1,5 | 1,7 |
| 30 | Largo del dedo meñique | 5,6 | 6,2 | 7,0 | 5,2 | 5,8 | 6,6 |
| 31 | Largo del dedo anular | 7,0 | 7,7 | 8,6 | 6,5 | 7,3 | 8,0 |
| 32 | Largo del dedo mayor | 7,5 | 8,3 | 9,2 | 6,9 | 7,7 | 8,5 |
| 33 | Largo del dedo índice | 6,8 | 7,5 | 8,3 | 6,2 | 6,9 | 7,6 |
| 34 | Largo del dedo pulgar | 6,0 | 6,7 | 7,6 | 5,2 | 6,0 | 6,9 |
| 35 | Largo de la palma de la mano | 10,1 | 10,9 | 11,7 | 9,1 | 10,0 | 10,8 |
| 36 | Largo total de la mano | 17,0 | 18,6 | 20,1 | 15,9 | 17,4 | 19,0 |

Figura 1. Medidas de los dedos según Norma DIN 33402 (Parte 1)



| Dimensiones | PERCENTIL | | | | | |
|--------------------------|-----------|------|------|---------|------|------|
| | Hombres | | | Mujeres | | |
| | 5 % | 50 % | 95 % | 5 % | 50 % | 95 % |
| En cm. | | | | | | |
| 37 Ancho del dedo pulgar | 2,0 | 2,3 | 2,5 | 1,6 | 1,9 | 2,1 |
| 38 Grosor de la mano | 2,4 | 2,8 | 3,2 | 2,1 | 2,6 | 3,1 |

| Dimensiones | PERCENTIL | | | | | |
|---|-----------|------|------|---------|------|------|
| | Hombres | | | Mujeres | | |
| | 5 % | 50 % | 95 % | 5 % | 50 % | 95 % |
| En cm. | | | | | | |
| 39 Ancho de la mano incluyendo dedo pulgar | 9,8 | 10,7 | 11,6 | 8,2 | 9,2 | 10,1 |
| 40 Ancho de la mano excluyendo el dedo pulgar | 7,8 | 8,5 | 9,3 | 7,2 | 8,0 | 8,5 |
| 41 Diámetro de agarre de la mano* | 11,9 | 13,8 | 15,4 | 10,8 | 13,0 | 15,7 |
| 42 Perímetro de la mano | 19,5 | 21,0 | 22,9 | 17,6 | 19,2 | 20,7 |
| 43 Perímetro de la articulación de la muñeca | 16,1 | 17,6 | 18,9 | 14,6 | 16,0 | 17,7 |

* Las medidas corresponden al anillo descrito por los dedos pulgar e índice


Figura 2. Medidas de los dedos según Norma DIN 33402 (Parte 2)

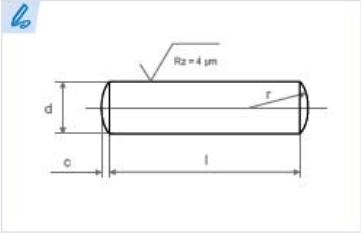


Anexo B

PASADORES
DOWEL PINS • GOUPILLES • CAVILHAS

DIN 7





Pasador cilíndrico
Paralel pins
Goupille cylindrique
Cavilha cilíndrica

Material: 9SMnPb28K
Materia: 9SMnPb28K
Matière: 9SMnPb28K
Materia: 9SMnPb28K

Tolerancia: m6
Tolerance: m6
Tolérance: m6
Tolerância: m6

| d | m6 | 0,8* | 1 | 1,2 | 1,5 | 2 | 2,5 | 3 | 4 | 5 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 20 | 25 | 30 | 40 | 50 | m6 | d |
|-----|------|------|------|------|------|-----|-----|------|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|-----|------|---|
| c | max. | 0,12 | 0,15 | 0,18 | 0,23 | 0,3 | 0,4 | 0,45 | 0,6 | 0,75 | 0,9 | 1,2 | 1,5 | 1,8 | 2 | 2,5 | 3 | 4 | 4,5 | 6 | 7,5 | max. | c |
| r | = | 0,8 | 1 | 1,2 | 1,6 | 2 | 2,5 | 3 | 4 | 5 | 6 | 8 | 10 | 12 | 16 | 16 | 20 | 25 | 32 | 40 | 50 | = | r |
| 02 | 03 | 03 | 03 | 04 | 04 | 04 | 04 | 05 | 05 | 06 | 08 | 10 | 10 | 14 | 16 | 20 | 24 | 32 | 40 | 50 | | | |
| 03 | 04 | 04 | 04 | 05 | 05 | 05 | 06 | 06 | 08 | 10 | 12 | 12 | 16 | 18 | 22 | 28 | 36 | 45 | 55 | | | | |
| 04 | 05 | 05 | 06 | 06 | 06 | 08 | 08 | 10 | 10 | 12 | 14 | 14 | 18 | 20 | 24 | 32 | 40 | 50 | 60 | | | | |
| 05 | 06 | 06 | 06 | 08 | 08 | 08 | 10 | 10 | 12 | 12 | 14 | 16 | 16 | 20 | 22 | 26 | 36 | 45 | 55 | 70 | | | |
| 06 | 08 | 08 | 08 | 10 | 10 | 10 | 12 | 12 | 14 | 16 | 18 | 18 | 22 | 24 | 28 | 40 | 50 | 60 | 80 | | | | |
| 08 | 10 | 10 | 10 | 12 | 12 | 12 | 14 | 14 | 16 | 18 | 20 | 20 | 24 | 26 | 30 | 45 | 55 | 70 | 90 | | | | |
| 12 | 12 | 12 | 14 | 14 | 14 | 16 | 16 | 18 | 20 | 22 | 22 | 26 | 28 | 32 | 50 | 60 | 80 | 100 | | | | | |
| 14 | 14 | 14 | 16 | 16 | 16 | 18 | 18 | 20 | 22 | 24 | 24 | 28 | 30 | 36 | 55 | 70 | 90 | 120 | | | | | |
| 16 | 16 | 18 | 18 | 18 | 20 | 20 | 22 | 24 | 26 | 26 | 30 | 32 | 40 | 60 | 80 | 100 | 140 | | | | | | |
| 18 | 18 | 20 | 20 | 20 | 22 | 22 | 24 | 26 | 28 | 28 | 32 | 36 | 45 | 70 | 90 | 120 | 160 | | | | | | |
| 20 | 20 | 22 | 22 | 22 | 24 | 24 | 26 | 28 | 30 | 30 | 36 | 40 | 50 | 80 | 100 | 140 | 180 | | | | | | |
| 22 | 22 | 24 | 24 | 24 | 26 | 26 | 28 | 30 | 32 | 32 | 40 | 45 | 55 | 90 | 120 | 160 | 200 | | | | | | |
| 24 | 24 | 26 | 26 | 26 | 28 | 28 | 30 | 32 | 36 | 36 | 45 | 50 | 60 | 100 | 140 | 180 | | | | | | | |
| 26 | 26 | 28 | 28 | 28 | 30 | 30 | 32 | 36 | 40 | 40 | 50 | 55 | 70 | 120 | 160 | 200 | | | | | | | |
| 28 | 28 | 30 | 30 | 30 | 32 | 32 | 36 | 40 | 45 | 45 | 55 | 60 | 80 | 140 | 180 | | | | | | | | |
| 30 | 30 | 32 | 32 | 32 | 36 | 36 | 40 | 45 | 50 | 50 | 60 | 70 | 90 | 150 | 200 | | | | | | | | |
| 32 | 32 | 36 | 36 | 36 | 40 | 40 | 45 | 50 | 55 | 55 | 70 | 80 | 100 | 160 | | | | | | | | | |
| 40 | 40 | 40 | 40 | 45 | 45 | 50 | 55 | 60 | 70 | 70 | 90 | 100 | 140 | 200 | | | | | | | | | |
| 45 | 45 | 50 | 50 | 55 | 60 | 70 | 80 | 100 | 120 | 120 | 160 | | | | | | | | | | | | |
| 50 | 50 | 55 | 55 | 60 | 70 | 80 | 100 | 120 | 160 | | | | | | | | | | | | | | |
| 55 | 55 | 60 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | 120 | 140 | 180 | | | | | | | | | | | | | |
| 60 | 60 | 70 | 70 | 80 | 90 | 100 | 120 | 140 | 160 | 200 | | | | | | | | | | | | | |
| 80 | 80 | 90 | 90 | 100 | 120 | 120 | 160 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 90 | 90 | 100 | 100 | 120 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 100 | 100 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Tolerancia de la longitud (l) - Tolerance of the length (l) - Tolerância do comprimento (l)

La siguiente tabla muestra la tolerancia de la longitud según la longitud y la tolerancia del diámetro.
 The following table shows the length tolerance according to length and the diameter tolerance.
 Le tableau ci-joint indique la tolérance de la longueur suivant la longueur et la tolérance du diamètre.
 A seguinte tabela mostra a tolerância do comprimento conforme o comprimento e a tolerância do diâmetro.

| | | | |
|------|------------|-------------|--------------|
| | l = 2 - 10 | l = 12 - 90 | l = 95 - 200 |
| d m6 | + 0,3 / 0 | + 0,5 / 0 | + 0,8 / 0 |
| d h8 | + 0,5 / 0 | + 1 / 0 | + 1,5 / 0 |

Las longitudes en negrita son las más utilizadas.
Bold numbers represent the most commonly used lengths.
En noir les longueurs les plus utilisées.
Os comprimentos em negrito são os mais utilizados.


Otras medidas bajo consulta.
Other dimensions by request.
Autras dimensões sur demanda.
Outras medidas, sob consulta.

Medidas fuera de norma DIN.
Dimensions outside DIN standard.
Longueur hors norme DIN.
Medidas fora da norma DIN.

d = 0,8mm. sólo normalizado para h8.
d = 0,8 mm. Only standardized for h8.
d = 0,8 mm. Seulement normalisé pour h8.
d = 0,8 mm normalizado apenas para h8.

Ref.?

ejemplo Ref = D70 - XX - XXX
example Ref = D70 - XX - XXX
example Ref = D70 - XX - XXX

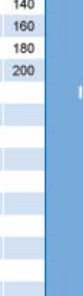

 ISO 8734 A 10 x 40
 Ref. = D70-10-20

Inoxidable - Stainless Steel - Inoxydable - Inoxidável

También disponibles en stock en material inoxidable.
 Consulte con nuestro departamento comercial.
We also have stainless steel available in stock. Contact our sales department.
Egalement disponible sur stock en inox. Nous consulter.
Também disponíveis em estoque em material inoxidável. Consulte o nosso departamento comercial.

h8

Disponibile en stock pasadores DIN 7 en tolerancia h8. Consulte con nuestro departamento comercial.
 We stock DIN 7 dowel pins with an h8 tolerance. Contact our sales department.
 Disponible sur stock goupilles DIN 7 en tolérance h8. Nous consulter.
 Disponível em estoque cavilhas DIN 7 em tolerância h8. Consulte o nosso departamento comercial.

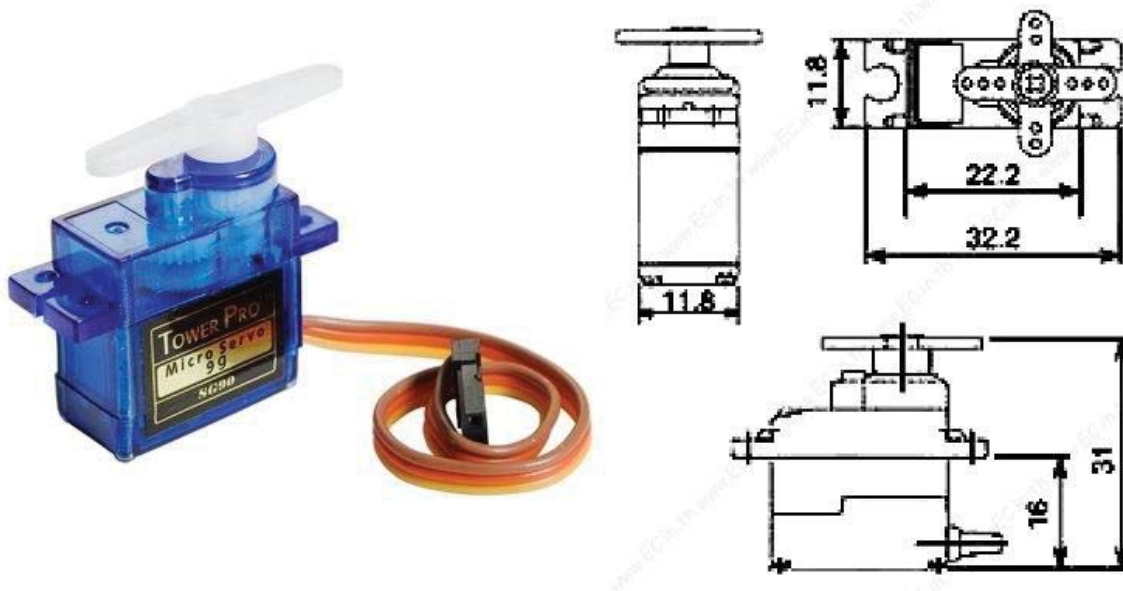


Fuente: (OPAC, 2016)



Anexo C

Datasheet: SG90 9 g Micro Servo



Tiny and lightweight with high output power. Servo can rotate approximately 180 degrees(90 in each direction), and works just like the standard kinds but *smaller*. You can use anyservo code, hardware or library to control these servos. Good for beginners who want to makestuff move without building a motor controller with feedback & gear box, especially since itwill fit in small places. It comes with a 3 horns (arms) and hardware.

Specifications

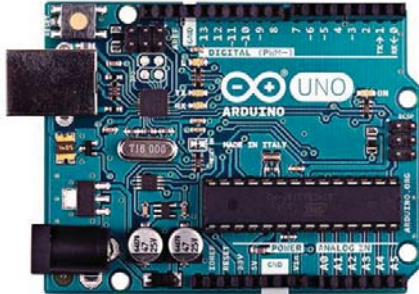
- Weight: 9 g
- Dimension: 22.2 x 11.8 x 31 mm approx.
- Stall torque: 1.85 kgf·cm
- Operating speed: 0.12 s/60 degree
- Operating voltage: 4.8 V (~5V)
- Power: 15.0 watt
- Dead band width: 10 μ s
- Temperature range: 0 °C – 55 °C

Fuente: DATA SHEET DF Robot.



Anexo D

Datasheet: Arduino UNO



The Arduino Uno is a microcontroller board based on the ATmega328 ([datasheet](#)). It has 14 digital input/output pins (of which 6 can be used as PWM outputs), 6 analog inputs, a 16 MHz ceramic resonator, a USB connection, a power jack, an ICSP header, and a reset button. It contains everything needed to support the microcontroller; simply connect it to a computer with a USB cable or power it with a AC-to-DC adapter or battery to get started.

ARDUINO MICROCONTROLLER

| | |
|-------------------------|--|
| Microcontroller | ATmega328 |
| Architecture | AVR |
| Operating Voltage | 5 V |
| Flash memory | 32 KB of which 0.5 KB used by bootloader |
| SRAM | 2 KB |
| Clock Speed | 16 MHz |
| Analog I/O Pins | 6 |
| EEPROM | 1 KB |
| DC Current per I/O Pins | 40 mA on I/O Pins; 50 mA on 3,3 V Pin |

GENERAL

| | |
|------------------|------------------------------------|
| Input Voltage | 7-12 V |
| Digital I/O Pins | 20 (of which 6 provide PWM output) |
| PWM Output | 6 |
| PCB Size | 53.4 x 68.6 mm |
| Weight | 25 g |
| Product Code | A000066 (TH); A000073 (SMD) |

Fuente: (Arduino, 2016)



Anexo E

Código cinemático y cinético del mecanismo, Matlab.

```

%%Código de programación Matlab
clc,clear
K=[0,0,0,0,0,0,0];
h=0;%t2=ángulo teta2,t3: ángulo teta3,t4: ángulo teta4p
%V variación de teta3,U variación de teta4
R2=50/1000; %longitud del eslabón 2
r2 =27.416/1000;%m posicionamiento del CG de 2
r22=2.685/1000; %m posicionamiento del CG de 2
m2 =0.005; I2 =1.455; %Kg*mm^2
I2 =I2/1000000; % kg*m^2
R3=7.91432/1000; %longitud del eslabón 3
r3 =14.906/1000; % posicionamiento del CG de 3
r33= 3.250/1000; % posicionamiento del CG de 3
m3 =0.003; I3 =0.335; %Kg*mm^2
I3=I3/1000000; % kg*m^2
R4=48.39810/1000; %longitud del eslabón 4
r4=(R4/2); % posicionamiento del CG de 4
r44=0; % posicionamiento del CG de 4
m4=0.001; I4=0.029; %Kg*mm^2
I4=I4/1000000; % kg*m^2
%bancadas
R1x=5 /1000; %longitud del eslabón 1 en x mm
R1y=6 /1000; %longitud del eslabón 1 en y mm
R5=55.0 /1000; R6=4.0 /1000; R7=30 /1000;
R8 = 6.53521/1000;
r8 =10.036/1000; r88= 2.411/1000; m8 = 0.002;%kg
I8 = 0.125; I8 =I8/1000000; % kg*m^2
R9=28.343060/1000; r9=(R9/2); r99=0;
m9=0.001; I9=0.029;I9=I9/1000000; % kg*m^2
%%Distancias hacia los puntos de reacción en los eslabones
r12=sqrt((r2.^2)+(r22.^2)); r32=22.7430/1000; r92=27.6153/1000;
r23=sqrt((r3.^2)+(r33.^2)); r43=12.8230/1000; r83=15.4399/1000;
r38=sqrt((r8.^2)+(r88.^2)); r98=9.5329/1000; rp =5.566/1000;
r14=(R4/2); r34=(R4/2); r29=(R9/2); r89=(R9/2); R10=25/1000;
t2=90*pi/180;% Angulo inicial de t2
t3=159.4354*pi/180; %introducimos ángulos arbitrarios
t4=104.8574*pi/180; %introducimos ángulos arbitrarios
w2=0.78540;%velocidad angular d entrada rad/seg
a2=0; %Aceleracion angular
%Ángulos de los eslabones medial, distal
be=69.435*pi/180;g =77.8912*pi/180; t7=t3-be;
t8=167.89*pi/180; %introducimos ángulos arbitrarios
t9=111.50*pi/180; %introducimos ángulos arbitrarios
P=6;%(N) fuerza de agarre requerida
hh=19; % números de interacciones para t2
for i=1:hh % números de interacción par t2
%Primera interacción nodo 1
f1=R2*cos(t2)+R3*cos(t3)-R4*cos(t4)-R1x; %funciones de generación para el
primer nodo=0
f2=R2*sin(t2)+R3*sin(t3)-R4*sin(t4)-R1y; %funciones de generación para el
primer nodo=0
A=[-R3*sin(t3) R4*sin(t4);R3*cos(t3) -R4*cos(t4)]; %EL JACOBIANO
B=-[R2*cos(t2)+R3*cos(t3)-R4*cos(t4)-R1x; R2*sin(t2)+R3*sin(t3)-R4*sin(t4)-
R1y];
X=inv(A)*B;
vt3=X(1);vt4=X(2);
%Segunda interacción nodo 4
f7=R2*cos(t2)+R7*cos(t3-be)+R8*cos(t8)-R5*cos(t2)-R6*cos(t2-90*pi/180)-
R9*cos(t9); %funciones de generación para el cuarto nodo=0
f8=R2*sin(t2)+R7*sin(t3-be)+R8*sin(t8)-R5*sin(t2)-R6*sin(t2-90*pi/180)-
R9*sin(t9); %funciones de generación para el cuarto nodo=0
C=[-R8*sin(t8) R9*sin(t9);R8*cos(t8) -R9*cos(t9)]; %El jacobiano

```



```

D=-[ f7 ; f8 ];
Y=inv(C)*D; vt5=Y(1); vt6=Y(2); e=0.00001;pi ;
while abs(vt3)>e & abs(vt4)>e % mientras que vt3 > que e
    t3=t3+vt3;t4=t4+vt4;
    f1=R2*cos(t2)+R3*cos(t3)-R4*cos(t4)-R1x; %funciones de generación para el
primer nodo=0
    f2=R2*sin(t2)+R3*sin(t3)-R4*sin(t4)-R1y; %funciones de generación para el
primer nodo=0
    A=[-R3*sin(t3) R4*sin(t4);R3*cos(t3) -R4*cos(t4)]; %EL JACOBIANO
    B=-[R2*cos(t2)+R3*cos(t3)-R4*cos(t4)-R1x; R2*sin(t2)+R3*sin(t3)-
R4*sin(t4)-R1y];
    X=inv(A)*B;          vt3=X(1);          vt4=X(2);
end
while abs(vt5)>e & abs(vt6)>e % mientras que vt3 > que e
    t8=t8+vt5;          t9=t9+vt6;
    f7=R2*cos(t2)+R7*cos(t3-be)+R8*cos(t8)-R5*cos(t2)-R6*cos(t2-
90*pi/180)-R9*cos(t9); %funciones de generación para el cuarto nodo=0
    f8=R2*sin(t2)+R7*sin(t3-be)+R8*sin(t8)-R5*sin(t2)-R6*sin(t2-90*pi/180)-
R9*sin(t9); %funciones de generación para el cuarto nodo=0
    C=[-R8*sin(t8) R9*sin(t9);R8*cos(t8) -R9*cos(t9)]; %El jacobiano
    D=-[ f7 ; f8 ];          Y=inv(C)*D;          vt5=Y(1);          vt6=Y(2);
    %ángulos % puede modificarse
    t7=t3-be; t10=t8-g;
end
%Velocidades para el nodo 1
%Ecuaciones de velocidades angulares
%definimos w3, w4
Jv1=[-R3*sin(t3) R4*sin(t4);R3*cos(t3) -R4*cos(t4)]; %JACOBIANO
F=[w2*R2*sin(t2); -w2*R2*cos(t2)];
XX=inv(Jv1)*F;
w3=XX(1); %%Velocidad angular: barra 3
w4=XX(2); %%Velocidad angular: barra 4
w7 =w3; %%velocidad angular: barra 7
%%Ecuaciones de aceleraciones angulares
%definimos alfa3, alfa 4
Ja1=[-R3*sin(t3) R4*sin(t4);R3*cos(t3) -R4*cos(t4)];
H=[R2*a2*sin(t2)+R2*w2*w2*cos(t2)+R3*w3*w3*cos(t3)-R4*w4*w4*cos(t4); -
R2*a2*cos(t2)+R2*w2*w2*sin(t2)+R3*w3*w3*sin(t3)-R4*w4*w4*sin(t4)];
XXX=inv(Ja1)*H;
a3=XXX(1); %%Velocidad angular: barra 3
a4=XXX(2); %%Velocidad angular: barra 4
a7 =a3; %aceleraciones en 7
% velocidades para el nodo 4
%%Ecuaciones de velocidades angulares
%definimos w8, w9
Jv2=[-R8*sin(t8) R9*sin(t9);R8*cos(t8) -R9*cos(t9)]; %jACOVIANO
I=[w2*R2*sin(t2)+w3*R7*sin(t3-be)-w2*R5*sin(t2)-w2*R6*sin(t2-90*pi/180) ;
-w2*R2*cos(t2)-w3*R7*cos(t3-be)+w2*R5*cos(t2)+w2*R6*cos(t2-90*pi/180) ];
YY=inv(Jv2)*I;
w8=YY(1); %%Velocidad angular: barra 3
w9=YY(2); %%Velocidad angular: barra 4
w10=w8; % velocidad. Angular, 10
%Ecuaciones de aceleraciones angulares
%definimos alfa8, alfa 9
Ja2=[-R8*sin(t8) R9*sin(t9);R8*cos(t8) -R9*cos(t9)]; %jACOBIANO
j=[R2*a2*sin(t2)+R2*w2*w2*cos(t2)+R7*a3*sin(t3-be)+R7*w3*w3*cos(t3-
be)+R8*w8*w8*cos(t8)-R5*a2*sin(t2)-R5*w2*w2*cos(t2)-R6*a2*sin(t2-90*pi/180)-
R6*w2*w2*cos(t2-90*pi/180)-R9*w9*w9*cos(t9); -R2*a2*cos(t2)+R2*w2*w2*sin(t2)-
R7*a3*cos(t3-be)+R7*w3*w3*sin(t3-be)+R8*w8*w8*sin(t8)+R5*a2*cos(t2)-
R5*w2*w2*sin(t2)+R6*a2*cos(t2-90*pi/180)-R6*w2*w2*sin(t2-90*pi/180)-
R9*w9*w9*sin(t9)];
yyy=inv(Ja2)*j;
a8=yyy(1); %%Aceleración angular: barra 8
a9=yyy(2); %%Aceleración angular: barra 9
a10=a8; % aceleraciones angulares 10
%Ecuaciones posicionamiento A
%posición de A

```



```

Rax=R2*cos(t2);Ray=R2*sin(t2);Ra=sqrt((Rax^2)+(Ray^2));
%velocidad DE A;
Vax=-R2*w2*sin(t2);Vay= R2*w2*cos(t2);Va=sqrt((Vax^2)+(Vay^2));
%Aceleración de A
Aax=-R2*a2*sin(t2)-R2*w2*w2*cos(t2);Aay= R2*a2*cos(t2)-
R2*w2*w2*sin(t2);Aa=sqrt((Aax^2)+(Aay^2));
%Ecuaciones posicionamiento C
%posición de C
Rcx=R5*cos(t2)+R6*cos(t2-90*pi/180);Rcy=R5*sin(t2)+R6*sin(t2-
90*pi/180);Rc=sqrt((Rcx^2)+(Rcy^2));
%velocidad DE C;
Vcx=-R5*w2*sin(t2)-R6*w2*sin(t2-90*pi/180);
Vcy= R5*w2*cos(t2)+R6*w2*cos(t2-90*pi/180);
Vc=sqrt((Vcx^2)+(Vcy^2));
%aceleracion de C
Acx=-R5*a2*sin(t2)-R5*w2*w2*cos(t2)-R6*a2*sin(t2-90*pi/180)-R6*w2*w2*cos(t2-
90*pi/180);
Acy= R5*a2*cos(t2)-R5*w2*w2*sin(t2)+R6*a2*cos(t2-90*pi/180)-R6*w2*w2*sin(t2-
90*pi/180);
Ac=sqrt((Acx^2)+(Acy^2));
%Ecuaciones posicionamiento D
%posición de D
Rdx=R2*cos(t2)+R7*cos(t3-be);Rdy=R2*sin(t2)+R7*sin(t3-be);
Rd=sqrt((Rdx^2)+(Rdy^2));
%velocidad DE D;
Vdx=-R2*w2*sin(t2)-R7*w3*sin(t3-be);Vdy= R2*w2*cos(t2)+R7*w3*cos(t3-
be);Vd=sqrt((Vdx^2)+(Vdy^2));
%aceleracion de D
Adx=-R2*a2*sin(t2)-R2*w2*w2*cos(t2)-R7*a3*sin(t3-be)-R7*w3*w3*cos(t3-be);Ady=
R2*a2*cos(t2)-R2*w2*w2*sin(t2)+R7*a3*cos(t3-be)-R7*w3*w3*sin(t3-be);
Ad=sqrt((Adx^2)+(Ady^2));
%Ecuaciones posicionamiento B
%posición de B
Rbx=R4*cos(t4);Rby=R4*sin(t4);Rb=sqrt((Rbx^2)+(Rby^2));
%velocidad DE B;
Vbx=-R4*w4*sin(t4);Vby= R4*w4*cos(t4);Vb=sqrt((Vbx^2)+(Vby^2));
%aceleracion de B
Abx=-R4*a4*sin(t4)-R4*w4*w4*cos(t4);Aby= R4*a4*cos(t4)-
R4*w4*w4*sin(t4);Ab=sqrt((Abx^2)+(Aby^2));
%Ecuaciones posicionamiento E
%posición de E
Rex=Rcx+ R9*cos(t9);Rey=Rcy+ R9*sin(t9);Re=sqrt((Rex^2)+(Rey^2));
%velocidad DE E;
Vex=Vcx-R9*w9*sin(t9);Vey=Vcy+R9*w9*cos(t9);Ve=sqrt((Vex^2)+(Vey^2));
%aceleracion de E
Aex=Acx-R9*a9*sin(t9)-R9*w9*w9*cos(t9);Aey=Acy+R9*a9*cos(t9)-
R9*w9*w9*sin(t9);Ae=sqrt((Aex^2)+(Aey^2));
%Ecuaciones posicionamiento F
%posición de F
Rfx=Rdx+ R10*cos(t8-g);Rfy=Rdy+ R10*sin(t8-g);Rf=sqrt((Rfx^2)+(Rfy^2));
%velocidad DE F;
Vfx=Vdx-R10*w8*sin(t8-g);Vfy=Vdy+R10*w8*cos(t8-g);
Vf=sqrt((Vfx^2)+(Vfy^2));
%aceleracion de F
Afx=Adx -R10*a8*sin(t8-g)-R10*w8*w8*cos(t8-g);Afy=Ady +R10*a8*cos(t8-g)-
R10*w8*w8*sin(t8-g);Af=sqrt((Afx^2)+(Afy^2));
% CENTRO DE MASA
%%B POSICIONES VELOCIDADES Y ACELERACIONES
%Ecuaciones posicionamiento centro de gravedad eslabón 2
%Posicionamiento de Centro de gravedad 2
Rcg2x=r2*cos(t2)+r22*cos(t2-90*pi/180);
Rcg2y=r2*sin(t2)+r22*sin(t2-90*pi/180);
Rcg2=sqrt((Rcg2x^2)+(Rcg2y^2));
%velocidad DE CG2;
Vcg2x=-r2*w2*sin(t2)-r22*w2*sin(t2-90*pi/180);
Vcg2y= r2*w2*cos(t2)+r22*w2*cos(t2-90*pi/180);
Vcg2=sqrt((Vcg2x^2)+(Vcg2y^2));

```



```

%aceleracion de CG2
Acg2x=-r2*a2*sin(t2)-r2*w2*w2*cos(t2)-r22*a2*sin(t2-90*pi/180)-r22*w2*w2*cos(t2-90*pi/180);
Acg2y=+r2*a2*cos(t2)-r2*w2*w2*sin(t2)+r22*a2*cos(t2-90*pi/180)-r22*w2*w2*sin(t2-90*pi/180);
Acg2=sqrt((Acg2x^2)+(Acg2y^2));
%Ecuaciones posicionamiento gravedad eslabón 3 CG3
%posición de CG3
Rcg3x=r3*cos(t7)+r33*cos(t7+90*pi/180); %t3-be=t7
Rcg3y=r3*sin(t7)+r33*sin(t7+90*pi/180);
Rcg3=sqrt((Rcg3x^2)+(Rcg3y^2));
%velocidad DE ACG3
Vcg3x=Vax-r3*w3*sin(t7)-r33*w3*sin(t7+90*pi/180);
Vcg3y=Vay+r3*w3*cos(t7)+r33*w3*cos(t7+90*pi/180);
Vcg3=sqrt((Vcg3x^2)+(Vcg3y^2));
%aceleracion de ACG3
Acg3x=Aax-r3*a3*sin(t7)-r3*w3*w3*cos(t7)-r33*a3*sin(t7+90*pi/180)-r33*w3*w3*cos(t7+90*pi/180);
Acg3y=Aay+r3*a3*cos(t7)-r3*w3*w3*sin(t7)+r33*a3*cos(t7+90*pi/180)-r33*w3*w3*sin(t7+90*pi/180);
Acg3=sqrt((Acg3x^2)+(Acg3y^2));
%Ecuaciones posicionamiento centro de gravedad eslabón 4
%posición de ACG4
Rcg4x=r4*cos(t4);Rcg4y=r4*sin(t4);Rcg4=sqrt((Rcg4x^2)+(Rcg4y^2));
%velocidad DE ACG4;
Vcg4x=-r4*w4*sin(t4);Vcg4y=+r4*w4*cos(t4); Vcg4=sqrt((Vcg4x^2)+(Vcg4y^2));
%aceleracion de ACG4
Acg4x=-r4*a4*sin(t4)-r4*w4*w4*cos(t4);Acg4y=+r4*a4*cos(t4)-r4*w4*w4*sin(t4);Acg4=sqrt((Acg4x^2)+(Acg4y^2));
%Ecuaciones posicionamiento CENTRO gravedad eslabón 8
%posición de CG8
Rcg8x=r8*cos(t8-g)+r88*cos(t8-g-90*pi/180);
Rcg8y=r8*sin(t8-g)+r88*sin(t8-g-90*pi/180);
Rcg8=sqrt((Rcg8x^2)+(Rcg8y^2));
%velocidad DE CG8;
Vcg8x=Vdx-r8*w8*sin(t8-g)-r88*w8*sin(t8-g+90*pi/180);
Vcg8y=Vdy+r8*w8*cos(t8-g)+r88*w8*cos(t8-g+90*pi/180);
Vcg8=sqrt((Vcg8x^2)+(Vcg8y^2));
%aceleracion de CG8
Acg8x=Adx-r8*a8*sin(t8-g)-r8*w8*w8*cos(t8-g)-r88*a8*sin(t8-g+90*pi/180)-r88*w8*w8*cos(t8-g+90*pi/180);
Acg8y=Ady+r8*a8*cos(t8-g)-r8*w8*w8*sin(t8-g)+r88*a8*cos(t8-g+90*pi/180)-r88*w8*w8*sin(t8-g+90*pi/180);
Acg8=sqrt((Acg8x^2)+(Acg8y^2));
%Ecuaciones posicionamiento CG9
%posición de CG9
Rcg9x=r9*cos(t9)+r99*cos(t9-90*pi/180);
Rcg9y=r9*sin(t9)+r99*sin(t9-90*pi/180);
Rcg9=sqrt((Rcg9x^2)+(Rcg9y^2));
%velocidad DE CG9
Vcg9x=Vcx-r9*w9*sin(t9)-r99*w9*sin(t9-90*pi/180);
Vcg9y=Vcy+r9*w9*cos(t9)-r99*w9*cos(t9-90*pi/180);
Vcg9=sqrt((Vcg9x^2)+(Vcg9y^2));
%aceleracion de CG9
Acg9x=Acx-r9*a9*sin(t9)-r9*w9*w9*cos(t9)-r99*a9*sin(t9-90*pi/180)-r99*w9*w9*cos(t9-90*pi/180);
Acg9y=Acy+r9*a9*cos(t9)-r9*w9*w9*sin(t9)+r99*a9*cos(t9-90*pi/180)-r99*w9*w9*sin(t9-90*pi/180);
Acg9=sqrt((Acg9x^2)+(Acg9y^2));
%ángulos en los cg
be1=174.40655*pi/180;be2= 6.78040*pi/180;be3= 2.72937*pi/180;
be4=192.29980*pi/180;be6= 12.15126*pi/180;be5=161.06473*pi/180;
be7=193.50848*pi/180;be8=155.33775*pi/180;be99=12.10088*pi/180;
be10=180.0000*pi/180;be11=000.0000*pi/180;be12=1.431560*pi/180;
%Vectores de posicionamiento de los Cg a los pasadores
%%En 2
r12x=r12*cos(t2+be1);r12y=r12*sin(t2+be1);r32x=r32*cos(t2+be2);

```




```

r32y=r32*sin(t2+be2);r92x=r92*cos(t2-be3);r92y=r92*sin(t2-be3);
%%En 3
r23x=r23*cos(t7+be4);r23y=r23*sin(t7+be4);r43x=r43*cos(t7+be5);
r43y=r43*sin(t7+be5);r83x=r83*cos(t7-be6);r83y=r83*sin(t7-be6);
% En 8
r38x=r38*cos(t10+be7);r38y=r38*sin(t10+be7);r98x=r98*cos(t10+be8);
r98y=r98*sin(t10+be8);rpx=rp*cos(t8+be99);rpy=rp*sin(t8+be99);
% en4
r14x=r14*cos(t4+be10);r14y=r14*sin(t4+be10);r34x=r34*cos(t4+0);
r34y=r34*sin(t4+0);
%En 9
r29x=r29*cos(t9+be10);r29y=r29*sin(t9+be10);r89x=r89*cos(t9+be11);
r89y=r89*sin(t9+be11);
%%Matrices de fuerzas en los eslabones
%fuerza aplicada en el eslabón 8 perpendicular a r10
Px=P*cos(t10-90*pi/180);Py=P*sin(t10-90*pi/180);
PP=[ 1 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
1 0 0 0 ;
0 1 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 1 0 ;
-r12y r12x -r32y r32x 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
-r92y r92x 1 ;
0 0 0 -1 0 1 0 0 0 1 0 0 0 0
0 0 0 0 -1 0 1 0 0 0 1 0 0 0
0 0 0 ;
0 0 0 r23y -r23x -r43y r43x 0 0 -r83y +r83x 0 0
0 0 0 ;
0 0 0 0 0 -1 0 1 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 -1 0 1 0 0 0 0 0
0 0 0 ;
0 0 0 0 0 r34y -r34x -r14y r14x 0 0 0 0 0
0 0 0 ;
0 0 0 0 0 0 0 0 0 -1 0 1 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 -1 0 1
0 0 0 ;
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 r38y -r38x -r98y
r98x 0 0 0 ;
-1 0 0 0 ;
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 -1 0
0 -1 0 ;
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 r89y -
r89x r29y -r29x 0 ];
Q=[m2*Acg2x ;
m2*Acg2y ;
I2*a2 ;
m3*Acg3x ;
m3*Acg3y ;
I3*a3 ;
m4*Acg4x ;
m4*Acg4y ;
I4*a4 ;
m8*Acg8x-Px;
m8*Acg8y-Py;
I8*a8-((rpx*Py)-(rpy*Px));
m9*Acg9x ;
m9*Acg9y ;
I9*a9 ; ];
FU=inv(PP)*Q;
f12x=FU(1);f12y=FU(2);f32x=FU(3);f32y=FU(4);f43x=FU(5);f43y=FU(6);
f14x=FU(7);f14y=FU(8);f83x=FU(9);f83y=FU(10);f98x=FU(11);f98y=FU(12);
f92x=FU(13);f92y=FU(14);T2par=FU(15);
RESULTADO=[t2*(180/pi),t3*(180/pi),t4*(180/pi),t7*(180/pi),t8*(180/pi),t9*(180/pi)
),t10*(180/pi), w2,w3,w4,w7,w8,w9,w10, a2,a3,a4,a7,a8,a9,a10,

```



```

Vax, Vay, Va, Vcx, Vcy, Vc, Vbx, Vby, Vb, Vdx, Vdy, Vd, Vex, Vey, Ve, Vfx, Vfy, Vf, Aax, Aay, Aa, Acx,
Acy, Ac, Abx, Aby, Ab, Adx, Ady, Ad, Aex, Aey, Ae, Afx, Afy, Af,
Vcg2x, Vcg2y, Vcg2, Vcg3x, Vcg3y, Vcg3, Vcg4x, Vcg4y, Vcg4, Vcg8x, Vcg8y, Vcg8, Vcg9x, Vcg9y, V
cg9,
Acg2x, Acg2y, Acg2, Acg3x, Acg3y, Acg3, Acg4x, Acg4y, Acg4, Acg8x, Acg8y, Acg8, Acg9x, Acg9y, A
cg9,
r12x, r12y, r32x, r32y, r92x, r92y, r23x, r23y, r43x, r43y, r83x, r83y,
r38x, r38y, r98x, r98y, rpx, rpy, r14x, r14y, r34x, r34y, r29x, r29y, r89x, r89y,
Px, Py, T2par,
f12x, f12y, f32x, f32y, f43x, f43y, f14x, f14y, f83x, f83y, f98x, f98y, f92x, f92y ];
if h==0
    K=RESULTADO; h=1;
else
    K=[K;RESULTADO];
end
    %disp (M)
    t2=t2+5*pi/180; t7=t7+5*pi/180;
end
%disp (K);
T2 =K(:,1);T3 =K(:,2);T4 =K(:,3);T7 =K(:,4);
T8 =K(:,5);T9 =K(:,6);T10=K(:,7);
%velocidades angulares
W2 =K(:,8);W3 =K(:,9);W4=K(:,10);W7=K(:,11);
W8=K(:,12);W9=K(:,13);W10=K(:,14);
%aceleraciones angulares
a2 =K(:,15);a3 =K(:,16);a4 =K(:,17);a7 =K(:,18);
a8 =K(:,19);a9 =K(:,20);a10=K(:,21);
% velocidades en el nodo 1
Vax =K(:,22);Vay =K(:,23);Va =K(:,24);Vcx =K(:,25);Vcy =K(:,26);
Vc =K(:,27);Vbx =K(:,28);Vby =K(:,29);Vb =K(:,30);
% velocidades en el nodo 2
Vdx =K(:,31);Vdy =K(:,32);Vd =K(:,33);Vex =K(:,34);Vey =K(:,35);
Ve =K(:,36);Vfx =K(:,37);Vfy =K(:,38);Vf =K(:,39);
% aceleraciones en el nodo 1
Aax =K(:,40);Aay =K(:,41);Aa =K(:,42);Acx =K(:,43);Acy =K(:,44);
Ac =K(:,45);Abx =K(:,46);Aby =K(:,47);Ab =K(:,48);
% aceleraciones en el nodo 2
Adx =K(:,49);Ady =K(:,50);Ad =K(:,51);Aex =K(:,52);Aey =K(:,53);
Ae =K(:,54);Afx =K(:,55);Afy =K(:,56);Af =K(:,57);
% velocidades de cg
%en2
Vcg2x=K(:,58);Vcg2y=K(:,59);Vcg2 =K(:,60);
%en3
Vcg3x=K(:,61);Vcg3y=K(:,62);Vcg3 =K(:,63);
%en4
Vcg4x=K(:,64);Vcg4y=K(:,65);Vcg4 =K(:,66);
%en8
Vcg8x=K(:,67);Vcg8y=K(:,68);Vcg8 =K(:,69);
%en9
Vcg9x=K(:,70);Vcg9y=K(:,71);Vcg9 =K(:,72);
% ACELERACIÓN de cg
Acg2x=K(:,73);Acg2y=K(:,74);Acg2 =K(:,75);Acg3x=K(:,76);Acg3y=K(:,77);
Acg3 =K(:,78);Acg4x=K(:,79);Acg4y=K(:,80);Acg4 =K(:,81);Acg8x=K(:,82);
Acg8y=K(:,83);Acg8 =K(:,84);Acg9x=K(:,85);Acg9y=K(:,86);Acg9 =K(:,87);
%%% RADIOS DE CG A LOS PASADORES
r12x=K(:,88);r12y=K(:,89);r32x=K(:,90);r32y=K(:,91);r92x=K(:,92);
r92y=K(:,93);r23x=K(:,94);r23y=K(:,95);r43x=K(:,96);r43y=K(:,97);
r83x=K(:,98);r83y=K(:,99);r38x=K(:,100);r38y=K(:,101);r98x=K(:,102);
r98y=K(:,103);rpx =K(:,104);rpy =K(:,105);r14x=K(:,106);r14y=K(:,107);
r34x=K(:,108);r34y=K(:,109);r29x=K(:,110);r29y=K(:,111);r89x=K(:,112);
r89y=K(:,113);
% fuerza aplicada en el mecanismo
px=K(:,114);py=K(:,115);
%par torsor inicial
T2PAR=K(:,116);
% fuerza en los pasadores
f12x=K(:,117);f12y=K(:,118);f32x=K(:,119);f32y=K(:,120);f43x=K(:,121);
f43y=K(:,122);f14x=K(:,123);f14y=K(:,124);f83x=K(:,125);f83y=K(:,126);

```




```

f98x=K(:,127);f98y=K(:,128);f92x=K(:,129);f92y=K(:,130);
MATRIZ.angulo=[T2,T3,T4,T7,T8,T9,T10];
disp ('MATRIZ. ANGULO Grados sexag. ');
disp ('  theta2  theta3  theta4  theta7  theta8  theta9  theta10');
disp (MATRIZ.angulo)
%Grafica ángulos mecanismo
figure(16)
plot (T2, T3, T2, T4, T2, T7, T2, T8, T2, T9, T2, T10)
grid
xlabel ('Theta2')
title('Angulos')
legend('T3', 'T4', 'T7', 'T8', 'T9', 'T10')
MATRIZ.vel.angul=[T2,W2,W3,W4,W7,W8,W9,W10];
disp ('MATRIZ.velo.ANGULAR Rad/seg');
disp ('  theta2  W2  W3  W4  W7  W8  W9
W10 ');
disp (MATRIZ.vel.angul)
MATRIZ.acel.angul=[T2,a2,a3,a4,a7,a8,a9,a10];
disp ('acel.angul rad/seg^2');
disp ('  theta2  a2  a3  a4  a7  a8  a9
a10 ');
disp (MATRIZ.acel.angul)
MATRIZ.vel.nodo1=[T2/1000,Vax,Vay,Vbx,Vby,Vcx,Vcy,Va,Vb,Vc,]*1000;
disp ('vel.nodo1 mm/seg ');
disp ('  theta  Vax  Vay  Vbx  Vby  Vcx  Vcy
Va  Vb  Vc');
disp (MATRIZ.vel.nodo1)
MATRIZ.vel.nodo2=[T2/1000,Vdx,Vdy,Vex,Vey,Vfx,Vfy,Vd,Ve,Vf]*1000;
disp ('vel.nodo2 mm/seg');
disp ('  theta  Vdx  Vdy  Vex  Vey  Vfx  Vfy
Vd  Ve  Vf');
disp (MATRIZ.vel.nodo2)
MATRIZ.acel.nodo1=[T2/1000,Aax,Aay,Aa,Acx,Acy,Ac,Abx,Aby,Ab]*1000;
disp ('ACEL.nodo1 mm/seg^2');
disp ('  theta  Aax  Aay  Aa  Acx  Acy  Ac
Abx  Aby  Ab');
disp (MATRIZ.acel.nodo1)
MATRIZ.acel.nodo2=[T2/1000,Adx,Ady,Ad,Aex,Aey,Ae,Afx,Afy,Af]*1000;
disp ('ACEL.nodo2 mm/seg^2');
disp ('theta  Adx  Ady  Ad  Aex  Aey  Ae  Afx  Afy  Af');
disp (MATRIZ.acel.nodo2)
MATRIZ.vel.Cg.nodo1=[T2/1000,Vcg2x,Vcg2y,Vcg2,Vcg3x,Vcg3y,Vcg3,Vcg4x,Vcg4y,Vcg4]*
1000;
disp ('velo.nodo1 mm/seg');
disp ('theta Vcg2x Vcg2y Vcg2 Vcg3x Vcg3y Vcg3 Vcg4x Vcg4y Vcg4');
disp (MATRIZ.vel.Cg.nodo1)
MATRIZ.vel.Cg.nodo2=[T2/1000,Vcg8x,Vcg8y,Vcg8,Vcg9x,Vcg9y,Vcg9]*1000;
disp ('vel.nodo2 mm/seg');
disp ('  theta  Vcg8x  Vcg8y  Vcg8  Vcg9x  Vcg9y  Vcg9');
disp (MATRIZ.vel.Cg.nodo2)
MATRIZ.acele.Cg.nodo1=[T2/1000,Acg2x,Acg2y,Acg2,Acg3x,Acg3y,Acg3,Acg4x,Acg4y,Acg4
]*1000;
disp ('ACEL.nodo1 mm/seg^2');
disp ('theta Acg2x Acg2y Acg2 Acg3x Acg3y Acg3 Acg4x Acg4y Acg4');
disp (MATRIZ.acele.Cg.nodo1)
MATRIZ.acele.Cg.nodo2=[T2/1000,Acg8x,Acg8y,Acg8,Acg9x,Acg9y,Acg9]*1000;
disp ('ACEL.nodo2 mm/seg^2');
disp ('theta Acg8x Acg8y Acg8 Acg9x Acg9y Acg9');
disp (MATRIZ.acele.Cg.nodo2)
r12=sqrt((r12x.^2)+(r12y.^2));r32=sqrt((r32x.^2)+(r32y.^2));
r92=sqrt((r92x.^2)+(r92y.^2));r23=sqrt((r23x.^2)+(r23y.^2));
r43=sqrt((r43x.^2)+(r43y.^2));r83=sqrt((r83x.^2)+(r83y.^2));
MATRIZ.RADIO.PASADORES2=[T2/1000,r12x,r12y,r12,r32x,r32y,r32,r92x,r92y,r92]*1000;
disp ('medidas a pasadores en 2 portador mm');
disp('theta r12x r12y r12 r32x r32y r32 r92x r92y r92');
disp (MATRIZ.RADIO.PASADORES2)
MATRIZ.RADIO.PASADORES3=[T2/1000,r23x,r23y,r23,r43x,r43y,r43,r83x,r83y,r83]*1000;

```



```

disp ('adias a pasadores en 3 mm');
disp('theta r23x r23y r23 r43x r43y r43 r83x r83y r83');
disp(MATRIZ.RADIO.PASADORES3)
r38=sqrt((r38x.^2)+(r38y.^2));r98=sqrt((r98x.^2)+(r98y.^2));
rp=sqrt((rpx.^2)+(rpy.^2));
MATRIZ.RADIO.PASADORES8=[T2/1000,r38x,r38y,r38, r98x,r98y,r98 ,rpx,rpy,rp]*1000;
disp ('adias a pasadores en 8 mm');
disp('theta r38x r38y r38 r98x r98y r98 rpx rpy rp');
disp(MATRIZ.RADIO.PASADORES8)
r14=sqrt((r14x.^2)+(r14y.^2));r34=sqrt((r34x.^2)+(r34y.^2));
r29=sqrt((r29x.^2)+(r29y.^2));r89=sqrt((r89x.^2)+(r89y.^2));
MATRIZ.RADIO.PASADORES14=[T2/1000,r14x,r14y,r14, r34x,r34y,r34, r29x,r29y,r29,
r89x,r89y,r89 ]*1000;
disp ('adias a pasadores en 4-9 mm');
disp('t r14x r14y r14 r34x r34y r34 r29x r29y r29 r89x r89y r89');
disp(MATRIZ.RADIO.PASADORES14)
MATRIZ.fuerza.en8=[T2,px,py ];
disp ('fuerza.en 8 N');
disp(' theta Px Py');disp(MATRIZ.fuerza.en8)
MATRIZ.torque.entrada=[T2-90,T2PAR*1000 ];disp ('.torque.entrada N-mm');
disp(' theta T2PAR');
format short g
disp(MATRIZ.torque.entrada),format short
f12=sqrt((f12x.^2)+(f12y.^2));f32=sqrt((f32x.^2)+(f32y.^2));
f92=sqrt((f92x.^2)+(f92y.^2));
MATRIZ.fuerza.en2=[T2,f12,f32,f92,f12x,f12y,f32x,f32y,f92x,f92y];
disp ('fuerza.en 2 Newton');
disp('theta2 f12 f32 f92 f12x f12y f32x f32y f92x f92y');
disp(MATRIZ.fuerza.en2)
f23x=-f32x;f23y=-f32y;f23=sqrt((f23x.^2)+(f23y.^2));
f43=sqrt((f43x.^2)+(f43y.^2));f83=sqrt((f83x.^2)+(f83y.^2));
MATRIZ.fuerza.en3=[T2 ,f23,f43,f83, f23x,f23y, f43x,f43y ,f83x,f83y];
disp ('fuerza.en 3 Newton');
disp('theta2 f23 f43 f83 f23x f23y f43x f43y f83x f83y');
disp(MATRIZ.fuerza.en3)
f38x=-f83x;f38y=-f83y;
f38=sqrt((f38x.^2)+(f38y.^2));f98=sqrt((f98x.^2)+(f98y.^2));
p=sqrt((px.^2)+(py.^2));
MATRIZ.fuerza.en8=[T2 ,f38,f98,p, f38x,f38y, f98x,f98y ,px,py];
disp ('fuerza.en 8 Newton');
disp(' theta2 f38 f98 p f38x f38y f98x f98y px py');
disp(MATRIZ.fuerza.en8) f34x=-f43x;f34y=-f43y;f14=sqrt((f14x.^2)+(f14y.^2));
f34=sqrt((f34x.^2)+(f34y.^2));
MATRIZ.fuerza.en4=[T2,f14,f34,f14x,f14y,f34x,f34y];disp('fuerza.en 4 N');
disp(' theta2 f14 f34 f14x f14y f34x f34y');
disp(MATRIZ.fuerza.en4)
f89x=-f98x;f89y=-f98y;f29x=-f92x;f29y=-f92y;
f89=sqrt((f89x.^2)+(f89y.^2));f29=sqrt((f29x.^2)+(f29y.^2));
MATRIZ.fuerza.en9=[T2 ,f89,f29, f89x,f89y, f29x,f29y ];
disp ('fuerza.en 9 Newton');
disp('theta2 f98 f29 f89x f89y f29x f29y');disp(MATRIZ.fuerza.en9)
%graficas
figure(1)
plot(T2,f12,T2,f32,T2,f92,T2,m2*Acg2),grid,xlabel ('Theta2')
title('FUERZA APLICADA EN EL ESLABON 2') legend('f12','f32','f92','m2*a2')
figure(2)
plot(T2,f23,T2,f43,T2,f83),grid,xlabel ('Theta2'),title('FUERZA APLICADA EN EL
ESLABON 3'),legend('f23','f43','f83')
figure(3)
plot(T2,f14,T2,f34),grid,xlabel ('Theta2'),title('FUERZA APLICADA EN EL ESLABON
4'),legend('f14','f34')
figure(4)
plot(T2,f38,T2,f98,T2,p),grid,xlabel ('Theta2'),title('FUERZA APLICADA EN EL
ESLABON 8'),legend('f38','f98','p')
figure(5)
plot(T2,f89,T2,f29),grid,xlabel ('Theta2'),title('FUERZA APLICADA EN EL ESLABON
9'),legend('f89','f29','p')

```



```

figure(6)
plot(T2,T2PAR),grid,xlabel ('Theta2'),title('par torsor'), legend('par')
figure(7)
plot(T2,T3,T2,T4,T2,T7,T2,T8,T2,T9,T2,T10),grid,xlabel ('Theta2')
ylabel ('grados sex'),title('Angulos respecto a T2')
legend ('T2','T3','T2','T4','T2','T7','T2','T8','T2','T9','T2','T10')
%%%% cálculo de fuerzas respecto a la horizontal para el eslabón 2
F12X=(f12x.*cos((180-T2)*pi/180))-( f12y.*cos(( T2-90)*pi/180));
F12Y=(f12x.*sin((180-T2)*pi/180))+( f12y.*sin(( T2-90)*pi/180));
F12=sqrt((F12X).^2)+(F12Y).^2);
F92X=(f92x.*cos((180-T2)*pi/180))-( f92y.*cos(( T2-90)*pi/180));
F92Y=(f92x.*sin((180-T2)*pi/180))+( f92y.*sin(( T2-90)*pi/180));
F92=sqrt((F92X).^2)+(F92Y).^2);
F32X=(f32x.*cos((180-T2)*pi/180))-( f32y.*cos(( T2-90)*pi/180));
F32Y=(f32x.*sin((180-T2)*pi/180))+( f32y.*sin(( T2-90)*pi/180));
F32=sqrt((F32X).^2)+(F32Y).^2);
FUERZA.en2=[T2,F12X,F12Y,F32X,F32Y,F92X,F92Y];
disp ('fuerza.en 2 Newton');
disp('theta2 F12X F12Y F32X F32Y F92X F92');disp(FUERZA.en2)
%%%% cálculo de fuerzas respecto a la horizontal para el eslabone 3
F23X=(f23x.*cos((180-T7)*pi/180))-( f23y.*cos(( T7-90)*pi/180));
F23Y=(f23x.*sin((180-T7)*pi/180))+( f23y.*sin(( T7-90)*pi/180));
F23=sqrt((F23X).^2)+(F23Y).^2);
F43X=(f43x.*cos((180-T7)*pi/180))-( f43y.*cos(( T7-90)*pi/180));
F43Y=(f43x.*sin((180-T7)*pi/180))+( f43y.*sin(( T7-90)*pi/180));
F43=sqrt((F43X).^2)+(F43Y).^2);
F83X=(f83x.*cos((180-T7)*pi/180))-( f83y.*cos(( T7-90)*pi/180));
F83Y=(f83x.*sin((180-T7)*pi/180))+( f83y.*sin(( T7-90)*pi/180));
F83=sqrt((F83X).^2)+(F83Y).^2);
FUERZA.en3=[T2,F23X,F23Y,F43X,F43Y,F83X,F83Y];
disp ('fuerza.en 3 Newton');
disp('theta2 F23X F23Y F43X F43Y F83X F83Y');disp(FUERZA.en3)
%%%% cálculo de fuerzas respecto a la horizontal para el eslabone 8
F38X=(f38x.*cos((180-T10)*pi/180))-( f38y.*cos(( T10-90)*pi/180));
F38Y=(f38x.*sin((180-T10)*pi/180))+( f38y.*sin(( T10-90)*pi/180));
F38=sqrt((F38X).^2)+(F38Y).^2);
F98X=(f98x.*cos((180-T10)*pi/180))-( f98y.*cos(( T10-90)*pi/180));
F98Y=(f98x.*sin((180-T10)*pi/180))+( f98y.*sin(( T10-90)*pi/180));
F98=sqrt((F98X).^2)+(F98Y).^2);
PX=[T2-T2]+0;PY=[T2-T2]+P;P=sqrt(((PX).^2)+((PY).^2));
FUERZA.en8=[T2,F38X,F38Y,F98X,F98Y,PX,PY];disp ('fuerza.en 8 Newton');
disp('theta2 F38X F38Y F98X F98Y PX PY');disp(FUERZA.en8)
%%%% calculo de fuerzas respeco a la horizontal para el eslabone 4
F14X=(f14x.*cos((180-T4)*pi/180))-( f14y.*cos(( T4-90)*pi/180));
F14Y=(f14x.*sin((180-T4)*pi/180))+( f14y.*sin(( T4-90)*pi/180));
F14=sqrt((F14X).^2)+(F14Y).^2);
F34X=(f34x.*cos((180-T4)*pi/180))-( f34y.*cos(( T4-90)*pi/180));
F34Y=(f34x.*sin((180-T4)*pi/180))+( f34y.*sin(( T4-90)*pi/180));
F34=sqrt((F34X).^2)+(F34Y).^2);FUERZA.en4=[T2,F14X,F14Y,F34X,F34Y];
disp ('fuerza.en 4 Newton');
disp('theta2 F14X F14Y F34X F34Y');disp(FUERZA.en4)
%%%% calculo de fuerzas respeco a la horizontal para el eslabone 9
F29X=(f29x.*cos((180-T9)*pi/180))-( f29y.*cos(( T9-90)*pi/180));
F29Y=(f29x.*sin((180-T9)*pi/180))+( f29y.*sin(( T9-90)*pi/180));
F29=sqrt((F29X).^2)+(F29Y).^2);
F89X=(f89x.*cos((180-T9)*pi/180))-( f89y.*cos(( T9-90)*pi/180));
F89Y=(f89x.*sin((180-T9)*pi/180))+( f89y.*sin(( T9-90)*pi/180));
F89=sqrt((F89X).^2)+(F89Y).^2);
FUERZA.en9=[T2,F29X,F29Y,F89X,F89Y];
disp ('fuerza.en 9 Newton');disp('theta2 F29X F29Y F89X F89Y');disp(FUERZA.en9)
figure(9)
plot(T2,F12, T2,F32, T2,F92 ,T2,F43 ,T2,F83 ,T2,F98 ,T2,F14, T2,P),
grid,xlabel ('Theta2'),title('FUERZA APLICADA EN LAS JUNTAS')
legend('F12=F21 PASADOR 02 ','F32=F23 PASADOR A','F92=F29 PASADOR C','F43=F34
PASADOR B','F83=F38 PASADOR D','F98=F89 PASADOR E','F14=F41 PASADOR O4','P FUERZA
DE AGARRE')

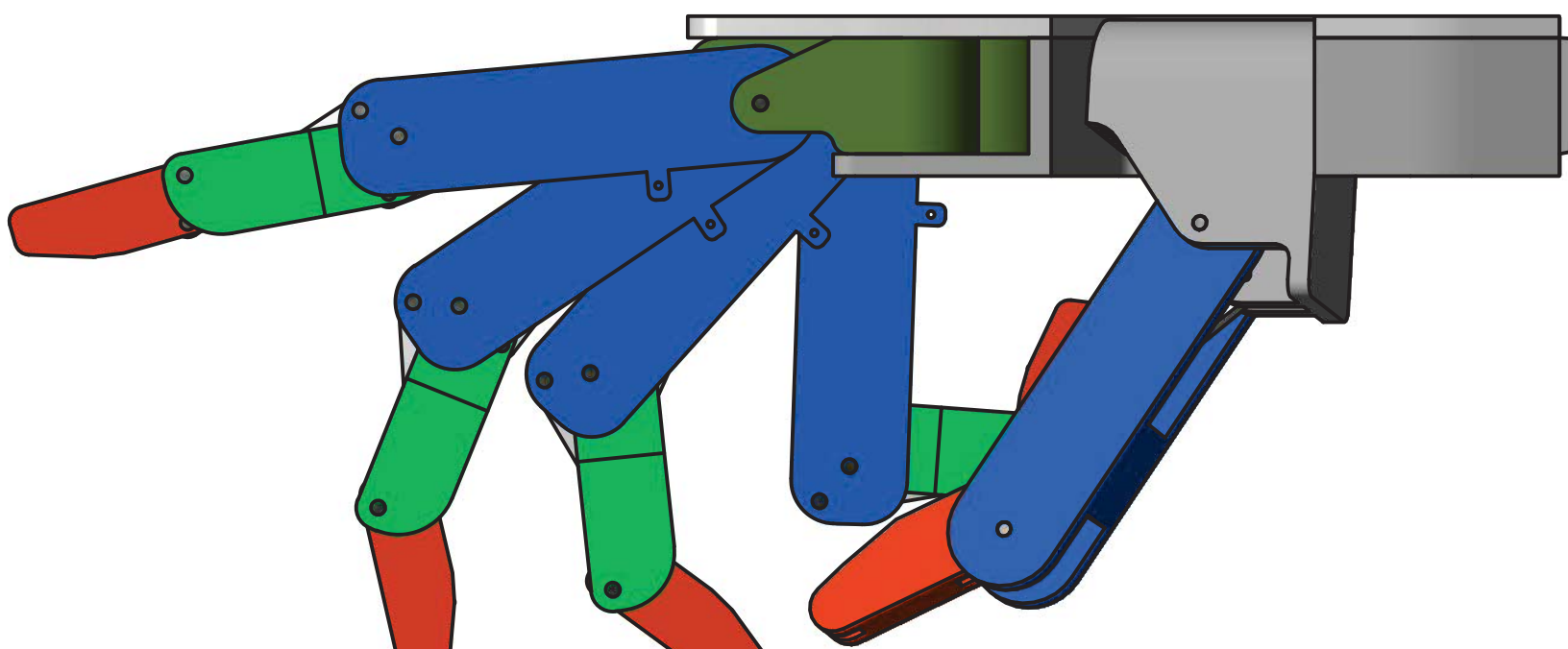
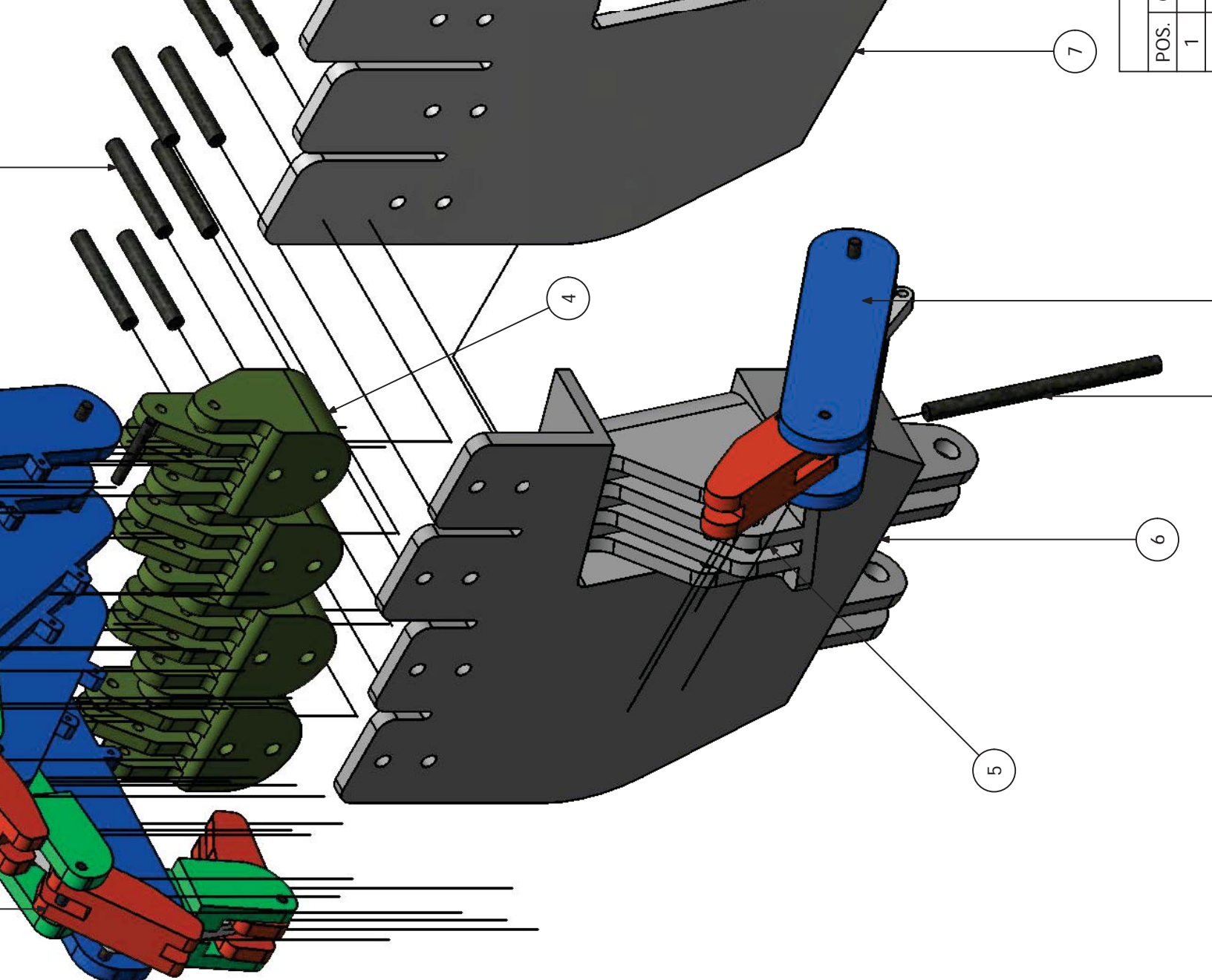
```

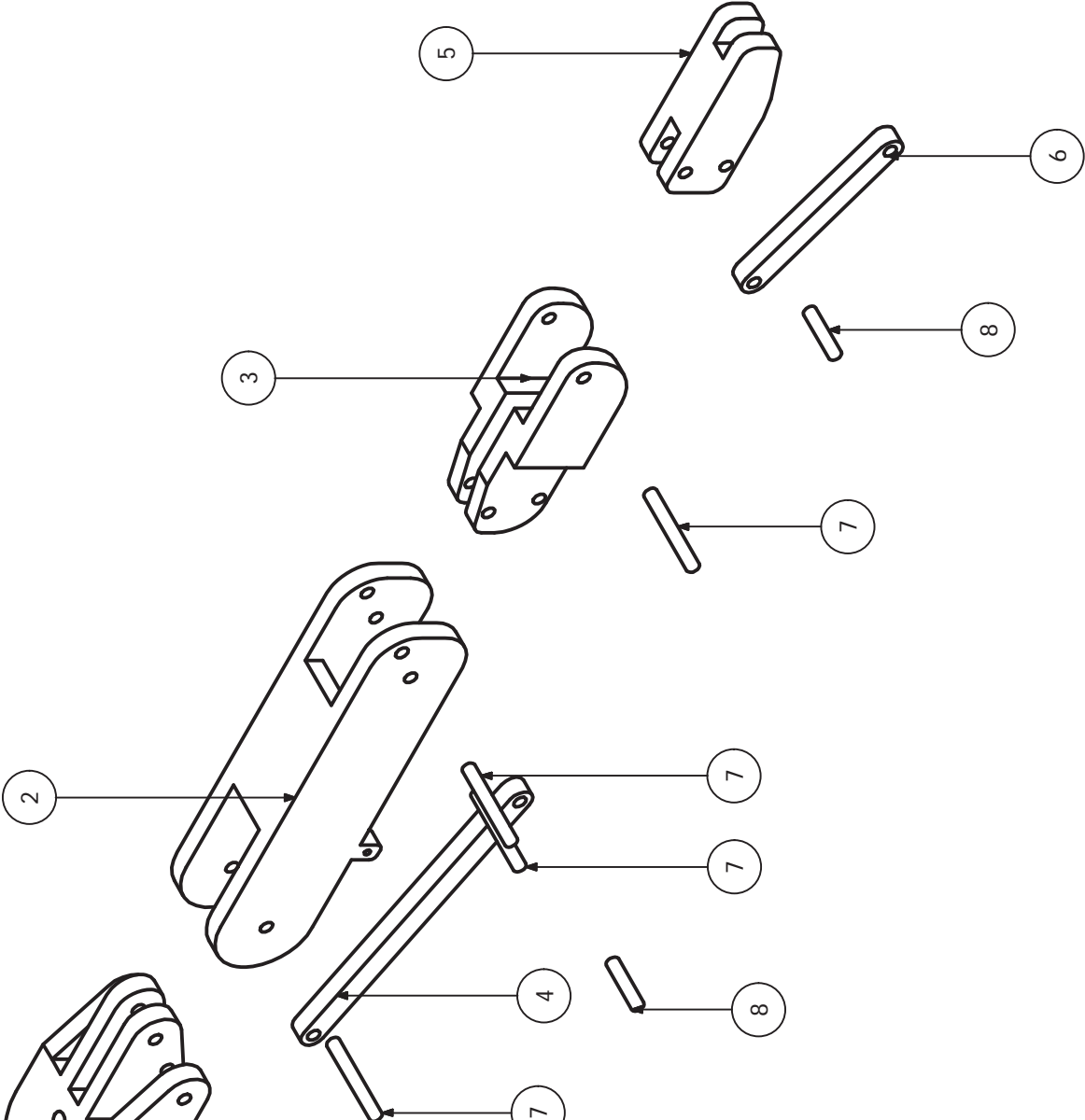
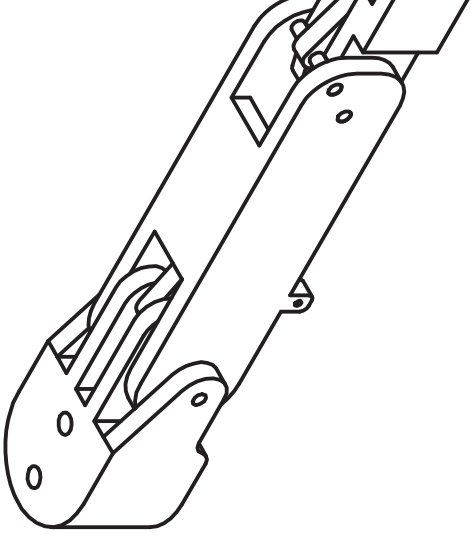
Fuente: Propia codificado en matlab.



PLANOS.

| | |
|------|---|
| POS. | 1 |
|------|---|





LISTA DE PIEZAS

| POS. | CTDAD | DESCIPCION | NORMA | MATERIAL |
|------|-------|------------------|-------|----------|
| 8 | 3 | PASADOR CILIND. | DIN 7 | AISI/5/ |
| 7 | 4 | PASADOR CILIND. | DIN 7 | AISI/5/ |
| 6 | 1 | BARRA MEDIAL | | ABS |
| 5 | 1 | FALANGE DISTAL | | ABS |
| 4 | 1 | BARRA PROXIMAL | | ABS |
| 3 | 1 | FALANGE MEDIA | | ABS |
| 2 | 1 | FALANGE PROXIMAL | | ABS |
| 1 | 1 | BASE INDICE | | ABS |

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABDO DEL CUSCO
 ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA MECANICA

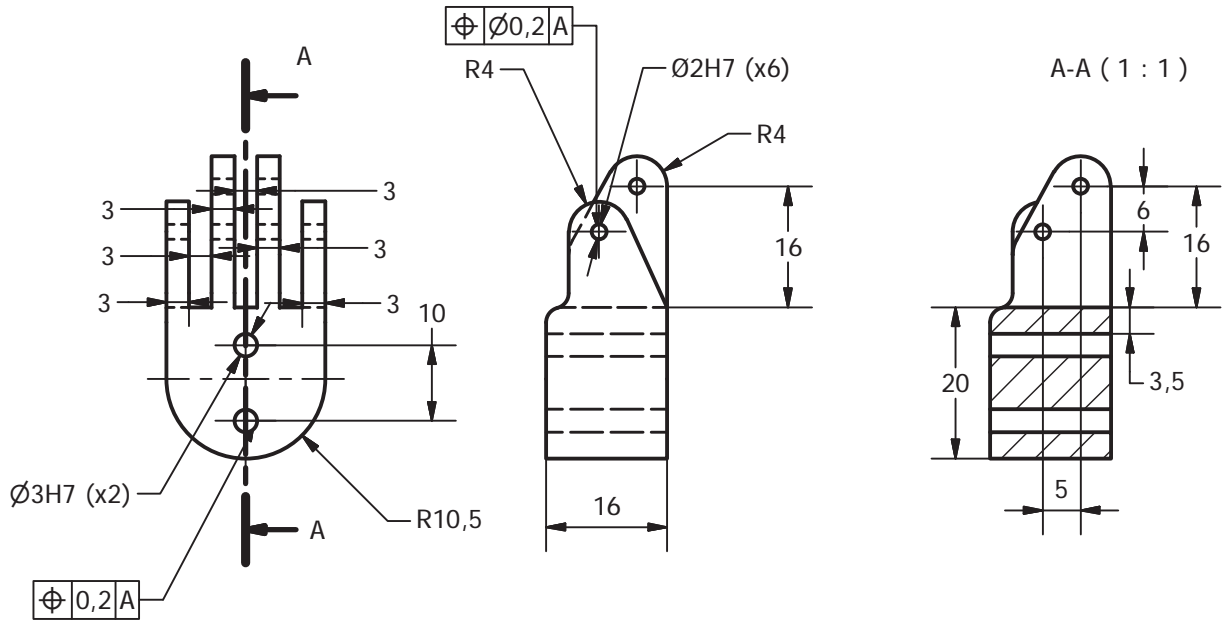
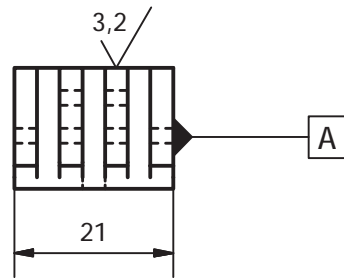
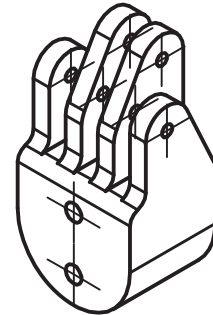
MÉTODO DE PROYECCION

DISEÑO Y ANÁLISIS DE

SEGUN DIN ISO 2768 T1

| | | | | | |
|--------------------|--------------------|------------------|-------------------|---------------------|----------------------|
| GRADO DE EXACTITUD | Más de 0.5 hasta 3 | Más de 3 hasta 6 | Más de 6 hasta 30 | Más de 30 hasta 120 | Más de 120 hasta 400 |
| MEDIO | ±0,1 | ±0,1 | ±0,2 | ±0,3 | ±0,5 |

| | | |
|--------------|-------------|-------------|
| 2H7 | 2,010 | 2,000 |
| COTA NOMINAL | COTA MAXIMA | COTA MINIMA |



| | | |
|----------------------------------|--|-----------------|
| ACABADO SUPERFICIAL 3,2 (3,2) | TOLERANCIA GENERAL DIN-ISO-2786 IT | MATERIAL ABS |
|----------------------------------|--|-----------------|

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABDA DEL CUSCO
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA

| | | |
|--------------------------|---|---------------|
| MÉTODO DE PROYECCION | DISEÑO Y ANÁLISIS DE UN PROTOTIPO DE UNA MANO ROBÓTICA ANTROPOMÉTRICA | Escala 1:1 |
|--------------------------|---|---------------|

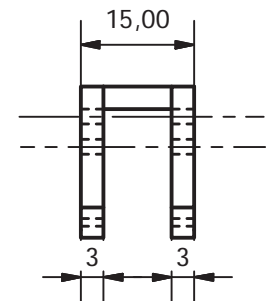
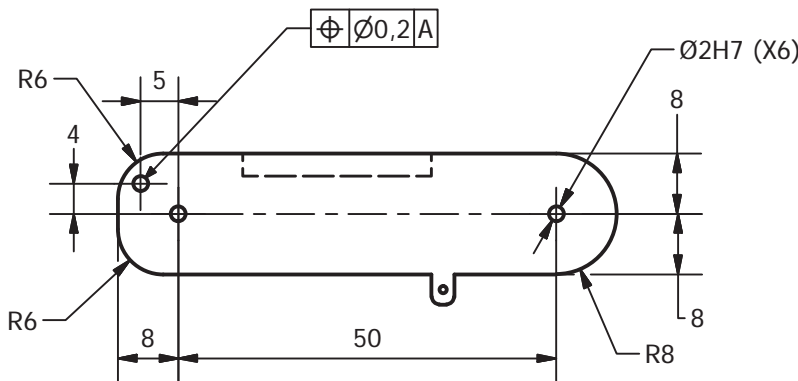
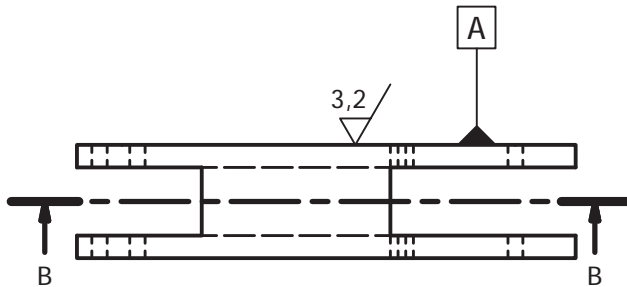
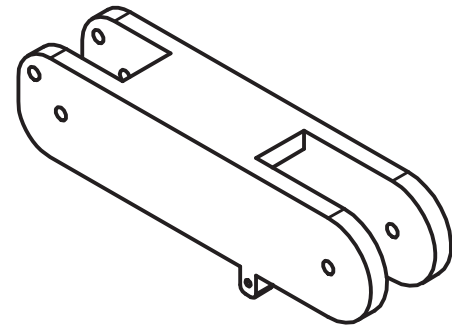
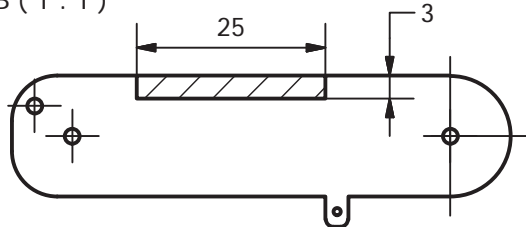
| | | |
|------------------------------------|------------------|---------------------|
| DIBUJADO POR: GUEVARA V., Oscar | BASE DEDO INDICE | Fecha 23/10/2016 |
|------------------------------------|------------------|---------------------|

| | | |
|--|--|----------------|
| | | Hoja 2 / 14 |
|--|--|----------------|

| | | | | | |
|--------------------|--------------------|------------------|-------------------|---------------------|----------------------|
| GRADO DE EXACTITUD | Más de 0.5 hasta 3 | Más de 3 hasta 6 | Más de 6 hasta 30 | Más de 30 hasta 120 | Más de 120 hasta 400 |
| MEDIO | ±0,1 | ±0,1 | ±0,2 | ±0,3 | ±0,5 |

| | | |
|--------------|-------------|-------------|
| COTA NOMINAL | COTA MAXIMA | COTA MINIMA |
|--------------|-------------|-------------|

B-B (1 : 1)



| | | |
|----------------------------------|--|-----------------|
| ACABADO SUPERFICIAL 3,2 (3,2) | TOLERANCIA GENERAL DIN-ISO-2786 IT | MATERIAL ABS |
|----------------------------------|--|-----------------|

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABDA DEL CUSCO
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA

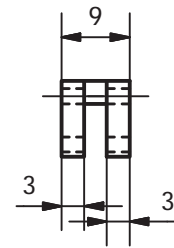
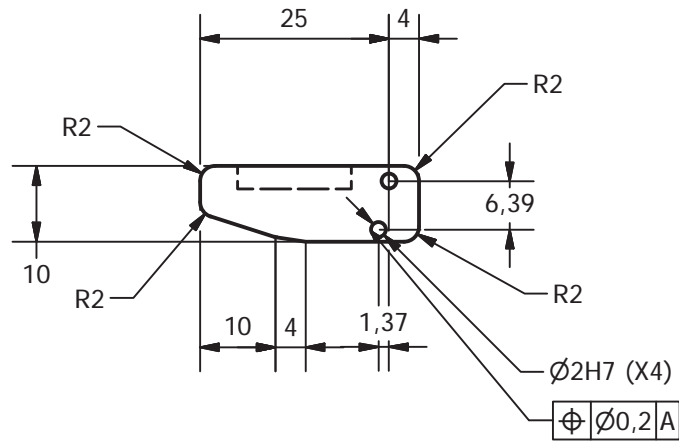
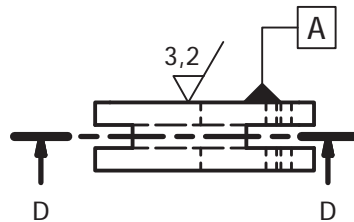
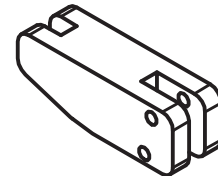
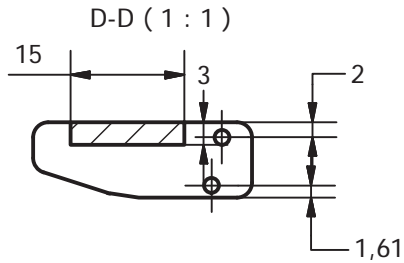
| | | |
|--------------------------|---|---------------|
| MÉTODO DE PROYECCION | DISEÑO Y ANÁLISIS DE UN PROTOTIPO DE UNA MANO ROBÓTICA ANTROPOMÉTRICA | Escala 1:1 |
|--------------------------|---|---------------|

| | | |
|------------------------------------|------------------------------|---------------------|
| DIBUJADO POR: GUEVARA V., Oscar | FALANGE PROXIMAL DEDO INDICE | Fecha 23/10/2016 |
|------------------------------------|------------------------------|---------------------|

| | | |
|--|--|----------------|
| | | Hoja 1 / 14 |
|--|--|----------------|

| | | | | | |
|--------------------|--------------------|------------------|-------------------|---------------------|----------------------|
| GRADO DE EXACTITUD | Más de 0.5 hasta 3 | Más de 3 hasta 6 | Más de 6 hasta 30 | Más de 30 hasta 120 | Más de 120 hasta 400 |
| MEDIO | ±0,1 | ±0,1 | ±0,2 | ±0,3 | ±0,5 |

| | | |
|--------------|-------------|-------------|
| COTA NOMINAL | COTA MAXIMA | COTA MINIMA |
|--------------|-------------|-------------|



| | | |
|----------------------------------|--|-----------------|
| ACABADO SUPERFICIAL 3,2 (3,2) | TOLERANCIA GENERAL DIN-ISO-2786 IT | MATERIAL ABS |
|----------------------------------|--|-----------------|

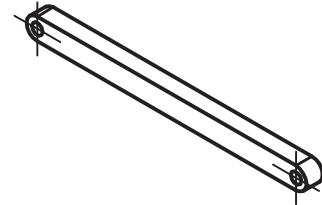
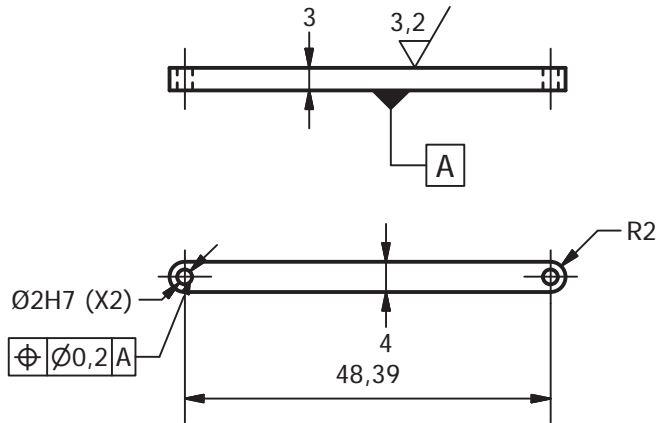
UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABDA DEL CUSCO
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA

| | | |
|------------------------------------|---|------------------|
| MÉTODO DE PROYECCION | DISEÑO Y ANÁLISIS DE UN PROTOTIPO DE UNA MANO ROBÓTICA ANTROPOMÉTRICA | Escala 1:1 |
| DIBUJADO POR: GUEVARA V., Oscar | FALANGE PROXIMAL DEDO INDICE | Fecha 23/10/2016 |

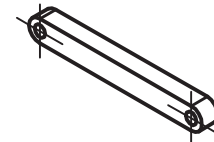
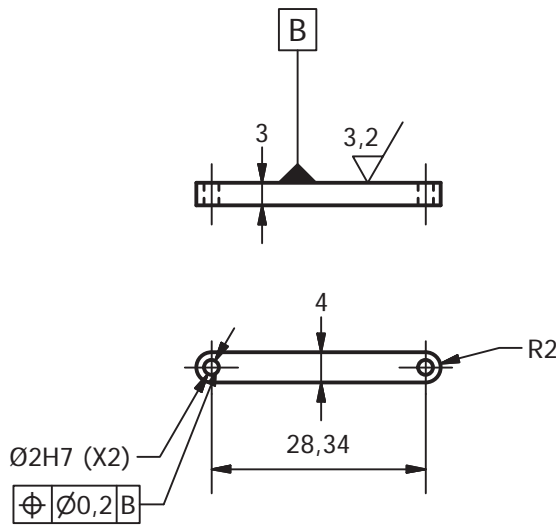
SEGUN DIN ISO 2768 T1

| | | | | | |
|--------------------|--------------------|------------------|-------------------|---------------------|----------------------|
| GRADO DE EXACTITUD | Más de 0.5 hasta 3 | Más de 3 hasta 6 | Más de 6 hasta 30 | Más de 30 hasta 120 | Más de 120 hasta 400 |
| MEDIO | ±0,1 | ±0,1 | ±0,2 | ±0,3 | ±0,5 |

| | | |
|--------------|-------------|-------------|
| COTA NOMINAL | COTA MAXIMA | COTA MINIMA |
|--------------|-------------|-------------|



BARRA PROXIMAL



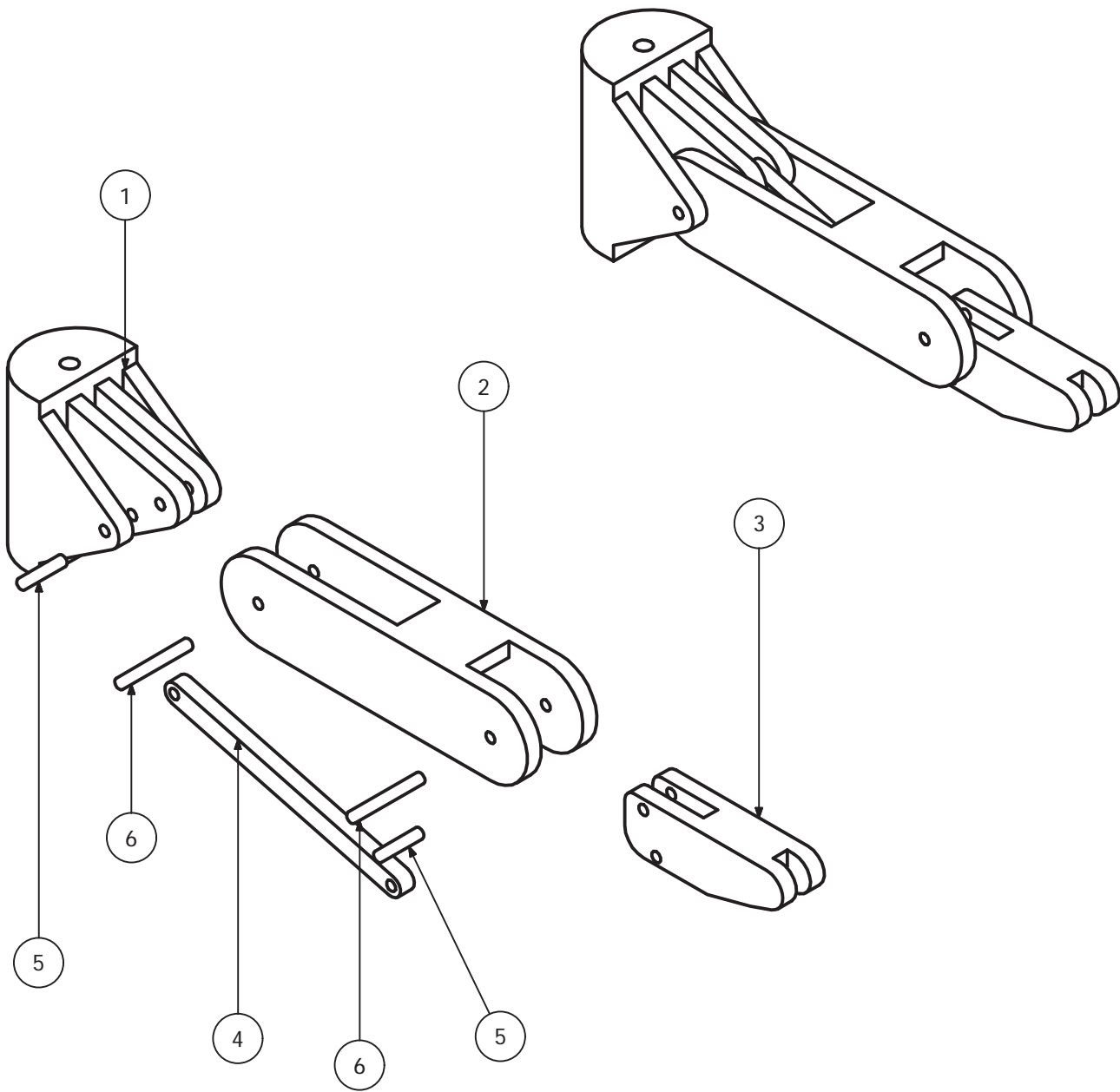
BARRA MEDIA

| | | |
|----------------------------------|--|-----------------|
| ACABADO SUPERFICIAL 3,2 (3,2) | TOLERANCIA GENERAL DIN-ISO-2786 IT | MATERIAL ABS |
|----------------------------------|--|-----------------|

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABDA DEL CUSCO
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA

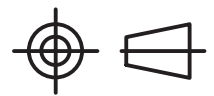
| | | |
|--------------------------|---|---------------|
| MÉTODO DE PROYECCION | DISEÑO Y ANÁLISIS DE UN PROTOTIPO DE UNA MANO ROBÓTICA ANTROPOMÉTRICA | Escala 1:1 |
|--------------------------|---|---------------|

| | | |
|------------------------------------|------------------------------------|---------------------|
| DIBUJADO POR: GUEVARA V., Oscar | BARRA PROXIMAL Y MEDIA DEDO INDICE | Fecha 23/10/2016 |
|------------------------------------|------------------------------------|---------------------|



| LISTA DE PIEZAS | | | | | |
|-----------------|-------|------------------|-------|---------------|---------------|
| POS. | CTDAD | DESCRIPCION | NORMA | MATERIAL | OBSERVACIONES |
| 1 | 1 | BASE PULGAR | | ABS | |
| 2 | 1 | FALANGE PROXIMAL | | ABS | |
| 3 | 1 | FALANGE DISTAL | | ABS | |
| 4 | 1 | BARRA PROXIMAL | | ABS | |
| 5 | 2 | PASADOR CILIN. | DIN 7 | AISI/SAE 4340 | D70-2-8 |
| 6 | 2 | PASADOR CILIN. | DIN 7 | AISI/SAE 4340 | D70-2-16 |

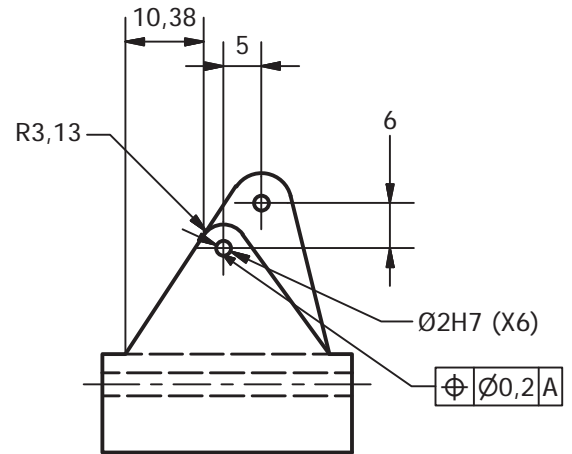
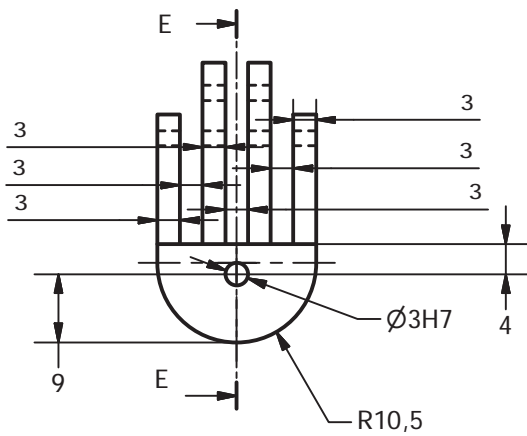
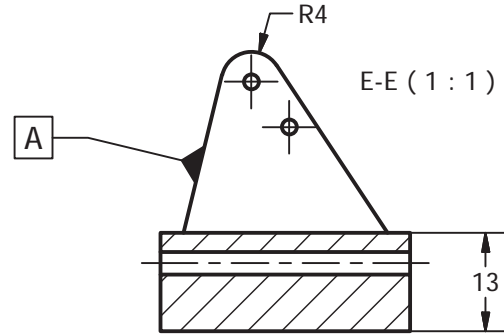
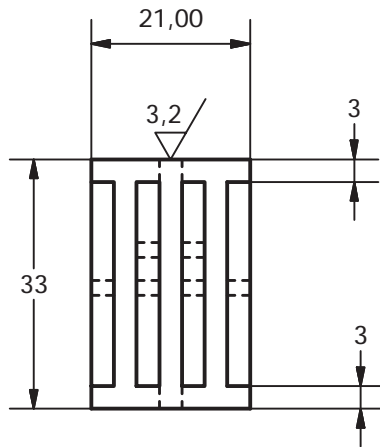
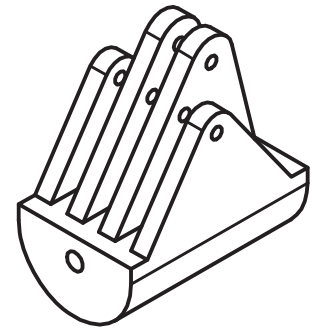
UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABDA DEL CUSCO
 ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA

| | | |
|---|---|---------------------|
| MÉTODO DE PROYECCION  | DISEÑO Y ANÁLISIS DE UN PROTOTIPO DE UNA MANO ROBÓTICA ANTROPOMÉTRICA | Escala 1:1 |
| DIBUJADO POR: GUEVARA V., Oscar | DESPECIE DEDO PULGAR | Fecha 23/10/2016 |
| | | Hoja 8 / 14 |

SEGUN DIN ISO 2768 T1

| | | | | | |
|--------------------|--------------------|------------------|-------------------|---------------------|----------------------|
| GRADO DE EXACTITUD | Más de 0.5 hasta 3 | Más de 3 hasta 6 | Más de 6 hasta 30 | Más de 30 hasta 120 | Más de 120 hasta 400 |
| MEDIO | ±0,1 | ±0,1 | ±0,2 | ±0,3 | ±0,5 |

| | | |
|--------------|-------------|-------------|
| 3H7 | 3,010 | 3,000 |
| COTA NOMINAL | COTA MAXIMA | COTA MINIMA |



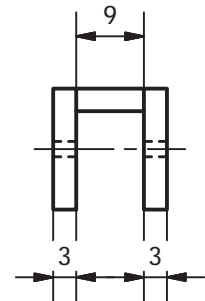
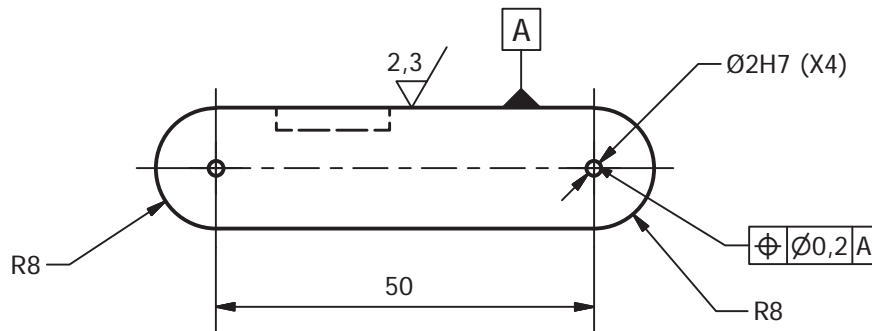
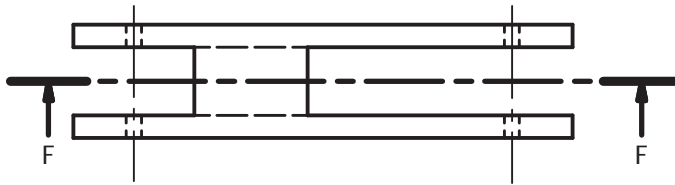
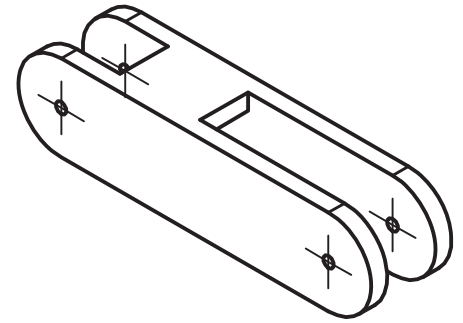
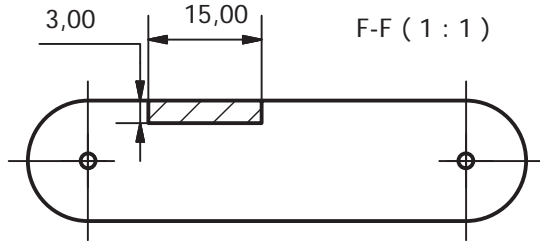
| | | |
|----------------------------------|--|-----------------|
| ACABADO SUPERFICIAL 3,2 (3,2) | TOLERANCIA GENERAL DIN-ISO-2786 IT | MATERIAL ABS |
|----------------------------------|--|-----------------|

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABDA DEL CUSCO
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA

| | | |
|------------------------------------|---|---------------------|
| MÉTODO DE PROYECCION | DISEÑO Y ANÁLISIS DE UN PROTOTIPO DE UNA MANO ROBÓTICA ANTROPOMÉTRICA | Escala 1:1 |
| DIBUJADO POR: GUEVARA V., Oscar | BASE DEDO PULGAR | Fecha 23/10/2016 |

| | | | | | |
|--------------------|--------------------|------------------|-------------------|---------------------|----------------------|
| GRADO DE EXACTITUD | Más de 0.5 hasta 3 | Más de 3 hasta 6 | Más de 6 hasta 30 | Más de 30 hasta 120 | Más de 120 hasta 400 |
| MEDIO | ±0,1 | ±0,1 | ±0,2 | ±0,3 | ±0,5 |

| | | |
|--------------|-------------|-------------|
| COTA NOMINAL | COTA MAXIMA | COTA MINIMA |
|--------------|-------------|-------------|



| | | |
|----------------------------------|--|-----------------|
| ACABADO SUPERFICIAL 3.2 (3.2) | TOLERANCIA GENERAL DIN-ISO-2786 IT | MATERIAL ABS |
|----------------------------------|--|-----------------|

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABDA DEL CUSCO
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA

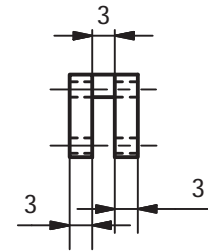
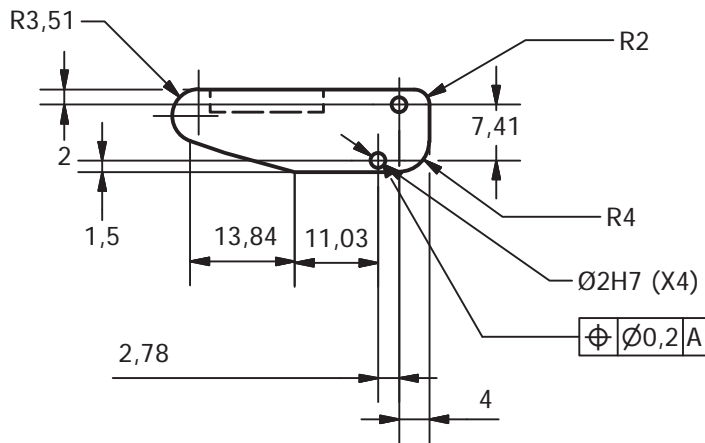
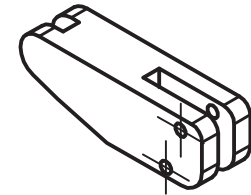
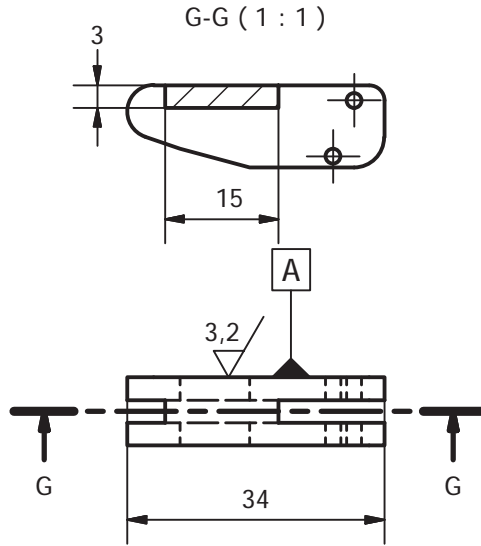
| | | |
|--------------------------|---|---------------|
| MÉTODO DE PROYECCION | DISEÑO Y ANÁLISIS DE UN PROTOTIPO DE UNA MANO ROBÓTICA ANTROPOMÉTRICA | Escala 1:1 |
|--------------------------|---|---------------|

| | | |
|------------------------------------|------------------------------|---------------------|
| DIBUJADO POR: GUEVARA V., Oscar | FALANGE PROXIMAL DEDO PULGAR | Fecha 23/10/2016 |
|------------------------------------|------------------------------|---------------------|

| | | |
|--|--|-----------------|
| | | Hoja 10 / 14 |
|--|--|-----------------|

| | | | | | |
|--------------------|--------------------|------------------|-------------------|---------------------|----------------------|
| GRADO DE EXACTITUD | Más de 0.5 hasta 3 | Más de 3 hasta 6 | Más de 6 hasta 30 | Más de 30 hasta 120 | Más de 120 hasta 400 |
| MEDIO | ±0,1 | ±0,1 | ±0,2 | ±0,3 | ±0,5 |

| | | |
|--------------|-------------|-------------|
| COTA NOMINAL | COTA MAXIMA | COTA MINIMA |
|--------------|-------------|-------------|



| | | |
|----------------------------------|--|-----------------|
| ACABADO SUPERFICIAL 3,2 (3,2) | TOLERANCIA GENERAL DIN-ISO-2786 IT | MATERIAL ABS |
|----------------------------------|--|-----------------|

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABDA DEL CUSCO
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA

| | | |
|--------------------------|---|---------------|
| MÉTODO DE PROYECCION | DISEÑO Y ANÁLISIS DE UN PROTOTIPO DE UNA MANO ROBÓTICA ANTROPOMÉTRICA | Escala 1:1 |
|--------------------------|---|---------------|

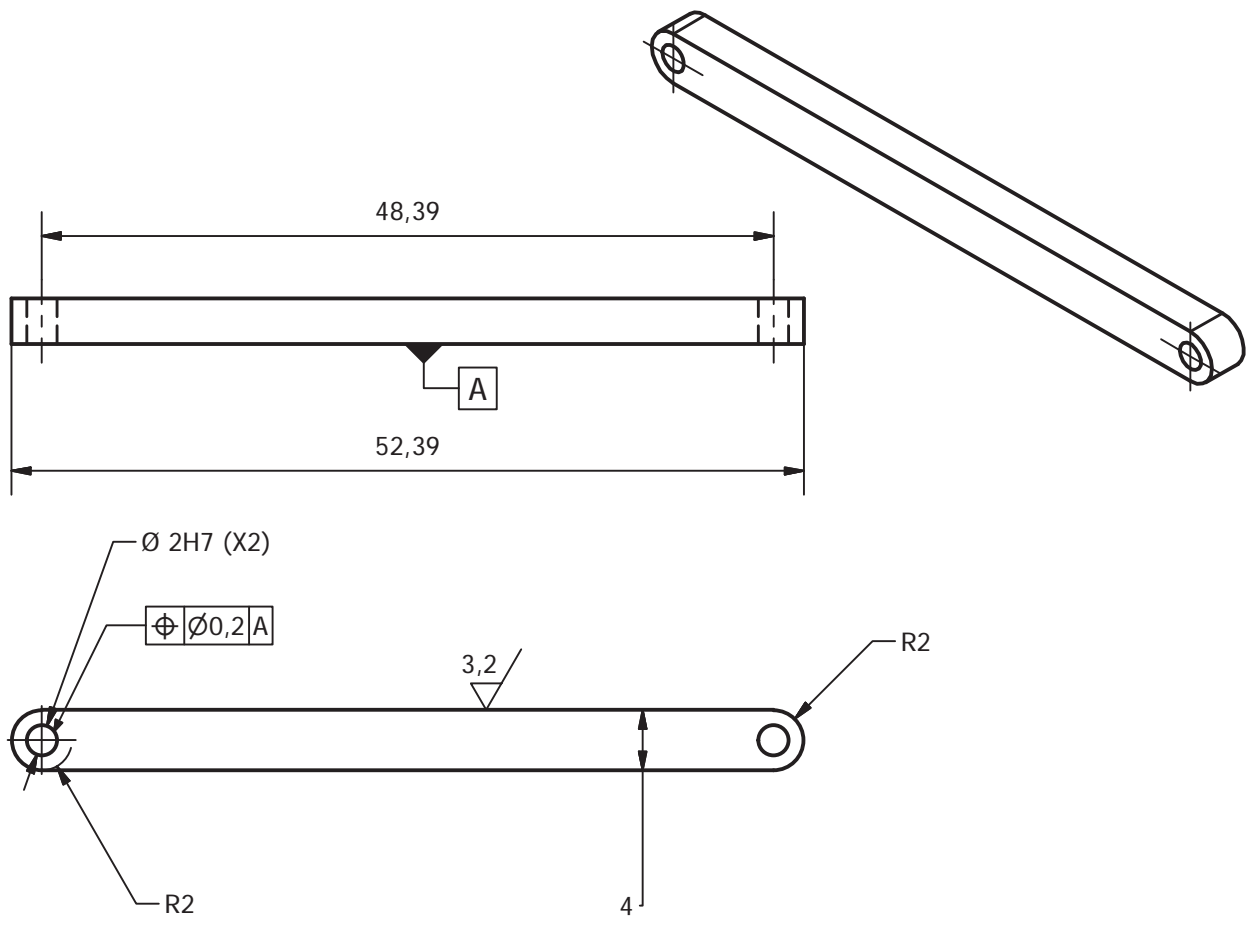
| | | |
|------------------------------------|----------------------------|---------------------|
| DIBUJADO POR: GUEVARA V., Oscar | FALANGE DISTAL DEDO PULGAR | Fecha 23/10/2016 |
|------------------------------------|----------------------------|---------------------|

| | | |
|--|--|-----------------|
| | | Hoja 11 / 14 |
|--|--|-----------------|

SEGUN DIN ISO 2768 T1

| | | | | | |
|--------------------|--------------------|------------------|-------------------|---------------------|----------------------|
| GRADO DE EXACTITUD | Más de 0.5 hasta 3 | Más de 3 hasta 6 | Más de 6 hasta 30 | Más de 30 hasta 120 | Más de 120 hasta 400 |
| MEDIO | ±0,1 | ±0,1 | ±0,2 | ±0,3 | ±0,5 |

| | | |
|--------------|-------------|-------------|
| COTA NOMINAL | COTA MAXIMA | COTA MINIMA |
|--------------|-------------|-------------|



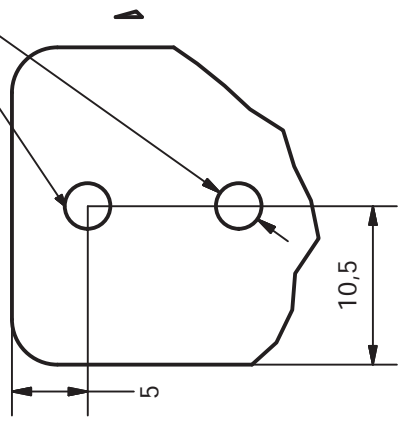
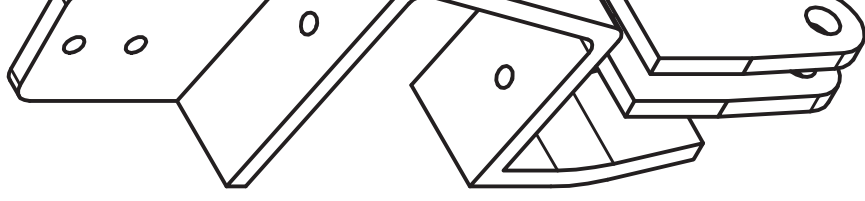
| | | |
|----------------------------------|--|-----------------|
| ACABADO SUPERFICIAL 3,2 (3,2) | TOLERANCIA GENERAL DIN-ISO-2786 IT | MATERIAL ABS |
|----------------------------------|--|-----------------|

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABDA DEL CUSCO
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA

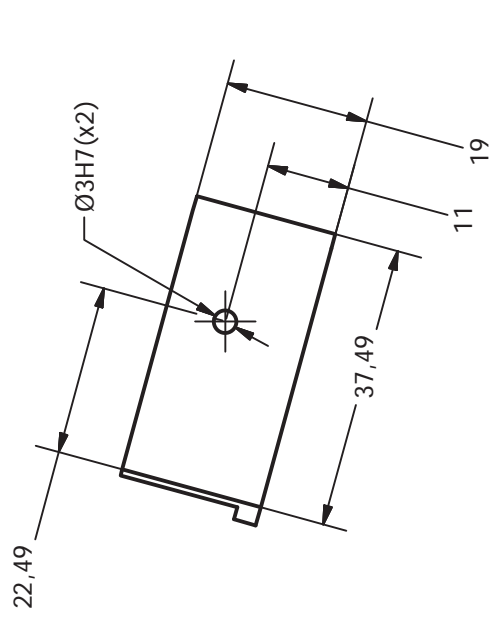
| | | |
|--|---|------------|
| MÉTODO DE PROYECCION First angle projection symbols | DISEÑO Y ANÁLISIS DE UN PROTOTIPO DE UNA MANO ROBÓTICA ANTROPOMÉTRICA | Escala 2:1 |
|--|---|------------|

| | | |
|------------------------------------|----------------------------|------------------|
| DIBUJADO POR: GUEVARA V., Oscar | BARRA PROXIMAL DEDO PULGAR | Fecha 23/10/2016 |
|------------------------------------|----------------------------|------------------|

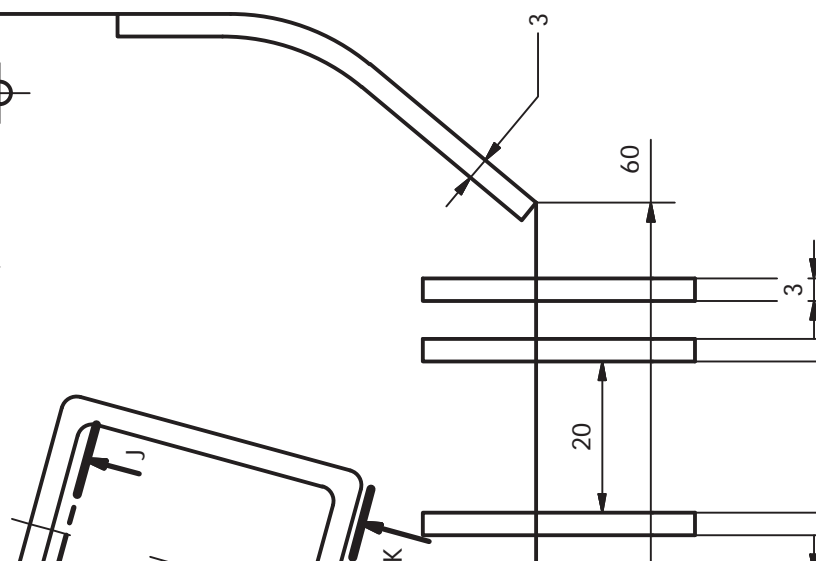
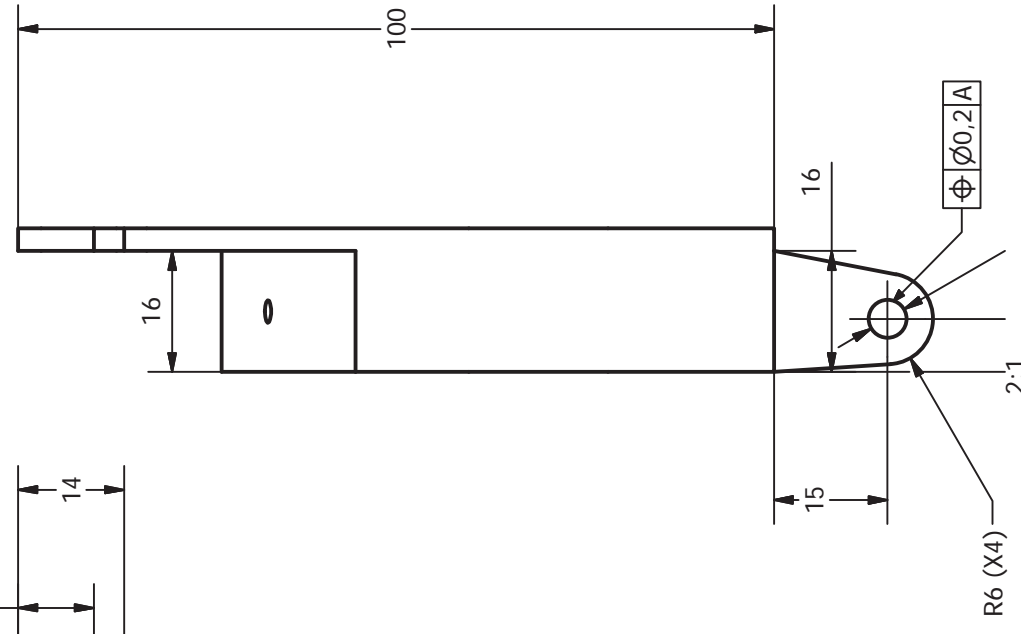
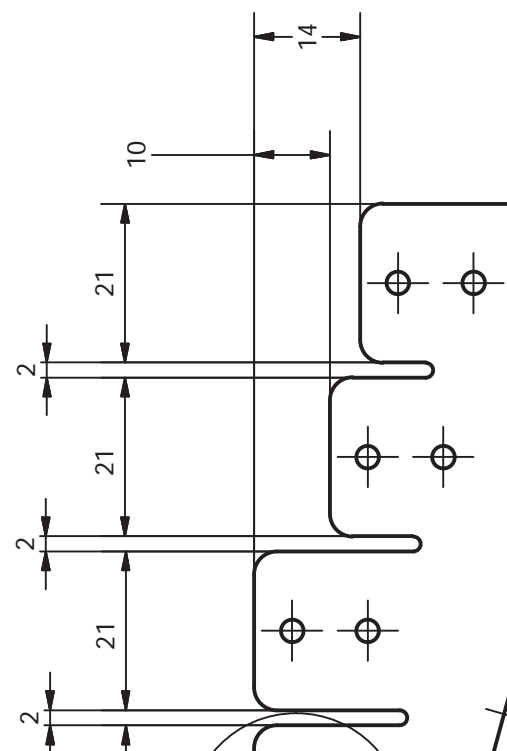
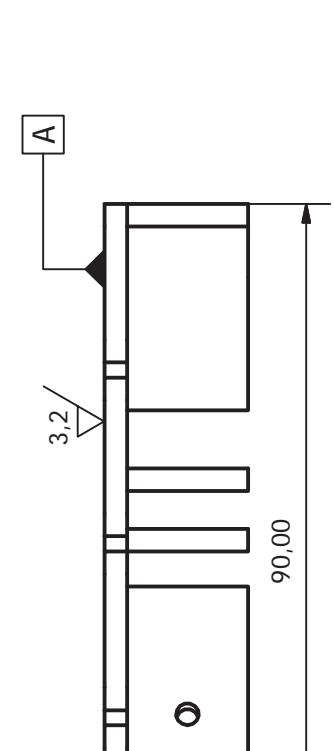
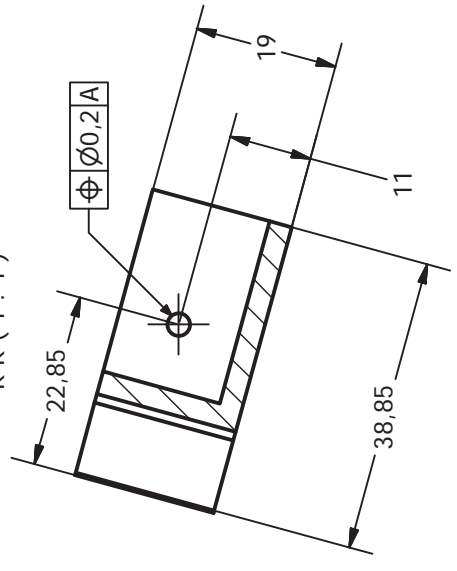
| | | |
|--|--|--------------|
| | | Hoja 12 / 14 |
|--|--|--------------|



J-J (1:1)



K-K (1:1)

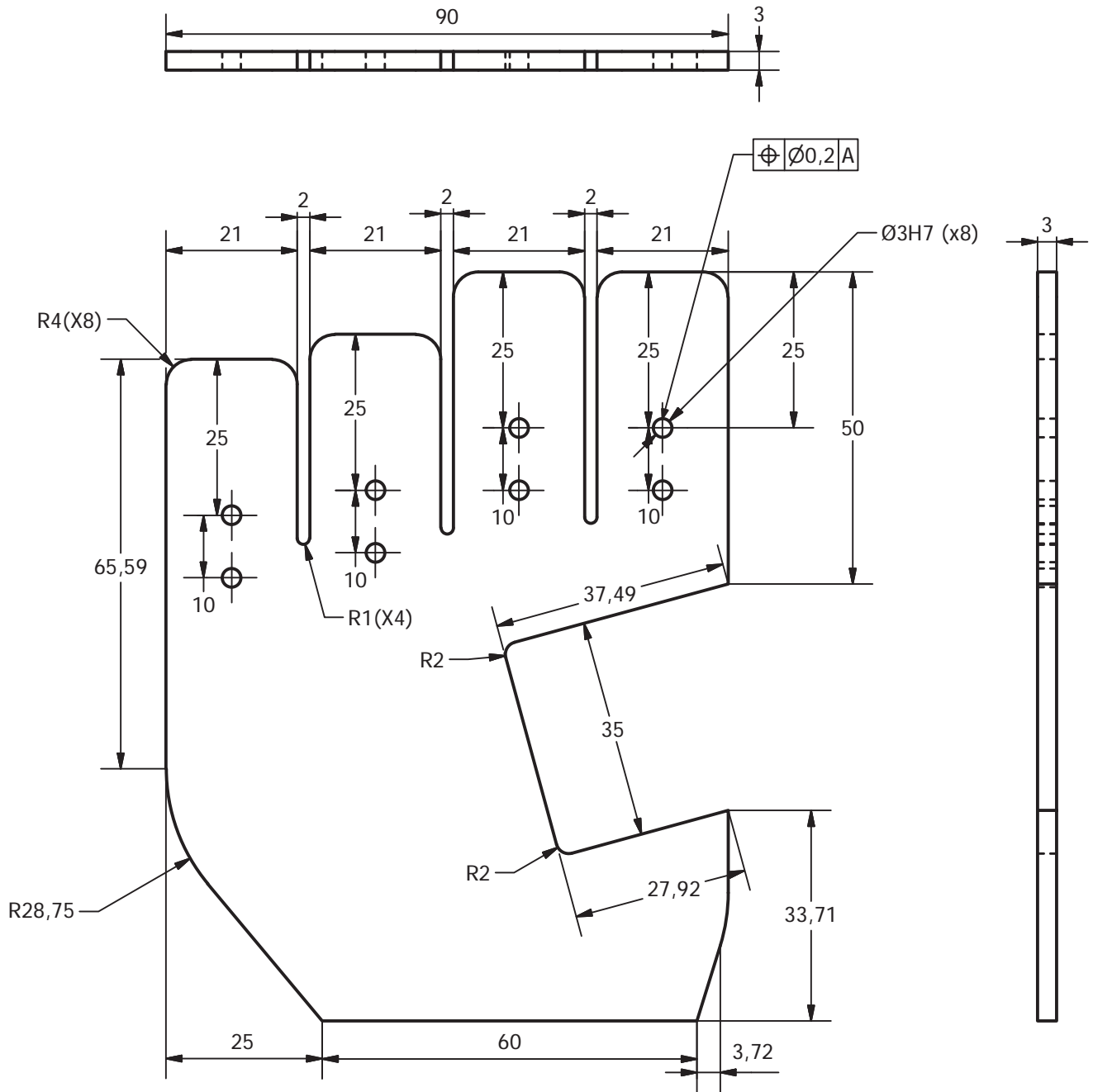


| | |
|---|---|
| <p>ACABADO SUPERFICIAL</p> <p>3.2 (▽)</p> | <p>TOLERANCIA GENERAL</p> <p>DIN-ISO-2786</p> <p>IT</p> |
| <p>UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABDA DEL CUSCO</p> <p>ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA MECANICA</p> | |
| <p>MÉTODO DE PROYECCION</p> | <p>DISEÑO Y ANÁLISIS DE</p> |

SEGUN DIN ISO 2768 T1


| GRADO DE EXACTITUD | Más de 0.5 hasta 3 | Más de 3 hasta 6 | Más de 6 hasta 30 | Más de 30 hasta 120 | Más de 120 hasta 400 |
|--------------------|--------------------|------------------|-------------------|---------------------|----------------------|
| MEDIO | ±0,2 | ±0,2 | ±0,2 | ±0,3 | ±0,5 |

| 3H7 | 3,010 | 3,00 |
|--------------|-------------|-------------|
| COTA NOMINAL | COTA MAXIMA | COTA MINIMA |



| | | |
|----------------------------------|--|-----------------|
| ACABADO SUPERFICIAL 3,2 / 3,2 | TOLERANCIA GENERAL DIN-ISO-2786 IT | MATERIAL ABS |
|----------------------------------|--|-----------------|

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABDA DEL CUSCO
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA

| | | |
|---|---|---------------|
| MÉTODO DE PROYECCION  | DISEÑO Y ANÁLISIS DE UN PROTOTIPO DE UNA MANO ROBÓTICA ANTROPOMÉTRICA | Escala 1:1 |
|---|---|---------------|

| | | |
|------------------------------------|--------------|---------------------|
| DIBUJADO POR: GUEVARA V., Oscar | CONTRA CARPO | Fecha 23/10/2016 |
|------------------------------------|--------------|---------------------|

| | | |
|--|--|-----------------|
| | | Hoja 11 / 14 |
|--|--|-----------------|