

RAE

1. **TIPO DE DOCUMENTO:** Trabajo y diseño realizado sobre un servomecanismo copiador de movimientos en dos dimensiones, para el grafico de figuras simples.
2. **TITULO:** Diseño y construcción de un servomecanismo copiador de movimientos en dos dimensiones.
3. **AUTORES:** Félix Antonio Aceros Troncoso, Reiman Vega Flautero.
4. **LUGAR:** Bogotá D.C.
5. **FECHA:** Enero 2011.
6. **PALABRAS CLAVES:** servo mecanismo, robótica, tele operación, control, micro controlador, sensor, esfuerzo, eslabón, modelado, torque, trabajo, estática, dinámica, langrangiano, matriz.
7. **DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO:** El siguiente trabajo es un diseño de un servo mecanismo copiador de movimientos en dos dimensiones, su movimiento se logra ver reflejado en una hoja de papel donde el mecanismo dibuja los movimientos realizados.
8. **LINEA DE INVESTIGACION:** Este trabajo se desarrollo en el marco en el marco de la línea de investigación de la facultad de ingeniería “tecnologías actuales y sociedad”.
9. **FUENTES CONSULTADAS:** Mecánica vectorial para ingenieros, Ferdinand p. Beer. E. Rusell Johnston;Diseño de ingeniería mecánica, Joseph E. Shigley. Charles R. Mischke; Microcontrolador PIC 16F84 Desarrollo de proyectos, Enrique palacios. Fernando Remiro. Lucas J. López; Robótica industrial; Ingeniería de control; Ingeniería de control moderna, Ogata; Diseño de maquinaria, Robert Norton.
10. **CONTENIDOS:** En este trabajo se encuentra el diseño y construcción de un servomecanismo que pueda copiar movimientos en dos dimensiones. Estos movimientos serán registrados por medio de un brazo mecánico de referencia el cual llevará unos sensores estratégicamente ubicados en cada articulación sensando así cada posición angular para luego convertir estas señales en movimientos que serán ejecutados por un brazo electromecánico.
11. **METODOLOGIA:** El método de la investigación fue basado en el empírico-analítico, ya que por medio de la investigación de los movimientos de un brazo humano se aprendió sobre los movimientos de un brazo y los grados de libertad que tiene este brazo de tres eslabones como un brazo humano pero con ciertas limitantes ya que solo mi brazo copiara y se moverá solo en dos 2 dimensiones que son X, Y. También tendrá una rotación de 180° .
12. **CONCLUSIONES:** Se concluyo que la ventaja de los servomotores es su Torque, y el servomotor cambia de posición por la acción de control y no por una fuerza externa. La única desventaja es que originalmente solo trabajan de 0° a 180° pero se pueden modificar fácilmente para que giren 360° y así se pueden utilizar como motores y se les puede controlar la velocidad y el sentido de giro.

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SERVOMECANISMO COPIADOR DE MOVIMIENTOS
EN DOS DIMENSIONES**

FELIX ANTONIO ACEROS TRONCOSO

REIMAN VEGA FLAUTERO

**UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA INGENIERÍA MECATRÓNICA
BOGOTÁ D.C.
2011**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SERVOMECANISMO COPIADOR DE MOVIMIENTOS
EN DOS DIMENSIONES**

**FELIX ANTONIO ACEROS TRONCOS
REIMAN VEGA FLAUTERO**

**Universidad de San Buenaventura
Facultad de Ingeniería
Programa Ingeniería Mecatrónica
Bogotá D.C.
2011**

Nota de aceptación:

Firma del presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Bogotá 17 de enero del 2011

DEDICATORIA

Félix Antonio Aceros Troncoso

Quiero dedicar este trabajo a mi mamá, papá y hermano por ser las piedras angular de mi vida, en estar siempre hay cuando los e necesitados y cuando no los e necesitado, ser mi inspiración para alcanzar mis metras y siempre llenarme de fuerza para segur adelante.

Quiero dedicar este trabajo a mis compañeros de la carrera pero especial mente a Andrés León, Cristhian Gómez, Jhon Prada, Henry Rodríguez, JelverCubides, Gustavo Cortes, Jaime Roa. Ya que fueron los que me apoyaron en el transcurso de la carrera, los que estuvieron con migo en mis triunfos y derrotas, los faros que alumbraron en la oscuridad, los que me guiaron y no dejaron que me perdiera en el transcurso de la carrera, pero mas por siempre extender la mano cuando mas lo necesitaba en mis caídas y poder contar con una amistad sincera.

Reiman Vega Flautero

Quiero dedicarle este trabajo a mi familia; que siempre me apoyo en mi educación y estuvo conmigo en el desarrollo de este trabajo.

AGRADECIMIENTOS

Al Ingeniero Roberto Bohórquez, por su colaboración en el desarrollo de este proyecto.

Al Ingeniero Ricardo Ríos, por su colaboración en la parte mecánica y en la asesoría del Solid Edge y en 3D y 2D.

Al Ingeniero Pedro Nel, por su colaboración en la parte mecánica.

Al Ingeniero Alcy Blanco, por su colaboración en la parte de control.

Al Ingeniero Ricardo Ríos, Gregorio Rubenstein, Lely Luegas, Alcy Blanco, Adonái Varela, Carlos González, Baldomero Méndez, Héctor Vega, Roberto Bohórquez, Luis Andrés Rodríguez, Alfonso duque y demás profesores del programa de Ingeniería Mecatrónica por haber sido los líderes en nuestro proceso de formación como ingenieros.

A los técnicos del laboratorio del hangar por su colaboración y desarrollo del proyecto.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
LISTA DE FIGURAS.....	4
LISTA DE TABLAS.....	8
LISTA DE ANEXOS.....	9
RESUMEN.....	10
INTRODUCCIÓN.....	11
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	12
1.1 ANTECEDENTES (ESTADO DEL ARTE).....	12
1.1.1 Sistemas Hapticos.....	14
1.2 DESCRIPCIÓN Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	17
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	17
1.4OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	17
1.4.1OBJETIVO GENERAL.....	17
1.4.2OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES DEL PROYECTO.....	18
1.5.1 ALCANCES.....	18
1.5.2 LIMITACIONES.....	18
2. MARCO DE REFERENCIA.....	19
2.1 MARCO CONCEPTUAL.....	19
2.2 MARCO TEÓRICO.....	19
2.2.1 MODELO DEL BRAZO HUMANO.....	19
2.2.2 DEFINICIÓN TRADICIONAL DE LOS MOVIMIENTOS DEL HOMBRO.....	22
2.2.3 MOTOR.....	23
2.2.4 MICROCONTROLADOR.....	24

2.2.5 MATERIAL.....	25
2.2.5.1 Características Físicas.....	26
2.2.5.2 Características Mecánicas.....	26
2.2.6 RODAMIENTOS AXIALES DE BOLAS.....	26
3. METODOLOGÍA.....	28
3.1 ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN.....	28
3.2 LÍNEA DE INVESTIGACIÓN DE USB / SUB-LÍNEA DE FACULTAD / CAMPO TEMÁTICO DEL PROGRAMA.....	28
3.3 TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN.....	28
3.4 HIPÓTESIS.....	28
3.5 VARIABLES.....	29
3.5.1 VARIABLES INDEPENDIENTES.....	29
3.5.2 VARIABLES DEPENDIENTES.....	29
4 DISEÑO INGENIERIL.....	30
4.1 SERVOMOTOR.....	30
4.2 BRAZOS DEL SERVOMECANISMO.....	31
4.2.1 CÁLCULOS MECÁNICOS DEL SERVOMECANISMO.....	33
4.2.1.1 CARGAS EN EL MECANISMO.....	33
4.2.2 CÁLCULOS DE MOMENTO Y FLEXION DEL BRAZO ROBOTO.....	34
4.2.3 CÁLCULOS DE VELOCIDADES, ACELERACION Y TORQUES	76
4.2.4 PASADOR EN LA UNIÓN DE LOS DOS ESLABONES.....	84
4.3 CÁLCULOS RODAMIENTOS AXIALES DE BOLAS.....	91
4.3.1 CAPACIDAD DE CARGA.....	94
4.3.2 ESCOGENCIA DEL RODAMIENTO.....	94
4.4 ELECTRÓNICA.....	94
4.5 MODELO DE CONTROL.....	96

4.5.1 MODELO DE UN SERVOMOTOR.....	97
4.5.2 MODELOS DE BRAZO DE TRES EXTREMIDADES.....	100
4.5.2.1 MODELADO POR MÉTODO DE LAGRANGE.....	103
5. RECURSOS Y PRESUPUESTO.....	115
5.1 RECURSOS.....	115
5.2 PRESUPUESTO.....	115
6. CONCLUSIONES.....	116
7. GLOSARIO.....	177
8 BIBLIOGRAFÍA.....	119
ANEXO A: PROGRAMA.....	122
ANEXO B: PBC O TRAZO DEL CIRCUITO ELECTRÓNICO.....	126
ANEXO C: PROPIEDADES DEL ALUMINIO 1060.....	127
ANEXO D: PLANOS DEL PRIMER BRAZO.....	129
ANEXO E: PLANOS DEL SEGUNDO BRAZO.....	138

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Pantógrafo híbrido.....	12
Figura 2. El brazo de control personalizado con AnalogReader.....	13
Figura 3. Brazo robot montado en la RV-1.....	14
Figura 4. Joysticks hápticos.....	14
Figura 5. Brazo robótico táctil.....	15
Figura 6. 5-DOF Haptic Wand.....	16
Figura 7. Estación de tele operación.....	19
Figura 8. Modelo del brazo humano.....	20
Figura 9. Articulaciones consideradas en el modelo.....	21
Figura 10.: Movimiento del hombro y ejes relacionados.....	22
Figura 11. Servomotor.....	24
Figura 12. Servomotor en despiece.....	24
Figura 13. PIC 16f877a.....	25
Figura14. PIC 16f877ael data sheet.....	25
Figura 15. Rodamientos axiales de bolas de simple.....	26
Figura 16: Ancho de pulso para determinados ángulos.....	31
Figura 17: Diagrama de cuerpo libre.....	31
Figura 18: Area de trabajo.....	32
Figura 19: Diagrama de fuerza.....	32
Figura 20: Brazo de tres extremidades.....	34
Figura 21: Carga distribuida en C-D.....	34
Figura 22: Diagrama cortante y momento flector.....	36
Figura 23: Diagrama de flexión.....	37

Figura 24: Cálculos por el programa MDsolid.....	38
Figura 25: Carga distribuida en B-C-D.....	39
Figura 26: Diagrama cortante y momento flector.....	40
Figura 27: Diagrama de flexión.....	41
Figura 28: Cálculos por el programa MDsolid.....	42
Figura 29: Carga distribuida en A-B-C-D.....	43
Figura 30: Diagrama cortante y momento flector.....	44
Figura 31: Diagrama de flexión.....	45
Figura 32: Cálculos por el programa MDsolid.....	46
Figura 33: Diagrama cortante y momento flector.....	49
Figura 34: Diagrama de flexión.....	50
Figura 35: Cálculos por el programa MDsolid.....	51
Figura 36: Diagrama cortante y momento flector.....	54
Figura 37: Diagrama de flexión.....	55
Figura 38: Cálculos por el programa MDsolid.....	56
Figura 39: Diagrama cortante y momento flector.....	59
Figura 40: Diagrama de flexión.....	60
Figura 41: Cálculos por el programa MDsolid.....	61
Figura 42: Diagrama cortante y momento flector.....	64
Figura 43: Diagrama de flexión.....	65
Figura 44: Cálculos por el programa MDsolid.....	66
Figura 45: Diagrama cortante y momento flector.....	69
Figura 46: Diagrama de flexión.....	70
Figura 47: Cálculos por el programa MDsolid.....	71
Figura 48: Diagrama cortante y momento flector.....	74

Figura 49: Diagrama de flexión.....	75
Figura 50: Cálculos por el programa MDsolid.....	76
Figura 51: Grafica de secciones del brazo.....	76
Figura 52: Grafica del brazo con ángulo	78
Figura 53: Sección C.....	78
Figura 54: Sección B.....	80
Figura 55: Sección A.....	81
Figura 56: Eslabón con pasador.....	84
Figura 57: Esfuerzo en los apoyos.....	84
Figura 58: Esfuerzo en cada extremo.....	85
Figura 59: Esfuerzo en la barra.....	85
Figura 60: Eslabón con pasador.....	86
Figura 61: Esfuerzo en los apoyos.....	87
Figura 62: Esfuerzo en cada extremo.....	87
Figura 63: Esfuerzo en la barra.....	88
Figura 64: Eslabón con pasador.....	88
Figura 65: Esfuerzo en los apoyos.....	89
Figura 66: Esfuerzo en cada extremo.....	90
Figura 67: Esfuerzo en la barra.....	90
Figura 68: Diagrama de flujo de rodamientos axiales de bola de simple efecto.....	92
Figura 69: Tabla de rodamientos axiales de bola de simple efecto.....	93
Figura 70: Tabla de rodamientos axiales de bola de simple efecto y medidas.....	93
Figura 71: Circuito electrónico del servomecanismo.....	95
Figura 72: LM 7805.....	95
Figura 73: LM 7805 parámetros D.C.....	96

Figura 74: Diagrama de bloques de un control de posición.....	97
Figura 75: Diagrama de bloques de un servomotor.....	97
Figura 76: Pruebas del servomotor.....	99
Figura 77: Diagrama de bloques del sistema.....	99
Figura 78: Grafica del diagrama de bloque del sistema.....	100
Figura 79: Brazo de 3 extremidades.....	102
Figura 80: Diagrama de K_2	104
Figura 81: Diagrama de bloque de retroalimentación.....	110
Figura 82: Sistema estable y sus respectivos K	110
Figura 83: Respuesta óptima.....	111
Figura 84: Diagrama de bloque de retroalimentación óptima.....	112
Figura 85: Respuesta óptima que se obtuvo.....	112
Figura 86: Diagrama de bloque estimador.....	113
Figura 87: Respuesta del estimador.....	114

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1: Definición de segmentos del modelo del brazo humano.....	20
Tabla 2: Para encontrar el c/p.....	91
Tabla 3: Datos del servomotor.....	96

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A: PROGRAMA.....	122
ANEXO B: PCB O TRAZO DEL CIRCUITO ELECTRÓNICO.....	126
ANEXO C: PROPIEDADES DEL ALUMINIO 1060.....	127
ANEXO D: PLANOS DEL PRIMER BRAZO.....	129
ANEXO E: PLANOS DEL SEGUNDO BRAZO.....	138

RESUMEN

Este proyecto consiste en el diseño y construcción de un servomecanismo que pueda copiar movimientos en dos dimensiones. Estos movimientos serán registrados por medio de un brazo mecánico de referencia el cual llevará unos sensores estratégicamente ubicados en cada articulación sensando así cada posición angular para luego convertir estas señales en movimientos que serán ejecutados por un brazo electromecánico.

Tanto el brazo mecánico de referencia como el brazo electromecánico copiado utilizarán materiales como aluminio y acrílico ya que son livianos, resistentes y muy fáciles de manipular, ajustándose a las necesidades que la construcción de los brazos requiere.

Para la captura de movimientos se utilizan potenciómetros lineales que permiten tomar estas señales de manera proporcional y posteriormente acondicionarla a un micro controlador, el cual se encargará de hacer el procesamiento de estas señales para retransmitirlas a un sistema de servomotores.

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SERVOMECANISMO COPIADOR DE MOVIMIENTOS EN DOS DIMENSIONES

INTRODUCCIÓN

En la historia el ser humano ha tenido la necesidad de copiar imágenes en sus tamaños reales, ampliarla y reducirla pero era muy complicado realizar estas copias a escalas o copiar folios simultáneamente y las personas que realizaban este tipo de trabajos les tomaba mucho tiempo. Pero Arquímedes inventó un sistema para poder cumplir estas necesidades llamado por él como pantógrafo, creado en el año 250 a. c. Desde esa fecha hasta el día de hoy, se utiliza para dibujar cualquier figura con la capacidad de ampliarla o reducirla y también para escribir varios folios simultáneamente.

Este tipo de herramienta fue una gran ayuda para muchos científicos, ingenieros y artistas. Pero también este sistema fue pie para aplicaciones en otras áreas de investigación como para la medicina e industria. Que se basaron en el principio del pantógrafo que está constituido con 2 herramientas, una es la herramienta de referencia y la otra es la herramienta que copia y sigue los movimientos de la herramienta de referencia, pero el pantógrafo tenía una gran desventaja para esta área de trabajo ya que se necesitaba trabajar áreas muy distantes. Para solucionar este problema lo que se utilizó fueron dos brazos robóticos, un brazo será la herramienta de guía y el otro brazo será la herramienta copiadora.

Para la industria este sistema fue muy útil trabajos de manipulación, corte, y sistemas de copiado a distancia, evitando así accidentes.

En la medicina se ha utilizado para hacer operaciones a distancias remotas, donde el medico interactúa y manipula en tiempo real este dispositivo, realizando así determinados procedimientos quirúrgicos.

También existen los sistemas hápticos, los cuales pueden controlar y manipular herramientas de forma remota, pero en este caso estos dispositivos permiten que las fuerzas de contacto resistentes retornen hacia el teleoperador., hoy en día estos dispositivos se diseñan e integran en simuladores de juegos, médicos y en simuladores de conducción entre otros.

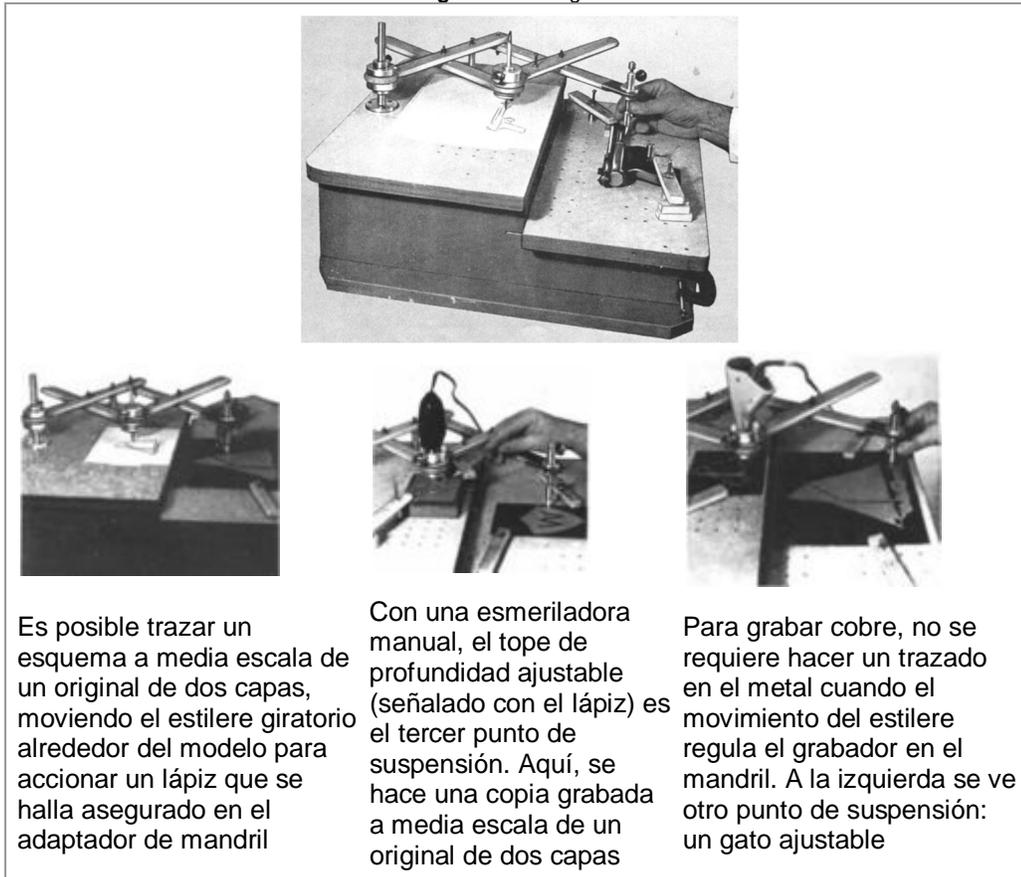
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 ANTECEDENTES (ESTADO DEL ARTE)

En el transcurso de la historia y la necesidad de copiar piezas a escala o escribir mano escritas simultáneamente era algo complicado hasta la invención del pantógrafo es una máquina copiadora que puede producir esquemas a una escala con un lápiz, una pluma, un marcador, una grabadora motriz o una esmeriladora manual como se puede observar en la figura [1]. Este pantógrafo híbrido hasta tiene una mesa escalonada de altura ajustable que permite trazar los contornos de tales objetos como la pistola que se muestra. Esto resulta particularmente ventajoso para los modelistas que quieran reducir piezas individuales a escala o establecer proporciones generales.

El estilete gira torio especial, tiene una punta cortada hasta la línea central. Manteniendo el lado plano de este estilete en posición tangente con el borde de cualquier original tridimensional, obtiene usted una copia reducida con casi ninguna distorsión cosa imposible con un estilete cónico convencional. Además, este estilete especial puede subirse o bajarse para seguir bordes en planos diferentes. La copia resultante es una vista de plano exacta.

Figura 1: Pantógrafo híbrido.



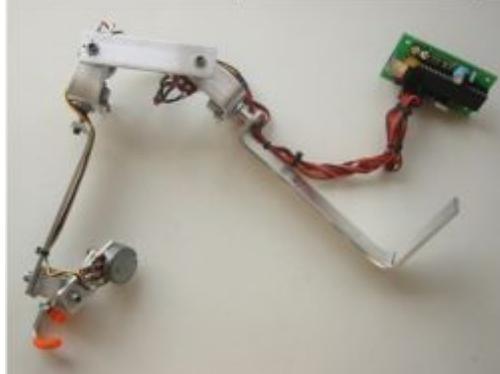
Fuente: <http://www.mimecanicapopular.com/vernota.php?n=329>

Estos fueron los principios del pantógrafo y sus primeros diseños como se muestra en la figura [1], con el tiempo fue evolucionando ya su vez utilizado para distintas funciones en la industria.

También se ha utilizado este sistema como Joystick para manipular brazos robóticos y a su vez acoplado a vehículos para el transporte de estos brazos como lo muestra la figura [3].

Este sistema también permite la adaptación de diferentes instrumentos en el efector final, tales como herramientas de corte, garras, laser, entre otras. Accediendo de esta manera a la manipulación de este sistema a distancias controladas y llegando a lugares de difícil acceso que a su vez puedan ser perjudiciales para el ser humano. En la figura [2] se puede observar un Joystick como un brazo de control personalizado llamado AnalogReader el cual captura y controla los movimientos suministrados.

Figura 2: El brazo de control personalizado con AnalogReader.



Fuente: <http://www.endurance-robotics.com/page.aspx?id=4>

Este Joystick aparte de capturar los movimientos en diferentes grados de libertad, también cumple con la función de agarre y corte. En la siguiente figura [3] se puede observar el brazo robótico RV-1, que permite ser controlado por el brazo de control personalizado con AnalogReader.

Figura 3: brazo robot montado RV-1.



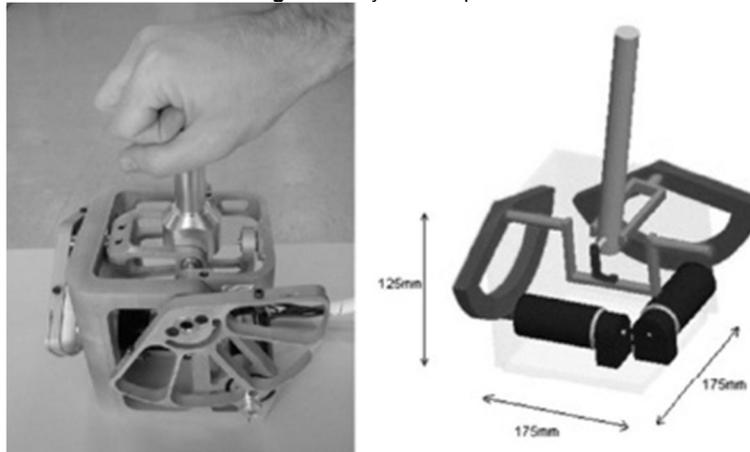
Fuente: <http://www.endurance-robotics.com/page.aspx?id=4>

1.1.1 Sistemas hápticos

Los sistemas hápticos sirven de enlace entre el usuario y un escenario real o virtual, a través del sentido del tacto. El sistema requiere dispositivos mecánicos, que el operario manipula a modo de herramienta, con espacio de trabajo.

Una de las ventajas de los dispositivos hápticos es que un solo dispositivo puede sustituir a diferentes dispositivos reales, es decir, una sola palanca háptica de 2 grados o 3 grados de libertad puede comportarse como una palanca de cambio de un vehículo, palanca o Joysticks de videos juegos, palanca para cirugías entre otras funciones, en la figura 4 podemos ver un palanca o joysticks háptica.

Figura 4: Joysticks hápticos.



Fuente: http://6597155071174327270-a-1802744773732722657-sites.googlegroups.com/site/jorgejuangilnobajas/files/Bengoechea06-CIIP0-Palanca.pdf?attachauth=ANoY7craRpgNnNIRW_2gJfEv5t77o9KhlQiGaVlhn2U6Zdkns8R2gvSfpxtvMA4e0uTk hNt2gL6dk7xOWcfkl614EskaYijDC_jc1-FDImVegzKIOYKUG55cQsNfi3p6RjilNnozy5ahmt4c4bGxh8RrkdzKILQtYRqLrmd_EtUzO7I2p2xv-XfeisyFFUdQxudXQeeg8vERFvEATizqT3W7AZuBdxXAitVucuGkskzyJA_vj8ulEA80%3D&attredirects=0

En el desarrollo de sistemas hápticos se ha encontrado que existen varios enfoques para la creación de sistemas hápticos. Aunque puede que todos parezcan totalmente diferentes, todos tienen cosas en común que son dos brazos uno es el brazo que genera el movimiento, el segundo es que copia el movimientos para hacer cortes, agarrar, escritos. Pero también en la actualidad los hay para diseños de imágenes táctiles similares a un mouse, con la diferencia que un mouse no puede comunicar los datos sintetizados hápticos para el usuario. Esto se logra con un lápiz óptico conectado un brazo como se puede observar en la figura [5].

Figura 5: brazo robótico táctil.



Fuente: <http://electronics.howstuffworks.com/gadgets/other-gadgets/haptic-technology3.htm>

Este brazo es similar a los otros de dos brazos la diferencia es que se utiliza solo uno brazo y el lápiz óptico escribe en un computador en un programa de interfaz táctil para hacer gráficos, él brazo es Joysticks que la persona agarra con la mano y genera los movimientos en la pantalla de la computadora y genere el dibujo que desea.

Todos estos son sistemas e investigación que personas a logrado para poder manipular un brazo robótico por medio de una palanca, otro brazo o joysticks, así manipular un brazo a distancia y evitar riesgos de accidente con la manipulación de objetos explosivos o radiactivos. Pero también se le vio la necesidad como para simuladores, tele medicina, para copiar folios y entre otras más funciones que puede utilizar.

La empresa Quanserha trabajado y desarrollado brazos robóticos controlados por un Joysticks háptico para escribir que este sistema se llama Telepresencesystem y también para hacer corte que se llama OA HapticTeloperation of Mitsubishi PA-10 via Simulink.

En la figura [6] se puede observar el Joystick háptico que manipula los brazos robóticos “5-DOF HapticWand, tiene 5 grados de libertad: 3 translaciones y 2 son rotaciones, este diseño fue realizado mediante un acuerdo de doble pantógrafo. Tambiéncada pantógrafo es accionado directamente por 2 motores de corriente continua DC en sus hombros y 2 motores DC de más alcance en la cintura.

Datos e información del 5-DOF:

- Interfaz de Control háptico
- Control de Impedancia
- Joystick Maestro. Esclavo Interacción Medio Ambiente
- Teleoperación
- Paralelo, redundante Manipuladores
- Cinemática y Dinámica Modelización
- Robótica
- El movimiento (posición y velocidad) Control
- Control de la Fuerza
- Fuerza. Observador de velocidad
- Localización y Seguimiento de la Fuerza: En el movimiento libre y Durante Duro de contacto.
- Sistema de Identificación
- Diseño de Control multivariable
- Diseño de control PID
- Control Adaptativo
- Estado de votos
- control en tiempo real
- Tiempo de muestreo discreto”¹

Figura 6: 5-DOF HapticWand.



Fuente: http://www.quanser.com/english/downloads/products/Specialty/5DOF_HapticWand_PIS_032008.pdf

Enlaces de 2 videos a donde están utilizando este sistema háptico Quanser:

- Brazo que corta link: <http://www.youtube.com/watch?v=xQGkokPhzsg&feature=related>
- Brazo que escribe link: http://www.youtube.com/watch?v=Q4s_TXP9jl&feature=related

¹ http://www.quanser.com/english/downloads/products/Specialty/5DOF_HapticWand_PIS_032008.pdf visitada el 11/08/2010 hora de visita a las 9 am

1.2 DESCRIPCIÓN Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Cómo hacer que el segundo brazo copie los movimientos del primer brazo?

A partir de sensores lineales para la captura de movimientos, servomotores como actuadores, y un micro controlador para el procesamiento de la señal, generar una respuesta en tiempo real.

1.3 JUSTIFICACIÓN

El diseño y construcción de un servomecanismo que pueda copiar movimientos en dos dimensiones, se utiliza para dibujar y escribir a distancia ya que se va a manejar en forma alámbrica a una distancia variable de un brazo al otro. El manipulador del primer brazo este retirado del segundo brazo y del área de trabajo evitando accidentes laborales.

1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.4.1 Objetivo General

Diseñar y construir un servomecanismo copiadore de movimientos en dos dimensiones.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Diseñar y construir un brazo mecánico de referencia y un brazo robótico copiadore para un área de trabajo de 25x35cm.
- Implementar un sistema que soporte una carga máxima de 500g.
- Diseñar el programa de control para el servo mecanismo copiadore.
- Realizar la programación para obtener una respuesta en tiempo real del brazo mecánico de referencia al brazo robótico copiadore.

1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES DEL PROYECTO

1.5.1 Alcances

- Diseño y construcción de servomecanismo coprador en dos dimensiones.
- El segundo brazo copie en tiempo real los movimientos del primer brazo.

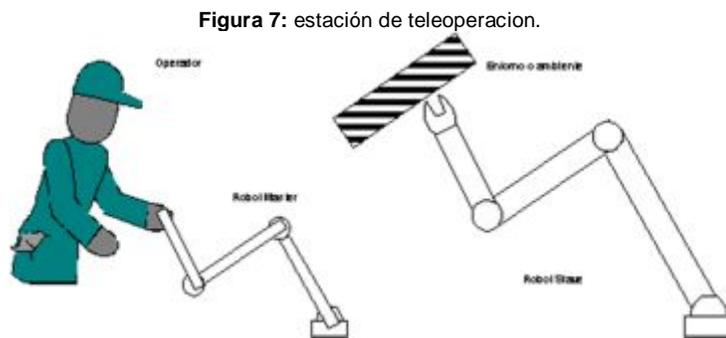
1.5.2 Limitaciones

- Se construirá un servomecanismo coprador que soporte como máximo 500 gramos de carga.
- Los ángulos de cada eslabón tendrán como máximo de 180 grados.
- El área de trabajo del brazo robótico coprador tendrá un área mínimo y máxima de 25x35cm.
- Las dimensiones en las que trabajará el servomecanismo coprador serán las componentes X y Y.

2. MARCO DE REFERENCIA

2.1 MARCO CONCEPTUAL

Los sistemas teleoperados están experimentando numerosas innovaciones para el avance de las tecnologías pero su principio básico sigue siendo el mismo que es analizar los movimientos que efectúa el robot cuando es guiado por el operador y extraer las reglas de comportamiento adecuados para poder repetir operaciones similares de modo autónomo como se puede observar en la figura [7].



Fuente: <http://www.tecnun.es/asignaturas/control1/proyectos/teleop2D/teleoperacion.htm>

La variedad de los posibles sistemas de aprendizaje es enorme, debido a lo heterogéneo de la información, gran parte de esta información se encuentra contenida en la descripción del entorno. También de acuerdo a su grado de autonomía los robots pueden clasificarse en teleoperados de funcionamiento repetitivo y automático o inteligente.

2.2 MARCO TEÓRICO

Para el desarrollo de este proyecto se toma en cuenta la anatomía de un brazo humano para entender mejor los grados de libertad y su cinemática y así poder lograr e imitar los movimientos.

2.2.1 “MODELO DEL BRAZO HUMANO

El modelo biomecánico de la extremidad superior figura [8], se define como una cadena abierta de 5 segmentos rígidos, conectados entre sí por cuatro uniones articulares simples.

FIGURA 8: Modelo del brazo humano.



Fuente: <http://revistaing.uniandes.edu.co/pdf/rev22art4.pdf?ri=741e8a08c8a99d36aa38401f45b19b4f>

Los segmentos que componen el modelo serán tratados como cuerpos rígidos y se definen en la Tabla [1].

Tabla 1: Definición de segmentos del modelo del brazo humano.

Segmento	Definición
Tórax	Origen del sistema articulado
Clavícula	Desde la articulación esterno-clavicular hasta la acromio-clavicular
Húmero	Desde la articulación gleno-humeral hasta la articulación de
Antebrazo	Desde el codo hasta la
Mano	A partir de la muñeca.

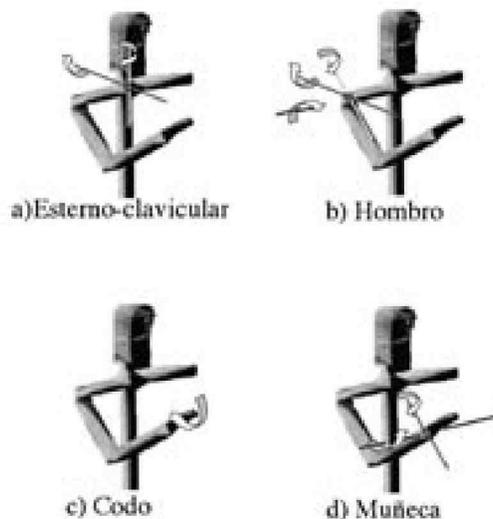
Fuente: <http://revistaing.uniandes.edu.co/pdf/rev22art4.pdf?ri=741e8a08c8a99d36aa38401f45b19b4f>

Estos segmentos se unen por medio de cuatro articulaciones que proveen un total de nueve grados de libertad. Las articulaciones que se han incluido en el modelo son: la articulación externo-clavicular figura [9a]. Que permite 2 grados de libertad; el hombro figura [9b], que permite 3 grados de libertad y funcionalmente es la unión de las articulaciones acromio-clavicular y gleno-humeral; el codo figura [9c]; y la muñeca figura [9d], que permiten cada una 2 grados de libertad.

El modelo propuesto tiene algunas simplificaciones importantes con respecto a la fisiología de la extremidad superior. Las tres principales son las siguientes:

- Cada articulación se define a través de un centro articular, que es un punto que se considera fijo a los dos cuerpos adyacentes. La articulación del hombro, especialmente, se considera como una unión esférica simple, que mantiene la funcionalidad de los movimientos del hombro pero no su configuración real.
- El antebrazo se considera como un cuerpo rígido, lo cual hace que los movimientos de pronación y supinación se deban considerar alrededor del codo.
- La mano se modela como un cuerpo rígido.

Figura 9: Articulaciones consideradas en el modelo.

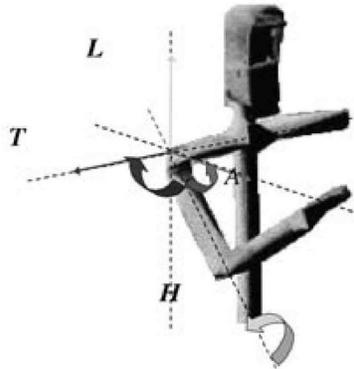


Fuente: <http://revistaing.uniandes.edu.co/pdf/rev22art4.pdf?ri=741e8a08c8a99d36aa38401f45b19b4f>

Por otra parte, una novedad de este modelo respecto a otros propuestos en la literatura es la inclusión del movimiento de la clavícula como parte de la extremidad superior; lo cual enriquece la representación de movimientos, como se muestra posteriormente.

2.2.2 DEFINICIÓN TRADICIONAL DE LOS MOVIMIENTOS DEL HOMBRO

Figura 10: Movimiento del hombro y ejes relacionados.



Fuente: <http://revistaing.uniandes.edu.co/pdf/rev22art4.pdf?ri=741e8a08c8a99d36aa38401f45b19b4f>

En la figura [10] se muestran los ejes principales que se definen para describir el movimiento del hombro: un eje transverso (**T**) que va desde un hombro hasta el otro; un eje antero-posterior (**A**) que va de atrás hacia adelante a través del hombro; y un eje longitudinal (**L**) que atraviesa el hombro verticalmente y es perpendicular a los dos anteriores. Adicionalmente, se define un eje longitudinal del miembro (**H**) fijo al húmero.

Con base en estos ejes se definen los siguientes planos de referencia:

- El plano de flexión - extensión, el cual contiene el eje antero-posterior y el eje longitudinal, y es normal al eje transverso.
- El plano de abducción - aducción, el cual contiene los ejes transverso y longitudinal, y es normal al eje antero-posterior.
- El plano neutro, el cual contiene los ejes transversos y antero-posterior, y es normal al eje longitudinal. Teniendo estas definiciones de ejes y planos, los movimientos del hombro se definen como:

Flexión: Este movimiento tiene lugar alrededor del eje transverso y es una descripción del movimiento que ocurre cuando se eleva el brazo hacia adelante. En el caso del hombro, se cuantifica mediante el valor del ángulo que se crea entre el brazo y el eje longitudinal en el plano de Flexión – Extensión. En la posición anatómica la flexión del hombro es nula.

Extensión: Movimiento opuesto a la flexión, también tiene lugar alrededor del eje transversal. Se describe como el movimiento que acerca el brazo hacia el cuerpo si el brazo está en flexión.

Abducción y Aducción: Estos movimientos tienen lugar alrededor del eje antero-posterior y ocurren cuando el brazo se aleja del cuerpo (abducción) y cuando se acerca nuevamente (aducción). Para el hombro, estos movimientos se cuantifican mediante el valor del ángulo creado entre el brazo y el eje longitudinal en el plano de Abducción – Aducción.

Rotación de Hombro: Este movimiento tiene lugar alrededor del eje longitudinal del miembro. Se define como la rotación del miembro sobre su propio eje. Esta descripción de los movimientos del brazo es ampliamente utilizada por fisioterapeutas y médicos, y resulta especialmente útil para describir movimientos sencillos del tipo arcos de movimiento del brazo (Rodríguez, Quintero y Botero, 2003). Sin embargo, estas definiciones no son lo suficientemente claras y precisas para definir movimientos complejos, entendidos como movimientos compuestos que ocurren en el espacio tridimensional.²

2.2.3 MOTOR

Se eligió como motor los servomotores ya que estos permiten controlar la posición angular de una forma precisa y proporcional al ancho de pulso generado por el microcontrolador.

También son especiales para las aplicaciones donde se requiere un movimiento de mucha fuerza con precisión en su posicionamiento, y son muy utilizados en la robótica, ya que son pequeños, tienen internamente un circuito de control.

Las ventajas de los servomotores es su fuerza y que si se le está entregando señal adecuada quedan en una posición fija, y si se trata de moverlo el servo hace fuerza contraria para mantener su posición en que se dejó (gran ventaja en comparación a los motores DC y Paso a Paso.) la única desventaja es que originalmente solo trabajan de 0° a 180° pero se pueden modificar fácilmente para que giren 360° y así se pueden utilizar como motores y se les puede controlar la velocidad y el sentido de giro.

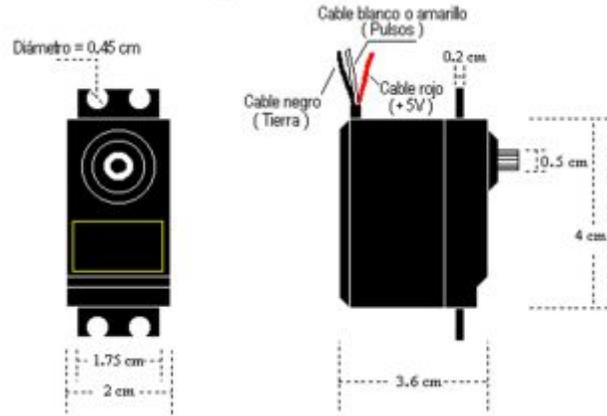
Las características esenciales de este servomotor para este proyecto son:

- Alto torque.
- Alta velocidad.
- Caja reductora metálica.
- Voltaje de entrada de 5v a 6v.
- Bajo costo.

En la figura [11], podemos observar como es un servomotor

² <http://revistainq.uniandes.edu.co/pdf/rev22art4.pdf?ri=741e8a08c8a99d36aa38401f45b19b4f> visitada el 01/09/2010
hora de visita a las 9 am

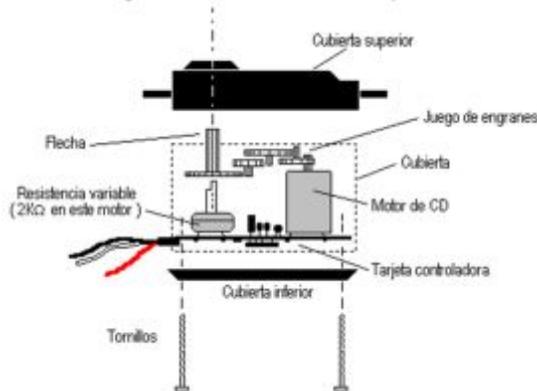
Figura 11: Servomotor.



Fuente: http://members.fortunecity.es/grupot12m/normal/sistema_de_control_archivos/image015.gif

En esta siguiente figura [12], podemos observar un despiece de un servomotor y así ver cómo está constituida por dentro.

Figura 12: Servomotor en despiece.



Fuente: <http://www.monografias.com/trabajos60/servo-motores/Image26919.gif>

2.2.4 MICROCONTROLADOR

El microcontrolador seleccionado para realizar este diseño del servomecanismo de movimientos en dos dimensiones es el PIC 16f877ade Microchip pertenece a una gran familia de microcontroladores de 8 bits (bus de datos) figura [13], el cual posee varias características que lo hacen imprescindible para este proyecto como son:

- Corriente de pines de hasta 25 mA.
- Tiene 5 puertos configurables a las necesidades requeridas
- Convertidor Análogo Digital de 8 entradas, 10 bit
- Bajo consumo de potencia
- Desempeño alto.
- Hasta 20 MHz de velocidad
- Económico.

Figura 13: PIC 16f877a.

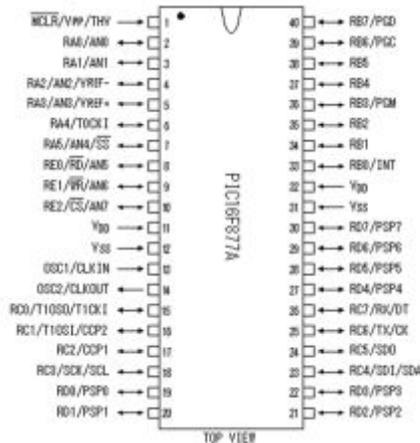


www.HVWTech.com

Fuente http://www.hvwtech.com/products/7/28000_PV.jpg

En esta figura [14], se puede observar el data sheet del PIC 16f877a.

Figura14: PIC 16f877ael data sheet.



Fuente: http://www.piclist.com/images/www/hobby_elec/gif/pic6_h04_411.gif

2.2.5 MATERIAL

Se escogió el aluminio porque es un elemento metálico que cumple con las características físicas y mecánicas que son importantes para este proyecto, también su precio es muy económico. Las características son:

2.2.5.1 Características físicas

Entre las características físicas del aluminio, destacan las siguientes:

- Es un metal ligero.
- Tiene un punto de fusión bajo.
- Resistente a la corrosión.
- Material económico y fácil de reciclar.

2.2.5.2 Características mecánicas

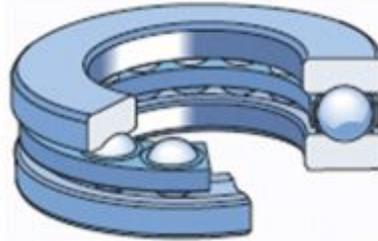
Entre las características mecánicas del aluminio se tienen las siguientes:

- De fácil mecanizado debido a su baja dureza.
- Muy moldeable, permite la producción de láminas muy delgadas.
- Material blando lo que permitió su uso en aplicaciones estructurales.
- Permite la fabricación de piezas por fundición, forja y extrusión.
- Material soldable.

2.2.6 RODAMIENTOS AXIALES DE BOLAS

Para este diseño se necesita que los brazos giren 180° , para este necesitamos de servomotor y un rodamiento. Pero no cualquier clase de rodamientos sino un rodamiento axial de bolas de simple efecto [15], ya que el brazo solo maneja carga axial y este rodamiento constan de una arandela de eje, una arandela de alojamiento y una corona axial de bolas. Los rodamientos son desarmables de modo que el montaje resulta sencillo ya que las arandelas y la corona de bolas pueden montarse por separado.

Figura 15: Rodamientos axiales de bolas de simple efecto.



Fuente

http://www.skf.com/skf/productcatalogue/jsp/viewers/imageViewerJs.jsp?image=1300f01.gif&file=1_8_1&maincatalogue=1&lang=es

Los rodamientos axiales de bolas de simple efecto, como su propio nombre indica, pueden soportar cargas axiales en una dirección y por tanto fijar un eje axialmente en una dirección. No deberán someterse a ninguna carga radial.

3 METODOLOGÍA

3.1 ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN

13. **Empírico-analítico:** ya que por medio de la investigación de los movimientos de un brazo humano se aprendió sobre los movimientos de un brazo y los grados de libertad que tiene este brazo de tres eslabones como un brazo humano pero con ciertas limitantes ya que solo mi brazo copiara y se moverá solo en dos 2 dimensiones que son X, Y. También tendrá una rotación de 180°.

3.2 LÍNEA DE INVESTIGACIÓN DE USB / SUB-LÍNEA DE FACULTAD / CAMPO TEMÁTICO DEL PROGRAMA

14. Tecnologías actuales y sociedad.
15. Instrumentación y control de procesos.
16. Automatización de procesos. Robótica
17. Mecatrónica

3.3 TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

La técnica de recolección de información para la realización de este proyecto se recurre a la información que se encontró por Internet, también se emplean mediciones con instrumentos y simulaciones, también proyectos que pueden estar relacionados con el tema y se acude a la ayuda de textos para poder realizar el modelado de una de diversos sistemas.

3.4 HIPÓTESIS

El diseño y construcción de este servomecanismo de movimientos en dos dimensiones es poder dibujar o escribir en un área de trabajo mínimo y máxima de 25x35cm, en donde se tendrá 2 brazos robóticos, un brazo robótico será el brazo mecánico copiador y el segundo brazo robótico será el brazo electromecánico copiador.

3.5 VARIABLES

3.5.1 Variables Independientes

- La posición, velocidad y la aceleración de los servomotores.
- El peso de los 500gramos en lapunta del servo mecanismo.
- El área de trabajo.

3.5.2 Variables Dependientes

- El sistema de control interno de los servos motores que se utilizan.
- Las propiedades mecánicas de aluminio.
- La potencia requerida por el sistema.

4 DISEÑO INGENIERIL

Para el desarrollo del proyecto, se procedió inicialmente a realizar el análisis de los movimientos que puede un mecanismo articulado basado en las propiedades de los paralelogramos con el fin de determinar, los grados de libertad que debe llevar su homóloga robótica.

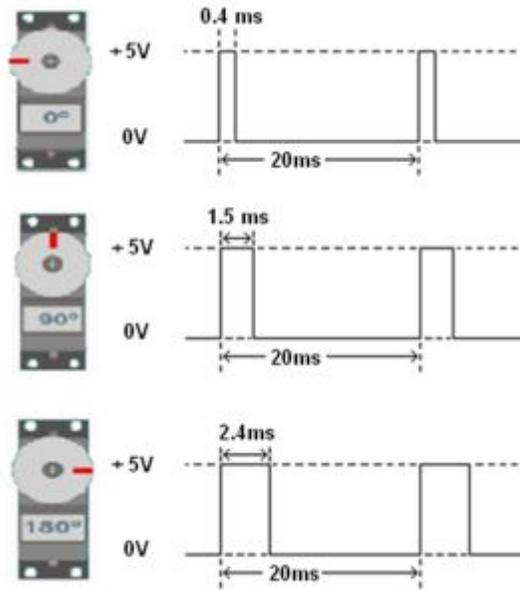
4.1 SERVOMOTOR

El servo motor que se escogieron fueron el MG996R, y el SM-S8166M. Cumple con el torque y velocidad requeridos, permitiendo así tener un factor de seguridad adecuado.

El servo que corresponda para hacer un movimiento en particular, y para entender qué tipo de señal se le debe enviar, detallare a continuación como funciona un servomotor:

El servo tiene una movilidad de 180° y funciona con lo que se conoce como modulación por ancho de pulsos o PWM. Funciona a 50Hz, o sea en un segundo le son enviados 50 pulsos, y con un simple cálculo se puede dividir 1/50 y nos dará 20 mili segundos el ancho de pulso se utilizara para el trabajo del movimiento de este: trabajando en este pequeño intervalo, podemos poner en un ángulo a nuestro beneficio el servomotor y que se quede allí hasta que cambiemos ese pulso por otro. Para 0° tenemos que tener un pulso de 0,4 mili segundos y el resto un pulso bajo hasta los 20 mili segundos, esto repetidamente 50 veces nos da los 50 Hz y por consecuencia el servo en la posición 0° como se muestra en la figura 20. Para 90° tenemos que aplicar un pulso de 1,5 mili segundos y el resto en pulso bajo hasta los 20 mili segundos, esto repetidamente por 50 Hz nos dará la posición 90°, también mostrado en la figura 20. Y para 180 ° tenemos que aplicar un pulso de 2,4 mili segundos y el resto en pulso bajo hasta 20 mili segundos, esto repetidamente por 50 Hz nos dará la posición 180°, también mostrado en la figura [16].

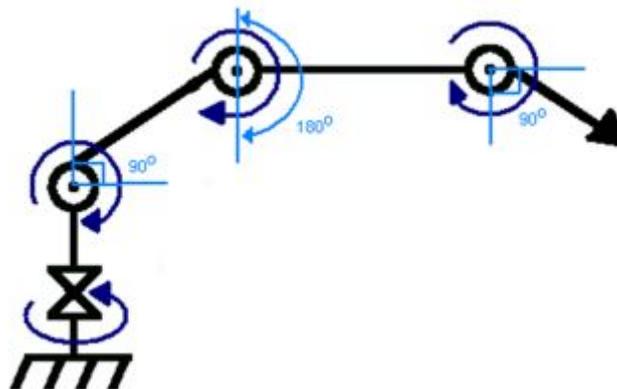
Figura 16: Ancho de pulso para determinados ángulos.



Fuente: Autor

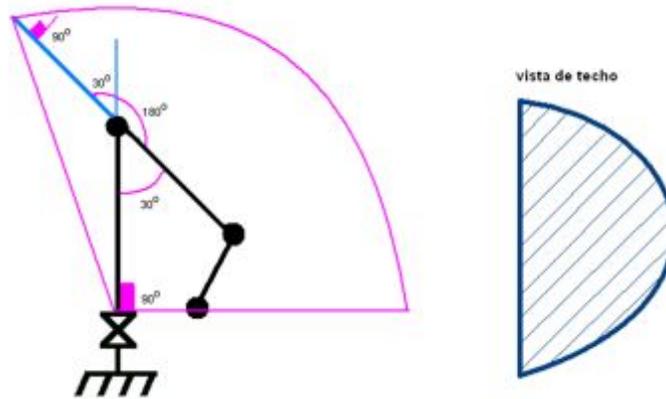
4.2 BRAZOS DEL SERVOMECANISMO

Figura 17: Diagrama de cuerpo libre.



Fuente Autor

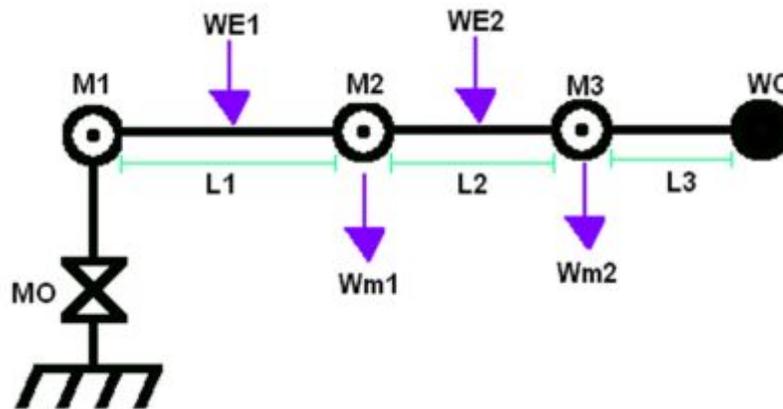
Figura 18: Área de trabajo.



Fuente Autor

En la siguiente figura [19], se observa el diagrama de fuerza del brazo electromecánico copiadore

Figura 19: Diagrama de fuerza.



Fuente Autor

En los siguientes datos son las medidas y pesos reales que tiene el segundo brazos que son:

- L_1 : 20 cm = longitud de la articulación.
- L_2 : 15 cm = longitud de la articulación.
- L_3 : 10 cm = longitud de la articulación.
- W_c : 500gramos = peso del mandril o la punta del brazo.
- W_{E1} : 0.09 kilogramos = Eslabón.
- W_{E2} : 0.07kilogramos =Eslabón.
- W_{m1} y W_{m2} : 0.09 kilogramos= Articulado.

4.2.1 CÁLCULOS MECÁNICOS DEL SERVOMECANISMO

4.2.1.1 CARGAS EN EL MECANISMO

En los siguientes cálculos se hallaran las fuerzas y los torque necesarios para encontrar los motores que necesita el servomecanismo.

Ya que el mandril debe tener un peso de 500 gramos más los pesos de los eslabones y articulaciones, esas masas se pasan a fuerzas, con la siguiente Ecuación [1].

$$F=m*g \quad \text{Ec.(1)}$$

Masa:

W_{E1} : 0.09 kilogramos ← Eslabon₁

W_{E2} y W_{E3} : 0.07 kilogramos ← Eslabon_{2y3}

W_{m1} y W_{m2} : 0.09 kilogramos ← Articulaciones

W_c : 0.5 kilogramos ← mandril

$$F_{E1} = 0.09\text{kg} * 9.81\text{m/s}^2$$

$$\mathbf{F_{E1} = 0.882N}$$

$$F_{E2y3} = 0.07\text{kg} * 9.81\text{m/s}^2$$

$$\mathbf{F_{E2y3} = 0.686N}$$

$$F_{m1ym2} = 0.09\text{kg} * 9.81\text{m/s}^2$$

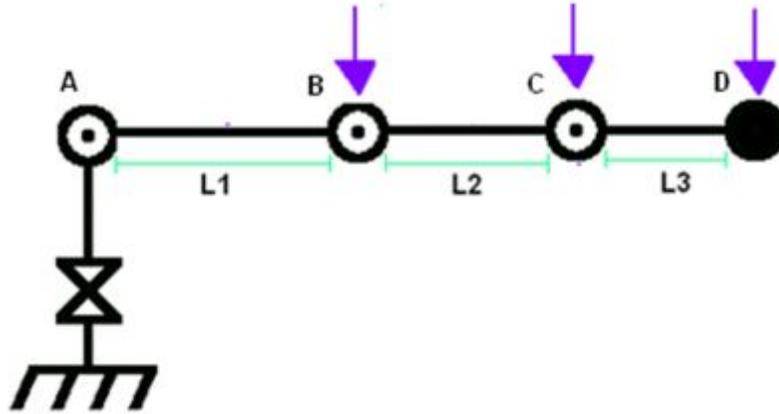
$$\mathbf{F_{m1ym2} = 0.882N}$$

$$F_c = 0.5\text{kg} * 9.81\text{m/s}^2$$

$$\mathbf{F_c = 4.91N}$$

4.2.2 CÁLCULOS DE MOMENTO Y FLEXION DEL BRAZO ROBOTICO

Figura 20: Brazo de tres extremidades

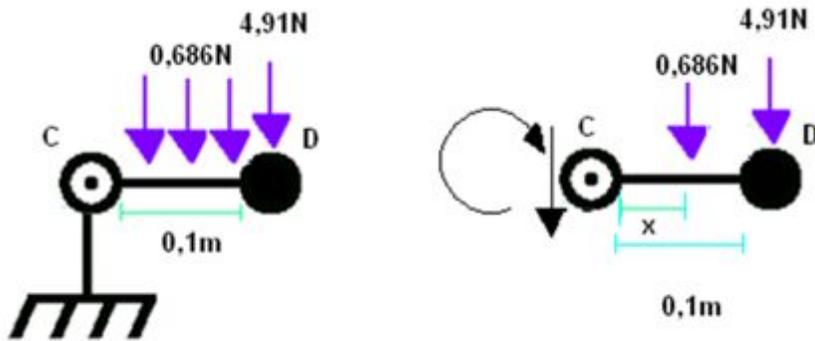


Fuente: Autor

0°GRADOS

Eslabón C-D

Figura 21: Carga distribuida en C-D



Fuente: Autor

Carga distribuida

La carga del peso del eslabón C-D tiene un peso en su longitud de los 0,1m. Lo que se hace es poner la carga en el centro del eslabón C-D

$$W=0,686\text{N}\cdot 0,1\text{m}$$
$$\mathbf{W=0,0686\text{N}}$$

$$\sum F=0$$
$$-V-0,686\text{N}-4,91\text{N}$$
$$\mathbf{V=4,98\text{N}}$$

$$\sum M=0$$
$$-M-(0,686\text{N}\cdot 0,05\text{m})-(4,91\text{N}\cdot 0,1\text{m})=0$$
$$\mathbf{M=-0,4944\text{Nm}}$$

$$\sigma_{\max}=\frac{M \cdot C}{I}Ec.(2)$$

$$I=\frac{1}{2}b \cdot h^3Ec.(3)$$

$$I=\frac{1}{2}(0,003\text{m}) \cdot (0,03\text{m})^3$$

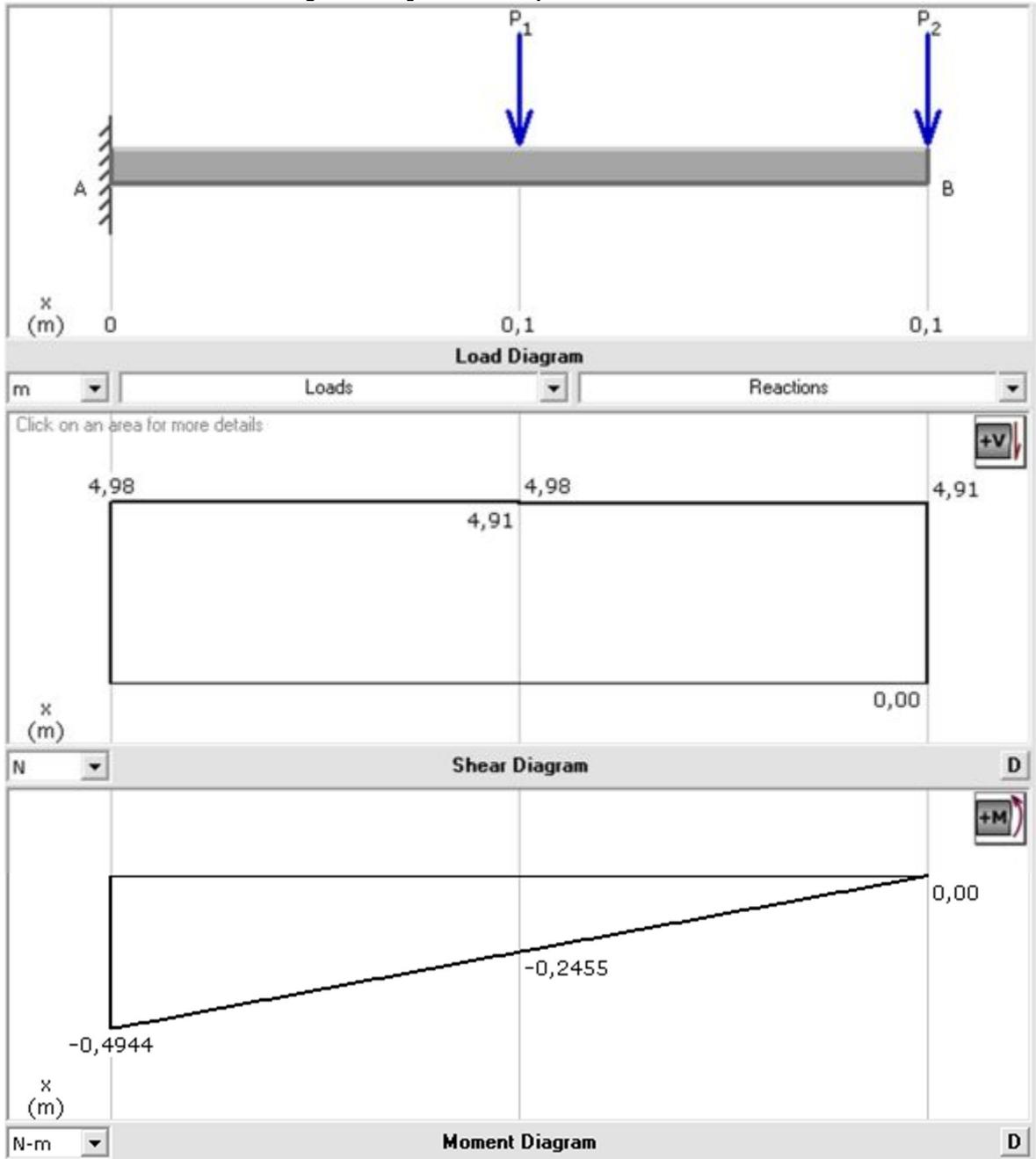
$$\mathbf{I=6,75 \times 10^{-9} \text{m}^4}$$

$$\sigma_{\max}=\frac{(0,4944\text{Nm}) \cdot (0,015\text{m})}{6,75 \times 10^{-9}}$$

$$\mathbf{\sigma_{\max}=1,10\text{Mpa}}$$

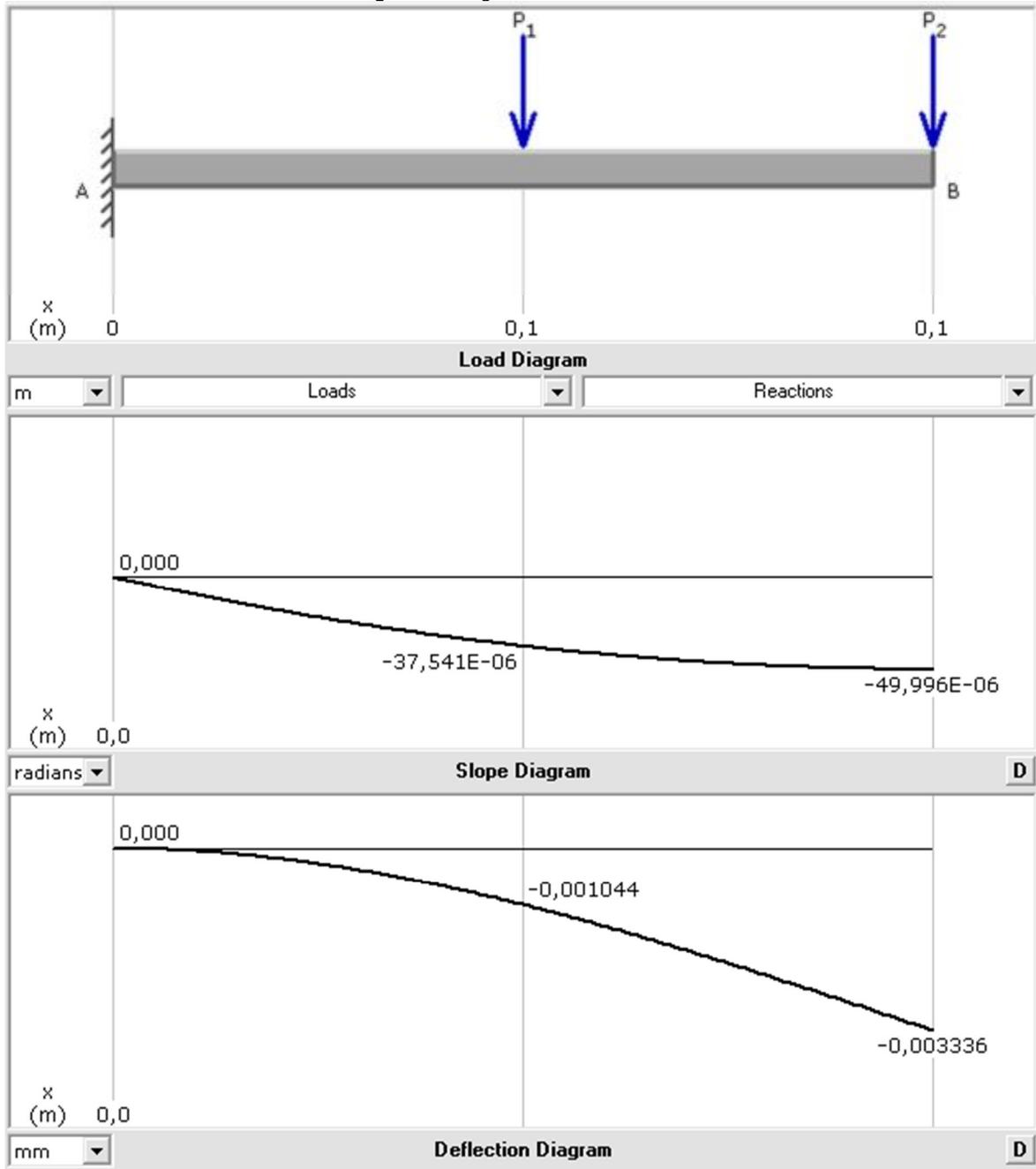
En la siguientes 3 graficas se puedo observar lo datos calculados anterior mente y el comportamiento del eslabón C-D. Realizados por el software llamado Mdsolid y una tabla con los datos calculados por el software

Figura22: Diagrama cortante y momento flector



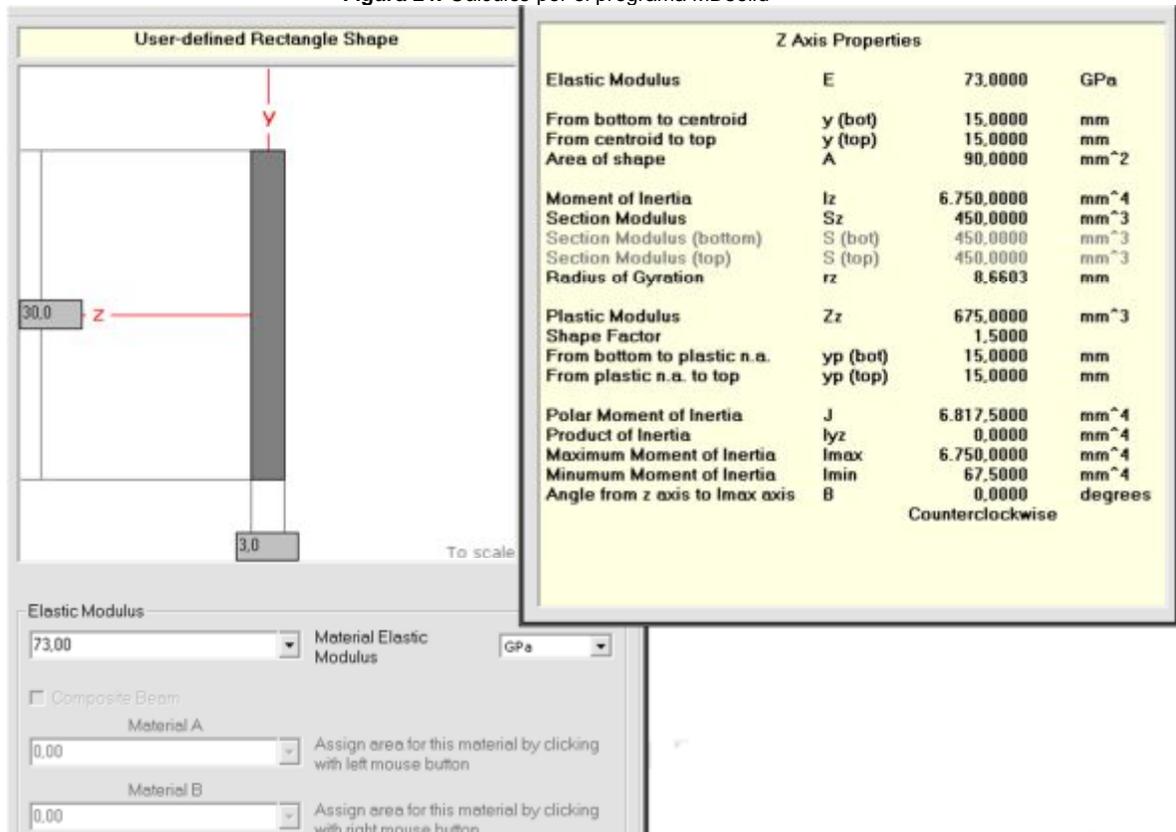
Fuente: Autor

Figura 23: Diagrama de flexión



Fuente: Autor

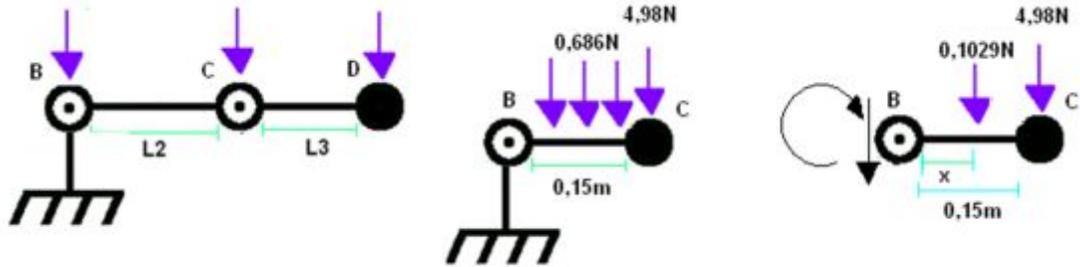
Figura 24: Cálculos por el programa MDsolid



Fuente: Autor

Eslabón B-C-D

Figura 25: Carga distribuida en B-C-D



Fuente: Autor

Carga distribuida

La carga del peso del eslabón B-C tiene un peso en su longitud de los 0,15m. Lo que se hace es poner la carga en el centro del eslabón B-C

$$W = 0,686\text{N} \cdot 0,15\text{m}$$

$$W = 0,1029\text{N}$$

$$\sum F = 0$$

$$-V - 0,1029\text{N} - 4,98\text{N}$$

$$V = 5,08\text{N}$$

$$\sum M = 0$$

$$-M - (0,1029\text{N} \cdot 0,075\text{m}) - (4,98\text{N} \cdot 0,15\text{m}) = 0$$

$$M = -0,7547\text{Nm}$$

$$\sigma_{\max} = \frac{M \cdot C}{I}$$

$$I = \frac{1}{2} b \cdot h^3$$

$$I = \frac{1}{2} (0,03\text{m}) \cdot (0,003\text{m})^3$$

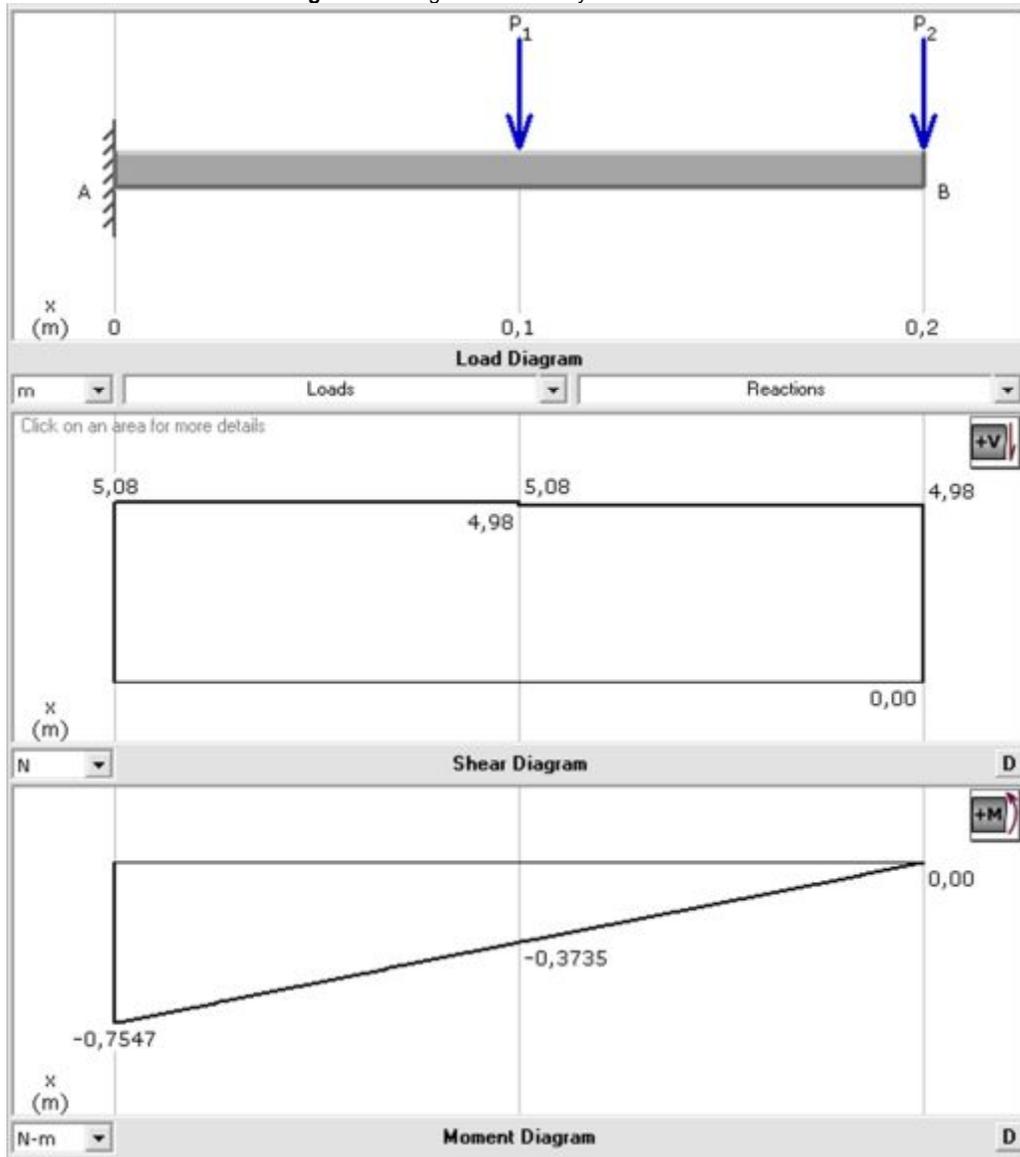
$$I = 67,5 \times 10^{-12} \text{m}^4$$

$$\sigma_{\max} = \frac{(0,7545\text{Nm}) \cdot (0,015\text{m})}{67,5 \times 10^{-12}}$$

$$\sigma_{\max} = 168\text{Mpa}$$

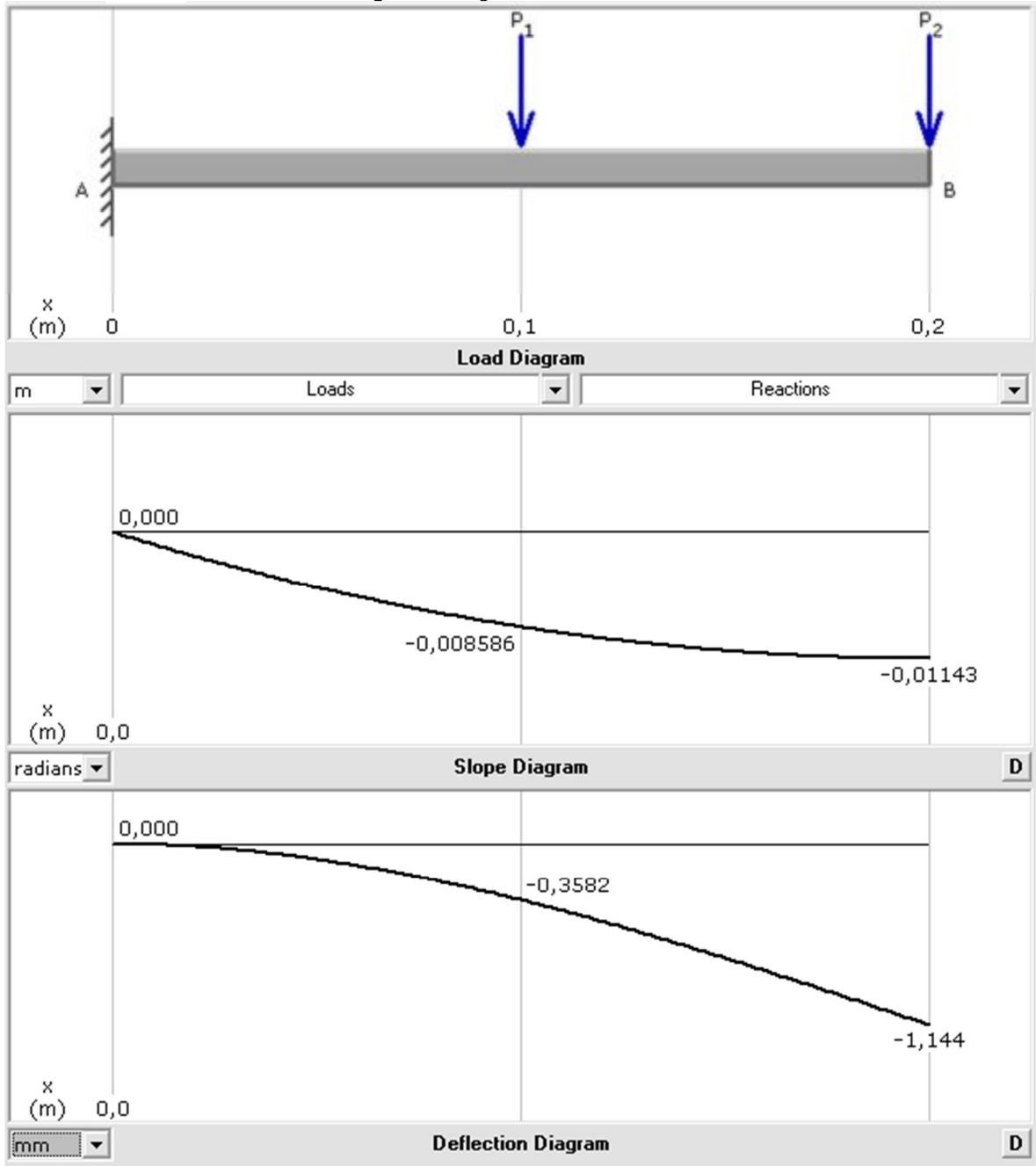
En las siguientes 3 graficas se puede observar los datos calculados anteriormente y el comportamiento del eslabón B-C. Realizadas por el software llamado Mdsolid y una tabla con los datos calculados por el software

Figura 26: Diagrama cortante y momento flector



Fuente: Autor

Figura 27: Diagrama de flexión



Fuente: Autor

Figura 28: Cálculos por el programa MDSolid

User-defined Rectangle Shape

Dimensions: 30.0 (width), 3.0 (height)

Elastic Modulus: 73.00 GPa

Composite Beam

Material A: 0.00 (Assign area for this material by clicking with left mouse button)

Material B: 0.00 (Assign area for this material by clicking with right mouse button)

Z Axis Properties

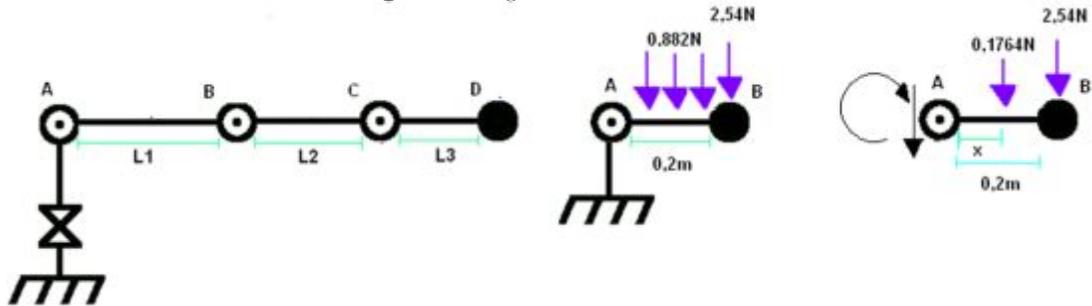
Elastic Modulus	E	73,0000	GPa
From bottom to centroid	y (bot)	1,5000	mm
From centroid to top	y (top)	1,5000	mm
Area of shape	A	90,0000	mm ²
Moment of Inertia	Iz	67,5000	mm ⁴
Section Modulus	Sz	45,0000	mm ³
Section Modulus (bottom)	S (bot)	45,0000	mm ³
Section Modulus (top)	S (top)	45,0000	mm ³
Radius of Gyration	rz	0,8660	mm
Plastic Modulus	Zz	67,5000	mm ³
Shape Factor		1,5000	
From bottom to plastic n.a.	yp (bot)	1,5000	mm
From plastic n.a. to top	yp (top)	1,5000	mm
Polar Moment of Inertia	J	6,817,5000	mm ⁴
Product of Inertia	Iyz	0,0000	mm ⁴
Maximum Moment of Inertia	I _{max}	6,750,0000	mm ⁴
Minimum Moment of Inertia	I _{min}	67,5000	mm ⁴
Angle from z axis to I _{max} axis	B	0,0000	degrees

Buttons: Circle, Compute

Fuente: Autor

Eslabón A-B-C-D

Figura 29: Carga distribuida en A-B-C-D



Fuente: Autor

Carga distribuida

La carga del peso del eslabón A-B tiene un peso en su longitud de los 0,2m. Lo que se hace es poner la carga en el centro del eslabón A-B

$$W = 0,882 \text{ N} \cdot 0,2 \text{ m}$$

$$W = 0,1764 \text{ N}$$

$$\sum F = 0$$

$$-V - 0,1764 \text{ N} - 2,54 \text{ N}$$

$$V = 2,72 \text{ N}$$

$$\sum M = 0$$

$$-M - (0,1764 \text{ N} \cdot 0,1 \text{ m}) - (2,54 \text{ N} \cdot 0,2 \text{ m}) = 0$$

$$M = -0,525 \text{ Nm}$$

$$\sigma_{\max} = \frac{M \cdot C}{I}$$

$$I = \frac{1}{2} b \cdot h^3$$

$$I = \frac{1}{2} (0,003 \text{ m}) \cdot (0,03 \text{ m})^3$$

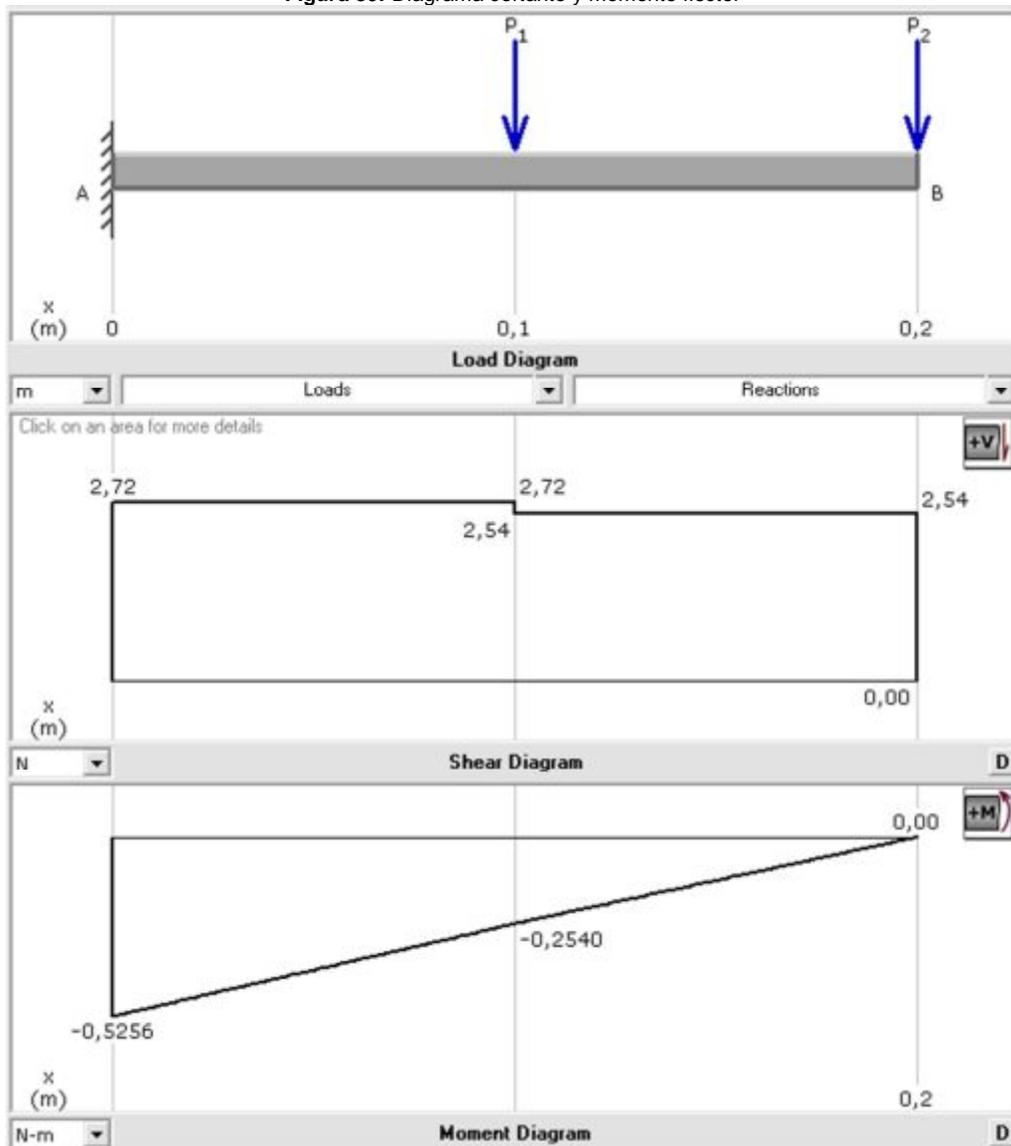
$$I = 6,75 \times 10^{-9} \text{ m}^4$$

$$\sigma_{\max} = \frac{(0,525\text{Nm}) \cdot (0,015\text{m})}{6,75 \times 10^{-9}}$$

$$\sigma_{\max} = 1,17\text{Mpa}$$

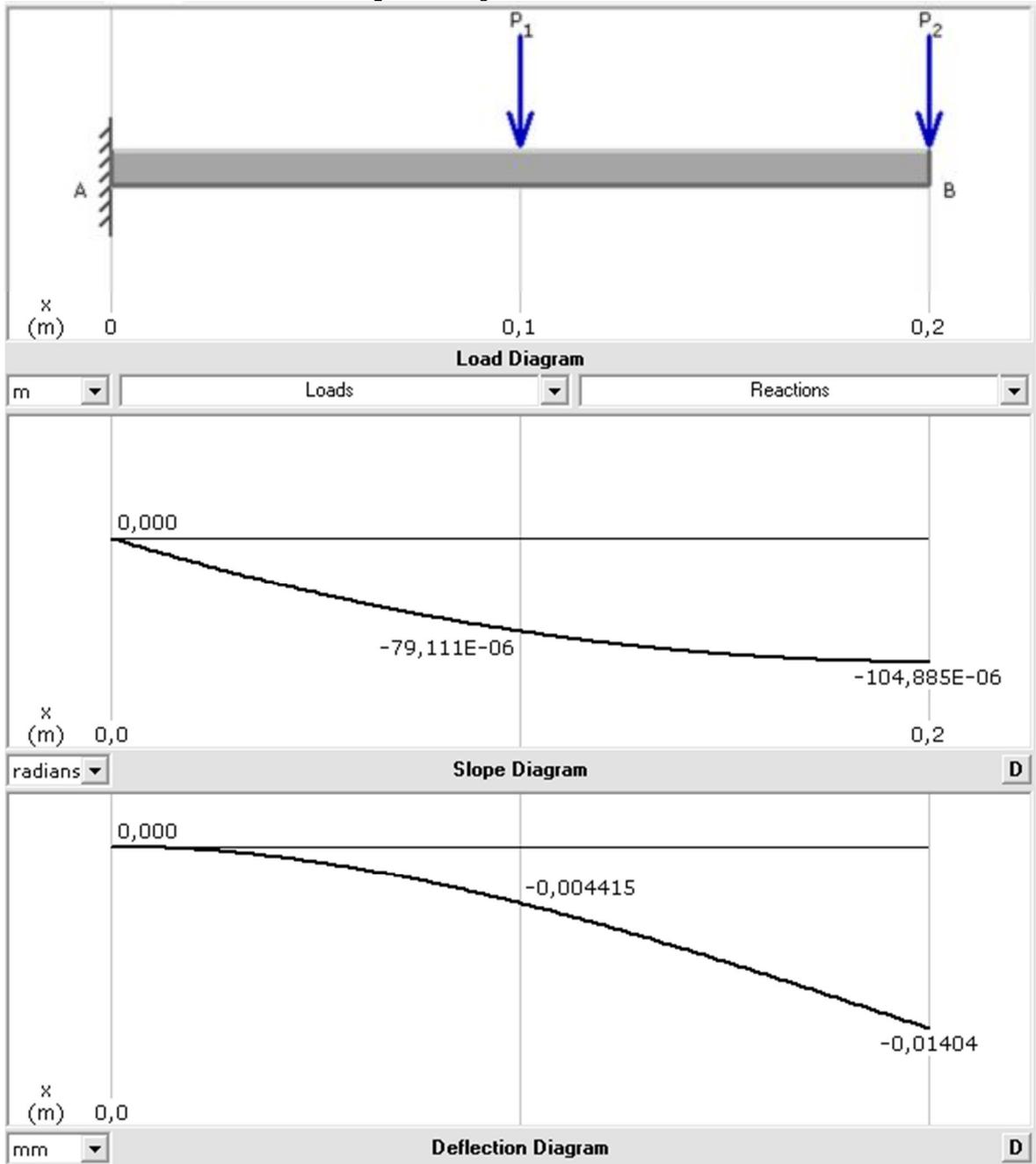
En las siguientes 3 gráficas se puede observar los datos calculados anteriormente y el comportamiento del eslabón A-B. Realizados por el software llamado Mdsolid y una tabla con los datos calculados por el software

Figura 30: Diagrama cortante y momento flector



Fuente: Autor

Figura 31: Diagrama de flexión



Fuente: Autor

Figura 32: Cálculos por el programa MDsolid

User-defined Rectangle Shape

To scale

Elastic Modulus
 Material Elastic Modulus

Composite Beam

Material A Assign area for this material by clicking with left mouse button

Material B Assign area for this material by clicking with right mouse button

Z Axis Properties

Elastic Modulus	E	73.0000	GPa
From bottom to centroid	y (bot)	15.0000	mm
From centroid to top	y (top)	15.0000	mm
Area of shape	A	90.0000	mm ²
Moment of Inertia	Iz	6.750.0000	mm ⁴
Section Modulus	Sz	450.0000	mm ³
Section Modulus (bottom)	S (bot)	450.0000	mm ³
Section Modulus (top)	S (top)	450.0000	mm ³
Radius of Gyration	rz	8.6603	mm
Plastic Modulus	Zz	675.0000	mm ³
Shape Factor		1.5000	
From bottom to plastic n.a.	yp (bot)	15.0000	mm
From plastic n.a. to top	yp (top)	15.0000	mm
Polar Moment of Inertia	J	6.817.5000	mm ⁴
Product of Inertia	Iyz	0.0000	mm ⁴
Maximum Moment of Inertia	I _{max}	6.750.0000	mm ⁴
Minimum Moment of Inertia	I _{min}	67.5000	mm ⁴
Angle from z axis to I_{max} axis	B	0.0000	degrees

Counterclockwise

Fuente: Autor

45° grados

Eslabón C-D

Para los cálculos de los eslabones con grados que no sean cero cambian, ya que toca calcular la fuerza equivalente y las distancia equivalente

Se tiene el ángulo α este ángulo se tomo por criterio del diseñador pero se puede tomar cualquier ángulo de los 0° a los 90° .

Fuerza equivalente

Se calcula la fuerza equivalente por Pitágoras, ya que se tienes el ángulo α pero no conocemos el ángulo θ .

$$\begin{aligned}\theta &= 90^\circ - \alpha \\ \theta &= 90^\circ - 45^\circ \\ \theta &= 45^\circ\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}F_{\text{equi}} &= 4,91\text{N} * \text{sen}(45^\circ) \\ F_{\text{equi}} &= 3,19\text{N}\end{aligned}$$

Distancia equivalente

Se calcula la distancia en la base porque la distancia de del eslabón esta en los 45° , entonces se allá por Pitágoras la distancia de al baje porque los $0,1\text{m}$ esta ahora ubicado en la hipotenusa.

$$\begin{aligned}X_{\text{equi}} &= 0,1\text{m} * \text{cos}(45^\circ) \\ X_{\text{equi}} &= 0,0760\text{m}\end{aligned}$$

Carga distribuida

La carga del peso del eslabón C-D tienes un peso en su longitud de los $0,1\text{m}$. Lo que se hace es poner la carga en el centro del eslabón C-D.

$$\begin{aligned}W &= 0,686\text{N} * 0,0760\text{m} \\ W &= 0,0521\text{N}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sum F &= 0 \\ -V - 0,0521N - 3,19N \\ \mathbf{V} &= \mathbf{3,24N}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sum M &= 0 \\ -M - (0,0521N * 0,038m) - (3,19N * 0,0760m) &= 0 \\ \mathbf{M} &= \mathbf{-0,2450Nm}\end{aligned}$$

$$\sigma_{\max} = \frac{M * C}{I}$$

$$I = \frac{1}{2} b * h^3$$

$$I = \frac{1}{2} (0,003m) * (0,03m)^3$$

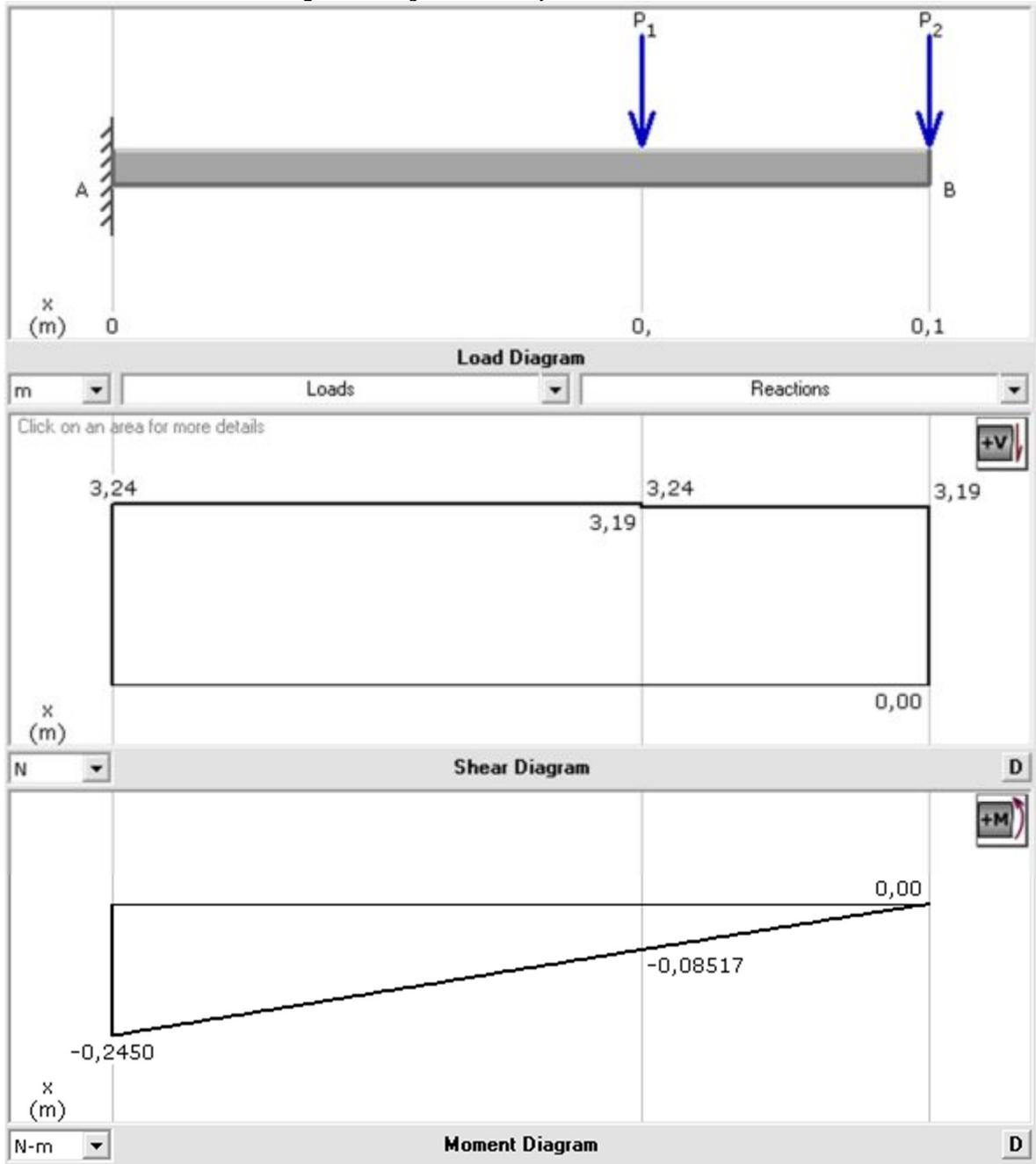
$$\mathbf{I = 6,75 \times 10^{-9} m^4}$$

$$\sigma_{\max} = \frac{(0,2450Nm) * (0,015m)}{6,75 \times 10^{-9}}$$

$$\mathbf{\sigma_{\max} = 544Kpa}$$

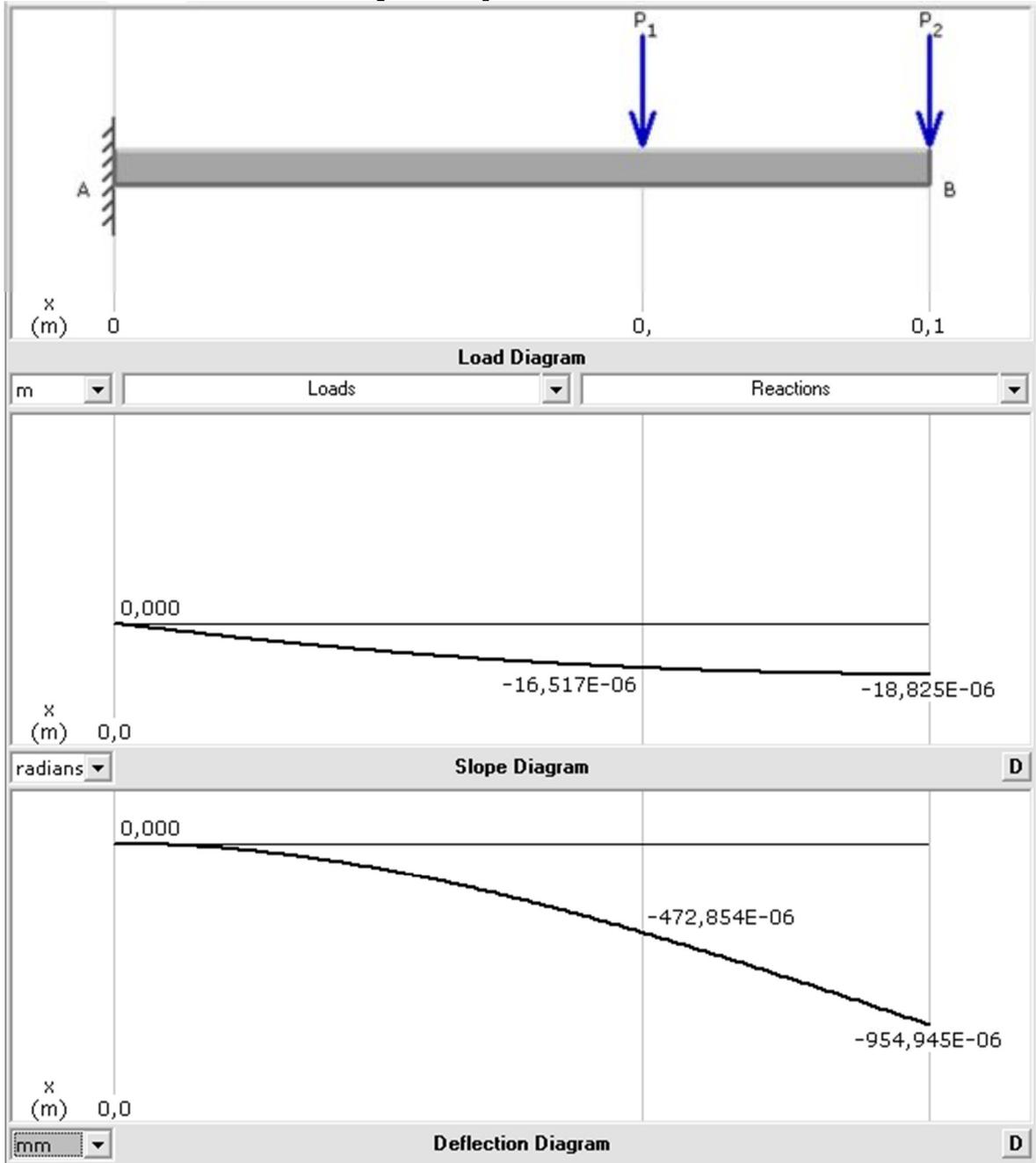
En las siguientes 3 gráficas se pueden observar los datos calculados anteriormente y el comportamiento del eslabón C-D. Realizados por el software llamado Mdsolid y una tabla con los datos calculados por el software

Figura 33: Diagrama cortante y momento flector



Fuente: Autor

Figura 34: Diagrama de flexión



Fuente: Autor

Figura 35: Cálculos por el programa MDsolid

User-defined Rectangle Shape

Diagram showing a vertical rectangle with a height of 30.0 and a width of 3.0. The Z-axis is horizontal and the Y-axis is vertical.

Z Axis Properties

Elastic Modulus	E	73.0000	GPa
From bottom to centroid	y (bot)	15.0000	mm
From centroid to top	y (top)	15.0000	mm
Area of shape	A	90.0000	mm ²
Moment of Inertia	Iz	6.750.0000	mm ⁴
Section Modulus	Sz	450.0000	mm ³
Section Modulus (bottom)	S (bot)	450.0000	mm ³
Section Modulus (top)	S (top)	450.0000	mm ³
Radius of Gyration	rz	8.6603	mm
Plastic Modulus	Zz	675.0000	mm ³
Shape Factor		1.5000	
From bottom to plastic n. a.	yp (bot)	15.0000	mm
From plastic n. a. to top	yp (top)	15.0000	mm
Polar Moment of Inertia	J	6.817.5000	mm ⁴
Product of Inertia	Iyz	0.0000	mm ⁴
Maximum Moment of Inertia	I _{max}	6.750.0000	mm ⁴
Minumum Moment of Inertia	I _{min}	67.5000	mm ⁴
Angle from z axis to I _{max} axis	θ	0.0000	degrees
		Counterclockwise	

Buttons: Circle, Compute, To scale

Elastic Modulus

73.00 Material Elastic Modulus GPa

Composite Beam

Material A: 0.00 Assign area for this material by clicking with left mouse button

Material B: 0.00 Assign area for this material by clicking with right mouse button

Fuente: Autor

Eslabón B-C-D

Para los cálculos de los eslabones con grados que no sean cero cambian, ya que toca calcular la fuerza equivalente y las distancia equivalente

Se tiene el ángulo α este ángulo se tomo por criterio del diseñador pero se puede tomar cualquier ángulo de los 0° a los 90° .

Fuerza equivalente

Se calcula la fuerza equivalente por Pitágoras, ya que se tienes el ángulo α pero no conocemos el ángulo θ .

$$\begin{aligned}\theta &= 90^\circ - \alpha \\ \theta &= 90^\circ - 45^\circ \\ \theta &= 45^\circ\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}F_{\text{equi}} &= 3,24\text{N} * \text{sen}(45^\circ) \\ \mathbf{F_{\text{equi}} = 2,10\text{N}}\end{aligned}$$

Distancia equivalente

Se calcula la distancia en la base porque la distancia de del eslabón esta en los 45° , entonces se allá por Pitágoras la distancia de al baje porque los $0,1\text{m}$ esta ahora ubicado en la hipotenusa.

$$\begin{aligned}X_{\text{equi}} &= 0,15\text{m} * \text{cos}(45^\circ) \\ \mathbf{X_{\text{equi}} = 0,1140\text{m}}\end{aligned}$$

Carga distribuida

La carga del peso del eslabón B-C tienes un peso en su longitud de los $0,15\text{m}$. Lo que se hace es poner la carga en el centro del eslabón B-C

$$\begin{aligned}W &= 0,686\text{N} * 0,1140\text{m} \\ \mathbf{W = 0,07820\text{N}}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum F &= 0 \\ -V - 0,07820\text{N} - 2,10\text{N} \\ \mathbf{V} &= \mathbf{2,18\text{N}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum M &= 0 \\ -M - (0,07820\text{N} * 0,057\text{m}) - (2,10\text{N} * 0,1140\text{m}) &= 0 \\ \mathbf{M} &= \mathbf{-0,2438\text{Nm}} \end{aligned}$$

$$\sigma_{\max} = \frac{M * C}{I}$$

$$I = \frac{1}{2} b * h^3$$

$$I = \frac{1}{2} (0,03\text{m}) * (0,003\text{m})^3$$

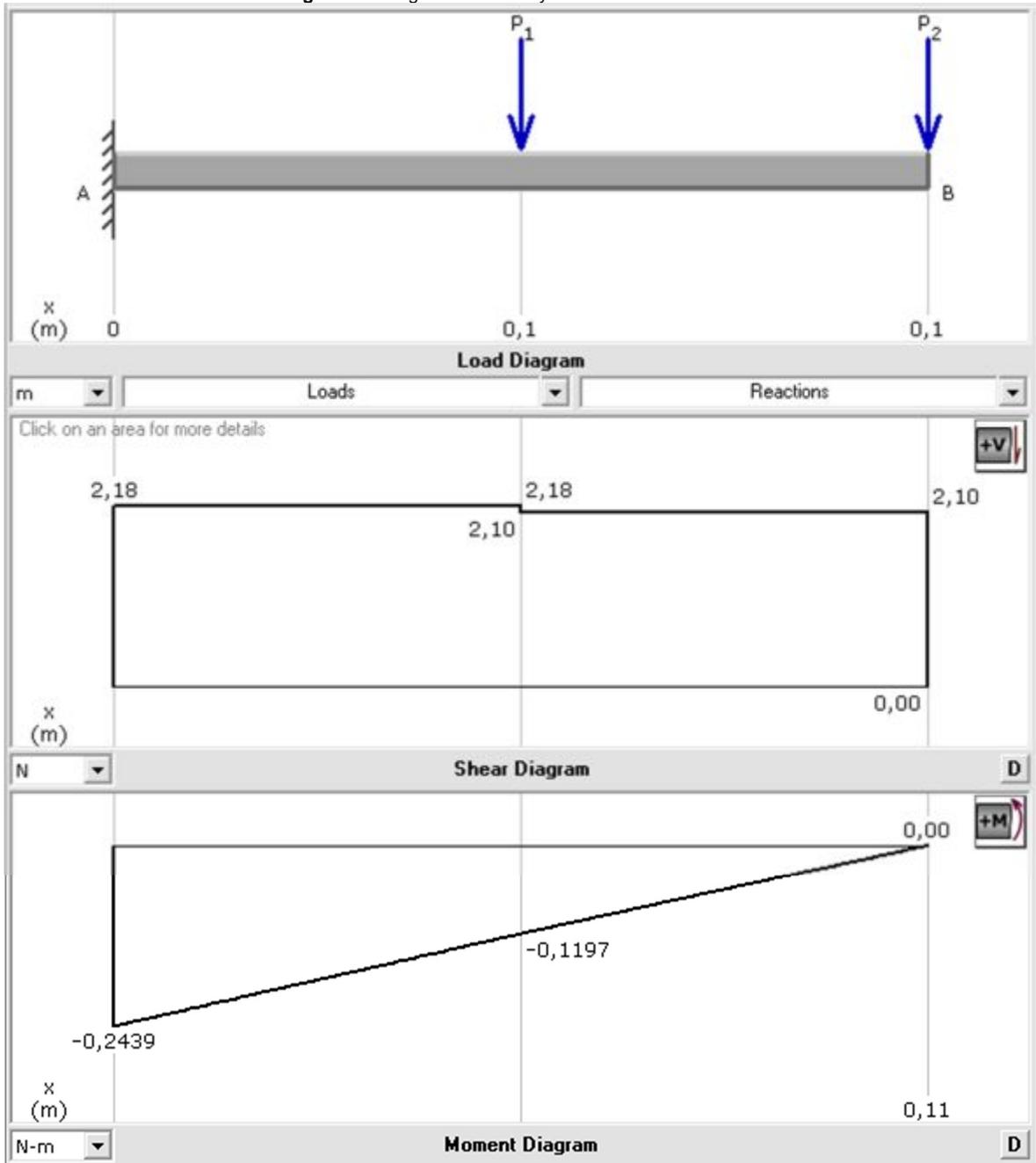
$$\mathbf{I = 67,5 \times 10^{-12} \text{m}^4}$$

$$\sigma_{\max} = \frac{(0,2438\text{Nm}) * (0,015\text{m})}{67,5 \times 10^{-12}}$$

$$\mathbf{\sigma_{\max} = 54,2\text{Mpa}}$$

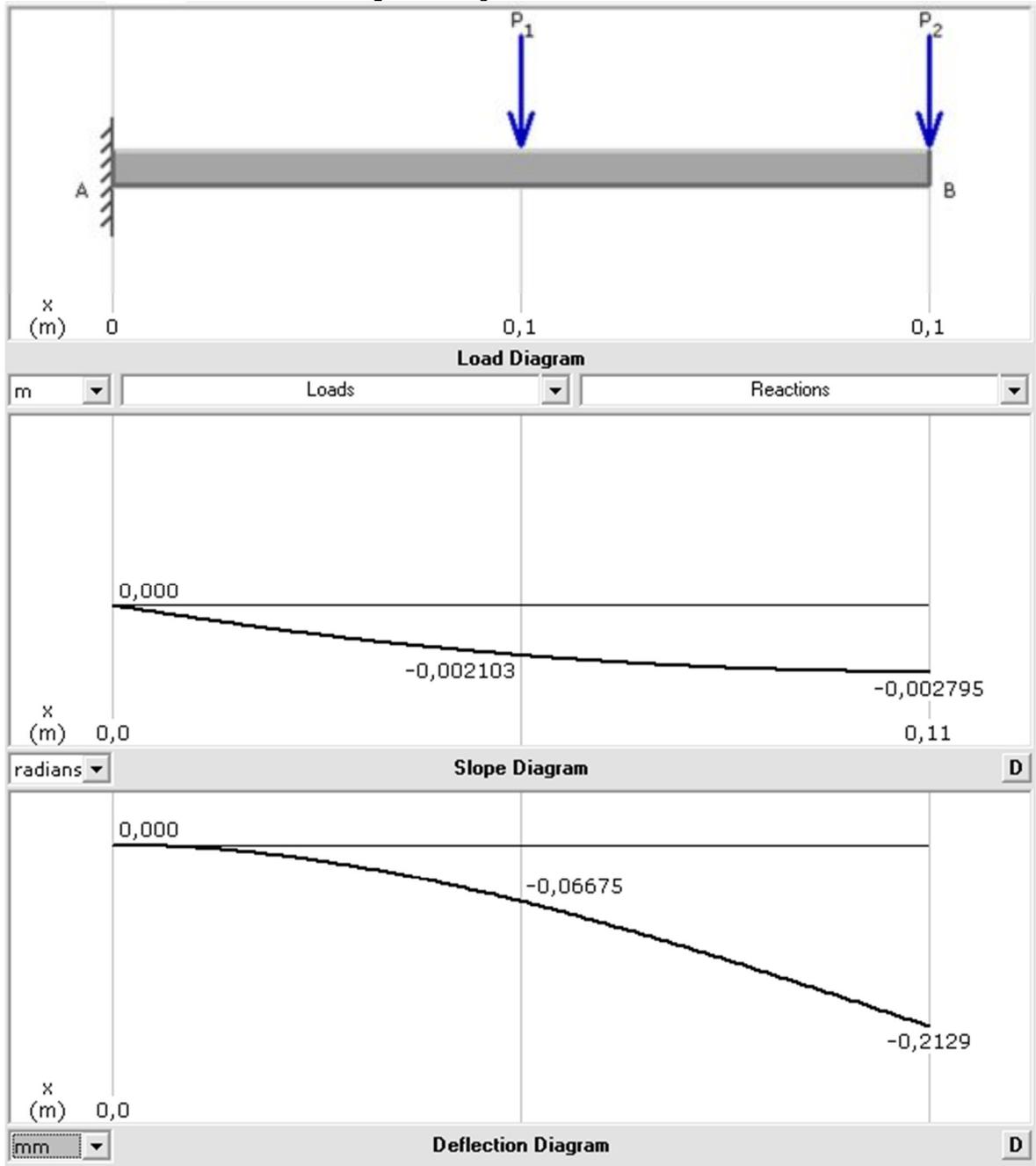
En la siguientes 3 graficas se puedo observar lo datos calculados anterior mente y el comportamiento del eslabón B-C. Realizados por el software llamado Mdsolid y una tabla con los datos calculados por el software

Figura 36: Diagrama cortante y momento flector



Fuente: Autor

Figura 37: Diagrama de flexión



Fuente: Autor

Figura 38: Cálculos por el programa MDsolid

User-defined Rectangle Shape

Diagram showing a rectangle with a width of 30.0 and a height of 3.0. The Z-axis is vertical, and the Y-axis is horizontal.

Z Axis Properties

Elastic Modulus	E	73,0000	GPa
From bottom to centroid	y (bot)	1,5000	mm
From centroid to top	y (top)	1,5000	mm
Area of shape	A	90,0000	mm ²
Moment of Inertia	Iz	67,5000	mm ⁴
Section Modulus	Sz	45,0000	mm ³
Section Modulus (bottom)	S (bot)	45,0000	mm ³
Section Modulus (top)	S (top)	45,0000	mm ³
Radius of Gyration	rz	0,8660	mm
Plastic Modulus	Zz	67,5000	mm ³
Shape Factor		1,5000	
From bottom to plastic n.a.	yp (bot)	1,5000	mm
From plastic n.a. to top	yp (top)	1,5000	mm
Polar Moment of Inertia	J	6.817,5000	mm ⁴
Product of Inertia	Iyz	0,0000	mm ⁴
Maximum Moment of Inertia	I _{max}	6.750,0000	mm ⁴
Minimum Moment of Inertia	I _{min}	67,5000	mm ⁴
Angle from z axis to I _{max} axis	θ	0,0000	degrees
			Counterclockwise

Buttons: Circle, Compute

Elastic Modulus: 73.00 Material Elastic Modulus: GPa

Composite Beam

Material A: 0,00 Assign area for this material by clicking with left mouse button

Material B: 0,00 Assign area for this material by clicking with right mouse button

Fuente: Autor

Eslabón A-B-C-D

Para los cálculos de los eslabones con grados que no sean cero cambian, ya que toca calcular la fuerza equivalente y la distancia equivalente

Se tiene el ángulo α este ángulo se toma por criterio del diseñador pero se puede tomar cualquier ángulo de los 0° a los 90° .

Fuerza equivalente

Se calcula la fuerza equivalente por Pitágoras, ya que se tienen el ángulo α pero no conocemos el ángulo θ .

$$\begin{aligned}\theta &= 90^\circ - \alpha \\ \theta &= 90^\circ - 45^\circ \\ \theta &= 45^\circ\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}F_{\text{equi}} &= 1,09\text{N} \cdot \sin(45^\circ) \\ F_{\text{equi}} &= 0,70\text{N}\end{aligned}$$

Distancia equivalente

Se calcula la distancia en la base porque la distancia del eslabón está en los 45° , entonces se usa Pitágoras la distancia de la base porque los $0,2\text{m}$ está ahora ubicado en la hipotenusa.

$$\begin{aligned}X_{\text{equi}} &= 0,2\text{m} \cdot \cos(45^\circ) \\ X_{\text{equi}} &= 0,1520\text{m}\end{aligned}$$

Carga distribuida

La carga del peso del eslabón A-B tiene un peso en su longitud de los $0,2\text{m}$. Lo que se hace es poner la carga en el centro del eslabón A-B.

$$\begin{aligned}W &= 0,882\text{N} \cdot 0,1520\text{m} \\ W &= 0,1340\text{N}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sum F &= 0 \\ -V - 0,1340\text{N} - 0,70\text{N} \\ \mathbf{V} &= \mathbf{0,834\text{N}}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sum M &= 0 \\ -M - (0,1340\text{N} * 0,076\text{m}) - (0,70\text{N} * 0,1520\text{m}) &= 0 \\ \mathbf{M} &= \mathbf{-0,1165\text{Nm}}\end{aligned}$$

$$\sigma_{\max} = \frac{M * C}{I}$$

$$I = \frac{1}{2} b * h^3$$

$$I = \frac{1}{2} (0,003\text{m}) * (0,03\text{m})^3$$

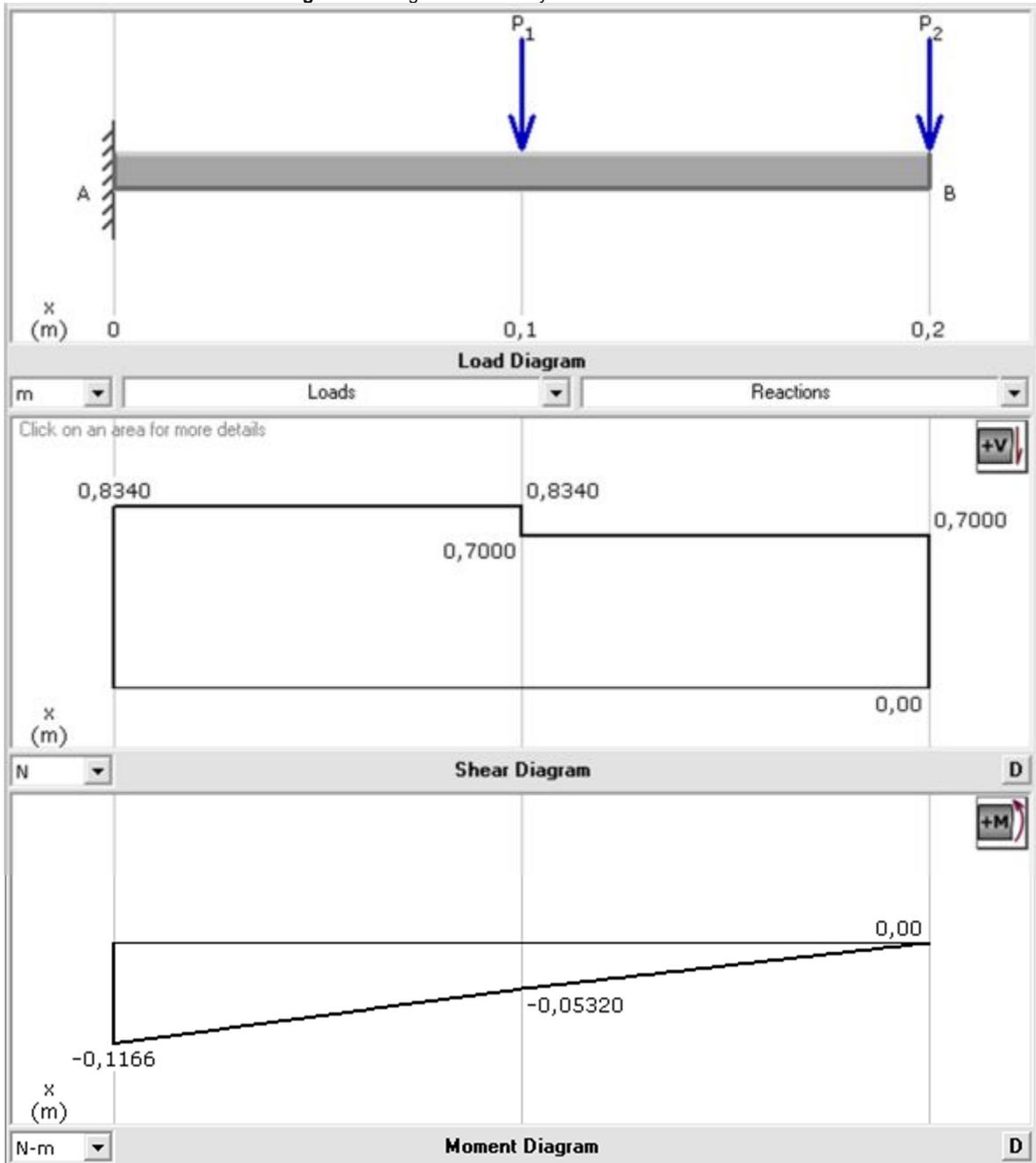
$$\mathbf{I = 6,75 \times 10^{-9} \text{m}^4}$$

$$\sigma_{\max} = \frac{(0,1165\text{Nm}) * (0,015\text{m})}{6,75 \times 10^{-9}}$$

$$\mathbf{\sigma_{\max} = 259\text{Kpa}}$$

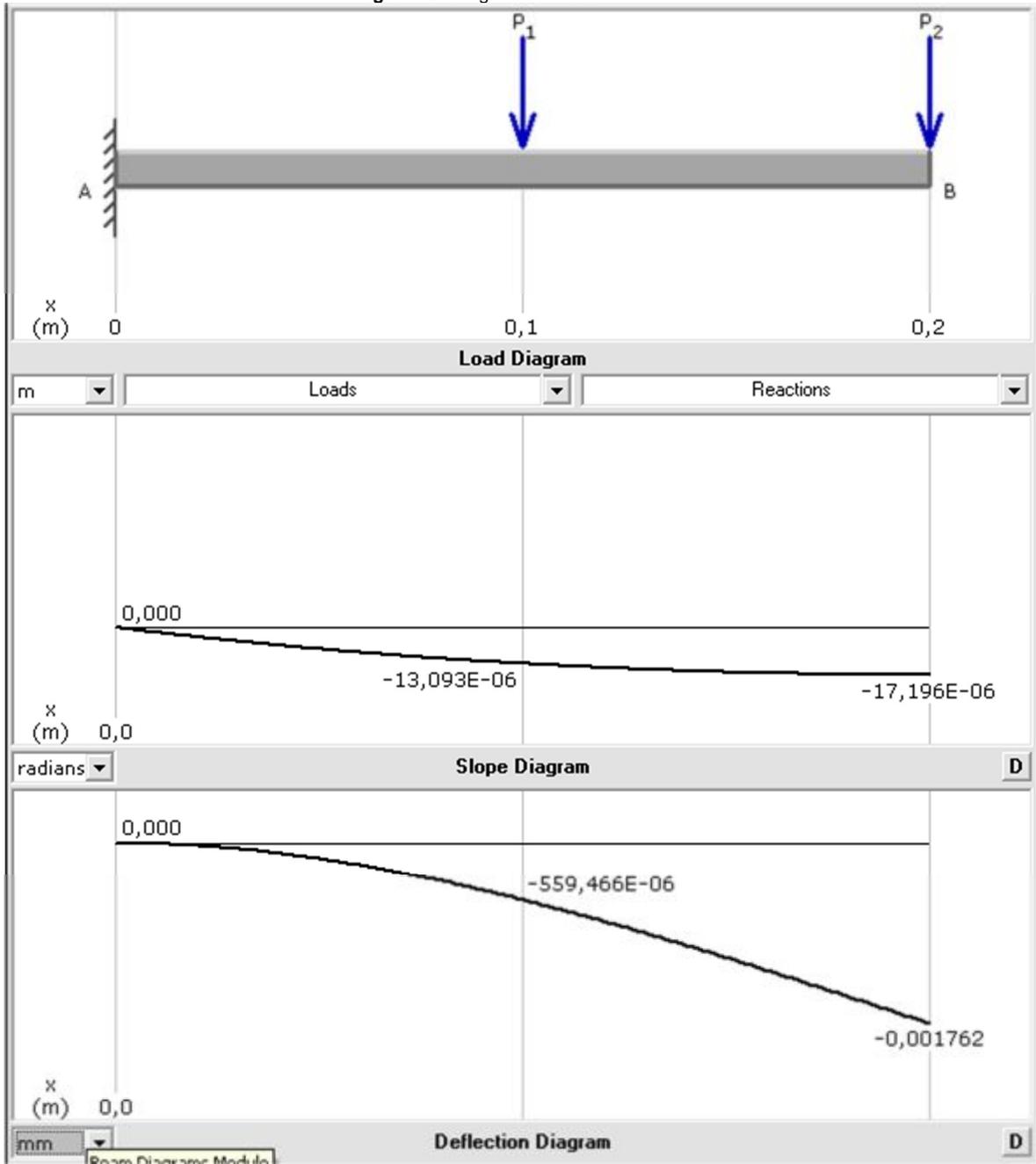
En las siguientes 3 gráficas se pueden observar los datos calculados anteriormente y el comportamiento del eslabón A-B. Realizados por el software llamado Mdsolid y una tabla con los datos calculados por el software

Figura 39: Diagrama cortante y momento flector



Fuente: Autor

Figura 40: Diagrama de flexión



Fuente: Autor

Figura 41: Cálculos por el programa MDsolid

The image shows the MDsolid software interface. On the left, a 'User-defined Rectangle Shape' is displayed with dimensions 30.0 (width) and 3.0 (height). A coordinate system with Y and Z axes is shown. On the right, a 'Z Axis Properties' table lists various mechanical properties. Below the diagram are buttons for 'Circle', 'Compute', and 'To scale'. At the bottom, there are input fields for 'Elastic Modulus' (73.00 GPa) and 'Composite Beam' options for Material A and Material B (both 0.00).

Z Axis Properties			
Elastic Modulus	E	73,0000	GPa
From bottom to centroid	y (bot)	15,0000	mm
From centroid to top	y (top)	15,0000	mm
Area of shape	A	90,0000	mm ²
Moment of Inertia	Iz	6,750,0000	mm ⁴
Section Modulus	Sz	450,0000	mm ³
Section Modulus (bottom)	S (bot)	450,0000	mm ³
Section Modulus (top)	S (top)	450,0000	mm ³
Radius of Gyration	rz	8,6603	mm
Plastic Modulus	Zz	675,0000	mm ³
Shape Factor		1,5000	
From bottom to plastic n.a.	yp (bot)	15,0000	mm
From plastic n.a. to top	yp (top)	15,0000	mm
Polar Moment of Inertia	J	6,817,5000	mm ⁴
Product of Inertia	Iyz	0,0000	mm ⁴
Maximum Moment of Inertia	I _{max}	6,750,0000	mm ⁴
Minimum Moment of Inertia	I _{min}	67,5000	mm ⁴
Angle from z axis to I _{max} axis	B	0,0000	degrees
		Counterclockwise	

Fuente: Autor

80° GRADOS

Eslabón C-D

Para los cálculos de los eslabones con grados que no sean cero cambian, ya que toca calcular la fuerza equivalente y las distancia equivalente

Se tiene el ángulo α este ángulo se tomo por criterio del diseñador pero se puede tomar cualquier ángulo de los 0° a los 90° .

Fuerza equivalente

Se calcula la fuerza equivalente por Pitágoras, ya que se tienes el ángulo α pero no conocemos el ángulo θ .

$$\theta = 90^\circ - \alpha$$

$$\theta = 90^\circ - 80^\circ$$

$$\theta = 10^\circ$$

$$F_{\text{equi}} = 4,91\text{N} * \text{sen}(10^\circ)$$

$$F_{\text{equi}} = 0,7680\text{N}$$

Distancia equivalente

Se calcula la distancia en la base porque la distancia de del eslabón esta en los 80° , entonces se allá por Pitágoras la distancia de al baje porque los $0,1\text{m}$ esta ahora ubicado en la hipotenusa.

$$X_{\text{equi}} = 0,1\text{m} * \text{cos}(80^\circ)$$

$$X_{\text{equi}} = 0,0309\text{m}$$

Carga distribuida

La carga del peso del eslabón C-D tienes un peso en su longitud de los $0,1\text{m}$. Lo que se hace es poner la carga en el centro del eslabón C-D.

$$W = 0,686\text{N} * 0,0309\text{m}$$

$$W = 0,0211\text{N}$$

$$\begin{aligned}\sum F &= 0 \\ -V - 0,0211\text{N} - 0,768\text{N} \\ \mathbf{V} &= \mathbf{0,7891\text{N}}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sum M &= 0 \\ -M - (0,0211\text{N} * 0,0154\text{m}) - (0,768\text{N} * 0,0309\text{m}) &= 0 \\ \mathbf{M} &= \mathbf{-0,0240\text{Nm}}\end{aligned}$$

$$\sigma_{\max} = \frac{M * C}{I}$$

$$I = \frac{1}{2} b * h^3$$

$$I = \frac{1}{2} (0,003\text{m}) * (0,03\text{m})^3$$

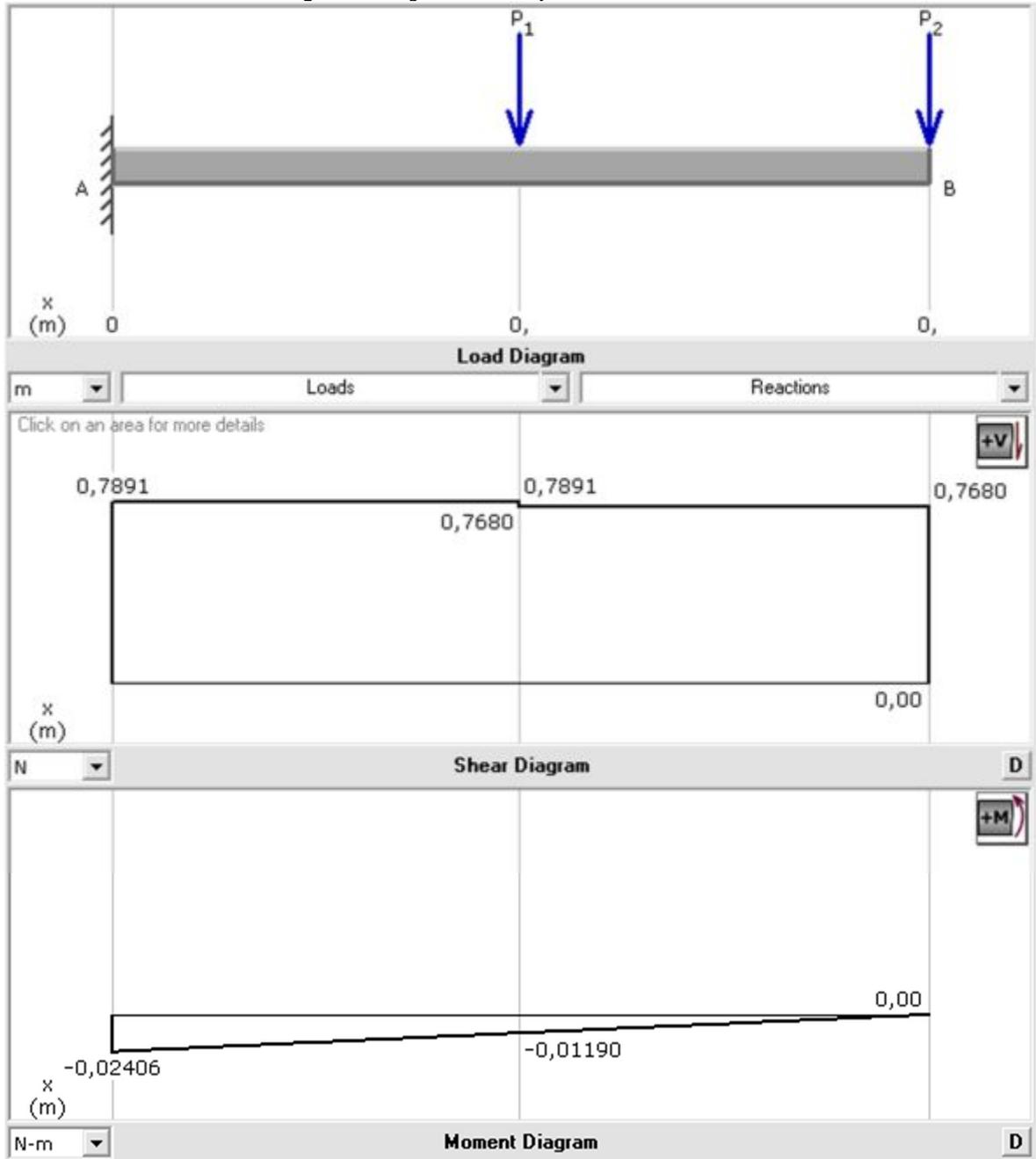
$$\mathbf{I = 6,75 * 10^{-9} m^4}$$

$$\sigma_{\max} = \frac{(0,0240\text{Nm}) * (0,015\text{m})}{6,75 * 10^{-9}}$$

$$\mathbf{\sigma_{\max} = 53,3\text{Kpa}}$$

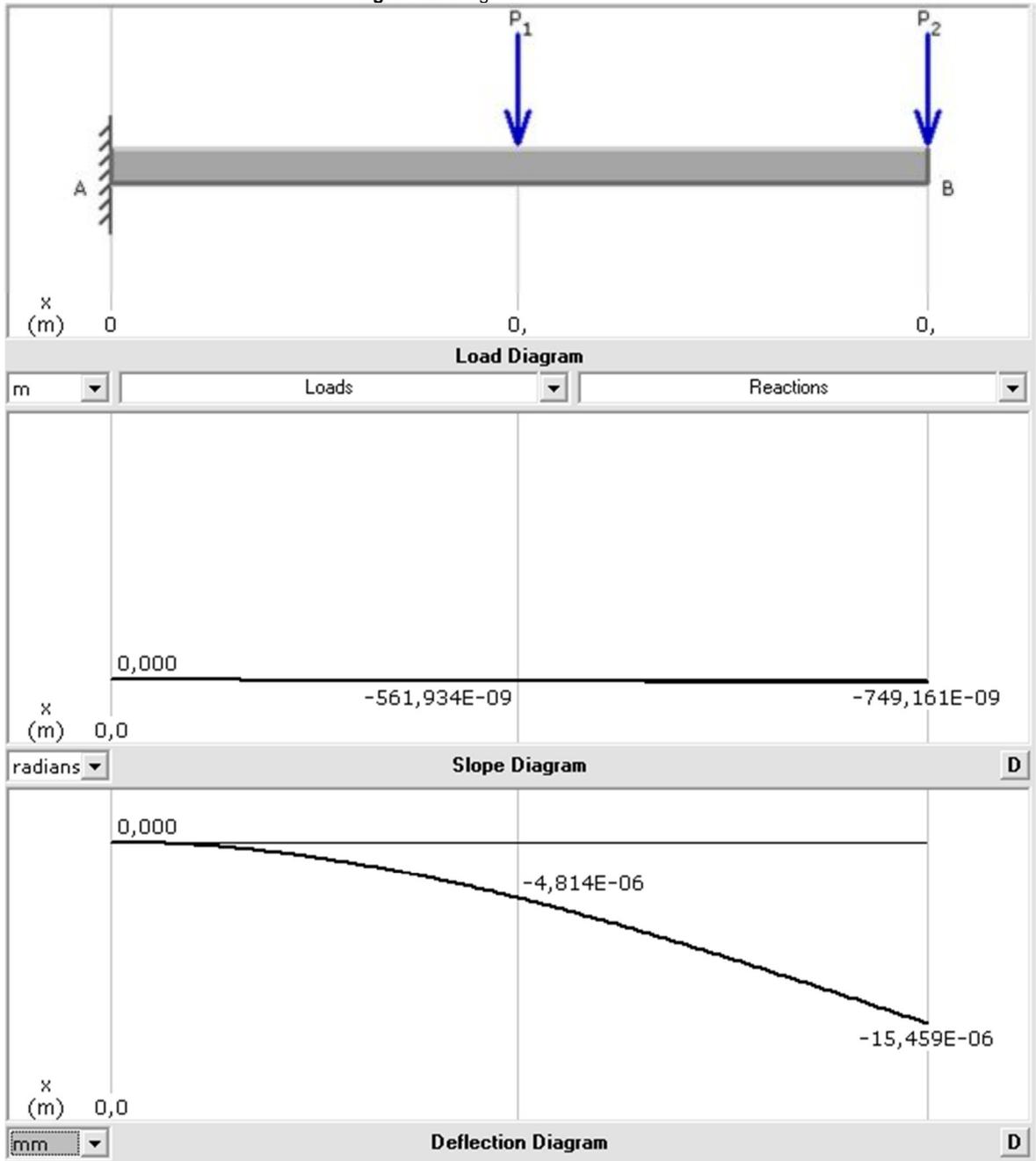
En las siguientes 3 gráficas se pueden observar los datos calculados anteriormente y el comportamiento del eslabón C-D. Realizados por el software llamado Mdsolid y una tabla con los datos calculados por el software

Figura 42: Diagrama cortante y momento flector



Fuente: Autor

Figura 43: Diagrama de flexión



Fuente: Autor

Figura 44: Cálculos por el programa MDSolid

The screenshot displays the MDSolid software interface for defining a rectangle shape and viewing its properties. The main window is titled "User-defined Rectangle Shape" and shows a vertical rectangle with a width of 30.0 and a height of 3.0. A coordinate system is shown with the Y-axis vertical and the Z-axis horizontal. The Z-axis is labeled with a value of 30.0. Below the main window, there are buttons for "Circle" and "Compute".

The "Z Axis Properties" panel on the right provides the following data:

Z Axis Properties			
Elastic Modulus	E	73,0000	GPa
From bottom to centroid	y (bot)	15,0000	mm
From centroid to top	y (top)	15,0000	mm
Area of shape	A	90,0000	mm ²
Moment of Inertia	Iz	6,750,0000	mm ⁴
Section Modulus	Sz	450,0000	mm ³
Section Modulus (bottom)	S (bot)	450,0000	mm ³
Section Modulus (top)	S (top)	450,0000	mm ³
Radius of Gyration	rz	8,6603	mm
Plastic Modulus	Zz	675,0000	mm ³
Shape Factor		1,5000	
From bottom to plastic n.a.	yp (bot)	15,0000	mm
From plastic n.a. to top	yp (top)	15,0000	mm
Polar Moment of Inertia	J	6,817,5000	mm ⁴
Product of Inertia	Iyz	0,0000	mm ⁴
Maximum Moment of Inertia	I _{max}	6,750,0000	mm ⁴
Minimum Moment of Inertia	I _{min}	67,5000	mm ⁴
Angle from z axis to I _{max} axis	θ	0,0000	degrees

Below the main window, there are input fields for material properties:

- Elastic Modulus: 73.00 (Material Elastic Modulus) GPa
- Composite Beam: (unchecked)
- Material A: 0.00 (Assign area for this material by clicking with left mouse button)
- Material B: 0.00 (Assign area for this material by clicking with right mouse button)

Fuente: Autor

Eslabón B-C-D

Para los cálculos de los eslabones con grados que no sean cero cambian, ya que toca calcular la fuerza equivalente y las distancia equivalente

Se tiene el ángulo α este ángulo se tomo por criterio del diseñador pero se puede tomar cualquier ángulo de los 0° a los 90° .

Fuerza equivalente

Se calcula la fuerza equivalente por Pitágoras, ya que se tienes el ángulo α pero no conocemos el ángulo θ .

$$\theta = 90^\circ - \alpha$$

$$\theta = 90^\circ - 80^\circ$$

$$\theta = 10^\circ$$

$$F_{\text{equi}} = 0,7891\text{N} * \text{sen}(45^\circ)$$

$$\mathbf{F_{\text{equi}} = 0,1234\text{N}}$$

Distancia equivalente

Se calcula la distancia en la base porque la distancia de del eslabón esta en los 80° , entonces se allá por Pitágoras la distancia de al baje porque los $0,1\text{m}$ esta ahora ubicado en la hipotenusa.

$$X_{\text{equi}} = 0,15\text{m} * \text{cos}(80^\circ)$$

$$\mathbf{X_{\text{equi}} = 0,0463\text{m}}$$

Carga distribuida

La carga del peso del eslabón B-C tienes un peso en su longitud de los $0,15\text{m}$. Lo que se hace es poner la carga en el centro del eslabón B-C

$$W = 0,686\text{N} * 0,0463\text{m}$$

$$\mathbf{W = 0,0317\text{N}}$$

$$\begin{aligned} \sum F &= 0 \\ -V - 0,0317N - 0,1234N \\ \mathbf{V} &= \mathbf{0,1551N} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum M &= 0 \\ -M - (0,0317N * 0,0231m) - (0,1234N * 0,0463m) &= 0 \\ \mathbf{M} &= \mathbf{-0,00644Nm} \end{aligned}$$

$$\sigma_{\max} = \frac{M * C}{I}$$

$$I = \frac{1}{2} b * h^3$$

$$I = \frac{1}{2} (0,03m) * (0,003m)^3$$

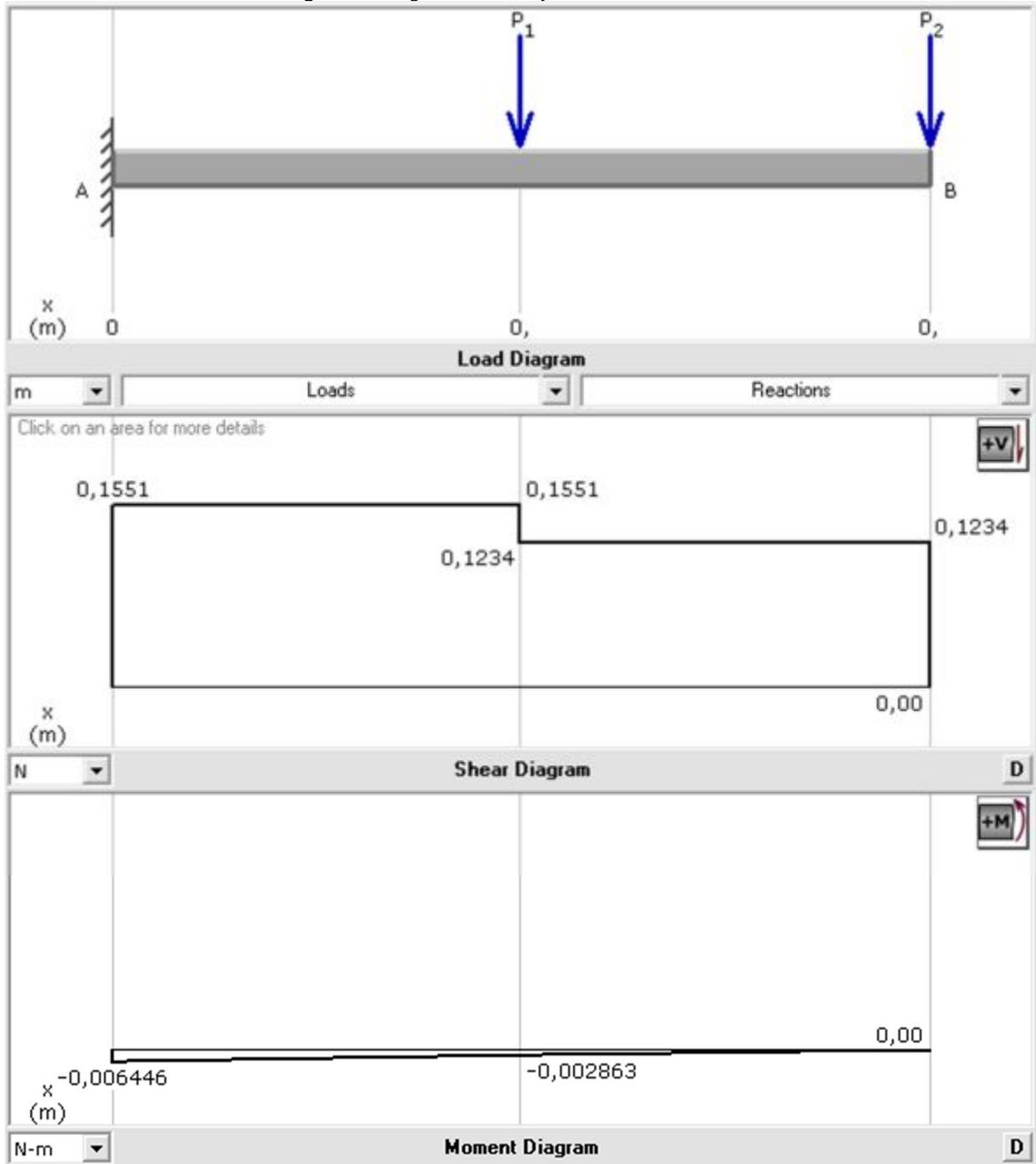
$$\mathbf{I = 67,5 \times 10^{-12} m^4}$$

$$\sigma_{\max} = \frac{(0,00644Nm) * (0,015m)}{67,5 \times 10^{-12}}$$

$$\mathbf{\sigma_{\max} = 1,43Mpa}$$

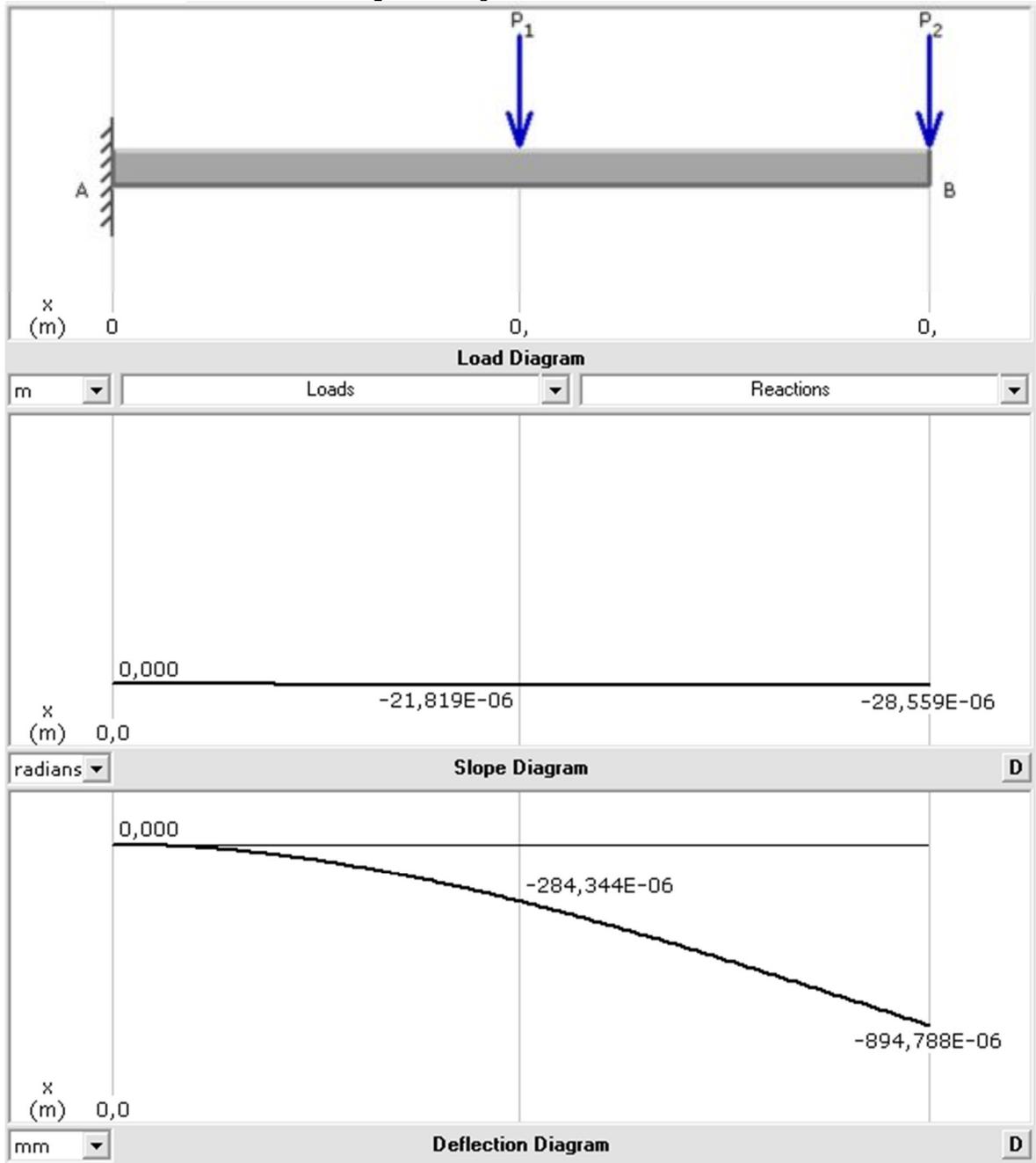
En la siguientes 3 graficas se puedo observar lo datos calculados anterior mente y el comportamiento del eslabón B-C. Realizados por el software llamado Mdsolid y una tabla con los datos calculados por el software

Figura 45: Diagrama cortante y momento flector



Fuente: Autor

Figura 46: Diagrama de flexión



Fuente: Autor

Figura 47: Cálculos por el programa MDsolid

User-defined Rectangle Shape

Dimensions: 30.0 (width), 3.0 (height)

Elastic Modulus: 73.00 GPa

Composite Beam

Material A: 0.00 (Assign area for this material by clicking with left mouse button)

Material B: 0.00 (Assign area for this material by clicking with right mouse button)

Z Axis Properties

Elastic Modulus	E	73,000	GPa
From bottom to centroid	y (bot)	1,500	mm
From centroid to top	y (top)	1,500	mm
Area of shape	A	90,000	mm ²
Moment of Inertia	Iz	67,500	mm ⁴
Section Modulus	Sz	45,000	mm ³
Section Modulus (bottom)	S (bot)	45,000	mm ³
Section Modulus (top)	S (top)	45,000	mm ³
Radius of Gyration	rz	0,8660	mm
Plastic Modulus	Zz	67,500	mm ³
Shape Factor		1,500	
From bottom to plastic n.a.	yp (bot)	1,500	mm
From plastic n.a. to top	yp (top)	1,500	mm
Polar Moment of Inertia	J	6,817,500	mm ⁴
Product of Inertia	Iyz	0,000	mm ⁴
Maximum Moment of Inertia	I _{max}	6,750,000	mm ⁴
Minimum Moment of Inertia	I _{min}	67,500	mm ⁴
Angle from z axis to I _{max} axis	B	0,000	degrees

Buttons: Circle, Compute

Fuente: Autor

Eslabón A-B-C-D

Para los cálculos de los eslabones con grados que no sean cero cambian, ya que toca calcular la fuerza equivalente y las distancia equivalente

Se tiene el ángulo α este ángulo se tomo por criterio del diseñador pero se puede tomar cualquier ángulo de los 0° a los 90° .

Fuerza equivalente

Se calcula la fuerza equivalente por Pitágoras, ya que se tienes el ángulo α pero no conocemos el ángulo θ .

$$\begin{aligned}\theta &= 90^\circ - \alpha \\ \theta &= 90^\circ - 80^\circ \\ \theta &= 10^\circ\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}F_{\text{equi}} &= 0,0775\text{N} * \text{sen}(10^\circ) \\ \mathbf{F_{\text{equi}} = 0,0121\text{N}}\end{aligned}$$

Distancia equivalente

Se calcula la distancia en la base porque la distancia de del eslabón esta en los 80° , entonces se allá por Pitágoras la distancia de al baje porque los 0,2m esta ahora ubicado en la hipotenusa.

$$\begin{aligned}X_{\text{equi}} &= 0,2\text{m} * \cos(80^\circ) \\ \mathbf{X_{\text{equi}} = 0,06180\text{m}}\end{aligned}$$

Carga distribuida

La carga del peso del eslabón A-B tienes un peso en su longitud de los 0,2m. Lo que se hace es poner la carga en el centro del eslabón A-B.

$$\begin{aligned}W &= 0,882\text{N} * 0,06180\text{m} \\ \mathbf{W = 0,0545\text{N}}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sum F &= 0 \\ -V - 0,0545\text{N} - 0,0121\text{N} \\ \mathbf{V} &= \mathbf{0,0666\text{N}}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sum M &= 0 \\ -M - (0,0545\text{N} * 0,0309\text{m}) - (0,0121\text{N} * 0,06180\text{m}) &= 0 \\ \mathbf{M} &= \mathbf{-0,00243\text{Nm}}\end{aligned}$$

$$\sigma_{\max} = \frac{M * C}{I}$$

$$I = \frac{1}{2} b * h^3$$

$$I = \frac{1}{2} (0,003\text{m}) * (0,03\text{m})^3$$

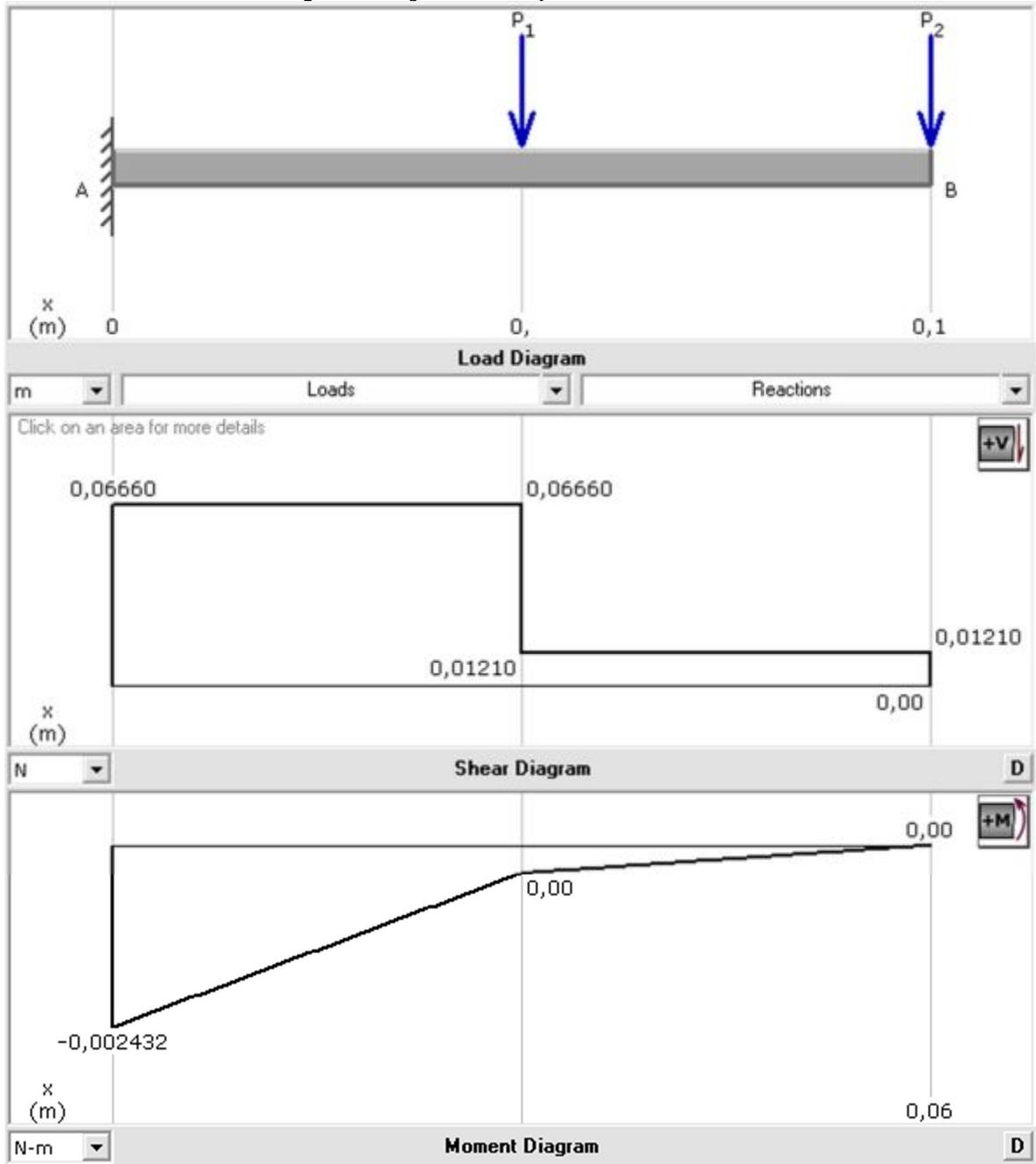
$$\mathbf{I = 6,75 * 10^{-9} m^4}$$

$$\sigma_{\max} = \frac{(0,00243\text{Nm}) * (0,015\text{m})}{6,75 * 10^{-9}}$$

$$\mathbf{\sigma_{\max} = 5,40\text{Kpa}}$$

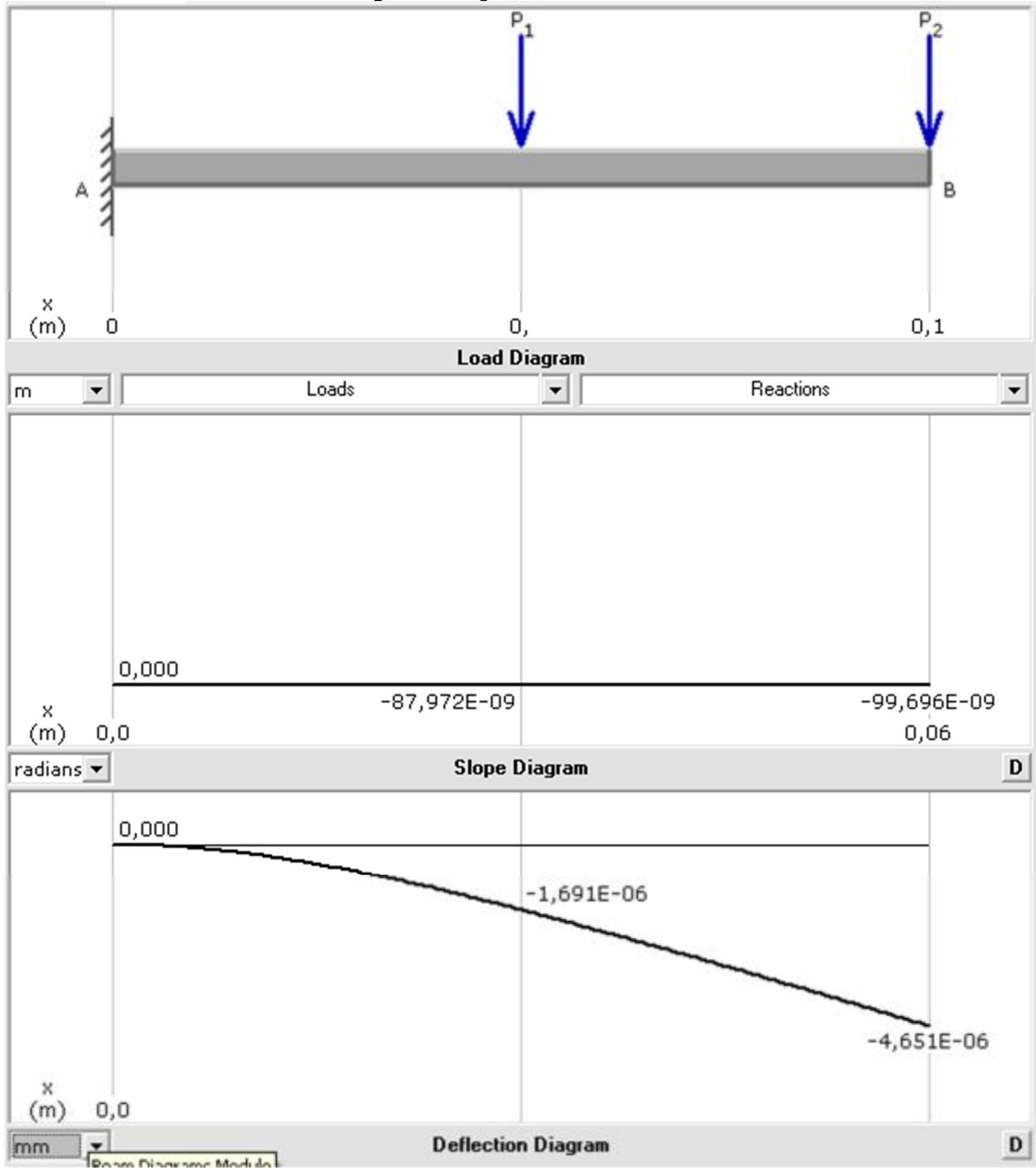
En las siguientes 3 gráficas se pueden observar los datos calculados anteriormente y el comportamiento del eslabón A-B. Realizados por el software llamado Mdsolid y una tabla con los datos calculados por el software

Figura 48: Diagrama cortante y momento flector



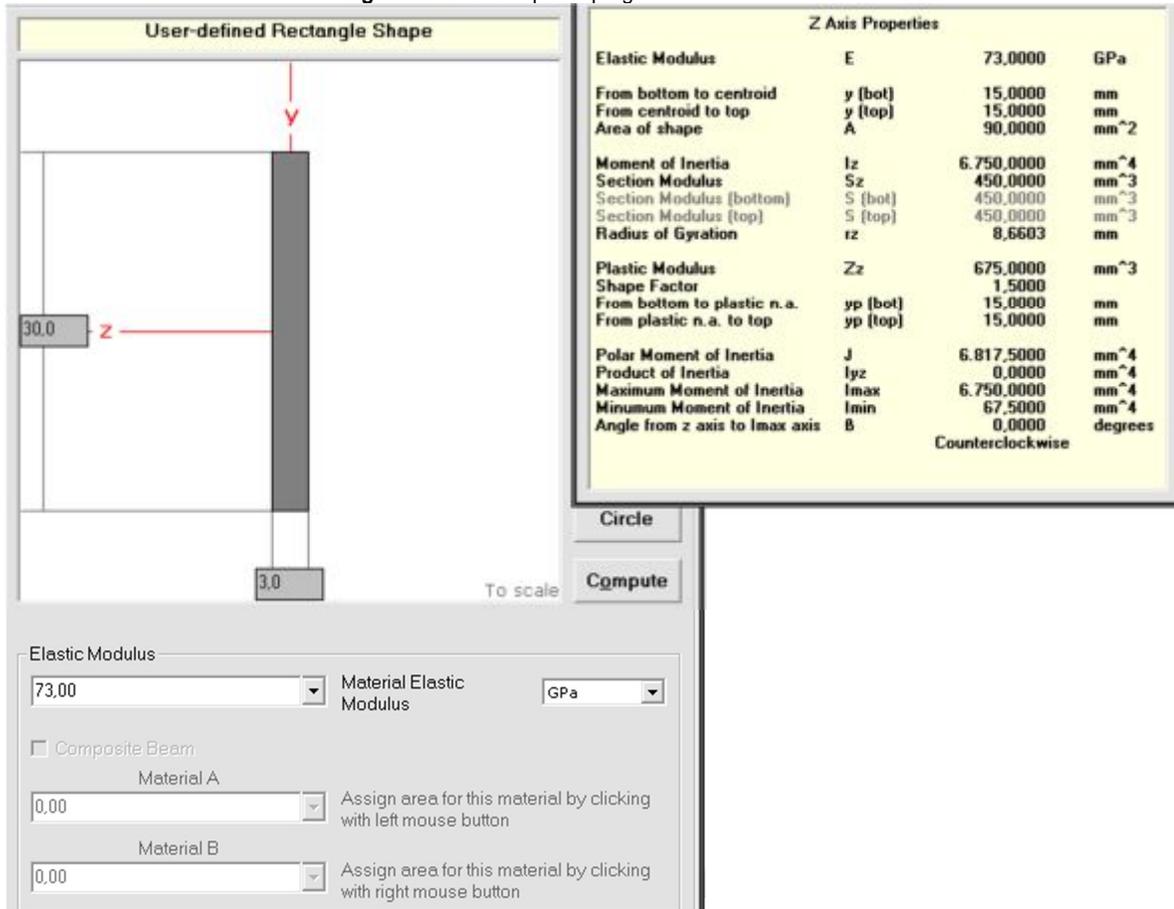
Fuente: Autor

Figura 49: Diagrama de flexión



Fuente: Autor

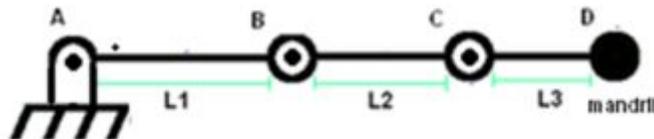
Figura 50: cálculos por el programa MDSolid



Fuente: Autor

4.2.3 CÁLCULOS DE VELOCIDADES, ACELERACION Y TORQUES

Figura 51: Grafica de secciones del brazo



Fuente: Autor

Se supone la velocidad en el punto D que será una línea recta de 10cm/seg, y se tomara un tiempo de 2 segundos. Se toma como parámetros de diseño.

Donde:

a_c =aceleración centrípeta.

a_t =aceleración tangencial.

α =aceleración angular.

a^T =aceleración total.

$$V_D = r_{DC} * W_D \text{ Ec.(1)}$$

$$W_D = \frac{V_D}{r_{DC}} \text{ Ec.(2)}$$

$$W_D = \frac{10 \text{ cm/seg}}{10 \text{ cm}}$$

$$W_D = 1 \text{ rad/seg}$$

$$a_{CD} = \frac{(V_D)^2}{r_{DC}} \text{ Ec.(3)}$$

$$a_{CD} = \frac{(10 \text{ cm/seg})^2}{10 \text{ cm}}$$

$$a_{CD} = 10 \text{ cm/seg}^2$$

$$\alpha = \frac{W_D}{t} \text{ Ec.(4)}$$

$$\alpha = \frac{1 \text{ rad/seg}}{2 \text{ seg}}$$

$$\alpha = 0.5 \text{ rad/seg}^2$$

$$a_{TD} = \alpha * r_{DC} \text{ Ec.(5)}$$

$$a_{TD} = 0.5 \text{ rad/seg}^2 * 10 \text{ cm}$$

$$a_{TD} = 5 \text{ cm/seg}^2$$

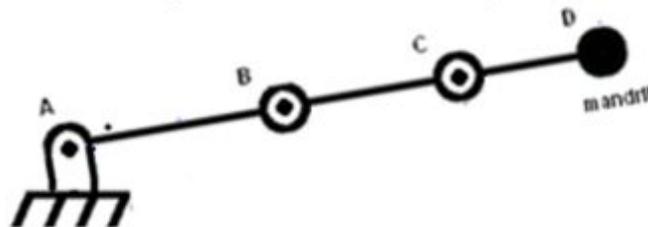
$$a_D^T = \sqrt{(a_{CD})^2 + (a_{TD})^2} \text{ Ec. (6)}$$

$$a_D^T = \sqrt{(10 \text{ cm/seg}^2)^2 + (5 \text{ cm/seg}^2)^2}$$

$$a_D^T = 11.2 \text{ cm/seg}^2$$

Para el cálculo de las velocidades en C, B y A se utiliza la teoría de velocidad relativa, teniendo en cuenta la velocidad de D.

Figura 52: Grafica del brazo con ángulo

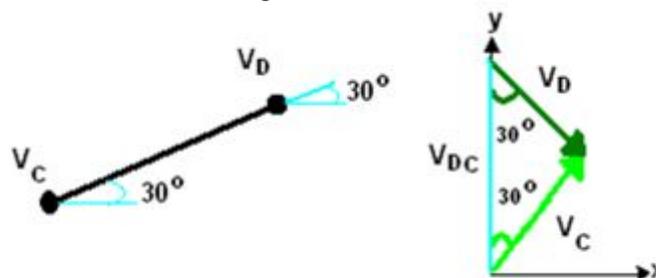


Fuente: Autor

Velocidad y aceleración en C:

Se pone a un ángulo de 30° parámetros de diseño y se dibujan los distintos vectores en el plano de 2 dimensiones. Ya que se conoce la velocidad en D se busca la velocidad en C. Utilizando la ley de los senos para encontrar la velocidad en C.

Figura 53: Sección C



Fuente: Autor

$$\frac{\text{sen } 120}{V_D} = \frac{\text{sen } 30}{V_C} \text{ Ec. (7)}$$

$$V_C = V_D (\text{sen } 30^\circ / \text{sen } 120^\circ) \text{ Ec. (8)}$$

$$V_C = 10 \text{ cm/seg} (\text{sen } 30^\circ / \text{sen } 120^\circ)$$

$$V_C = 5.77 \text{ cm/seg}$$

$$V_C = r_{CB} * W_C$$

$$W_C = \frac{V_C}{r_{CB}}$$

$$W_C = \frac{5.77 \text{ cm/seg}}{15 \text{ cm}}$$

$$\mathbf{W_C = 0.384 \text{ rad/seg}}$$

$$a_{CC} = \frac{(V_C)^2}{r_{CB}}$$

$$a_{CC} = \frac{(5.77 \text{ cm/seg})^2}{15 \text{ cm}}$$

$$\mathbf{a_{CC} = 2.22 \text{ cm/seg}^2}$$

$$\alpha = \frac{W_C}{t}$$

$$\alpha = \frac{0.384 \text{ rad/seg}}{2 \text{ seg}}$$

$$\mathbf{\alpha = 0.192 \text{ rad/seg}^2}$$

$$a_{TC} = \alpha * r_{CB}$$

$$a_{TC} = 0.192 \text{ rad/seg}^2 * 15 \text{ cm}$$

$$\mathbf{a_{TC} = 2.88 \text{ cm/seg}^2}$$

$$a_D^T = \sqrt{(a_{CD})^2 + (a_{TD})^2}$$

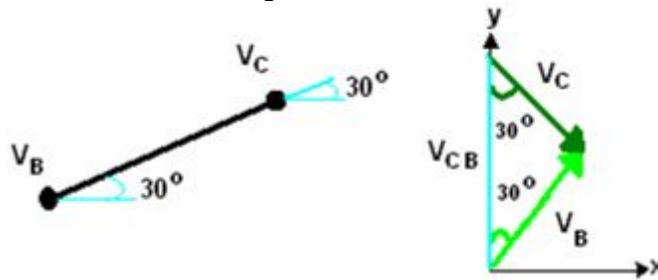
$$a_D^T = \sqrt{(2.22 \text{ cm/seg}^2)^2 + (2.88 \text{ cm/seg}^2)^2}$$

$$\mathbf{a_D^T = 3.64 \text{ cm/seg}^2}$$

Velocidad y aceleración en B:

Se pone a un ángulo de 30° parámetros de diseño y se dibujan los distintos vectores en el plano de 2 dimensiones. Ya que se conoce la velocidad en C se busca la velocidad en B. Utilizando la ley de los senos para encontrar la velocidad en B.

Figura 54: Sección B



Fuente: Autor

$$\frac{\text{sen } 120}{V_C} = \frac{\text{sen } 30}{V_B}$$

$$V_B = V_C (\text{sen } 30^\circ / \text{sen } 120^\circ)$$

$$V_B = 5.77 \text{ cm/seg} (\text{sen } 30^\circ / \text{sen } 120^\circ)$$

$$\mathbf{V_B = 3.33 \text{ cm/seg}}$$

$$V_B = r_{BA} * W_B$$

$$W_B = \frac{V_B}{r_{BA}}$$

$$W_B = \frac{3.33 \text{ cm/seg}}{20 \text{ cm}}$$

$$\mathbf{W_B = 0.166 \text{ rad/seg}}$$

$$a_{CB} = \frac{(V_B)^2}{r_{BA}}$$

$$a_{CB} = \frac{(3.33 \text{ cm/seg})^2}{20 \text{ cm}}$$

$$\mathbf{a_{CB} = 0.554 \text{ cm/seg}^2}$$

$$\alpha = \frac{W_B}{t}$$

$$\alpha = \frac{0.1665 \text{ rad/seg}}{2 \text{ seg}}$$

$$\alpha = 0.08325 \text{ rad/seg}^2$$

$$a_{TB} = \alpha * r_{BA}$$

$$a_{TB} = 0.08325 \text{ rad/seg}^2 * 20 \text{ cm}$$

$$a_{TB} = 1.67 \text{ cm/seg}^2$$

$$a_D^T = \sqrt{(a_{CD})^2 + (a_{TD})^2}$$

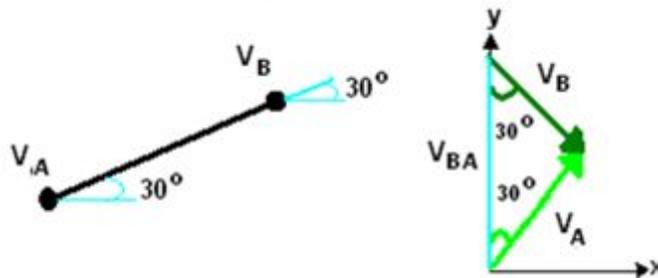
$$a_D^T = \sqrt{(0.554 \text{ cm/seg}^2)^2 + (1.67 \text{ cm/seg}^2)^2}$$

$$a_D^T = 1.76 \text{ cm/seg}^2$$

Velocidad y aceleración en A:

Se pone a un ángulo de 30° parámetros de diseño y se dibujan los distintos vectores en el plano de 2 dimensiones. Ya que se conoce la velocidad en B se busca la velocidad en A. Utilizando la ley de los senos para encontrar la velocidad en A.

Figura 55: Sección A



Fuente: Autor

$$\frac{\text{sen } 120}{V_B} = \frac{\text{sen } 30}{V_A}$$

$$V_A = V_B (\text{sen } 30^\circ / \text{sen } 120^\circ)$$

$$V_A = 3.33 \text{ cm/seg} (\text{sen } 30^\circ / \text{sen } 120^\circ)$$

$$V_A = 1.92 \text{ cm/seg}$$

$$V_A = r * W_A$$

$$W_A = \frac{V_A}{r_{AB}}$$

$$W_A = \frac{1.92 \text{ cm/seg}}{20 \text{ cm}}$$

$$\mathbf{W_A = 0.096 \text{ rad/seg}}$$

$$a_{CA} = \frac{(V_A)^2}{r_{AB}}$$

$$a_{CA} = \frac{(1.92 \text{ cm/seg})^2}{20 \text{ cm}}$$

$$\mathbf{a_{CA} = 0.18432 \text{ cm/seg}^2}$$

$$\alpha = \frac{W_A}{t}$$

$$\alpha = \frac{0.096 \text{ rad/seg}}{2 \text{ seg}}$$

$$\mathbf{\alpha = 0.048 \text{ rad/seg}^2}$$

$$a_{TA} = \alpha * r$$

$$a_{TA} = 0.048 \text{ rad/seg}^2 * 20 \text{ cm}$$

$$\mathbf{a_{TA} = 0.96 \text{ cm/seg}^2}$$

$$a_A^T = \sqrt{(a_{CD})^2 + (a_{TD})^2}$$

$$a_A^T = \sqrt{(0.18432 \text{ cm/seg}^2)^2 + (0.96 \text{ cm/seg}^2)^2}$$

$$\mathbf{a_A^T = 0.9775 \text{ cm/seg}^2}$$

Torque en el punto A, B y C

Ahora se buscan los torque en los puntos A, B y C, para eso se hace una sumatoria de fuerzas.

Donde:

I:Momento de inercia
 α :Aceleración angular

$$\sum T = I * \alpha \quad \text{Ec.(9)}$$

$$\sum T_A = (I_A * \alpha_A) + (I_B * \alpha_B) + (I_C * \alpha_C)$$

$$T_A = (*) + (*) + (*)$$

$$T_A = 1.63 * 10^{-9} \text{Nm}$$

$$\sum T_B = (I_B * \alpha_B) + (I_C * \alpha_C)$$

$$T_B = (*) + (*)$$

$$T_B = 1.30 * 10^{-9} \text{Nm}$$

$$\sum T_C = (I_C * \alpha_C)$$

$$T_C = (*)$$

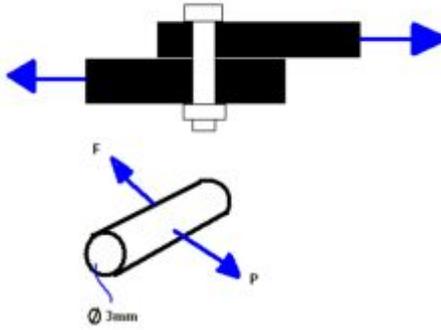
$$T_C = 1.30 * 10^{-9} \text{Nm}$$

Para este sistema se selecciono como motor los servomotor, ya que los servomotores trabaja en torque (Kg*cm), lo que se puede hacer para el elección del servomotor es convertir el torque del servomotor a (Nm). O convertir los torque del brazos a (Kg*cm), y asi se busca el servomotor que necesitamos.

4.2.4 PASADOR EN LA UNIÓN DE LOS DOS ESLABONES

UNIÓN PASADOR C-D

Figura 56: Eslabón con pasador



Fuente: Autor

$$P=4,91N$$
$$F=P=4,91N$$

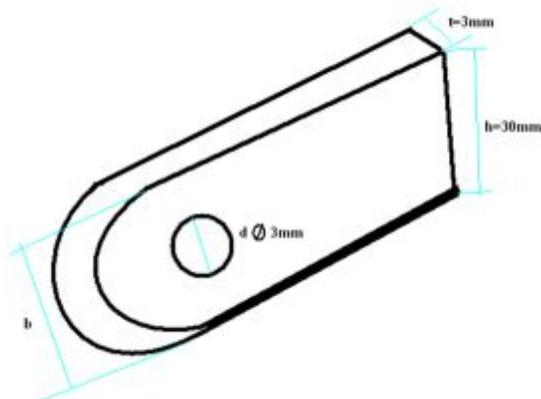
$$T=\frac{F}{A}Ec.(10)$$

$$T=\frac{4,91N}{0,003m}$$

$$T=1,64Kpa$$

Esfuerzo en los apoyos

Figura 57: Esfuerzo en los apoyos



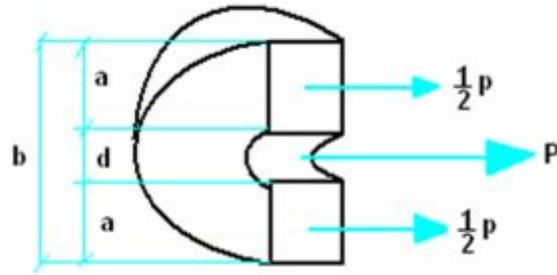
Fuente: Autor

$$T_b=\frac{P}{td}Ec.(11)$$

$$\tau_b = \frac{4,91N}{(0,003m) \cdot (0,003m)}$$

$$\tau_b = 546 \text{Kpa}$$

Figura 58: Esfuerzo en cada extremo



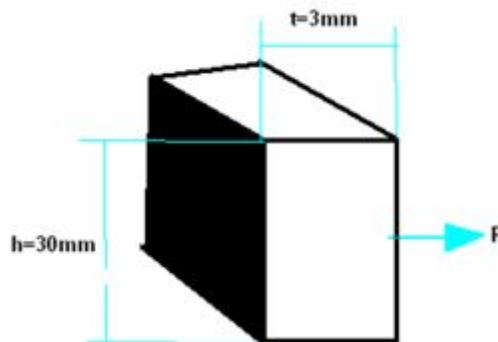
Fuente: Autor

$$\sigma = \frac{\frac{1}{2}P}{ta} E_c \quad (12)$$

$$\sigma = \frac{\frac{1}{2}(4,91N)}{(0,003m) \cdot (0,0135m)}$$

$$\sigma = 60,6 \text{Kpa}$$

Figura 59: Esfuerzo en la barra



Fuente: Autor

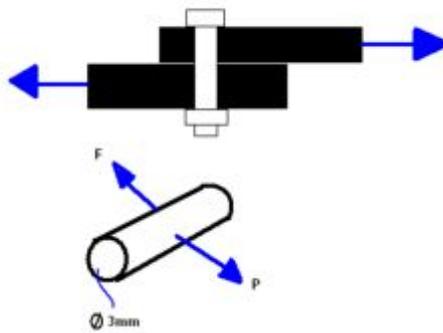
$$\sigma = \frac{P}{th} Ec. (13)$$

$$\sigma = \frac{4,91N}{(0,003m) * (0,03m)}$$

$$\sigma = 54,6Kpa$$

UNIÓN PASADOR B-C

Figura 60: Eslabón con pasador



Fuente: Autor

$$P = 4,98N$$

$$F = P = 4,98N$$

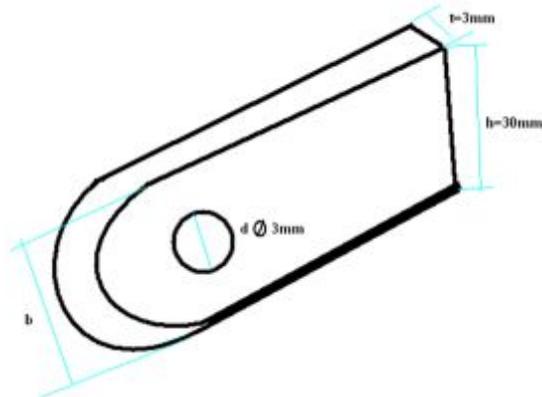
$$T = \frac{F}{A}$$

$$T = \frac{4,98N}{0,003m}$$

$$T = 1,66Kpa$$

Esfuerzo en los apoyos

Figura61: Esfuerzo en los apoyos



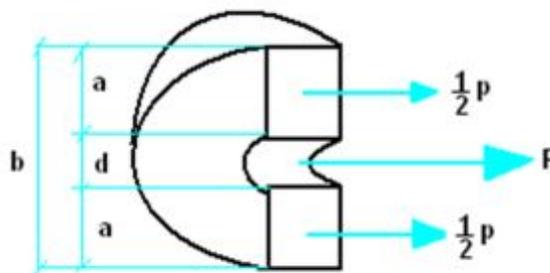
Fuente: Autor

$$T_b = \frac{P}{td}$$

$$T_b = \frac{4,98N}{(0,003m) * (0,003m)}$$

$$T_b = 553Kpa$$

Figura 62: Esfuerzo en cada extremo



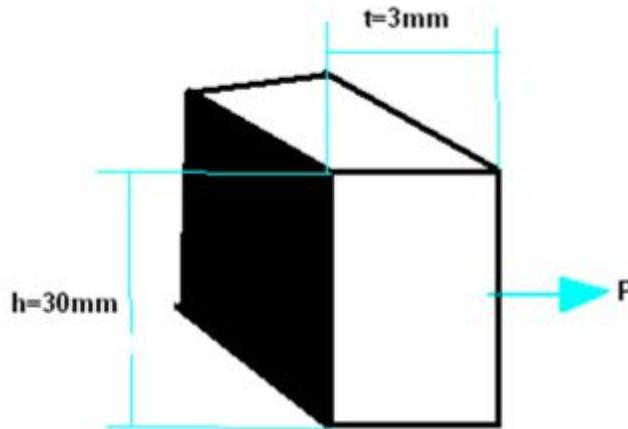
Fuente: Autor

$$\sigma = \frac{\frac{1}{2}P}{ta}$$

$$\sigma = \frac{\frac{1}{2}(4,98N)}{(0,003m) * (0,0135m)}$$

$$\sigma = 61,5 \text{ Kpa}$$

Figura 63: Esfuerzo en la barra



Fuente: Autor

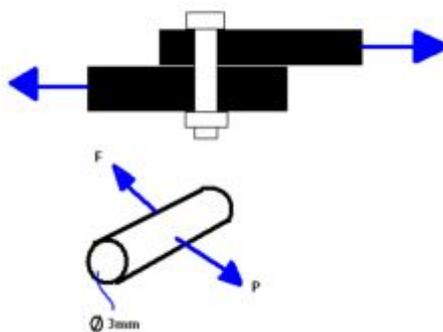
$$\sigma = \frac{P}{th}$$

$$\sigma = \frac{4,98 \text{ N}}{(0,003 \text{ m}) * (0,03 \text{ m})}$$

$$\sigma = 55,3 \text{ Kpa}$$

UNIÓN PASADOR A-B

Figura 64: Eslabón con pasador



Fuente: Autor

$$P=2,54N$$
$$F=P=2,54N$$

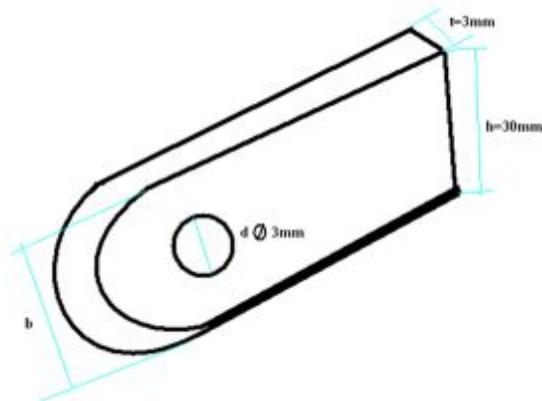
$$T=\frac{F}{A}$$

$$T=\frac{2,54N}{0,003m}$$

$$T=847pa$$

Esfuerzo en los apoyos

Figura 65: Esfuerzo en los apoyos



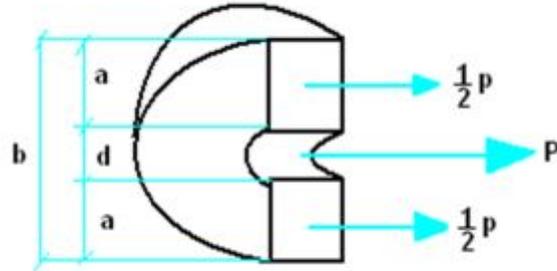
Fuente: Autor

$$T_b=\frac{P}{td}$$

$$T_b=\frac{2,54N}{(0,003m)*(0,003m)}$$

$$T_b=282Kpa$$

Figura 66: Esfuerzo en cada extremo



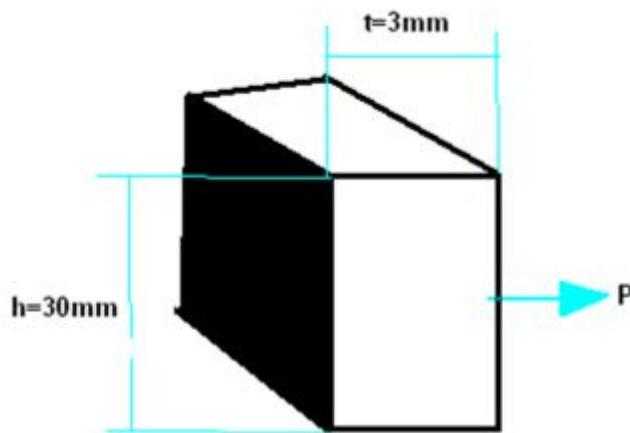
Fuente: Autor

$$\sigma = \frac{\frac{1}{2}P}{ta}$$

$$\sigma = \frac{\frac{1}{2}(2,54N)}{(0,003m) \cdot (0,0135m)}$$

$$\sigma = 32,4 \text{ Kpa}$$

Figura 67: Esfuerzo en la barra



Fuente: Autor

$$\sigma = \frac{P}{th}$$

$$\sigma = \frac{2,54N}{(0,003m) * (0,03m)}$$

$$\sigma = 28,2Kpa$$

4.3 CÁLCULOS DEL RODAMIENTOS AXIALES DE BOLAS

En la siguiente figura [68], se puede ver el diagrama de flujo para rodamientos de bolas axiales de simple efecto.

F_{am} = carga axial. (KN)

P = carga dinámica equivalente.

P_o = carga estática equivalente.

A = factor de carga mínima (ver tabla de rodamientos)

n = velocidad de giro, rpm

$$F_A = 2,72n$$

$$50rpm$$

$$S_o = 2$$

$$L_{10h} = 3500 \text{ horas}$$

$$F_A = P = P_o = 2.72N$$

Tabla 2: Para encontrar el c/p.

	40	50	63
3200	1.96		2.29
3500		c/p	
4000	2.12		2.47

Fuente Autor

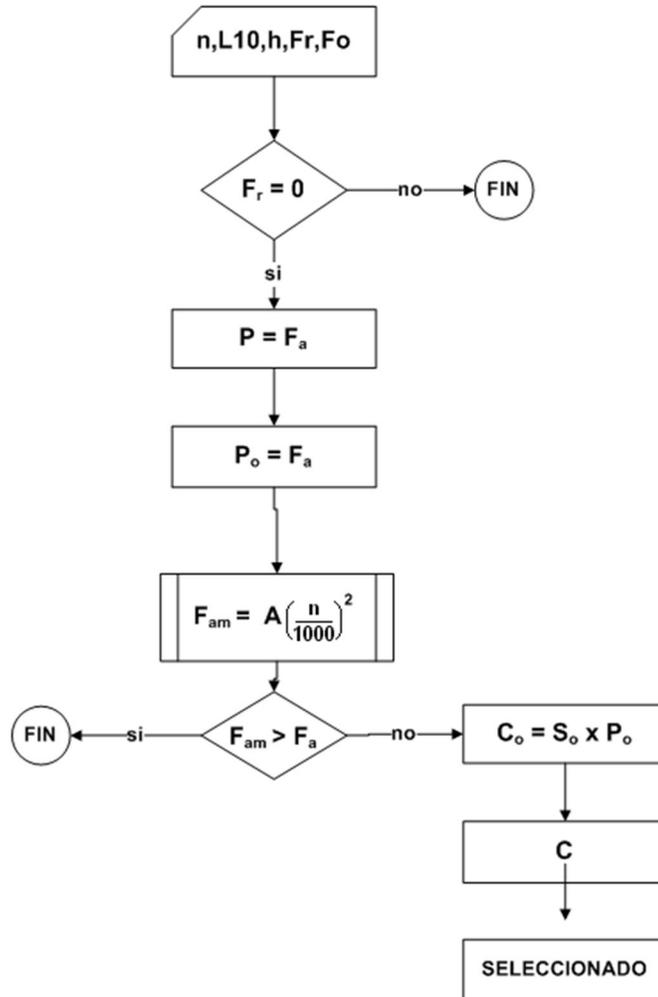
$$\frac{4000-3200}{2.29-1.96} = \frac{4000-3500}{2.29-x} = 2.08$$

$$\frac{4000-3200}{2.47-2.12} = \frac{4000-3500}{2.47-x} = 2.25$$

$$\frac{63-40}{2.25-2.08} = \frac{63-50}{2.25-c/p} = 2.15$$

$$c/p = 2.15$$

Figura 68: Diagrama de flujo de rodamientos axiales de bola de simple efecto.



Fuente Autor

Para diseñar los rodamientos axiales de bola de simple efecto, se siguen los paso del diagrama de flujo de los rodamientos axiales de bola de simple efecto, también se entramos a la página de la SKF para mirar el catalogo de rodamientos axiales de bolas de simple efecto y seleccionar los datos que necesitamos para los cálculos. Figura [69].

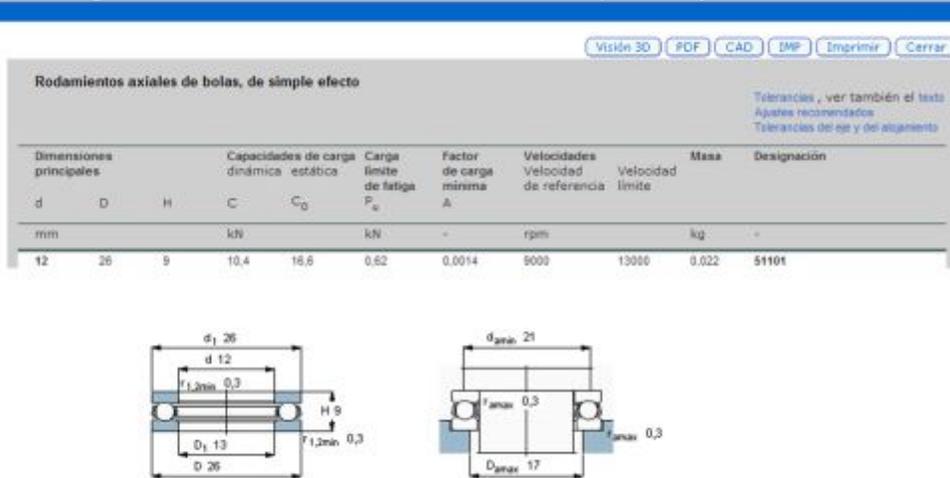
Figura 69: Tabla de rodamientos axiales de bola de simple efecto.

Rodamientos axiales de bolas, de simple efecto										Tolerancias y, ver también el texto Ajustes recomendados Tolerancias del eje y del alojamiento
Dimensiones principales			Capacidades de carga		Carga límite de fatiga	Factor de carga mínima	Velocidades	Velocidad	Masa	Designación
d	D	H	C	C ₀	P ₀	A	Velocidad de referencia	Velocidad límite	kg	-
mm			kN		kN	-	rpm			-
3	8	3,5	0,508	0,72	0,027	0,000003	26000	36000	0,0099	BA 3
4	10	4	0,781	0,72	0,027	0,000003	22000	30000	0,0015	BA 4
5	12	4	0,852	0,965	0,036	0,000005	20000	28000	0,0021	BA 5
6	14	5	1,78	1,92	0,071	0,000019	17000	24000	0,0035	BA 6
7	17	6	2,51	2,9	0,108	0,000044	14000	19000	0,0065	BA 7
8	19	7	3,19	3,8	0,143	0,000075	12000	17000	0,0091	BA 8
9	20	7	3,12	3,8	0,143	0,000075	12000	16000	0,010	BA 9
10	24	9	9,95	15,3	0,56	0,0012	9500	13000	0,020	51100
10	28	11	12,7	18,6	0,70	0,0018	8000	11000	0,038	51200
12	26	9	10,4	16,6	0,62	0,0014	9000	13000	0,022	51101
12	28	11	13,3	20,8	0,77	0,0022	8500	11000	0,034	51201
15	28	9	10,6	18,3	0,67	0,0017	8500	12000	0,024	51182
15	32	12	16,5	27	1	0,0038	7900	10000	0,045	51292
17	30	9	11,4	21,2	0,78	0,0023	8500	12000	0,026	51183
17	35	12	17,2	30	1,1	0,0047	6700	9500	0,053	51203
20	35	10	15,1	29	1,06	0,0044	7500	10000	0,039	51194
20	40	14	22,5	40,5	1,53	0,0085	6000	8000	0,082	51204
25	42	11	18,2	39	1,43	0,0079	6300	9000	0,060	51195
25	47	15	27,6	55	2,04	0,015	5300	7500	0,11	51205
25	52	18	34,5	60	2,24	0,018	4500	6300	0,12	51305
25	60	24	55,3	96,5	3,6	0,048	3600	5000	0,34	51405
30	47	11	19	43	1,6	0,0096	6000	8500	0,069	51196
30	52	16	25,5	51	1,9	0,013	4800	6700	0,13	51206
30	60	21	37,7	71	2,65	0,025	3800	5300	0,26	51306
30	70	28	72,8	137	5,1	0,097	3000	4300	0,52	51406

Fuente: http://www.skf.com/skf/productcatalogue/jsp/viewers/productTableViewer.jsp?tableName=1_8_1&maincatalogue=1&lang=es

Se escogió el rodamiento axial de bola de simple efecto designado como 51101 por si diámetro internos que se acopa perfectamente con el servomotor pero esta sobre diseñado por. Figura [70].

Figura 70: Tabla de rodamientos axiales de bola de simple efecto y medidas.



Fuente: <http://www.skf.com/skf/productcatalogue/Forwarder?action=PPP&lang=es&imperial=false&windowName=null&perfid=161001&prodid=161001101>

$$A= 0.0014$$

$$F_{am} = A\left(\frac{n}{1000}\right)^2 Ec. (14)$$

$$F_{am} = 0.0014\left(\frac{50}{1000}\right)^2$$

$$F_{am} = 3.5 \times 10^{-6} N$$

$$F_{am} \geq F_A \text{ Ec. (15)}$$

$$3.5 \times 10^{-6} N \geq 2.27 N$$

$$C_o = S_o * P_o C_o = 2 * 2.15 N \quad C_o = 4.30 \text{ Ec. (16)}$$

$$C = P * 2.15 \quad C = 2.72 N * 2.15 N \quad C = 5.85 \text{ Ec. (17)}$$

4.3.1 CAPACIDAD DE CARGA

En el diseño de la base giratoria del sistema copiadore se incluye un rodamiento axial de bolas para permitir el giro libre de esta base, desplazándola de 0 a 180 grados.

4.3.2 ESCOGENCIA DEL RODAMIENTO

Para la escogencia del rodamiento se tienen en cuenta tres condiciones básicas para este diseño, las cuales son: la carga axial, ya que este sistema solo manejará cargas axiales y no radiales, las bajas revoluciones, puesto que el rodamiento de la base solo girará 180 grados en periodos cortos de tiempo y un diámetro específico, el cual será designado por una parte de eje del servomotor y las especificaciones del diseño de la base giratoria.

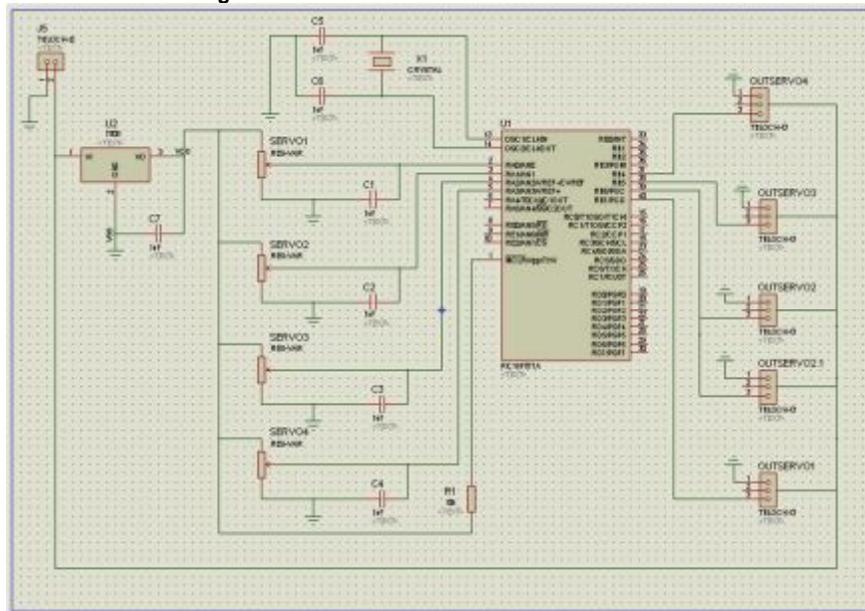
Por ende se optó por los rodamientos axiales de bolas de simple efecto ya que son los tipos mas adecuados para cargas axiales puras pequeñas y bajas velocidades. Los rodamientos axiales de bolas de simple efecto solo pueden soportar cargas axiales en un solo sentido

La capacidad de carga estática C_o se usa en los cálculos cuando los rodamientos giran a velocidad muy bajas cuando están sometidos a movimientos lentos de oscilación o cuando están estacionarios bajo carga durante ciertos periodos. También debe tomarse en cuenta cuando sobre un rodamiento giratorio (sometido a esfuerzo dinámico) actúan elevadas cargas de choque de corta duración.

4.4 ELECTRÓNICA

Para la simulación del circuito electrónico y el desarrollo del PCB de la parte electrónica se simulo con un software llamado Proteus. Figura [71].

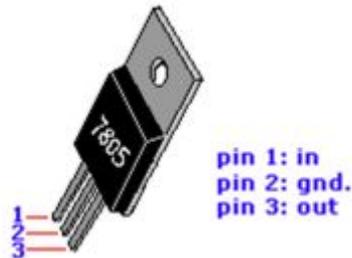
Figura 71: Circuito electrónico del servomecanismo



Fuente: Autor

El circuito del servomecanismo será alimentado con una batería de 6 voltios, ya que los servomotores necesitan 6 voltios. Pero el pic necesita 5 voltios por eso se utilizo un LM 7805. Figura [72].

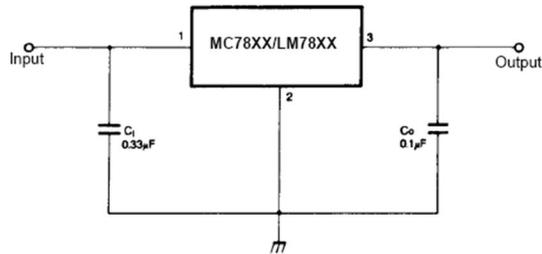
Figura 72: LM 7805



Fuente: http://daneshnameh.roshd.ir/mavara/img/daneshnameh_up/9/9b/7805.gif

Se utilizo un LM7805 ya que es un convertidor de voltaje de 5 voltios, son los 5 voltios que necesitamos para el pic. En la siguiente Figura [73], podemos ver el parámetro de montaje que recomienda el fabricante.

Figura 73: LM 7805 parámetros D.C



Fuente: <http://snesdev.antihero.org/wp-content/uploads/2008/03/lm7805.gif>

La batería que se está utilizando es un de 6 voltios 5 amperios hora, y el tiempo de duración de la batería en este circuito es:

Tabla 3: Datos del servomotor

SERVOMOTOR	CORRIENTE SIN CARGA	CORRIENTE CON CARGA
MG996R	350mA	400mA
SM-S8166M	370mA	450mA

Fuente: Autor

3 servomotor MG996R: $400\text{mA} + 400\text{mA} + 400\text{mA} = 1200\text{mA}$
 2 servomotor SM-S8166M: $450\text{mA} + 450\text{mA} = 900\text{mA}$

El pic consume una corriente de 25mA.

El regulador utiliza una corriente de salida de 500mA y consumo máximo de 800mA.

$1200\text{mA} + 900\text{mA} + 800\text{mA} = \mathbf{2,9A}$

El circuito del servomecanismo es de 2,9A y que el tiempo de duración con la batería utilizada es de 1 h con 40 minutos, ya que la batería utilizada suministra máximo 5 amperios en una hora.

4.5 MODELO DE CONTROL

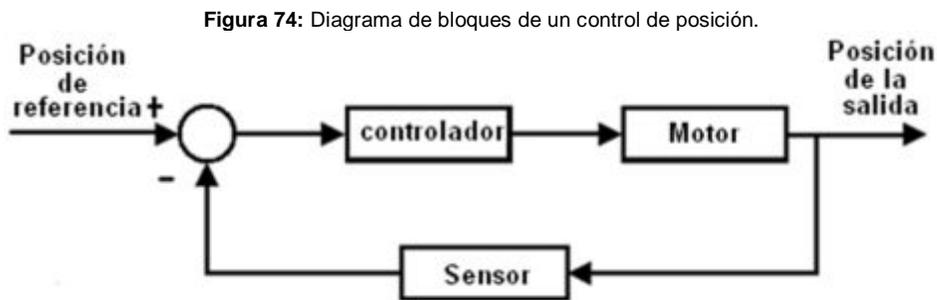
Para asegurar un funcionamiento optimo del sistema, es necesario analizar, el comportamiento de todo el conjunto.

Pero también este sistema posee 2 tipos de control, que uno es de lazo cerrado y el otro de lazo abierto. El de lazo cerrado es el que posee el servomotor que está diseñado previamente por el fabricante, y que regula el funcionamiento.

Mientras que el otro lazo es el de lazo abierto está conformado por la interacción de todo el conjunto, esto debido a que no existe una retroalimentación directa del brazo robótico al usuario. Le indica el cambio de alguna variable como: posición, velocidad y etc.

4.5.1 MODELO DE UN SERVOMOTOR

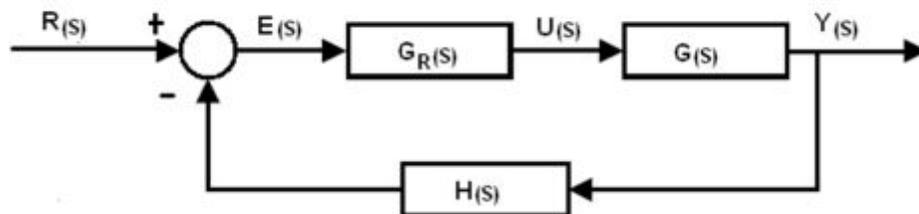
Un sistema de control de posición básico consta de un servomotor, sensor de posición y controles como se muestra en el siguiente figura [74].



Fuente: Autor

“Como se ha comentado, lo que se pretende es controlar dicho servomotor, es decir, que la salida de éste cumpla unas determinadas especificaciones tanto dinámicas como estáticas. Para ello utilizaremos un esquema de control con realimentación negativa como el que se propone en la siguiente Figura [75].”³

Figura 75: Diagrama de bloques de un servomotor.



Fuente: <http://isa.umh.es/asignaturas/asc/practicas/SimulacionMotorPID.pdf>

³ <http://isa.umh.es/asignaturas/asc/practicas/SimulacionMotorPID.pdf> visitada el 01/09/2010 hora de visita a las 9 am.

Donde:

R(s): denota la referencia que deseamos que siga la salida del sistema.

E(s): el error entre la salida del sistema y la referencia.

U(s): la entrada de control al servomotor.

Y(s): la señal de salida del servomotor.

G(s): es la función de transferencia del servomotor.

H(s): es la función de transferencia del sensor.

GR(s): la función de transferencia del regulador calculado.

El control del servomotor se realizará tanto en velocidad como en posición (debiendo hallar posteriormente la función de transferencia que nos proporciona la relación $\theta(s)/U(s)$).

Ecuación de la señal de salida corresponderá a una señal rampa con pendiente m:

$$y=m*tEc.(18)$$

Cuya transformada de laplace será:

$$Y(s)=\frac{m}{s^2}Ec.(19)$$

La señal de entrada corresponde a una señal escalón de amplitud igual a la del voltaje de dc aplicado:

$$u(t)=VEc.(20)$$

Cuya transformada de laplace es:

$$U(s)=\frac{V}{s}Ec.(21)$$

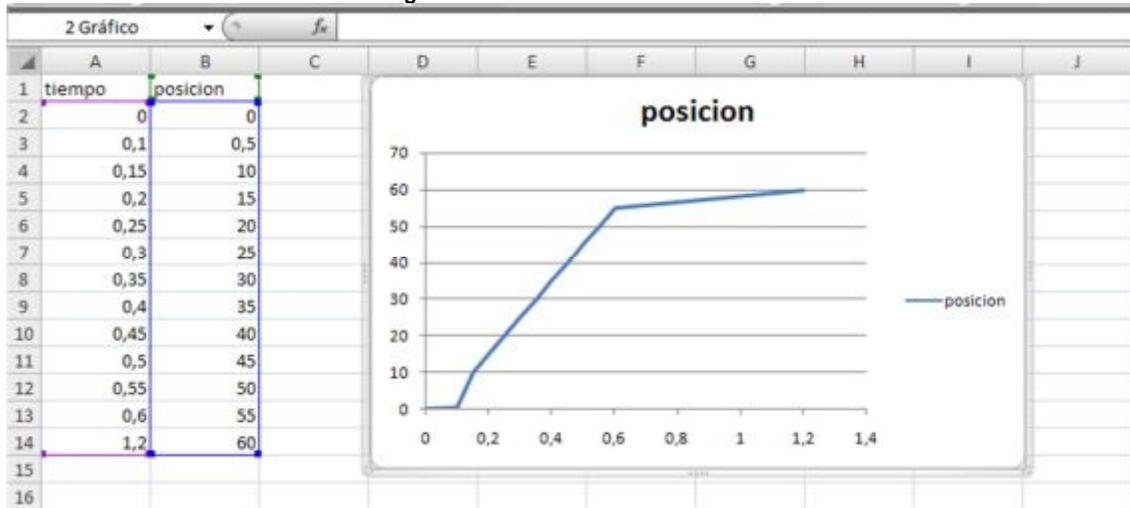
El modelo matemático será la función de transferencia del sistema, es:

$$G(s)=\frac{Y(s)}{U(s)}=\frac{m/V}{s}Ec.(22)$$

El modelo de polos y ceros obtenido no tiene ceros y tiene un polo en el origen. Un polo en el origen representa un sistema tipo 1

En el laboratorio se tomaron unos datos para caracterizar el servomotor que fueron graficados en Excel que es la siguiente Figura [76].

Figura 76: Pruebas del servomotor.



Fuente: Autor

En donde los datos tomados fueron de posición y tiempo del servomotor, ya con eso tenemos los datos de la ecuación.

$$G(s) = \frac{M}{ts + 1} \text{ Ec. (23)}$$

$$M = \frac{\text{valor de salida}}{\text{valor de entrada}} \text{ Ec. (24)}$$

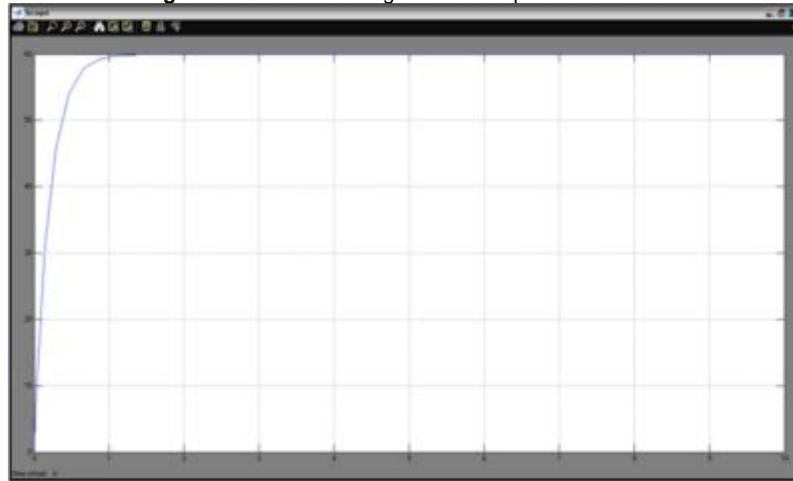
Con los siguientes datos hallados la simulamos en el programa de Matlab simulink para ver en comportamiento en la siguiente Figuras [77] y en la Figura [78], podemos observar el comportamiento del diagrama.

Figura 77: Diagrama de bloques del sistema.



Fuente: Autor

Figura 78: Grafica del diagrama de bloque del sistema.



Fuente: Autor

4.5.2 MODELOS DE BRAZO DE TRES EXTREMIDADES

La demostración de un modelo matemático de un brazo robótico. Para lograr este hay que tener en cuenta 3 pasos importante para encontrar el modelo matemático que son:

- Creación de un modelo.
- Utilizar el modelo para la solución del problema.
- Visualizar el modelo mediante una animación de 2 o 3 dimensiones.

“Modelo matemático de un brazo robótico en la transformación homogénea de Denavit y Hartenberg. Se realiza una matriz de D y H, y lo aplicamos al movimiento de un brazo robótico (codo o en mi caso la base). Por medio de la función de la posición angular $\delta(i)$ de las articulaciones.

También se toca definir la matriz de transformación ya que las transformaciones de la matriz de rotación alrededor del eje de ordenadas Z(i) por el ángulo θ_{i+1} (en realidad simples θ) Es A1, la matriz de transformación de movimiento en la dirección de Z(i) por la distancia d(i) una (en realidad simples d) es A2. El común de la transformación de matriz de la rotación y el movimiento es B1.

$$\text{Matriz A1} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\text{sen} \theta & 0 & 0 \\ \text{sen} \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{Ec. (25)}$$

$$\text{Matriz A2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{Ec. (26)}$$

$$\text{Matriz B1} = \text{multiplicar (A2, A1)} \text{Ec. (27)}$$

Las transformaciones de la matriz de rotación alrededor del eje X_{i+1} por el ángulo α_{i+1} (En realidad simples α) Es A3, la matriz de transformación de movimiento en la dirección Z_i por la distancia a_{i+1} (en realidad simples a) Es A4. El común de la transformación de matriz de la rotación y el movimiento es B2.

$$\text{Matriz A3} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\text{sen}\alpha & 0 \\ 0 & \text{sen}\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{Ec. (28)}$$

$$\text{Matriz A4} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{Ec. (29)}$$

$$\text{Matriz B1} = \text{multiplicar (A3, A4)} \text{Ec. (30)}$$

La matriz de D y H diseñada como más especializada transforma para los brazos robóticos. Z_{i-1} eje a lo largo del movimiento de sus articulaciones, X_i eje normal Z_{i-1} eje, y se aleja de ella.

Los pasos de la transformación son de las siguientes:

1. Que giran alrededor de Z_{i-1} por δ (Angulo de las articulaciones).
2. Traducción a lo largo de Z_{i-1} por d (enlace offset).
3. Traducción a lo largo de X_i por a (longitud del enlace).
4. Que giran alrededor de X_i por α (giro enlace).

La transformación general de D y H en la matriz

$$\text{Matriz H} = (B1, B2) \text{Ec. (31)}$$

$$\text{Matriz H} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\text{sen}\theta * \text{cosa} & \text{sen}\theta * \text{sena} & \cos\theta * a \\ \text{sen}\theta & \cos\theta * \text{cosa} & -\cos\theta * \text{sena} & \text{sen}\theta * a \\ 0 & \text{sena} & \cos\alpha & d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{Ec. (32)}$$

La transformar del brazo del robótico es la sustitución de los parámetros geométricos reales en la Matriz H proporciona las matrices reales de las transformaciones de los brazos robóticos H1, H2, H3. La transformación final expresado por Matriz H14 = H1.H2.H3.

$$H1 = \text{map} (x \rightarrow \text{eval}(\text{subs}(\theta=\theta2, \alpha=-\frac{\pi}{2}, a=0, d=12, x)), H) \text{Ec. (33)}$$

$$H2 = \text{map} (x \rightarrow \text{eval}(\text{subs}(\theta=\theta3, \alpha=0, a=13, d=0, x)), H) \text{Ec. (34)}$$

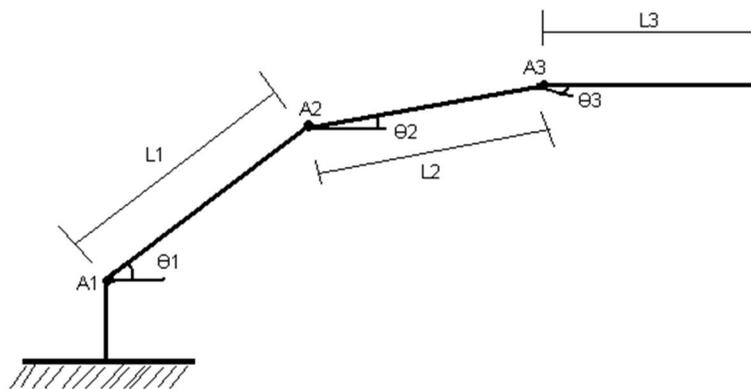
$$H3 = \text{map} (x \rightarrow \text{eval}(\text{subs}(\theta=\theta4, \alpha=0, a=14+15, d=0, x)), H) \text{Ec. (35)}$$

$$H14 = \text{multiply} (H1, \text{multiply} (H2, H3)) \text{Ec. (36)}$$

Básica mente, podemos encontrar los ángulos de las articulaciones, δ_2 , δ_3 y δ_4 para el brazos robótico basado en la posición dada por $r(t)$ del efecto final.⁴

Por medio de la siguiente Figura [79] podemos ver y comprender los grados de libertad ángulos y distancias que tiene el brazo.

Figura 79: Brazo de 3 extremidades.



Fuente: Autor

⁴ <http://www.maplesoft.com/applications/view.aspx?SID=6850&view=html> visitada el 08/09/2010 hora de visita a las 9 am.

Convenciones:

A_i : articulación número i

L_i : eslabón falange número i

θ_i : ángulo de inclinación número i con respecto al eje X

4.5.2.1 Modelado por método de lagrange

Este método de modelado es el recomendado por diversos autores. Para dicho fin, se analiza la energía potencial y cinética del sistema.

$$L = K - PEc.(37)$$

K: energía cinética.

P: energía potencial.

Para cuestiones prácticas y dado que el movimiento de L_2 Y L_3 son dependientes del cambio de su respectivo ángulo, más el de los ángulos anteriores decimos:

$$\beta = (\theta_1 + \theta_2)Ec.(38)$$

$$\alpha = (\beta + \theta_3) = (\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)Ec.(39)$$

De tal forma la energía potencial en cada falange, está dada por:

$$P_1 = m_1 g \text{ seno } \theta_i = m_1 g \text{ seno } \theta Ec.(40)$$

$$P_2 = m_2 g \text{ seno } \beta Ec.(41)$$

$$P_3 = m_3 g \text{ seno } \alpha Ec.(42)$$

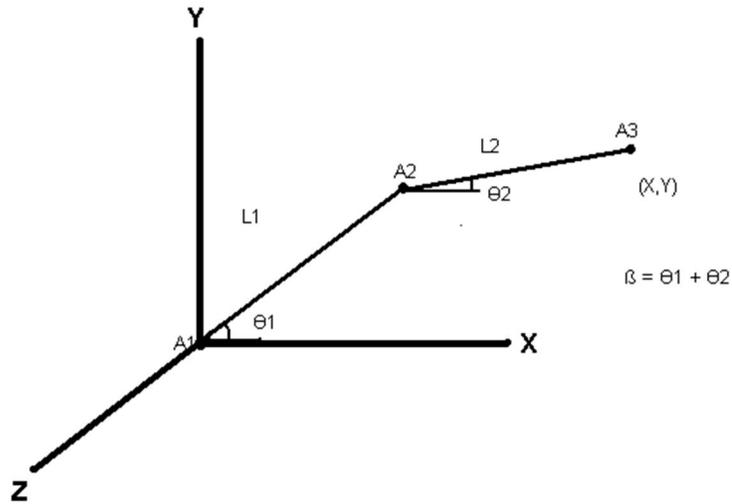
$$P_T = m_1 g \text{ seno } \theta + m_2 g \text{ seno } \beta + m_3 g \text{ seno } \alpha Ec.(43)$$

Suponemos que la velocidad del movimiento es relativamente pequeña y que la masa de cada falange se concentra en su extremo de tal forma que las energías cinéticas serán:

$$K_1 = \frac{m_1 L_1^2 \dot{\theta}^2}{2} Ec.(44)$$

Para K_2 debemos definir la velocidad angular en términos del radio desde el origen del sistema al punto más extremo, Figura [80].

Figura80:Diagrama de K₂.



Fuente: Autor

$$X = L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos \beta$$

$$Y = L_1 \operatorname{seno} \theta_1 + L_2 \operatorname{seno} \beta$$

$$X = -L_1 \operatorname{seno} \theta^* \theta - L_2 \operatorname{seno} \beta^* \beta \text{ Ec. (45)}$$

$$Y = L_1 \cos \theta^* \theta - L_2 \cos \beta^* \beta \text{ Ec. (46)}$$

La energía cinética K₂ será

$$K_2 = \frac{m_2}{2} S + S \text{ Ec. (47)}$$

Donde S = [X, Y] (referencia libros fundamentos de robótica Análisis y control de Tsuneoyushikawa).

De tal forma obtenemos

$$K_2 = \frac{m_2}{2} (L_1^2 \dot{\theta}^2 + L_2^2 \dot{\beta}^2 + 2 L_1 L_2 \cos(\theta - \beta) \dot{\theta}^* \dot{\beta}) \text{ Ec. (48)}$$

Para K₃ repetimos el mismo procedimiento de K₂ teniendo en cuenta esta vez α

$$K_3 = \frac{m_3}{2} (L_1^2 \dot{\theta}^2 + L_2^2 \dot{\beta}^2 + L_3^2 \dot{\alpha}^2 + 2 L_1 L_2 \cos(\theta - \beta) \dot{\theta}^* \dot{\beta} + 2 L_1 L_3 \cos(\theta - \alpha) \dot{\theta}^* \dot{\alpha} + 2 L_2 L_3 \cos(\beta - \alpha) \dot{\beta}^* \dot{\alpha}) \text{ Ec. (49)}$$

$$K_T = \left(\frac{m_1+m_2+m_3}{2}\right)L_1^2\theta^2 + \left(\frac{m_2+m_3}{2}\right)L_2^2\beta^2 + \left(\frac{m_3+m_3^2\alpha^2}{2}\right) + m_3 L_1 L_3 \cos(\theta - \alpha) \theta * \alpha + m_3 L_2 L_3 \cos(\beta - \alpha) \beta * \alpha + \left(\frac{m_2+m_3}{2}\right)L_1 L_2 \cos(\theta - \beta) \theta * \beta \text{Ec. (50)}$$

Entonces:

$$t_1 = \frac{d(\partial K_T / \partial \theta)}{dt} - \frac{\partial K_T}{\partial \theta} + \frac{\partial P_T}{\partial \theta} \text{Ec. (51)}$$

$$t_2 = \frac{d(\partial K_T / \partial \beta)}{dt} - \frac{\partial K_T}{\partial \beta} + \frac{\partial P_T}{\partial \beta} \text{Ec. (52)}$$

$$t_3 = \frac{d(\partial K_T / \partial \alpha)}{dt} - \frac{\partial K_T}{\partial \alpha} + \frac{\partial P_T}{\partial \alpha} \text{Ec. (53)}$$

Operando y ordenando se obtiene:

$$\begin{matrix} M_{11} & M_{12} & M_{13}\theta & C_{11} & C_{12}\beta & C_{13}\alpha\theta & N_1 & t_1 \\ M_{21} & M_{22} & M_{23}\beta & +C_{21}\theta & C_{22} & C_{23}\alpha\beta & +N_2 & = t_2 \text{Ec. (54)} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33}\alpha & C_{31}\theta & C_{32}\beta & C_{33}\alpha & N_3 & t_3 \end{matrix}$$

$$M_{11} = m_1 L_1^2 + m_2 L_1^2 + m_3 L_1^2 \text{Ec. (55)}$$

$$M_{12} = (L_1 L_2 m_2 + L_1 L_2 m_3) \cos(\theta - \beta) \text{Ec. (56)}$$

$$M_{13} = m_3 L_1 L_3 \cos(\theta - \alpha) \text{Ec. (57)}$$

$$M_{21} = (L_1 L_2 m_2 + L_1 L_2 m_3) \cos(\theta - \beta) \text{Ec. (58)}$$

$$M_{22} = (m_2 L_2^2 + m_3 L_2^2) \text{Ec. (59)}$$

$$M_{23} = m_3 L_2 L_3 \cos(\beta - \alpha) \text{Ec. (60)}$$

$$M_{31} = m_3 L_1 L_3 \cos(\theta - \alpha) \text{Ec. (61)}$$

$$M_{32} = m_3 L_2 L_3 \cos(\beta - \alpha) \text{Ec. (62)}$$

$$M_{33} = m_3 L_3^2 \text{Ec. (63)}$$

$$C_{11} = C_{22} = C_{33} = 0 \text{Ec. (64)}$$

$$C_{12} = (L_1 L_2 m_2 + L_1 L_2 m_3) \text{seno}(\theta - \beta) \beta \text{Ec. (65)}$$

$$C_{13} = m_3 L_1 L_3 \text{seno}(\theta - \alpha) \alpha \text{Ec. (66)}$$

$$C_{21} = - (L_1 L_2 m_2 + L_1 L_2 m_3) \text{seno}(\theta - \beta) \theta \text{Ec. (67)}$$

$$C_{23} = m_3 L_2 L_3 \text{seno}(\beta - \alpha) \alpha \text{Ec. (68)}$$

$$C_{31} = m_3 L_1 L_3 \text{seno}(\theta - \alpha) \theta \text{Ec. (69)}$$

$$C_{32} = m_3 L_2 L_3 \text{seno}(\beta - \alpha) \beta \text{Ec. (70)}$$

$$N_1 = m_1 g \cos\theta \text{Ec. (71)}$$

$$N_2 = m_2 g \cos\beta \text{Ec. (72)}$$

$$N_3 = m_3 g \cos\alpha \text{Ec. (73)}$$

M= fuerza de inercia
 C= fuerza centrifugas
 N= fuerza de coriolis

Reemplazando valores

$$\begin{array}{ll} m_1=1.25 \times 10^{-2} \text{ Kg} & L_1=0.025\text{m} \\ m_2=1 \times 10^{-2} \text{ Kg} & L_2=0.02\text{m} \\ m_3=1.25 \times 10^{-2} \text{ Kg} & L_3=0.025\text{m} \end{array}$$

Suponiendo la mano cera como punto de operación, entonces

$$\theta=90^\circ, \quad \beta=180^\circ, \quad \alpha=270^\circ$$

Obtenemos

$$\begin{array}{ccccccc} 22 \times 10^{-6} & 5 \times 10^{-6} & -6.2 \times 10^{-6} \theta & \emptyset & 1.2 \times 10^{-6} \beta & \emptyset & \theta & \emptyset \\ \emptyset & 9 \times 10^{-6} & \emptyset \beta & +11.2 \times 10^{-6} \theta & \emptyset & -6.2 \times 10^{-6} \alpha \beta & \emptyset & +1 \\ -6.2 \times 10^{-6} & \emptyset & 7.8 \times 10^{-6} \alpha & \emptyset & 6.2 \times 10^{-6} \beta & \emptyset & \alpha & \emptyset \end{array}$$

$$\begin{array}{l} t_1 \\ = t_2 \\ t_3 \end{array}$$

Retornamos a las ecuaciones, para linealizar el sistema

$$\begin{array}{l} \theta = 45.4 \times 10^3 t_1 - 228.5 \times 10^3 \beta + 285 \times 10^3 \alpha - 56.90 \beta^2 \\ \beta = 111 \times 10^3 t_2 - 1.25 \theta^2 + 694 \times 10^3 \alpha^2 + 11.11 \times 10^3 \\ \alpha = 128 \times 10^3 t_3 + 0.8 \theta - 0.8 \beta^2 \end{array}$$

Despejando θ , β y α se obtiene

$$\begin{array}{l} \theta = 58 \times 10^3 t_1 - 32 \times 10^3 t_2 + 46.5 \times 10^3 t_3 + 0.35 \theta - 73 \beta - 0.19 \alpha - 3.2 \times 10^3 \quad (F1) \\ \beta = 111.1 \times 10^3 t_2 - 1.25 \theta + 694 \times 10^3 \beta + 11 \times 10^3 \quad (F2) \\ \alpha = 46 \times 10^3 t_1 - 25.6 \times 10^3 t_2 + 165 t_3 + 0.28 \theta - 59 \beta - 0.15 \alpha - 2.5 \times 10^3 \quad (F3) \end{array}$$

Hallamos las variables de desviación, para dicho fin se supone:

$$\begin{array}{l} t_1 = t_2 = t_3 = 3\text{N-m} \\ \theta = \beta = \alpha = \emptyset \\ \theta = \emptyset = 0.35 \theta^2 - 73 \beta^2 - 0.19 \alpha^2 + 212.8 \times 10^3 \\ \beta = \emptyset = -1.25 \theta^2 + 694 \times 10^3 \beta^2 + 344 \times 10^3 \\ \alpha = \emptyset = 0.28 \theta^2 - 59 \beta^2 - 0.15 \alpha^2 - 558.7 \times 10^3 \\ \theta = W\theta = 659.3 \\ \beta = W\beta = 535 \\ \alpha = W\alpha = 10403 \\ t_1 d = t_2 d = t_3 d = t_i - t_{is} = t_i - 3 \end{array}$$

$$W\theta_d = W\theta - W\theta_s = W\theta - 659.3$$

$$W\beta_d = W\beta - W\beta_s = W\beta - 535.4$$

$$W\alpha_d = W\alpha - W\alpha_s = W\alpha - 10403$$

$$\frac{dW\theta}{dt} = W\theta$$

$$\frac{dW\beta}{dt} = W\beta$$

$$\frac{dW\alpha}{dt} = W\alpha$$

Linealizando el sistema se obtiene

$$\frac{dF1}{dW\theta} = 0.7 W\theta = 461.5 \qquad \frac{dF1}{dt_1} = 58 \times 10^3$$

$$\frac{dF1}{dW\beta} = -146 W\beta = -78 \times 10^3 \qquad \frac{dF1}{dt_2} = -32 \times 10^3$$

$$\frac{dF1}{dW\alpha} = -0.38 W\alpha = -3.9 \times 10^3 \qquad \frac{dF1}{dt_3} = 46 \times 10^3$$

$$\frac{dF2}{dW\theta} = -2.5 W\theta = 1.648 \times 10^3 \qquad \frac{dF2}{dt_1} = \emptyset$$

$$\frac{dF2}{dW\beta} = 1.38 W\beta = 743.5 \qquad \frac{dF2}{dt_2} = 111 \times 10^3$$

$$\frac{dF3}{dW\alpha} = \emptyset \qquad \frac{dF2}{dt_3} = \emptyset$$

$$\frac{dF3}{dW\theta} = 0.565 W\theta = 369.2 \qquad \frac{dF3}{dt_1} = 46 \times 10^3$$

$$\frac{dF3}{dW\beta} = -118 W\beta = -63 \times 10^3 \qquad \frac{dF3}{dt_2} = -25.6 \times 10^3$$

$$\frac{dF3}{dW\alpha} = -0.3 W\alpha = -3.12 \times 10^3 \qquad \frac{dF3}{dt_3} = 10^5$$

Ahora reemplazando por variable de estado

$$\begin{aligned} X_1 &= W\theta X_1 = W\theta \\ X_2 &= W\beta X_2 = W\beta \\ X_3 &= W\alpha X_3 = W\alpha \end{aligned}$$

Para la matriz de variables de estado se desprecia las perturbaciones por corioles para efecto prácticos obteniéndose:

$$\begin{aligned} X_1 & \quad 461.5 \quad -78 \times 10^3 \quad -3.9 \times 10^3 X_1 \quad 58 \times 10^3 \quad -32 \times 10^3 \quad 46 \times 10^3 t_1 \\ X_2 & = 1.6 \times 10^3 \quad 743.5 \quad \emptyset \quad X_2 + \quad \emptyset \quad 111 \times 10^3 \quad \emptyset \quad t_2 \\ X_3 & \quad 369.2 \quad -63 \times 10^3 \quad -3.12 \times 10^3 X_3 \quad 46 \times 10^3 \quad -25.6 \times 10^3 \quad 165 \quad t_3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Y_1 & \quad 1 \quad 0 \quad 0 X_1 \\ Y_2 & = 0 \quad 1 \quad 0 X_2 \\ Y_3 & \quad 0 \quad 0 \quad 1 X_3 \end{aligned}$$

Se analiza la controlabilidad y la observabilidad

Test de controlabilidad

$$e = [B \quad ABA^2B]$$

$$AB = \begin{bmatrix} -0.015 \times 10^{10} & -8.57 \times 10^{10} & 0.0021 \times 10^{10} \\ 0.093 \times 10^{10} & 0.0021 \times 10^{10} & 0.0074 \times 10^{10} \\ -0.0122 \times 10^{10} & 0.69 \times 10^{10} & 0.0016 \times 10^{10} \end{bmatrix}$$

$$A^2B = \begin{bmatrix} -0.71 \times 10^{14} & -0.9 \times 10^{14} & -0.57 \times 10^{14} \\ -0.0018 \times 10^{14} & -1.37 \times 10^{10} & 0.0009 \times 10^{14} \\ 0.0617 \times 10^{14} & -0.51 \times 10^{14} & 0.0459 \times 10^{14} \end{bmatrix}$$

$$e = \begin{bmatrix} 58 \times 10^3 & -32 \times 10^3 & 46 \times 10^3 & 150 \times 10^6 & -8.57 \times 10^{10} & 21 \times 10^6 \\ \emptyset & 111 \times 10^3 & \emptyset & 930 \times 10^6 & 21 \times 10^6 & 74 \times 10^6 \\ 46 \times 10^3 & -25.6 \times 10^3 & 165 & -122 \times 10^6 & 0.69 \times 10^{10} & 16 \times 10^6 \\ & & & -0.71 \times 10^{14} & -0.9 \times 10^{14} & -0.57 \times 10^{14} \\ & & & -1.8 \times 10^{11} & -1.37 \times 10^{14} & 9 \times 10^{10} \\ & & & 6.17 \times 10^{12} & -0.51 \times 10^{14} & 4.59 \times 10^{12} \end{bmatrix}$$

Existe independencia lineal entre los vectores fila su rango es completo, el sistema es controlable.

Test de observabilidad

$$\begin{matrix} C \\ \emptyset = CA \\ CA^2 \end{matrix}$$

$$CA = \begin{bmatrix} 0.046 \times 10^4 & -7.8 \times 10^4 & -0.39 \times 10^4 \\ 0.16 \times 10^4 & 0.074 \times 10^4 & \emptyset \\ 0.0369 \times 10^4 & -6.3 \times 10^4 & -0.312 \times 10^4 \end{bmatrix}$$

$$CA^2 = \begin{bmatrix} -1.28 \times 10^8 & 1.5171 \times 10^8 & 0.1037 \times 10^8 \\ 0.0193 \times 10^8 & -1.242 \times 10^8 & -0.0624 \times 10^8 \\ -1.01 \times 10^8 & 1.2 \times 10^8 & 0.082 \times 10^8 \end{bmatrix}$$

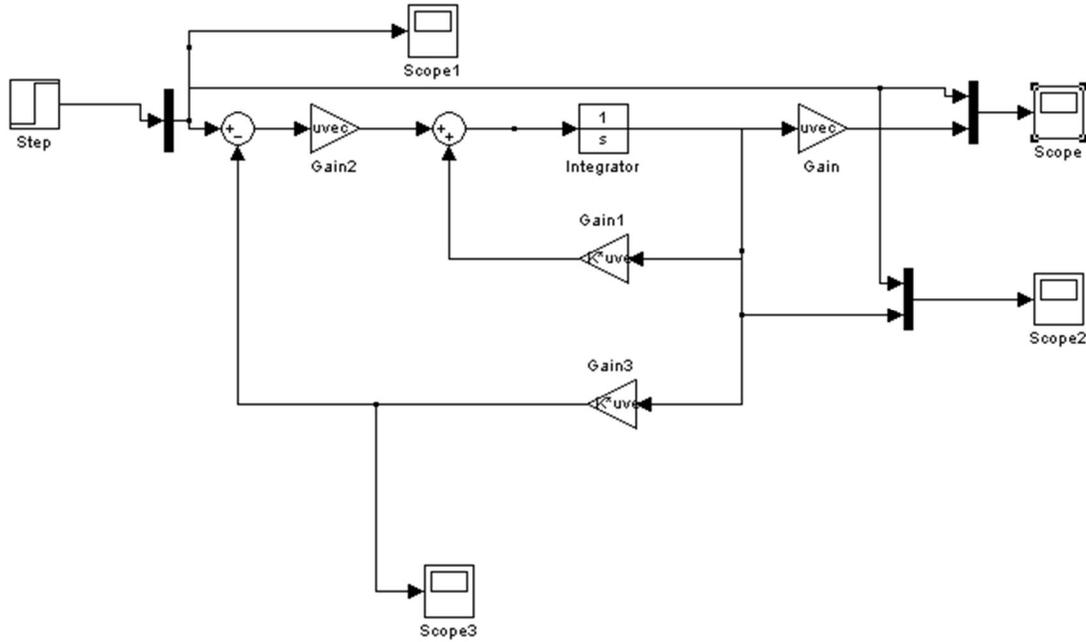
$$\emptyset = \begin{bmatrix} & & 1 & 0 & 0 \\ & & 0 & 1 & 0 \\ & & 0 & 0 & 1 \\ 0.046 \times 10^4 & -7.8 \times 10^4 & -0.39 \times 10^4 & & \\ 0.16 \times 10^4 & 0.074 \times 10^4 & \emptyset & & \\ 0.0369 \times 10^4 & -6.3 \times 10^4 & -0.312 \times 10^4 & & \\ & -1.28 \times 10^8 & 1.5171 \times 10^8 & 0.1037 \times 10^8 & \\ & 0.0193 \times 10^8 & -1.242 \times 10^8 & -0.0624 \times 10^8 & \\ & -1.01 \times 10^8 & 1.2 \times 10^8 & 0.082 \times 10^8 & \end{bmatrix}$$

Los vectores columna son linealmente independientes el sistema es observable, se produce a hallar los estimadores y demás. Se simulamos en el programa de Matlab simulink para ver en comportamiento en la siguiente Figuras[81].

Retro alimentación:

```
clearall
closeall
A=[461.5 -78000 -3900; 1600 743.5 0; 369.2 -63000 -3120 ];
B=[58000 -32000 46000; 0 111000 0; 46000 -25600 165];
C=[1 0 0; 0 1 0; 0 0 1];
D=zeros(3);
CP=[-280000 -250000 -22000];
K=place(A,B,CP);
```

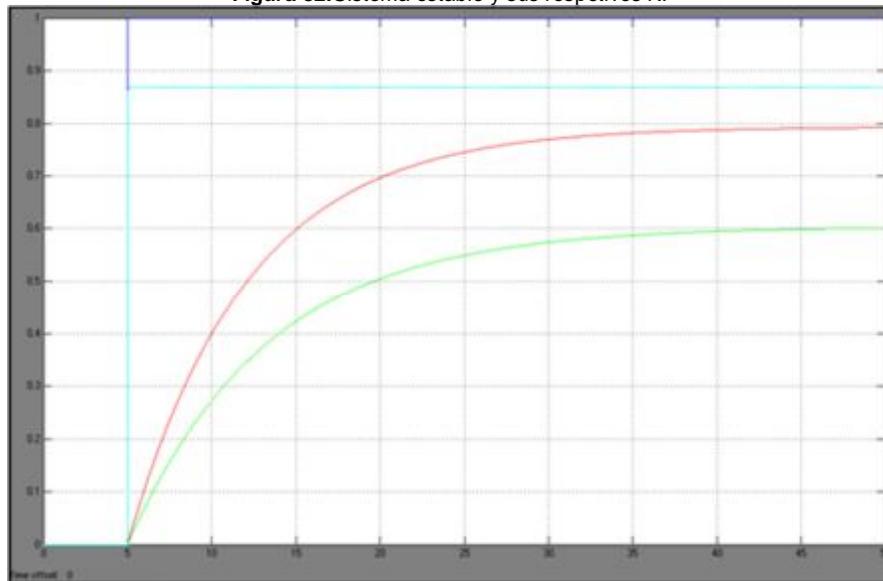
Figura 81: Diagrama de bloque de retroalimentación



Fuente: Autor

En la Figura [82], se ve el comportamiento del diagrama de bloque anterior endonde muestra que el sistema es estable y sus respectivos K.

Figura 82: Sistema estable y sus respectivos K.

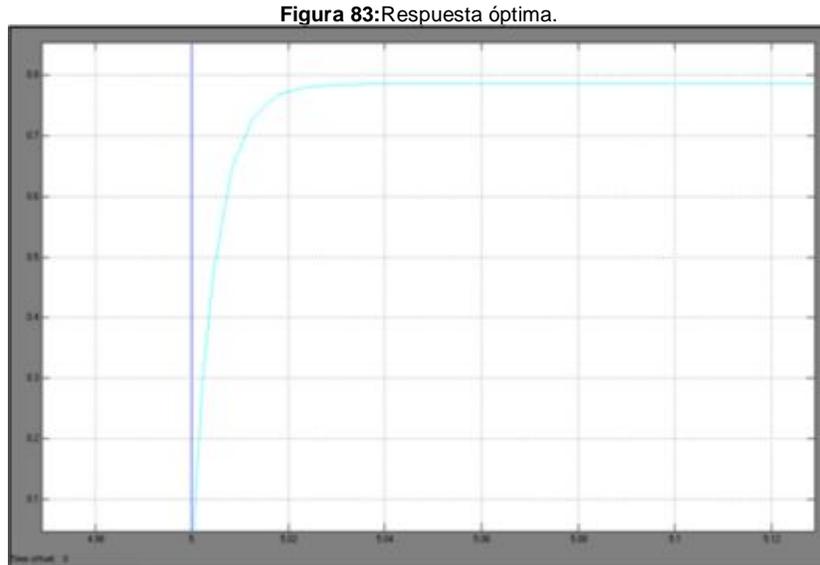


Fuente: Autor

La grafica muestra que el sistema es estable y sus respectivos k son:

```
K =  
-0.0059 -0.1125  0.4126  
 0.0144  2.2590  0.0000  
 6.1144  0.0176 -0.6050
```

En la Figura [82], la línea roja parece una entrada escalón, porque la curva es muy pequeña. Por lo siguiente se da zoom a la línea verde claro y se puede observar en la Figura [83], en donde se demuestra que no es una entrada escalón.



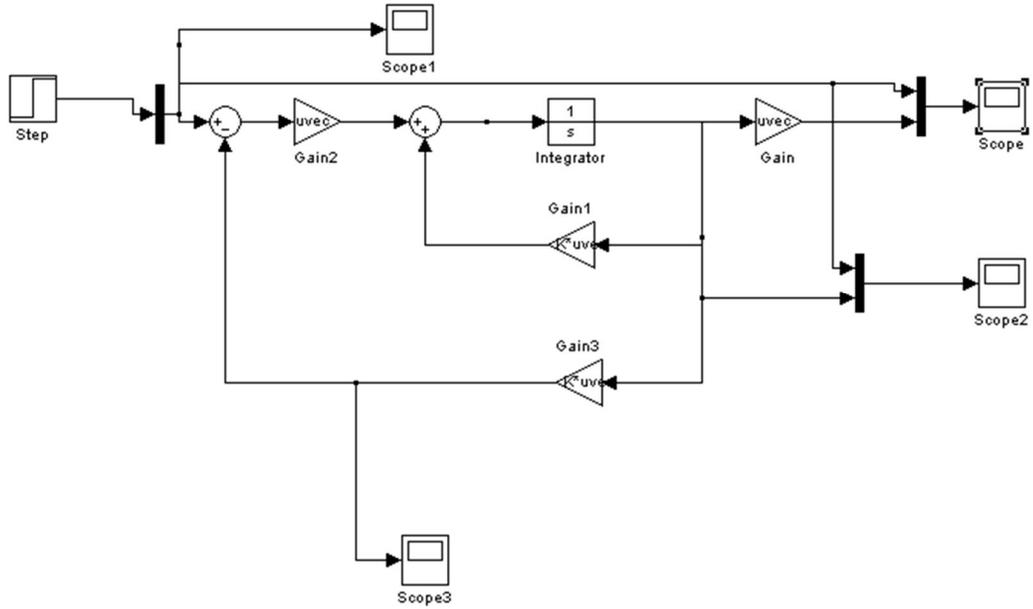
Fuente: Autor

Esta Figura [83], es la mejor respuesta óptima que se obtuvo

Retroalimentación óptima:

```
clearall  
closeall  
clc  
A=[461.5 -78000 -3900; 1600 743.5 0; 369.2 -63000 -3120];  
B=[58000 -32000 46000; 0 111000 0; 46000 -25600 165];  
C=[1 0 0; 0 1 0; 0 0 1];  
Q=C'*C;  
R=1*eye(3);  
K=lqr(A,B,Q,R);
```

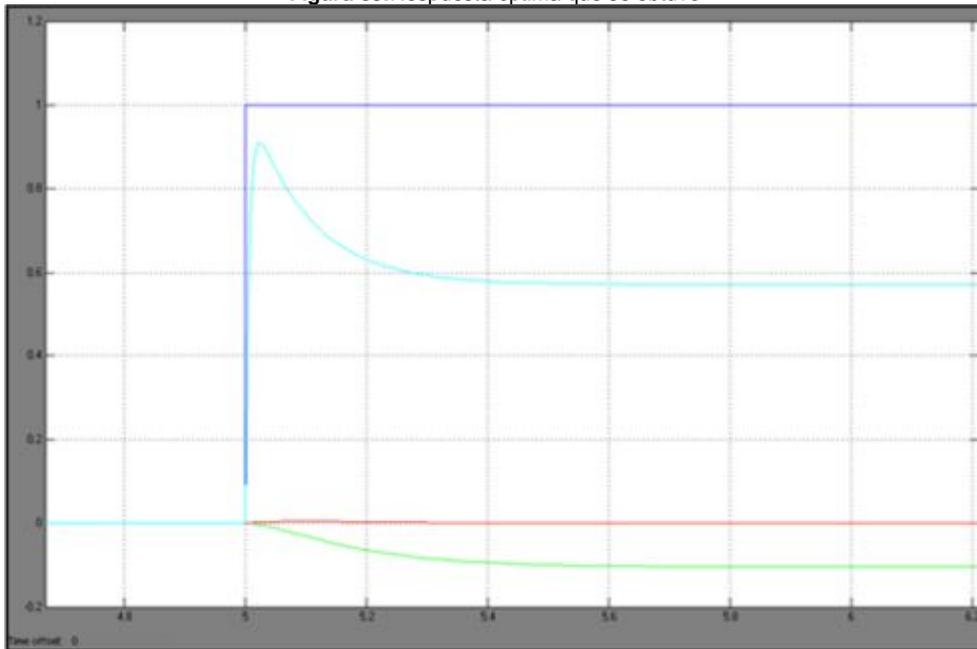
Figura 84: Diagrama de bloque de retroalimentación óptima



Fuente: Autor

En la Figura [84] se puede observar la respuesta que se obtuvo del diagrama de bloque de retroalimentación óptima de la Figura [85].

Figura 85: Respuesta óptima que se obtuvo



Fuente: Autor

En la Figura [85], se puede observar la mejor respuesta óptima que se obtuvo y se muestra que el sistema es estable y sus respectivos k son:

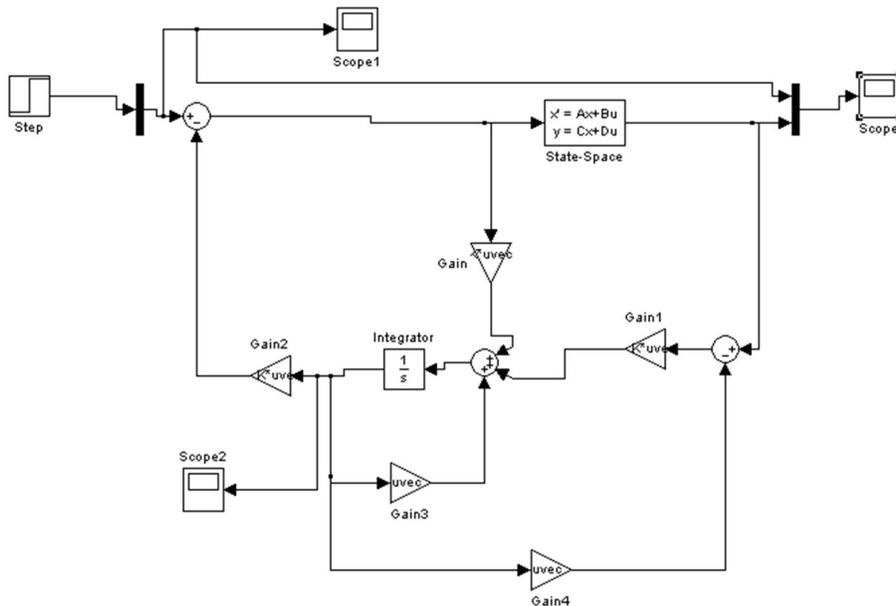
K =
 0.4463 -0.1748 0.5296
 -0.3728 1.2070 -0.5570
 0.8156 -0.0540 -0.5801

Estimador:

```

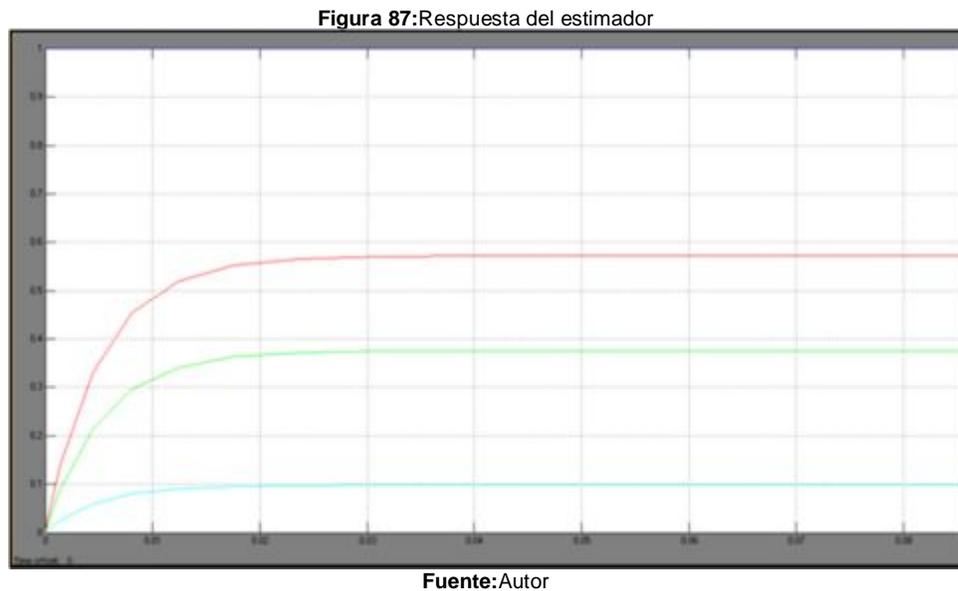
clc
clearall
A= [0.35 -73 -0.19; -1.25 0.6944 0; 0.28 -59 -0.15];
B= [0.058 -0.032 0.0465; 0 0.1111 0; 0.046 -0.0256 165];
C= [1 0 0; 0 1 0; 0 0 1];
D=zeros(3);
CP=[-0.192 -0.194 -210];
K=place(A,B,CP);
CL=5*K;
L=place(A',C',CL)';
    
```

Figura 86:Diagrama de bloque estimador.



Fuente: Autor

En la Figura [86] se puede observar la respuesta que se obtuvo del diagrama de bloque del estimador de la Figura [87].



En la Figura [87], es la mejor respuesta óptima que se obtuvo y muestra que el sistema es estable y sus respectivos k son:

$$K = \begin{matrix} 0.0160 & -1.3659 & -0.0632 \\ 0.0144 & 0.0067 & -0.0000 \\ -0.0002 & 0.0313 & -0.0050 \end{matrix}$$

5. RECURSOS Y PRESUPUESTO

En el desarrollo de este proyecto se conto con el recurso y el presupuesto para el desarrollo y culminación e los brazos que son:

5.1 RECURSOS

- Libros de diseño, programación y electrónica.
- Software de diseño mecánico y electrónico.
- El hangar de la Universidad de San Buenaventura.
- Los profesores que ayudaron al desarrollo de este proyecto con sus conocimientos.
- Los técnicos del hangar de la universidad con la construcción de los brazos.
- Internet.

5.2 PRESUPUESTO

El presupuesto de toda la tesis es de alrededor de 2.050.000 de pesos

- 1.900.000 pesos en la construcción del servomecanismo copiador.
- 150.000 pesos en papelería de la tesis.

6. CONCLUSIONES

Se concluyo que la ventaja de los servomotores es su Torque, y el servomotor cambia de posición por la acción de control y no por una fuerza externa. La única desventaja es que originalmente solo trabajan de 0° a 180° pero se pueden modificar fácilmente para que giren 360° y así se pueden utilizar como motores y se les puede controlar la velocidad y el sentido de giro.

Para la escogencia del rodamiento se tuvo en cuenta que el proyecto es un brazo, y en este sistema solo manejará cargas axiales y no radiales. Por este motivo se escogieron los rodamientos de carga axial de simple efecto. Pero también se tubo en cuenta las bajas revoluciones, puesto que el rodamiento de la base solo girará 180 grados en periodos cortos de tiempo y un diámetro específico, el cual será designado por una parte de eje del servomotor y las especificaciones del diseño de la base giratoria.

Para la escogencia material fue aluminio porque es un elemento metálico que cumple con las características físicas y mecánicas que son importantes para este proyecto, también su precio es muy económico y que es un material ligero, resistente a la corrosión, soldable, blando y moldeable, Permite la fabricación de piezas por fundición, forja y extrusión.

Los software de análisis que se utilizaron para el proyecto, fueron escogidos porque están diseñados para la necesidad del diseño mecánico y el diseño electrónico, también para mirar y analizar por medio de simulaciones los comportamiento mecánico del brazos y el circuito electrónico, para hacer mas fácil la construcción del diseño mecánico y electrónico,

7. GLOSARIO

- **Articulación:** Es el medio de contacto que hace a la unión entre dos eslabones.
- **Eslabón:** Estructura que hace parte de un cuerpo.
- **Control:** Regulación manual o automática sobre un sistema.
- **Esfuerzo:** Es el resultado de una división entre una fuerza y el área en que se aplica.
- **Háptico:** Da referencia a sistemas de contacto y sensaciones, la palabra no existe en la Real Academia de la Lengua Española
- **Matriz:** Una ordenación rectangular de elementos algebraicos que pueden sumarse y multiplicarse.
- **Sensor:** Es un dispositivo capaz de transformar magnitudes físicas o químicas, llamadas variables de instrumentación, en magnitudes eléctricas.
- **Servomotor:** Motor de corriente continua con un sistema de engranajes que trabajan como reductores y un sistema de control electrónico.
- **Sistema:** Es una entidad material formada por partes organizadas o de sus "componentes" que interactúan entre sí.
- **Teleoperado:** Es aquel sistema que permite gobernar un elemento robótico denominado esclavo (controlar su actuar) ubicado este en una zona remota a través de un elemento maestro localizado en el punto de trabajo del operador.
- **Tele presencia:** Presencia remota o medio que proporciona a la persona la sensación de estar físicamente en otro lugar.
- **Torque:** Fuerza aplicada en una palanca para producir un movimiento de rotación en un cuerpo.
- **Microcontrolador:** Es un circuito integrado programable que contiene todos los componentes necesarios, para controlar el funcionamiento de una tarea determinada.
- **Modelado:** Es una técnica cognitiva que consiste en crear una representación ideal de un objeto real mediante un conjunto de simplificaciones y abstracciones, cuya validez se pretende constatar.
- **Modelo:** Representación de la realidad por medio de abstracciones. Los modelos enfocan ciertas partes importantes de un sistema, restándole importancia a otras.

- **Pantógrafo:**Es un mecanismo articulado basado en las propiedades de los paralelogramos. Como instrumento de dibujo, permite copiar una figura o reproducirla a una escala distinta.
- **Estilete:**es un instrumento de escritura y muchos estiletes son marcadamente curvos para facilitar su manejo.
- **Joystick:**o **palanca de mando** es un dispositivo de control de dos o tres ejes que se usa desde una computadora o videoconsola hasta un transbordador espacial o los aviones de caza, pasando por grúas.
- **Folios:**Hoja de papel, de pergamino o de otro material de un libro o cuaderno.

BIBLIOGRAFÍA

18. Mecánica vectorial para ingenieros, Ferdinand p. Beer. E. Russell Johnston, sexta edición, Mc-GRAW-HILL 1998.
19. Diseño de ingeniería mecánica, Joseph E. Shigley. Charles R. Mischke, sexta edición, Mc-GRAW-HILL 2002.
20. Microcontrolador PIC 16F84 Desarrollo de proyectos, Enrique palacios. Fernando Remiro. Lucas J. López, segunda edición, Alfaomega 2006.
21. Robótica industrial, editorial MC GRAW HILL, 1994.
22. Ingeniería de control 2da edición - w bolton – alfaomega.
23. Ingeniería de control moderna ogata (sistemas lineales).
24. Empresa quanser. Consultada el 7 de agosto del 2010. <http://www.youtube.com/watch?v=xQGkokPhzsg&feature=related>
25. Empresa quanser. Consultada el 7 de agosto del 2010. http://www.youtube.com/watch?v=Q4s_TXP9jl&feature=related
26. ALUMAC C.A. DE C.V. ALUMINIO. Consultada el 8 de agosto del 2010. <http://www.alumac.com.mx/prod/aluminio.html>
27. METALMECANICA. ALUMINIO1060. Consultada el 10 de agosto del 2010. http://www.metalmecanica.com/mm/secciones/MM/ES/MAIN/R/REFERENCIA1/documento_HTML.jsp?idDocumento=12274
28. MICROCHIPi. data sheet PIC16F877a. Consultada el 11 de agosto del 2010. <http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/39582b.pdf>
29. FAIRCHILD. LM7805. Consultada el 11 de agosto del 2010. <http://www.fairchildsemi.com/ds/LM/LM7805.pdf>
30. CONVERTOR ANALÓGICODIGITAL DEL PIC16F877. Consultada el 11 de agosto del 2010. <http://server-die.alc.upv.es/assignaturas/PAEEES/2004-05/A02-A03%20-%20Conversor%20AD%20del%20PIC16F877.pdf>

31. Empresa quanser. Consultada el 11 de agosto del 2010. <http://www.quanser.com/choice.asp>

32. Empresa quanser. Consultada el 11 de agosto del 2010. http://www.quanser.com/english/downloads/products/Specialty/5DOF_HapticWand_PIS_032008.pdf

33. Por John W. Nash. Pantógrafo para su taller. Consultada el 11 de agosto del 2010. <http://www.mimecanicapopular.com/vernota.php?n=329>

34. Empresa EnduranceRobotics. Consultada el 14 de agosto del 2010. <http://www.endurance-robotics.com/page.aspx?id=4>

35. ElixabeteBengoechea, Emilio Sánchez y Jorge Juan Gil. Palanca Háptica Versátil de Bajo Coste para Simuladores de Conducción y Entrenamiento. Consultada el 14 de agosto del 2010. http://6597155071174327270-a-1802744773732722657-sites.googlegroups.com/site/jorgejuangilnobajas/files/Bengoechea06-CIIPO-Palanca.pdf?attachauth=ANoY7cowLC4Ebhq2cgkuv9epxu3RDh8SKEEHV9K0IPdbMZwSAm72Qz70JpAh7U7yUoDh0unzUPUA1TjtfaEO_Gwn_m7qaKjt2S0JM6ZwQ5DuUf6ZTgt8g4eXAv8KVz0zTAhnHGIVSCJUrYat_IVwcZo-sBnRwvbMmu95Yo9QGlrFY0aFzuhcC6Fp4Le9TPqjtLbi3n1fIQU3srlGP1Hi_IM65zi0aw9RJcb6e5VOOTuBLroCakTmbHw%3D&attredirects=0

36. SOCIETY OF ROBOTS.ROBOT ARM CALCULATOR. Consultada el 14 de agosto del 2010. http://www.societyofrobots.com/robot_arm_calculator.shtml

37. Denavit-Hartenberg. Cinemática de los manipuladores Robótica. Consultada el 14 de agosto del 2010. http://www.uhu.es/omar_sanchez/Omar%27s%20Resources/Cinematicadelos_manipuladores.pdf

38. Iñaki Aliaga para obtener la titulación de Ingeniero Industrial. Arquitecturas de Teleoperación con Reflexión de Fuerza sobre un Sistema Master-Slave de 2 GDL. Consultada el 20 de agosto del 2010. <http://www.tecnun.es/asignaturas/control1/proyectos/teleop2D/anso/index.htm>

39. Carlos F. Rodríguez, Hugo Quintero, Helena Aschner. Movimiento del brazo humano: de los tres planos a las tres dimensiones. Consultada el 01 de septiembre del 2010 <http://revistaing.uniandes.edu.co/pdf/rev22art4.pdf?ri=741e8a08c8a99d36aa38401f45b19b4f>
40. Empresa SKF. Rodamientos axiales de bolas, de simple efecto. Consultada el 01 de septiembre del 2010 http://www.skf.com/skf/productcatalogue/jsp/viewers/productTableViewer.jsp?tableName=1_8_1&maincatalogue=1&lang=es
41. 3º INGENIERÍA INDUSTRIAL AUTÓMATAS Y SISTEMAS DE CONTROL. PRÁCTICA SISTEMAS DE CONTROL CONTROL EN SIMULACIÓN DE UN MOTOR DE CC MEDIANTE PID. Consultada el 01 de septiembre del 2010 <http://isa.umh.es/asignaturas/asc/practicas/SimulacionMotorPID.pdf>
42. MaplesoftApplicationCenter.Robot Arm Modeling.Consultada el 01 de septiembre del 2010 <http://www.maplesoft.com/applications/view.aspx?SID=6850&view=html>
43. Compendio de Dibujo Técnico, ICONTEC, tercera edición, Instituto de normas técnicas y certificación 2006.
44. NORMAS ICONTEC. LA PRESENTACIÓN DE TRABAJOS ESCRITOS.Consultada el 15 de octubre del 2010. http://www.utp.edu.co/php/revistas/cafeconletras/docsFTP/92842sis_icontec.pdf

ANEXO A

PROGRAMA

```
LIST          P=16F877A
INCLUDE      <P16F877A.INC>

CBLOCK 0X0C
FACTORALTO          ; FACTOR POR EL QUE SE VA A MULTIPLICAR EL
TIEMPO
ENDC                ; PATRÓN DE 10 µS PARA OBTENER EL TIEMPO
EN ALTO.

TMR0_CARGA EQU    D'221' ; TMRO CARGADO CON UN TIEMPO DE 10 µS,
PARA UNA RESOLUCION DE 0.1 GRADOS

CERO_GRADOS      EQU    D'4'   ; TIEMPO EN ALTO PARA 0°.
MG996R 0.4 POSICION
TIEMPO_REFERENCIA EQU    D'10'

VALOR_MINIMO      EQU    CERO_GRADOS/TIEMPO_REFERENCIA

#DEFINE SERVO1    PORTB,7
#DEFINE SERVO2    PORTB,6
#DEFINE SERVO3    PORTB,5
#DEFINE SERVO4    PORTB,4

; ZONA DE CÓDIGOS *****

ORG 0
GOTO INICIO
ORG .4
GOTO TIMER0_INTERRUPCION

INICIO
BSF STATUS,RP0
MOVLW B'00000000
MOVWF PORTB          ; PUERTO B SALIDAS.
MOVLW B'00011111'    ; PUERTO A ENTRADA.
MOVWF PORTA
MOVLW B'00001001'    ; TMR0 CON PRESCALER
```

DE 4

```
MOVWF    OPTION_REG
BCF      STATUS,RP0
MOVLW   TMR0_CARGA
MOVWF    TMR0                ; CARGA EL TIMER 0.
MOVLW   B'10100000'
MOVWF    INTCON              ; AUTORIZA
```

INTERRUPCIÓN T01 Y LA GENERAL (GIE).
PRINCIPAL

```
MOVF    ADRESH,W            ; LEE EL PUERTO DE ENTRADA
ANDLW   B'11111111'        ; SE QUEDA CON LOS
BITS VÁLIDOS.
ADDLW   VALOR_MINIMO       ; PARA CONSEGUIR EL
TIEMPO MÍNIMO CORRESPONDIENTE A 0°.
MOVWF   FACTORALTO        ; VALOR ENTREGADO A
LA SUBROUTINA DE
GOTO    PRINCIPAL          ; ATENCIÓN A LA INTERRUPCIÓN.

; SUBROUTINA "TIMER0_INTERRUPCION"
```

```
CBLOCK
GUARDA_W
GUARDA_STATUS
TIMER0_CONTADORA            ; CONTADOR AUXILIAR.
ENDC
```

TIMER0_INTERRUPCION

```
CLRF    PORTB
MOVLW   B'11000001'
MOVWF   ADCON0              ;CANAL0, HABILITO
EL CONVERSOR A/D
CALL    CONVERSION
MOVF    ADRESH,W
MOVWF   SERVO1

MOVLW   B'11001001'
MOVWF   ADCON0              ;CANAL1, HABILITO
```

```

EL CONVERSION A/D
    CALL  CONVERSION
    MOVF  ADRESH,W
    MOVWF SERVO2

    MOVLW B'11010001'
    MOVWF ADCON0 ;CANAL2, HABILITO

EL CONVERSION A/D
    CALL  CONVERSION
    MOVF  ADRESH,W
    MOVWF SERVO3

    MOVLW B'11011001'
    MOVWF ADCON0 ;CANAL3, HABILITO

EL CONVERSION A/D
    CALL  CONVERSION
    MOVF  ADRESH,W
    MOVWF SERVO4

    MOVWF GUARDA_W ; GUARDA LOS VALORES
DE TENÍAN W Y STATUS EN EL
    SWAPF STATUS,W ; PROGRAMA
PRINCIPAL.

    MOVWF GUARDA_STATUS
    BCF STATUS,RP0 ; GARANTIZA QUE TRABAJA EN
EL BANCO 0.

    MOVLW TMR0_CARGA
    MOVWF TMR0
    DECFSZ TIMER0_CONTADORA,F
    GOTO FIN_TIMER0_INTERRUPCION
    BTFSC SERVO1 ; TESTEA EL
ANTERIOR ESTADO DE LA SALIDA.
    GOTO ESTABAALTO
    BTFSC SERVO2 ; TESTEA EL
ANTERIOR ESTADO DE LA SALIDA.
    GOTO ESTABAALTO
    BTFSC SERVO3 ; TESTEA EL
ANTERIOR ESTADO DE LA SALIDA.
    GOTO ESTABAALTO
    BTFSC SERVO4 ; TESTEA EL
ANTERIOR ESTADO DE LA SALIDA.
    GOTO ESTABAALTO

```

```

ESTABABAJO
    BSF  SERVO1
    BSF  SERVO2
    BSF  SERVO3                ; ESTABA BAJO Y LO PASA
A ALTO.
    BSF  SERVO4
    MOVF FACTORALTO,W          ; REPONE EL CONTADOR
NUEVAMENTE CON EL TIEMPO EN
    MOVWF    TIMER0_CONTADORA ; ALTO.
    GOTO    FIN_TIMER0_INTERRUPCION
ESTABAALTO
    BCF  SERVO1
    BCF  SERVO2
    BCF  SERVO3
    BCF  SERVO4
    MOVF FACTORALTO,W
    SUBLW    .200
    MOVWF    TIMER0_CONTADORA

FIN_TIMER0_INTERRUPCION
    SWAPF    GUARDA_STATUS,W    ; RESTAURA REGISTROS
W Y STATUS.
    MOVWF    STATUS
    SWAPF    GUARDA_W,F
    SWAPF    GUARDA_W,W
    BCF  INTCON,RBIF
    BCF  INTCON,TOIF

CONVERSION
    BCF  PIR1,ADIF                ;BORRO EL SEÑALIZADOR A/D
    BSF  ADCON0,GO                ;INICIO LA CONVERSION
BUCLE
    BTFSS PIR1,ADIF
    GOTO BUCLE

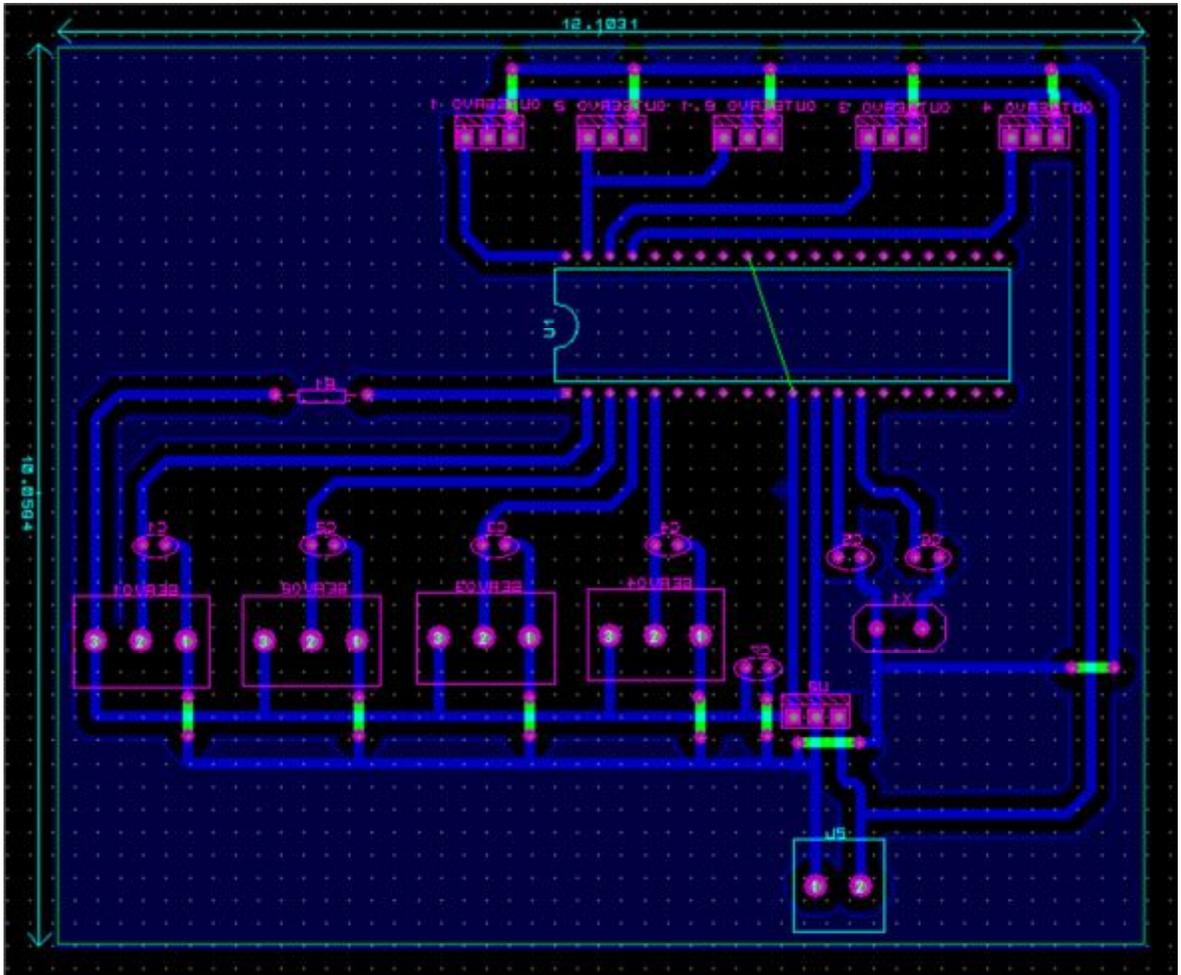
RETURN

END

```

ANEXO B

PCB O TRAZO DEL CIRCUITO ELETRONICO



ANEXO C

“PROPIEDADES DEL ALUMINIO 1060

Todas las propiedades disponibles del **aluminio 1060** se presentan a continuación.

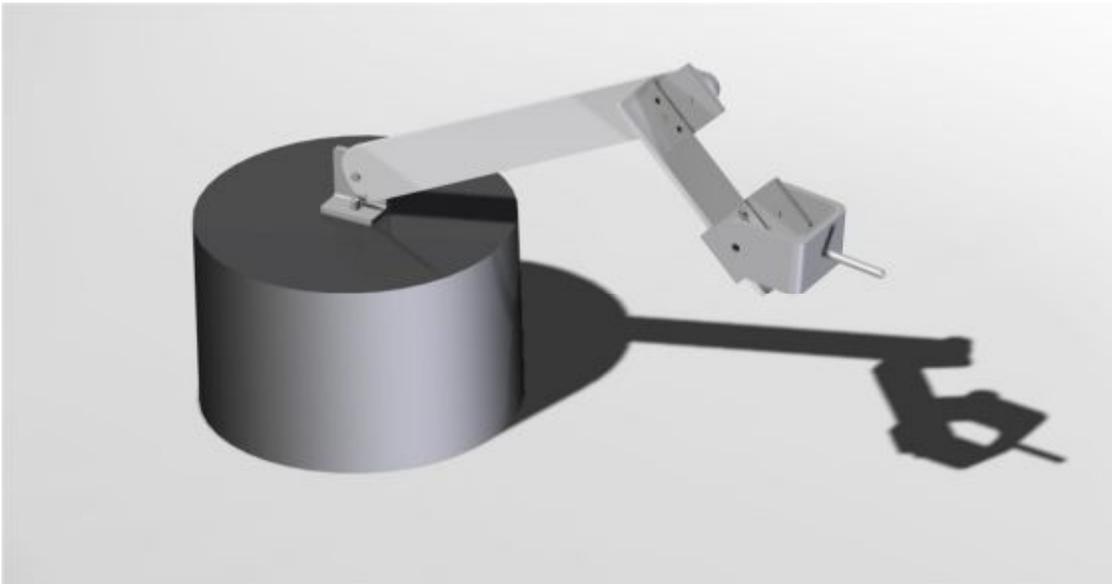
- **Propiedades de diseño:** Es una aleación esencialmente de aluminio puro con relativamente baja resistencia a la tracción. Es notable por sus excelentes características de soldabilidad y conformabilidad con buena resistencia a la corrosión. No puede ser endurecida por tratamiento térmico.
- **Aplicaciones:** Es usada comúnmente en la manufactura de equipo químico y vagones tanque.
- **Maquinabilidad:** La maquinabilidad del aluminio 1060 está entre aceptable y pobre, especialmente en condiciones de endurecido suave. Las características de mecanizado son mejores con endurecimientos severos (por trabajo en frío) tales como H16 y H18. Se puede usar cualquier herramienta de acero rápido de carburo y se recomienda el uso de lubricantes, aunque algunos cortes pueden realizarse en seco.
- **Conformado:** Esta aleación tiene una capacidad excelente para ser conformada por trabajo en frío o en caliente a través de técnicas comerciales.
- **Soldadura:** El aluminio 1060 se puede soldar por métodos comerciales estándar. Si se necesita metal de aporte deberá usarse el mismo aluminio 1060. Deben tomarse en cuenta algunas precauciones para el uso de soldadura por resistencia, como algunos experimentos de ensayo y error que pueden necesitarse para obtener buenos resultados.
- **Tratamiento térmico:** Esta aleación no endurece por tratamiento térmico. Puede ser recocida después del trabajo en frío. Ver "Recocido".
- **Forja:** Esta aleación puede forjarse en el rango de temperaturas comprendido entre 950 y 750 F.
- **Trabajo en caliente:** En caso de necesitarse trabajo en caliente, se puede hacer en el rango de 900 a 500 F.
- **Trabajo en frío:** Las características del aluminio 1060 para ser trabajado en frío son excelentes. Puede ser trabajado en frío por todos los métodos convencionales.
- **Recocido:** El recocido puede hacerse a 650 F seguido de enfriamiento al aire.
- **Envejecimiento:** No es aplicable a esta aleación.
- **Revenido:** No aplicable.

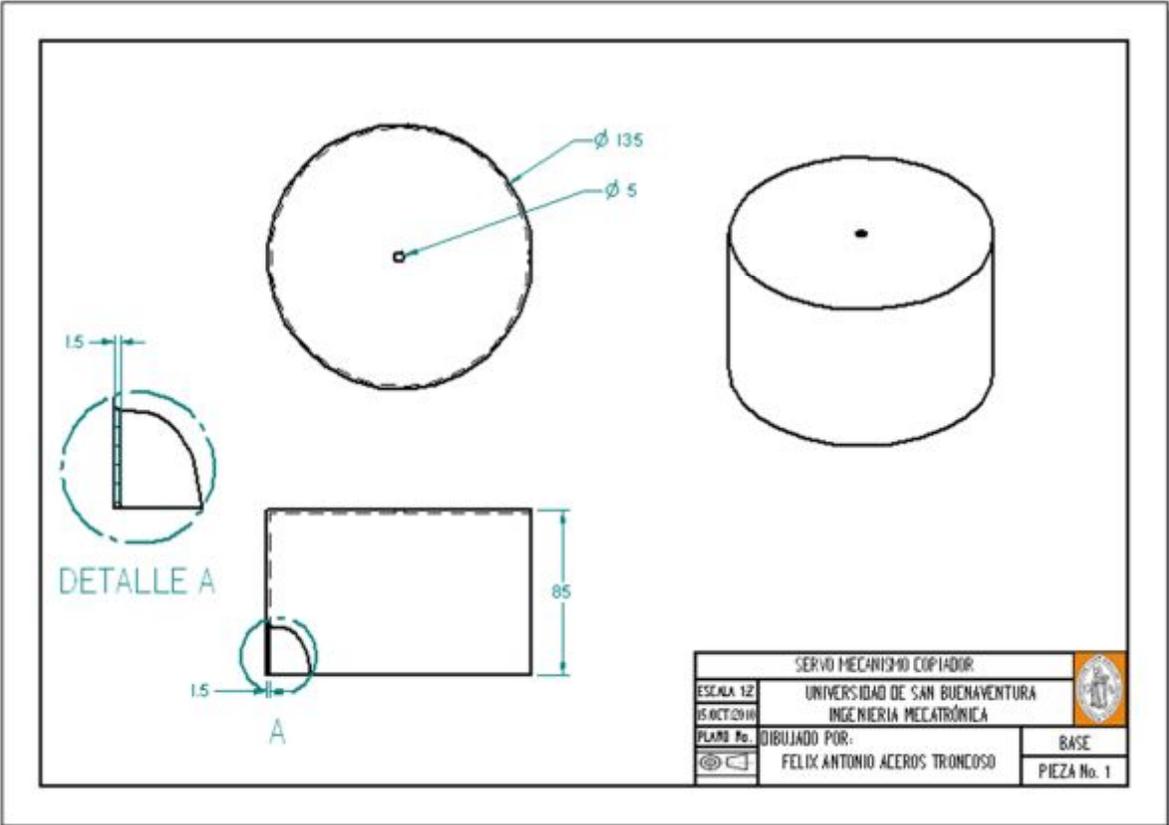
- **Endurecimiento:** La aleación endurece solo por trabajo en frío. Los endurecimientos H12, H14, H16, H18 son determinados por la cantidad de trabajado en frío impartido en la aleación.
- **Otras propiedades físicas:** 55% de la conductividad eléctrica del cobre.
- **Otras propiedades mecánicas:** La resistencia en cortante es 7 Ksi en estado recocido (endurecimiento 0). Para endurecimiento H14 es 9 Ksi y para endurecimiento H18, 11 Ksi.⁵

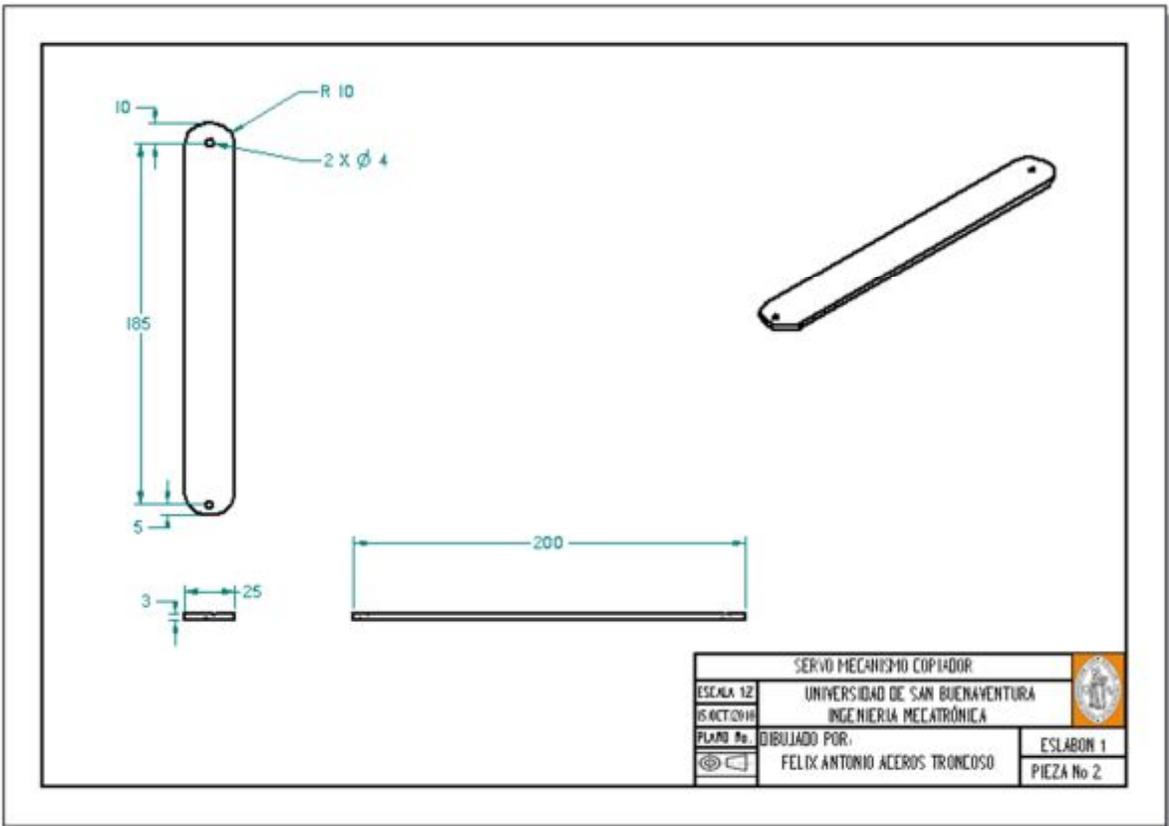
⁵http://www.metalmecanica.com/mm/secciones/MM/ES/MAIN/R/REFERENCIA1/documento_HTML.jsp?idDocumento=12274 Visitada el 10-08-20010

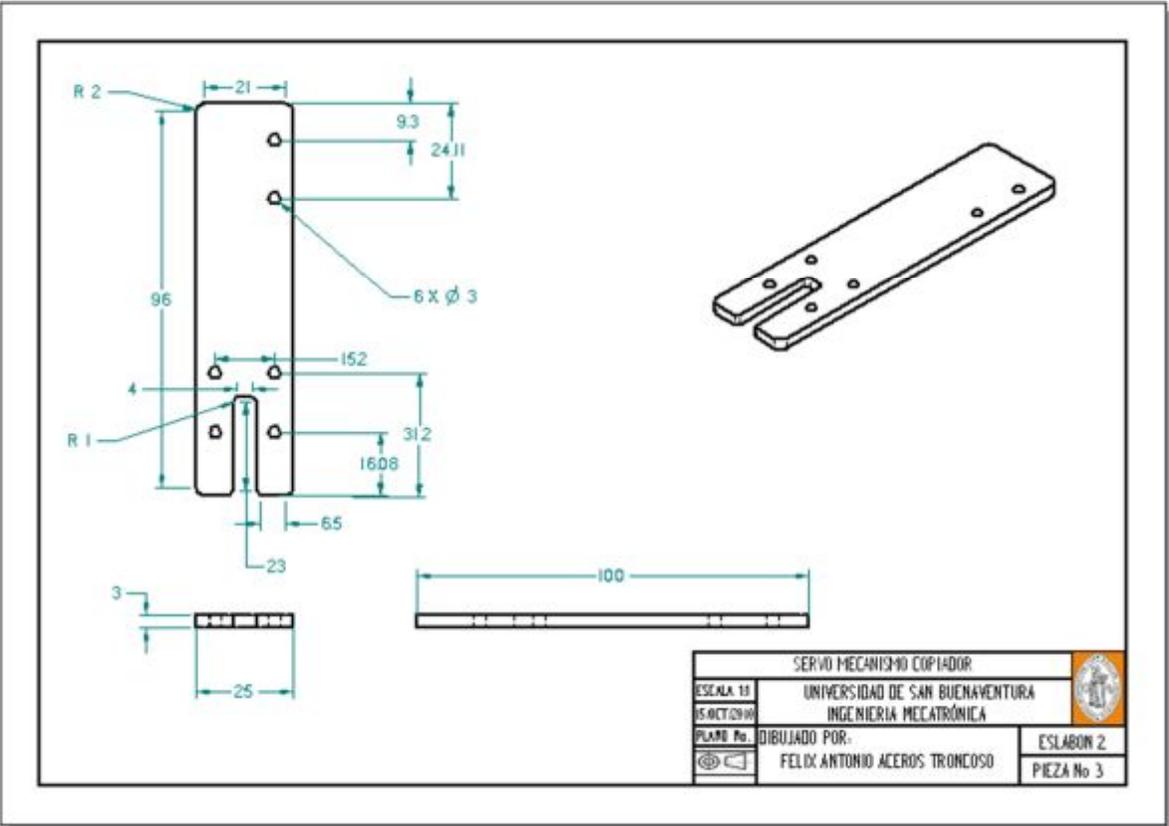
ANEXO D

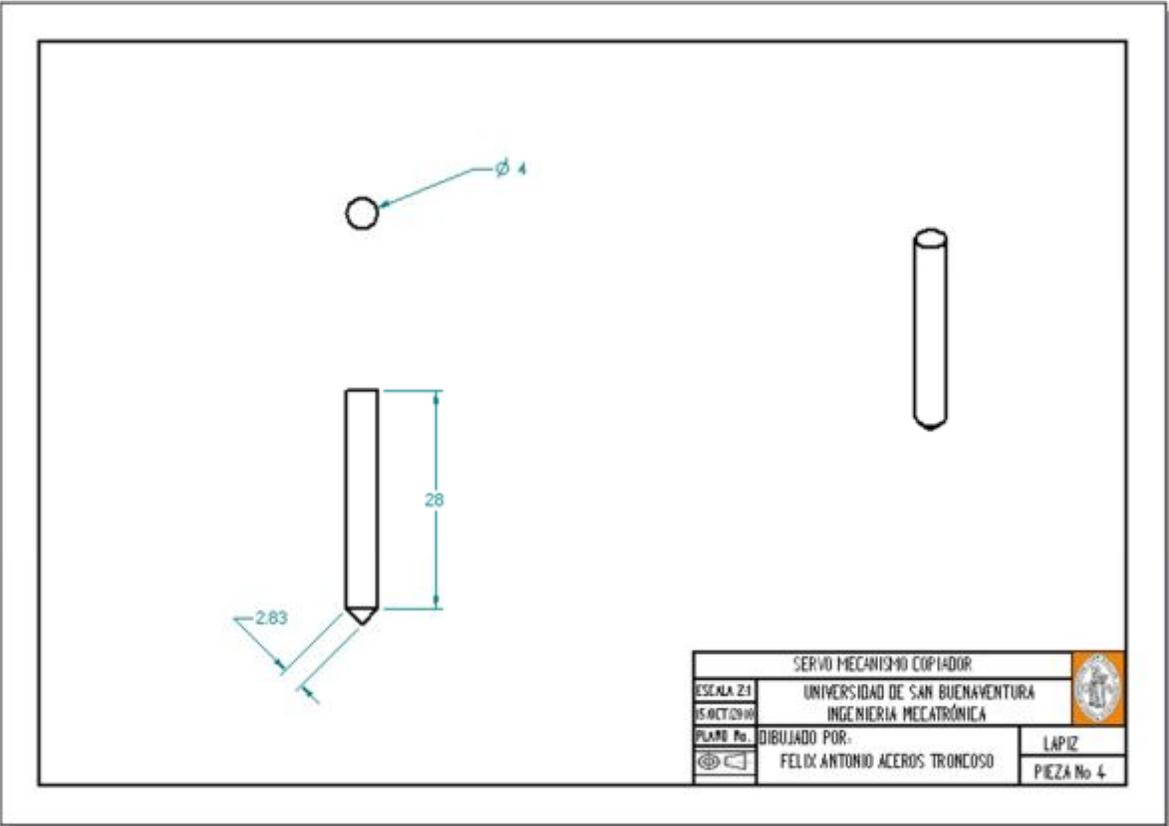
PLANOS DEL PRIMER BRAZO

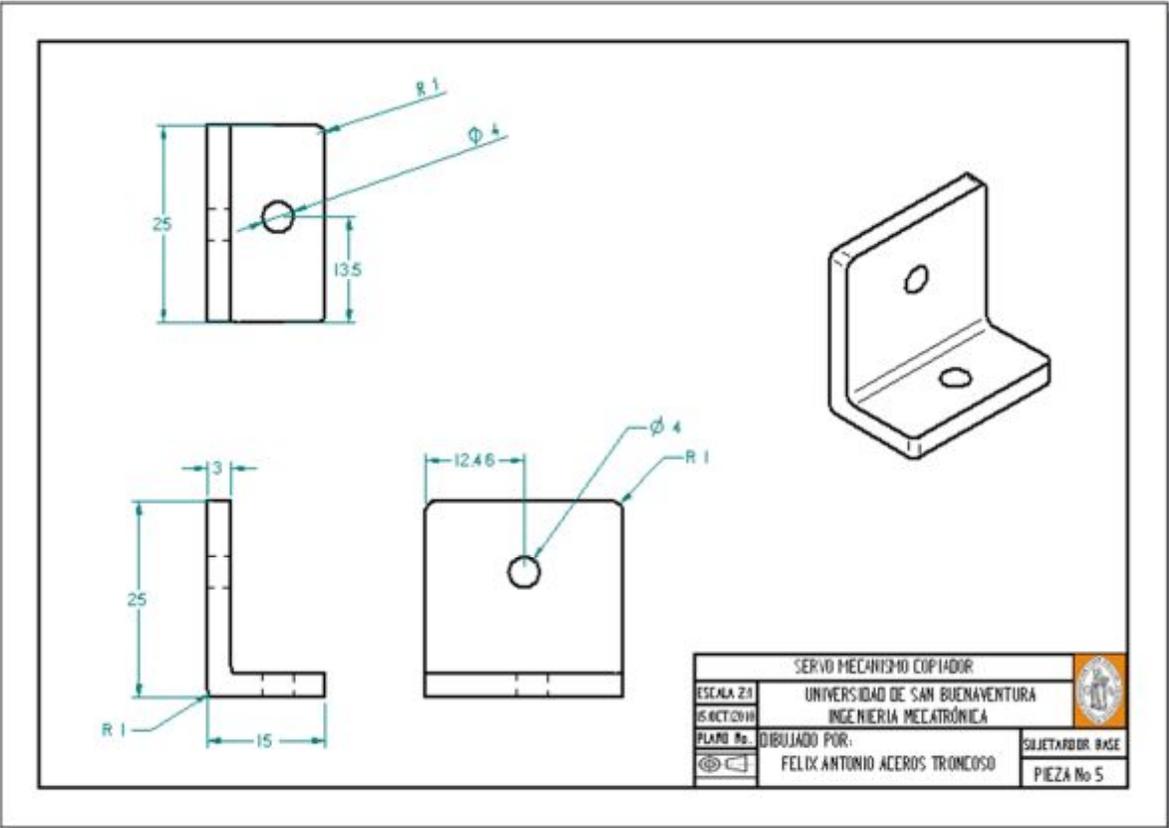


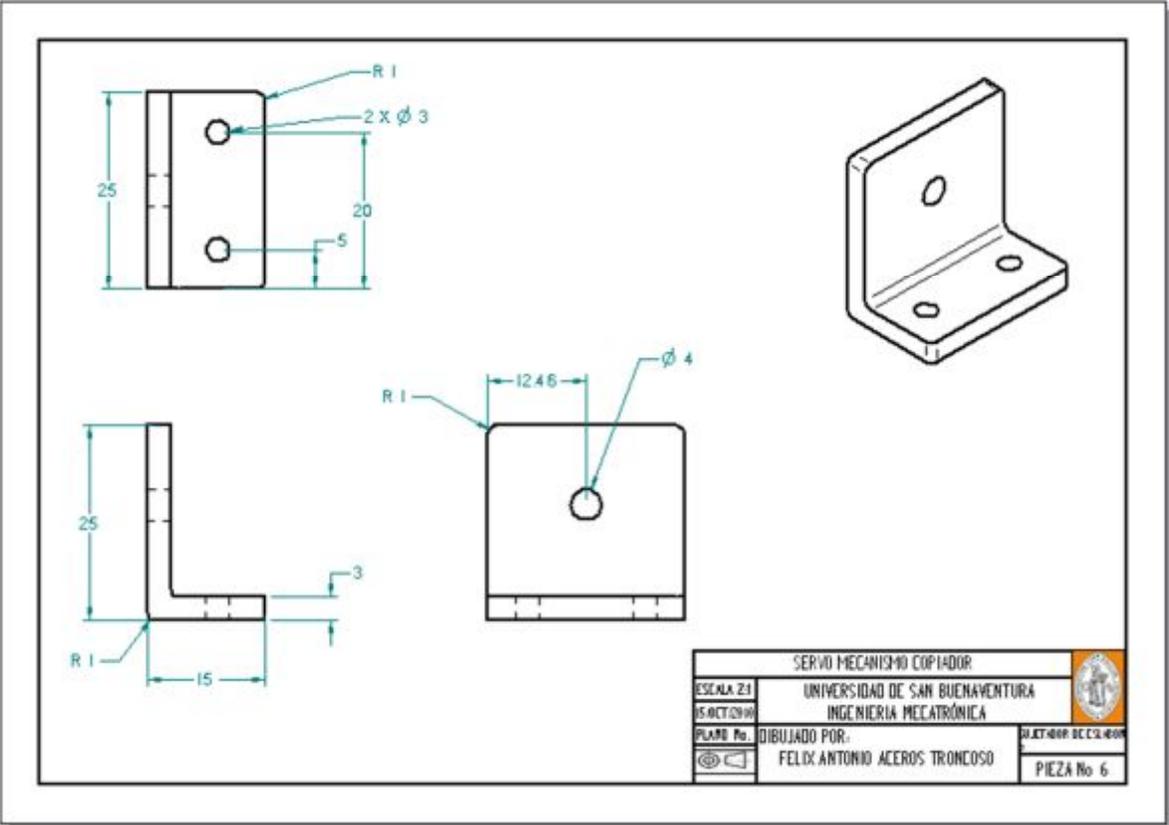


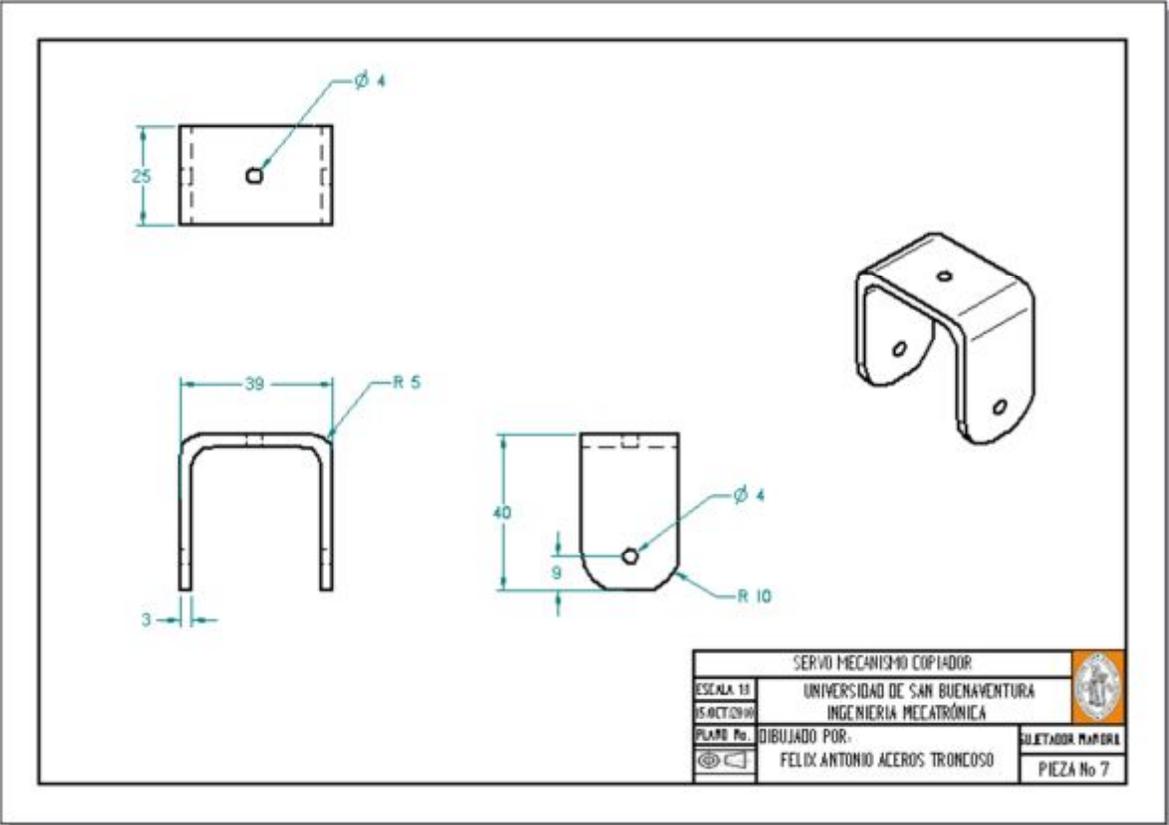


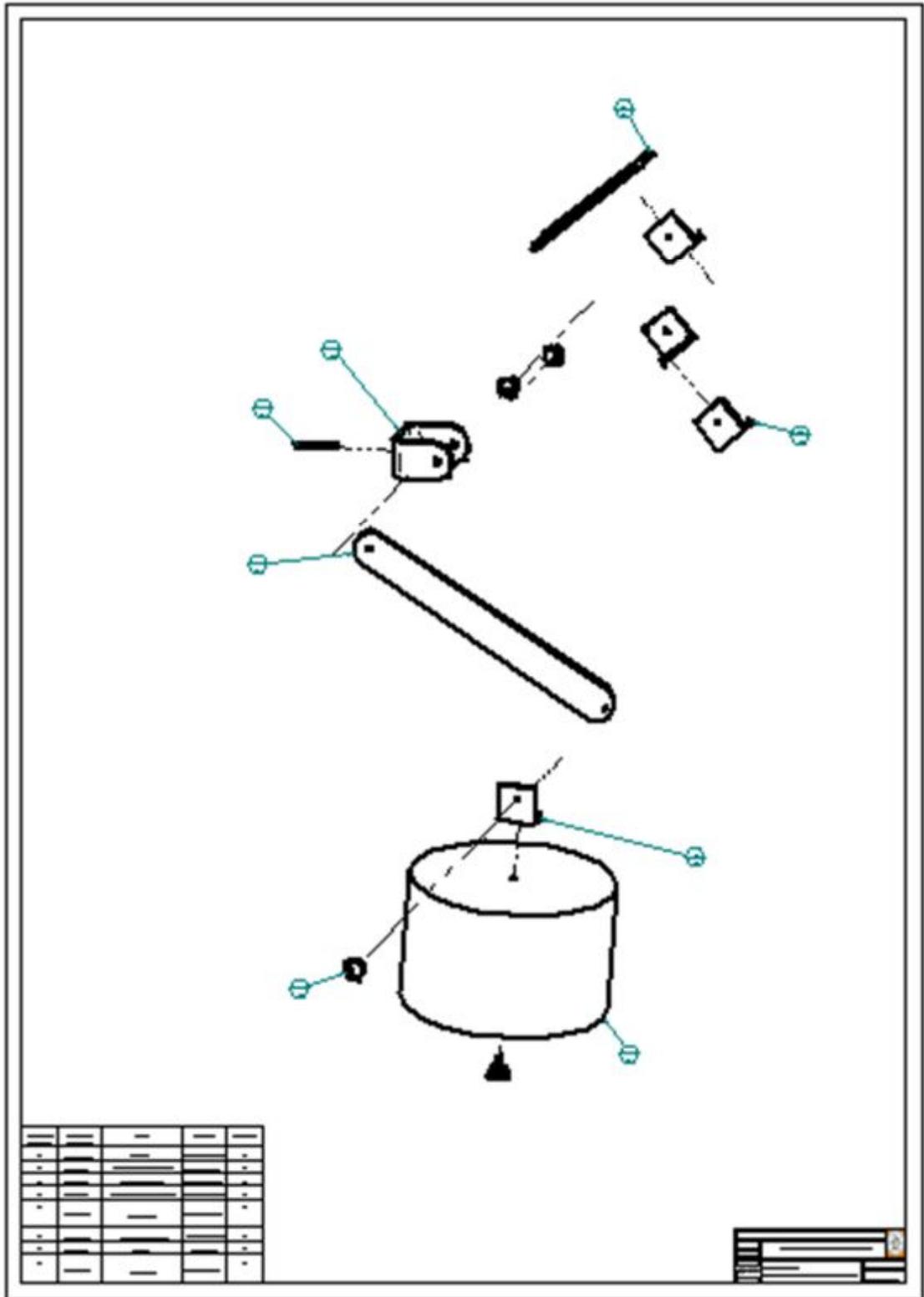








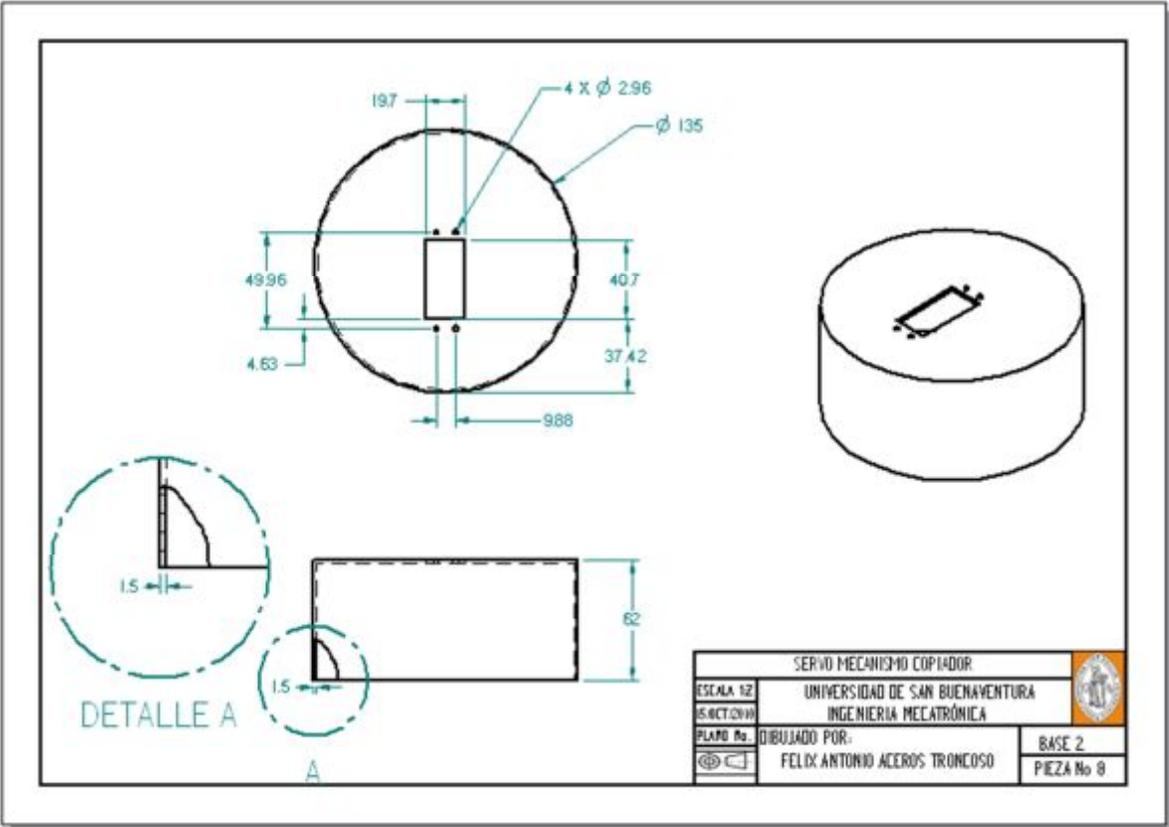


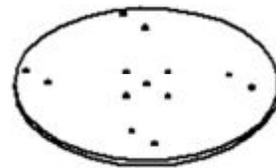
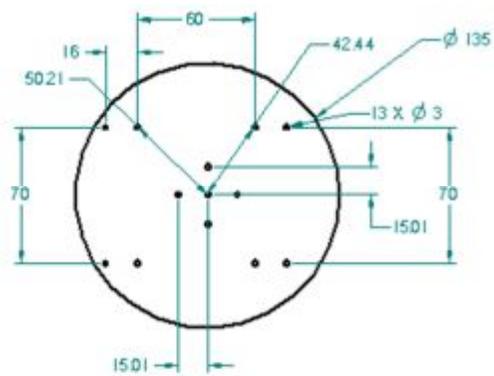


ANEXO E

PLANOS DEL SEGUNDO BRAZO







SERVO MECANISMO COPIADOR		
ESCALA 1:2 (5.OCT.2018)	UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA INGENIERIA MECATRONICA	
PLANO No.	DIBUJADO POR: FELIX ANTONIO ACEROS TRONCOSO	CIRCULO 1 PIEZA No 9

