

SECRETARIA DE EDUCACION PÚBLICA
DIRECCIÓN DE EDUCACIÓN SUPERIOR TECNOLÓGICA
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIERREZ
INGENIERIA MECÁNICA
MEMORIA DE RESIDENCIA:
DISEÑO Y ANALISIS ESTRUCTURAL DE UN ROBOT PARALELO
PLANAR DE DOS GRADOS DE LIBERTAD.

PRESENTA:

TREJO LOPEZ JOSE HUGO

ASESOR INTERNO:

DR. ROBERTO CARLOS GARCIA GOMEZ

ASESOR EXTERNO:

DR. ERNESTO OLGUIN DIAZ

TUXTLA GUTIERREZ, CHIAPAS, JUNIO DE 2016

Índice

CAPITULO I	5
Generalidades del proyecto.....	5
1.1 Introducción	5
1.2Justificación	7
1.3Objetivos.....	8
1.3.1 Objetivo General.....	8
1.3.2 Objetivos Específicos.	8
1.4 Problemas a resolver.....	9
1.5 Alcances y limitaciones.....	10
1.6 Descripción del área.	11
CAPITULO II	13
Marco Teórico	13
2.1Características de los elementos físicos.....	13
CAPITULO III	15
Memoria de cálculo.	15
3.1 Modelo matemático del sistema.....	15
3.2 Selección del Modelo:	28
3.2.1 Planos y Piezas:	34
CAPITULO IV	39
Resultados	39
CAPITULO V	48
Conclusiones y recomendaciones.....	48
CAPITULO VI	52
Competencias desarrolladas	52
CAPITULO VII	56
Referencias	56
ANEXOS	58
A	58
B	70
C	74

Figura 1.1 CINESTAV Unidad Saltillo.	12
Figura 2.1 Cilindro Neumático de Doble efecto modelo DNCL.	14
Figura 2.2 Componentes del Cilindro Neumático.	14
Figura 3.1 Variación en el esfuerzo medio cíclico.	18
Figura 3.2 Desglosamiento del sistema.	19
Figura 3.3 Alcance del sistema.	19
Figura 3.4 Movimiento del sistema multi-cuerpo.	20
Figura 3.5 Nuevo sistema utilizando ángulos.	26
Figura 3.6 Pistón tipo DNCL.	29
Figura 3.7 Cilindro Neumático DNC-50-320 P-A.	29
Figura 3.8 Brida basculante SNCS.	31
Figura 3.9 Brida basculante SNCB/SNCB-....-R3.	31
Figura 3.10 Brida basculante SNC.	32
Figura 3.11 Cabeza de Rotula SGS.	33
Figura 3.12 Horquilla CRSG.	33
Figura 4.1 Perfil para la mesa de trabajo.	39
Figura 4.2 Diagrama de bloques para encontrar la fuerza resultante.	40
Figura 4.3 Aplicación de la fuerza resultante a la horquilla fija.	43
A.1 Cilindro Neumático en SolidWorks.	58
A.2 Ensamble de los elementos de cada vástago.	58
A.3 Colisión de los elementos.	59
A.4 Modelo de brida base seleccionada.	59
A.5 Plano de brida base.	60
A.6 Modelo de rotula embolo.	60
A.7 Plano de rotula.	61
A.8 Modelo de horquilla embolo.	61
A.9 Plano de horquilla embolo.	62
A.10 Ensamble de eje rodante.	62
A.11 Plano de eje rodante.	63
A.12 Plano de la base del eje rodante.	63
A.13 Plano del tornillo de apriete del eje rodante.	64
A.14 Modelo de horquilla fija.	64
A.15 Plano de horquilla fija.	65
A.16 Comportamiento del ángulo alpha.	65
A.17 Comportamiento del ángulo betha.	66
A.18 Comportamiento de la fuerza resultante Px.	66
A.19 Comportamiento de la fuerza Px cuando un cilindro está en retroceso.	67
A.20 Selección del material y sus características.	67
A.21 Comportamiento de la horquilla fija ante el límite elástico.	68
A.22 Punto de mayor desplazamiento de la pieza.	68
A.23 Comportamiento de la pieza ante el factor de seguridad.	69
B.1 Ensamble del eje rodante con los acoplamientos para cada vástago.	70
B.2 Ensamble de horquilla fija con brida basculante.	70
B.3 Ensamble de los dos cilindros con sus respectivos elementos.	71

<i>B.4 Recorrido del sistema a 90° uno con respecto del otro.</i>	<u>71</u>
<i>B.5 Componentes del ensamble general.</i>	<u>72</u>
<i>B.6 Modelo de la mesa de trabajo utilizando perfil 30x30.</i>	<u>72</u>
<i>B.7 Ensamble del sistema con la mesa de trabajo.</i>	<u>73</u>
<i>C.1 Intersección de círculos utilizando GeoGebra.</i>	<u>74</u>
<i>C.2 Comportamiento de los componentes del sistema.</i>	<u>74</u>
<i>C.3 Parámetros de simulación.</i>	<u>75</u>
<i>C.4 Visualización del comportamiento del sistema.</i>	<u>75</u>

CAPITULO I

Generalidades del proyecto

1.1 Introducción

En la actualidad las industrias cada vez se están volviendo más competitivas, y con esto están obligando a los empleados a mantener e incrementar la eficiencia productiva dentro de sus industrias con el fin de permanecer en el mercado en condiciones económicamente satisfactorias.

Esta competitividad se ha visto afectada por el abastecimiento de insumos y tecnologías importadas. Es por ello, que es necesario desarrollar sistemas o mecanismos capaces de permitir el acceso a oportunidades de mejorar procesos industriales.

La mayor limitante para la producción de nuevos mecanismos es el apoyo económico, ya que algunas ideas o proyectos tienen la capacidad de innovar o mejorar los tiempos de producción, pero estas a veces no son bien vistas por las industrias y es por ello que estos temas solo se trabajan en centros de investigación donde tal aporte se trabaja de manera teórica y en algunas ocasiones, los proyectos logran obtener apoyo por parte del sector industrial esto siempre y cuando el tema se encuentre desarrollado de la mejor manera.

Un factor importante que ha ayudado a revolucionar la producción dentro de la industria es la programación y automatización de los equipos industriales. Esto debido a su rapidez, simplicidad de programar, el tiempo de mantenimiento no es tan extenso, entre otras capacidades.

Es por ello que se ha optado por optimizar un dispositivo como lo es el pantógrafo, que como ya sabemos además de usar una imagen guía para ampliarla (generalmente utilizado en arquitectura) también se utilizó este mismo modelo para crear el pantógrafo de ferrocarril, el gato hidráulico, o el pantógrafo de oxicorte.

En el presente trabajo, se muestra el desarrollo del mejoramiento y automatización de un mecanismo multi-cuerpo (Robot paralelo planar) capaz de realizar traslaciones en un plano bidimensional utilizando actuadores neumáticos prismáticos, utilizando herramientas vistas en la universidad como lo son MATLAB, Simulink, SolidWorks, entre otras.

Es importante señalar que este proyecto es la continuidad de un trabajo presentado por el Dr. Ernesto Olguín Díaz en el CINVESTAV Saltillo, el nombre de dicho proyecto es “A unifying framework for the modeling formulations of rigid multibody systems”.

1.2 Justificación

¿Qué?

Este consiste en un pantógrafo, el cual se desea realizar empleando actuadores neumáticos prismáticos, esto con el fin de realizar figuras, trazos o aplicaciones industriales a fin.

Al estudiar el funcionamiento de dicho pantógrafo ordinario nos dimos a la tarea de replicar el funcionamiento del mismo, generalizándolo como un mecanismo multi-cuerpo (Robot paralelo planar).

El mecanismo que deseamos establecer contara con dos varillas que estarán representadas por los cilindros, estos se tienen que mover respecto a un punto fijo en cada uno de ellos.

Por ello, este trabajo se enfoca en el análisis de los componentes que lo conforman y el diseño de los soportes que permitirán el movimiento adecuado del sistema multi-cuerpo (Robot paralelo planar).

¿Para qué?

Este proyecto facilitara la creación de figuras o trazos, ya sea para aplicaciones básicas o aplicaciones industriales las cuales requieren de mayor exactitud, ya que como sabemos la aplicación de cilindros neumáticos nos ofrece una cantidad mayor de fuerza y un exacto acoplamiento en condiciones de trabajo un tanto complicadas.

1.3Objetivos

1.3.1 Objetivo General.

Diseño de un mecanismo multi-cuerpo (Robot paralelo planar) capaz de realizar traslaciones en un plano bidimensional, y que tenga la capacidad de trasladarse de un punto a otro a través de diversas trayectorias.

1.3.2 Objetivos Específicos.

- Analizar los diferentes tipos de pantógrafos para compararlos entre sí.
- Plantear las ventajas y desventajas que ofrece nuestro modelo, esto para limitar las tareas a desarrollar.
- Puntualizar las variables como: las condiciones de trabajo, alcances máximos y mínimos del sistema, materiales que se utilizaran para la creación de las piezas y que estas proporcionen seguridad y confianza, etc. Estas son algunas de las variables que se deben de considerar en el diseño de los elementos que se desarrollaran y que conformaran el mecanismo por completo.
- Realizar pruebas mediante simulación. Para visualizar el comportamiento del sistema.

1.4 Problemas a resolver.

- La localización del punto móvil (punto B), a partir de la ecuación general del círculo, se planea buscar las intersecciones de los dos círculos esto con la ayuda de la ecuación general en su forma $ay^2 + by + c = 0$. Y discriminando los resultados obtenidos elegir el que mejor se adapte al modelo.
- De las coordenadas (x_1, y_1) obtenemos la posición del punto móvil, esto nos ayudara para saber los esfuerzos máximos que se producen en cada punto en el cual este ubicado este punto.
- Después de saber los esfuerzos que se producen en cada punto de la trayectoria del punto móvil, los ordenaremos y de esta manera podremos saber en qué punto se produce el esfuerzo máximo y con esto diseñar el soporte que estará fijo.
- Conociendo el peso de cada embolo y las demás piezas que se acoplaran en la punta del vástago, podremos saber la carga que tiene que soportar el eje móvil y con estos valores podremos diseñar el eje y saber si cumplirá con la tarea encomendada.
- Elegir el material que mejor se adapte a las características y valores que obtengamos de las simulaciones. Así para que de esta manera las piezas puedan soportar las fuerzas que nosotros propongamos sin temor de que estas puedan llegar a romperse o fracturarse.

1.5 Alcances y limitaciones.

Alcances:

1. Se estudia el modelo matemático que rige el comportamiento de los actuadores neumáticos prismáticos de doble efecto.
2. Se propone un análisis matemático para determinar la ubicación del punto móvil, esto nos servirá posteriormente para determinar esfuerzos máximos y mínimos.
3. Se realiza la selección de las piezas que conformaran el sistema multi-cuerpo (Robot paralelo planar), esto mediante catálogos.
4. Se realizara un simulador para determinar el valor de los esfuerzos que provocan los actuadores en los apoyos cuando ambos están en avance.
5. Se implementara la comparación de resultados teóricos ante resultados obtenidos en simulación.

Limitaciones:

1. La localización del punto móvil se puede hacer de diferentes formas, pero para nosotros es importante que el número de ecuaciones para determinar el punto no sea demasiado grande, ya que esta ubicación estará dentro de un simulador y para que este funcione de manera eficiente el proceso de resolución tiene que ser muy rápido.
2. La implementación de piezas fabricadas por empresas de nombres reconocidos como FESTO nos proporciona seguridad y confianza, pero el costo de las mismas puede elevado y esto puede afectar al presupuesto

estimado para realizar el proyecto, además el tiempo de entrega es indispensable ya que entre más rápido sea nos ayudara en la implementación.

3. La unión de las piezas o elementos entre si provoca fricción, este fenómeno es un factor que debemos considerar en nuestro análisis como también debemos de considerar evitar la colisión entre ellas.

1.6 Descripción del área.

El área a desempeñar dicho proyecto es en el centro de Investigación y de Estudios Avanzados (CINVESTAV) unidad Saltillo, en el Área de Robótica y Manufactura avanzada, dicha área se enfoca en el desarrollo de técnicas que abordan distintos problemas donde se estudia la Robótica en todos sus tipos como: Móvil, Cooperativa, Submarina, Aérea, Humanoide, de rehabilitación, Industrial, Visión, Rastreo y seguimiento, etc.

Misión: Contribuir al desarrollo de la sociedad mediante la investigación científica y tecnológica de vanguardia, la formación de recursos humanos de alto nivel y la vinculación con la industria regional y nacional en las áreas de ingeniería metalúrgica, ingeniería cerámica, robótica y manufactura avanzada y recursos naturales y energéticos.

Visión: Ser una entidad innovadora y creativa, con infraestructura física y experimental moderna y adecuada a las necesidades académicas, de investigación y vinculación en las áreas que se cultivan. Los programas académicos estarán

consolidados garantizando el desarrollo de competencias de sus estudiantes. Las actividades de investigación y vinculación serán relevantes, realizadas con calidad y compromiso con la sociedad alcanzando un impacto significativo en el entorno regional.



Figura 1.1 CINVESTAV Unidad Saltillo.

CAPITULO II

Marco Teórico

En este capítulo se exhibirán los elementos físicos, que se pretenden utilizar en este trabajo, ya que es importante conocer cada componente que integrara por completo al sistema para que al momento de integrarlos entre si estos funcionen de la mejor manera posible, cabe mencionar que únicamente se detallaran a los elementos más relevantes y de mayor importancia para nosotros.

2.1 Características de los elementos físicos.

1. Pistón neumático.

El elemento que utilizaremos como barrilla para el pantógrafo será un pistón neumático DNCI 50-320 con número de producto 15552 este elemento es comercializado por FESTO, a continuación mencionaremos algunos de sus características:

- Funcionamiento: Doble efecto
- Carrera: 320 mm
- Amortiguación: Anillos y discos elásticos en ambos extremos
- Presión de trabajo (rango): 6 – 12 bar
- Diámetro del embolo: 50 mm

- Detección de posiciones: incorporada a través de un sensor.
- Temperatura de trabajo: -20...+80 °C



Figura 2.1 Cilindro Neumático de Doble efecto modelo DNCL.

Las características que conforman estructuralmente a este actuador se alcanzan a visualizar en la siguiente figura.

- Tubo perfilado (1): Aleación forjada de aluminio anodizado liso.
- Culatas (anterior y posterior) (2): Fundición inyectada de aluminio.
- Vástago (3): Acero de aleación fina.
- Juntas: Poliuretano, caucho nitrílico.

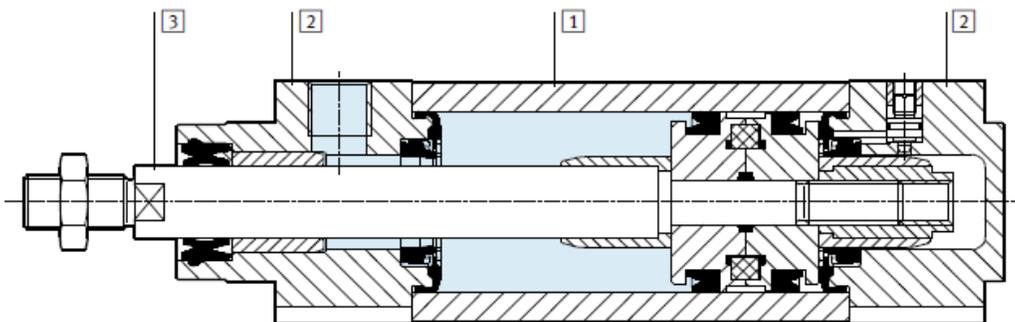


Figura 2.2 Componentes del Cilindro Neumático.

CAPITULO III

Memoria de cálculo.

En este capítulo se describirán en diferentes secciones las actividades realizadas para llevar a cabo el análisis, diseño y simulación del sistema multi-cuerpo (Robot paralelo planar). Se puntualizan los diferentes elementos matemáticos en los cuales nos basamos para llegar a un modelo general para nuestro sistema, posterior a ello se compararan las diferentes soluciones que se propongan para seleccionar la que mejor nos convenga, a continuación se seleccionaran los elementos que conformaran el sistema de fijación y el sistema móvil. Se propondrá al asesor la idea de comprar o mandarlas a maquinar, esto siempre y cuando antes estas muestren tener un excelente acoplamiento unas con otras, y también se verificaran por medio de simulación con MatLab & Simulink si ofrecen la fijación que necesitamos y si soportan los esfuerzos calculados analíticamente y por simulación.

3.1 Modelo matemático del sistema.

Partiendo de la idea principal de que todo cuerpo realiza un trabajo, esto depende de la fuerza que se le aplique y la distancia que el cuerpo tienda a recorrer. Pero hay que tener en cuenta también, que la dirección de la fuerza puede o no coincidir con la dirección sobre la que se está moviendo el cuerpo. De esto surge la fórmula que será la base de nuestro análisis.

$$W_{1-2} = \int_1^2 (f * V) dt = \frac{1}{2} m ||V||^2 \quad (1)$$

Al integrar la ecuación (1) llegamos a un resultado que es la energía cinética. Si podemos darnos cuenta mientras el cuerpo realiza un trabajo del punto 1 al punto 2 también va generando energía potencial y cinética. Estas dos energías se relacionan entre si creando una equivalencia de poder-energía.

$$P = \dot{W} \leftrightarrow V * f = \dot{K} \quad (2)$$

Analizando más detalladamente el cuerpo en movimiento lidia con diferentes factores entre ellos las fuerzas. Estas fuerzas son las fuerzas de inercia f_I y las fuerzas externas f_E tomando en cuenta todas y cada una de ellas para realizar un equilibrio estático se llega a la siguiente ecuación.

$$(f_I + f_E) * \delta d = 0 \quad (3)$$

Relacionamos estas fuerzas con las energías potencial y cinética de la siguiente manera. Las fuerzas externas impresas sobre la partícula crean una tasa de cambio de energía y las fuerzas de inercia en las partículas crean una inducción de energía.

Siendo:
$$P = f_E * V , \quad K = V * f_I$$

El cambio de movimiento es proporcional a la fuerza motriz aplicada y tiene lugar en la dirección de la recta según la cual se aplica la fuerza. Entonces hacemos mención de la cantidad de movimiento o movimiento lineal que relaciona la masa del cuerpo y su velocidad en un instante.

$$p = m * V \quad (4)$$

La segunda ley de Newton, que relaciona el movimiento acelerado de un punto material con las fuerzas que lo originan, constituye la base de los estudios de la dinámica.

$$f = \dot{p} = m * a \quad (5)$$

Basándose en las ecuaciones de LaGrange para determinar la solución general del sistema analizado, la ecuación de LaGrange puede aceptar cualquier tipo de fuerzas activas, esto es válido solo para sistemas mecánicos. Analizamos las fuerzas que actúan en una partícula j perteneciente al cuerpo. Estas fuerzas son las fuerzas impresas sobre la partícula f_{Ej} , las fuerzas efectivas de adición f_{ej} y las fuerzas surgidas de restricciones f_{rj} , quedando de la siguiente forma.

$$f_{Ej} = f_{ej} + f_{rj} \quad (6)$$

Para resumir o hacer un balance de las fuerzas que intervienen en el sistema se genera un vector de fuerzas generalizadas (Q) esto para hacer más práctico y razonable el efecto que estas causan.

$$Q_i \triangleq \sum_{j=1}^{N_p} \frac{\partial d_j}{\partial q_i} f_{ej} \quad (7)$$

Hasta este punto llevamos en consideración fuerzas que intervienen en el sistema o en el comportamiento del sistema. Ahora haremos hincapié en los esfuerzos que estas fuerzas provocan en el cuerpo y en los apoyos. El esfuerzo es la relación entre la cantidad de fuerza aplicada y la superficie en la cual se aplica. Así como las fuerzas existen diferentes tipos de esfuerzos nosotros mencionaremos solo los que

se relacionan con el tipo de fuerzas dinámicas. Este tipo de fuerzas son aplicadas en un periodo relativamente corto.

Los esfuerzos fluctuantes son esfuerzos que están en funciones del tiempo; pero la variación es tal que la secuencia del esfuerzo se repite. Este tipo de esfuerzos se presentan en elementos rotativos.

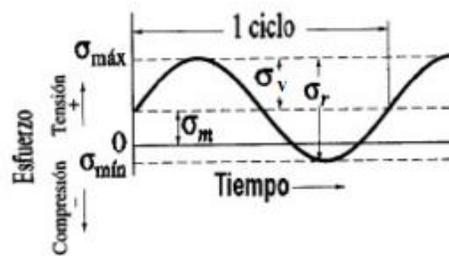


Figura 3.1 Variación en el esfuerzo medio cíclico.

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad (8)$$

También debemos de tomar en cuenta las denominadas cargas o fuerzas de impacto, estas se producen cuando dos objetos colisionan y por lo menos uno de estos esta en movimiento.

Tomando en cuenta las fuerzas que hemos analizado hasta este punto podemos darnos una idea del comportamiento del cuerpo del cilindro neumático, así como también tomar estas para empezar el análisis, y selección del soporte que sujetara cada cilindro, tomando en cuenta que debe de permitir una determinada libertad para realizar los desplazamientos deseados.

Necesitamos determinar los elementos algebraicos que intervendrán en el desplazamiento de los cilindros neumáticos, para esto necesitamos esquematizarlos.

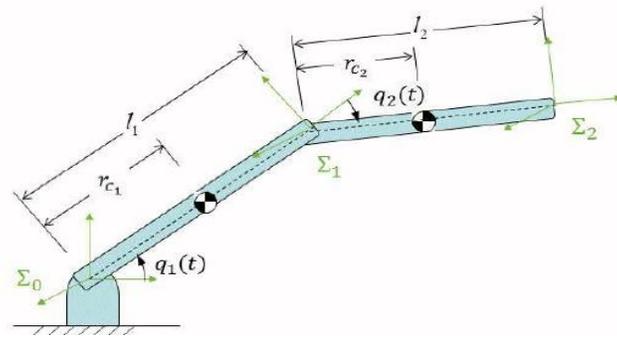


Figura 3.2 Desglosamiento del sistema.

Relacionamos el alcance del sistema con el punto A (Fig. 3). Como se puede observar en la Fig. 2 el sistema se analiza por separado, la l_1 pertenece al cilindro y la l_2 pertenece al vástago. Así también la localización de sus respectivos momentos de inercia.

Donde:

$$L_1 = l_1 + l_2$$

$$L_2 = l_3 + l_4$$

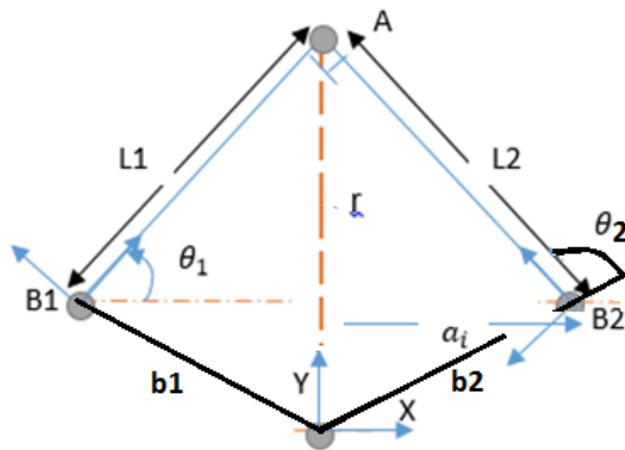


Figura 3.3 Alcance del sistema.

El marco de referencia no precisamente debe de encontrarse como en la figura 3. Pero si debe de estar a la misma distancia de B1 y B2. Los puntos B1 y B2 no

precisamente deben de ser lineales, en nuestro caso manejaremos estos puntos tales que su conexión entre sí dé como resultado un ángulo de 90°.

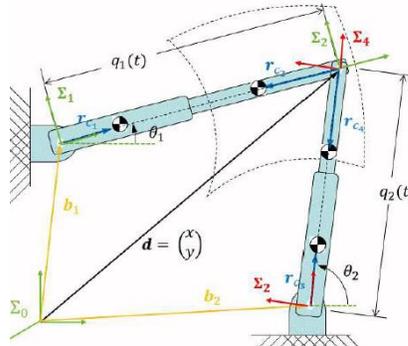


Figura 3.4 Movimiento del sistema multi-cuerpo.

Como mencionamos anteriormente en la figura 4 podemos percatarnos que el sistema está separado; es decir los apoyos tienen una superación de 90° y la distancia del marco de referencia Σ_0 al punto de movimiento A es d o r , esta distancia es la que nos interesa saber para determinar si nuestro sistema está llegando al punto que nosotros deseamos.

Para determinar estos puntos en coordenadas planares, se necesita conocer las coordenadas de la base de cada eslabón y las longitudes de ambos cilindros para poder determinar las coordenadas del punto A, este es el punto que realizará movimientos de traslación en el plano.

Para ello necesitamos resolver para X, Y las siguientes ecuaciones:

$$q_1^2 = (x - b_{x1})^2 + (y - b_{y1})^2$$

$$q_2^2 = (x - b_{x2})^2 + (y - b_{y2})^2$$

Se procede a desarrollar cada binomio cuadrado que se encuentra en cada ecuación llegando a lo siguiente:

$$q_1^2 = x^2 - 2x * b_{x1} + b_{x1}^2 + y^2 - 2y * b_{y1} + b_{y1}^2 \quad (9)$$

$$q_2^2 = x^2 - 2x * b_{x2} + b_{x2}^2 + y^2 - 2y * b_{y2} + b_{y2}^2 \quad (10)$$

El siguiente paso es igualar a 0 (cero) trasladando los términos q_1^2, q_2^2 del otro lado de la ecuación, de forma negativa. Quedando de la siguiente manera:

$$x^2 - 2x * b_{x1} + b_{x1}^2 + y^2 - 2y * b_{y1} + b_{y1}^2 - q_1^2 = 0 \quad (11)$$

$$x^2 - 2x * b_{x2} + b_{x2}^2 + y^2 - 2y * b_{y2} + b_{y2}^2 - q_2^2 = 0 \quad (12)$$

Para reducir un poco cada ecuación se realizara un cambio de variable, esto con el fin de tener un orden y ocupar menos espacio. Quedando de la siguiente manera.

Haciendo: $A = (-2 * b_{x1}), A1 = (-2 * b_{x2}), B = (-2 * b_{y1}), B1 = (-2 * b_{y2}),$

$C = (b_{x1}^2 + b_{y1}^2 - q_1^2), C1 = (b_{x2}^2 + b_{y2}^2 - q_2^2)$

Reescribiendo (11) y (12)

$$x^2 + y^2 + Ax + By + C = 0 \quad (13)$$

$$x^2 + y^2 + A1x + B1y + C1 = 0 \quad (14)$$

Procedemos a realizar una resta de la siguiente manera: (12) – (13)

$$x^2 + y^2 + Ax + By + C$$

$$-(x^2 + y^2 + A1x + B1y + C1)$$

Resultando la siguiente expresión:

$$(A - A1)x + (B - B1)y + (C - C1) = 0 \quad (15)$$

De la ecuación (15) se pretende despejar a x para después sustituirla en la ecuación (12), quedando de la siguiente manera:

$$x = \frac{-(B-B1)y - (C-C1)}{(A-A1)} \quad (16)$$

Sustituyendo (16) en (13).

$$\left(\frac{-(B-B1)y - (C-C1)}{(A-A1)}\right)^2 + y^2 + \left(\frac{-(B-B1)y - (C-C1)}{(A-A1)}\right) * A + By + C = 0 \quad (17)$$

Resolviendo cada operación se obtiene lo siguiente:

$$\left(\frac{(B-B1)^2}{(A-A1)^2}\right) * y^2 + \left(2 * \frac{(B-B1)(C-C1)}{(A-A1)^2}\right) + \left(\frac{(C-C1)^2}{(A-A1)^2}\right) + y^2 - \left(\frac{(B-B1)*A}{(A-A1)}\right) * y - \frac{(C-C1)*A}{(A-A1)} + By + C = 0$$

Reordenando y agrupando términos semejantes:

$$\left(\frac{(B-B1)^2}{(A-A1)^2} + 1\right) * y^2 + \left(2 * \frac{(B-B1)(C-C1)}{(A-A1)^2} - \frac{(B-B1)*A}{(A-A1)} + B\right) * y + \left(\frac{(C-C1)^2}{(A-A1)^2} - \frac{(C-C1)*A}{(A-A1)} + C\right) = 0 \quad (18)$$

La ecuación (17) nos queda de la forma $ay^2 + by + c = 0$ por lo que el paso siguiente es aplicar esta forma, con ayuda del software matlab introducimos esta fórmula para obtener las dos posibles soluciones para y , y después encontraremos las soluciones para x .

El código que se utilizo es el siguiente:

```
syms y A A1 B B1 C C1 bx1 bx2 by1 by2 q1 q2
```

```
A=-2*bx1;
```

$$A1=-2*bx2;$$

$$B=-2*by1;$$

$$B1=-2*by2;$$

$$C=bx1^2+by1^2-q1^2;$$

$$C1=bx2^2+by2^2-q2^2;$$

$$Ysol=solve((((B-B1)^2/(A-A1)^2+1)*y^2+((2*(B-B1)*(C-C1))/(A-A1)^2-((B-B1)*A)/(A-A1)+B)*y+((C-C1)^2/(A-A1)^2-((C-C1)*A)/(A-A1)+C))$$

El software nos arroja dos soluciones pero solo una es la que nos interesa que es la siguiente:

Ysol:

$$\begin{aligned} & (bx1^2*by1 + bx1^2*by2 + bx2^2*by1 + bx2^2*by2 - by1*by2^2 - by1^2*by2 - \\ & by1*q1^2 + by1*q2^2 + by2*q1^2 - by2*q2^2 + by1^3 + by2^3 - bx1*((- bx1^2 + \\ & 2*bx1*bx2 - bx2^2 - by1^2 + 2*by1*by2 - by2^2 + q1^2 + 2*q1*q2 + q2^2)*(bx1^2 - \\ & 2*bx1*bx2 + bx2^2 + by1^2 - 2*by1*by2 + by2^2 - q1^2 + 2*q1*q2 - q2^2))^{(1/2)} + \\ & bx2*((- bx1^2 + 2*bx1*bx2 - bx2^2 - by1^2 + 2*by1*by2 - by2^2 + q1^2 + 2*q1*q2 + \\ & q2^2)*(bx1^2 - 2*bx1*bx2 + bx2^2 + by1^2 - 2*by1*by2 + by2^2 - q1^2 + 2*q1*q2 - \\ & q2^2))^{(1/2)} - 2*bx1*bx2*by1 - 2*bx1*bx2*by2) / (2*(bx1^2 - 2*bx1*bx2 + bx2^2 + \\ & by1^2 - 2*by1*by2 + by2^2)) \end{aligned}$$

Sustituyendo el valor de y en x obtenemos dos soluciones, pero la que nos sirve para determinar los puntos es la siguiente:

Xsol=

$$\begin{aligned}
& (bx_1^2 - bx_2^2 + by_1^2 - by_2^2 - q_1^2 + q_2^2)/(2*(bx_1 - bx_2)) - ((by_1 - \\
& by_2)*(bx_1^2*by_1 + bx_1^2*by_2 + bx_2^2*by_1 + bx_2^2*by_2 - by_1*by_2^2 - by_1^2*by_2 - \\
& by_1*q_1^2 + by_1*q_2^2 + by_2*q_1^2 - by_2*q_2^2 + by_1^3 + by_2^3 - bx_1*((- bx_1^2 + \\
& 2*bx_1*bx_2 - bx_2^2 - by_1^2 + 2*by_1*by_2 - by_2^2 + q_1^2 + 2*q_1*q_2 + q_2^2)*(bx_1^2 - \\
& 2*bx_1*bx_2 + bx_2^2 + by_1^2 - 2*by_1*by_2 + by_2^2 - q_1^2 + 2*q_1*q_2 - q_2^2))^{(1/2)} + \\
& bx_2*((- bx_1^2 + 2*bx_1*bx_2 - bx_2^2 - by_1^2 + 2*by_1*by_2 - by_2^2 + q_1^2 + 2*q_1*q_2 + \\
& q_2^2)*(bx_1^2 - 2*bx_1*bx_2 + bx_2^2 + by_1^2 - 2*by_1*by_2 + by_2^2 - q_1^2 + 2*q_1*q_2 - \\
& q_2^2))^{(1/2)} - 2*bx_1*bx_2*by_1 - 2*bx_1*bx_2*by_2)/(2*(bx_1 - bx_2)*(bx_1^2 - 2*bx_1*bx_2 + \\
& bx_2^2 + by_1^2 - 2*by_1*by_2 + by_2^2))
\end{aligned}$$

En conclusión con el asesor interno se tomó la decisión de no emplear este método ya que el número de operaciones realizadas es muy grande. Se procedió a realizar un nuevo planteamiento en este caso sustitución mediante variables y constantes utilizando la cinemática directa. El planteamiento de las siguientes ecuaciones fue a cargo del asesor interno, se busca saber el número de operaciones y de esta manera determinar si se podía emplear al modelo.

Se plantea de la siguiente manera las constantes:

$$b_x = b_{x2} - b_{x1} \quad (19)$$

$$b_y = b_{y2} - b_{y1} \quad (20)$$

$$a = b_x^2 + b_y^2 \quad (21)$$

$$a_1 = b_x^2 - b_y^2 \quad (22)$$

Ahora definiremos nuestras variables:

$$z_1(q) = q_1^2 - q_2^2 - a_1 \quad (23)$$

$$z_2(q) = b_x(z_1 - 2b_y^2) \quad (24)$$

$$z_3(q) = b_y(z_1 + 2b_x^2) \quad (25)$$

$$z_4(q) = z_1^2 + 4b_y^2(b_x^2 - q_1^2) \quad (26)$$

$$z_5(q) = z_1^2 + 4b_x^2(b_y^2 - q_2^2) \quad (27)$$

$$z_6(q) = \frac{z_2 + \sqrt{z_2^2 - az_4}}{2a} \quad (28)$$

$$z_7(q) = \frac{z_3 + \sqrt{z_3^2 - az_5}}{2a} \quad (29)$$

Ahora evaluando la cinemática directa, se obtienen nuestra solución para el punto (x, y) y se obtiene de la siguiente manera:

$$x(q) = z_6 + b_{x2} \quad (30)$$

$$y(q) = z_7 + b_{y1} \quad (31)$$

En conclusión con el asesor interno se tomó la decisión de emplear este método ya que el número de operaciones realizadas eran un tanto grande. Se procedió a realizar un nuevo planteamiento en este utilizando ángulos.

De la siguiente manera se plantea un sistema planar, tomando en cuenta las distancias (q_1, q_2) la longitud entre cada sistema fijo (R).

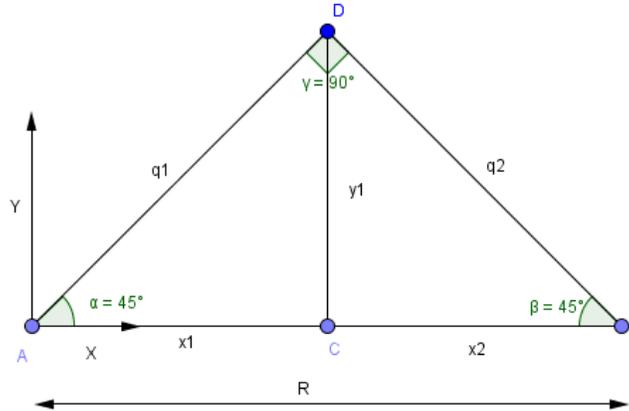


Figura 3.5 Nuevo sistema utilizando ángulos.

Suponemos un margen de referencia con respecto al punto A para poder realizar el análisis siguiente. Lo que pretendes entender o conocer es la posición del punto D mediante la apertura o crecimiento de q_1 o q_2 o de ambos.

Como podemos observar en la fig. 2 dividimos el sistema en 2 componentes que nos ayudaran a ubicar el punto sobre el eje x, de la misma manera lo hacemos para ubicar el punto con el eje Y. Utilizamos las siguientes condiciones para analizar el sistema:

Para Y:

$$y_1 = y_2$$

$$y_1 = q_1 \text{ sen}(\alpha) \quad (32)$$

$$y_2 = q_2 \text{ sen}(\beta) \quad (33)$$

Para X:

$$x_1 = q_1 \text{ cos}(\alpha) \quad (34)$$

$$x_2 = R - q_1 \text{ cos}(\alpha) \quad (35)$$

Entonces como tenemos un triángulo, utilizamos la ley de cosenos para determinar solución al ángulo

$$\alpha: q_2^2 = q_1^2 + R^2 - 2q_1R\cos(\alpha)$$

Entonces

$$\cos(\alpha) = (-q_2^2 + q_1^2 + R^2)/(2q_1R) \quad (36)$$

Sustituimos en (3) quedando de la siguiente manera:

$$x_1 = q_1(-q_2^2 - q_1^2 - R^2)/(2q_1R) \quad (37)$$

De esta manera obtenemos la coordenada en x, para encontrar la coordenada en y analizamos la siguiente identidad trigonométrica: $\text{sen}^2\alpha + \text{cos}^2\alpha = 1$, de donde se deduce que

$$\text{sen}(\alpha) = (\sqrt{1 - \text{cos}^2(\alpha)}) \quad (38)$$

Que usando (9) se convierte a

$$\text{sen}(\alpha) = \sqrt{1 - (-q_2^2 - q_1^2 - R^2)/(2q_1R))^2} \quad (39)$$

Ahora sustituimos (10) en (1) para determinar la coordenada en Y:

$$y_1 = q_1 \left(\sqrt{1 - (-q_2^2 - q_1^2 - R^2)/(2q_1R))^2} \right) \quad 40$$

Y de esta manera obtenemos nuestras soluciones que son la ecuación (8) y la ecuación (11). En coordinación con el asesor interno se optó por este análisis ya que el número de operaciones es más corto.

Entonces las coordenadas del punto son $D(x_1, y_1)$ esto cuando el elemento q_1 crece, para cuando el elemento q_2 crece las coordenadas son las siguientes $D(x_2, y_2)$.

En conclusión con el asesor interno se tomó la decisión de emplear este método ya que el número de operaciones realizadas en comparación con el segundo método utilizando la cinemática directa eran menos. Se procedió a realizar el conteo de operaciones y se realizaron sustituciones esto para reducir un poco más el número de operaciones y de esta manera hacer más efectivo el modelo para hallar de manera más rápida la posición del punto en movimiento.

Después de obtener este modelo optamos por simular el comportamiento del ángulo y de esta manera calcular la fuerza que se produce en cada apoyo en consecuencia de las fuerzas ejercidas por cada cilindro. Esto se hará posteriormente cuando ya tengamos definida la forma, las medidas y características del apoyo que emplearemos.

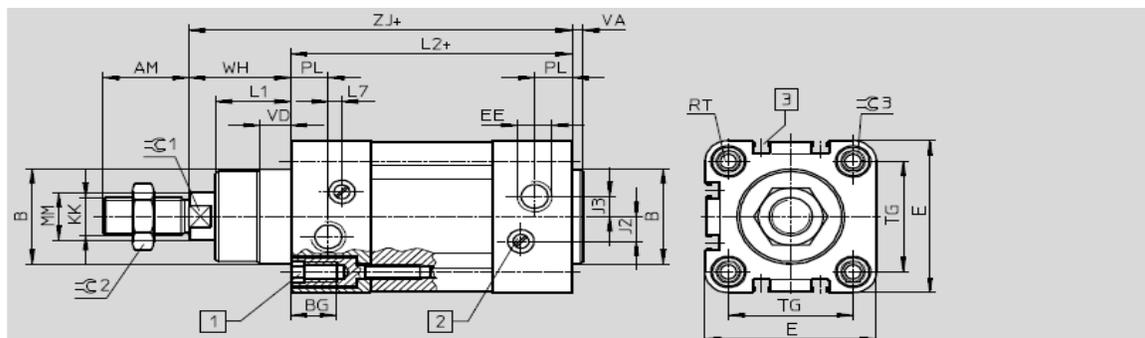
3.2 Selección del Modelo:

De acuerdo con el catalogo del proveedor (FESTO) se realiza la selección del cilindro neumático que se desea emplear en el sistema multi-cuerpo (Robot paralelo planar), tomando en cuenta las características de nuestro interés como son la presión, la carrera, el diámetro del embolo y del vástago. También se deben seleccionar los demás accesorios que conformaran el sistema por completo como son las válvulas, las electroválvulas, solenoides, conectores, etc.

Para este caso se seleccionó un cilindro neumático modelo DNC-50-320-P-A como se muestra en la siguiente imagen



Figura 3.6 Pistón tipo DNCI.



∅	AM	B	BG	E	EE	J2	J3	KK	L1	L2
[mm]		∅ d11								
32	22	30	16	45	G $\frac{1}{8}$	6	5,2	M10x1,25	18	94
40	24	35	16	54	G $\frac{1}{4}$	8	6	M12x1,25	21,5	105
50	32	40	17	64	G $\frac{1}{4}$	10,4	8,5	M16x1,5	28	106

Figura 3.7 Cilindro Neumático DNC-50-320 P-A.

Fuente: Festo Catalogo.

Las características del cilindro de nuestro interés se muestran en las siguientes tablas:

Tabla 3.0.1 Características del cilindro.

Fuente: Festo catálogo.

Piston Ø	32	40	50
Pneumatic connection	G $\frac{1}{8}$	G $\frac{1}{4}$	G $\frac{1}{4}$
Piston rod thread	M10x1.25	M12x1.25	M16x1.5
	K3	M6	M8
	K5	M10	M12
Constructional design	Piston		
	Piston rod		
	Profile barrel		
Max. torsional backlash of piston rod [°]	Q ±0.65	±0.6	±0.45
Cushioning	Flexible cushioning rings/pads at both ends		
	Pneumatic cushioning, adjustable at both ends		
Cushioning length PPV [mm]	20	20	22
Position sensing	Via proximity sensor		
Type of mounting	Via female thread		
	Via accessories		
Mounting position	Any		

Tabla 3.0.2 Fuerzas y presiones del cilindro.

Fuente: Festo catálogo.

Energía de impacto [J]							
Diámetro del émbolo	32	40	50	63	80	100	125
Energía máx. de impacto en las posiciones finales	0,1	0,2	0,2	0,5	0,9	1,2	5

Fuerzas [N]							
Diámetro del émbolo	32	40	50	63	80	100	125
Fuerza teórica con 6 bar en avance		483	754	1178	1870	3016	4712
	S2	415	633	990	1682	2721	4418
Fuerza teórica con 6 bar en retroceso		415	633	990	1682	2721	4418
	S2	415	633	990	1682	2721	4418
Fuerza de sujeción	600	1000	1400	2000	5000	5000	7500

En estas tablas el proveedor nos proporciona las fuerzas de avance, retroceso y la fuerza de sujeción. Esta última nos ayudara para diseñar o seleccionar el elemento de sujeción de cada cilindro este tiene que permitirnos el realizar movimientos deseados.

Con ayuda de las tablas anteriores y con ayuda del programa SolidWorks en su versión 2014 se logró realizar el diseño del primer pistón (A.1), esto con la finalidad

de poder simular el comportamiento de este mismo bajo distintas condiciones. Los datos que se obtengan en dicha simulación nos ayudaran a corregir detalles o defectos que se presenten, también nos proporcionaran un panorama con el cual veremos si las condiciones, propiedades y características seleccionadas para el cilindro son las adecuadas.

Con la ayuda de los catálogos de FESTO, también realizamos la búsqueda de los apoyos que irán conectados a la parte trasera del pistón esto para poder fijarlos a la mesa de trabajo y se puedan mover de la manera que se está planteando.

Los elementos seleccionados son los siguientes:

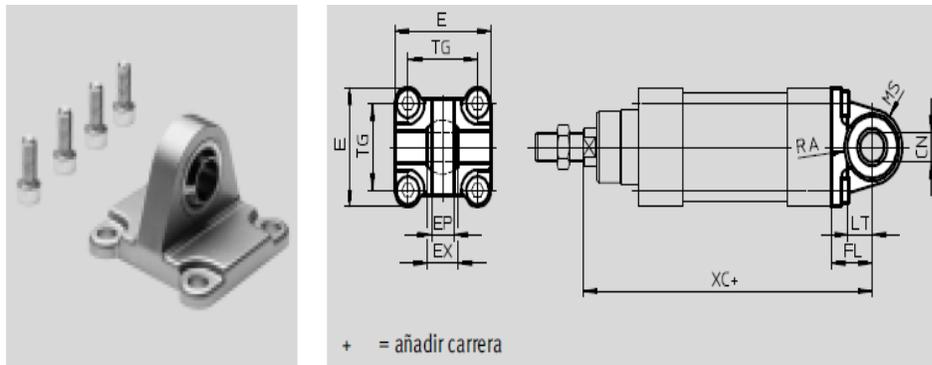


Figura 3.8 Brida basculante SNCS.

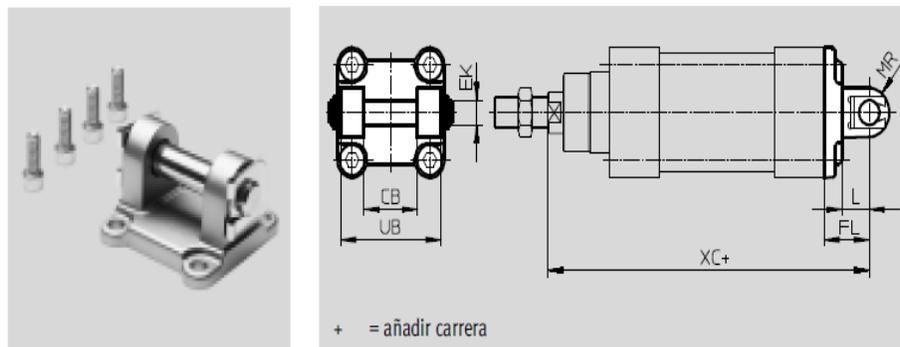


Figura 3.9 Brida basculante SNCB/SNCB-...-R3.

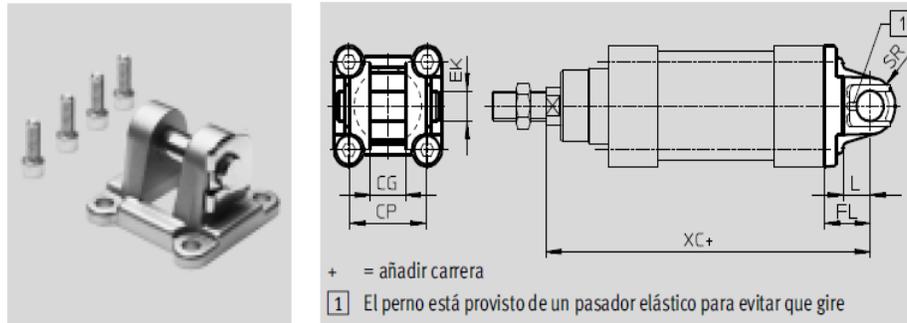


Figura 3.10 Brida basculante SNC.

Fuente: Festo Catalogo.

Basándonos en el resultado que arrojó cada brida se seleccionó el que mejor diera la relación peso/sujeción. Llegamos a la conclusión de que ese elemento era la brida basculante SNCS.

Del catálogo de FESTO obtuvimos las características de este elemento que son las siguientes:

Tabla 3.0.3 Dimensiones y referencias.

Fuente: Festo Catalogo.

Dimensiones y referencias															
Para diámetro [mm]	CN \varnothing	E	EP $\pm 0,2$	EX	FL $\pm 0,2$	LT	MS	RA $+1$	TG	XC		CRC ¹⁾	Peso [g]	N° art.	Tipo
											KP				
32	10 ^{+0,013}	45 ^{+0,2/-0,5}	10,5	14	22	13	15 ^{+0,5}	14,5	32,5	142	187	2	86	174397	SNCS-32
40	12 ^{+0,015}	54 ^{-0,5}	12	16	25	16	17 ^{+0,5}	17,5	38	160	213	2	122	174398	SNCS-40
50	16 ^{+0,015}	64 ^{-0,6}	15	21	27	16	20 ^{+0,5}	18,5	46,5	170	237	2	216	174399	SNCS-50
63	16 ^{+0,015}	75 ^{-0,6}	15	21	32	21	23 ^{-0,5}	23	56,5	190	266	2	281	174400	SNCS-63
80	20 ^{+0,018}	93 ^{-0,8}	18	25	36	22	28 ^{-0,5}	25	72	210	305	2	557	174401	SNCS-80
100	20 ^{+0,018}	109 ^{+1/-0,7}	18	25	41	27	30 ^{+0,5}	95	89	230	328	2	683	174402	SNCS-100
125	30 ^{+0,018}	132 ^{+1/-0,7}	25	37	50	30	39 ^{+0,5}	100	110	275	400	2	1369	174403	SNCS-125

Posterior a esto se escogieron los acoplamientos de cada vástago esto para realizar la unión que permitiera el desplazamiento de manera planar. Los elementos seleccionados fueron los siguientes:

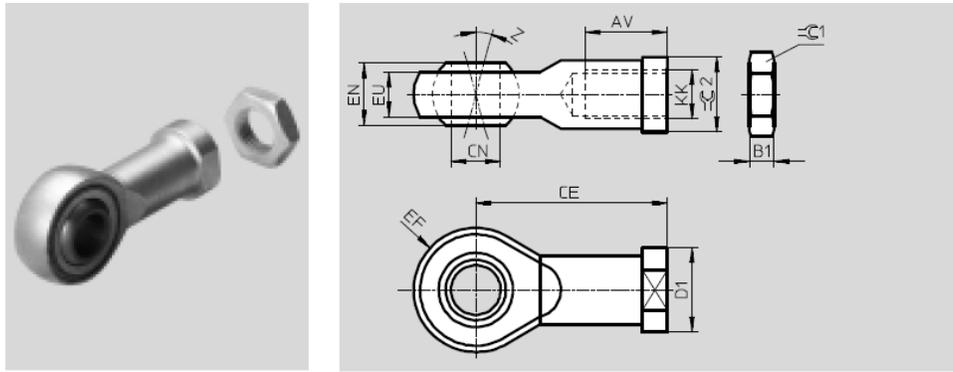


Figura 3.11 Cabeza de Rotula SGS.

Fuente: Festo Catalogo.

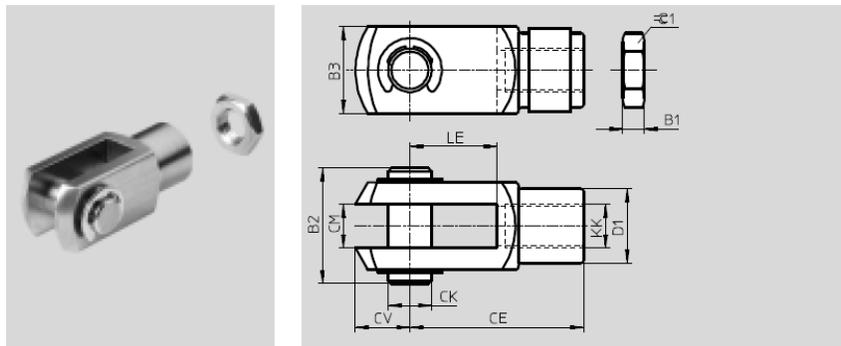


Figura 3.12 Horquilla CRSG.

Fuente: Festo Catalogo.

Estos dos elementos se adaptan de una buena manera tal que nos permite el movimiento de rotar en el punto de traslación que es lo que nos interesa al momento de que los cilindros neumáticos se encuentran en su carrera ya sea de avance o de retroceso.

Para saber de manera exacta si los elementos que se seleccionaron funcionarían de la manera que nosotros estamos buscando, se utilizó el software SolidWorks para ensamblar cada pieza y buscar un movimiento de rotación a través de un eje que nosotros propondremos como se muestra en el primer ensamble (A.2).

Como podemos observar la horquilla (izquierda) y la rótula (derecha) permiten el movimiento deseado, que es el de rotar en un eje deseado establecimos un eje en

medio de cada círculo para simular que este es un tornillo y verificar de esta manera el giro.

Pero como podemos observar en la figura (A.3) existe colisión entre los elementos, la horquilla tiene un espacio muy estrecho y la rótula posee una parte que hace la función de un ball-joint.

Lo que se optó por hacer fue cotizar con la empresa FESTO el precio de cada elemento para que de esta manera se eligiera uno de los dos dependiendo el precio y el otro mandarlo a maquinar. Después de cotizar cada elemento se llegó a la conclusión de que sería mejor mandar hacer las dos piezas.

Se cotizo también el costo de las piezas que irían en la parte trasera de los cilindros y también se eligió mandarlas a maquinar ya que el precio de cada pieza es elevado.

Tomamos las medidas proporcionadas por el software FESTO PARTdataManager 2015 los datos que proporciona este software son los mismos que proporciona la empresa en sus catálogos. Así que con estas medidas generaremos los sólidos con las características que más nos convengan para reducir el costo del maquinado y también generaremos los planos con las tolerancias e indicaciones que vayamos a necesitar para obtener los movimientos y alcances deseados.

3.2.1 Planos y Piezas:

El primer elemento que construimos virtualmente y el cual al mismo tiempo se elaboró su plano fue la brida basculante (A.4), esta pieza ira colocada con tornillos M8 estándar a la parte trasera del cilindro tendrá la función de mantener fijo el

elemento hacia la base y también tendrá que permitir la rotación del cilindro en el plano.

Cabe mencionar que esta pieza con respecto al modelo que tomamos de FESTO es distinta ya que en algunas partes donde había un redondeo se optó por eliminarlo ya que el proceso de maquinado tiene un costo más caro y se cambió por chaflán (A.5).

Posteriormente a eso se procedió a elaborar los acoplamientos para cada vástago de la misma manera que la brida se obtuvieron las medidas del programa de FESTO y también se realizaron los ajustes para evitar la colisión antes mencionada y entre otros cuestiones que creíamos convenientes para que se ajustara a las necesidades de nuestro sistema todo esto se realizó en A3.

La rotula se puede ver en la parte de anexos como quedo de manera sólida virtualmente (A.6).

A continuación analizamos el plano de la rótula (A.7), a este elemento solo se le modificaron algunos aspectos en cuanto a medidas. Con respecto al modelo en que nos basamos podríamos decir que es casi igual.

Ahora veremos a la horquilla, esta pieza con respecto a la original, si se le tuvo que modificar aspectos en cuanto a su medida y forma original. Esto detalles los podremos observar en la parte de anexos (A.8).

Ahora podemos observar que la forma de esta pieza con respecto a la de FESTO, si cambia y mucho ya que algunas aspectos en los cuales existía algún redondeo los cambiamos por chaflán, además de que modificamos el espacio entre la

horquilla para que se evitara la colisión que ya habíamos observado anteriormente. También se ajustaron algunas medidas y radios, para que la pieza embonara de una excelente manera con respecto a la rótula (A.9).

Posteriormente se hablara del elemento deslizante, este tiene que ser un tornillo con una base donde se pueda colocar una bola loca, para que esta permita el movimiento del desplazamiento sobre el plano, también debe de soportar el peso de cada uno de los cilindros. Este elemento está compuesto por 3 piezas.

El primer elemento de nuestro conjunto sería el tornillo en el cual se colocaría la rótula y la horquilla, el segundo elemento sería la tapa en la cual se colocaría la bola loca, cabe mencionar que esta tapa se enroscara con el tornillo por motivos de mantenimiento o ajustes, y el último elemento sería una tuerca esta cumpliría la tarea de evitar que por cualquier motivo o impacto la horquilla y la rótula se salgan, y de esta manera también exista presión.

A continuación mostraremos el ensamble de la pieza en la parte de anexos (A.10) que deseamos fabricar, las medidas de las roscas fueron obtenidas de empresas que se dedican a la fabricación de roscas, es decir son roscar estándar.

Posteriormente veremos el plano de cada pieza y qué medidas se le aplicaron.

Para la pieza que ira fija a la mesa de trabajo se tomó como referencia una horquilla (A.14) a la cual se le añadieron y se le modificaron algunas características, esta horquilla tendrá que soportar el peso de un cilindro y también deberá soportar las fuerzas de empuje que efectúan los cilindros y las efectos que estos causen.

Al igual que en los otros planos, en este se utilizaran medidas y tolerancias estándares. Esta pieza aun estará sometida a un análisis dinámico con ayuda de SolidWorks esto para corroborar si soportara las distintas secuencias para las cuales se diseñó.

Para saber si las piezas están sujetas a las medidas y corroborar que estas mismas desempeñaran bien su labor al igual que tengan una buena colocación una con otra. Se procedió a realizar ensambles, esta herramienta nos ayuda para detectar posibles fallas en cuanto a colocación o en cuanto a holguras. Para evitar fricción entre cada pieza y así anticiparnos ante alguna falla o ruptura en cualquier elemento.

El primer ensamble que realizamos fue del eje rodante con los elementos seleccionados para cada vástago (B.1). Y de esta manera podemos observar que las medidas y las roscas seleccionadas embonan de una buena manera como se muestra a continuación.

Como podemos observar las piezas se colocan bien unas entre otras, este ensamble nos permite ver ya no existe colisión alguna entre piezas, cada pieza tiene un pequeño espacio libre esto para evitar el cabeceo o juego entre elementos.

El segundo ensamble que se realizo fue el de parte trasera del cilindro que ira fija a la mesa de trabajo (B.2).

Se observa como cada pieza elaborada con las medidas pre-establecidas encajan de la mejor manera, cabe mencionar que el tornillo utilizado para este ensamble se

realizó con la ayuda del toolbox de SolidWorks, y como se puede ver es un tornillo que encaja bien y se adapta con nuestras necesidades.

El ultimo ensamble que se realizo fue el del sistema por completo (B.3), esto para observar cómo funcionaban las piezas ya en un ensamble general y para observar su comportamiento trabajando como un sistema en lazo cerrado.

Nuestro sistema inicialmente empezara su recorrido a 90° (B.4) con respecto uno del otro. Esto nos dará como resultado un movimiento de forma lineal, circular, etc. El desplazamiento depende mucho de las longitudes que nosotros proporcionamos a cada cilindro y de esta manera obtendremos las coordenadas del elemento móvil que es el que determinara el tipo de movimiento que nosotros estaremos observando.

CAPITULO IV

Resultados

Los catálogos del proveedor nos sirvieron de mucho al igual que el programa de FESTO PARTdataManager para realizar las piezas que necesitábamos ya que al final de esto terminamos mandando a maquinar todos los elementos seleccionados por cuestiones de precio.

El área de trabajo fue una mesa (B.6), que de igual manera es distribuida por FESTO pero es de la marca BOSCH, el perfil es de 30 x 30 mm se utilizaron varias republicas de este perfil para crear la mesa que utilizamos las medidas de la mesa son 70 cm de ancho por 110 cm de largo con un espesor de 30mm.

Utilizamos el software de SolidWorks para elaborar el sólido y poder realizar el ensamble final de todos elementos en conjunto.

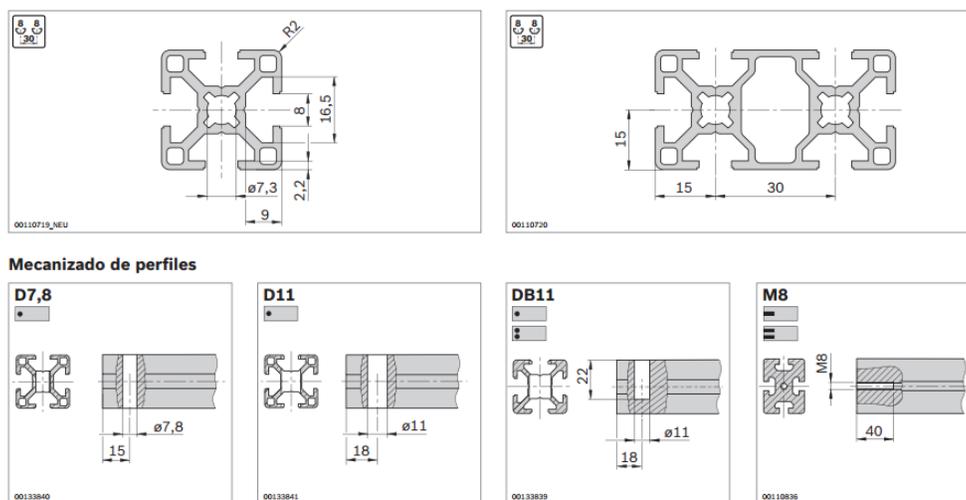


Figura 4.1 Perfil para la mesa de trabajo.

Fuente: Manual de perfiles BOSCH.

Podemos observar ya todo el sistema con la mesa de trabajo (B.7) y podemos ver que las ranuras están a la medida con respecto a los tornillos con los cuales fijaremos a cada cilindro neumático.

En la simulación utilizamos la herramienta que posee MATLAB esta herramienta es Simulink, nos permite simular el comportamiento de nuestro sistema a través de bloques. En cada bloque proporcionamos condiciones y características que nosotros consideremos importantes para el funcionamiento de nuestro sistema.

Lo que nosotros deseamos hacer es que a través de conocer las longitudes, estas nos permitan obtener un ángulo este será multiplicado con la fuerza y de esta manera sabremos el efecto que causa la fuerza en cualquier posición.

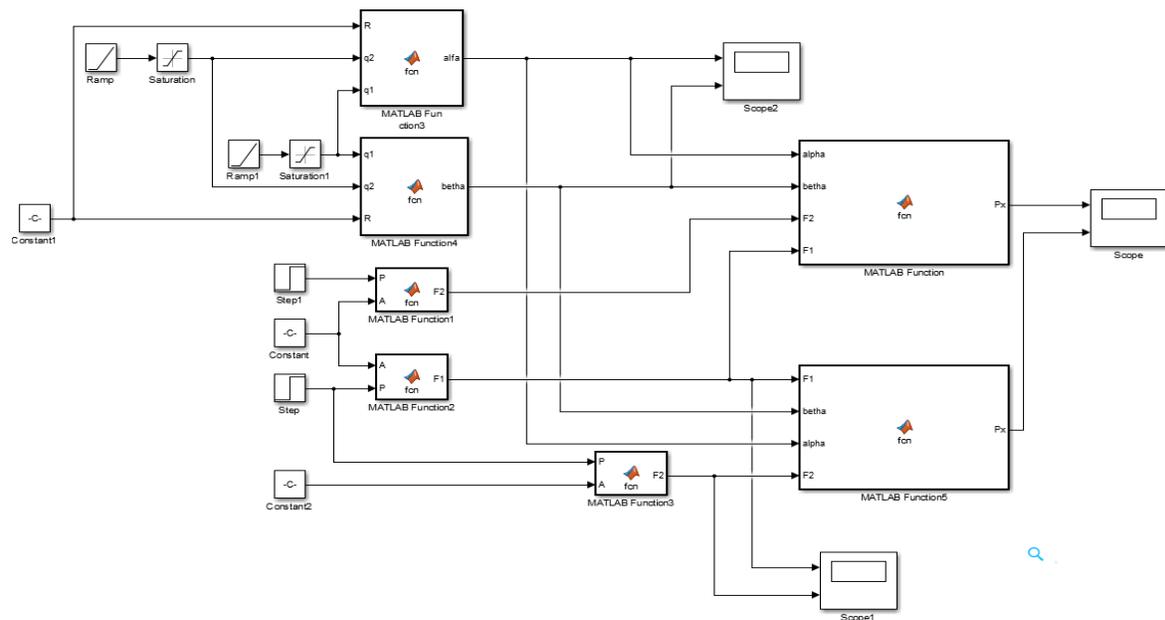


Figura 4.2 Diagrama de bloques para encontrar la fuerza resultante.

Después de conocer el efecto de cada fuerza buscamos sumarlas entre sí. Y de esta manera obtener la fuerza resultante que actúa en cada apoyo. Esta fuerza resultante nos servirá para diseñar la brida base, esta es la pieza que ira fija a la mesa de trabajo.

Como podemos observar en el primer recuadro (A.16) el comportamiento de alpha inicia la simulación en 0.6 y llega a alcanzar un máximo de 1.26 (en radianes).

En el segundo recuadro (A.17) podemos ver el comportamiento de betha al igual que alpha, betha inicia la simulación en 0.6 y termina alcanzando un valor de 0.95 (en radianes).

Cabe mencionar que alpha depende directamente de las medidas que nosotros le proporcionamos a q_2 , q_1 y R . Mientras que betha depende de q_1 , q_2 y R en el orden que se mencionan. A continuación mostraremos las ecuaciones que definen a estas variables y explicaremos como obtuvimos cada valor hasta llegar a la fuerza resultante.

Como sabemos los únicos datos que podemos conocer son las longitudes del pistón 1 (q_1), del pistón 2 (q_2) y la distancia que existe entre los apoyos (R). Con estas medidas obtendremos los siguientes valores:

$$\alpha = \arccos\left(\frac{q_2^2 - q_1^2 - R^2}{-2q_1R}\right) \quad (41)$$

$$\beta = \arccos\left(\frac{q_1^2 - q_2^2 - R^2}{-2q_2R}\right) \quad (42)$$

Estas dos variables nos sirven para hallar la fuerza resultante, que al mismo tiempo depende de otros valores constantes que más adelante mencionaremos.

$$P_x = F_1 \cos(\alpha) + F_2 \cos(\beta)$$

(43)

Las fuerzas F1 y F2 se obtienen de multiplicar la presión y el área estos datos son importantes ya que la presión que apliquemos al sistema será constante, para este caso de simulación se utilizó una presión de 6 bar (600000 Pascales) y el área que también es constante en cualquiera de los casos ya sea en avance (0.001963 m) o retroceso (0.001649m).

Como podemos observar en la imagen (A.18) la fuerza cuando ambos pistones están en su carrera de avance es de 1148.5 N aproximadamente. Empezando desde cero, después de llegar a esta fuerza se mantiene ya que alcanza la posición que nosotros le indicamos por medio de las longitudes (q1, q2, R).

En la imagen posterior (A.19) observamos que la fuerza resultante alcanza valores negativos de -300 N esto se debe por que la F1 está en avance y la F2 está en retroceso. Y esto hace un efecto de golpeteo y por esta razón el valor de la Px es negativo.

Ahora utilizaremos la fuerza resultante Px de 1148.5 para diseñar bajo esta carga la horquilla base que ira sujeta a la mesa de trabajo, a continuación mostraremos el análisis realizado al modelo que ya planteamos anteriormente le proporcionaremos las características de carga y material.

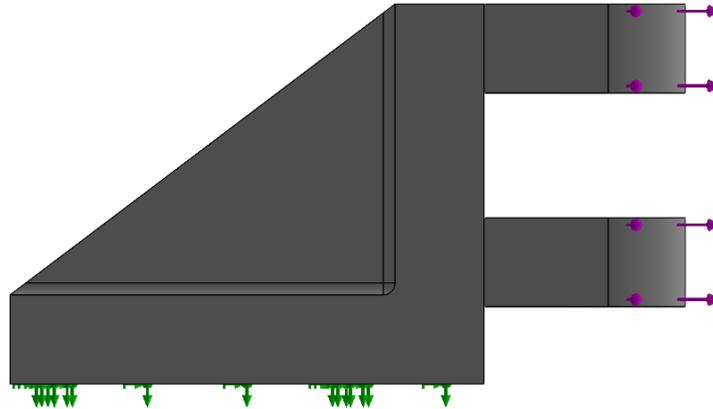


Figura 4.3 Aplicación de la fuerza resultante a la horquilla fija.

Fuente: Autor.

La parte de abajo con flechas en color verde es la parte fija, esta ira colocada a la mesa de trabajo por medio de unos tornillos, las flechas en color morado son las fuerzas que actuaran, es la suma de fuerza del pistón 1 y el pistón 2, el valor que le proporcionamos es esta fuerza P_x fue de 2000 N mayor a la obtenida en simulación esto se hizo con el fin de darle una fuerza máxima se soporte a la pieza.

El material seleccionado es una aleación de aluminio (A.20), la aleación 6061 con las características que se observan. Esta aleación fue seleccionada por su amplio limite elástico sobre las otras, además de ser un poco más comercial que otras y fácil de comprar.

El primer resultado obtenido de la simulación es el de Von Mises (A.21) podemos apreciar que la pieza casi alcanza su límite elástico que es de $5.5148 \text{ (N/mm}^2\text{)}$. En algunas partes de la pieza como podemos observar en la base no se sufre elasticidad.

En la imagen podemos observar que el mayor desplazamiento (A.22) se lleva a cabo en la parte de la horquilla superior y también observamos que el valor de esta

es de 8.614e-003 mm podríamos decir que es casi imposible que se note este desplazamiento, además debemos recordar que le estamos proporcionando una fuerza máxima, la diferencia entre la fuerza máxima Px obtenida en simulación y la que nosotros estamos proporcionando es de 850 N y por ende sabemos que el desplazamiento es casi imperceptible.

Aquí se puede apreciar que la pieza no sobrepasa el valor del factor de seguridad (A.23) que nosotros le hemos proporcionado es de $n= 1.2$ y con esto aseguramos la funcionalidad y resistencia de la misma.

Tabla 4.1 Valores de fuerzas establecidos por el proveedor.

Fuente: Festo catálogo.

Fuerzas [N] y energía de impacto [J]	32	40	50	63	80	100	125
Diámetro del émbolo							
Fuerza teórica con 6 bar en avance	483	754	1178	1870	3016	4712	7363
S2/S20	415	633	990	1682	2721	4418	6881
Fuerza teórica con 6 bar en retroceso	415	633	990	1682	2721	4418	6881
S2/S20	415	633	990	1682	2721	4418	6881
Energía máx. de impacto en las posiciones finales ¹⁾	0,1	0,2	0,2	0,5	0,9	1,2	5

1) Con las variantes K10 S20 disminuye aprox. un 10% la energía admisible del impacto.

Velocidad de impacto admisible:

$$v_{adm.} = \sqrt{\frac{2 \times E_{adm.}}{m_{propia} + m_{carga}}}$$

Masa máxima admisible:

$$m_{carga} = \frac{2 \times E_{adm.}}{v^2} - m_{propia}$$

$v_{adm.}$ Velocidad admisible del impacto

$E_{adm.}$ Energía máxima admisible del impacto

m_{propia} Masa móvil (actuador)

m_{carga} Carga útil móvil

- Importante

Los datos se refieren a los valores máximos posibles. Debe tenerse en cuenta la energía máxima admisible del impacto.

Si podemos observar la tabla 4.4 nos centramos en el valor de 50 colocado en la parte superior de la tabla este valor de 50 es el diámetro del embolo; la tabla nos proporciona ciertos valores relacionados con fuerzas obtenidas a través de la aplicación de presión en el interior de la cámara del cilindro, la presión que maneja el proveedor es de 6 Bar cabe mencionar que esta presión es la misma que nosotros estuvimos manejando en nuestra pruebas. El valor teórico de le fuerza de avance es de 1178 es mayor que el valor que nosotros obtuvimos en simulación por lo tanto no excedimos los valores establecidos por el fabricante. También podemos observar

que la fuerza de retroceso de 990 es mayor comparada con la que obtuvimos en simulación. Con estos valores encontrados en los manuales de proveedor FESTO podemos amparar que nuestro valores estuvieron dentro de los valores aceptados ya que no sobrepasamos lo que ya ellos habían obtenido y por lo tanto las piezas que fueron diseñadas bajo estos valores, se puede asegurar el funcionamiento de estas piezas estableciendo como patrón de acción estas fuerzas obtenidas.

Para corroborar los resultados obtenidos al momento de calcular los valores de los ángulos α , β y de las coordenadas x_1 , y_1 decidimos emplear un software que nos es muy maravilloso pero que si nos ayuda con ciertos análisis geométricos.

Este software es GeoGebra en su versión 5.0.2 este software no es muy novedoso a comparación con otros pero a nosotros nos ayudó a establecer el sistema para que nosotros entendiéramos de mejor forma el desplazamiento y la trayectoria del elemento móvil.

Lo primero que se hizo fue crear 2 círculos (C.1), esto porque el movimiento del pistón sobre el plano será circular, entonces posteriormente mediante líneas rectas unimos puntos esto para representar un triángulo rectángulo.

Donde las longitudes a_1 y b_1 son las medidas de cada cilindro, estas tienen un valor mínimo de 495 mm medida desde la culata trasera hasta la punta del vástago y su longitud máxima es de 815 mm con el vástago extendido.

La distancia entre cada soporte o apoyo está reflejada con la recta c_1 . La medición la realizaremos desde un punto fijo ya que este será nuestro marco de referencia.

Sabemos que A y B son los apoyos de cada cilindro.

Como podemos observar del lado izquierdo (C.2) contamos con una tabla donde podemos saber los valores iniciales de cada recta el radio de cada círculo y la distancia que nos interesa conocer que es la recta g. Las letras en mayúsculas son las coordenadas de los puntos fijos en este caso C es el punto del eje móvil así que este cambiara conforme vayamos variando los valores.

Del lado derecho podemos ver unos deslizadores (C.3) esto es para ir variando los valores del radio de cada círculo en la parte de abajo vemos unos deslizadores que dicen velocidad estos son para simular el comportamiento y para aumentar o disminuir la velocidad con la cual cada círculo vaya cambiando su valor.

Como podemos ver ejecutamos la simulación (C.4) a velocidad normal de 1 mm/s y podemos observar que los deslizadores se movieron. El punto C se movió y las líneas o puntos en color negro son el rastro de su movimiento mientras va variando el valor de cada círculo.

De esta manera pudimos comprobar que los valores obtuvimos en cálculos a mano, ejecutando la simulación en simulink y corriendo el movimiento de cada círculo en GeoGebra llegamos a los mismos resultados. Y cabe mencionar que este último software nos ayudó a entender el tipo de movimiento del sistema, así como a discriminar una de las dos soluciones del sistema, porque cada intersección de los círculos es una solución del sistema y con la ayuda antes mencionada logramos quedarnos con la que más se acomoda a nuestras necesidades, y que es una solución real.

CAPITULO V

Conclusiones y recomendaciones.

De manera general se dice que este proyecto ha sido concluido satisfactoriamente. Se han realizado cada una de las actividades que se plantearon de manera óptima: desde la investigación hasta la simulación de todas las partes ensambladas en conjunto. Cabe mencionar que la construcción del prototipo real no se elaboró por causad de fuerza mayor, ya que el presupuesto considerado para este proyecto no se liberó a tiempo y por ende no se alcanzó a realizar las adquisiciones del piezas y demás.

La automatización del sistema a través de los programas y plataformas empleadas es viable por diferentes aspectos, uno de ellos y que cabe mencionar muy puntualmente es el ahorro económico que se lograra, es considerable, ya que se realizaron los modelos necesarios para cubrir las necesidades a las que nuestro sistema se someterá. Los planos tienen los ajustes necesarios y que se consideraron en el momento exacto ahora comparando los precios de las piezas que el fabricante nos ofrece a los precios que nos ofrecen al maquinar las piezas, nos conviene de mejor manera mandarlas a maquinar para ahorrar y cubrir otras demandas que el proyecto necesite posteriormente.

Con todo estos detalles que se observaron y que sin duda alguna son para bien del proyecto, se le planea darle continuidad a este proyecto por parte del CINVESTAV y el DR. Ernesto Olguín Díaz, el siguiente paso es construirlo con base a la

investigación que nosotros realizamos con la ambición de un futuro este proyecto volver 3D y que haga traslaciones en el espacio esto con el fin de realizar tareas industriales.

Aunque nuestra investigación abarco varios puntos que se consideraron importantes para el comportamiento del sistema, existen aún muchos más factores que se consideran una mejora para este sistema, como lo es agregarle otro actuador y que el sistema pase de 2D a 3D. Este factor modificaría en cierta manera los valores de los esfuerzos en los apoyos y por ende crearía nuevos factores a considerar.

Nuestra investigación considero muchos factores en el espacio 2D y esta probado de manera virtual y en simulación que bajo las condiciones establecidas el sistema no fallara y que se mantiene en el rango de funcionamiento del fabricante, esto quiere decir que nuestro no son erróneos y que cumplen con lo ya establecido.

Debido a que el investigador con el que estuvimos laborando aun no contaba con los recursos económicos por parte de la administración, no se realizaron pruebas físicas de mayor precisión, es decir si se pudieron hacer algunas pruebas pero no disponíamos de todos los elementos para hacer el análisis más profundo. Podríamos aconsejar a la unidad administrativa agilizar los procesos de una manera en la cual no se estanquen mucho en la aprobación de un recurso, también otro de

los impedimentos fueron los proveedores ya que para poder adquirir un equipo, material o pieza, nos pedían muchas referencias de la tienda o empresa distribuidora, y algunas de estas empresas no contaban con estos requisitos.

Algunas de las cotizaciones que logramos hacer fueron rechazadas por no contar con los requisitos expedidos por parte de la administración, en este caso de mi parte solo podría recomendar hacer más accesibles las compras o adquisiciones de material o equipo, para agilizar el tiempo de implementación y pruebas, para que de esta manera los resultados sean más rápidos o si se necesitan hacer algunas modificaciones se realicen de manera inmediata.

Otra de las cosas sería recomendarle al asesor pasar un poco más de tiempo con sus estudiantes o realizar revisiones grupales para que de esta manera si surgen dudas o detalles entre todos como un equipo resolverlas, ya que si dejas solo a una persona esta desarrollara la tarea que tú le asignes de la manera que él puede o de la manera que el entienda. Uno de los principales factores que impiden la comunicación asesor-alumno es el creer que el alumno por el simple hecho de ser universitario o de ser de una carrera a fin tiene que conocer todo, y esto es una problemática porque en ocasiones los cursos o materias no se alcanzan a terminar y por ende cuando un alumno tiene una tarea que resolver, no puede llevarla a cabo porque no tiene las herramientas necesarias para resolverla o analizarla.

Esto se recomienda para que los proyectos futuros puedan ser satisfactorios y tengan el impacto que se planea, además para garantizar que los temas, modelos y prototipos tienen la mejor funcionalidad.

En cuanto a las atenciones prestadas por parte del asesor externo, estas fueron de mucha ayuda ya que es de suma importancia las revisiones y soluciones que él pueda aportar para enriquecer más el proyecto que se está realizando, también aporta una exhausta revisión para que la residencia se escriba y tenga la estructura deseada por parte de los revisores de la academia.

CAPITULO VI

Competencias desarrolladas

El proyecto en general consistía en desarrollar y construir un robot paralelo planar con dos grados de libertad. Este se desmenuzo en dos partes, una parte era de control que trabajo mi compañero Luis Herrera y la parte de diseño que trabaje yo. Aplicamos los conocimientos adquiridos en la universidad, el tipo de investigación por el cual empezamos fue pura ya que se buscaba más teoría que nos pudiera ayudar a determinar de mejor manera los patrones o factores que intervendrían en nuestro análisis. Con ayuda de la investigación experimental pudimos manipular y entender cómo se desarrollaban las variables que encontramos en la investigación pura. Claro para determinar el tipo de investigación que utilizaríamos nos apoyamos de nuestro cursos llevados en la universidad.

El poder de análisis y comprensión fueron factores muy importantes durante nuestra estancia, ya que muchas cosas aún faltaban deducirse y estaban estas de manera implícita en el desarrollo del tema, es decir se realizaron análisis por aparte y posterior a eso se juntaron los resultados para posteriormente realizar un resultado de manera general.

Las herramientas matemáticas también fueron fundamentales en el desarrollo del tema, ya que este mismo lo requería por su naturaleza. Desde conceptos básicos como geométrica hasta leyes y casos de integrales, entre otras que fuimos requiriendo mientras avanzábamos con nuestra investigación.

Otras de las cosas que necesitamos fueron los conocimientos y herramientas que obtuvimos en nuestro curso de Diseño y Diseño asistido por computadora, estas dos materias para mí punto de vista son dependientes ya que una se entrelaza con la otra. Porque al realizar análisis de diseño de manera analítica encontramos factores de diseño y comportamiento de un elemento que este a su vez nos será de mucha ayuda ya que a través de ese resultado nosotros podremos generar un modelo en 3D de manera virtual que se adopte y comporte de manera estable ante los valores y características antes calculadas y analizadas. Para crear este modelo o sólido primero tenemos que calcular y valorar las medidas que nosotros proporcionaremos para esto podemos utilizar herramientas de CAD que nos permiten evaluar las piezas o sólidos de manera que esta nos dé a conocer si los valores que estamos proporcionando son correctos y si necesitan algunas correcciones. Existen dos tipos de análisis para que el software que utilicemos nos ayude en nuestro caso utilizamos SolidWorks que fue el software que utilizamos durante toda la carrera. SolidWorks nos permite analizar elementos o piezas de manera estática o dinámica dependiendo nuestra necesidad de análisis. En nuestro caso utilizamos análisis dinámico ya que nuestro sistema por completo siempre está en constante movimiento.

Después de analizar y diseñar las piezas o elementos por completo, a cada una de estas se le realizó su plano ya que se mandarían a maquinar por cuestiones de presupuesto, de esta manera aplicamos los conocimientos en metrología y normalización, también aplicamos el tema de tolerancias esto para generar planos que fuesen muy claros para la persona que llevara a cabo la tarea de maquinar, el

fin de esto es hacer de manera muy fácil la comprensión de la información que cada plano tiene para que de esta forma se obtengan los elementos como se planearon y calcularon.

La capacidad de crear y comprender el comportamiento de los sistemas en lazo cerrado fue también fuente de nuestro análisis y con ello la necesidad de realizar simulaciones para entender los efectos que actúan directamente en estos sistemas. Para ello utilizamos herramientas del software simulink esto visto en nuestras materias de control e instrumentación y control, en este caso aplicamos el cómo distribuir los sistemas con ayuda de bloques. Esto para ayudar a comprender como interactúan los elementos entre si además de conocer las constantes y variables que intervienen, también con esto verificamos si los valores obtenidos de manera analítica concordaban con los valores obtenidos en simulación.

En la universidad tuvimos el privilegio de trabajar con sistemas neumáticos, no eran sistemas muy complejos pero no ayudaron a distinguir entre neumática e hidráulica, esto nos ayudó en el proyecto para poder calcular las distintas variables que intervienen de manera interna en los cilindros de doble efecto y también logran causar considerables efectos que si no se toman en cuenta pueden llegar a afectar el sistema no destruirlo pero si con el tiempo ocasionarle daños notables es por eso que se tomaron en cuenta factores que son de ayuda para lograr diseñar elementos que ayuden a estos cilindros a desempeñar la tarea que nosotros les encomendamos.

En general mucho de lo visto de manera teórica y práctica durante nuestra formación como ingenieros se vieron aplicados con este proyecto aprendimos

muchas cosas que en la universidad solo se alcanza a hacer una pequeña introducción pero que esa mínima información que nos dan es de mucha ayuda para que en un futuro cuando necesitemos comprender ese tema no sea algo desconocido y por lo menos tengamos noción de lo que se está hablando o de lo que se necesita hablar. También el trabajar en equipo es primordial ya que esto nos enseña a colaborar para que obtengamos un producto de calidad y tengamos la certeza de que se hizo de la mejor manera posible y garantizamos que los resultados obtenidos fueron los mejores que se apegaban a nuestras necesidades.

CAPITULO VII

Referencia bibliográfica.

BOSCH. (12 de 1999). *Bosch Aluminium Structural Framing System*.

D.A. Ramirez Rodriguez, L. M. (2011). Modelamiento dinámico de mecanismos paralelos con actuadores prismaticos utilizando SimMechanics de Matlab. *Intekhnia*, 11.

Olguín, E. D. (01 de 05 de 2014). A unifying framework for the modeling formulations of rigid multibody systems A Body Decomposition Approach. 17.

Festo. (27/01/2016 de 12 de 2015). www.festo.com/catalogue/... Obtenido de Manual Cilindros Normalizados DNC, ISO 15552.

Festo. (02/02/2016 de 06 de 2015). www.festo.com/catalogue/... Obtenido de Acoplamientos para Vástagos.

Jay D. Helsel, C. J. (s.f.). *Dibujo y Diseño en Ingenieria*. Edicion Mexico, D.F.: Mc Graw Hill.

Oetomo, D. H. (2006). Direct Kinematics and Analytical solution to 3RRR parallel planar mechanisms. *RESEARCH ONLINE*, 2251-2256.

Valvias. (04 de 04 de 2016). www.valvias.com/prontuario-rosca-metrica.php.

Obtenido de Dimensiones Rosca Metrica:

<http://www.valvias.com/prontuario-rosca-metrica.php>

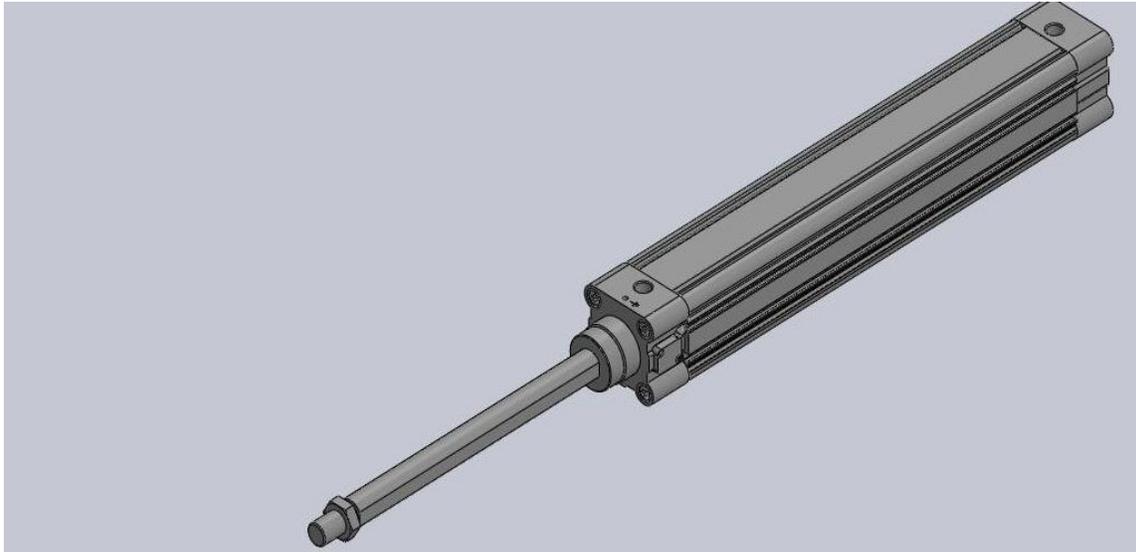
Zagalo Enrique Suárez Aguilar, O. S. (2009). *Virtual Uptc*. Obtenido de Solucion de Ecuaciones no lineales con Matlab:

http://virtual.uptc.edu.co/procesos/matematicas2009/memorias/Archivos/Talleres/taller_matlab.pdf

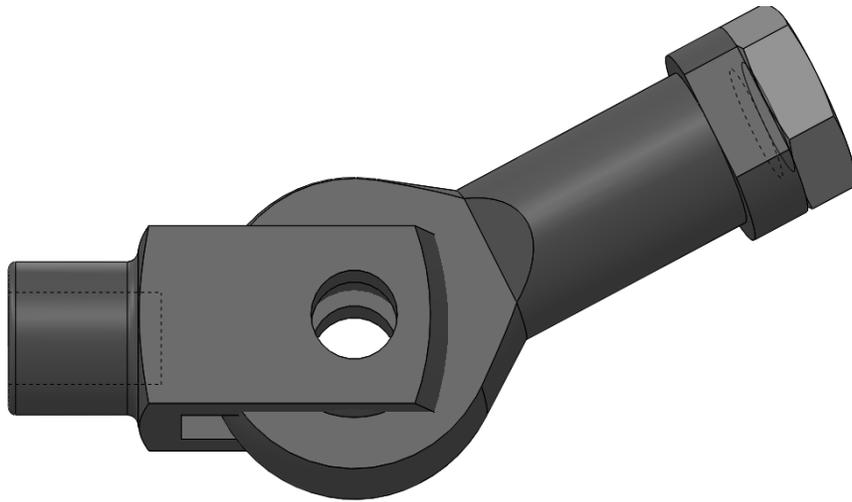
ANEXOS

Piezas, Planos y Simulación.

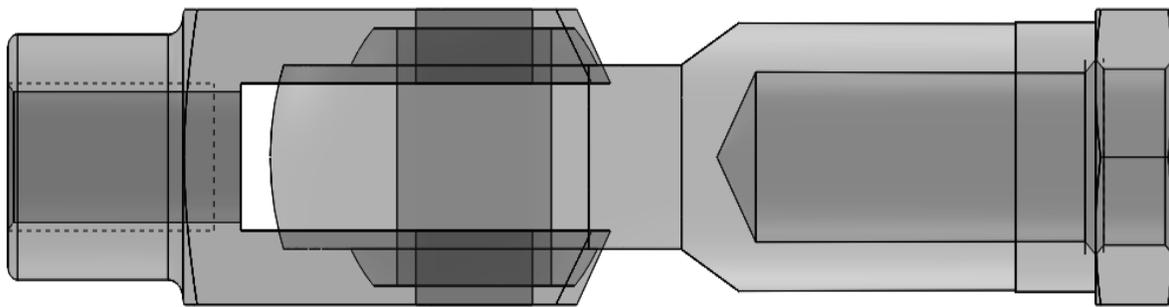
A



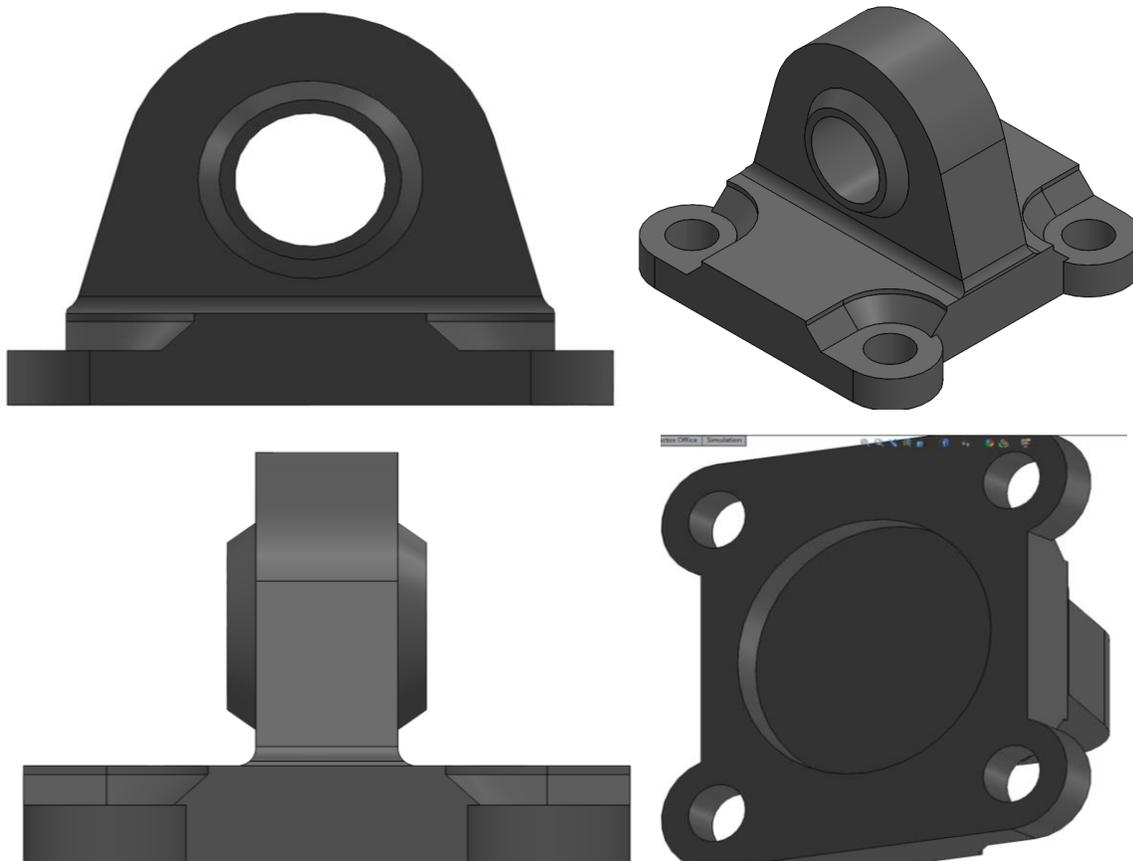
A.1 Cilindro Neumático en SolidWorks.



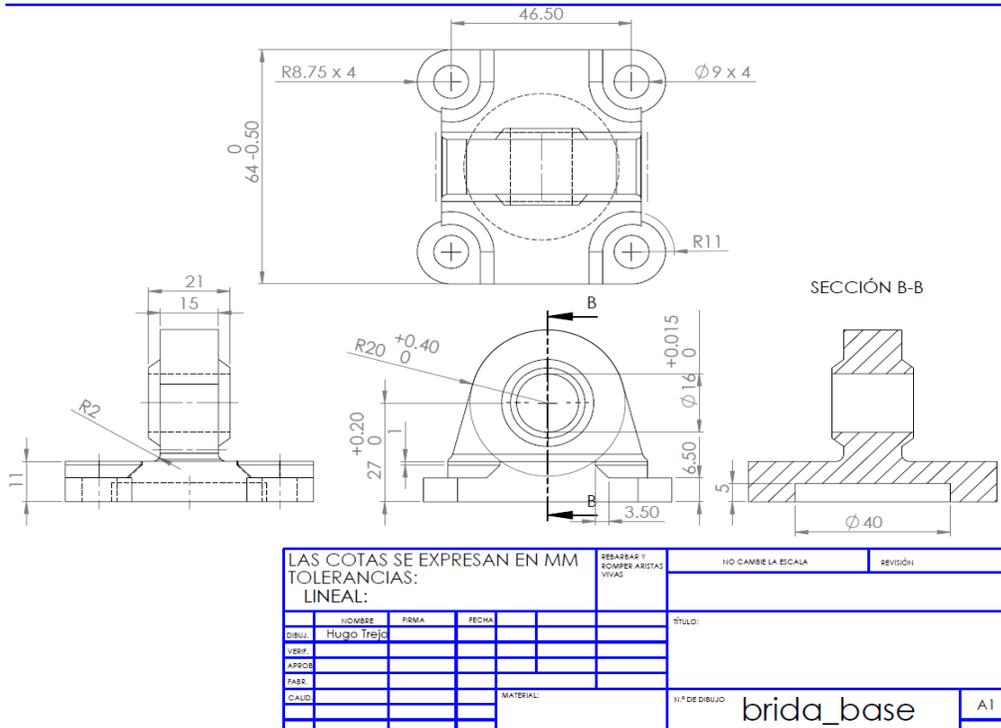
A.2 Ensamble de los elementos de cada vástago.



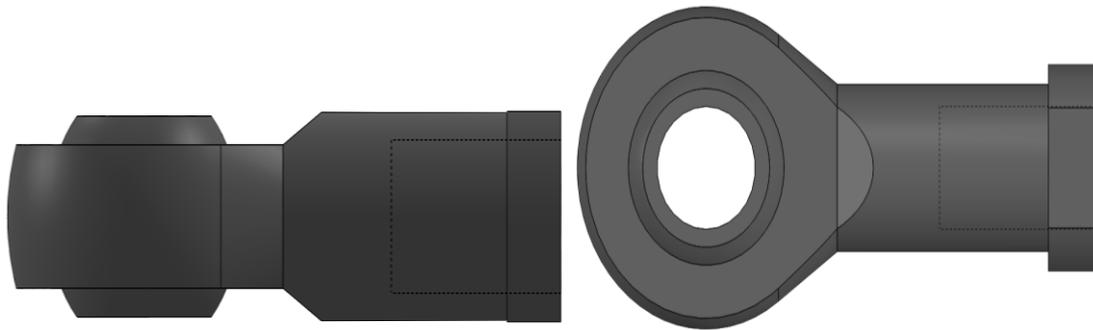
A.3 Colisión de los elementos.



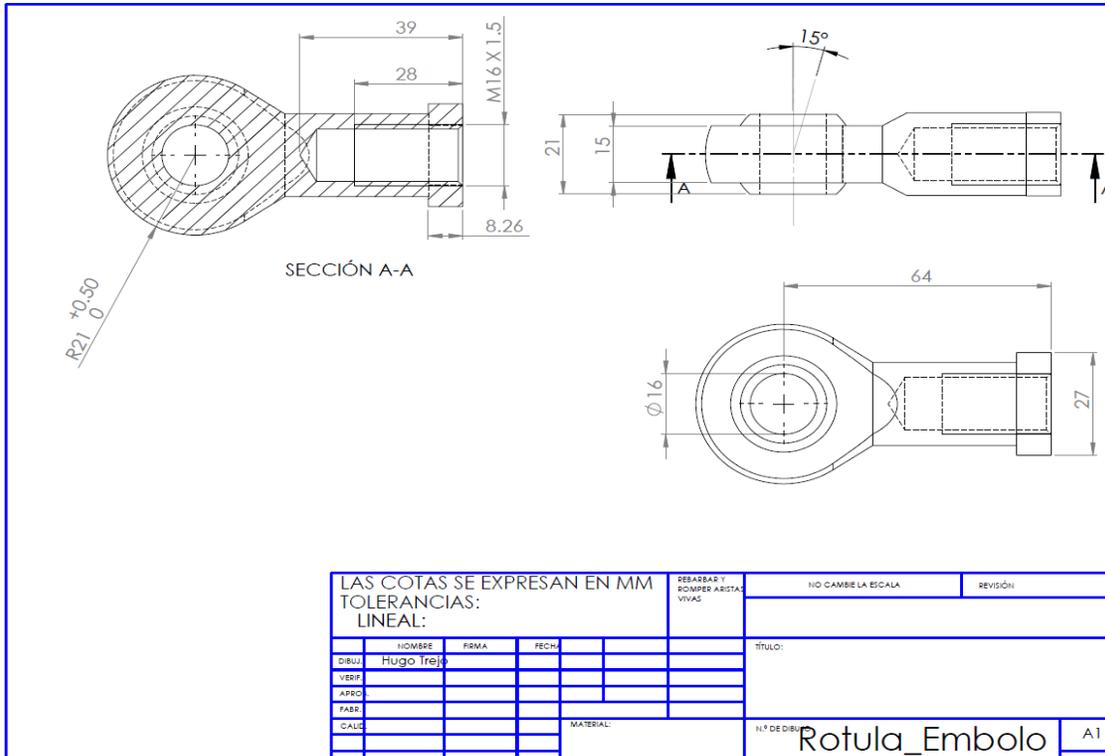
A.4 Modelo de brida base seleccionada.



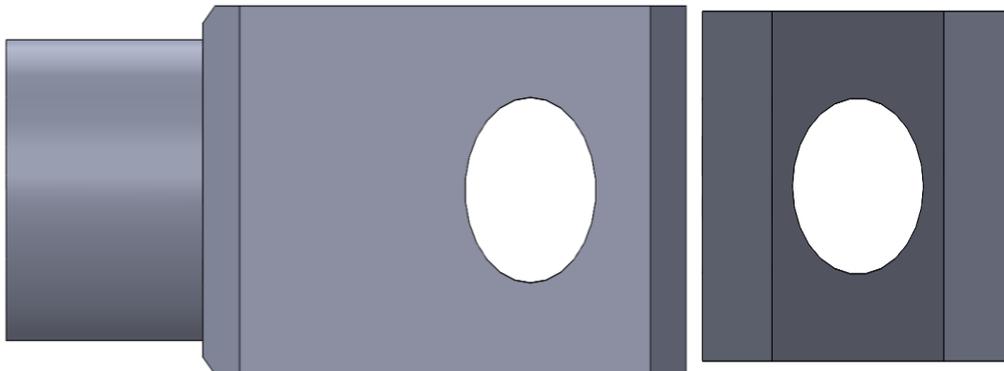
A.5 Plano de brida base.



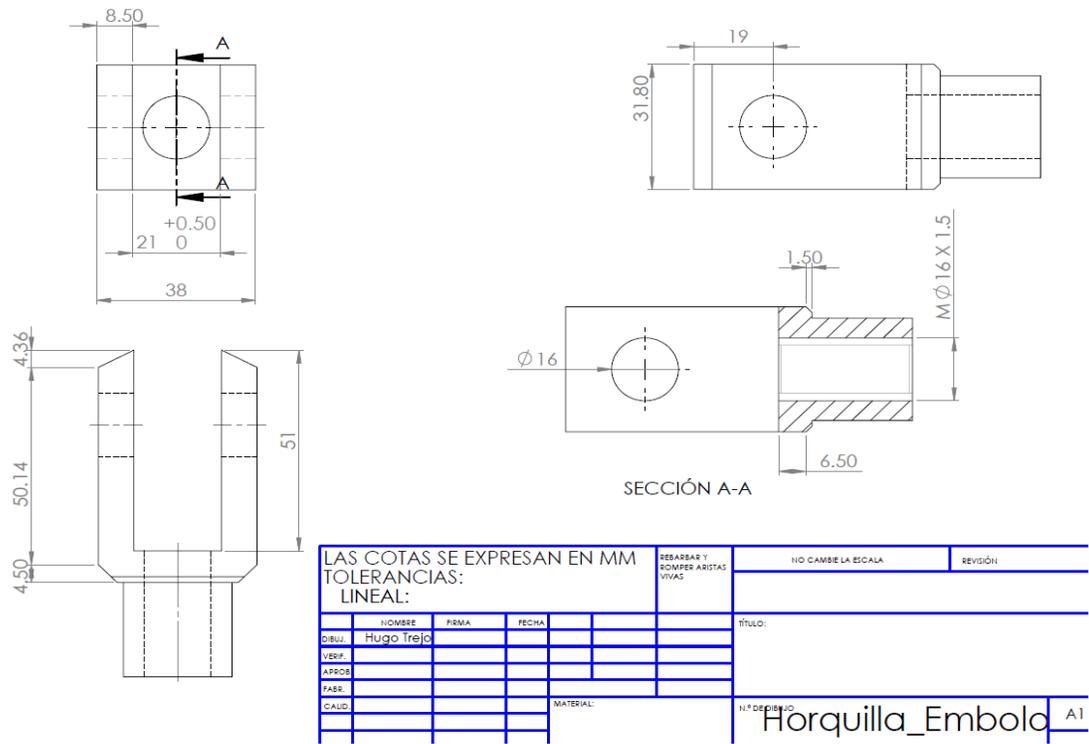
A.6 Modelo de rotula embolo.



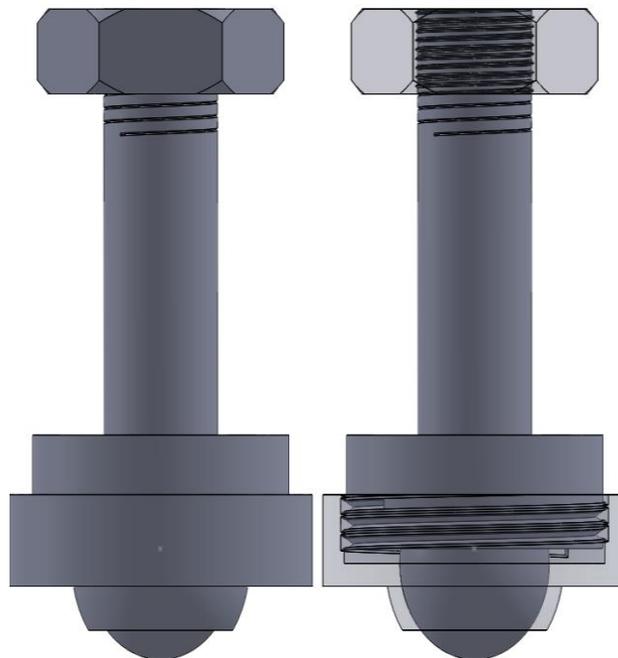
A.7 Plano de rotula.



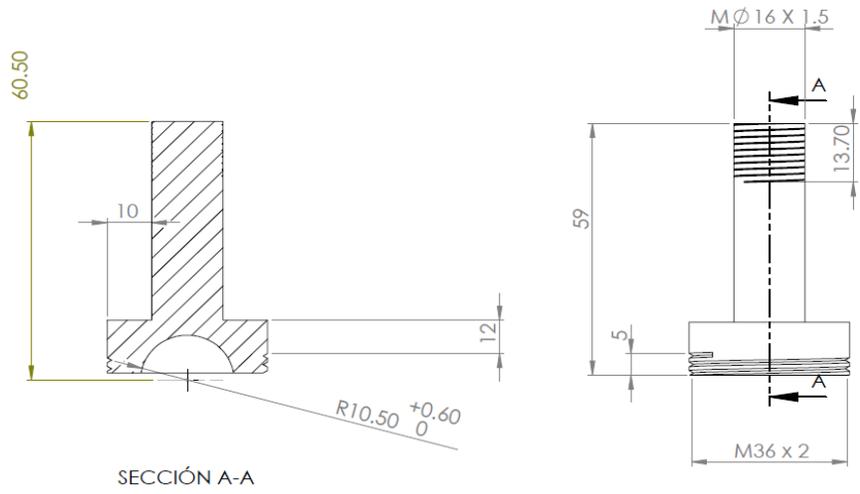
A.8 Modelo de horquilla embolo.



A.9 Plano de horquilla embolo.



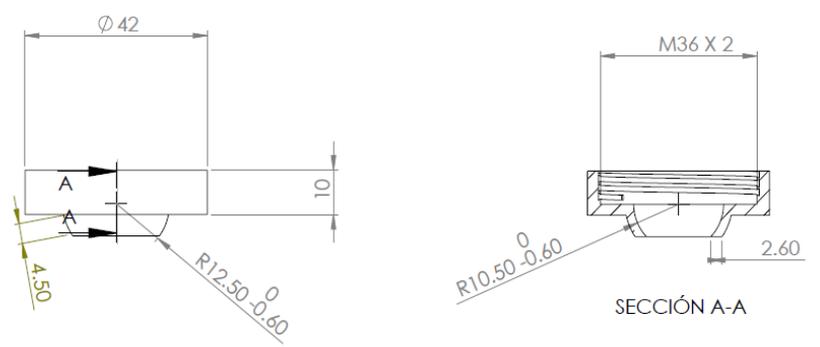
A.10 Ensamble de eje rodante.



SECCIÓN A-A

LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM TOLERANCIAS: LINEAL:				REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
DIBUJ.	HUGO TREJCI	FIRMA	FECHA		TÍTULO:	
VERIF.						
APROB.						
FABR.						
CALID.				MATERIAL:	N.º DE DIBUJO	
					Eje_Rodante	
				PESO:	ESCALA:1:1	HOJA 1 DE 1
						A1

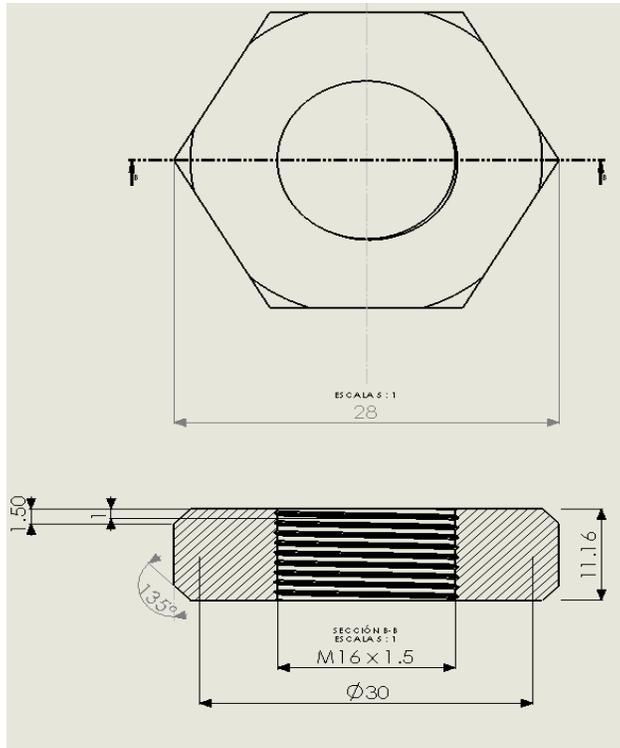
A.11 Plano de eje rodante.



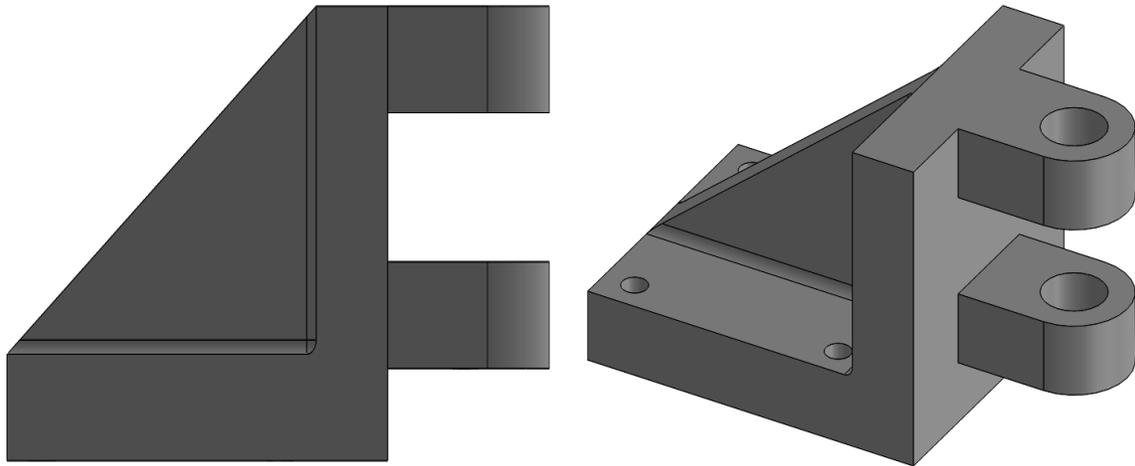
SECCIÓN A-A

LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM TOLERANCIAS: LINEAL:				REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
DIBUJ.	HUGO TREJCI	FIRMA	FECHA		TÍTULO:	
VERIF.						
APROB.						
FABR.						
CALID.				MATERIAL:	N.º DE DIBUJO	
					Eje_Rodante_(Base)	
						A1

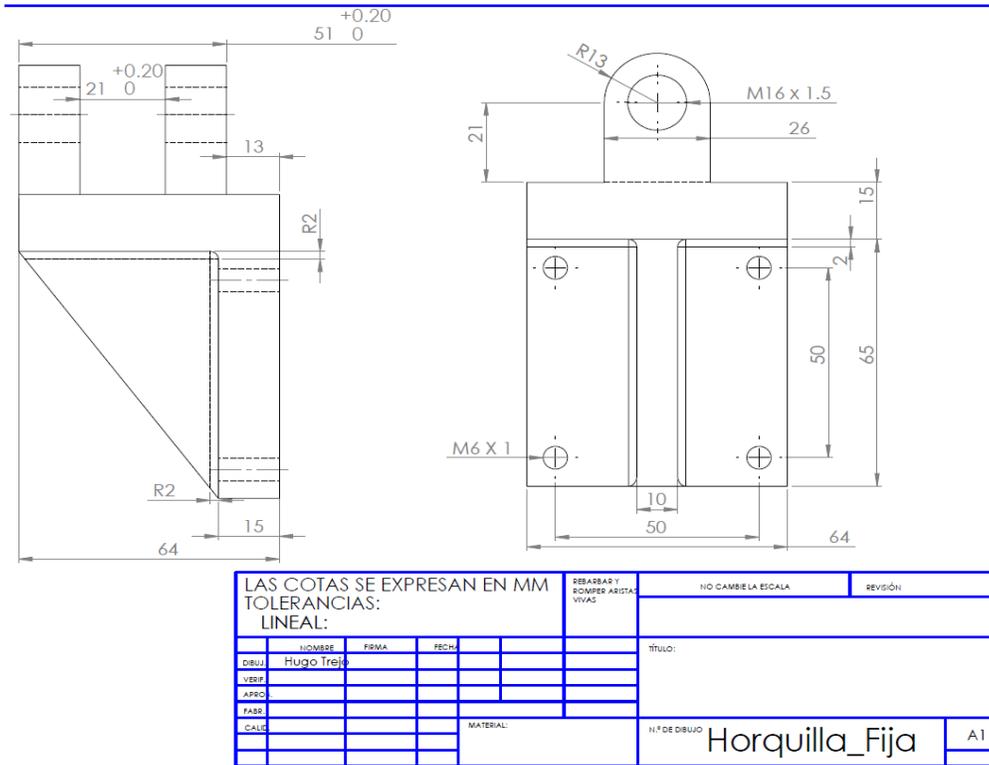
A.12 Plano de la base del eje rodante.



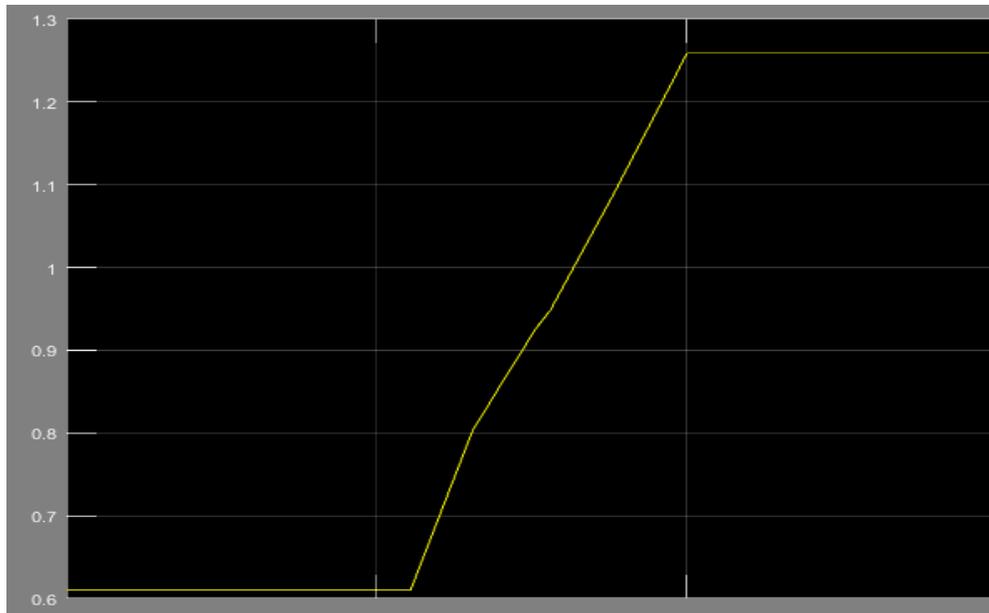
A.13 Plano del tornillo de apriete del eje rodante.



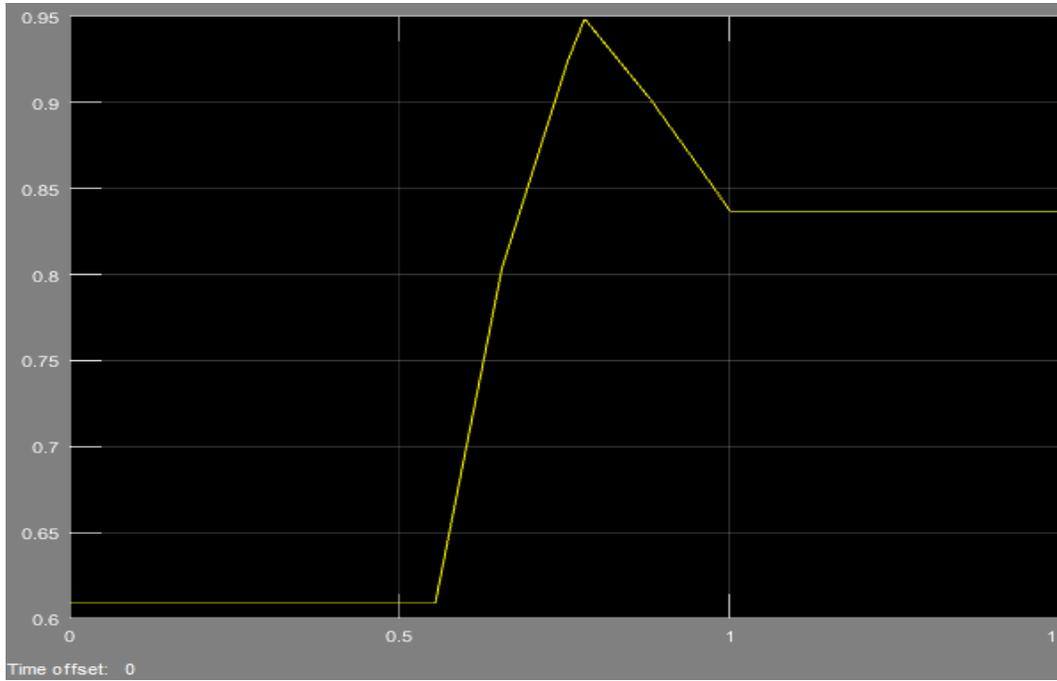
A.14 Modelo de horquilla fija.



A.15 Plano de horquilla fija.



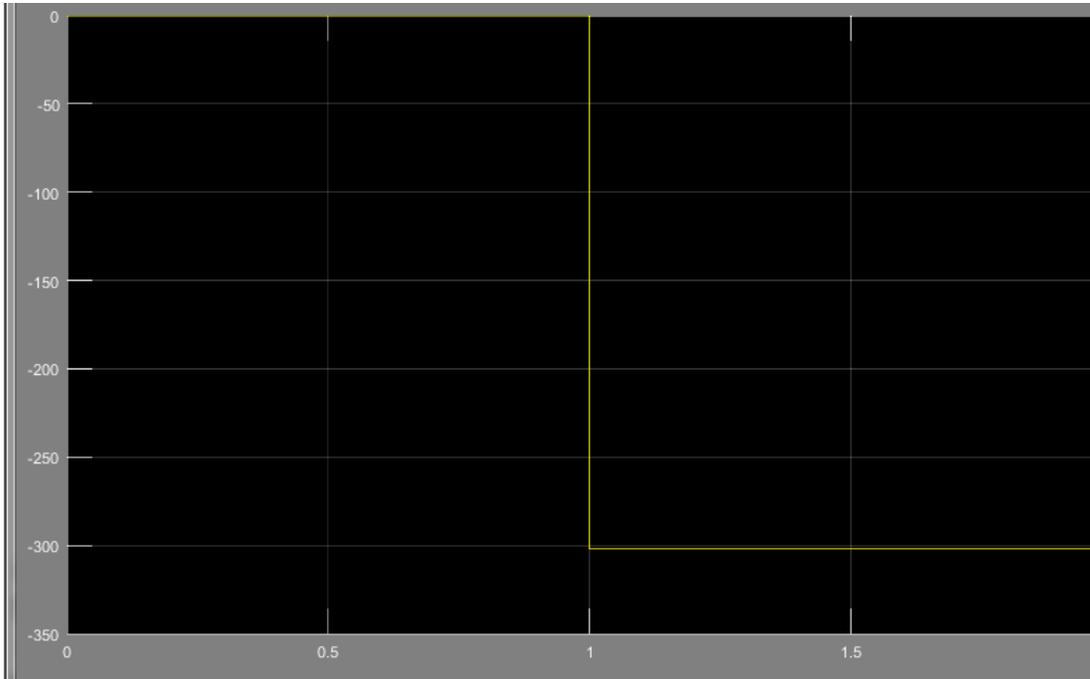
A.16 Comportamiento del ángulo alpha.



A.17 Comportamiento del ángulo betha.



A.18 Comportamiento de la fuerza resultante Px.



A.19 Comportamiento de la fuerza Px cuando un cilindro está en retroceso.

Propiedades Favoritos

Propiedades de material
No se pueden editar los materiales en la biblioteca predeterminada. Para editar un material, cópielo primero a una biblioteca personalizada.

Tipo de modelo:

Unidades:

Categoría:

Nombre:

Descripción:

Origen:

Sostenibilidad:

Propiedad	Valor	Unidades

« SolidWorks Simulati...

1 Sujeciones ✓
2 Cargas ✓
3 Material ✓
4 Ejecutar
5 Resultados
6 Optimizar

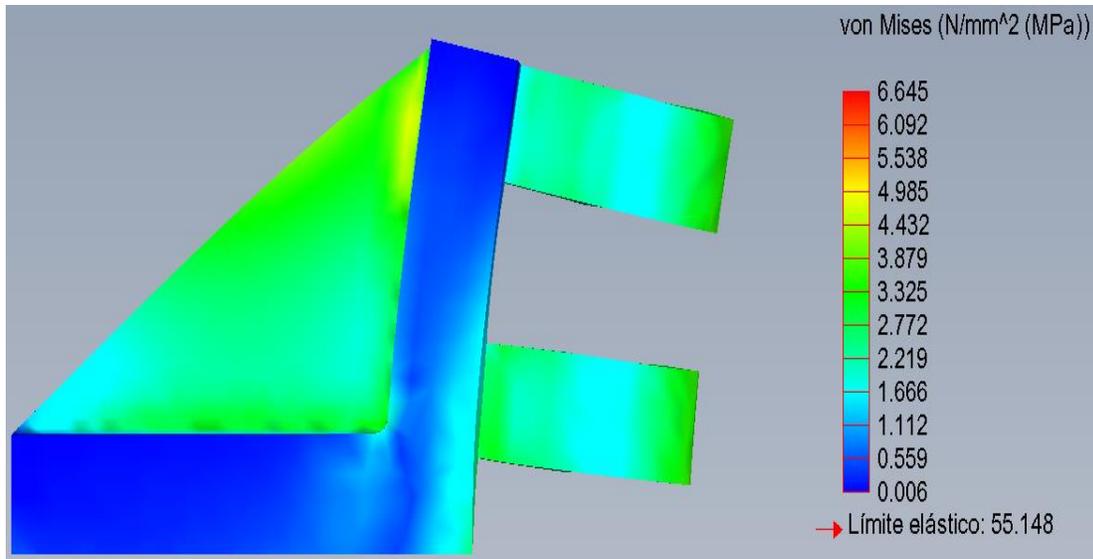
El material asignado a esta pieza es:

Aleacion 6061

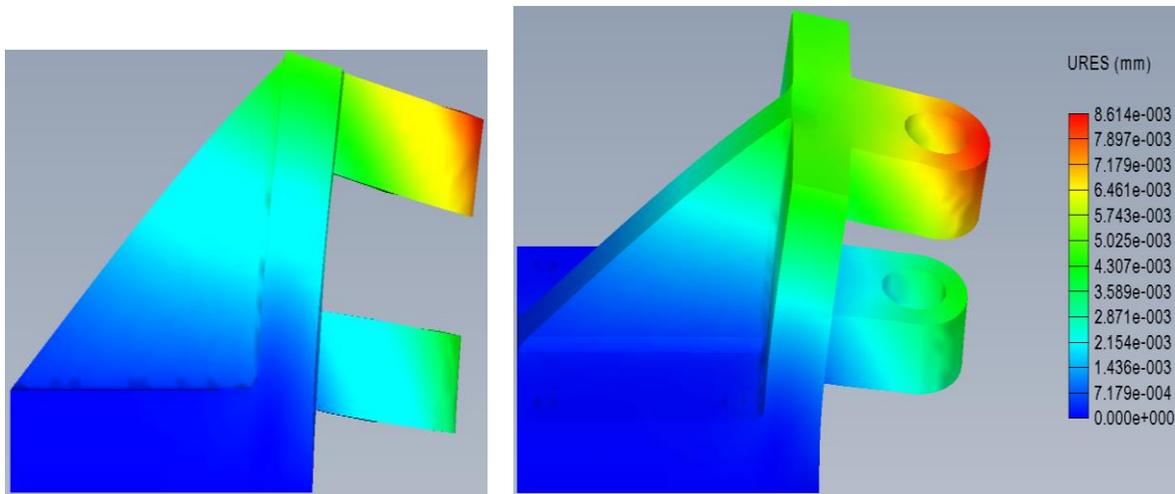
Módulo de Young:
6.9e+010N/m^2

Límite elástico:
5.51485e+007N/m^2

A.20 Selección del material y sus características.



A.21 Comportamiento de la horquilla fija ante el límite elástico.



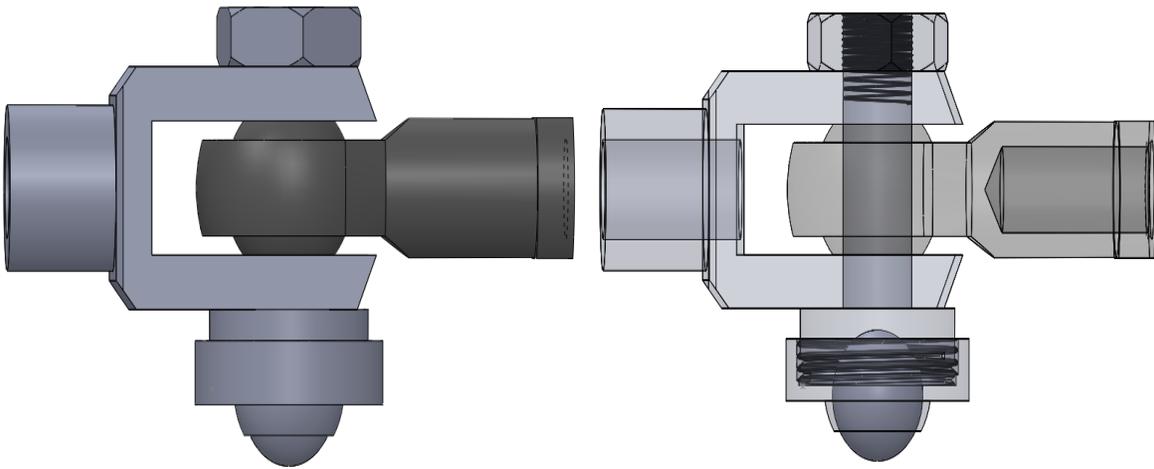
A.22 Punto de mayor desplazamiento de la pieza.



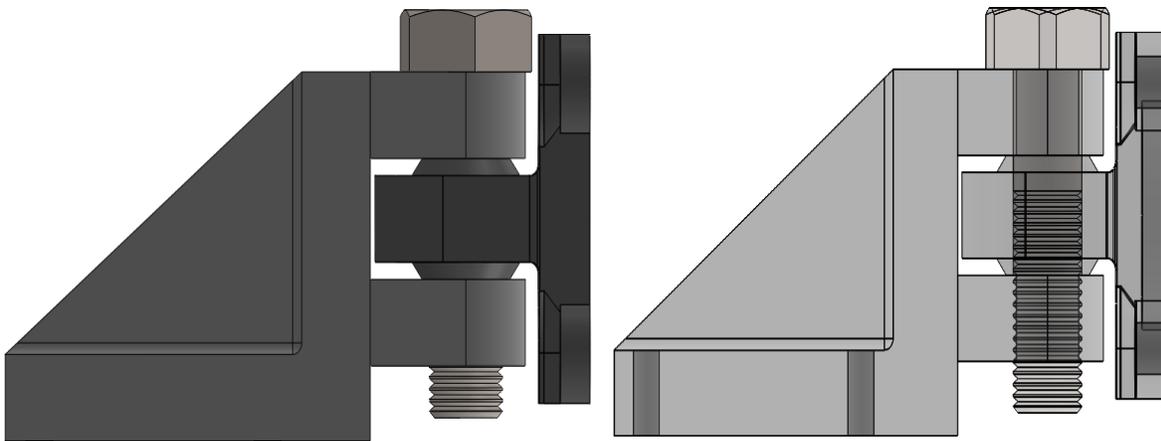
A.23 Comportamiento de la pieza ante el factor de seguridad.

B

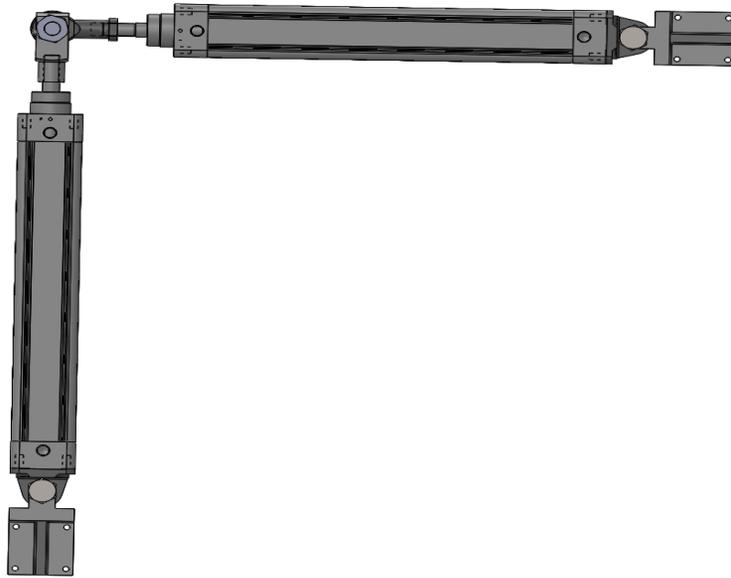
Ensamblados.



B.1 Ensamble del eje rodante con los acoplamientos para cada vástago.



B.2 Ensamble de horquilla fija con brida basculante.



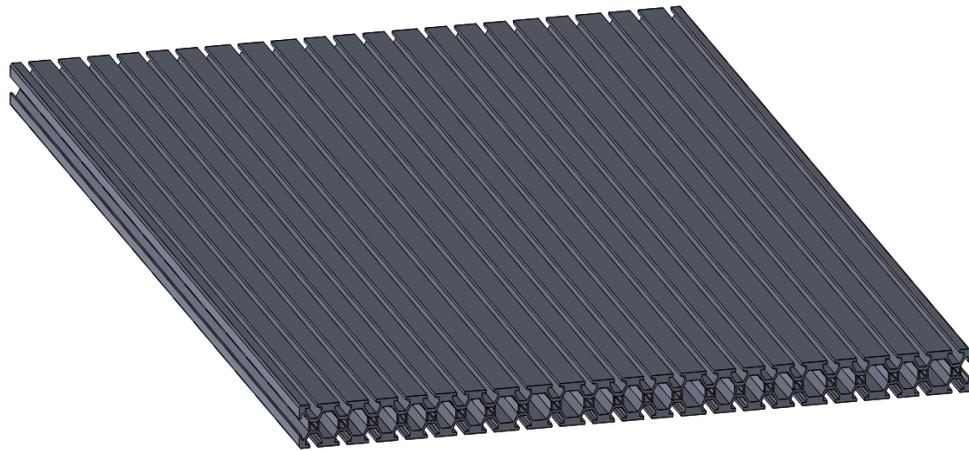
B.3 Ensamble de los dos cilindros con sus respectivos elementos.



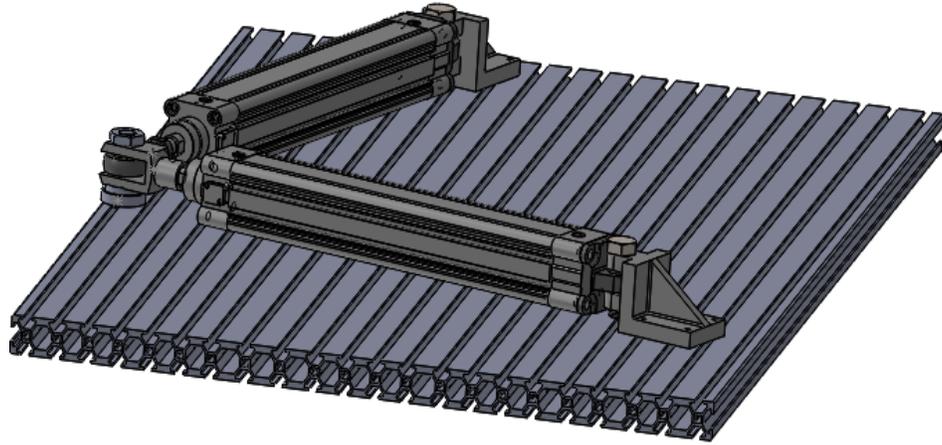
B.4 Recorrido del sistema a 90° uno con respecto del otro.



B.5 Componentes del ensamble general.



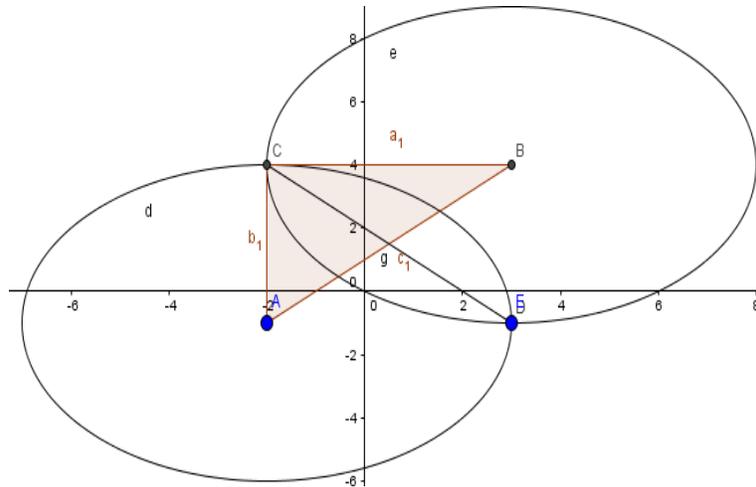
B.6 Modelo de la mesa de trabajo utilizando perfil 30x30.



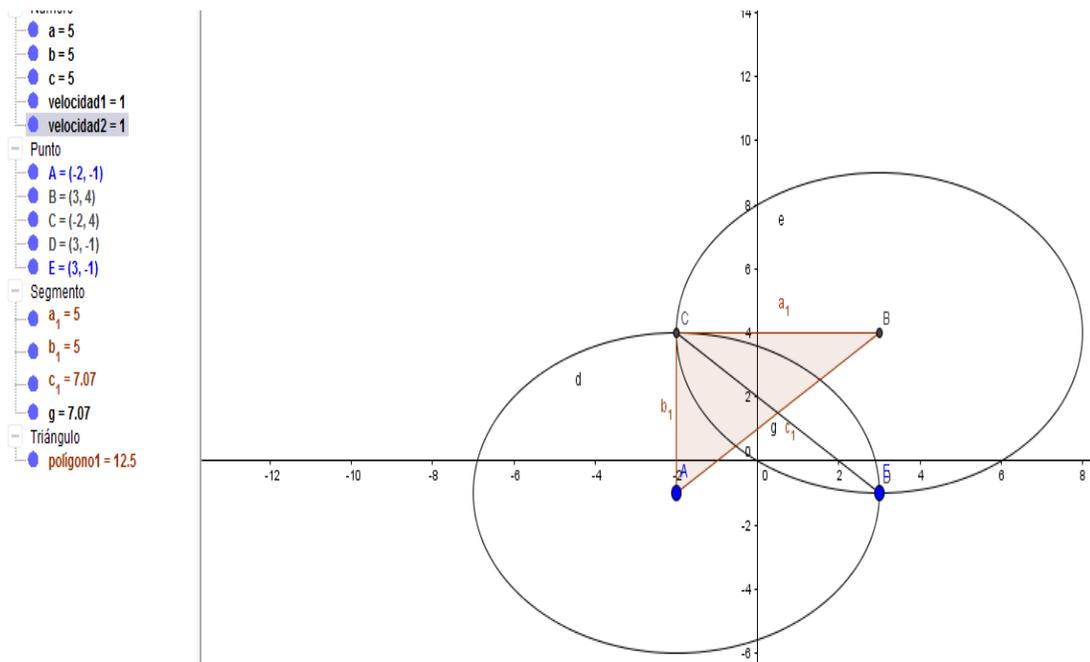
B.7 Ensamble del sistema con la mesa de trabajo.

C

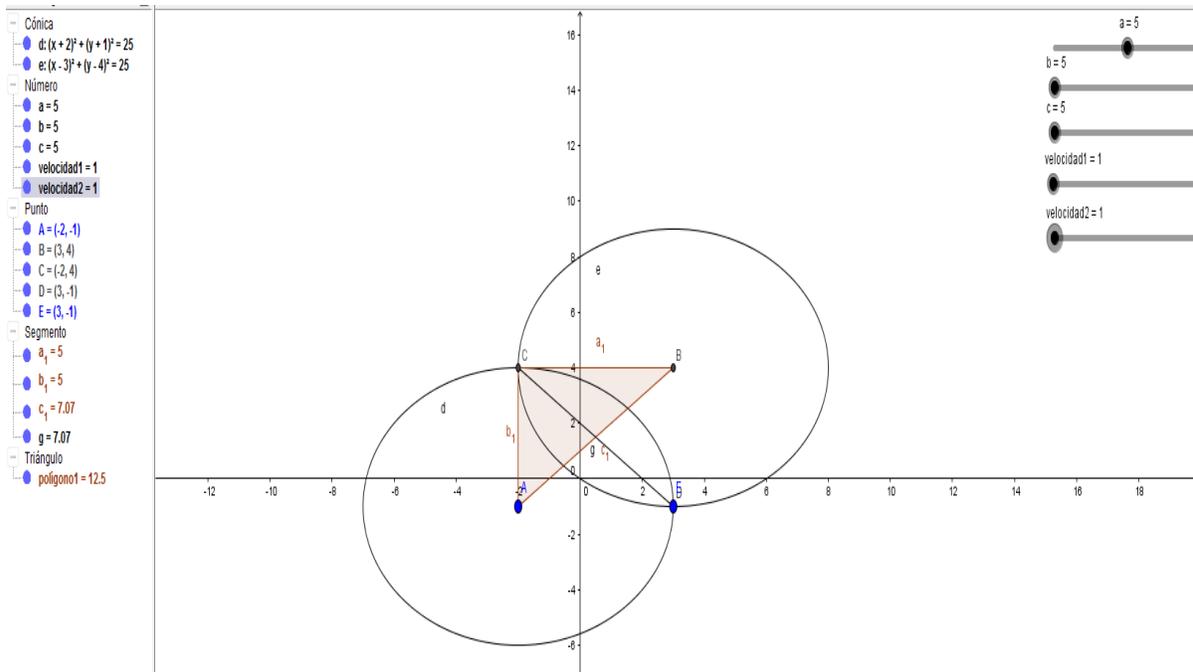
Análisis de comprobación.



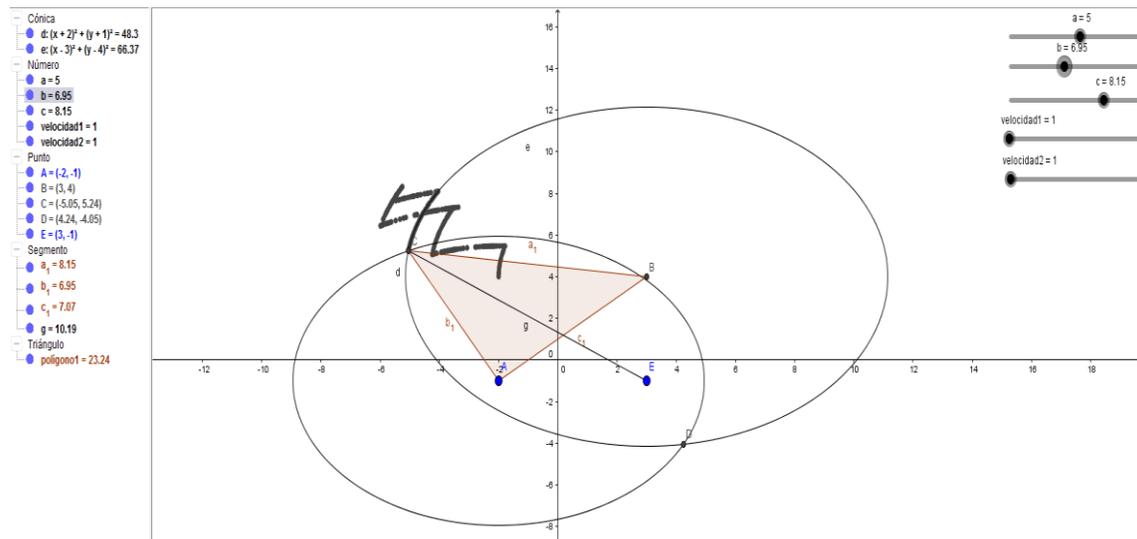
C.1 Intersección de círculos utilizando GeoGebra.



C.2 Comportamiento de los componentes del sistema.



C.3 Parámetros de simulación.



C.4 Visualización del comportamiento del sistema.