



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

“REDISEÑO DE UN ROBOT MANIPULADOR
ANTROPOMÓRFICO “

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO MECÁNICO

PRESENTA:

ERIK PEÑA MEDINA



DIRECTOR DE TESIS: ING. ULISES M. PEÑUELAS RIVAS

MÉXICO,

Octubre de 2007



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos

Agradezco a mis padres, Emma y Raúl, por su ejemplo que siempre me ha ayudado a llevar una vida plena, por su cariño y comprensión.

A mis hermanos Oscar y Raúl, por compartir diferentes experiencias juntos y por las enseñanzas que me han dado.

Al resto de mi familia por el apoyo mutuo durante todo este tiempo.

Al Ing. Ulises Martin Peñuelas Rivas, por su guía durante el desarrollo del proyecto, además de su amistad.

A mis compañeros durante este año y medio de trabajo; Ulises García, Fernando Becerril, Arturo Benítez. Gracias por compartir su experiencia conmigo.

Al Ing. Miguel Ángel Hernández por compartir su experiencia y su paciencia.

A los técnicos del taller del CDM por la ayuda durante la fabricación del prototipo de este proyecto y la confianza brindada en el uso del equipo.

Índice

Objetivos.....	<i>i</i>
Introducción.....	<i>ii</i>
Capítulo 1. Antecedentes.....	1
1.1 Definición de Robot Manipulador.....	1
1.1.1 Parámetros de un manipulador.....	2
1.1.2 Aplicaciones de los Robots Manipuladores.....	3
1.2 Tipos de Robots Manipuladores.....	5
1.2.1 Por el Tipo de Control.....	5
1.2.2 Por el nivel de Capacidad.....	6
1.2.3 Por su Configuración.....	8
1.2.4 Por la forma en que son programados.....	11
1.3 Elementos Terminales.....	12
1.3.1 Pinzas.....	12
1.3.2 Herramientas.....	14
Capítulo 2. Propuestas de Solución.....	16
2.1 Propuestas para El Hombro del Robot.....	17
2.1.1 Hombro 1.....	17
2.1.2 Hombro 2.....	18
2.1.3 Hombro 3.....	19
2.1.4 Hombro 4.....	20
2.2 Propuestas para el Brazo del Robot.....	21
2.2.1 Brazo 1.....	21
2.2.2 Brazo 2.....	22

2.2.3 Brazo 3.....	23
2.2.4 Brazo 4.....	24
2.3 Propuestas de la muñeca.....	25
2.3.1 Muñeca 1.....	25
2.3.2 Muñeca 2.....	26
2.3.3 Muñeca 3.....	27
2.4 Propuestas de Mecanismos para el Órgano Terminal (OT).....	28
2.4.1 Mecanismo 1.....	28
2.4.2 Mecanismo 2.....	29
2.4.3 Mecanismo 3.....	30
2.4.4 Mecanismo 4.....	31
2.4.5 Mecanismo 5.....	32
2.4.6 Mecanismo 6.....	33
2.4.7 Mecanismo 7.....	34
Capítulo 3. Evaluación y Selección.....	35
3.1 Matriz de Decisión.....	35
3.1.2 Prepara la Matriz de Selección.....	36
3.1.3 Calificar los Conceptos.....	36
3.1.4 Ordenar por Rango los Conceptos.....	37
3.1.5 Combinar y Mejorar los Conceptos.....	38
3.1.6 Seleccionar Uno o Más Conceptos.....	38
3.1.7 Reflexionar Sobre los Resultados y el Proceso.....	38
3.2.1 Evaluación de las Propuestas para el Mecanismo del Hombro.....	39
3.2.2 Evaluación de las Propuestas para el Mecanismo del Brazo.....	41

3.2.3 Evaluación de las Propuestas para el Mecanismo para la Muñeca	43
3.2.4 Evaluación de las Propuestas para el Mecanismo para el OT	45
3.3 Selección de las Propuestas de Solución	48
3.4 Combinaciones de Propuestas de Solución	50
3.4.1 Combinación 1	50
3.4.2 Combinación 2	50
3.4.3 Combinación 3	51
3.4.4 Selección de la Configuración	51
3.5 Selección del OT	52
Capítulo 4. Diseño a Detalle	54
4.1 Análisis de trayectoria del OT	54
4.2 Análisis de Esfuerzos y Dimensionamiento de los Eslabones	64
4.2.1 Análisis de Esfuerzos	65
4.2.1.1 Esfuerzo Normal en los Eslabones	67
4.2.1.2 Esfuerzo Cortante en los Eslabones	69
4.2.2 Selección del Material de los eslabones	70
4.3 Diseño del Órgano Terminal	72
4.3.1 Análisis de Fuerzas en el OT	72
4.3.2 Análisis de esfuerzos en el OT	80
4.3.2.1 Análisis de esfuerzos en la Lámina el OT	83
4.3.3 Análisis para Determinar el Peso que puede manipular el OT	87
4.4 Análisis de los Momentos del robot	87
4.4.1 Selección de los actuadores del motor	91
4.4.2 Selección del peso de la base	92
4.5 Análisis de los Ejes del Robot	92

4.6 Análisis de la Muñeca del Robot.....	95
4.7 Análisis de los Rodamientos del Robot.....	98
4.7.1 Características de los Rodamientos Radiales	99
4.7.2 Características de los Rodamientos Cónicos.....	99
Capítulo 5. Conclusiones y Recomendaciones.....	102
5.1 Conclusiones de diseño.....	102
5.2 Conclusiones del Análisis.....	103
5.3 Recomendaciones.....	104
Referencias.....	105
Apéndice 1. Planos	
Apéndice 2. Análisis de la Trayectoria del OT	
Apéndice 3. Construcción del Prototipo	

Objetivos

El objetivo del presente trabajo de tesis es rediseñar y construir la estructura mecánica de un robot manipulador antropomórfico con el fin de mejorar su funcionamiento para que sirva como herramienta de enseñanza en algunas asignaturas enfocadas al estudio y desarrollo de máquinas y mecanismos.

Objetivos Particulares

- Aumentar a 5 los grados de libertad del robot
- Redimensionar los eslabones que componen al robot y otros elementos constituyentes del robot
- Comprobar el funcionamiento de la estructura mecánica del robot a través del seguimiento virtual de una trayectoria de línea recta con un perfil de quinto grado

Alcances

- Se realizará un análisis detallado de los problemas de la estructura mecánica actual del robot. Por medio de la metodología de matrices de toma de decisión se propondrá una nueva configuración más funcional
- Se propone que la interacción del robot y el usuario sea por medio de una PC
- Del resultado obtenido en el proceso de rediseño se construirá la parte mecánica del robot.
- Se analizarán las cargas y esfuerzos a los que serán sometidos los diferentes elementos que conformarán la nueva estructura mecánica.

Restricciones

- Se consideran a los eslabones cuerpos rígidos
- El análisis de cada elemento del robot se adecuará de acuerdo a la forma de las piezas y sus características

Introducción

En la actualidad el rápido desarrollo de nuevas tecnologías hace que el país se rezague en diferentes aspectos. Para los centros de enseñanza resulta muy complicado transmitir una gran cantidad de información en un tiempo corto. Por lo que es necesario desarrollar nuevo material didáctico que cumpla con las necesidades actuales.

En el presente trabajo de tesis se describe el rediseño de un robot manipulador antropomórfico que se encuentra fuera de uso por el rezago tecnológico que presenta. Para el desarrollo de este proyecto se formó un equipo de diseño y se determinó una metodología para obtener la configuración más óptima.

Cabe mencionar que este trabajo únicamente muestra el diseño mecánico y la construcción del robot manipulador antropomórfico y las consideraciones hechas en los diferentes análisis de las piezas del robot.

A continuación se realiza una breve descripción de cada capítulo:

- En el capítulo 1 describe un poco los antecedentes y el estado de arte actual al de los robots industriales, diferentes formas de clasificar a este tipo de sistemas mecatrónicos, además de los diferentes tipos de órganos terminales que usan.
- En el capítulo 2 se presentan las diferentes propuestas de solución para cada una de las partes en las que se dividió el robot para su uso.
- En el capítulo 3 se describe el método usado para seleccionar la configuración más adecuada para la estructura mecánica del robot manipulador antropomórfico.
- En el capítulo 4 se presentan los estudios realizados a diferentes elementos de la estructura mecánica de dicho robot manipulador. En esta parte se presenta tanto la teoría utilizada como los resultados obtenidos de cada estudio con sus respectivas consideraciones.

- El capítulo 5 consta de las conclusiones y recomendaciones para la continuación del rediseño del robot manipulador
- En el apéndice 1 se muestran los planos del concepto de diseño
- En el apéndice 2 se muestra el programa de la simulación virtual de la trayectoria de línea recta que debe seguir el robot
- En el apéndice 3 se muestra una comparación del diseño conceptual del robot, con el prototipo construido

Capítulo 1. Antecedentes

Los procesos industriales actuales requieren operaciones repetitivas y de alta precisión. El uso de robots manipuladores en algunas industrias es muy común, lo que ha propiciado que el desarrollo y perfeccionamiento de éste tipo de máquinas sea continuo. En muchas industrias se usan robots manipuladores antropomórficos en líneas de producción y pueden contar con más de 3 grados de libertad.

1.1 Definición de Robot manipulador

La “Robots Industries Association” (RIA) define a un robot industrial como un: “Manipulador reprogramable y multifuncional diseñado para mover material, partes, herramientas o dispositivos a través de movimientos variables programados, por la interpretación de una variable de un problema”. La definición es muy parecida a la de otras asociaciones internacionales de Robots, como la británica, la japonesa, etc.¹

Los Robots están constituidos por tres sistemas básicos:

- La parte mecánica que corresponde a la estructura y los mecanismos que conforman el robot.
- La parte eléctrica-electrónica encargada de proporcionar energía a los motores y de los sensores del robot. Los sensores pueden ser de tipo externo o interno, en algunos casos el robot no cuenta con ningún tipo de sensor pero el conjunto de sistemas continúan considerándose como un Robot.
- La parte de control que se encarga de hacer las tomas de decisión y de comunicar al usuario y al robot, además de recibir e interpretar la información de los sensores.

¹ Eugene I. Rivin ,**Mechanical Design of Robots** , Mac-Graw Hill, página XI

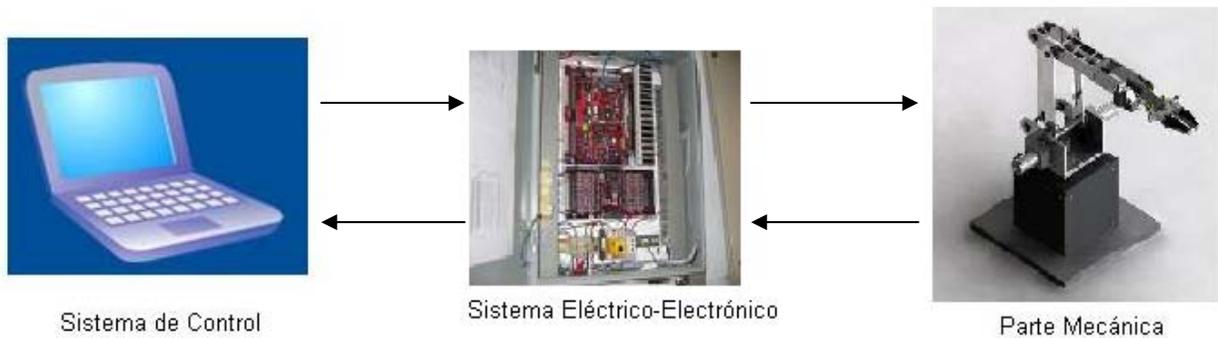


Figura 1.1 Componentes de un Robot

En la *figura 1.1* las líneas muestran la interacción entre las tres partes que conforman un robot.

1.1.1 Parámetros de un manipulador

En el diseño y desarrollo de los robots industriales no existe una configuración que sea cien por ciento óptima por lo que se tienen ciertos parámetros básicos más o menos asociados con su estructura mecánica. La lista siguiente presenta algunos parámetros que se deben considerar:²

- Carga.
- Movilidad; número y rango de movimientos independientes.
- Espacio de trabajo (volumen y forma).
- Agilidad (velocidad efectiva de ejecución de movimientos preescritos).
- Rigidez de la Estructura; masa, coeficientes de lubricación entre las partes y frecuencia natural.
- Economía (costo, rentabilidad, mantenimiento).

1.1.2 Aplicaciones de los Robots Manipuladores

Los robots son usados en diversas actividades industriales, para acciones que son muy repetitivas, cuando se requiere una alta precisión y cuando hay un alto riesgo en las operaciones en un proceso. Algunas de las principales industrias donde se utilizan este tipo de maquinas son la automotriz en la parte de soldadura de la carrocería, en la industria electrónica para desplazar con alta precisión piezas, en

² Eugene I. Rivin ,**Mechanical Design of Robots**,, Mac-Graw Hill, páginas 1-2

la industria de los plásticos en la inyección de moldes, en la industria espacial para manipular objetos en el espacio por mencionar algunas aplicaciones.

La Federación Internacional de la Robótica (IFR) estableció en 1998 una clasificación de las aplicaciones de la Robótica en el sector manufacturero:

- Manipulación en fundición
 - Moldes
 - Otros
- Manipulación en moldeo de plásticos
- Manipulación en tratamientos térmicos
- Manipulación en la forja y estampación
- Soldadura.
 - Por arco
 - Por puntos
 - Por gas
 - Por láser
 - Otros
- Aplicación de materiales
 - Pintura
 - Adhesivos y secantes
 - Otros
- Mecanización
 - Carga y descarga de máquinas
 - Corte mecánico, rectificado, desbarbado y pulido
 - Otros



Figura 1.2a Robot Soldador usado en la Industria Automotriz [1]

- Otros procesos
 - Láser
 - Chorro de agua
 - Otros

- Montaje.
 - Montaje mecánico
 - Inserción
 - Unión por adhesivos
 - Unión por soldadura
 - Manipulación para montaje
 - Otros

- Paletización
- Medición, inspección, control de calidad
- Manipulación de materiales
- Formación, enseñanza e investigación
- Otros



Figura 1.2b Manipulador Cartesiano de Cajas de Refresco [1]

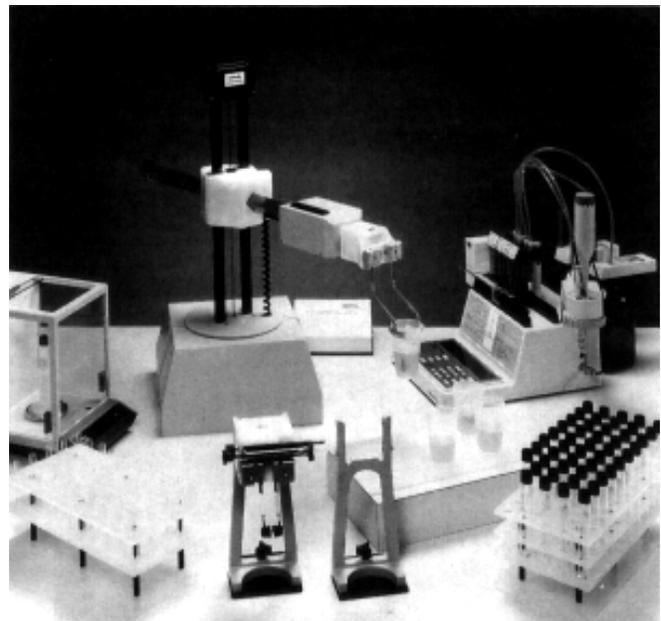


Figura 1.2c Manipulador de Muestras de Laboratorio [1]

La aplicación de robots manipuladores en las diferentes industrias es cada vez mayor y en diversos procesos, será más común encontrar máquinas de este tipo. Pero aunque utilicen más robots hay actividades en donde los trabajadores humanos no pueden ser reemplazados, además los robots requieren de mantenimiento especializado aumentando la capacitación de los obreros.

1.2 Tipos de Robots Manipuladores

Las actividades en las cuales son empleados los manipuladores son tan diversas que han motivado el desarrollo de robots con diferentes características. No es posible hacer una clasificación única que englobe a todos los robots industriales, para poder diferenciar a los robots se toman en cuenta sus características y capacidades por lo que un robot puede ser clasificado de muchas formas.

Algunas clasificaciones usadas para distinguir un robot industrial de otro son las siguientes:³

1.2.1 Por el Tipo de Control

1. Robots Punto a Punto; los robots de éste tipo se mueven a través de una serie de puntos en una trayectoria, el manipulador no puede salir de la secuencia de puntos lo que mantiene su trayectoria fija. Cada uno de los puntos donde se detiene es ajustado de forma mecánica y para cada nueva tarea tienen que ser ajustados. Los robots tienen servo-motores y en su control se usan potenciómetros para colocar las partes del robot en posiciones específicas. Son simples y de bajo costo.
2. Robots de Trayectoria Continúa; éstos son capaces de detenerse en varios puntos específicos contenidos en una trayectoria. Si el punto donde debe detenerse no se especifica, no se detendrá y seguirá a través de la línea o curva que tenga que recorrer. Los puntos y la curva se almacenan en un dispositivo de memoria del robot.

³ Arthur J. Critchlow, **Introduction to Robotics**, Macmillan Publishing Company, paginas 8-12

3. Robots de Trayectoria Controlada por Computadora; cuentan con un dispositivo que controla la trayectoria, este dispositivo es capaz de generar líneas, círculos y otros tipos de curvas con una alta precisión. Las trayectorias pueden ser especificadas en términos geométricos o algebraicos en algunos robots. Se puede obtener una buena exactitud a lo largo de los puntos contenidos en la trayectoria. Solo las coordenadas iniciales, finales y la trayectoria son necesarias para definir los movimientos del robot.
4. Robots con Servomotores y sin Servomotores; para mover cada uno de los elementos de un robot se pueden usar servomotores u otro tipo de motor. Los robots controlados por servomotores cuentan con una “retroalimentación”, por lo que se puede obtener una relación de cada uno de sus elementos. Los robots que funcionan con otro tipo de motor que no sea servomotor, requieren de un elemento indicador de la posición de cada uno de los elementos del robot.

1.2.2 Por el nivel de Capacidad

1. Máquinas de Secuencia Controlada; son máquinas que pueden seguir una secuencia de acciones específicas, de acuerdo a un curso de instrucciones. Un ejemplo de este tipo de dispositivos son las máquinas soldadoras de una línea de ensamble, realizan una secuencia un sin número de veces. Estos robots pueden cumplir su secuencia por medio de tiempo o por medio de eventos del proceso en el cual trabaja. Después de un número de secuencias el robot tiene que ser reajustado.
2. Máquinas Previas; en estas máquinas se les carga una secuencia en un elemento de almacenamiento de datos. Un dispositivo de grabación como puede ser un disco magnético, cinta magnética, una memoria RAM es usado para grabar una serie de puntos o pasos para coordinar la posición

de los sensores. Cada uno de los puntos, el robot los coordina a lo largo de tres ejes, los movimientos son dirigidos por la memoria de la trayectoria a seguir para realizar la tarea que haya sido indicada. Las instrucciones son dadas por un operador a lo largo de la trayectoria deseada.

3. Robots de Trayectoria Controlada (trayectorias computarizadas); algunos robots pueden ser programados para seguir ciertas trayectorias entre puntos particulares. No se necesita un indicador (operador). El usuario puede especificar los puntos y la forma que deseé que esos puntos sean usados en la trayectoria. Interpolando entre los puntos o estableciendo una *curva spline*. El nombre en japonés es de “máquinas de control numérico” por que son similares en sus acciones a las herramientas de control numérico.
4. Robots Adaptativos; los robots adaptativos tienen un control por computadora y una retroalimentación por medio de sensores, por eso ellos pueden reaccionar a su entorno. Estos robots tienen la capacidad de controlar su trayectoria y aceptar tareas externas, pueden modificar su trayectoria y sus acciones.
5. Robots Inteligentes; son robots de alto nivel, aun que hay varios argumentos que dudan de que existen. Tienen la habilidad de sentir su entorno y modificar sus acciones hacia un arreglo, ellos deben tener “conocimientos básicos” y modelos de su entorno. Un robot con un “sistema experto” es conocido de igual manera como Inteligencia Artificial, ya que según algunos, sus características físicas, su capacidad de memoria y el procesamiento de la información, tienen características de Inteligencia (que siguen siendo debatidas).

1.2.3 Por su Configuración

1. Robots Cartesianos; se refiere al uso de los ejes x , y y z . Cada brazo corresponde a un eje y se emplean estas coordenadas en cada parte de los brazos deslizantes del robot. El Robot puede alcanzar cualquier punto de un volumen relacionado con la longitud de las secciones separadas del brazo. Las coordenadas cartesianas son llamadas “coordenadas rectangulares” (Figura 1.3a).
2. Robots Cilíndricos; su volumen de trabajo es encerrado por un brazo de forma cilíndrica. Está conformado por un brazo que gira alrededor de un eje perpendicular a una base fija, y se conforma de dos partes, una sección del brazo puede moverse de forma horizontal, y la otra sección puede moverse de forma vertical. Normalmente, el soporte principal no puede rotar a lo largo de un círculo completo por la interferencia mecánica (Figura 1.3b).
3. Robots Polares; una sección del brazo es capaz de un movimiento lineal de adentro hacia fuera. Es soportado por otras dos secciones, una de esas secciones rota alrededor de la base y otra rota con relación al eje perpendicular del eje vertical de la base. Este brazo puede alcanzar casi todo el volumen encerrado por una semiesfera exterior e interior. El radio de las dos semiesferas corresponden a la máxima y mínima extensión de la sección lineal, respectivamente (Figura 1.4a).
4. Robots de Revolución (Angulares); este brazo usa coordenadas angulares, tiene tres rotaciones o revoluciones unidas. Una sección ó unión del brazo montado en la base puede rotar alrededor de ésta, y lleva otras dos secciones que se mueven como piezas de una bisagra relativa, una a otra. Las uniones de rotación pueden ser montadas de manera vertical u horizontal (Figura 1.4b).

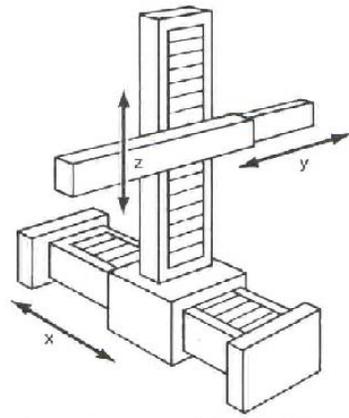


Figura 1.3a Manipulador Cartesiano

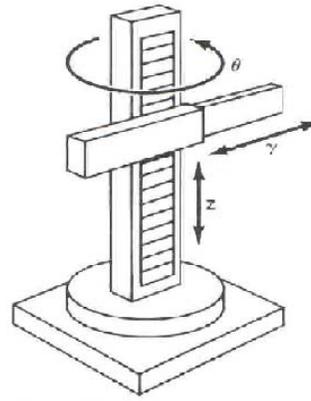


Figura 1.3b Manipulador Cilíndrico

Figura 1.3 [2]

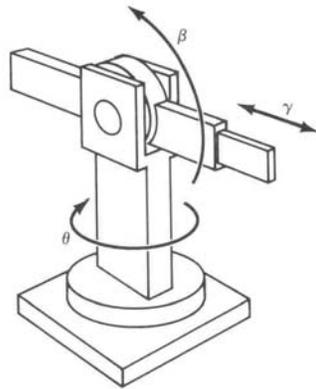


Figura 1.4a Manipulador esférico

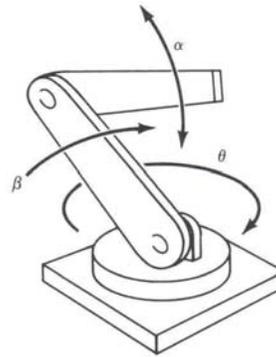


Figura 1.4b. Manipulador angular

Figura 1.4 [2]

En los esquemas, los manipuladores tienen formas definidas correspondientes a su configuración, pero cada configuración puede presentar variantes como las que se muestran en el siguiente esquema⁴:

⁴ Eugene I. Rivin, **Mechanical Desig of Robots**, Mac-Graw Hill.

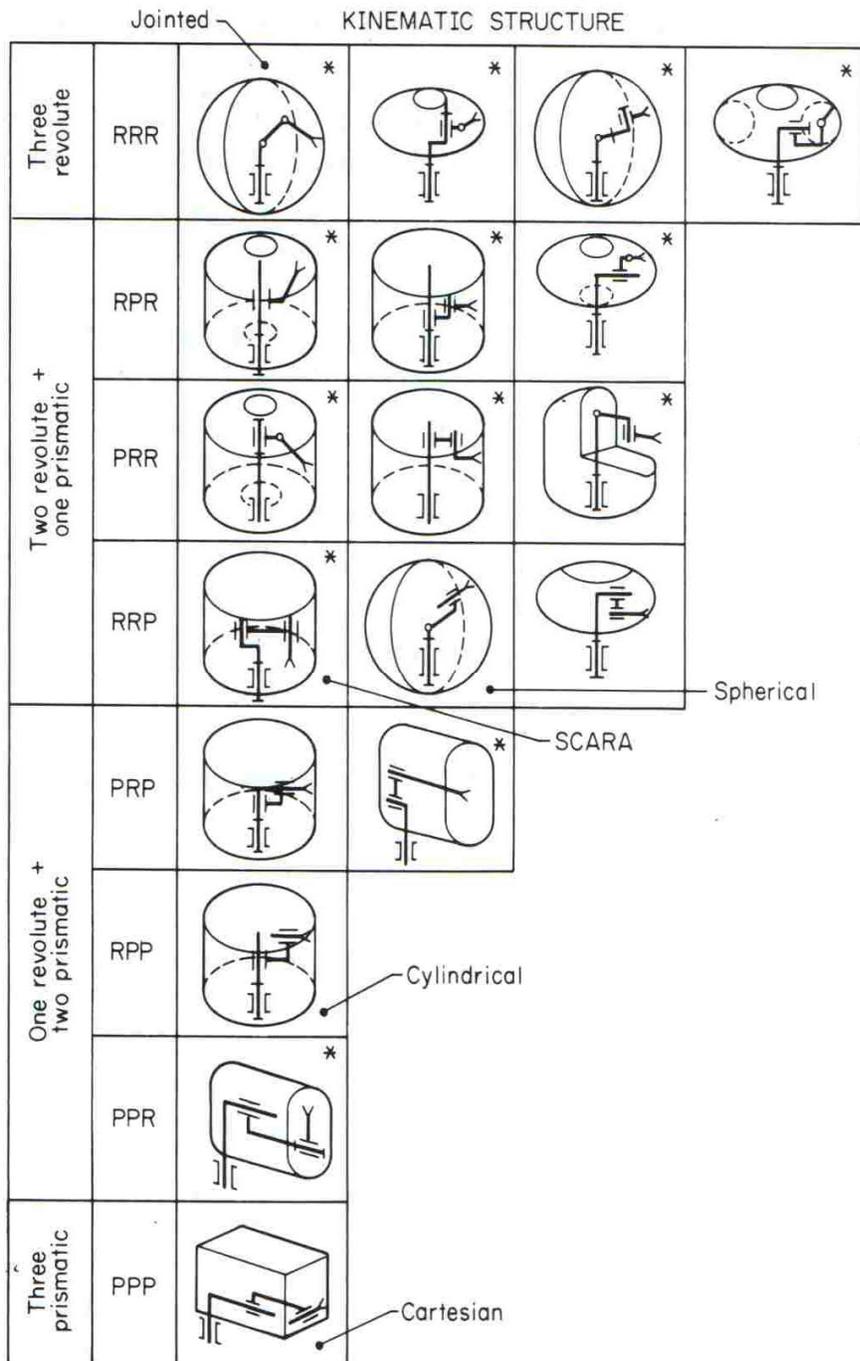


Figura 1.5 Configuraciones cinemáticas de robots manipuladores de 3 articulaciones [3]

El cuadro anterior corresponde a robots cuyos brazos manipuladores constan de tres eslabones.

Un ejemplo de variantes es la configuración SCARA (*Selective Compliance Arms for Robotic Assembly*), que tiene dos revoluciones y un deslizamiento. Este tipo de configuración es usado generalmente en líneas de ensamble donde es necesario mover un efector final en un plano fijo.

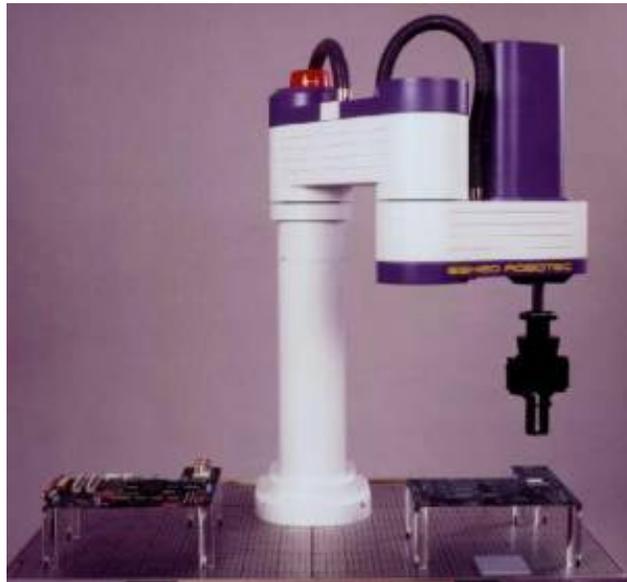


Figura 1.6 Manipulador Tipo SCARA [1]

1.2.4 Por la forma en que son programados⁵

1. Instrucción por dirección; con este método, el instructor humano dirige el efector final indicando la trayectoria que debe seguir. El robot registra el camino en la sesión de instrucción, para después hacer la trayectoria por si mismo.
2. Empleo de un brazo instructor; este método es similar al anterior y consta de indicar la trayectoria a un brazo secundario anexo al robot. Este método se utiliza cuando se tiene un brazo muy pesado o grande que un operador no pueda manipular libremente, el brazo anexo es por lo general un replica del robot principal a una escala más pequeña.

⁵ www.udec.cl/~gastete/clasificacion.htm, consulta 26 de marzo del 2007

3. Empleo de un “*teach pendant*”: un pendiente instructor es un control remoto avanzado. Con este método de instrucción, los operadores humanos guían al robot mediante las acciones que vayan a aprender moviendo cada actuador individualmente con el control remoto.
4. Programación *off-line*: Con este método de instrucción, un programador escribe código en un lenguaje de alto nivel, y luego le transfiere el código al robot. El código especifica las acciones que tomará el robot. Este método permite ajustes fáciles y rápidos a una conducta aprendida existente.⁶

1.3 Elementos Terminales

Un elemento terminal o efector final es un dispositivo que se une a la muñeca del brazo del robot⁷. El diseño de un efector final depende de la función que haga el robot, por lo que hay muchas clases de dispositivos enfocados en diversos usos. Existen una gran cantidad de estos dispositivos, pero únicamente se dividen en dos grupos⁸:

- Pinzas
- Herramientas

1.3.1 Pinzas

Las pinzas son dispositivos encargados de mover de un lugar a otro: piezas, materia prima, herramientas, etc. Las pinzas sostienen a un objeto por medio de dedos limitando su espacio de movimiento apretándolo y por medio de la fricción que se produce entre la superficie de los dedos y la del objeto que se desea mover. La mayoría de las pinzas cuenta con dos dedos, las que tienen tres o más dedos no son tan frecuentes.

⁶ Ulrich Rembold, **Robot Technology and Applications**, MARCEL DEKKER, INC, 1990.

⁷ Mikell Groove, **Robótica Industrial_r**, McGrall Hill, 1990, página 129.

⁸ Mikell Groove, **Robótica Industrial_**Mikell Groover, McGrall Hill, 1990, página 130.

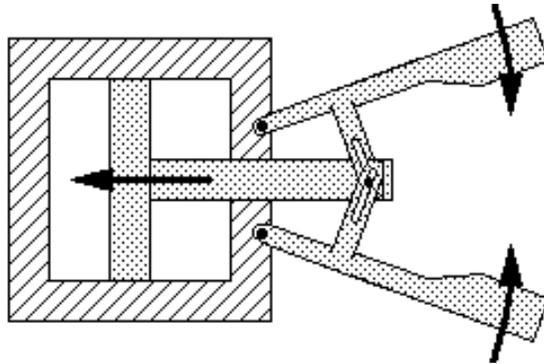


Figura 1.6 Pinza con dos Dedos [4]

Los dedos se mueven a través de un mecanismo que recibe la energía de movimiento de un actuador mecánico, hidráulico, neumático o eléctrico que sea capaz de proporcionar la fuerza necesaria para sostener el objeto. Las pinzas se pueden clasificar según su actuador en:

- Actuación por articulación
- Actuación por engranes y bastidor
- Actuación por leva
- Actuación por tornillo
- Actuación de cable y polea
- Varios

En las pinzas se construyen los dedos o se les ponen cojinetes a los dedos de un material blando para aumentar el coeficiente de fricción entre las superficies en contacto al sostener un objeto.

Los mecanismos que componen las pinzas se dividen en dos⁹:

⁹ Mikell Groover, **Robótica Industrial**, McGraw Hill, 1990, página 135.

- Movimiento de Pivote; los dedos giran con relación de puntos fijos para abrir y cerrar la pinza.
- Movimiento lineal o translación; el movimiento de los dedos se realiza por medio de una unión que los mantiene paralelos durante su actuación.

También encontramos pinzas magnéticas usadas para mover metales ferrosos con facilidad y las pinzas adhesivas que por medio de un agente químico sostienen objetos ligeros por un solo lado, ambas pinzas se usan en casos muy particulares y su uso depende las propiedades del material y la cantidad que se desea mover.

1.3.2 Herramientas

En algunos casos es necesario manipular herramientas por medio de un robot. En algunos casos el efector final es una pinza diseñada para tomar varias herramientas. La principal razón de diseñar una pinza que tome varias herramientas es para hacer más flexible un ciclo de producción.

Las principales herramientas usadas como efectores finales son¹⁰:

- Herramientas de soldadura por puntos
- Pinza porta electrodos
- Tobera de pintura por pulverización
- Husillos giratorios para operaciones como: taladrar, ranurado, cepillado, y rectificado
- Aplacadores de cemento líquido en montaje
- Sopletes de calentamiento
- Herramientas de corte por agua

¹⁰Mikell Groover, **Robótica Industrial**, McGrall Hill, 1990, página 149.

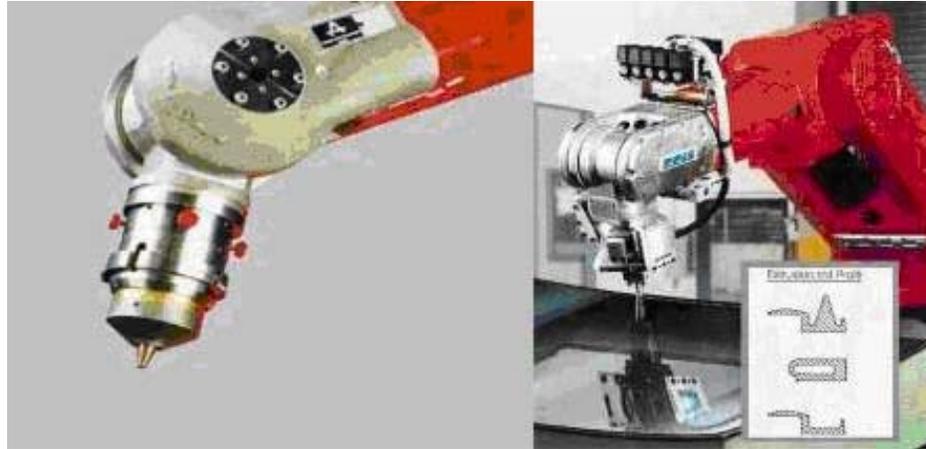


Figura 1.7 Herramientas Giratorias como efectores Finales [1]

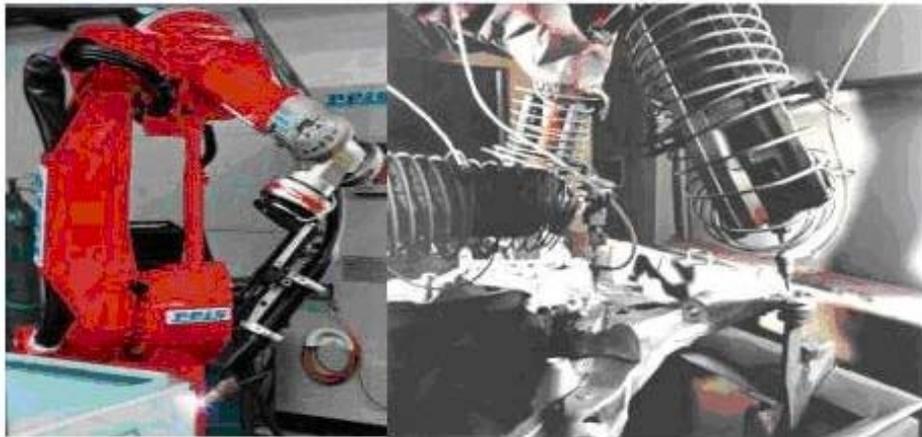


Figura 1.8 Robot Manipuladores Soldadores [1]

Capítulo 2. Propuestas de Solución

Para proponer diferentes soluciones que resolvieran los problemas del manipulador se dividió en tres partes:

- a) Hombro
- b) Soporte
- c) Brazo

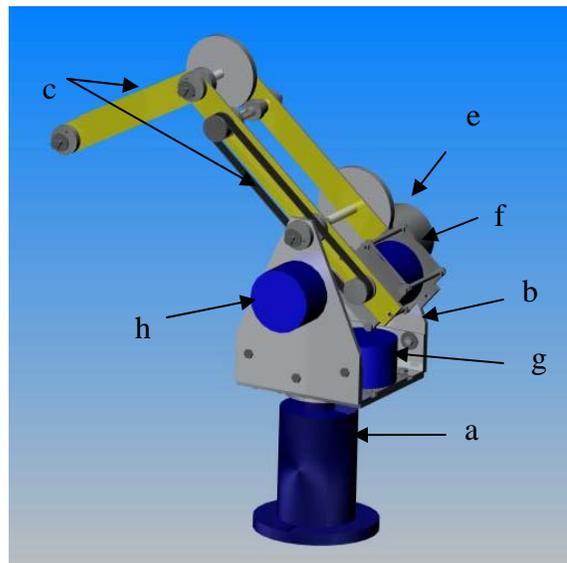


Figura 2.1 Configuración Inicial del Robot

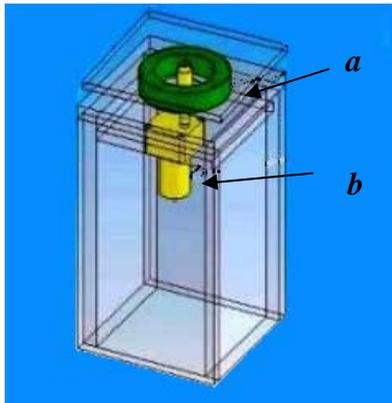
La parte del Hombro **a** se encontraba una transmisión compuesta de un engrane fijo y mueve al Soporte **b** por medio de un motor conectado a un piñón, la ubicación del motor **g** en esta parte desestabiliza a todo el conjunto, la solución al problema fue colocar un contrapeso al motor. El brazo del robot **c** contaba únicamente con dos eslabones, el primer eslabón se movía por medio de una sistema de engranes unidos a motor **e** ubicado en la parte superior del Soporte, también este motor provocaba problemas de estabilidad obligando a colocar otro contrapeso **h**, el segundo eslabón obtenía su movilidad de un motor ubicado en el primer eslabón **f** y una transmisión compuesta por una banda, la ubicación del motor del segundo eslabón desestabiliza a todo el brazo y este problema no está resuelto. Para modificar y mejorar el funcionamiento de cada una de las partes se proponen a continuación una serie de configuraciones de cada elemento del robot, cabe mencionar que la modificación del Soporte dependerá de las modificaciones del Hombro y al brazo del robot.

2.1 Propuestas para El Hombro del Robot

Se necesita que el robot tenga un rango de movimientos adecuados, para el hombro es deseable que permita girar al cuerpo del robot en un rango de 0° a 270° aproximadamente, soportar el peso del robot y del objeto manipulado, además de permanecer en una posición fija y estable.

Se proponen las siguientes configuraciones para el Hombro:

2.1.1 Hombro 1

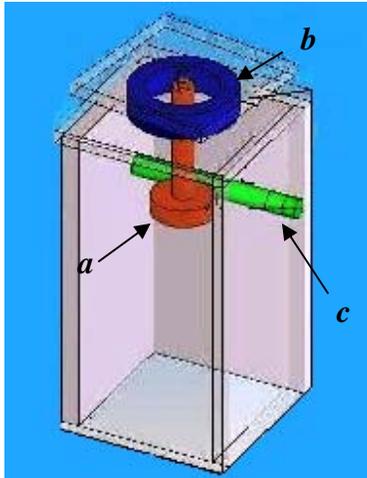


El cuerpo del robot se mueve por medio de un moto- reductor **b** anclado en la base, el peso del cuerpo del robot es soportado por un cojinete **a**.

Figura 2.2 Propuesta Hombro 1

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none">• El cojinete reduce las perdidas por fricción y soporta el peso del cuerpo de robot• El moto-reductor puede proporcionar mayor torque• La configuración tiene una buena precisión• La movilidad del sistema es buena• La repetibilidad del sistema es buena	<ul style="list-style-type: none">• El cojinete se puede llenar de polvo, provocando problemas al girar• El torque del sistema depende del actuador

2.1.2 Hombro 2



La base gira por medio de un mecanismo conformado por un tornillo sin fin *c* que transmite el movimiento a un engrane helicoidal *a*, el peso es soportado por un cojinete *b*.

Figura 2.3 Propuesta Hombro 2

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none">• El arreglo de engranes proporciona mucho torque• El sistema tiene una alta presión• La configuración es estable• La repetibilidad del sistema es buena	<ul style="list-style-type: none">• Como los dientes de tornillo y los del engrane siempre están en contacto hay pérdidas considerables por la fricción¹⁰• El maquinado del mecanismo tiene que hacerse con mucha precisión• El sistema es muy lento

¹⁰ Robert Norton, **Diseño de Máquinas**, McGraw-Hill, 2^{da} edición

2.1.3 Hombro 3

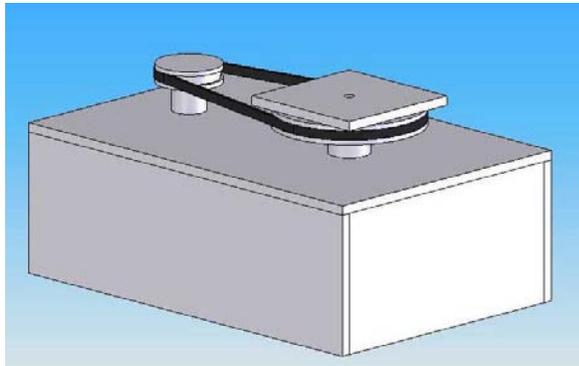


Figura 2.4 Propuesta Hombro 3

El cuerpo del robot se mueve por medio de un mecanismo de poleas colocadas en la base.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none">• Es económico en comparación de otros mecanismos• Las bandas se pueden ajustar a la distancia que hay entre los ejes• Las bandas son fáciles de reemplazar• La movilidad es buena	<ul style="list-style-type: none">• Por los efectos de estirado y deslizamiento que se producen en las bandas, la razón entre velocidades angulares entre los dos ejes no es constante, ni es exactamente igual a la razón entre los diámetros de las poleas¹¹• Esta configuración es susceptible a alteraciones externas• El sistema tiene poca precisión y repetibilidad• La configuración es fácil de construir• Para que el sistema funcione de forma precisa requiere de mucha precisión en la fabricación de sus partes

¹¹ Joseph E. Shygly, **Diseño en la Ingeniería Mecánica**, McGrawHill-Hill, 6^{ta} edición

2.1.4 Hombro 4

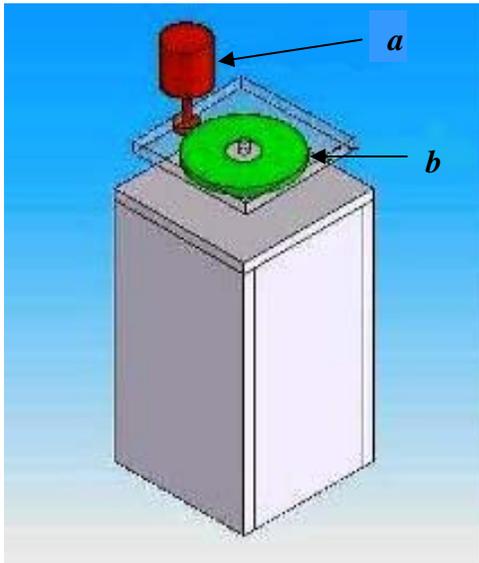


Figura 2.5 Propuesta Hombro 4

El mecanismo funciona por medio de un piñón acoplado a un motor *a*, colocado en el cuerpo del robot, y gira alrededor de un engrane fijo en la base *b*.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none">• Los engranes son muy comunes en sistemas de transmisión• La movilidad del sistema es buena• La precisión del sistema es aceptable• La repetibilidad del sistema es buena	<ul style="list-style-type: none">• La fatiga de los dientes es mayor que en una transmisión de engranes convencional, ya que los engranes cambian de dirección de giro¹²• El torque proporcionada por el mecanismo depende de las dimensiones de los engranes• El sistema requiere de un contrapeso para estabilizarlo

¹² Joseph E. Shygly, **Diseño en la Ingeniería Mecánica**, McGrawHill-Hill, 6^{ta} edición

2.2 Propuestas para el Brazo del Robot

El brazo debe permanecer fijo cuando ubica al Órgano Terminal (OT) en una posición determinada, tener un rango de movimiento adecuado para proporcionar un espacio de trabajo amplio y tener la capacidad de llevar el OT a través de una trayectoria de una línea recta.

Las configuraciones propuestas para el brazo son:

2.2.1 Brazo 1

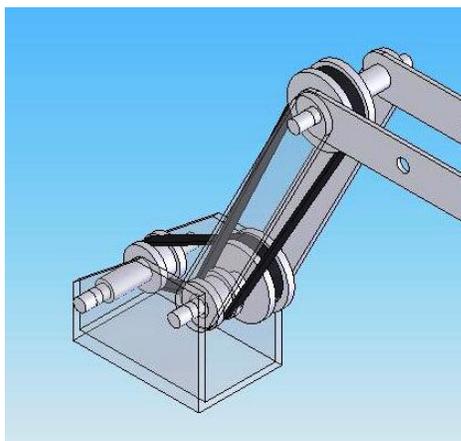


Figura 2.6 Propuesta Brazo 1

Cada uno de los eslabones se mueve por medio de un sistema de bandas y poleas, los actuadores que hacen girar las poleas se colocan en el cuerpo del robot.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none">• Es económico en comparación de otros mecanismos• Las bandas se pueden ajustar a la distancia que hay entre los ejes• Las bandas son fáciles de reemplazar• La movilidad del sistema es buena• El sistema es ligero• El sistema es estable	<ul style="list-style-type: none">• La velocidad con la que se mueven las poleas es variable por el estirado y el deslizamiento de las poleas y las bandas• La precisión y la repetibilidad del sistema es mala por el deslizamiento entre las bandas y las poleas

2.2.2 Brazo 2

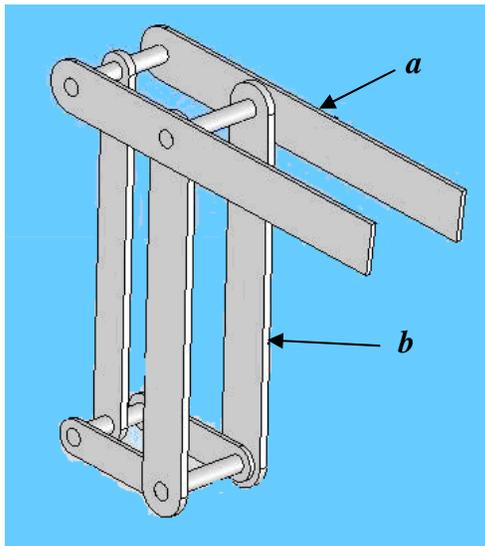


Figura 2.7 Propuesta Brazo 2

Este brazo se compone de una serie de eslabones, el movimiento de cada uno de los eslabones *a* y *b* es independiente y forman una estructura rígida.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none">• Los actuadores que mueven a cada eslabón se colocan al mismo nivel• Por la ubicación de los actuadores proporciona estabilidad al sistema• No hay ninguna limitación en la dimensión de los eslabones• La configuración no es susceptible a alteraciones externas• La configuración es precisa• La movilidad del sistema es buena	<ul style="list-style-type: none">• Esta compuesto de muchas piezas• En cada unión se tiene que colocar valeros para evitar problemas de fricción• El sistema consta de muchas partes

2.2.3 Brazo 3

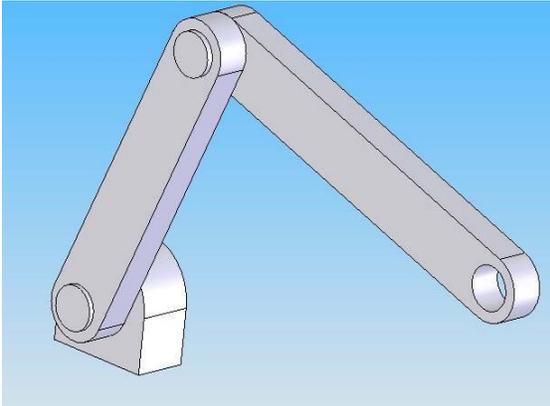


Figura 2.8 Propuesta Brazo 3

El sistema funciona por medio de dos eslabones robustos, en cada articulación se coloca un actuador, la posición de cada uno de los eslabones depende el uno del otro.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none">• El sistema se compone de pocas piezas• Por lo robusto de los eslabones puede soportar cargas mayores que las dos primeras propuestas	<ul style="list-style-type: none">• Los actuadores deben mover grandes cargas• El sistema no esta balanceado y pierde estabilidad fácilmente• La precisión del sistema no es buena• La configuración del sistema es susceptible a alteraciones externas• La repetibilidad no es buena por las características de los eslabones• El peso de los eslabones es grande

2.2.4 Brazo 4

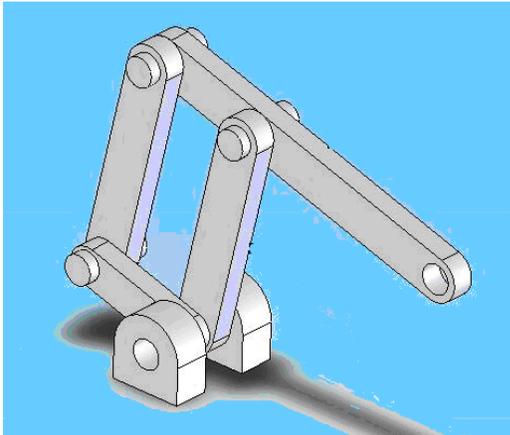


Figura 2.9 Propuesta Brazo 4

Es una combinación del Brazo 2 y Brazo 3, funciona con los mismos principios del primero pero tiene los mismos problemas de ambos.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none">• La configuración es fácil de construir• Por lo robusto de las piezas puede soportar mayores cargas• El movimiento de los eslabones a y b son independientes	<ul style="list-style-type: none">• El sistema es susceptible a alteraciones externas• Los actuadores que mueven a cada eslabón deben tener un torque considerable• Se tiene que colocar cojinetes de mayor capacidad en cada articulación• La precisión no es buena• La movilidad del sistema no es buena• La repetibilidad de la configuración no es buena• El peso de los eslabones

2.3 Propuestas de la muñeca

El sistema de la muñeca debe proporcionar dos grados de libertad para ubicar el OT en una posición que facilite tomar y manipular un objeto. La ubicación del sistema de la muñeca es en el último eslabón del brazo.

Las propuestas para la muñeca son:

2.3.1 Muñeca 1

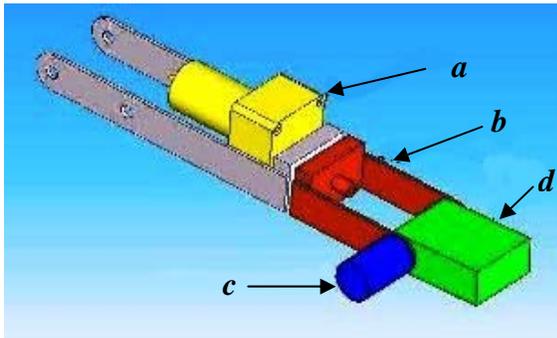


Figura 2.10 Propuesta Muñeca 1

El mecanismo se compone de dos partes, la primera parte se conforma de un motor-reductor *a* que hace girar el resto del eslabón *b*, la otra parte está compuesta por otro motor-reductor *d* que hace girar al órgano terminal *c*.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none">• El control de ambos movimientos son independientes• El sistema se compone de pocas piezas• El sistema no es susceptible a alteraciones externas• El peso de la configuración es reducido• La repetibilidad del sistema es buena	<ul style="list-style-type: none">• La capacidad de carga del manipulador depende del eje por el que rota la última parte del eslabón <i>b</i>• La precisión depende de los actuadores que lo integren

2.3.2 Muñeca 2

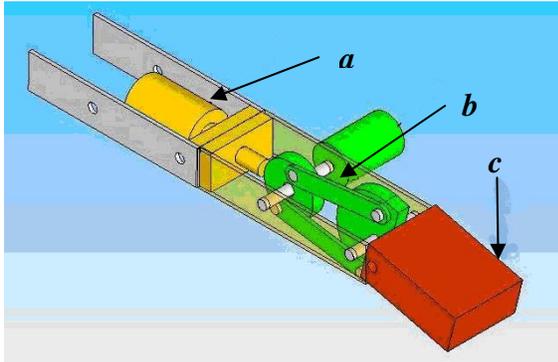
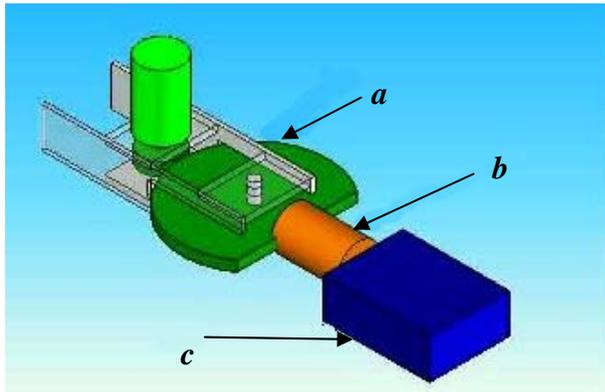


Figura 2.11 Propuesta para la Muñeca 2

El sistema se compone de tres partes, la primera es el actuador que hace girar a la última parte del eslabón *a*, la segunda parte se compone de un mecanismo de cuatro barras *b* que mueve al OT *c*.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none">• El sistema tiene un rango de movimiento alto• El espacio del mecanismo de 4 barras se puede ajustar• El sistema tiene buena movilidad	<ul style="list-style-type: none">• El sistema se compone de muchas piezas• El actuador del eslabón debe tener mucha capacidad para hacer girar al resto del sistema• El rango de movimientos depende de las dimensiones de cada una de las barras• El peso de los mecanismos no se distribuye bien• El mecanismo de cuatro barras reduce la precisión• La repetibilidad del sistema no es muy buena

2.3.3 Muñeca 3



El sistema se compone de un sistema de engranes *a* al cual se le acopla un actuador *b* que hace girar al OT *c*.

Figura 2.12 Propuesta para la Muñeca 3

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none">• Tiene un grado de movimiento mayor a los costados que las otras propuestas• Se compone de pocas piezas• El control de cada uno de los movimientos es independiente• La configuración tiene un rango grande de movimientos	<ul style="list-style-type: none">• El sistema saca de balance al último eslabón por el peso• El torque en la parte de los engranes depende de las dimensiones de estos• El acoplar un actuador al engrane más grande puede ser complicado por el torque que necesita• Los actuadores deben mover grandes pesos• La precisión no es buena• La repetibilidad del mecanismo no es buena

2.4 Propuestas de Mecanismos para el Órgano Terminal (OT)

Los mecanismos que se proponen para el OT tiene la característica de que sus dedos cierran de forma paralela, los que les permiten manipular objetos con perfiles planos o esféricos.

Se proponen los siguientes mecanismos para el OT:

2.4.1 Mecanismo 1

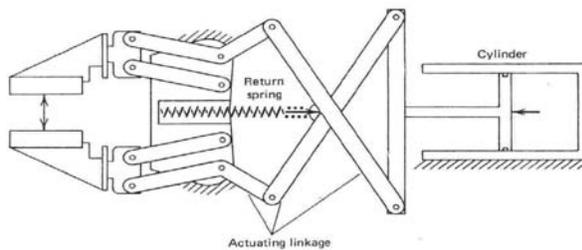


Figura 2.13 Propuesta de Mecanismo 1 [5]

El mecanismo funciona por medio de un actuador neumático, el actuador impulsa un mecanismo de cuatro barras, las barras más cortas permanecen verticales, las barras más largas giran haciendo que los dedos se abran y se cierren de manera paralela.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • El sistema puede cerrar los dedos con mucha fuerza • Se puede cambiar el actuador neumático por uno mecánico • La propuesta puede manipular objetos con superficies redondeadas • La velocidad de operación es rápida • El actuador es ligero 	<ul style="list-style-type: none"> • La capacidad de carga de las piezas depende de sus dimensiones • El actuador neumático es difícil controlar con precisión • La configuración varias piezas de precisión

2.4.2 Mecanismo 2

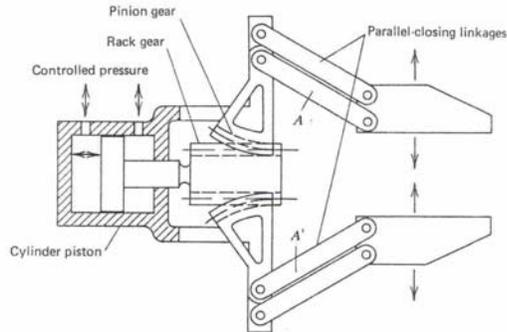


Figura 2.14 Propuesta para Mecanismo 2 [6]

Los dedos se mueven por un mecanismo de cuatro barras, el mecanismo es impulsado por un actuador neumático.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • El sistema puede cerrar los dedos con mucha fuerza • Se puede cambiar el actuador neumático por uno mecánico • La configuración puede manipular objetos con superficies redondas • La velocidad de operación es rápida • El actuador es ligero 	<ul style="list-style-type: none"> • La capacidad de carga del sistema depende de las dimensiones de sus piezas • El actuador neumático es difícil controlar con precisión • El actuador neumático es robusto • El mecanismo se compone de muchas piezas de precisión

2.4.4 Muñeca 4

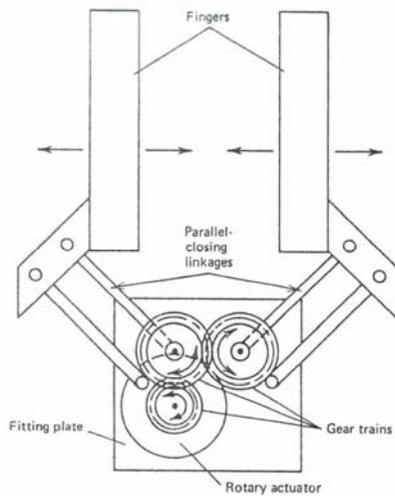


Figura 2.16 Propuesta para Mecanismo 4 [7]

El sistema funciona por un mecanismo de cuatro barras que es activado por un tren de engranes. El actuador que mueve a los engranes es un motor eléctrico.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • El peso del sistema es reducido • Los dedos del robot se mueven con buena precisión • Puede manipular objetos con superficies redondas 	<ul style="list-style-type: none"> • Entre más grande sea el tren de engranes, serán más lentos los dedos • Los engranes deben estar hechos de un material ligero, lo que los hace poco resistentes • El espacio del tren de engranes es limitado • Para que el mecanismo cierre con fuerza la transmisión de engranes debe ser grande

2.4.5 Mecanismo 5

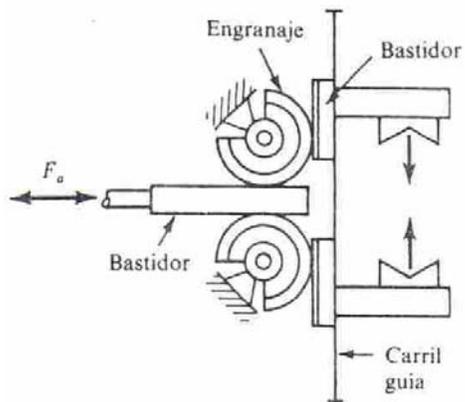


Figura 2.17 Propuesta para Mecanismo 5 [8]

El actuador del sistema es un bastidor horizontal que hace girar un par de engranes, los engranes transmiten su rotación a un bastidor vertical unido a los dedos y se mueven a través una guía. Por lo general se usa un cilindro de aire para mover el bastidor.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • El sistema se compone de pocas piezas • Los dedos se abren y cierran de forma rápida • El peso de todo el sistema es poco 	<ul style="list-style-type: none"> • El sistema no cierra con mucha fuerza • Algunas piezas requieren de mucha precisión • La capacidad de carga depende del actuador que mueve al bastidor horizontal y del tamaño de los engranes • El sistema sólo es recomendable para piezas pequeñas

2.4.6 Mecanismo 6

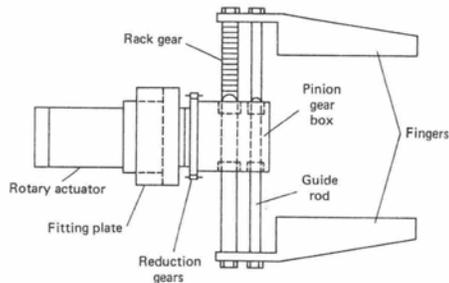


Figura 2.18 Propuesta para Mecanismo 6 [9]

El sistema se compone de una caja de engranes que hace girar unos tornillos sin fin y mueven los dedos a través de una barra guía.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • El sistema puede cerrar con mucha fuerza • La estructura es estable • El mecanismo puede manipular objetos con superficies redondas • La precisión y la repetibilidad son buenas 	<ul style="list-style-type: none"> • Se requiere que transmisión de engranes trabaje en un espacio reducido • El sistema se compone de muchas piezas • Por la transmisión de engranes y los tornillos sin fin hacen que los dedos cierren y abran muy lentamente • El sistema no funciona correctamente si los tornillos sin fin sufren algún tipo de daño • El peso del sistema de transmisión determina el peso de toda la estructura

2.4.7 Mecanismo 7

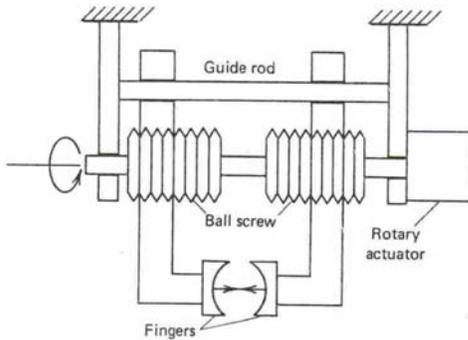


Figura 2.19 Propuesta para Mecanismo 7 [9]

El actuador hace girar un par de tornillos sin fin, que mueven a los dedos a través de una barra guía.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none">• El sistema se compone de pocas piezas• El peso del dispositivo es poco• La estructura del sistema es muy estable	<ul style="list-style-type: none">• La fuerza con la que cierra el sistema depende del actuador• El sistema funciona sólo para piezas muy pequeñas

Capítulo 3. Evaluación y Selección

En el capítulo anterior se plantearon diferentes propuestas de solución para cada uno de los elementos en los que se dividió el manipulador para su estudio. Para obtener la configuración más viable se usó el método de Matrices de Toma de Decisión¹³.

En el presente capítulo, primero se describe un poco de la teoría de cómo se elaboraron las Matrices de Decisión, posteriormente se presentan las matrices utilizadas en la evaluación de cada una de las propuestas y las calificaciones que recibieron cada una. El grupo de diseño que evaluó cada una de las propuestas se conformó de cinco personas con conocimientos y experiencia en el tema de la robótica.

3.1 Matriz de Decisión

Este método consiste en asignar a cada diseño una fila en la matriz y a las columnas se les asignan categorías en las que los diseños tienen que ser evaluados con respecto a su funcionamiento, costo, eficiencia, confiabilidad, etc.

Se pueden tomar en cuenta varias formas para desarrollar la matriz de decisión e interpretar la información que brinda. La selección del diseño se divide en dos etapas, para administrar mejor la complejidad y poder evaluar la mayor cantidad de diseños posibles. La primera etapa se denomina “proyección del concepto” y la segunda “puntuación del concepto”, ambas etapas se respaldan con una matriz de decisión.

Las matrices de decisión son diferentes en cada etapa. La etapa de “proyección del concepto” consiste en una evaluación rápida y aproximada, dirigida a reducir el número de alternativas viables. La etapa de “puntuación del concepto” consiste en un análisis más cuidadoso de los diseños seleccionados en el paso anterior, para elegir el que conducirá con mayor posibilidad al éxito.

¹³ Kart T. Ulrich, **Diseño y Desarrollo de Productos**, 3 ed, Ed. McGraw-Hill

Ambas etapas, tanto la de proyección como la de puntuación del concepto, siguen un proceso de cinco pasos que conducen al equipo a través de la actividad de selección del concepto¹⁴:

1. Preparar la matriz de selección
2. Calificar los conceptos
3. Combinar y mejorar los conceptos
4. Seleccionar uno o más conceptos
5. Reflexionar sobre los resultados y el proceso

Aunque se presenta un método de selección bien definido, el equipo, no el método, crea los conceptos y toma las decisiones que determinen la calidad del dispositivo.

3.1.2 Prepara la Matriz de Selección

Los conceptos que se han identificado para el análisis se ingresan en la parte superior de la matriz. Por lo regular ya se han depurado hasta cierto grado desde la visualización y se pueden expresar con más detalle. El nivel de detalle de los criterios dependerá de las necesidades. Se debe desarrollar una lista de las necesidades primarias, secundarias y terciarias para que posteriormente se empleen para determinar las categorías.

3.1.3 Calificar los Conceptos

Las calificaciones son puesta por el equipo de trabajo, cuando se tienen conceptos competitivos es necesario establecer una escala lo más precisa posible. Una escala recomendable es del 1 al 5¹⁵:

¹⁴ Kart T. Ulrich, **Diseño y Desarrollo de Productos**, 3 ed, Ed. McGraw-Hill, pagina 129.

¹⁵ Kart T. Ulrich, **Diseño y Desarrollo de Productos**, 3 ed, Ed. McGraw-Hill, página 135.

Tabla 3.1 Calificaciones para los conceptos

Desempeño Relativo	Calificación
Mucho peor que la referencia	1
Peor que la referencia	2
Igual que la referencia	3
Mejor que la referencia	4
Mucho mejor que la referencia	5

Se pueden usar otra escala, como 1 a 9, pero las escalas más precisas por lo general requieren más tiempo y esfuerzo en la evaluación de cada uno de los conceptos.

3.1.4 Ordenar por Rango los Conceptos

Una vez que se han ingresado las calificaciones para cada concepto, las puntuaciones ponderadas se calculan multiplicando las calificaciones de cada fila por su factor de importancia del criterio. La puntuación final para cada concepto es la suma de las puntuaciones ponderadas¹⁶:

$$S_j = \sum_{i=1}^n r_{ij} w_i$$

r_{ij} = calificación de la fila de concepto j para el criterio.

w_i = ponderación para el criterio i -ésimo.

n = número de criterios.

S_j = puntuación total del concepto.

¹⁶ Kart T. Ulrich, **Diseño y Desarrollo de Productos**, 3 ed, Ed. McGraw-Hill, página 136.

3.1.5 Combinar y Mejorar los Conceptos

Algunas de las depuraciones y mejoras más creativas ocurren durante el proceso de selección del concepto conforme el equipo descubre las fortalezas y debilidades inherentes de ciertas características de los diseños de un producto.

3.1.6 Seleccionar Uno o Más Conceptos

La selección final no es sólo cuestión de elegir el concepto que alcanza el rango más alto después del primer paso a través de la evaluación. Utilizando una hoja de cálculo se puede variar los pesos y calificaciones para determinar su efecto en el ordenamiento por rango. Con base en la matriz de selección, el equipo puede decidir seleccionar los dos o más diseños superiores. Se pueden crear prototipos de los diseños y plantear una evaluación mejor de funcionamiento.

3.1.7 Reflexionar Sobre los Resultados y el Proceso

Como paso final, el equipo reflexiona sobre él, o los conceptos seleccionados, y sobre el proceso de selección del concepto. La organización también se puede beneficiar de la reflexión sobre el proceso mismo. Para mejorar el proceso y las actividades de selección del concepto posteriores son útiles dos preguntas:

- El método de selección del concepto, ¿de qué manera facilitó la toma de decisiones en el equipo de diseño?
- ¿Cómo se puede modificar el método para mejorar el desempeño del equipo de diseño?

Para el presente trabajo únicamente se llevo a cabo la etapa de puntuación del concepto debido a que el grupo de diseño sólo está conformado por cinco personas y además en algunos casos pocas propuestas de solución.

Para todos los casos se desea que cada mecanismo tengan un número reducido de piezas y funcione de forma sencilla.

3.2.1 Evaluación de las Propuestas para el Mecanismo del Hombro

Las siguientes tablas son las matrices de toma de decisión para el mecanismo del hombro; con ellas se determinó el mecanismo que cumplía de mejor forma las funciones del hombro del robot.

En la primera columna de cada matriz se indica la propuesta de solución del mecanismo que se está analizando y en la parte superior se muestran los criterios de evaluación con su respectivo valor de ponderación:

Tabla 3.1 Evaluación del Hombro por el Primer integrante del equipo de diseño

Propuesta	Repetitividad en sus movimientos 30%		Precisión 30%		Número de piezas 5%		Confiabilidad 10%		Movilidad 20%		Facilidad de construcción 5%		Total
1	4	1.20	4	1.20	4	0.20	4	0.40	5	1.00	4	0.20	4.20
2	4	1.20	4	1.20	3	0.15	4	0.40	1	0.20	1	0.05	3.20
3	3	0.90	3	0.30	3	0.15	3	0.30	5	1.00	5	0.25	3.50
4	4	1.20	4	1.20	4	0.20	3	0.30	3	0.60	3	0.15	3.65

Tabla 3.2 Evaluación del Hombro por el Segundo integrante del equipo de diseño

Propuesta	Repetitividad en sus movimientos 30%		Precisión 30%		Número de piezas 5%		Confiabilidad 10%		Movilidad 20%		Facilidad de construcción 5%		Total
1	5	1.50	5	1.50	4	0.20	5	0.50	5	1.00	3	0.15	4.85
2	2	0.60	5	1.50	2	0.10	5	0.50	3	0.60	1	0.05	3.35
3	2	0.60	1	0.30	2	0.10	3	0.30	3	0.60	4	0.20	2.10
4	2	0.60	2	0.60	1	0.05	1	0.10	1	0.20	1	0.05	1.60

Tabla 3.3 Evaluación del Hombro por el Tercer integrante del equipo de diseño

Propuesta	Repetitividad en sus movimientos 30%		Precisión 30%		Número de piezas 5%		Confiabilidad 10%		Movilidad 20%		Facilidad de construcción 5%		Total
1	5	1.50	5	1.50	5	0.25	5	0.50	5	1.00	5	0.25	5.00
2	5	1.50	5	1.50	3	0.15	5	0.50	3	0.60	3	0.15	4.40
3	3	0.90	2	0.60	2	0.10	2	0.20	4	0.80	2	0.10	2.70
4	3	0.90	2	0.60	2	0.10	2	0.20	5	1.00	2	0.10	2.60

Tabla 3.4 Evaluación del Hombro por el Cuarto integrante del equipo de diseño

Propuesta	Repetitividad en sus movimientos 30%		Precisión 30%		Número de piezas 5%		Confiabilidad 10%		Movilidad 20%		Facilidad de construcción 5%		Total
1	5	1.50	5	1.50	4	0.20	5	0.50	5	1.00	3	0.15	4.85
2	3	0.90	5	1.50	3	0.15	5	0.50	1	0.20	1	0.05	3.30
3	3	0.90	1	0.30	3	0.15	2	0.20	3	0.60	4	0.20	2.35
4	3	0.90	3	0.90	2	0.10	3	0.30	2	0.40	3	0.15	2.75

Tabla 3.5 Evaluación del Hombro por el Quinto integrante del equipo de diseño

Propuesta	Repetitividad en sus movimientos 30%		Precisión 30%		Número de piezas 5%		Confiabilidad 10%		Movilidad 20%		Facilidad de construcción 5%		Total
1	4	1.20	4	1.20	4	0.20	4	0.40	5	1.00	4	0.20	4.20
2	4	1.20	5	1.50	3	0.15	4	0.40	2	0.40	2	0.10	3.75
3	3	0.90	2	0.60	3	0.15	3	0.30	4	0.80	3	0.15	2.90
4	4	1.20	3	0.90	3	0.15	3	0.30	5	1.00	3	0.15	3.70

3.2.2 Evaluación de las Propuestas para el Mecanismo del Brazo

Como en el punto anterior las siguientes tablas son las matrices de toma de decisión para el mecanismo del brazo del robot; con ellas se determinó el mecanismo que cumplía de mejor forma los rangos de movimiento que son necesarios para el brazo del robot.

En la primera columna de cada matriz se indica la propuesta de solución del mecanismo que se está analizando y en la parte superior se muestran los criterios de evaluación con su respectivo valor de ponderación:

Tabla 3.6 Evaluación del Mecanismo para el Brazo del robot hecha por el Primer miembro del equipo de diseño

Propuesta	Repetitividad en sus movimientos 15%		Número de piezas 5%		Precisión 15%		Peso (ligero) 20%		Confiabilidad 10%		Movilidad 20%		Facilidad de construcción 5%		Ubicación de los actuadores 10%		Total
1	3	0.45	4	0.20	3	0.45	4	0.80	3	0.30	4	0.80	4	0.20	4	0.40	3.60
2	4	0.6	3	0.15	5	0.75	4	0.80	4	0.40	3	0.60	4	0.20	4	0.40	3.90
3	2	0.30	5	0.25	2	0.30	2	0.40	2	0.20	4	0.80	1	0.05	1	0.10	2.55
4	3	0.45	3	0.15	3	0.45	4	0.80	3	0.30	3	0.60	2	0.10	4	0.40	3.35

Tabla 3.7 Evaluación del Mecanismo para el Brazo del robot hecha por el Segundo miembro del equipo de diseño

Propuesta	Repetitividad en sus movimientos 15%		Número de piezas 5%		Precisión 15%		Peso (ligero) 20%		Confiabilidad 10%		Movilidad 20%		Facilidad de construcción 5%		Ubicación de los actuadores 10%		Total
1	1	0.15	3	0.15	1	0.15	3	0.60	2	0.20	2	0.40	4	0.20	3	0.30	2.15
2	5	0.75	3	0.15	5	0.75	3	0.60	5	0.50	4	0.80	4	0.20	3	0.30	4.05
3	1	0.15	3	0.15	2	0.30	1	0.20	2	0.20	2	0.40	4	0.20	1	0.10	1.70
4	5	0.75	3	0.15	4	0.60	3	0.60	4	0.40	4	0.80	4	0.20	3	0.30	3.8

Tabla 3.8 Evaluación del Mecanismo para el Brazo del robot hecha por el Tercer miembro del equipo de diseño

Propuesta	Repetitividad en sus movimientos 15%		Número de piezas 5%		Precisión 15%		Peso (ligero) 20%		Confiabilidad 10%		Movilidad 20%		Facilidad de construcción 5%		Ubicación de los actuadores 10%		Total
1	5	0.75	3	0.15	4	0.60	5	1.00	5	0.50	1	0.20	3	0.15	5	0.50	4.65
2	5	0.75	3	0.15	3	0.45	4	0.80	3	0.30	3	0.60	4	0.20	3	0.30	3.55
3	3	0.45	5	0.25	4	0.60	5	1.00	3	0.30	3	0.60	4	0.20	3	0.30	3.70
4	3	0.45	5	0.25	3	0.45	4	0.80	3	0.30	3	0.60	3	0.15	3	0.30	3.30

Tabla 3.9 Evaluación del Mecanismo para el Brazo del robot hecha por el Cuarto miembro del equipo de diseño

Propuesta	Repetitividad en sus movimientos 15%		Número de piezas 5%		Precisión 15%		Peso (ligero) 20%		Confiabilidad 10%		Movilidad 20%		Facilidad de construcción 5%		Ubicación de los actuadores 10%		Total
1	2	0.30	3	0.15	2	0.30	4	0.80	1	0.10	2	0.40	4	0.20	4	0.40	2.65
2	5	0.75	3	0.15	5	0.75	3	0.60	5	0.50	4	0.80	3	0.15	4	0.40	4.10
3	1	0.15	3	0.15	1	0.15	1	0.10	2	0.20	2	0.40	3	0.15	1	0.10	1.50
4	5	0.75	3	0.15	3	0.45	3	0.60	2	0.20	4	0.80	4	0.20	3	0.30	3.45

Tabla 3.10 Evaluación del Mecanismo para el Brazo del robot hecha por el Quinto miembro del equipo de diseño

Propuesta	Repetitividad en sus movimientos 15%		Número de piezas 5%		Precisión 15%		Peso (ligero) 20%		Confiabilidad 10%		Movilidad 20%		Facilidad de construcción 5%		Ubicación de los actuadores 10%		Total
1	3	0.45	2	0.10	3	0.45	4	0.80	3	0.30	3	0.60	3	0.15	3	0.30	3.15
2	4	0.60	2	0.10	4	0.60	2	0.40	4	0.40	3	0.60	2	0.10	3	0.30	3.10
3	2	0.30	4	0.20	2	0.30	2	0.40	2	0.20	3	0.60	2	0.10	2	0.20	2.30
4	4	0.60	2	0.10	3	0.45	2	0.40	3	0.30	2	0.40	2	0.10	3	0.30	2.65

3.2.3 Evaluación de las Propuestas para el Mecanismo para la Muñeca

Las siguientes tablas son las matrices de toma de decisión para el mecanismo de la muñeca; con ellas se determinó el mecanismo que cumplía de mejor forma las funciones de muñeca para el robot.

En la primera columna de cada matriz se indica la propuesta de solución del mecanismo que se está analizando y en la parte superior se muestran los criterios de evaluación con su respectivo valor de ponderación:

Tabla 3.11 Evaluación del Mecanismo para la Muñeca del robot hecha por el Primer miembro del equipo de diseño

Propuestas	Repetitividad en sus movimientos 20%		Número de piezas 10%		Peso (ligero) 30%		Precisión 20%		Movilidad 10%		Facilidad de construcción 10%		Total
1	3	0.60	4	0.40	3	0.90	3	0.60	4	0.40	4	0.40	3.30
2	4	0.80	2	0.20	2	0.60	4	0.80	2	0.20	1	0.10	2.70
3	4	0.80	4	0.40	3	0.90	4	0.80	2	0.20	3	0.30	3.40

Tabla 3.12 Evaluación del Mecanismo para la Muñeca del robot hecha por el Segundo miembro del equipo de diseño

Propuestas	Repetitividad en sus movimientos 20%		Número de piezas 10%		Peso (ligero) 30%		Precisión 20%		Movilidad 10%		Facilidad de construcción 10%		Total
1	5	1.00	4	0.40	5	1.50	4	0.80	5	0.50	3	0.30	4.50
2	4	0.80	4	0.40	4	1.20	3	0.60	3	0.30	3	0.30	3.60
3	3	0.60	2	0.20	2	0.60	1	0.20	1	0.10	3	0.30	2.00

Tabla 3.13 Evaluación del Mecanismo para la Muñeca del robot hecha por el Tercer miembro del equipo de diseño

Propuestas	Repetitividad en sus movimientos		Número de piezas		Peso (ligero)		Precisión		Movilidad		Facilidad de construcción		Total
	20%		10%		30%		20%		10%		10%		
1	3	0.60	5	0.50	4	1.20	3	0.60	2	0.20	4	0.40	3.50
2	3	0.60	5	0.50	4	1.20	3	0.60	2	0.20	4	0.40	3.50
3	5	1.00	3	0.30	5	1.50	5	1.00	5	0.50	5	0.50	4.80

Tabla 3.14 Evaluación del Mecanismo para la Muñeca del robot hecha por el Cuarto miembro del equipo de diseño

Propuestas	Repetitividad en sus movimientos		Número de piezas		Peso (ligero)		Precisión		Movilidad		Facilidad de construcción		Total
	20%		10%		30%		20%		10%		10%		
1	4	0.80	5	0.50	4	1.20	4	0.80	4	0.40	4	0.40	4.10
2	2	0.40	5	0.50	4	1.20	2	0.40	3	0.30	3	0.30	3.10
3	4	0.80	4	0.40	3	0.90	4	0.80	5	0.50	4	0.40	3.80

Tabla 3.15 Evaluación del Mecanismo para la Muñeca del robot hecha por el Quinto miembro del equipo de diseño

Propuestas	Repetitividad en sus movimientos		Número de piezas		Peso (ligero)		Precisión		Movilidad		Facilidad de construcción		Total
	20%		10%		30%		20%		10%		10%		
													4
1	3	0.60	3	0.30	3	0.90	3	0.60	3	0.30	2	0.20	2.90
2	3	0.60	2	0.20	2	0.60	2	0.40	2	0.20	2	0.20	2.20
3	2	0.40	3	0.30	2	0.60	3	0.60	3	0.30	2	0.20	2.40

3.2.4 Evaluación de las Propuestas para el Mecanismo para el OT

Las siguientes tablas son las matrices de toma de decisión para el mecanismo del órgano terminal; con ellas se determinó el mecanismo que será capaz de manipular un objeto de la forma que se desea.

En la primera columna de cada matriz se indica la propuesta de solución del mecanismo que se está analizando y en la parte superior se muestran los criterios de evaluación con su respectivo valor de ponderación:

Tabla 3.16 Evaluación del Mecanismo para el OT del robot hecha por el Primer miembro del equipo de diseño

Propuestas	Peso (ligero)		Capacidad de manipular un objeto		Número de piezas		Facilidad de construcción		Rigidez en la estructura		Total
	30%		20%		20%		15%		15%		
1	3	0.90	3	0.60	2	0.40	3	0.45	4	0.60	2.95
2	4	1.20	4	0.80	3	0.60	4	0.60	4	0.60	3.80
3	5	1.50	1	0.20	5	1.00	5	0.75	1	0.15	3.60
4	4	1.20	3	0.60	3	0.60	3	0.45	2	0.30	3.15
5	3	0.90	2	0.40	4	0.80	3	0.45	4	0.60	3.15
6	4	1.20	4	0.80	3	0.60	3	0.45	4	0.60	3.65
7	3	0.90	3	0.60	4	0.80	4	0.60	4	0.60	3.50

Tabla 3.17 Evaluación del Mecanismo para el OT del robot hecha por el Segundo miembro del equipo de diseño

Propuestas	Peso (ligero)		Capacidad de manipular un objeto		Número de piezas		Facilidad de construcción		Rigidez en la estructura		Total
	30%		20%		20%		15%		15%		
1	2	0.60	3	0.60	2	0.40	2	0.30	4	0.60	2.35
2	3	0.90	3	0.60	3	0.60	2	0.30	4	0.60	3.00
3	3	0.90	1	0.20	3	0.60	3	0.45	4	0.60	2.75
4	2	0.60	2	0.40	2	0.40	1	0.15	3	0.45	2.00
5	3	0.90	3	0.60	3	0.60	3	0.45	4	0.60	3.15
6	2	0.60	3	0.60	2	0.40	2	0.30	4	0.60	2.50
7	2	0.60	3	0.60	2	0.40	3	0.45	4	0.60	2.65

Tabla 3.18 Evaluación del Mecanismo para el OT del robot hecha por el Tercer miembro del equipo de diseño

Propuestas	Peso (ligero)		Capacidad de manipular un objeto		Número de piezas		Facilidad de construcción		Rigidez en la estructura		Total
	30%		20%		20%		15%		15%		
1	4	1.20	4	0.80	3	0.60	4	0.60	4	0.60	3.80
2	3	0.90	3	0.60	4	0.80	3	0.45	5	0.75	3.50
3	2	0.60	4	0.80	5	1.00	5	0.75	5	0.75	3.90
4	3	0.90	5	1.00	4	0.80	3	0.45	5	0.75	3.90
5	5	1.50	4	0.80	5	1.00	5	0.75	5	0.75	4.80
6	4	1.20	5	1.00	5	1.00	5	0.75	5	0.75	4.70
7	3	0.90	5	1.00	5	1.00	4	0.60	5	0.75	4.75

Tabla 3.19 Evaluación del Mecanismo para el OT del robot hecha por el Cuarto miembro del equipo de diseño

Propuestas	Peso (ligero)		Capacidad de manipular un objeto		Número de piezas		Facilidad de construcción		Rigidez en la estructura		Total
	30%		20%		20%		15%		15%		
1	4	1.20	5	1.00	3	0.60	3	0.45	4	0.60	3.85
2	4	1.20	5	1.00	3	0.60	3	0.45	5	0.75	4.00
3	2	0.60	3	0.60	5	1.00	5	0.75	4	0.60	3.55
4	3	0.90	5	1.00	3	0.60	2	0.30	5	0.75	3.55
5	3	0.90	2	0.40	4	0.80	3	0.45	3	0.45	3.00
6	3	0.90	5	1.00	3	0.60	3	0.45	5	0.75	3.70
7	3	0.90	5	1.00	3	0.60	3	0.45	5	0.75	3.70

Tabla 3.20 Evaluación del Mecanismo para el OT del robot hecha por el Quinto miembro del equipo de diseño

Propuestas	Peso (ligero)		Capacidad de manipular un objeto		Número de piezas		Facilidad de construcción		Rigidez en la estructura		Total
	30%		20%		20%		15%		15%		
1	4	0.90	3	0.60	2	0.40	2	0.45	2	0.60	2.95
2	4	1.20	3	0.80	3	0.60	3	0.60	3	0.60	3.80
3	3	1.50	2	0.20	4	1.00	4	0.75	3	0.15	3.60
4	3	1.20	3	0.60	2	0.60	2	0.45	3	0.30	3.15
5	4	0.90	3	0.40	3	0.80	3	0.45	4	0.60	3.15
6	3	1.20	2	0.80	2	0.60	2	0.45	3	0.60	3.65
7	3	0.90	3	0.60	4	0.80	2	0.60	3	0.60	3.50

3.3 Selección de las Propuestas de Solución

En los puntos anteriores muestran las matrices de toma de decisión de cada una de las propuestas hechas para cada mecanismo que compone al robot. En la última columna de cada matriz aparece el total de puntos obtenidos por cada uno de los mecanismos propuestos. Se espera que el mecanismo que obtuvo más puntos sea el que mejor cubra las funciones requeridas. Las siguientes tablas muestran la suma de todos los puntos obtenidos por cada una de las propuestas hechas para cada parte del robot. En la primera columna de cada una de las siguientes tablas indica el número de propuesta del mecanismo para cada una de las partes en que se dividió el robot para su estudio, en la parte superior se indica el miembro del equipo de diseño que evaluó cada propuesta, la penúltima columna indica el promedio de puntos de cada una de las propuestas, la última columna indica cual es la mejor propuesta de acuerdo con la evaluación hecha por el equipo de diseño donde “1” es la mejor y la peor corresponde al número más alto.

3.21 Tabla de toma de decisión para el mecanismo del Hombro el robot

Propuesta	Evaluador 1	Evaluador 2	Evaluador 3	Evaluador 4	Evaluador 5	Total	Promedio	Viabilidad
1	4.20	4.85	5.00	4.85	4.20	23.1	4.62	1
2	3.20	3.35	4.40	3.30	3.75	18.00	3.60	2
3	3.50	2.10	2.70	2.35	2.90	13.55	2.71	4
4	3.65	1.60	2.90	2.75	3.70	14.60	2.92	3

3.22 Tabla de toma de decisión para el mecanismo del Brazo el robot

Propuesta	Evaluador 1	Evaluador 2	Evaluador 3	Evaluador 4	Evaluador 5	Total	Promedio	Viabilidad
1	3.60	2.15	4.65	2.65	3.15	16.20	3.24	3
2	3.90	4.05	3.55	4.1	3.1	18.70	3.74	1
3	2.55	1.70	3.70	1.50	2.30	11.75	2.35	4
4	3.35	3.80	3.30	3.45	2.65	16.55	3.31	2

3.23 Tabla de toma de decisión para el mecanismo de la muñeca del robot

Propuesta	Evaluador 1	Evaluador 2	Evaluador 3	Evaluador 4	Evaluador 5	Total	Promedio	Viabilidad
1	3.30	4.50	3.50	4.10	2.90	18.30	3.66	1
2	2.70	3.60	3.50	3.10	2.20	15.10	3.02	3
3	3.40	2.00	4.80	3.80	2.40	16.40	3.28	2

3.24 Tabla de toma de decisión para el mecanismo del OT del robot

Propuesta	Evaluador 1	Evaluador 2	Evaluador 3	Evaluador 4	Evaluador 5	Total	Promedio	Viabilidad
1	2.95	2.35	3.80	3.85	2.80	15.75	3.15	6
2	3.80	3.00	3.50	4.00	3.30	17.60	3.52	1
3	3.60	2.75	3.90	3.55	3.15	16.95	3.39	5
4	3.15	2.00	3.90	3.55	2.65	15.25	3.05	7
5	3.15	3.15	4.80	3.00	3.45	17.55	3.51	2
6	3.65	2.50	4.70	3.70	2.45	17.00	3.40	4
7	3.50	2.65	4.75	3.70	3.05	17.65	3.43	3

De acuerdo con la evaluación de cada una de las propuestas, se puede decir que la configuración que resulta más viable es la siguiente:

- Hombro del robot: Propuesta 1
- Brazo del robot: Propuesta 2
- Muñeca del robot: Propuesta 1
- Órgano Terminal del robot: Propuesta 7 o Propuesta 2

En el caso del OT las Propuestas 7 y 2 tiene puntuaciones demasiado cercanas, para esta parte del robot es necesario un estudio más detallado de cada propuesta, además de combinar las propuestas para determinar la que mejor cumpla con la función requerida y sea compatible con el resto de la estructura del robot.

3.4 Combinaciones de Propuestas de Solución

En el punto anterior se determino la configuración más viable respecto a la evaluación del equipo de diseño, pero para tener la seguridad de que en verdad funcione como se espera, se comparó con dos configuraciones más. Las otras configuraciones se obtienen combinando las otras propuestas de solución que tiene puntajes altos. Las siguientes combinaciones no incluyen al OT, es necesario hacer un estudio más detallado de esta parte.

3.4.1 Combinación 1

La combinación uno está compuesta por los elementos que obtuvieron mejores calificaciones:

- Hombro del robot: Propuesta 1
- Brazo del robot: Propuesta 2
- Muñeca del robot: Propuesta 1

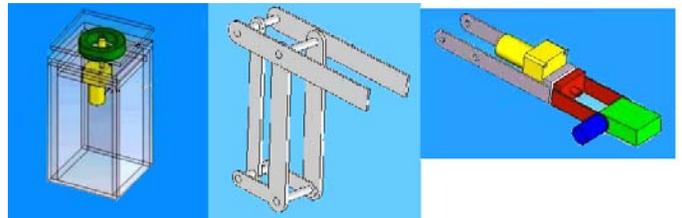


Figura 3.1 Combinación 1

3.4.2 Combinación 2

La siguiente combinación corresponde a los siguientes mecanismos:

- Hombro del robot: Propuesta 1
- Brazo del robot: Propuesta 1
- Muñeca del robot: Propuesta 3

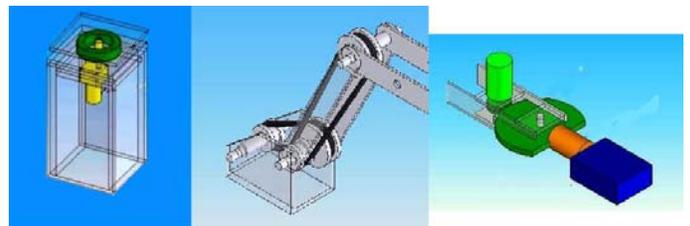


Figura 3.2 Combinación 2

3.4.3 Combinación 3

La siguiente combinación corresponde a los siguientes mecanismos:

- Hombro del robot: Propuesta 3
- Brazo del robot: Propuesta 2
- Muñeca del robot: Propuesta 3

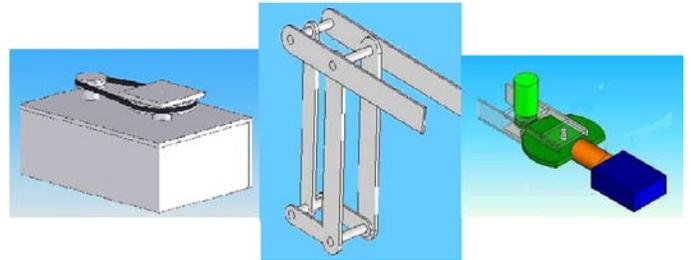


Figura 3.3 Combinación 2

3.4.4 Selección de la Configuración

La selección de la configuración del robot se basa en la siguiente tabla que contiene las ventajas y las desventajas del conjunto de mecanismos que componen cada configuración:

Tabla 3.25 Comparación de las configuraciones del robot

Propuesta	Ventajas	Desventajas
1	<ul style="list-style-type: none"> • La estructura del robot puede permanecer rígida cuando los actuadores no estén operando • La precisión y repetitividad es buena • Las dimensiones del robot no están sujetas a alguna limitación • La estructura del robot es ligera 	<ul style="list-style-type: none"> • La capacidad del robot depende de los actuadores • La cantidad de piezas es grande • El diseño total está sujeto a las dimensiones y capacidad de los actuadores
2	<ul style="list-style-type: none"> • Los mecanismos que componen al robot tienen pocas piezas • La precisión y la repetitividad de la configuración es aceptable • La estructura es ligera 	<ul style="list-style-type: none"> • Las dimensiones del robot están sujetas al tamaño de las bandas que conforman el brazo • Para que el sistema funcione de forma aceptable se deben usar bandas dentadas • Se requiere hacer ajustes a las bandas de manera esporádica
3	<ul style="list-style-type: none"> • La estructura es ligera • La capacidad de manipular un objeto es mayor que las anteriores • El número de piezas es reducido 	<ul style="list-style-type: none"> • El hombro necesita un contra peso y la banda tiene que ser dentada • El diseño total depende de las características de los actuadores • La estructura es difícil de balancear

De acuerdo con la comparación de las tres configuraciones, se selecciona la propuesta 1, porque resulta la más versátil y además sus dimensiones no se encuentran limitadas por alguna característica de los actuadores. Las desventajas de esta configuración son los actuadores.

3.5 Selección del OT

Para seleccionar el órgano terminante o efector final es necesario realizar un estudio más detallado, el OT es clave en el rendimiento del robot manipulador (la principal función del robot la lleva a cabo esta parte). Las propuestas siete y dos son las que mejor puntuación obtuvieron, se espera que estas propuestas cumplan mejor con las expectativas de funcionamiento necesarias para el robot, pero además hay que considerar los siguientes aspectos:

- El actuador responsable que la pinza cierre y abra
- El actuador debe concordar con el resto de los actuadores del robot
- La estructura del OT debe ser compatible con la del robot

La estructura seleccionada para el resto del robot se mueve por medio de motoreductores, uno de los requisitos importantes para el OT es su actuador, para que esta parte sea compatible con el resto del robot se deben elegir propuestas en las cuales se les pueda adaptar un actuador del tipo mecánico.

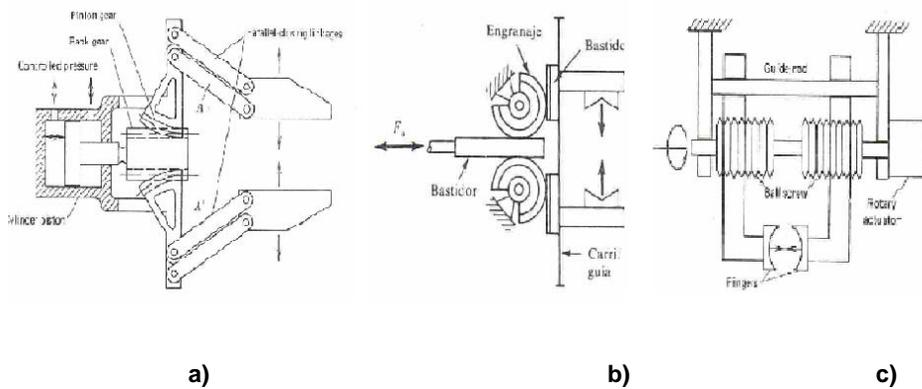


Figura 3.4 **a)** Propuesta 2 **b)** Propuesta 5 **c)** Propuesta 7

En la figura 3.4 **a)** corresponde a la propuesta dos, la que obtuvo mejor puntaje, su actuador es del tipo neumático, **b)** corresponde a la propuesta cinco, los dedos se cierran y se abren por medio de un mecanismo activado por un actuador neumático, y **c)** corresponde a la propuesta siete, este dispositivo cuenta con un actuador mecánico conformado por un tornillo sin fin.

El OT será una combinación entre el la propuesta dos y la propuesta siete. Se tomará como base la propuesta dos y se modificará para que su actuador sea un tornillo sin fin. Dispositivos de este tipo son comunes en robots pequeños como los scorbot que se encuentran en los laboratorios de Manufactura Flexible del la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

Capítulo 4. Diseño a Detalle

El presente capítulo muestra los cálculos y las consideraciones hechas en el diseño de la estructura mecánica del robot manipulador. Se plantea que el robot trabajará en un ambiente controlado como el de un laboratorio, con condiciones estándar de temperatura y humedad.

4.1 Análisis de trayectoria del OT

Un manipulador es un conjunto de cuerpos rígidos que tienen algún tipo de unión, las uniones se dividen en¹⁷ pares inferiores y superiores. Los pares inferiores existen cuando un elemento es acoplado a otro por medio de una acción envolvente y el contacto se realiza entre superficies. Si el contacto tiene lugar a lo largo de una línea o un punto, el acoplamiento se conoce como par superior. Los manipuladores se constituyen de pares inferiores. Los pares inferiores clasifican en seis tipos:

- Par de rotación (R), el cual permite giro alrededor de un eje y evita translaciones.
- Par prismático (P), que permite únicamente translación a lo largo de una dirección.
- Par tornillo (H), que permite translación a lo largo de un eje y rotación alrededor del mismo eje.
- Par cilíndrico (C), que permite dos movimientos independientes, a saber translación sobre un eje y rotación alrededor del mismo.

¹⁷ Dr. Ángel Alfonso Rojas Salgado, **Dinámica de Sistemas Articulados de Cuerpos Rígidos**, Tesis UNAM, 1987.

- Par esférico (S), que permite rotación alrededor de tres ejes no coplanares e impide movimientos de translación.
- Par plano (E), que permite la translación a lo largo de dos direcciones independientes y rotación alrededor de un eje perpendicular al plano de esas direcciones.

Nombre del par	Unión mecánica forma de los pares	Representación esquemática
1. Rotación (R)		
2. Prismático (P)		
3. Tornillo (H)		
4. Cilíndrico (C)		
5. Esférico (S)		
6. Plano (E)		

Figura 4.1 Tipos de Pares Inferiores referencia [12]

Cabe mencionar que un manipulador es una cadena cinemática abierta, que puede estar compuesta de sub-cadenas, las sub-cadenas pueden estar cerradas y formar mecanismos (los robots manipuladores paralelos están compuestos por cadenas cinemáticas cerradas un ejemplo de estos son los simuladores de aviación, pocisionadores de antenas, aplicaciones medicas, etc)¹⁸.

La función de un manipulador es la de trasladar un objeto de un lugar a otro, la capacidad que tenga el manipulador de colocar dicho objeto en un sitio determinado depende de sus partes y de los grados de libertad que tenga el sistema mecánico que lo compone. El grado de libertad de un sistema mecánico se define como¹⁹ un número entero correspondiente al número mínimo de coordenadas generalizadas para especificar una configuración geométrica del sistema. El manipulador tiene que trabajar en una región determinada por las dimensiones de sus partes y los grados de libertad de su estructura mecánica, a esta región se le conoce como²⁰ “espacio de trabajo”.

En este caso para realizar el análisis de trayectoria del manipulador se empleó el método de proyecciones de Denavit-Hartenberg, este método es muy usado en robótica. El método de proyecciones de Denavit-Hartenberg consta de colocar un sistema de referencia para la posición final del OT, pero para obtener las ecuaciones que describen ese punto es necesario realizar transformaciones de un sistema de referencia de un eslabón a otro de acuerdo a ciertos parámetros y

¹⁸ Rafael Aracil, **Robots Paralelos: Máquinas con un pasado y n Futuro en la Robótica**, RIAI, volumen 3, número 1, Enero 2006 , paginas16-28

¹⁹ Dr. Ángel Alfonso Rojas Salgado, **Dinámica de Sistemas Articulado de Cuerpos Rígidos**, Tesis UNAM, 1987.

²⁰ Eugene I. Rivin, **Mechanical Design of Robots**, Mac-Graw Hill, pág Xi

variables del movimiento entre las articulaciones que forman los eslabones. Al obtener las ecuaciones de posición del punto final de la cadena cinemática abierta con respecto a un sistema inicial de referencia se le llama “solución cinemática directa”. Resolver el problema de cinemática directa resulta complicado por el gran número de operaciones que hay que realizar, con la ayuda de un programa de cálculo formal se reduce el tiempo de cálculo de las ecuaciones.

La mayoría de los autores en la literatura referente a robótica usan el método de Denavit-Hartenberg, pero manejan en una sola matriz para las rotaciones y translaciones de un sistema a otro (una matriz de rotación de 4x4 y un vector de translación de 1x4). La desventaja de unir las rotaciones y las translaciones es realizar operaciones superfluas haciendo hasta cierto punto confuso el método. En este caso para mayor facilidad se separaron las rotaciones y las translaciones de cada sistema para después por medio de multiplicar matrices y vectores obtener las ecuaciones de cinemática directa del manipulador.

En el análisis de la trayectoria con el método de Denavit-Hartenberg se empleó la nomenclatura siguiente para definir los ejes de eslabonamiento y los parámetros de las articulaciones²¹:

Para definir los ejes unitarios en cada uno de los eslabones:

²¹ Dr. Ángel Alfonso Rojas Salgado, **Dinámica de Sistemas Articulados de Cuerpos Rígidos**, Tesis UNAM, 1987.

- Z_i es el eje del par que conecta los eslabones i e $i+1$. Se elige como:
 - i) El eje de rotación si el par asociado es R .

ii) La dirección de traslación si el par asociado es P .

- X_i es la perpendicular común a Z_{i-1} y Z_i dirigida de Z_{i-1} a Z_i .
- Y_i completa el sistema coordenado dextrógiro del i -ésimo eslabón.

Y para definir los parámetros de eslabonamiento:

- d_i es la distancia entre los ejes Z_i y Z_{i+1} , siempre positiva y medida sobre X_{i+1} .
- α_i es el ángulo entre Z_i y Z_{i+1} , medida en la dirección positiva de X_{i+1} .

Además se tienen las siguientes variables:

- b_i es la coordenada Z_i de la intersección de los ejes X_{i+1} y Z_i . Es constante si el par es de rotación y variable si el par es prismático.
- θ_i es el ángulo entre los ejes X_i y X_{i+1} , medido en la dirección positiva de Z_i , es constante cuando el par es prismático y variable si el par es de rotación.
- Q_i es la matriz de rotación de una base a otra.
- a_i es el vector de traslación de una base a otra.

Es importante aclarar que dependiendo del autor cambian los subíndices de la nomenclatura anterior, pero la forma de construir la matriz y el vector de traslación siguen siendo los mismos.

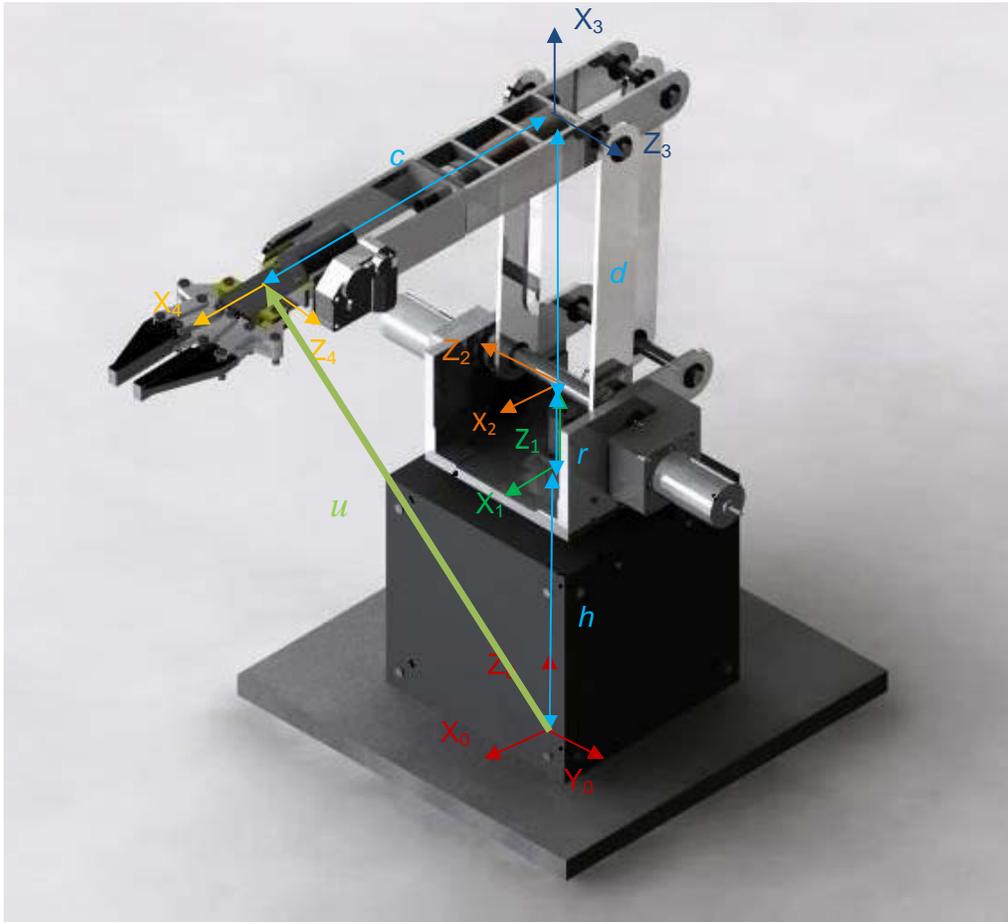


Figura 4.2 Sistemas de referencia de cada eslabón

La figura anterior muestra la configuración de los eslabones de la estructura mecánica del manipulador. De esta configuración obtenemos la siguiente tabla de parámetros:

Tabla 4.1 Parámetros de la configuración del robot

i	d_i	α_i	b_i	θ_i
1	0	90	r	0°
2	d	0	0	90°
3	c	0	0	90°

El origen del sistema de referencia se encuentra en la base, el vector \mathbf{u} resultante de este método es el que va del origen del sistema de referencia al último sistema de referencia de último eslabón es:

$$\vec{u} = \vec{a}_0 + \vec{a}_1 + Q_1 \cdot \vec{a}_2 + Q_1 \cdot Q_2 \cdot \vec{a}_3 \dots \text{(4.1)}$$

Sustituyendo en cada transformación:

$$\vec{u} = \begin{bmatrix} -c \cdot \cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2 \cdot \cos \theta_3 - d \cdot \cos \theta_1 \cdot \text{sen} \theta_2 + c \cdot \cos \theta_1 \cdot \text{sen} \theta_2 \cdot \text{sen} \theta_3 \\ -c \cdot \cos \theta_2 \cdot \cos \theta_3 \cdot \text{sen} \theta_1 - d \cdot \text{sen} \theta_1 \cdot \text{sen} \theta_2 + c \cdot \sin \theta_1 \cdot \text{sen} \theta_2 \cdot \text{sen} \theta_3 \\ h + r + d \cdot \cos \theta_2 - c \cdot \cos \theta_3 \cdot \text{sen} \theta_2 - c \cdot \cos \theta_2 \cdot \text{sen} \theta_3 \end{bmatrix} \dots \text{(4.2)}$$

Para ubicar el OT, se realiza otro análisis más exacto para su ubicación.

Las ecuaciones que componen al vector \mathbf{u} solo describen la trayectoria, a eso se le conoce como “solución de cinemática directa”, pero el verdadero problema es encontrar los parámetros que formen una configuración que ubique el último sistema de referencia en una posición determinada.

Las ecuaciones que componen a las componentes del vector \mathbf{u} están formadas por funciones trigonométricas lo que las hace difíciles de resolver.

El siguiente paso es describir una trayectoria, proponiendo un punto inicial y un punto final. Para obtener la trayectoria es necesario calcular las variables de cada ecuación, además de ajustar la forma en la que se moverá de acuerdo a un perfil en el tiempo. A lo anterior se le llama “solución cinemática inversa”, cabe mencionar que hay muchas formas de solucionar la cinemática inversa y que la dificultad de resolver las ecuaciones depende de la configuración y el número de grados de libertad del robot.

En este caso se estudia una trayectoria de una línea recta, se proponen las siguientes ecuaciones lineales de una trayectoria recta de forma paramétrica:

$$\begin{aligned} x &= x_1 + (x_2 - x_1) \cdot P(t) \\ y &= y_1 + (y_2 - y_1) \cdot P(t) \quad 0 \leq P(t) \leq 1 \dots \text{(4.3)} \\ z &= z_1 + (z_2 - z_1) \cdot P(t) \end{aligned}$$

Donde $P(t)$ es la función en parámetros del tiempo que describe el perfil de trayectoria, en este caso se usa un polinomio de 5 grado, cuyo dominio va de “0” a “1”.

$$P(t) = b_0 + b_1t + b_2t^2 + b_3t^3 + b_4t^4 + b_5t^5 \dots \text{(4.4)}$$

De la ecuación (4.3) hay 5 incógnitas y 1 sola ecuación, para resolver este sistema se obtiene $P'(t)$ y $P''(t)$, además de establecer condiciones iniciales y finales para la trayectoria, donde la velocidad y la aceleración al principio y al final son nulas.

$$\begin{aligned}
 P'(t) &= b_1 + 2b_2t + 3b_3t^2 + 4b_4t^3 + 5b_5t^4 \dots \text{(4.5)} \\
 P''(t) &= 2b_2 + 6b_3t + 12b_4t^2 + 20b_5t^3 \dots
 \end{aligned}$$

Para $t = 0$;
 $P(0) = 0 = b_0$

Para $t = t_f$;

$P'(0) = 0 = b_1$

$P(t_f) = P_{max} = 1$

$P''(0) = 0 = 2b_2 \rightarrow b_2 = 0$

Resolviendo el sistema de ecuaciones las tres primeras constantes son igual a cero, y el valor de las tres constantes que quedan son:

$$b_3 = \frac{10}{t_f^3}, \quad b_4 = \frac{-15}{t_f^4} \quad \text{y} \quad b_5 = \frac{6}{t_f^5}$$

Sustituyendo el valor de las constantes en (4.4) tiene la siguiente ecuación del perfil con respecto al tiempo:

$$P(t) = \frac{6t^5}{t_f^5} - \frac{15t^4}{t_f^4} + \frac{10t^3}{t_f^3} \dots \text{(4.6)}$$

Sustituyendo cada una de las ecuaciones obtenidas, se encuentra el siguiente perfil de trayectoria:

$$\begin{aligned}
 u_x = x(t) &= x_1 + (x_2 - x_1) \left(\frac{6t^5}{t_f^5} - \frac{15t^4}{t_f^4} + \frac{10t^3}{t_f^3} \right) \\
 u_y = y(t) &= y_1 + (y_2 - y_1) \left(\frac{6t^5}{t_f^5} - \frac{15t^4}{t_f^4} + \frac{10t^3}{t_f^3} \right) \dots \text{(4.7)} \\
 u_z = z(t) &= z_1 + (z_2 - z_1) \left(\frac{6t^5}{t_f^5} - \frac{15t^4}{t_f^4} + \frac{10t^3}{t_f^3} \right)
 \end{aligned}$$

Las ecuaciones en (4.7) representan la posición de un punto con respecto a un tiempo determinado, pero todavía es necesario relacionar las variables θ_1 , θ_2 y θ_3 con una posición determinada. Para obtener el valor de las variables θ_1 , θ_2 , y θ_3 se utiliza un método numérico. Se usó el programa comercial para calcular las ecuaciones de posición, además el programa cuenta con un modulo de Newton-Rahpson que se puede usar para obtener dichos valores. Los resultados pueden ser simulados en la interfaz grafica del programa, simulando la trayectoria del efector, así como el comportamiento de los eslabones.

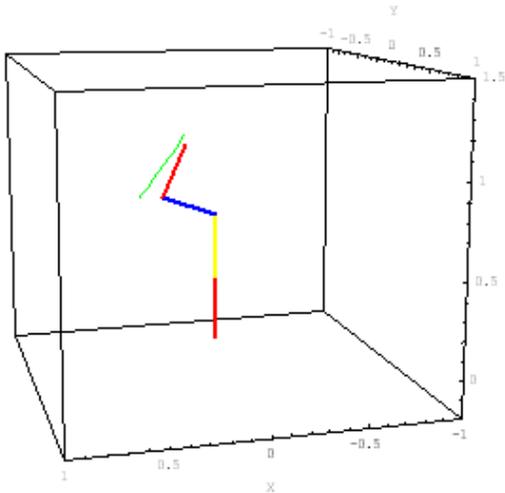


Figura 4.3 Simulación de trayectoria punto inicial

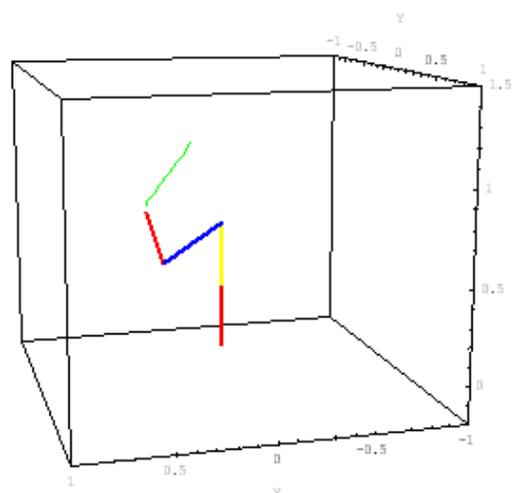


Figura 4.4 Simulación de trayectoria punto final.

Las figuras 4.3 y 4.4 corresponden a la simulación de la trayectoria hecha en Matemática. Las líneas gruesas de colores corresponden a cada uno de los eslabones que se forman a partir de los ejes de referencia, la línea delgada verde representa la trayectoria del efector final.

4.2 Análisis de Esfuerzos y Dimensionamiento de los Eslabones

El las dimensiones de los eslabones del manipulador dependen de los esfuerzos a los que son sometidos, el material con el que son construidos y del espacio de trabajo que debe cubrir el robot. Los eslabones del robot en un principio ya tienen una forma definida, por lo tanto la forma del robot de seguir con una línea parecida a la anterior, en su construcción. Con la ayuda de un programa de CAD se definió una nueva forma para cada una de las partes del robot de acuerdo con la configuración seleccionada en el capítulo anterior. Con una configuración aproximada a la del robot y con la flexibilidad del programa de CAD se realizó el análisis de esfuerzos a los que son sometidos cada eslabón.

Los eslabones que componen al robot tienen la siguiente forma:

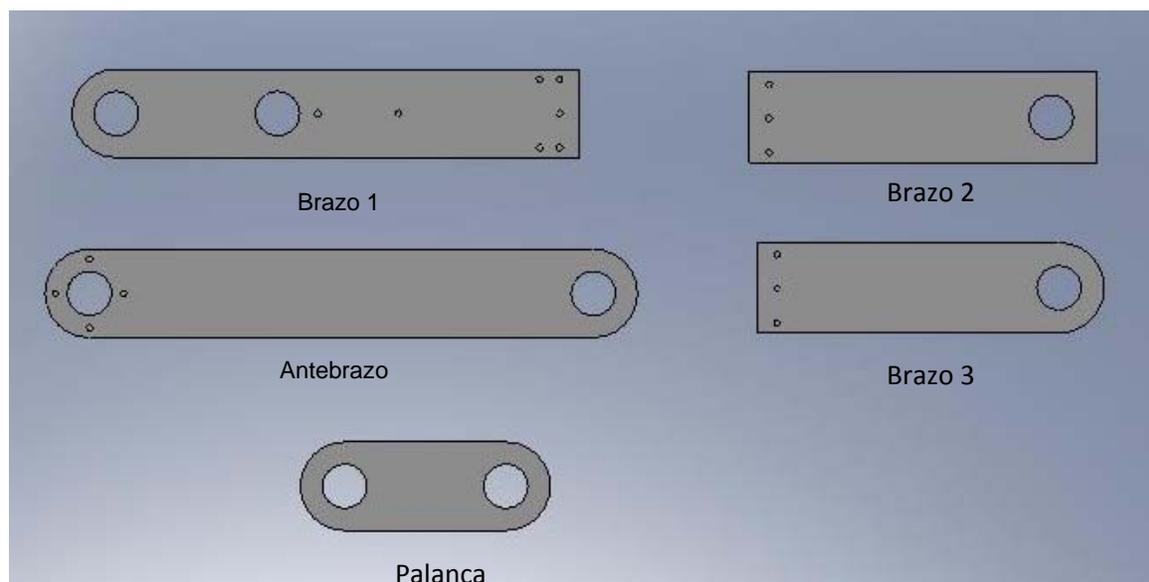


Figura 4.5 Tipo de eslabones que conforman el brazo del robot

4.2.1 Análisis de Esfuerzos

En la configuración anterior, la mayoría de las articulaciones no tenían ningún elemento que evite el contacto directo entre eslabón y el eje que forma la articulación, por lo que se presentaba un problema de fricción, para resolver este problema se colocó un rodamiento entre cada unión formada por un eslabón con su respectivo eje. Para ser congruentes con el análisis de trayectoria se considera a los eslabones como cuerpos rígidos y homogéneos.

Las partes más críticas que se presentan en la forma de los eslabones es en cada extremo, debido a que los barrenos donde van colocados los rodamientos y por su forma redondeada funcionan como concentradores de esfuerzos, los rodamientos de cada articulación tienen un diámetro de 22 [mm], para dimensionar un eslabón se usará el siguiente criterio²²:

$$D = 0.483 \cdot w \dots \textbf{(4.8)}$$

D : diámetro del orificio

w : ancho de la barra donde se maquina el orificio

El caso que se toma en cuenta es el más crítico donde el rodamiento no funcione. El ancho de los eslabones se estableció de 44 [mm].

Resulta complicado tomar en cuenta todos los factores que producen esfuerzos en la geometría de los eslabones, una buena aproximación es considerar a los eslabones como vigas de sección rectangular y además que uno de los extremos se encuentra fijo, para cada uno de los eslabones su diagrama de cuerpo libre es de la siguiente manera:

²² Joseph E. Shigley, **Diseño en Ingeniería Mecánica**, 6ª edición, Ed McGraw-Hill, pagina 133

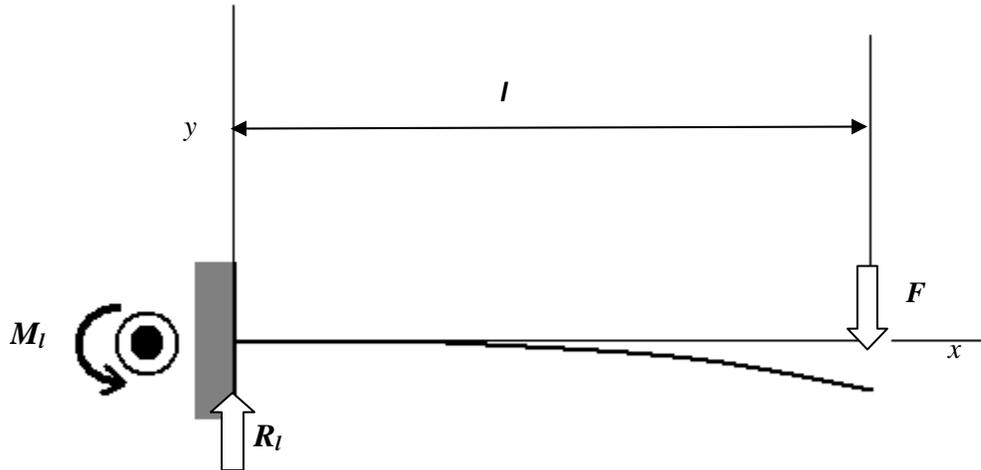


Figura 4.6 Diagrama de cuerpo libre de un viga empotrada

Para los eslabones que tienen extremos redondeados la distancia se mide de centro a centro de los barrenos, para los que tienen un extremo recto la distancia se mide desde el centro del barreno hasta el fin del eslabón.

Las ecuaciones del esfuerzo cortante máximo y del momento máximo son:

$$\begin{aligned} R_l &= V = F \\ M_l &= -Fl \end{aligned} \quad \dots(4.9)$$

Donde:

R_l es la fuerza resultante en el eje y

V es la fuerza cortante máxima

F es la fuerza que se aplica en el extremo del la viga

M_l es el momento máximo que recibe la viga

l es la longitud de la viga

4.2.1.1 Esfuerzo Normal en los Eslabones

Para calcular el esfuerzo normal que sufre la viga se usa la siguiente expresión:

$$\sigma = \frac{M}{I/c} \dots (4.10)$$

Donde:

M es el momento en la viga

I es el momento de inercia de la viga de sección rectangular

c es igual a la mínima distancia del punto de referencia al eje neutro de la viga

Para poder usar la expresión 4.10 se toman las siguientes consideraciones²³:

- La viga se somete a flexión pura; esto significa que la fuerza cortante es nula y que no hay cargas de torsión o axiales presentes
- El material es isotrópico y homogéneo
- El material cumple con la ley de Hooke
- Inicialmente la viga es recta con la sección transversal constante en toda su longitud
- La viga tiene un eje de simetría en el plano de la flexión

²³ Joshep E. Shigley, **Diseño en Ingeniería Mecánica**, 6ª ed, Ed MacGraw-Hill, página 112

- Las proporciones de la viga son tales que fallaría en flexión, en vez de fallar por aplastamiento, corrugación o alabeo lateral
- Las secciones transversales de la viga permanecen planas durante la flexión

Despejando el valor de I y de c correspondiente para vigas de sección rectangular en la ecuación 4.10 se obtiene:

$$\sigma = \frac{6M}{bh^2} \dots (4.11)$$

Donde:

M es el momento máximo sobre la viga

b es el ancho de la viga

h es la altura de la viga

En un principio el ancho de los eslabones es de 3 [mm], con una altura de 30 [mm], el ancho corresponde a un ancho comercial de solera de aluminio. Para el ancho de los eslabones se usarán un valor de 5 [mm] que es un valor comercial de solera. Por el momento no se ha determinado el material con el que se construirán los nuevos eslabones, eso se verá en el siguiente punto.

Tabla 4.2 Dimensiones del los eslabones del brazo del robot para su nueva configuración

Tipo de eslabón	Ancho (b [m])	Altura (h [m])	Largo [m]
Antebrazo	0.005	0.044	0.25
Brazo 1	0.005	0.044	0.23
Palanca	0.005	0.044	0.08
Brazo 2	0.005	0.044	0.15
Brazo 3	0.005	0.044	0.15

Con las dimensiones que se muestran en la tabla anterior y estimando una carga de prueba a la que estarán sometidos cada eslabón de 25 [N] se obtiene lo siguiente:

Tabla 4.3 Cálculo del esfuerzo normal para cada eslabón

Tipo de eslabón	Carga [N]	Momento correspondiente a la carga[Nm]	Esfuerzo Normal σ [MPa]
Antebrazo	25	6.25	3.874
Brazo 1	25	5.75	3.564
Palanca	25	2	1.240
Brazo 2	25	3.75	2.324
Brazo 3	25	3.75	2.324

4.2.1.2 Esfuerzo Cortante en los Eslabones

El esfuerzo cortante máximo (τ_{\max}) para una viga de sección rectangular es:

$$\tau_{\max} = \frac{3V}{2A} \dots (4.12)$$

Donde:

V es la fuerza cortante máxima

A es el área de la sección rectangular

De las ecuaciones 4.9 el cortante máximo es:

$$V = F \dots (4.13)$$

Sustituyendo los valores correspondientes para cada eslabón en la ecuación 4.12 se obtiene:

Tabla 4.4 Cálculo del esfuerzo cortante para cada eslabón

Tipo de eslabón	Fuerza Cortante Máxima $V [N]$	Área del eslabón [m^2]	Esfuerzo Cortante Máximo $\tau_{max} [MPa]$
Antebrazo	25	0.0110	0.00341
Brazo 1	25	0.0101	0.00371
Palanca	25	0.0035	0.01065
Brazo 2	25	0.0066	0.00568
Brazo 3	25	0.0066	0.00568

4.2.2 Selección del Material de los eslabones

En la primera configuración del robot, el material de los eslabones era una aleación de aluminio. Para la nueva estructura mecánica se verificó si la aleación de aluminio 6063 en solera comercial con un espesor de 5 [mm], resistiera los esfuerzos y cargas presentadas durante la operación de la máquina.

Se espera que el aluminio cumpla con los siguientes puntos:

- El peso, se requiere que las piezas sean lo más ligero posible
- La resistencia del material, el material debe soportar las cargas y esfuerzos a los que estará sometido durante su funcionamiento

Para el aluminio 6063 con un esfuerzo limite a la cedencia de 48 [MPa]²⁴, el máximo esfuerzo calculado es de 3.874 [MPa] (soportado por el antebrazo).

Tabla 4.5 Características del material seleccionado

Material	Esfuerzo de cedencia [MPa]	Mayor esfuerzo de los eslabones [MPa]	Factor de Seguridad
Aleación de aluminio 6063	48	3.874	12.4

La tabla 4.5 se muestra el factor de seguridad de 12.4 demostrando que el material cumple con la condición de resistencia. El aluminio se puede considerar adecuado

Cabe mencionar que se consideraran a las deformaciones de los eslabones cuando se les aplique la carga serán despreciables, pero esto no quiere decir que no ocurrirán, como el robot únicamente funcionará de manera demostrativa la consideración anterior es valida, en caso que la función del robot fuera otra y

²⁴M.F. Spotts, **Proyecto de Elementos de Máquinas**, Ed Reverte, 1966, Tabla 14-15, página 667

requiera de una determinada precisión o cambiarán las condiciones de operación es necesario realizar una estimación de las deformaciones de cada pieza del robot, por lo que se podría determinar otro material para la estructura del robot.

4.3 Diseño del Órgano Terminal

En el capítulo anterior se seleccionaron dos diferentes propuestas para el OT del robot, se realizó un diseño con la ayuda de un programa de CAD combinando las propuestas 2 y 7(ver capítulo 3). El resultado es un dispositivo similar al usado en algunos robots pequeños.

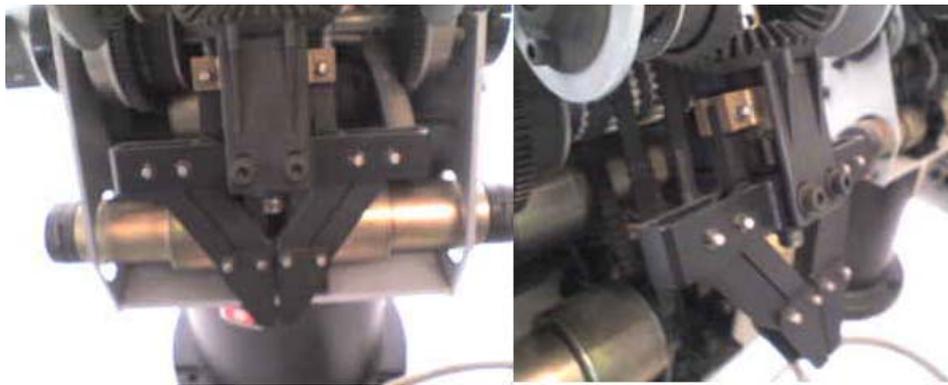


Figura 4.7 OT que usan un mecanismo similar

El diseño resultante es el que se muestra en la figura 4.8.

4.3.1 Análisis de Fuerzas en el OT

Los efectores del tipo pinza pueden sostener objetos de dos formas, apretando la pieza con fuerza o con la fuerza de fricción entre los dedos y el objeto, tal y como se espera que funcione el diseño obtenido para el OT.

El principal parámetro de diseño para el OT es su capacidad de desplazar un objeto de un lugar a otro. La capacidad del efector determina que tan robusto debe de ser el manipulador. Un dispositivo de este tipo, con una estructura muy reforzada, tendrá mayor capacidad de mover objetos, aunque resulta más complicado moverlo.

Para obtener la capacidad de la pinza con relación a la masa de los cuerpos que puede mover se realizó el análisis de fuerzas involucradas:

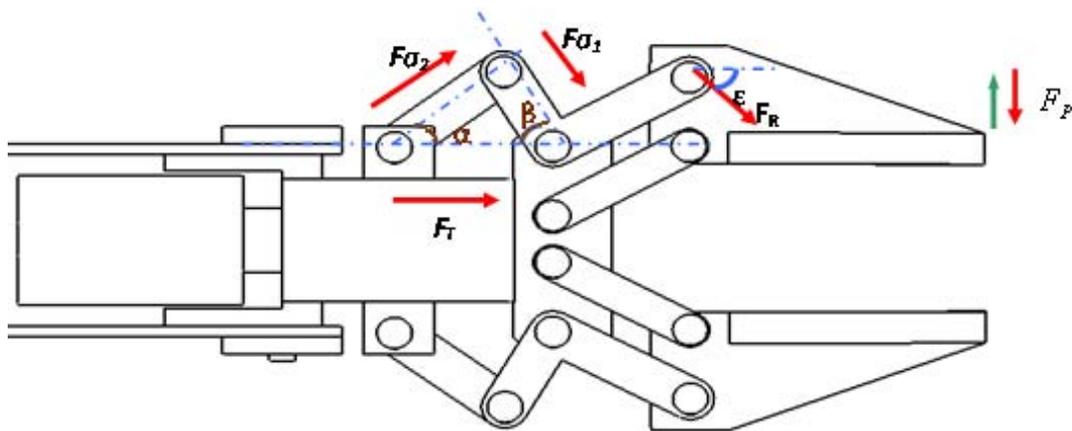


Figura 4.8 Diagrama de fuerzas involucradas en el cierre del OT

Del análisis de fuerzas se observa que la fuerza del tornillo necesaria para el cierre y la apertura es $\vec{F}_T = \vec{F}a_2 + \vec{F}a_1$. La fuerza del tornillo \vec{F}_T es una fuerza horizontal; resolviendo la suma de vectores e igualando los términos de cada componente, se obtiene una relación entre la magnitud de la fuerza del tornillo y estas dos fuerzas. Las ecuaciones de las fuerzas de las barras en función de la fuerza del tornillo:

$$\left| \vec{F}a_2 \right| = \frac{\left| \vec{F}_T \right| \text{Sen}\beta}{\text{Cos}\alpha \text{Sen}\beta + \text{Sen}\alpha \text{Cos}\beta} \dots (4.14)$$

$$\left| \vec{F}a_1 \right| = \frac{\left| \vec{F}_T \right| \text{Sen}\alpha}{\text{Cos}\alpha \text{Sen}\beta + \text{Sen}\alpha \text{Cos}\beta} \dots (4.15)$$

Del diagrama de la figura 4.8 se puede analizar lo que sucede con los dedos al momento de cerrar la pinza; se transmite una fuerza resultante F_r la cual cierra la pinza, cuya componente en el eje de cierre nos proporciona el valor de la fuerza con la que cerrarán los dedos.

De este esquema resulta un diagrama de cuerpo libre de las fuerzas que intervienen al momento de abrir o cerrar. Al elegir en la configuración de la barra a_1 , un ángulo recto, la fuerza F_{a1} no tiene ningún efecto sobre la fuerza F_r , es decir, no se transmite, por lo tanto la podemos descartar en el análisis.

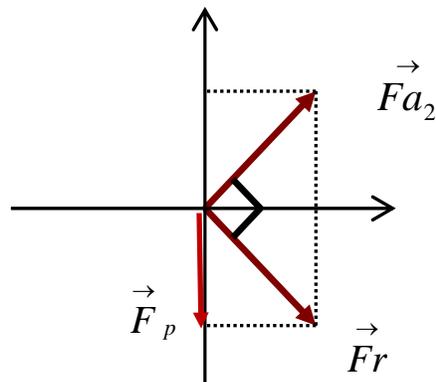


Figura 4.9 Diagrama de Cuerpo Libre de

Debido al ángulo recto de la barra a_1 , se puede considerar que la fuerza \vec{F}_r es normal a la fuerza \vec{F}_{a_2} , y de la misma magnitud, ya que la fuerza \vec{F}_{a_1} no se transmite y además de que $\varepsilon = \alpha - \frac{\pi}{2}$.

Para el caso en el que el efector se abre, realizando el mismo análisis al cierre y se llegará al mismo resultado:

$$F_P = F_{a_2} \text{Sen}\left(\alpha - \frac{\pi}{2}\right) \dots (4.16)$$

La ecuación 4.16 muestra la fuerza de cierre de la pinza es solamente dependiente de la componente vertical de la fuerza que le transmite del tornillo a la barra a_2 .

Lo siguiente es determinar la relación que hay entre F_P y la fuerza de fricción entre los dedos y el objeto que se sujeta por lo que se utiliza la siguiente expresión:

$$\mu \eta_f F_g = W \cdot g \dots (4.17)$$

Donde:

μ es el coeficiente de fricción entre la superficie del dedo del OT y la superficie del objeto que se esta manipulando

η_f es el número de dedos del OT

F_g es la fuerza con la que el OT toma el objeto

g es el factor de no deslizamiento entre el objetos y los dedos. Este factor puede tomar los valores de:

$g = 2$; si la aceleración se aplica de forma horizontal.

$g = 3$; si la aceleración se aplica en sentido contrario a la gravedad.

Para obtener la torción que necesita el tornillo para sujetar el objeto en función de su peso, se utiliza el análisis de fuerzas realizado anteriormente y la ecuación de sujeción (4.17). Igualando las fuerzas con la que cierra la pinza con F_g resulta la siguiente relación:

$$\vec{F}_g = \vec{F}_p$$

$$F_T = \frac{W \cdot g (\cos\alpha \sin\beta + \sin\alpha \cos\beta)}{\mu \eta_f \sin\left(\alpha - \frac{\pi}{2}\right)} \dots (4.18)$$

De ecuación anterior se puede despejar W que es peso del objeto;

$$W = \frac{F_T \left(\mu \eta_f \sin\left(\alpha - \frac{\pi}{2}\right) \right)}{g (\cos\alpha \sin\beta + \sin\alpha \cos\beta)} \dots (4.19)$$

Para este dispositivo usará un motoreductor marca Globe Motors, modelo E-2135, en su hoja de datos indica que su torque puede ser de hasta 130 [Ncm]. Con el dato anterior y usando la siguiente ecuación²⁵:

²⁵ Robert E. Shigley, **Diseño en Ingeniería Mecánica**, 6ª ed, Ed McGraw-Hill, página 460

$$F_T = \frac{2T}{d_m \left(\frac{l + \pi \cdot f \cdot d_m}{\pi \cdot d_m - f \cdot l} \right)} \dots (4.20)$$

Donde:

T es la torsión que proporciona el motor

l es el paso del tornillo

f es la fricción entre el tornillo y la rosca

d_m es el diámetro medio del tornillo

El tornillo seleccionado como actuador es de 3/8 de pulgada serie fina UNF de 24 hilos por pulgada. El tornillo se construirá de acero convencional y la rosca será hecha con Nylon, por lo que el coeficiente de fricción entre ambos materiales es de²⁶ 0.24

En la siguiente tabla se muestran los datos y la fuerza resultante, se considera el torque máximo del que puede dar el motor de 130 [Ncm] y otro troque aproximado de 100 [Ncm].

Tabla 4.6 Fuerza Transmitida por el motor

Torque del motor [N.cm]	Paso del Tornillo l[cm]	Diámetro medio del Tornillo d_m [cm]	Coficiente de Fricción f	Fuerza Transmitida por el Tornillo F_T [N]
130	0.10533	0.9525	0.24	983.50
100	0.10533	0.9525	0.24	756.54

²⁶ Ernest Rabinowicz, **Friction and Wear Materials**, 2^a ed. Ed Wiley-Interscience, 1995, página 118.

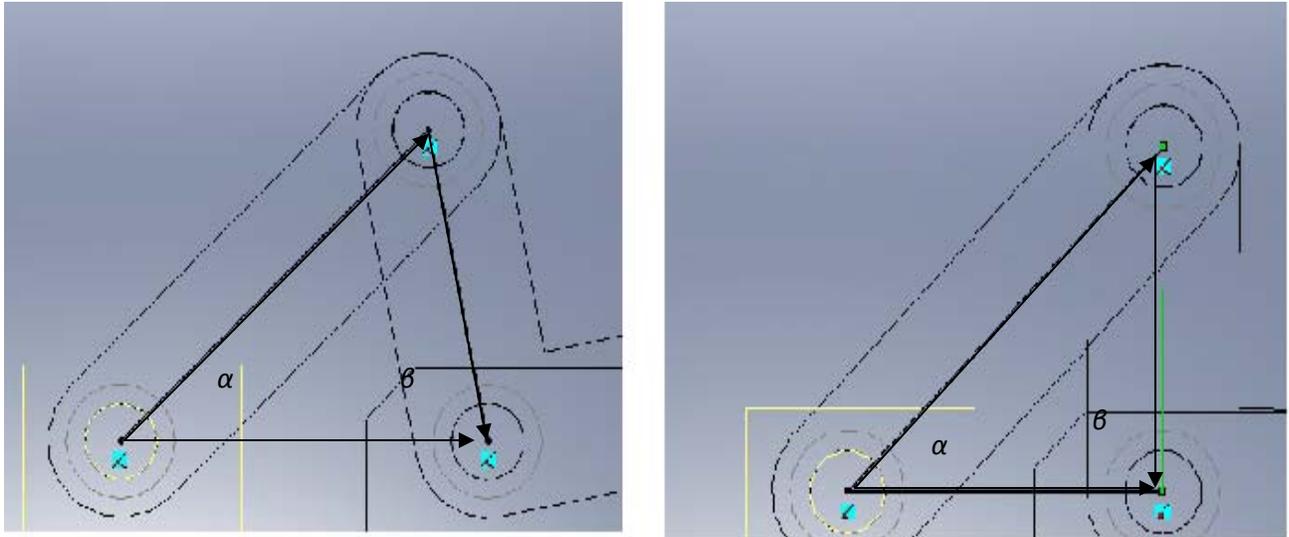


Figura 4.10 Relación entre α y β

Para usar la ecuación 4.19 es necesario encontrar una relación entre el ángulo α y el ángulo β , con la ayuda del diseño en CAD se estableció una relación directa entre α y β .

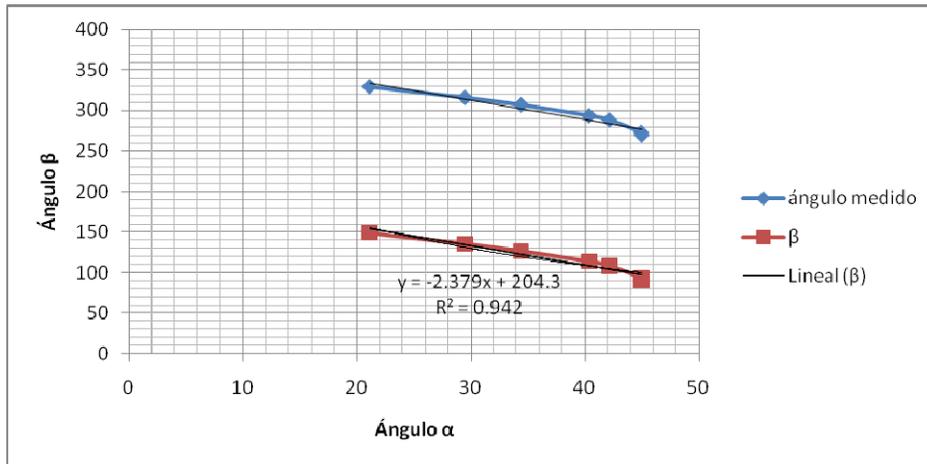


Figura 4.11 Relación entre α y β

La ecuación que describe la relación entre α y β es :

$$\beta = 2.379\alpha - 24.4 \dots \text{(4.21)}$$

Con esta relación se usa la ecuación 4.20 y se obtiene la siguiente tabla:

Tabla 4.7 Peso que robot puede Manipular

F_{T1} [N]	F_{T2} [N]	μ	η_f	g	α	β	W_1 [N]	W_2 [N]
756.54	983.50	0.3	2	3	20	156.7	164.71	214.12
756.54	983.50	0.3	2	3	25	144.8	702.68	913.48
756.54	983.50	0.3	2	3	30	132.9	109.96	142.95
756.54	983.50	0.3	2	3	35	121.0	174.93	227.41
756.54	983.50	0.3	2	3	40	109.1	39.85	51.80
756.54	983.50	0.3	2	3	45	90.0	1456.95	1894.04

F_{T2} Fuerza transmitida por el por el tornillo a 130 [Ncm]

μ Coeficiente de fricción entre los dedos y el objeto

η_f Número de dedos en contacto con el objeto

α Ángulo de la barra a_1

β Ángulo de la barra a_2

W_1 Masa que puede sostener el objeto cuando se trasmite F_{T1}

W_2 Masa que puede sostener el objeto cuando se trasmite F_{T2}

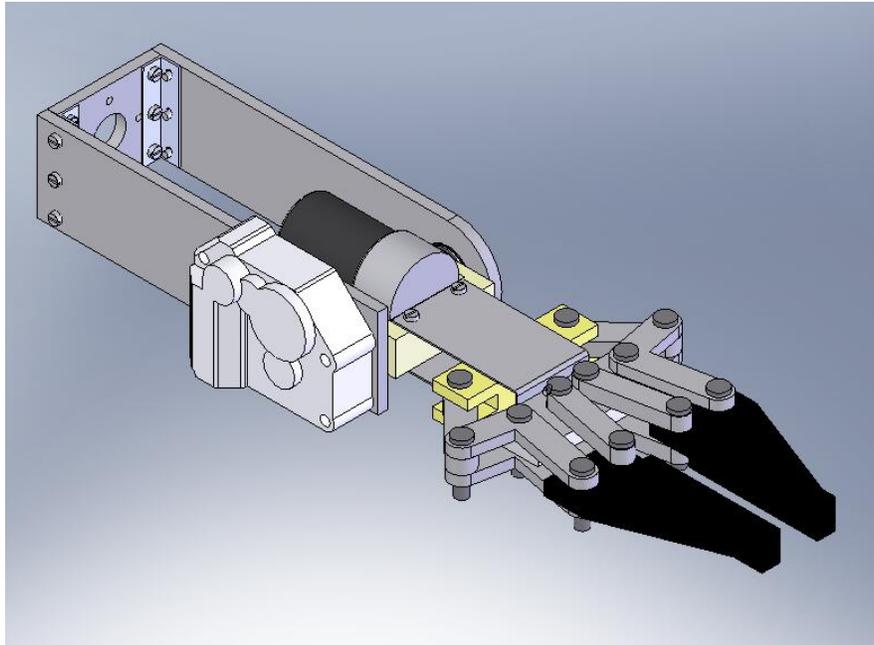


Figura 4.12 OT diseñado con el programa de CAD

4.3.2 Análisis de esfuerzos en el OT

El peso de un objeto que el manipulador puede sostener depende de la estructura del OT. Una estructura ligera tiene la ventaja de no forzar a los actuadores del manipulador, pero sus partes no podrán soportar mucha carga y por lo consiguiente el objeto que sostendrá no será muy pesado. Una estructura robusta puede soportar mayores cargas, pero se convierte en una desventaja, los actuadores deben cargar el peso del objeto y el peso del OT. Es necesario establecer un punto medio entre el peso de la estructura y la su capacidad de de sostener un objeto. Para este caso el material con el que se construirá el OT es

aluminio por su ligereza y resistencia, para determinar una capacidad de carga para este dispositivo del robot es necesario realizar un análisis de esfuerzos para cada uno de los componentes. El análisis se realizará como en el punto 4.2 del presente capítulo tomando las mismas consideraciones para cada uno de los eslabones que componen al OT.

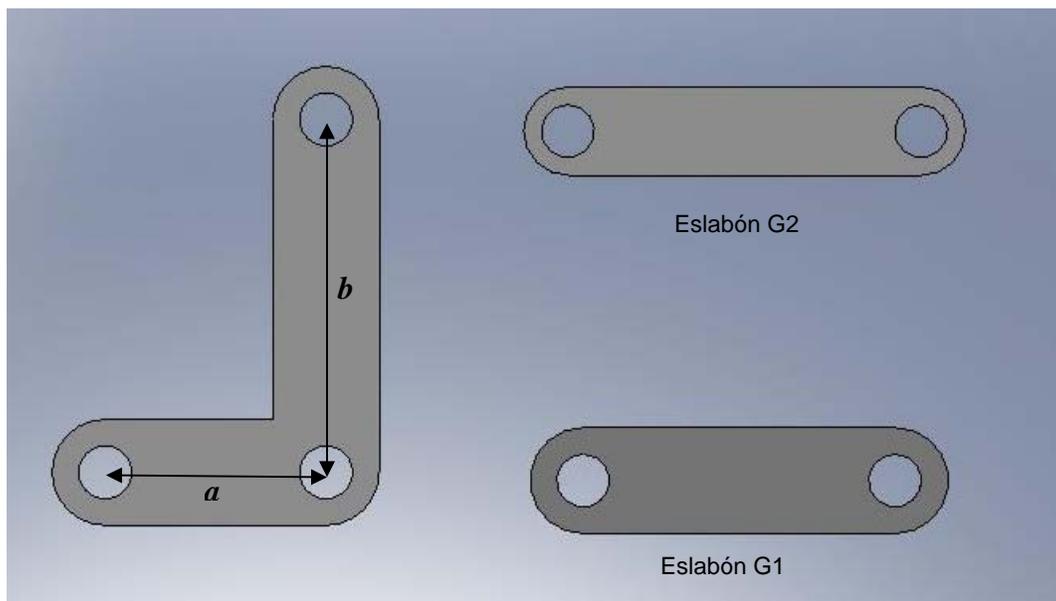


Figura 4.13 Eslabones que conforman el OT

En la figura 4.13 muestra la forma de los eslabones del OT, en la siguiente tabla se muestran las características de cada uno de ellos, el eslabón con forma de escuadra se realizan dos estudios para cada una de las secciones (a y b).

Tabla 4.8 Características de los eslabones del OT

Tipo de eslabón	Ancho [m]	Largo [m]	Alto [m]
Escuadra a	0.005	0.025	0.012
Escuadra b	0.005	0.040	0.012
Eslabón G1	0.007	0.03535	0.012
Eslabón G2	0.007	0.040	0.012

Aplicando la ecuación 4.11 para este caso obtenemos:

Tabla 4.9 Esfuerzos de cada uno de los eslabones del OT

Tipo de eslabón	Carga de prueba [N]	Momento máximo [N.M]	Esfuerzo Normal σ [MPa]
Escuadra a)	0.005	0.0003000	0.00250
Escuadra b)	0.005	0.0004800	0.00400
Eslabón G1	0.007	0.0004242	0.00253
Eslabón G2	0.007	0.0004800	0.00286

Comparando con la resistencia del material (aluminio 6063):

Tabla 4.10 Comparación de resistencia del material con la resistencia del material

Tipo de eslabón	Esfuerzo de cedencia [MPa]	Esfuerzo en cada eslabón [MPa]	Factor de Seguridad
Escuadra a)	50	0.00250	20000
Escuadra b)	50	0.00400	12500
Eslabón G1	50	0.00253	19802
Eslabón G2	50	0.00286	17500

4.3.2.1 Análisis de esfuerzos en la Lámina el OT

El elemento más crucial de todo el dispositivo es la lámina doblada que forma parte de la estructura del OT. El estudio del comportamiento de esta parte durante la aplicación de una carga resulta muy complicado por su geometría. Para esta pieza en particular se realizará un análisis de método de elemento finito, este estudio únicamente servirá como una referencia de las posibles deformaciones de la pieza y cabe aclarar que no se tomarán los resultados como definitivos. Los resultados del estudio únicamente abarcarán las deformaciones y esfuerzos que sufre la pieza, no se buscará la optimización de las dimensiones de la pieza ni tampoco del tamaño de malla usada para discretizar la lámina, se considera al material como isotrópico.

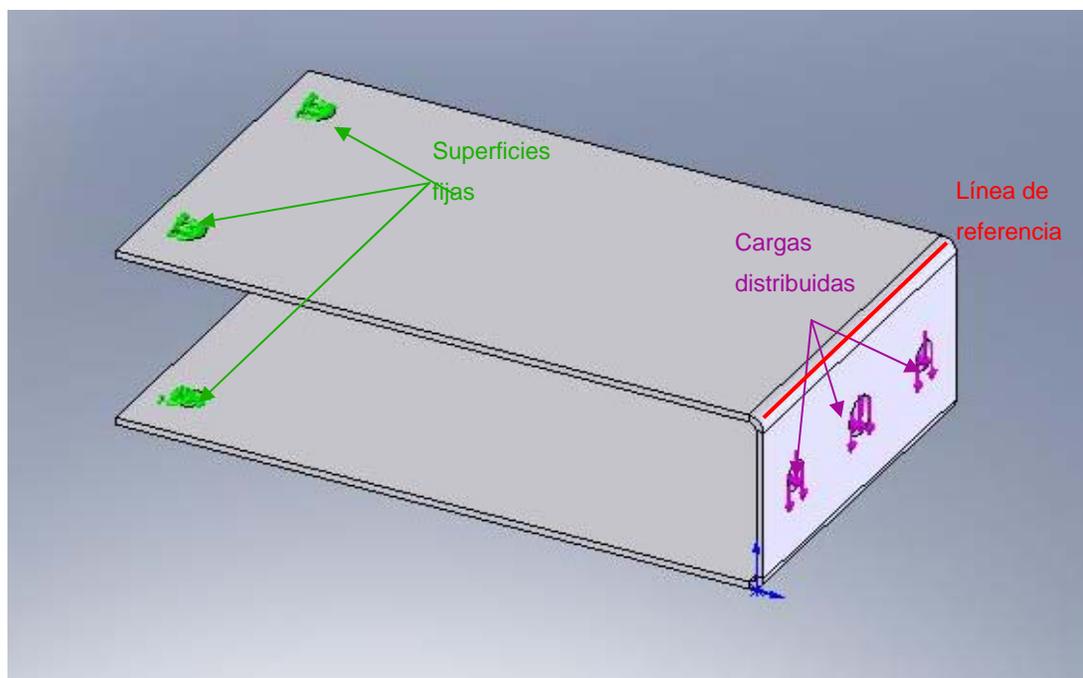


Figura 4.14 Lámina del OT

Las superficies fijas corresponden a los barrenos de los tornillos que unen a la lámina con la siguiente pieza donde se encuentra el tornillo y el motor, son un total de cuatro barrenos. Las cargas distribuidas se encuentran en los barrenos que unen la lámina con una placa que sostiene el peso del objeto. La deformación más crítica es la del extremo de la lámina que sostiene la carga y que no esta fija. Se considera una deformación aceptable de $1[mm]$ de la línea de referencia con respecto al eje y .

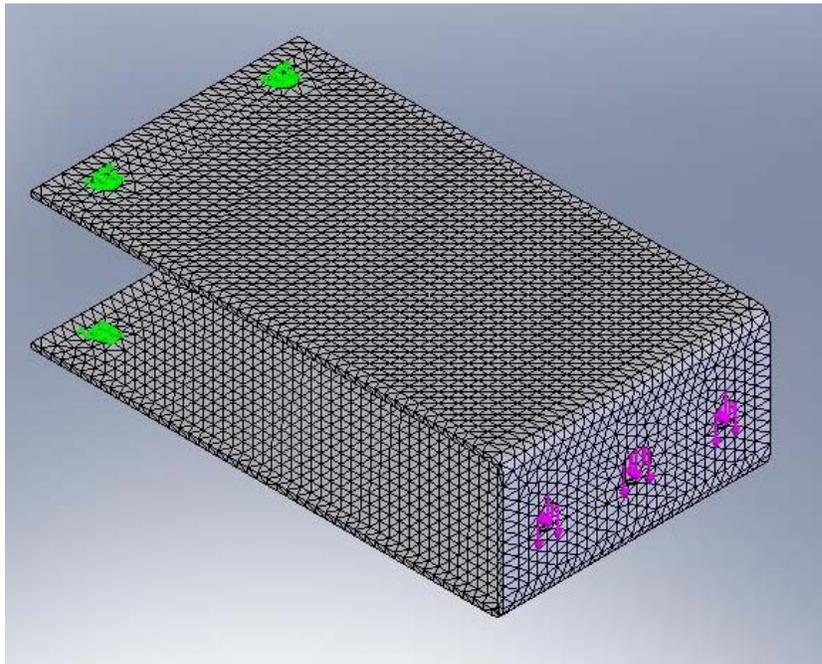


Figura 4.15 Mallado de la pieza

Las características de la malla son $1.34239 [mm]$ de tamaño global de celda con una tolerancia de $0.0671194 [mm]$ (el análisis se realizó con el módulo de elemento finito de un CAD comercial). El material que se estableció para la pieza es de acero al bajo carbono no aleado.

Material Detalles	
Nombre de estudio	Estudio 1 (-Predeterminado-)
EX	2.1E+011 N/m ²
NUXY	0.28
GXY	7.9E+010 N/m ²
DENS	7800 kg/m ³
SIGXT	3.9983E+008 N/m ²
SIGYLD	2.2059E+008 N/m ²
ALPX	1.3E-005 /Kelvin
KX	43 W/(m.K)
C	440 J/(kg.K)

Figura 4.16 Características del Material establecidas por el programa COSMOSWork

Los resultados de las cargas fueron:

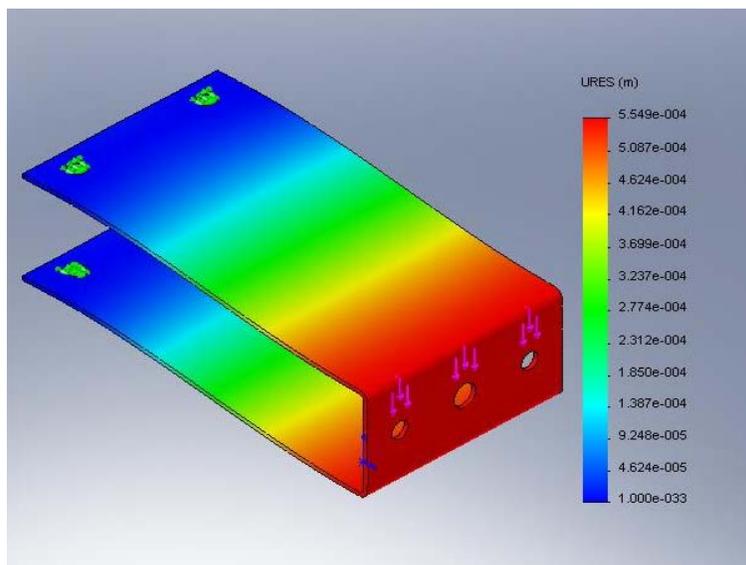


Figura 4.17 Vista isométrica de las deformaciones resultantes

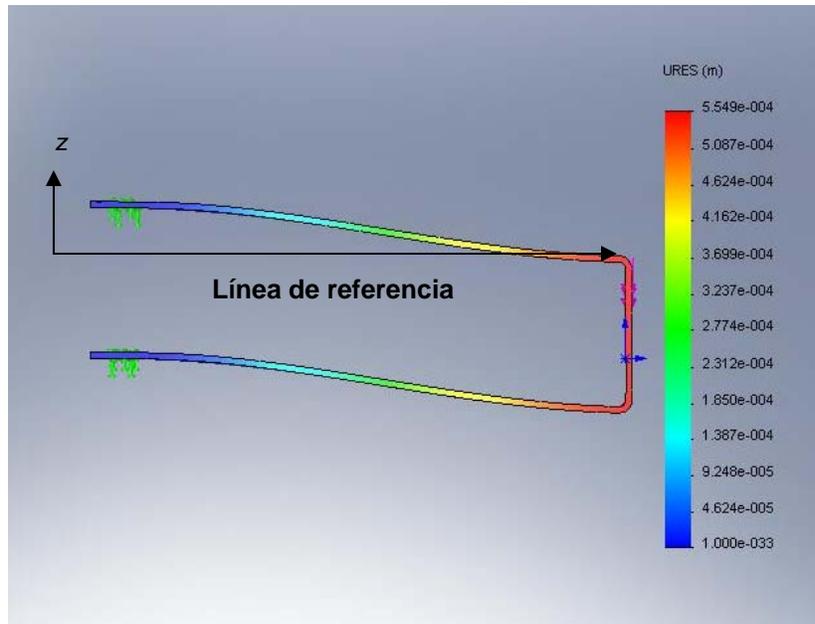


Figura 4.18 Vista frontal de las deformaciones resultantes

La deformación mayor que se obtuvo con la carga de 5 [N] con respecto a la línea de referencia es de 5.54×10^{-4} [m], es decir medio milímetro, una deformación aceptable para la pieza. Los esfuerzos de la pieza son:

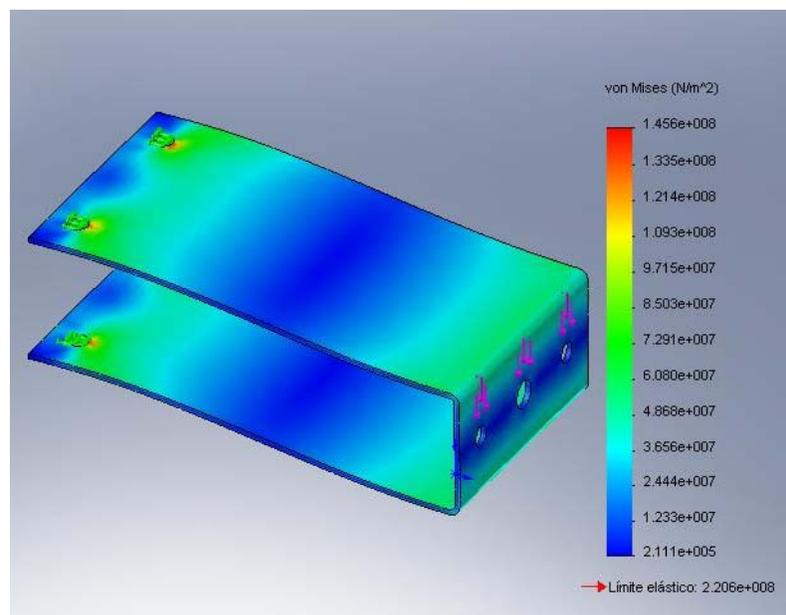


Figura 4.19 Esfuerzos de la pieza

Los esfuerzos máximos aparecen en los barrenos de la lámina, y son de $1.456 \times 10^8 \text{ [N/m}^2\text{]}$ y el límite elástico de la pieza es de $2.206 \times 10^8 \text{ [N/m}^2\text{]}$. El criterio para establecer los esfuerzos cortantes es el de VonMises.

4.3.3 Análisis para Determinar el Peso que puede manipular el OT

Reuniendo la información hecha en los estudios anteriores se establece el límite de carga del OT de 0.5 [kg] . La restricción corresponde a la estructura del dispositivo.

4.4 Análisis de los Momentos del robot

El brazo del robot cuando se mueve provoca fuerzas y momentos que sacan de balance al resto de la estructura del robot, además se deben seleccionar los actuadores del robot de acuerdo con las cargas que puede manipular el robot. Se realizará un estudio estático de los momentos y fuerzas sobre la estructura del robot en posiciones consideradas críticas. El objetivo de este estudio es determinar el peso de la base del robot y además determinar el torque de los actuadores.

En la siguiente figura se muestra el diagrama de cuerpo libre para la primera posición crítica del robot:

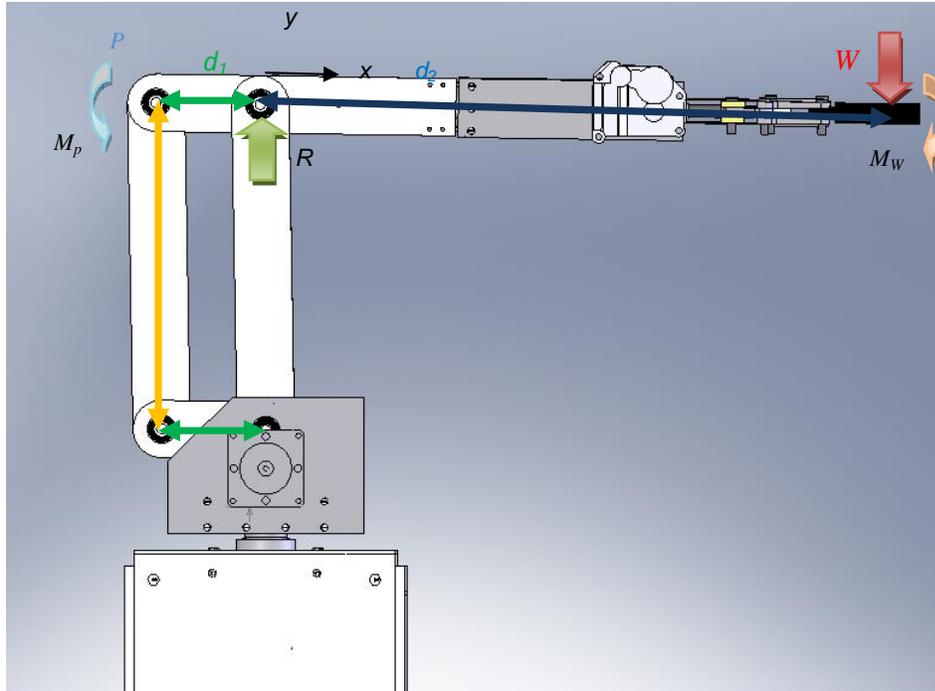


Figura 4.20 Diagrama de cuerpo libre en la posición 1

Las ecuaciones del diagrama de cuerpo libre para la posición 1 son:

$$\sum F_x = R - W - P = 0$$

... (4.22)

$$; R = W + P$$

$$\sum M = d_1 P - d_2 W = 0$$

$$d_1 P = d_2 W$$

... (4.23)

$$; P = \frac{d_2}{d_1} W$$

Sustituyendo en las ecuaciones anteriores:

Tabla 4.11 Fuerza y momentos en la posición crítica 1

W [kg]	W [N]	$d1$ [cm]	$d2$ [cm]	M_w [Ncm]	M_p [Ncm]	P [N]	R [N]	R [kg]
0.5	4.91	8	35	171.68	171.68	21.46	26.36	2.69

La segunda posición crítica es cuando el brazo se encuentra estirado a su máximo:

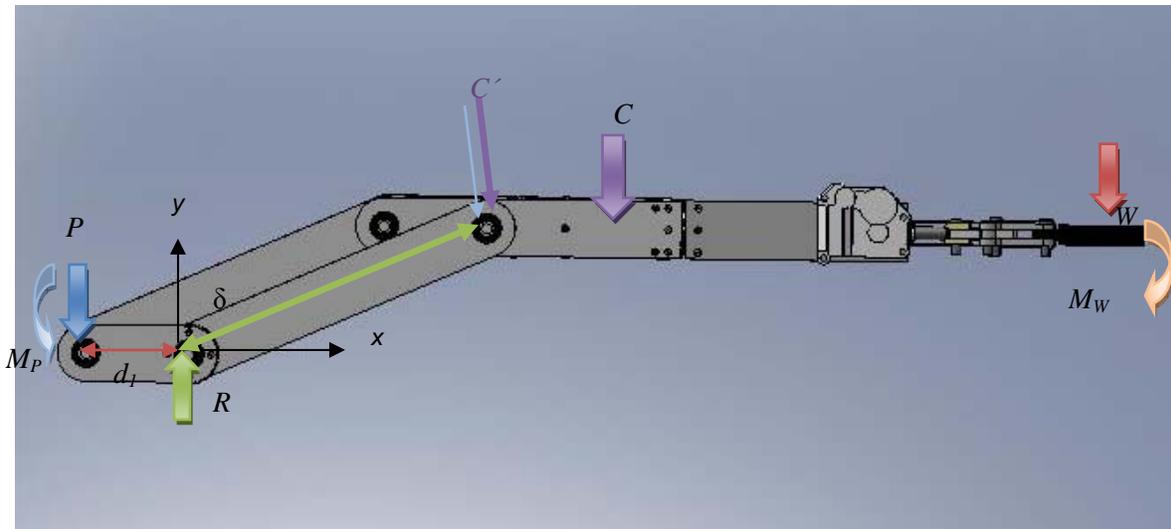


Figura 4.21 Posición Crítica 2

Las ecuaciones de este diagrama de cuerpo libre son iguales a las ecuaciones 4.22 y 4.23 La fuerza que provoca el momento es la componente del W que es perpendicular al vector que va del origen al punto medio de las pinzas del robot y que su magnitud es de d_2 . Sabiendo que el ángulo δ es de 90° obtenemos:

Tabla 4.12 Momentos y Fuerzas para la posición 2

W [kg]	W [M]	W' [M]	d1 [cm]	d2 [cm]	Mw [N.cm]	Mp [N.cm]	P [N]	R [M]	R [kg]
0.5	4.905	4.84	8	25	121	121	15.125	19.965	2.04

Falta calcular el momento del que es necesario para hacer girar el hombro y el brazo del robot el diagrama de cuerpo libre es el siguiente:

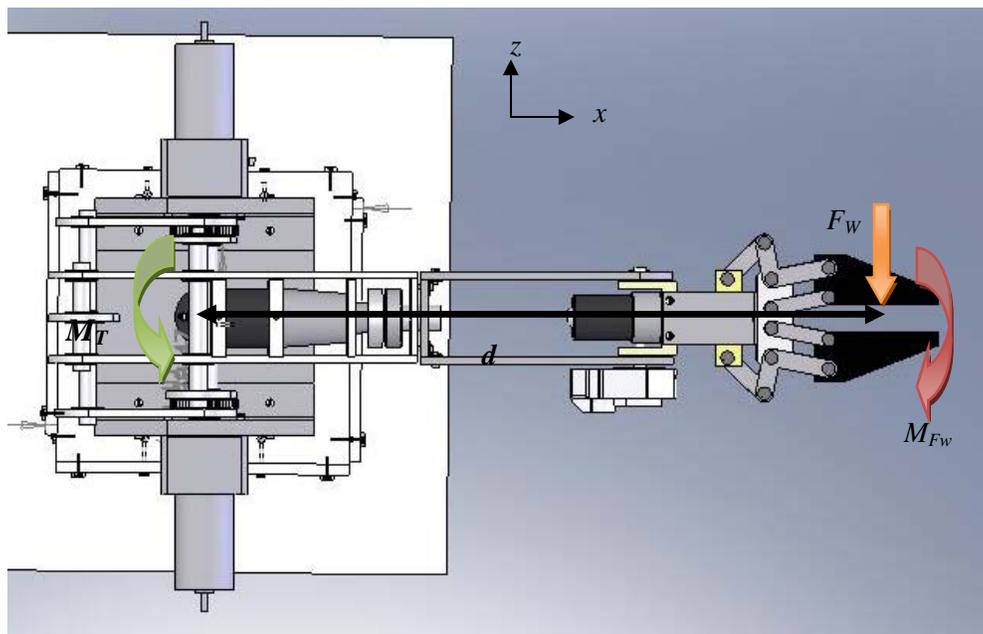


Figura 4.22 Diagrama de cuerpo libre para la posición 3

En esta posición se considera dos casos:

1. Cuando el brazo se encuentra en la posición 1
2. Cuando el brazo se encuentra en la posición 2

Considerando que la fuerza necesaria para que el brazo gire en la base es igual a la del peso del objeto a manipular (F_w). Lo que nos interesa para esta parte es el torque del actuador en la base para las dos posiciones anteriores, para obtener el torque usamos la siguiente ecuación obtenida del diagrama de cuerpo libre de la figura 4.22

$$\sum M = M_T - M_{F_w} \dots (4.24)$$

La siguiente tabla muestra el cálculo del torque para cada caso:

Tabla 4.13 Torques calculados para cada caso

W [N.cm]	Caso 1 d [cm]	Caso 2 d [cm]	M_{w1} [N.cm]	M_{w2} [N.cm]
4.905	35	72	171.675	353.16

4.4.1 Selección de los actuadores del motor

El máximo momento calculado corresponde a la posición 2, que es de 121 [N.cm], para tomar en cuenta el peso de la estructura se multiplica el momento anterior por un factor de 1.5. El momento resultante es de 181.5 [N.cm] (18.5 [kg.cm]), los actuadores seleccionados para este caso son moto-reductores con un par de salida de 25 [kg.cm].

En la posición tres caso 2, el máximo momento que resulta es de 353.16 [N.cm] con la carga de prueba de 0.5 [kg], para la base se seleccionó un actuador igual a los usados en el brazo con una capacidad de 25 [kg.cm], usando un factor de 1.5 para contar el peso de la estructura en esta posición la capacidad del robot para esa posición a una carga máxima de 0.25 [kg] y le corresponde un momento de 230 [kg.cm].

4.4.2 Selección del peso de la base

La resultante R en para el caso 2, la posición más extrema del robot, es de 48.4 [N], que son de alrededor de 4.9 [kg]. Cuando el robot se mueve genera fuerzas que no son contempladas en este estudio, multiplicando el peso calculado por un factor de dos, obtenemos un peso aproximado a 10 [kg]. Por lo que el peso de la base debe ser cercano a 10 [kg] o un peso distribuido en el eje de rotación de la base del robot de 10 [kg].

4.5 Análisis de los Ejes del Robot

Los ejes del robot están sometidos a cargas y torsiones, para determinar si las dimensiones de los ejes son adecuadas. Las consideraciones hechas para este estudio son²⁷:

- Sobre la barra actúa un par de torsión puro y las secciones bajo consideración se encuentran alejadas del punto de aplicación de la carga y de un cambio de diámetro

²⁷ Robert E. Shigley, **Diseño en Ingeniería Mecánica**, 6ª ed, Ed McGraw-Hill, página 124

- Las secciones transversales originalmente planas y paralelas permanecen planas y paralelas después de la torsión, y cualquier línea radial permanece recta
- El material obedece la ley de Hooke.

Las ecuaciones que se usaran son las siguientes²⁸:

$$\sigma = \frac{M}{I/c} = \frac{32M}{\pi \cdot d^3} \dots \text{(4.25)}$$

$$\tau = \frac{T}{J/c} = \frac{16T}{\pi \cdot d^3} \dots \text{(4.26)}$$

Donde:

M es el torque que recibe la flecha

d es el diámetro de la pieza

Las ecuaciones 4.25 y 4.26 corresponde al esfuerzo normal y cortante respectivamente, para todas las flechas del robot se espera que fallen en donde el diámetro es menor. Los ejes del robot en su mayoría tienen en cada extremo una sección de diámetro reducida para el acoplamiento con los rodamientos de cada una de las articulaciones. Para el estudio de los ejes del robot se considera un caso extremo donde uno de los lados se encuentra fijo y el diámetro del estudio es el diámetro menor de cada flecha.

²⁸ Robert E. Shigley, **Diseño en Ingeniería Mecánica**, 6ª ed, Ed McGraw-Hill, página 124

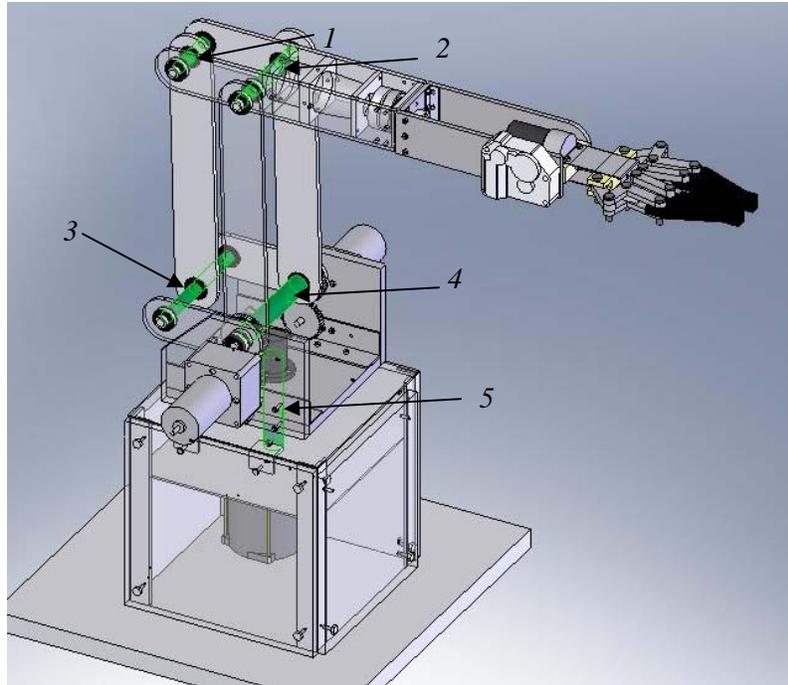


Figura 4.23 Ejes del robot

Los ejes del 1 a 4 cuentan con un diámetro menor de 0.8 [cm], el eje 5 se encarga de transmitir el torque del actuador para hacer girar al resto del robot y su diámetro es de 1.8 [cm] sustituyendo en las ecuaciones (4.25) y (4.26) tenemos:

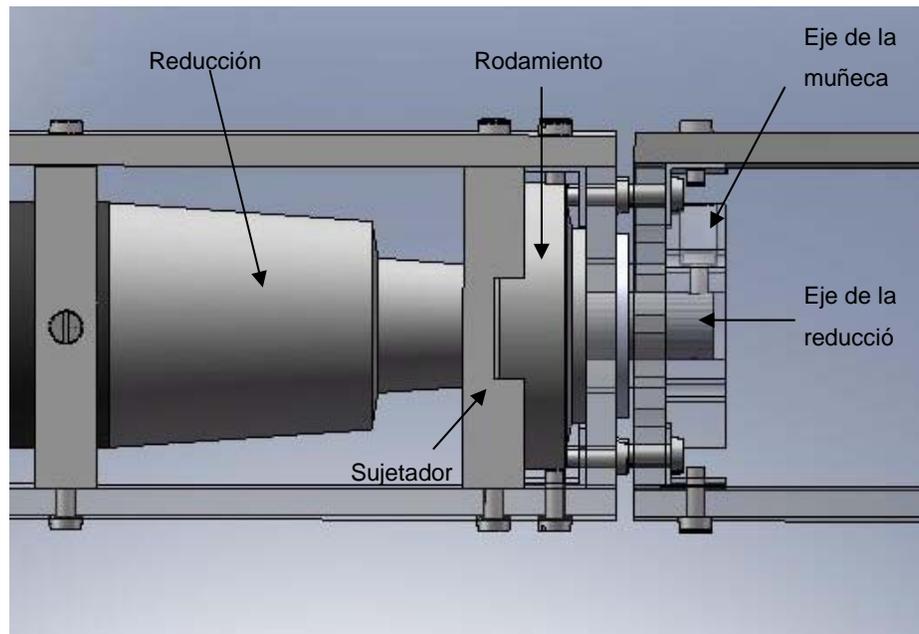
Tabla 4.14 Análisis de los ejes del robot

Tipo de eje	Diametro de los ejes $d [m]$	Momento máximo $M[Nm]$	Esfuerzo normal $\sigma[MPa]$	Esfuerzo cortante $\tau[MPa]$
1 a 4	0.008	1.21	24.07	12.04
5	0.018	2.3	4.02	2.01

El material de los ejes es acero inoxidable 303 recocido con un esfuerzo de cedencia de²⁹ 241 [MPa], comparando con el mayor esfuerzo que soportan los ejes de 24.07 [MPa] se tiene un factor de seguridad de 10. Por lo anterior se determina que las dimensiones y el material de los ejes son adecuados.

4.6 Análisis de la Muñeca del Robot

El mecanismo de la muñeca es fundamental, por eso, es necesario determinar las cargas que puede soportar esta parte del robot. La muñeca tiene que soportar una carga y además la torsión para hacer girar la estructura que sostiene al OT y al objeto que se esta manipulando. Las partes que componen la muñeca son las siguientes:



—
21

Figura 4.24 Partes que conforman la muñeca

Para el análisis de esta parte se propone el siguiente diagrama de cuerpo libre.

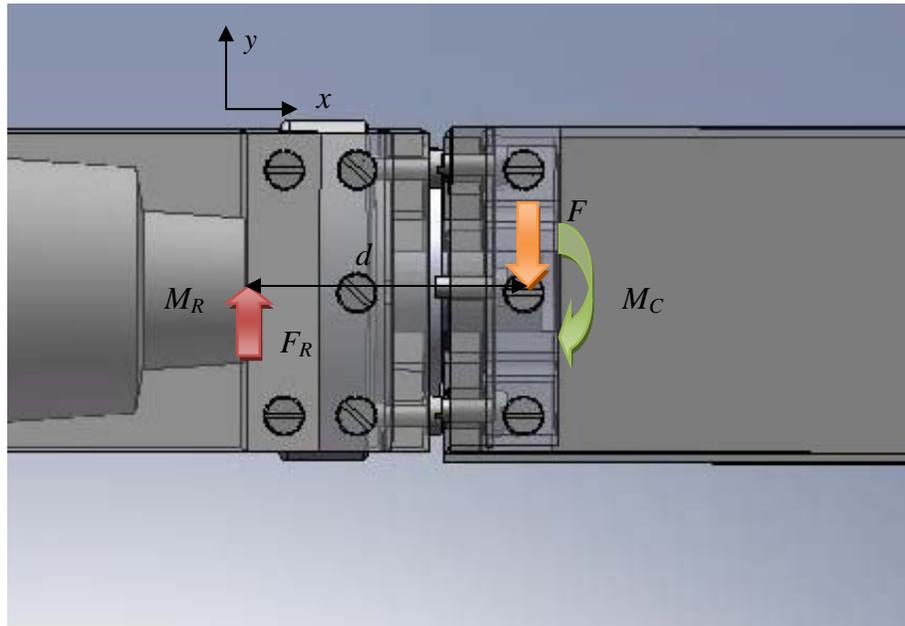


Figura 4.25 Diagrama de cuerpo libre de la muñeca

Las ecuaciones resultantes son:

$$\begin{aligned} \sum F_y &= F_R - F_C = 0 \quad \dots (4.27) \\ \therefore F_R &= F_C \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum M &= M_R - M_C = 0 \quad \dots (4.28) \\ \therefore M_R &= M_C = d \cdot F_C \end{aligned}$$

Las fuerzas y los momentos son soportados por el eje de la muñeca, esta pieza transmite el momento y las cargas al rodamiento cónico (3020A). El eje de la muñeca es una flecha hueca, el estudio de esfuerzos para esta parte se realiza por medio de los modelos de falla de la energía de distorsión-Gerber y la energía de falla por distorsión-elíptico bajo condiciones determinísticas y estocásticas. Los dos modelos de falla ajustan los datos.

La componente de la amplitud del esfuerzo de von Mises σ'_a es³⁰:

$$\sigma'_a = \frac{16}{\pi d^3} \sqrt{4(k_f M_a)^2 + 3(k_{fs} T_a)^2} \dots \text{(4.29)}$$

Donde k_f y k_{fs} son módulos de rigidez torsional para esfuerzo normal y cortante respectivamente, se determinan de acuerdo a la relación entre diámetros y radios. Para hacer uso de la ecuación 4.32 es necesario usar relación para el diámetro del eje que esta dada por:

$$K = \frac{d_i}{d_o} \dots \text{(4.30)}$$
$$d_e = d_o (1 - K^4)^{1/3}$$

Donde:

d_i es el diámetro interior

d_o es el diámetro exterior

d_e es el diámetro usado para cuando el eje es hueco

De la ecuación 4.27, F_C es una carga que incluye al peso del objeto a manipular y el peso de la estructura que sostiene al OT que se estima con la ayuda del programa de CAD en 18.583 [N], por seguridad se usará un valor de 20 [N]. La distancia d de la figura 4.20 es de 0.04 [m]. Sustituyendo en la ecuación se obtiene $M_R = 0.8 [N.m]$, y se considera $M_R = M_a$.

El mecanismo de la reducción corresponde a un desamador eléctrico Black & Decker³¹, modelo #9074CTNA, con un torque de 40 [lb.in] (4.52 [N.m]), el torque medio máximo puede estar sometido el eje de la muñeca (T_m).

³⁰ Robert E. Shigley, **Diseño en Ingeniería Mecánica**, 6ª ed, Ed McGraw-Hill, página 1131

Sustituyendo en la ecuación 4.29 con la ayuda de las tablas³² E-15-7 y E-15-18, $\sigma'_a = 77.01$ [MPa]. El material del eje de la muñeca es *Nylomaq "M"* con límite de cedencia según el proveedor³³ de 82.74 [MPa]. Para el caso de que se necesite el torque máximo de la reducción el factor de seguridad es de 1.074.

Considerando que el OT toma objetos pequeños con una masa límite de 0.5 [kg], los momentos a los que se encuentra sometido el eje de la muñeca son pequeños. La muñeca puede estar en riesgo si toma una pieza cuyo centro de masa se encuentra muy alejado del eje de la muñeca.

4.7 Análisis de los Rodamientos del Robot

El robot cuenta con dos tipos de rodamientos:

- Radial
- Cónico

Los rodamientos de carga radial se encuentran en las uniones de las articulaciones del robot, principalmente en el brazo del robot. Los rodamientos cónicos son usados en dos partes del robot, el primero soporta el peso del hombro, el brazo y el objeto que manipula el robot, el segundo se encuentra en el mecanismo de la muñeca y soporta el par que hace girar a la estructura del efector final, y además la flexión provocada por el peso del objeto y de la estructura.

³¹ www.blackanddecker.com

³² Robert E. Shigley, **Diseño en Ingeniería Mecánica**, 6^a ed, Ed McGraw-Hill, páginas 1203 y 1204

³³ www.lapaloma.com

4.7.1 Características de los Rodamientos Radiales

Los rodamientos radiales disponibles son de la marca *NSK* y su clasificación es 608z, la zeta indica rodamientos con cubierta y sus características son³⁴:

Tabla 4.16 Características importantes de rodamiento 608z

Carga estática [<i>N</i>] (segura)	Velocidad [<i>rpm</i>] (poco lubricado)	Material	Peso [<i>kg</i>]
3300	34000	Acero forjado	0.0118

4.7.2 Características de los Rodamientos Cónicos

Los rodamientos cónicos usados para el robot tienen la siguiente clasificación 45449/10 y 3020A, usados en la base y la muñeca respectivamente, su principal aplicación es en ejes de automóvil WV sedan.

Los rodamientos de este tipo deben soportar una carga radial y una carga de empuje. Las características del rodamiento 45449/10 son³⁵:

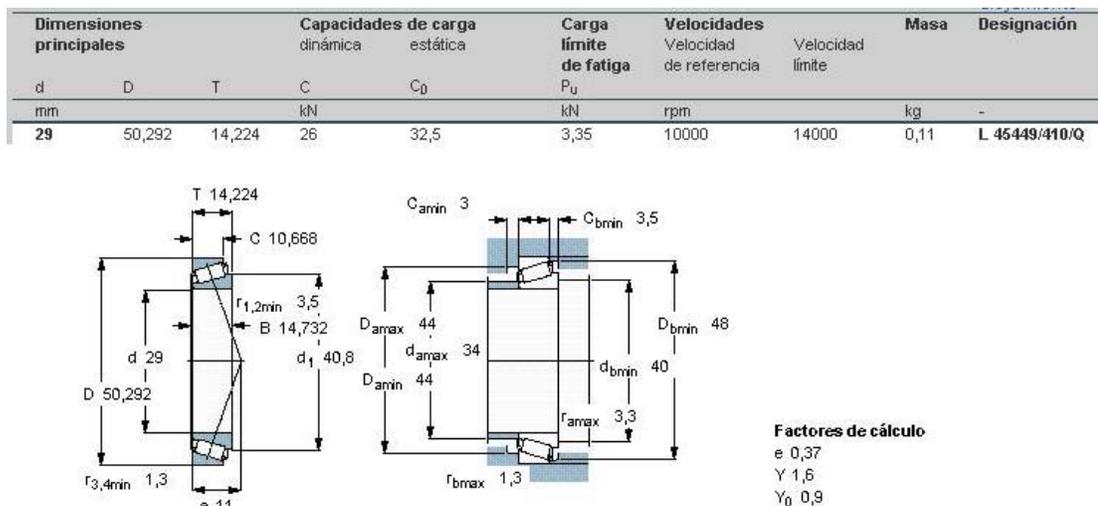


Figura 4.26 Características del rodamiento 45449/10 [20]

³⁵ www.skf.com.mx

Las características del rodamiento 3020A no las especifica el fabricante, para tener una referencia de las cargas que puede soportar se comparo con un rodamiento *SKF* de dimensiones similares³⁶:

Dimensiones principales			Capacidades de carga		Carga límite de fatiga	Velocidades		Masa	Designación
d	D	T	C	C ₀	P _U	Velocidad de referencia	Velocidad límite		
mm			kN		kN	rpm		kg	-
20	47	15,25	27,5	28	3	11000	15000	0,12	30204 J2/Q

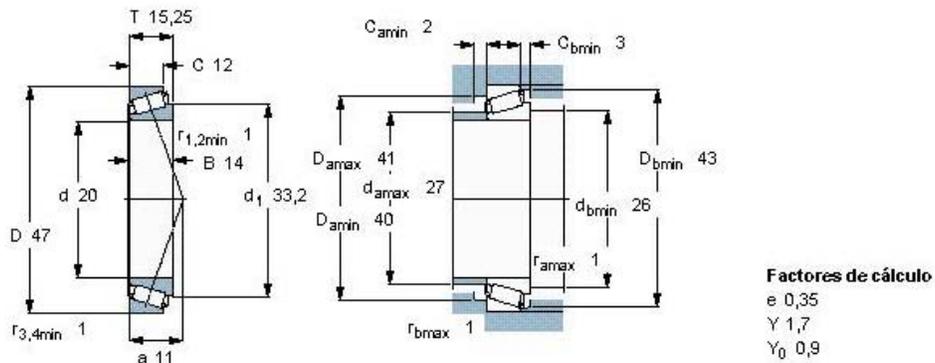


Figura 4.27 Características del rodamiento 30204 J2/Q [21]

Las cargas y las velocidades a los que son sometidos los rodamientos del robot se encuentran muy por debajo de los parámetros establecidos por el fabricante, se puede asegurar que cumplirán su función correctamente.

³⁶ www.skf.com.mx

Los análisis presentados en este capítulo se consideran suficientes para el desarrollo del robot, se podrían realizar más estudios de los diferentes elementos que componen la estructura, como análisis de elemento finito multi-físicos y multi-fásicos, cálculos para determinar diferentes tipos de trayectorias, un estudio dinámico de fuerzas más completo, etc. Dichos estudios requieren de un grado de estudio más elevado y por ende más tiempo, además las herramientas adecuadas para su realización.

Capítulo 5. Conclusiones y Recomendaciones

Durante todo el trabajo únicamente se establecen las bases para la realización de un prototipo. Las conclusiones se pueden dividir tanto para la parte del diseño como la del análisis.

5.1 Conclusiones de diseño

- El uso del programa de CAD ayuda a conceptualizar mejor el diseño, cuando se cuenta con poca experiencia de diseño se depurará constantemente en el software, pero la depuración más importante se realizará en la construcción del prototipo
- El uso de programas de computadora en el desarrollo de un concepto de diseño puede facilitar su desarrollo y reducir el tiempo, pero es necesario contar con el hardware necesario y la capacitación para usar el software adecuadamente
- La información que se recibe de los estudios hecho en programas de computadora, debe ser analizada detalladamente, los programas brindan mucha información y únicamente se debe seleccionar la necesaria para llevar a cabo el desarrollo del concepto de diseño
- Para determinar la calidad del prototipo es necesario determinar y realizar una serie de pruebas de acuerdo a la función que tiene que realizar, en dichas pruebas se evaluarán tanto la estructura mecánica como el control. Las pruebas que se proponen son de precisión, exactitud y repetitividad al colocar un objeto en un lugar determinado dentro del espacio del trabajo del robot. Únicamente con el uso del robot completo se puede determinar si el diseño cumple con los puntos que se establecieron al principio del presente trabajo
- La metodología de diseño usada puede servir para ilustrar como determinar y mejorar un concepto, pero es recomendable el formar un grupo de diseño con un número mayor de personas para no pasar por alto ningún elemento o consideración durante la toma de decisión. Aunque un mayor número de

personas pueden aportar más conceptos de diseño y de mejor calidad en cada uno, el tiempo de evaluación y de toma de decisión aumentará de forma considerable, por lo que será necesario llevar de manera organizada esta parte del proceso de diseño para reducir su tiempo

5.2 Conclusiones del Análisis

- Para el estudio de esfuerzos de las piezas, fue necesario adecuar cada análisis de acuerdo a las dimensiones de cada una. En el caso de la lamina del OT se hizo un análisis de esfuerzos con Elemento Finito debido a su geometría, el aplicar este mismo análisis a las demás piezas es innecesario, ya que resultarían resultados muy similares y se invertiría mayor tiempo en su realización
- El aumento a cinco los grados de libertad de la estructura mecánica del robot permitirá su uso en diferentes aplicaciones de tipo didáctico. En algunos casos los manipuladores articulados industriales tiene más grados de libertad que los del robot manipulador construido en base a este trabajo, pero este robot permitirá a los alumnos conocer los diferentes aspectos relacionados con esos dispositivos facilitando su manejo en sus diferentes aplicaciones
- Con la ayuda del programa elaborado en software comercial para simular la trayectoria del OT se pueden variar parámetros de manera rápida. La simulación de la trayectoria puede facilitar los cálculos de los grados de libertad para una posición específica, pero que el robot siga esta trayectoria depende totalmente del control y de la calidad de la estructura mecánica del prototipo.

- El redimensionamiento de las piezas del robot fue hecho en base a las dimensiones de un brazo de una persona de 1.75 [m] de altura, con un alcance de 750 [mm].
- El análisis de cada elemento del robot concuerda con los conocimientos adquiridos por un estudiante de ingeniería mecatrónica y mecánica. La información suministrada por este trabajo puede servir como material en algunas asignaturas y en el desarrollo de proyectos similares, por lo anterior se puede considerar exitoso la parte correspondiente al análisis del robot

5.3 Recomendaciones

Las recomendaciones para la continuación de este trabajo son las siguientes:

- Diseñar una interfaz grafica accesible a cualquier persona o estudiante que realice algún tipo de práctica
- La interfaz de potencia debe permitir a los motores realizar diferentes perfiles de velocidad en los movimientos de las articulaciones del robot
- Durante el funcionamiento del robot pueden realizar diferentes tipos de análisis en ciertas piezas del robot, como por ejemplo de agotamiento, flexión y torsión de los eslabones, desgaste en los ejes y rodamientos
- Se pueden trabajar con diferentes propuestas de OT, en el último eslabón se pueden diseñar distintos tipos de dispositivos que cumplan una función que se desea estudiar

Referencias

1. www.udec.cl/~gastete/clasificacion.htm *consulta 22 de enero del 2007*
2. Joseph L. Engelberger, Publisher in USA for **AMACON**, a division of American Management, New York, All right reserved
3. Jose M. Amgulo Usategui, **Robótica Practica**, 2^a ed, Ed Paraninfo, 1986
4. Eugene I. Rivin, **Mechanical Design of Robots**, Mac-Graw Hill, páginas 1-2
5. Mikell Groover, **Robótica Industrial**, McGrawll-Hill, 1990
6. Shimon Y. Nof, **Handbooks of Industrial Robotics**, Ed Board, 1985, página 115
7. Mikell P. Groover, **Robótica Industrial**, McGrawll-Hill, 1990, página 137
8. Mikell P. Groover, **Fundamentals of Modern Manufacturing**, 2^a ed, Ed John Wiley & Sons, Inc, 2002
9. Robert Norton, **Diseño de Máquinas**, McGrawll-Hill, 2^{da} edición
10. Joseph E. Shygly, **Diseño en la Ingeniería Mecánica**, McGrawll-Hill, 6^{ta} edición
11. Kart T. Ulrich, **Diseño y Desarrollo de Productos**, 3 ed, Ed. McGraw-Hill, página 129.
12. Dr. Ángel Alfonso Rojas Salgado, **Dinámica de Sistemas Articulados de Cuerpos Rígidos**, Tesis UNAM, 1987
13. www.blackanddecker.com *consulta 10 de Febrero del 2007*
14. www.lapaloma.com *consulta 24 de Febrero del 2007*
15. <http://www.nks.sjlbearing.com/NSK/nskgq/20060106161815.shtml> *consulta 8 de Mayo del 2007*
16. www.skf.com.mx *consulta 25 de Marzo del 2007*
17. Pat L. Mangonom, **Ciencia de Materiales Selección y Diseño**, Ed Prentice Hall, 2001, página 508
18. Ernest Rabinowicz, **Friction and Wear Materials**, 2^a ed. Ed Wiley-Intersciencie, 1995, página 118.
19. www.globalmotor.com *consulta 24 de Abril del 2007*

20. Rafael Aracil, **Robots Paralelos: Máquinas con un pasado y n Futuro en la Robótica**, RIAI, volumen 3, número 1, Enero 2006 , páginas16-28

21. <http://www.geplastics.com.ar/resinsar/resins/materials/cycolac.html> *consulta 22 de Mayo del 2007*

Referencias de Imagenes

[1] www.udec.cl/~gastete/clasificacion.htm

[2] Joseph L. Engelberger, Publisher in USA for **AMACON**, a division of American Management, New York, All right reserved

[3] Eugene I. Rivin, **Mechanical Design of Robots**, Mac-Graw Hill, páginas 1-2

[4] Mikell Groover, **Robótica Industrial**, McGrawH-Hill, 1990

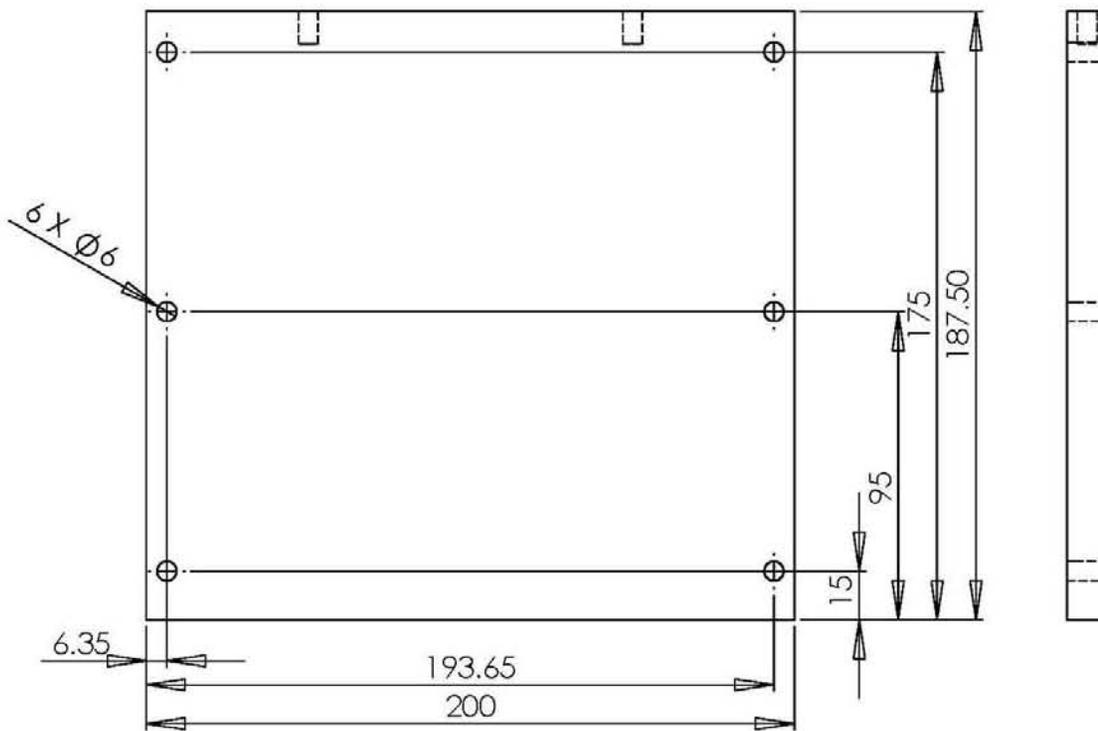
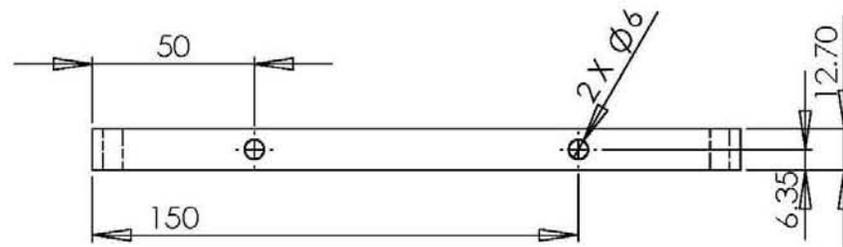
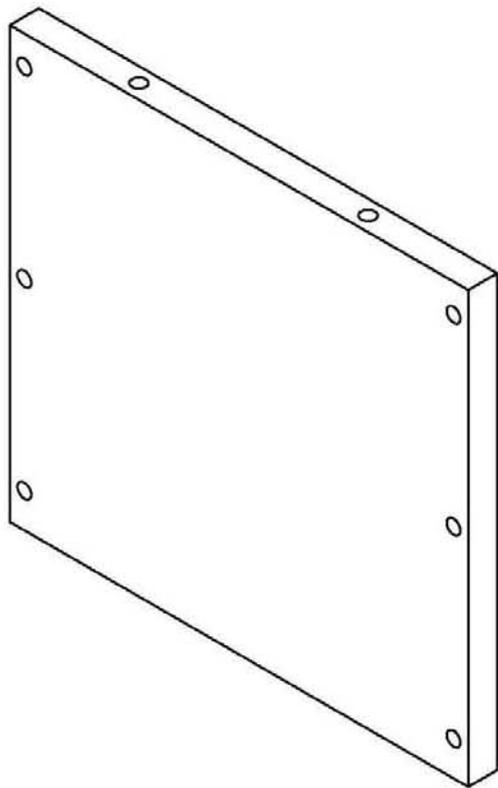
[5] Shimon Y. Nof, **Handbooks of Industrial Robotics**, Ed Board, 1985, página 115

[6] Shimon Y. Nof, **Handbooks of Industrial Robotics**, Ed Board, 1985, pagina 121

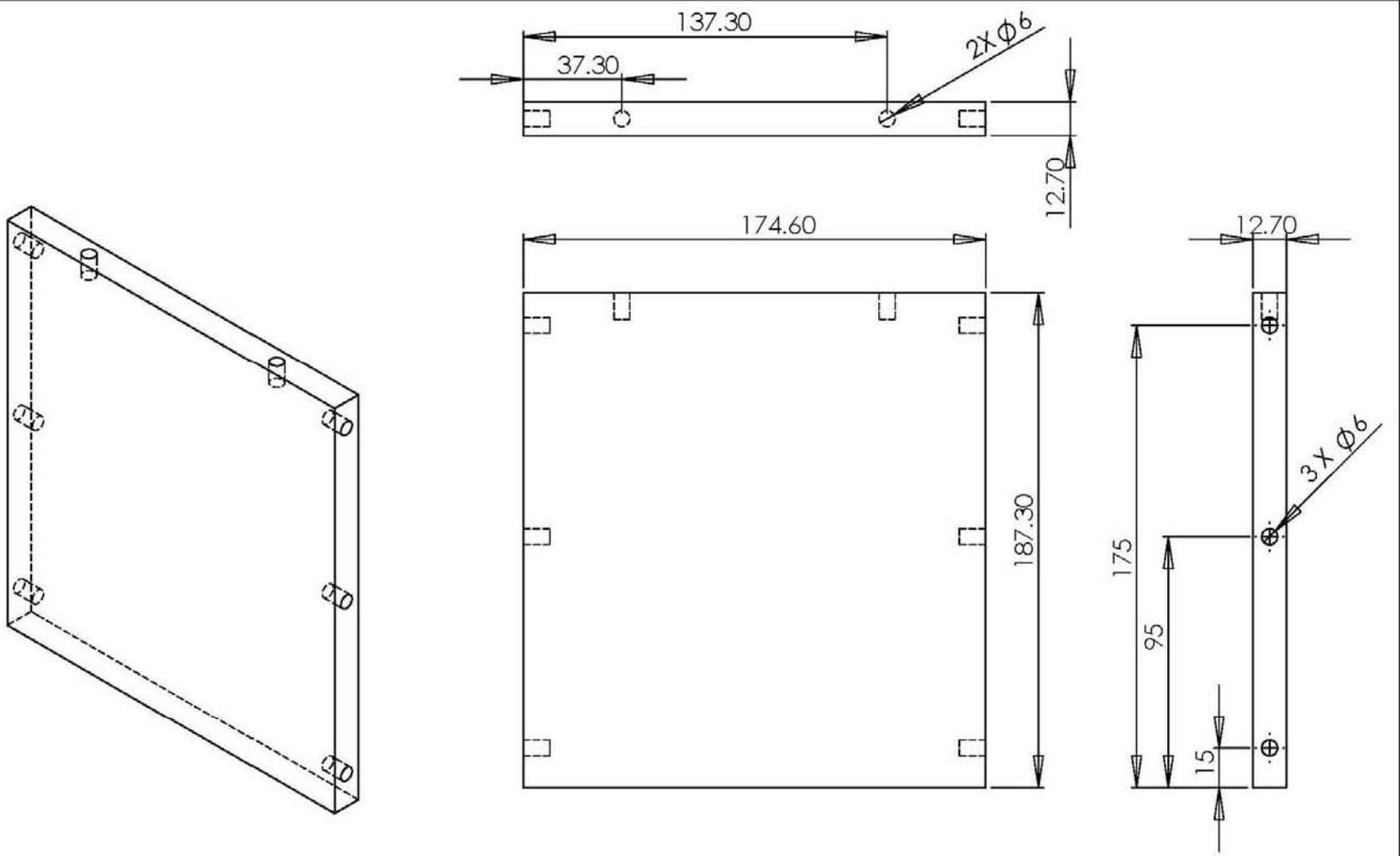
[7] Shimon Y. Nof, **Handbooks of Industrial Robotics**, Ed Board, 1985, pagina 122

[8] Mikell Groover, **Robótica Industrial**, McGrawH-Hill, 1990, pagina 137

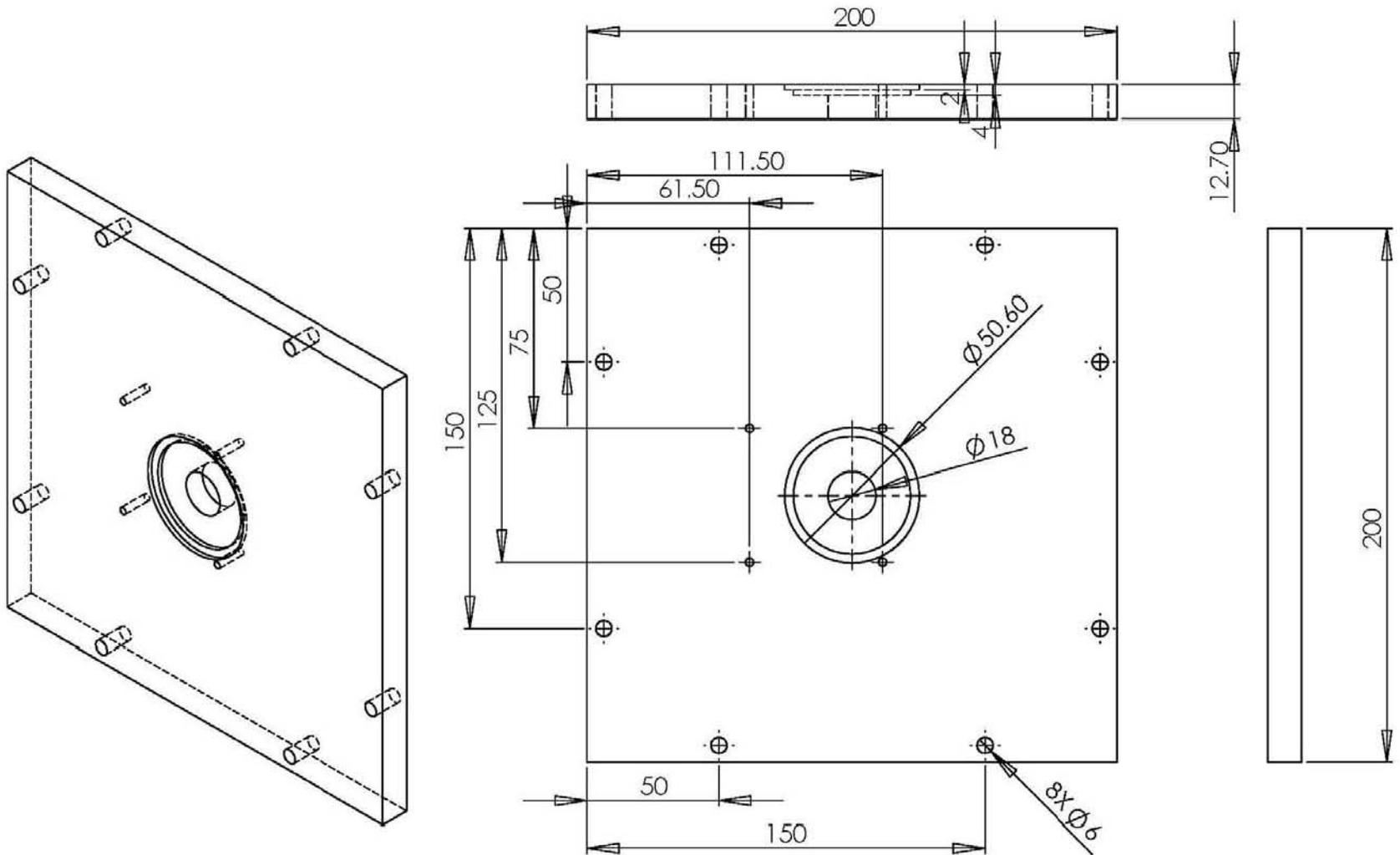
[9] Shimon Y. Nof, **Handbooks of Industrial Robotics**, Ed Board, 1985, pagina 123



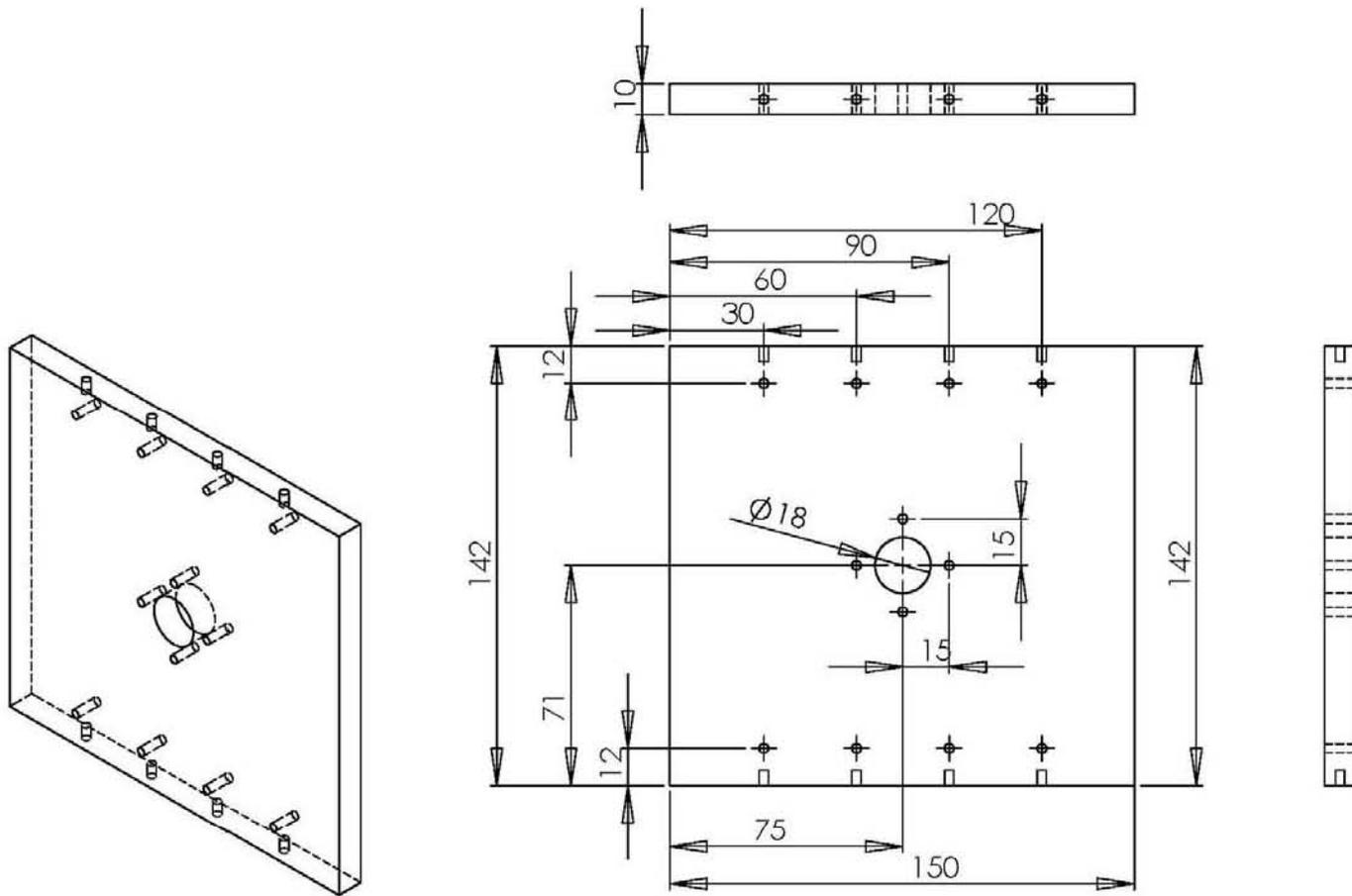
Autor: Peña Medina Erik		Número de plano: 1			Base del robot
Fecha: 3/07/2007		Número de pieza: B1			
Acotaciones: mm		Tolerancias: mm			



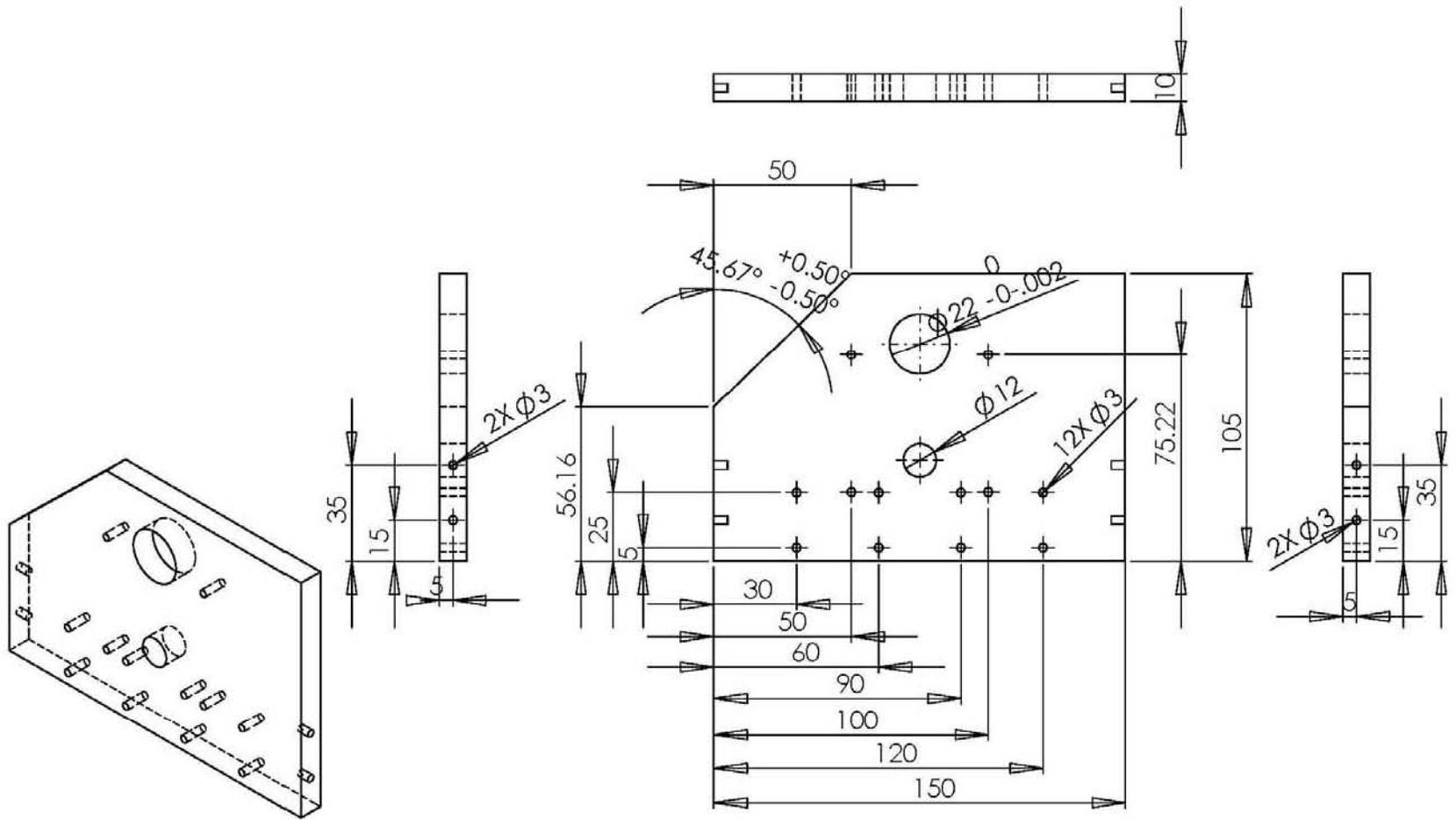
Autor: Peña Medina Erik		Número de plano: 2			Base del Robot B1
Fecha: 3/07/2007		Número de pieza: B2			
Acotaciones: mm		Tolerancias: mm			



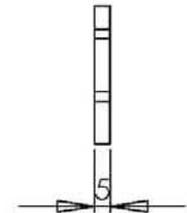
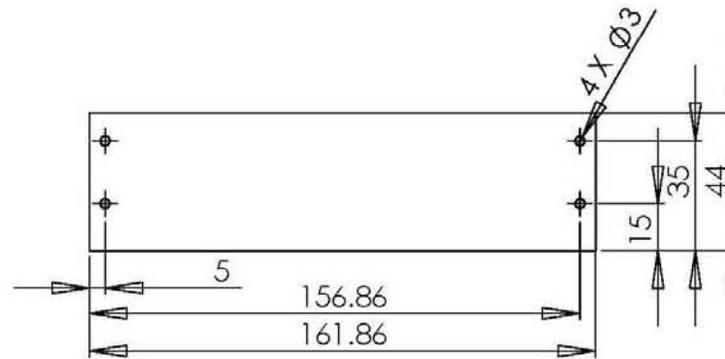
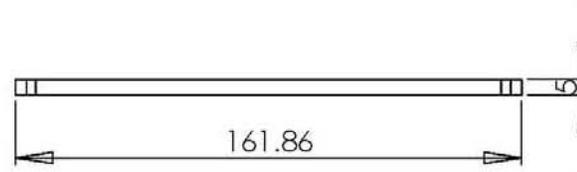
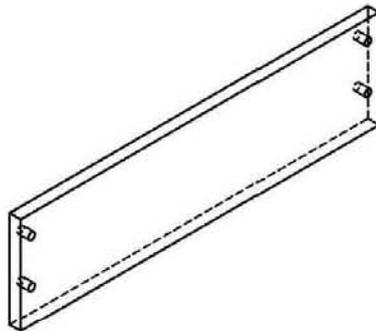
Autor: Peña Medina Erik		Número de plano: 3			Base del Robot Tapa
Fecha: 3/07/2007		Número de pieza: B3			
Acotaciones: mm		Tolerancias: mm			



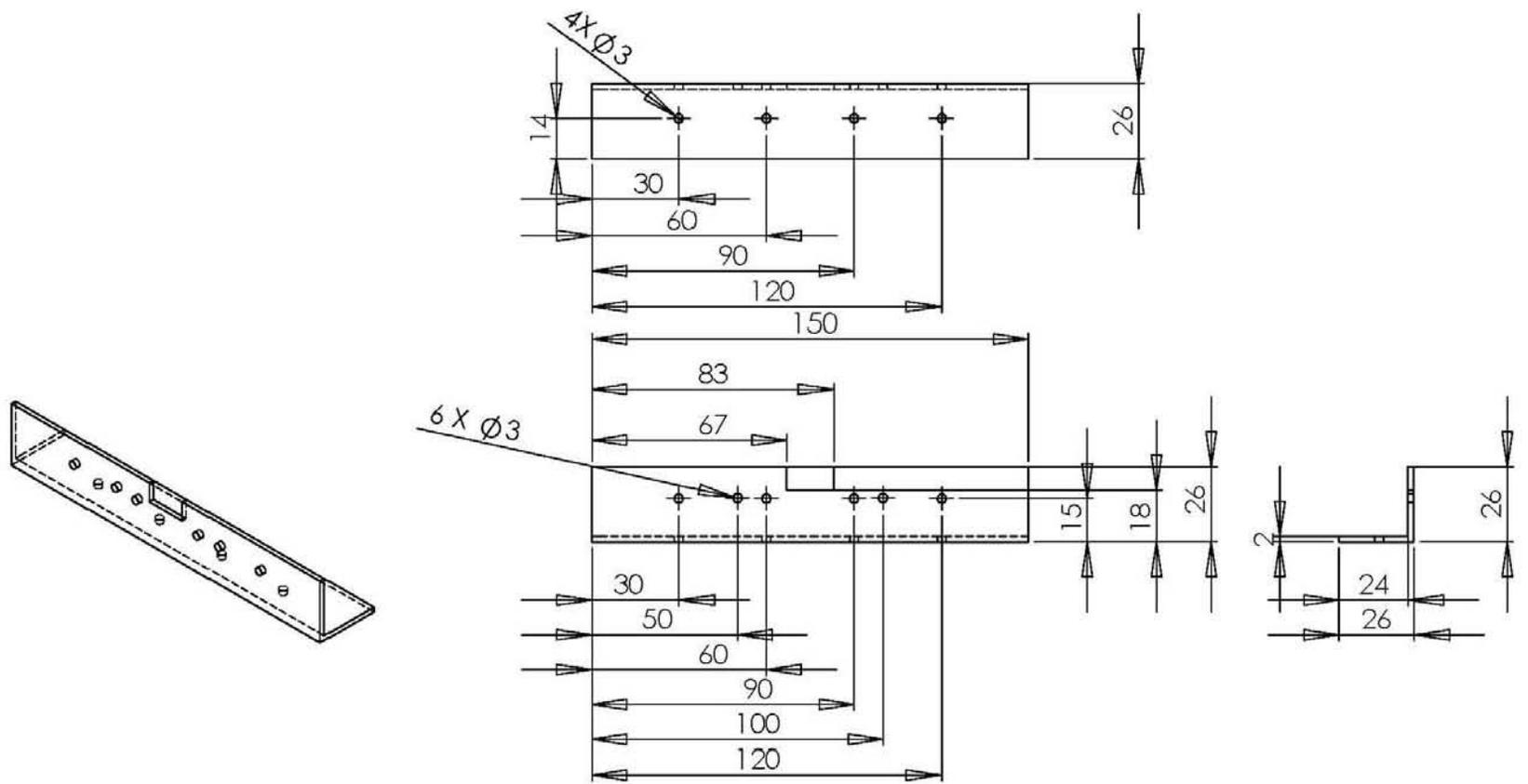
Autor: Peña Medina Erik		Número de plano: 4			Hombro del Robot
Fecha: 3/07/2007		Número de pieza: H1			
Acotaciones: mm		Tolerancias: mm			



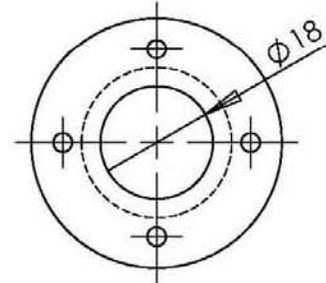
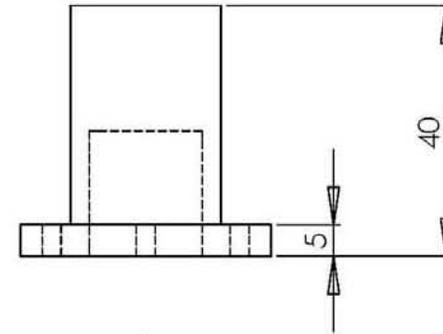
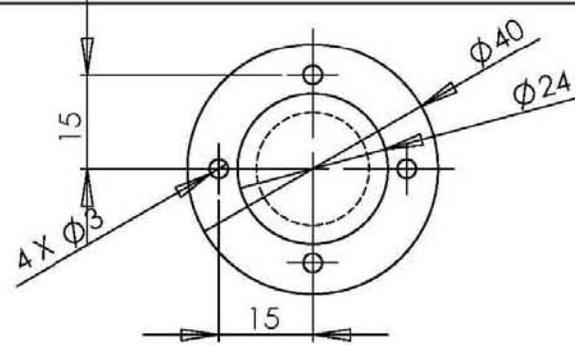
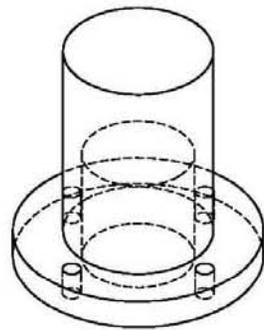
Autor: Peña Medina Erik		Número de plano: 5			Hombro del Robot
Fecha: 3/07/2007		Número de pieza: H2			
Acotaciones: mm		Tolerancias: mm			



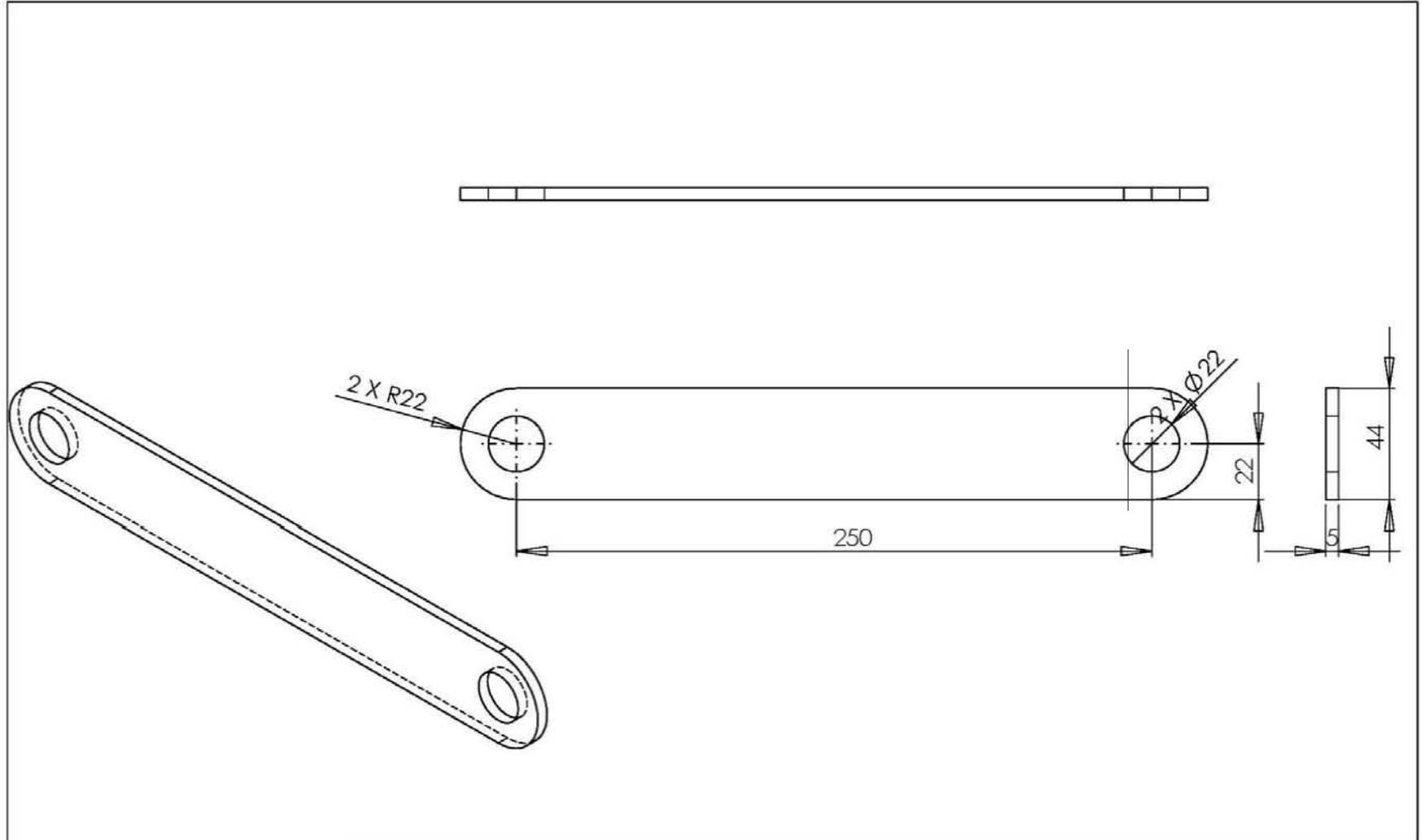
Autor: Peña Medina Erik		Número de plano: 6			Hombro del Robot
Fecha: 3/07/2007		Número de pieza: H3			
Acotaciones: mm		Tolerancias: mm			



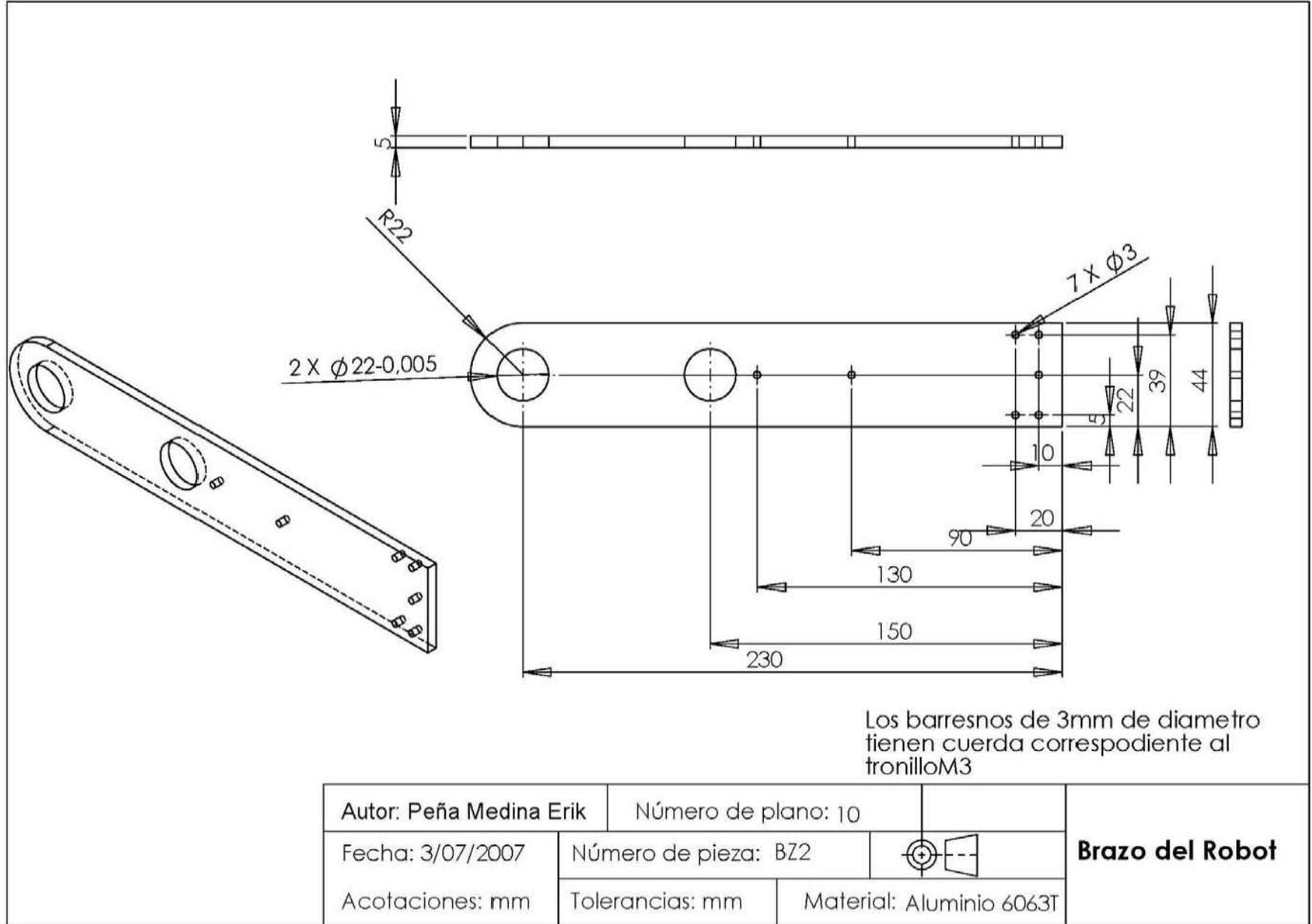
Autor: Peña Medina Erik		Número de plano: 7			Hombro del Robot
Fecha: 3/07/2007		Número de pieza: H4			
Acotaciones: mm		Tolerancias: mm			

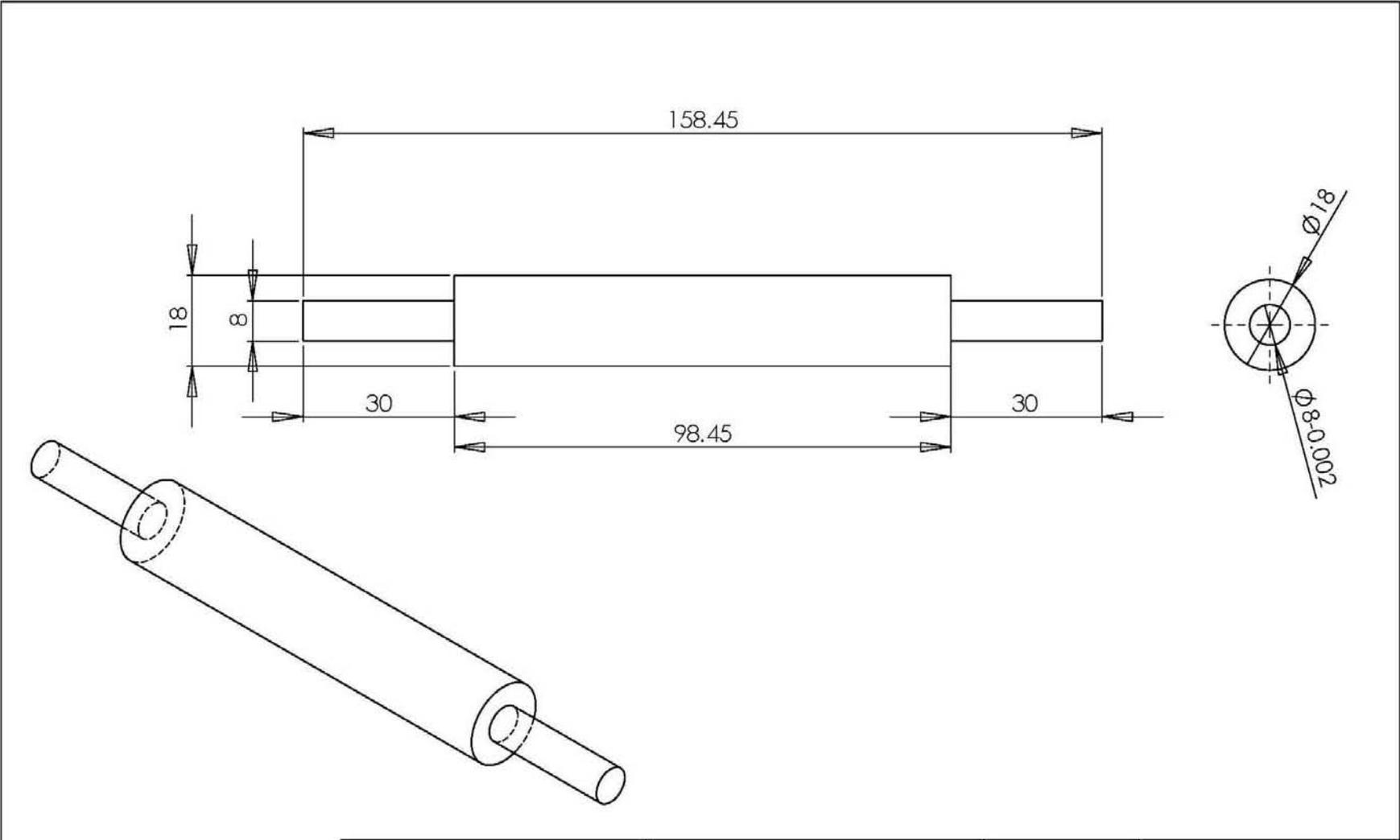


Autor: Peña Medina Erik		Número de plano: 8			Hombro del Robot
Fecha: 3/07/2007		Número de pieza: H5			
Acotaciones: mm		Tolerancias: mm			

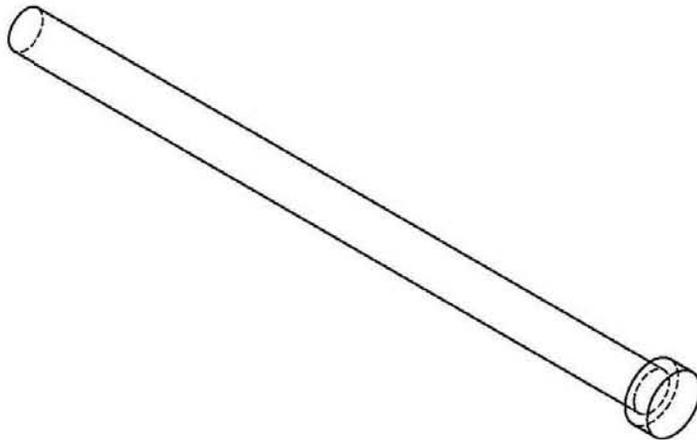
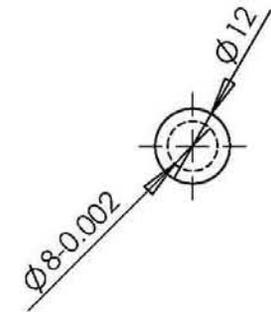
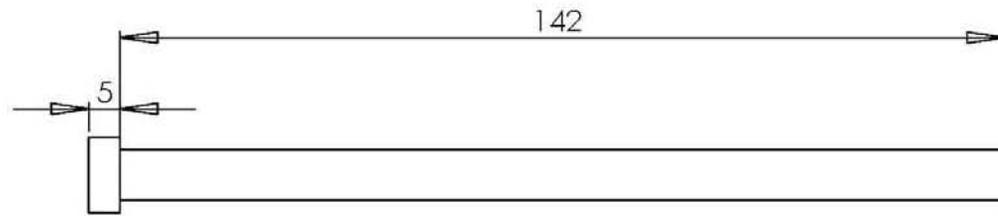


Autor: Peña Medina Erik		Número de plano: 9			Brazo del Robot
Fecha: 3/07/2007		Número de pieza: BZ1			
Acotaciones: mm		Tolerancias: mm			

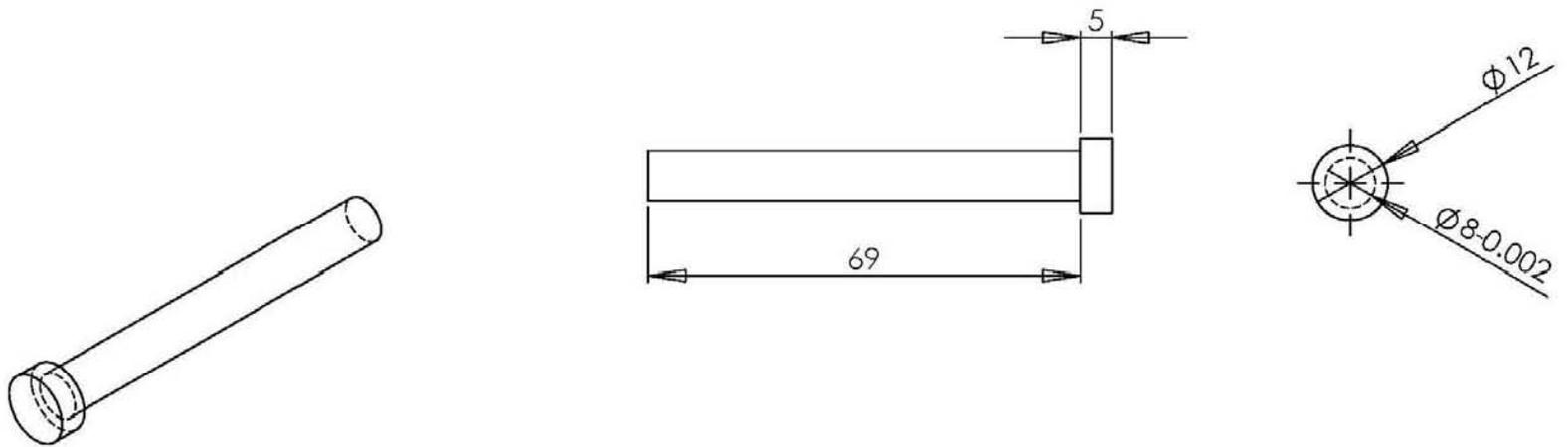


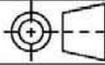


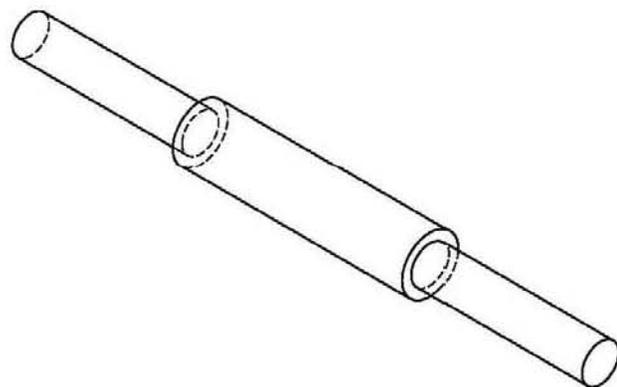
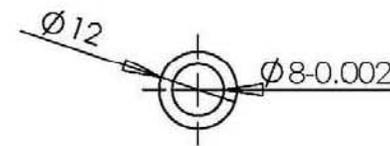
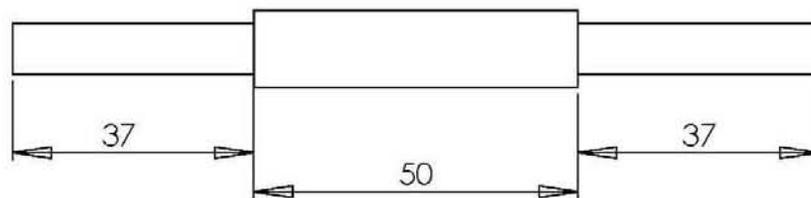
Autor: Peña Medina Erik	Número de plano: 11		Brazo del Robot
Fecha: 3/07/2007	Número de pieza: BZ3		
Acotaciones: mm	Tolerancias: mm	Material: Acero 1018	



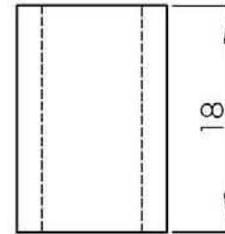
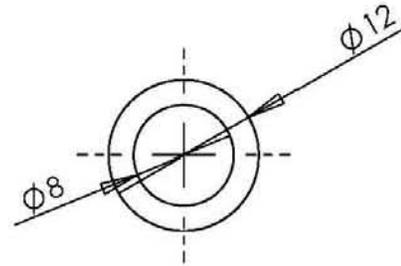
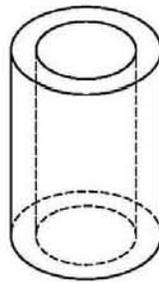
Autor: Peña Medina Erik		Número de plano: 12			Brazo el Robot
Fecha: 3/07/2007		Número de pieza: BZ11			
Acotaciones: mm		Tolerancias: mm			



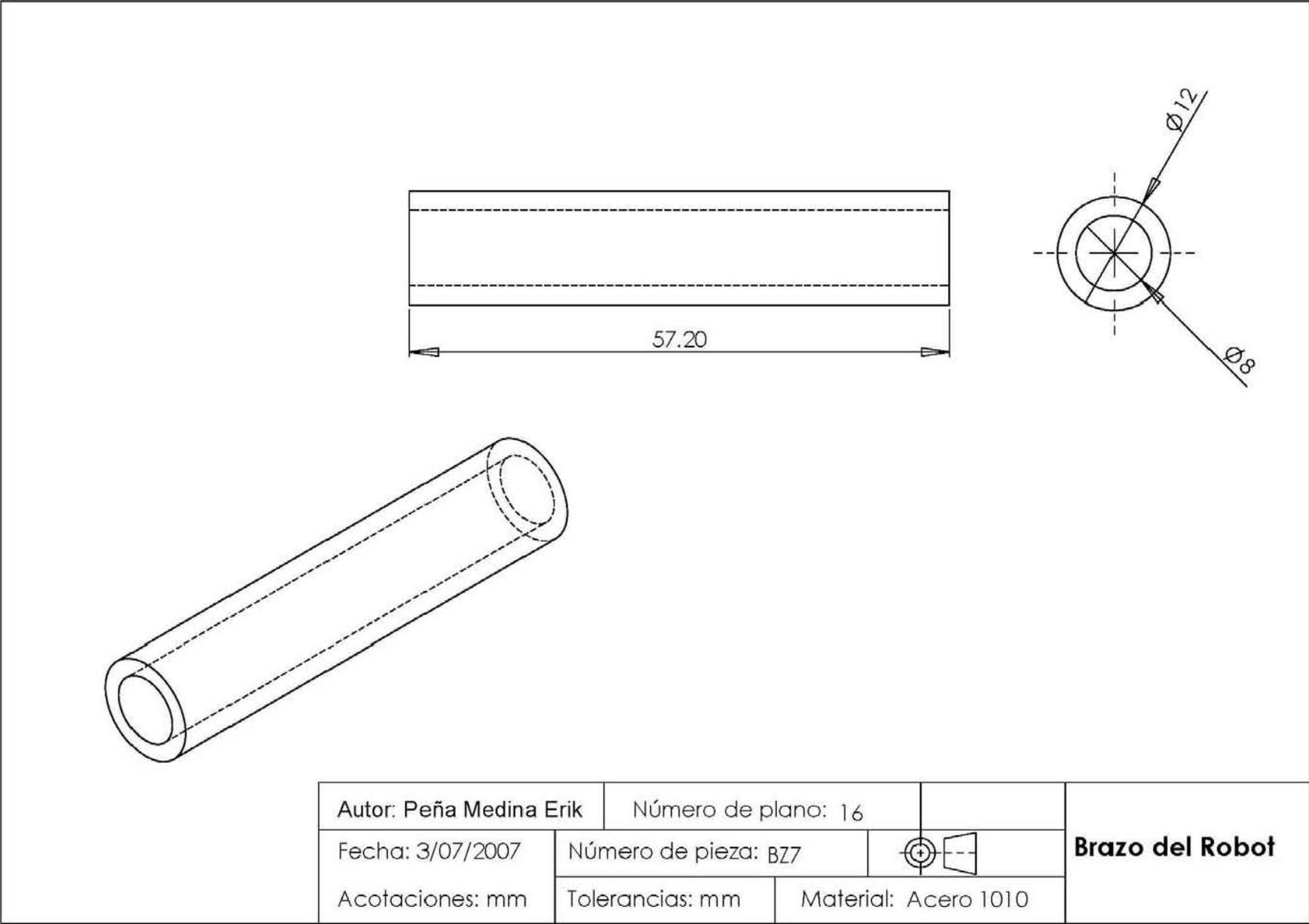
Autor: Peña Medina Erik	Número de plano: 13		Brazo del Robot
Fecha: 3/07/2007	Número de pieza: BZ4		
Acotaciones: mm	Tolerancias: mm	Material: Acero 1010	



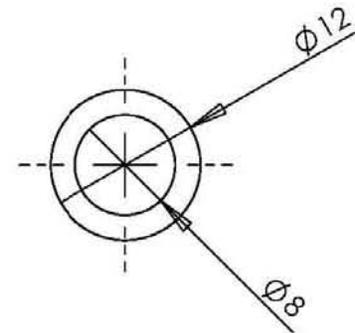
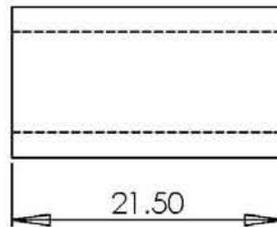
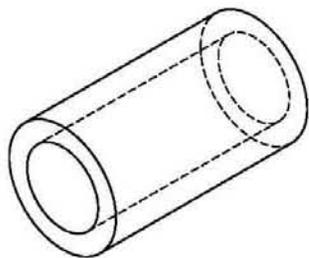
Autor: Peña Medina Erik	Número de plano: 14		Brazo del Robot
Fecha: 3/07/2007	Número de pieza: BZ5		
Acotaciones: mm	Tolerancias: mm	Material: Acero 1010	



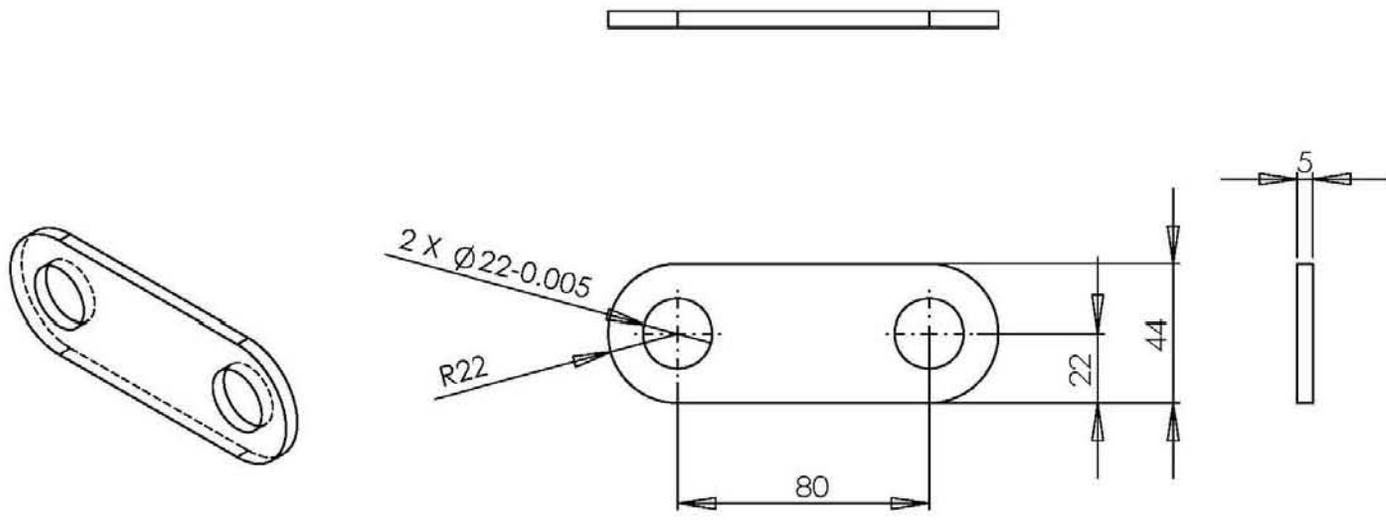
Autor: Peña Medina Erik	Número de plano: 15		Brazo del Robot
Fecha: 3/07/2007	Número de pieza: BZ6		
Acotaciones: mm	Tolerancias: mm	Material: Acero 1010	



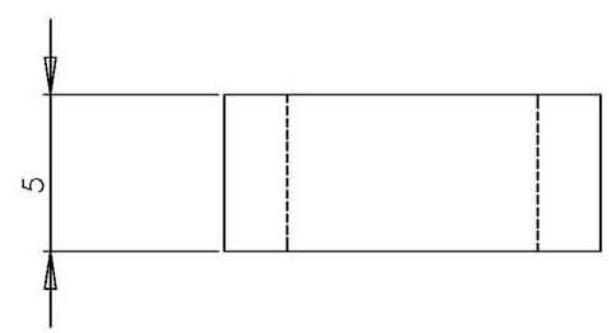
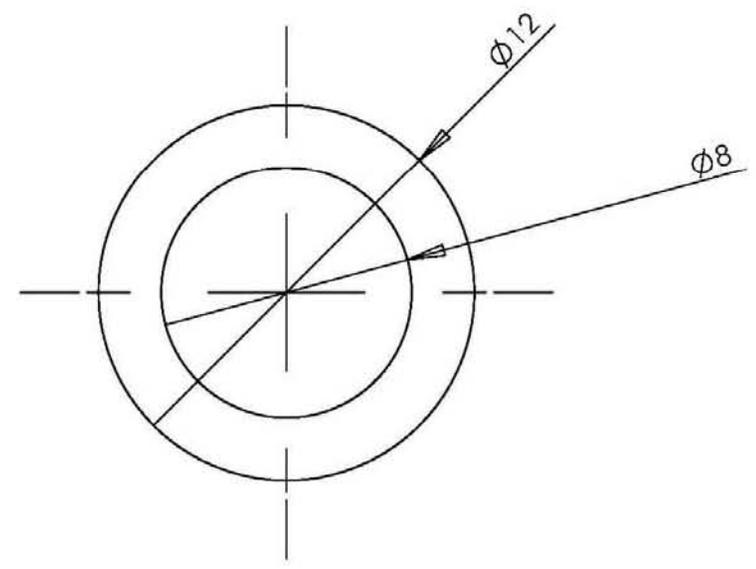
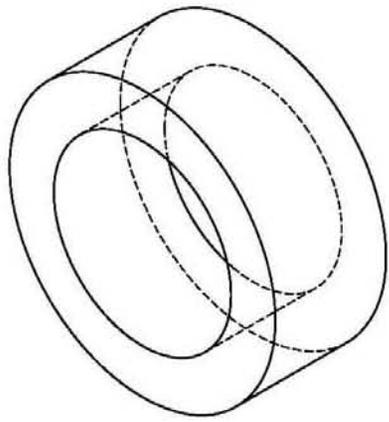
Autor: Peña Medina Erik		Número de plano: 16			Brazo del Robot
Fecha: 3/07/2007		Número de pieza: BZ7			
Acotaciones: mm		Tolerancias: mm			

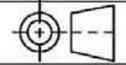


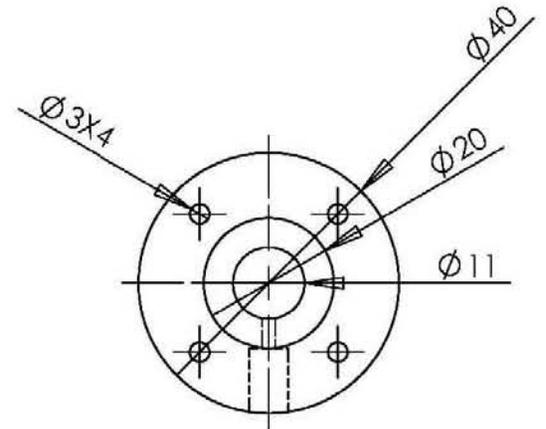
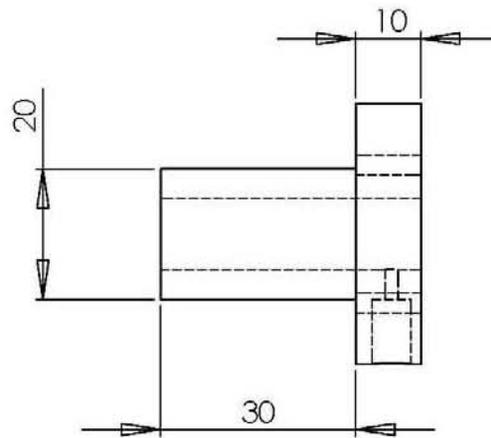
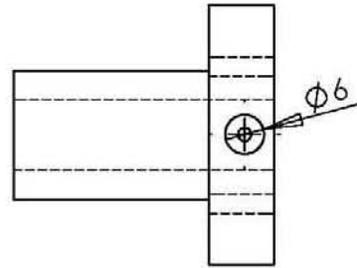
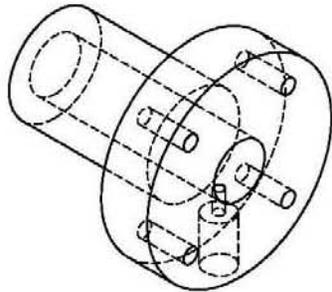
Autor: Peña Medina Erik	Número de plano: 17		Brazo del Robot
Fecha: 3/07/2007	Número de pieza: BZ8		
Acotaciones: mm	Tolerancias: mm	Material: Acero 1010	



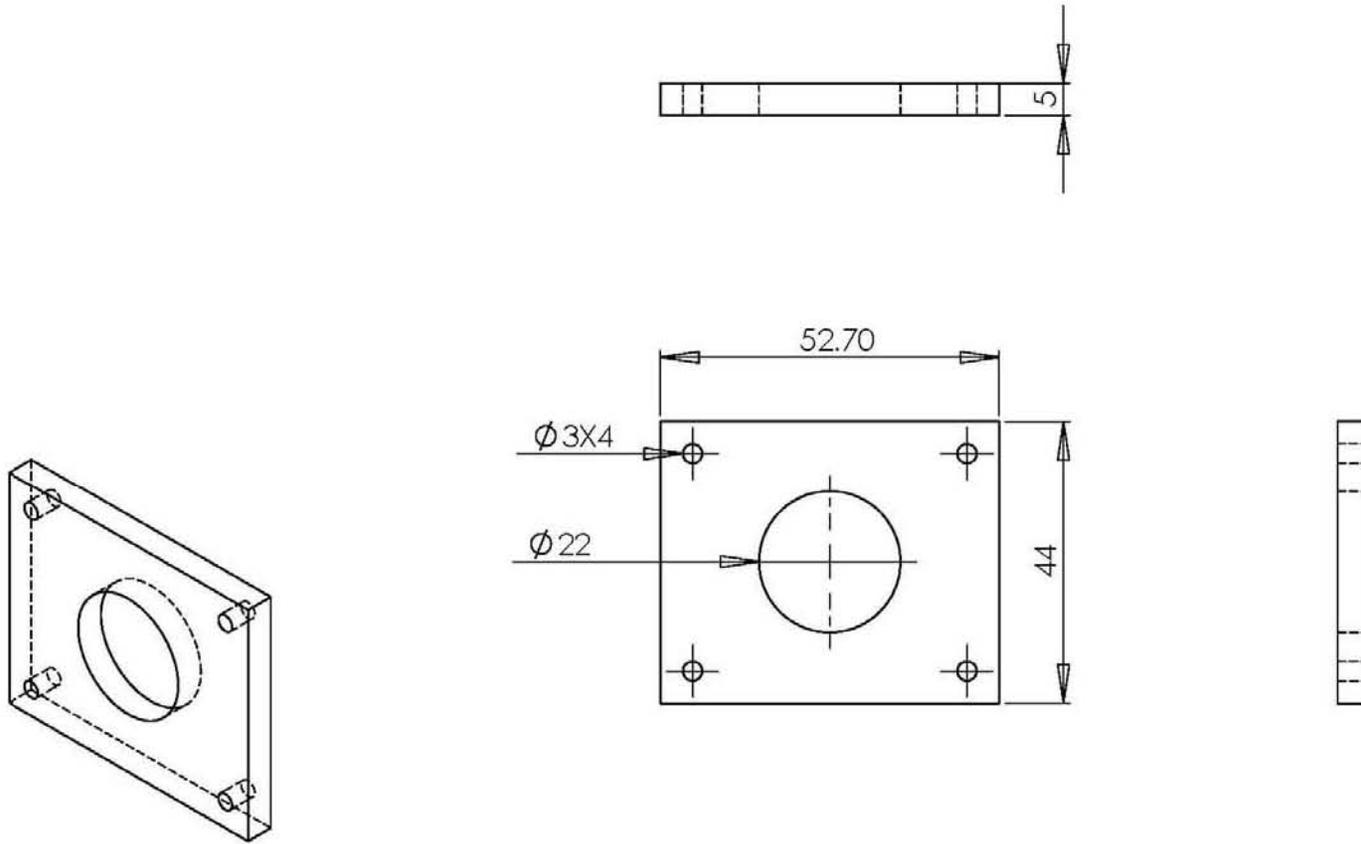
Autor: Peña Medina Erik		Número de plano: 18			Brazo del Robot
Fecha: 3/07/2007		Número de pieza: BZ9			
Acotaciones: mm		Tolerancias: mm	Material: Aluminio 6063T		



Autor: Peña Medina Erik	Número de plano: 19		Brazo del Robot
Fecha: 3/07/2007	Número de pieza: BZ10		
Acotaciones: mm	Tolerancias: mm	Material: Acero 1010	

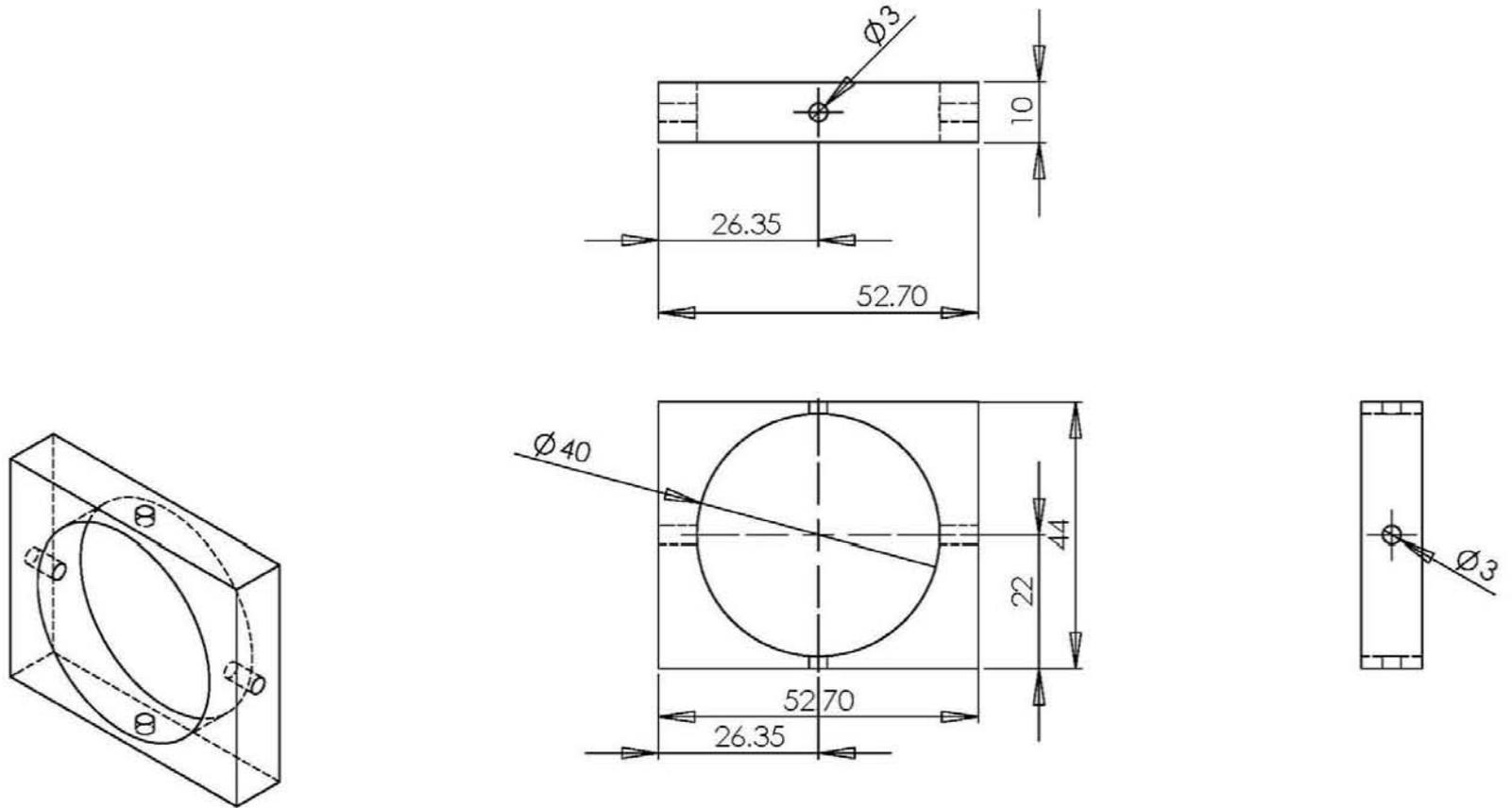


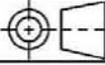
Autor: Peña Medina Erik		Número de plano: 20			Muñeca del Robot
Fecha: 3/07/2007		Número de pieza: M1			
Acotaciones: mm		Tolerancias: mm			

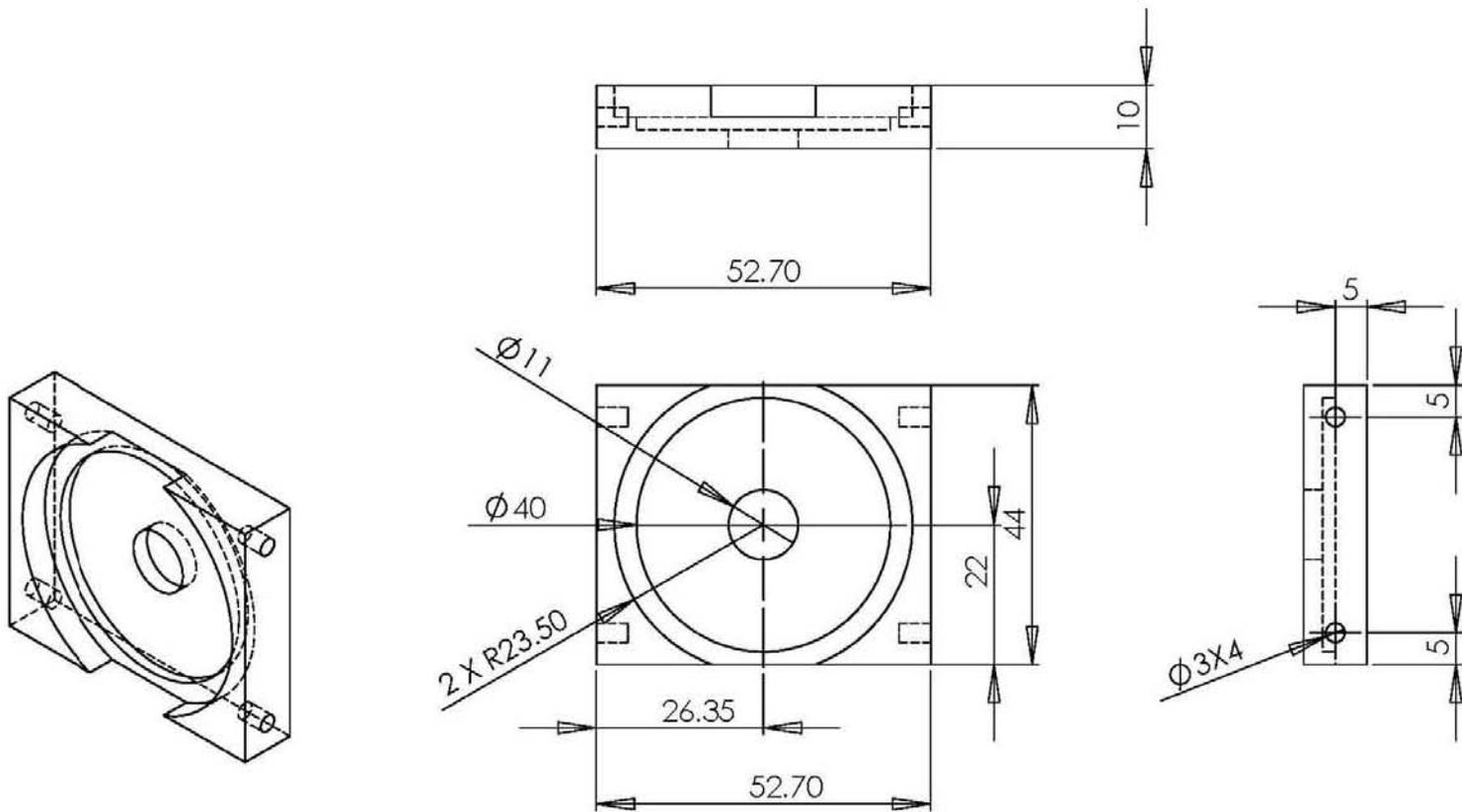


Los barrenos de 3 mm de diametro tienen cuerda correspondiente al M3

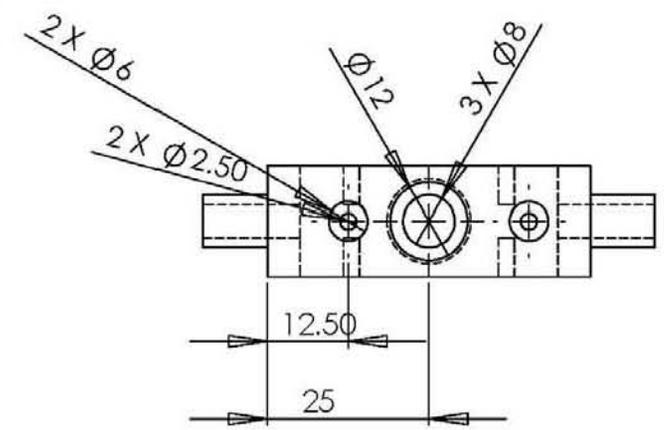
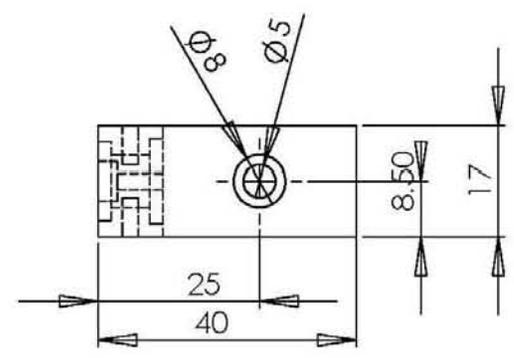
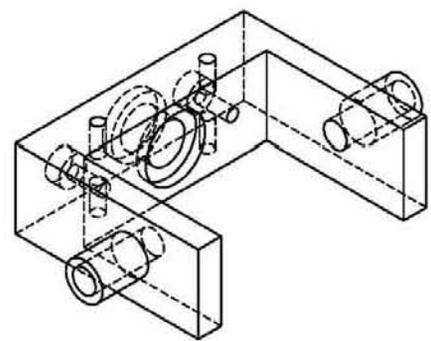
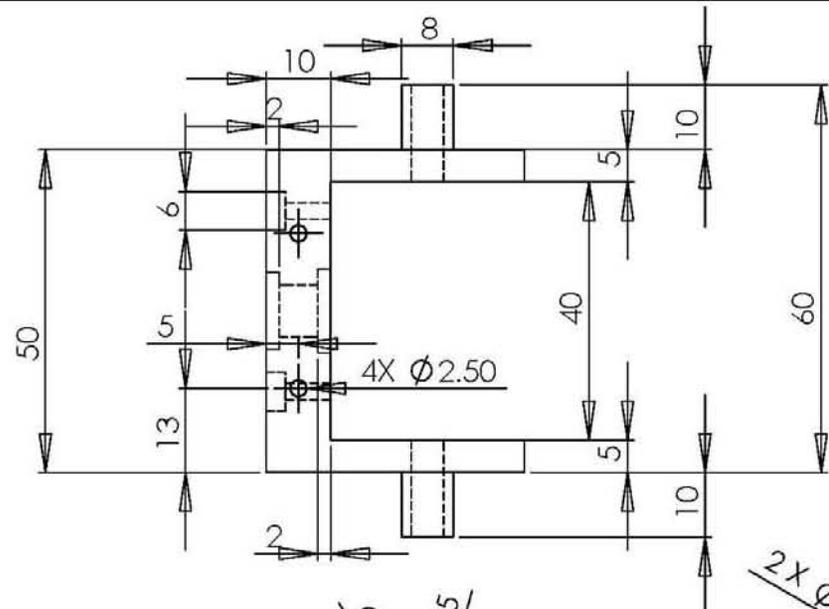
Autor: Peña Medina Erik	Número de plano: 21		Muñeca del Robot
Fecha: 3/07/2007	Número de pieza: M2		
Acotaciones: mm	Tolerancias: mm	Material: Aluminio 6063T	



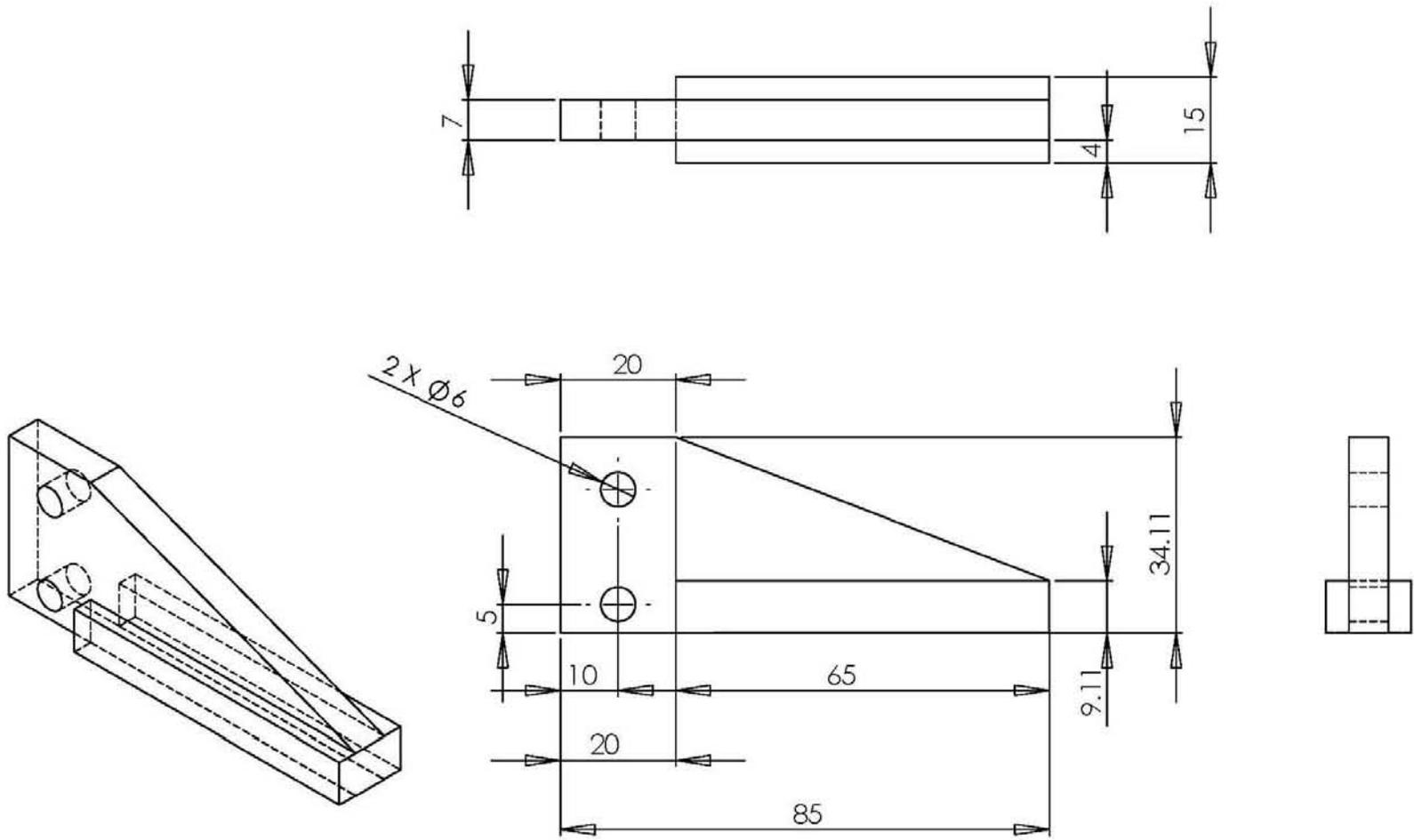
Autor: Peña Medina Erik		Número de plano: 22			Muñeca del Robot
Fecha: 3/07/2007		Número de pieza: M3			
Acotaciones: mm		Tolerancias: mm			



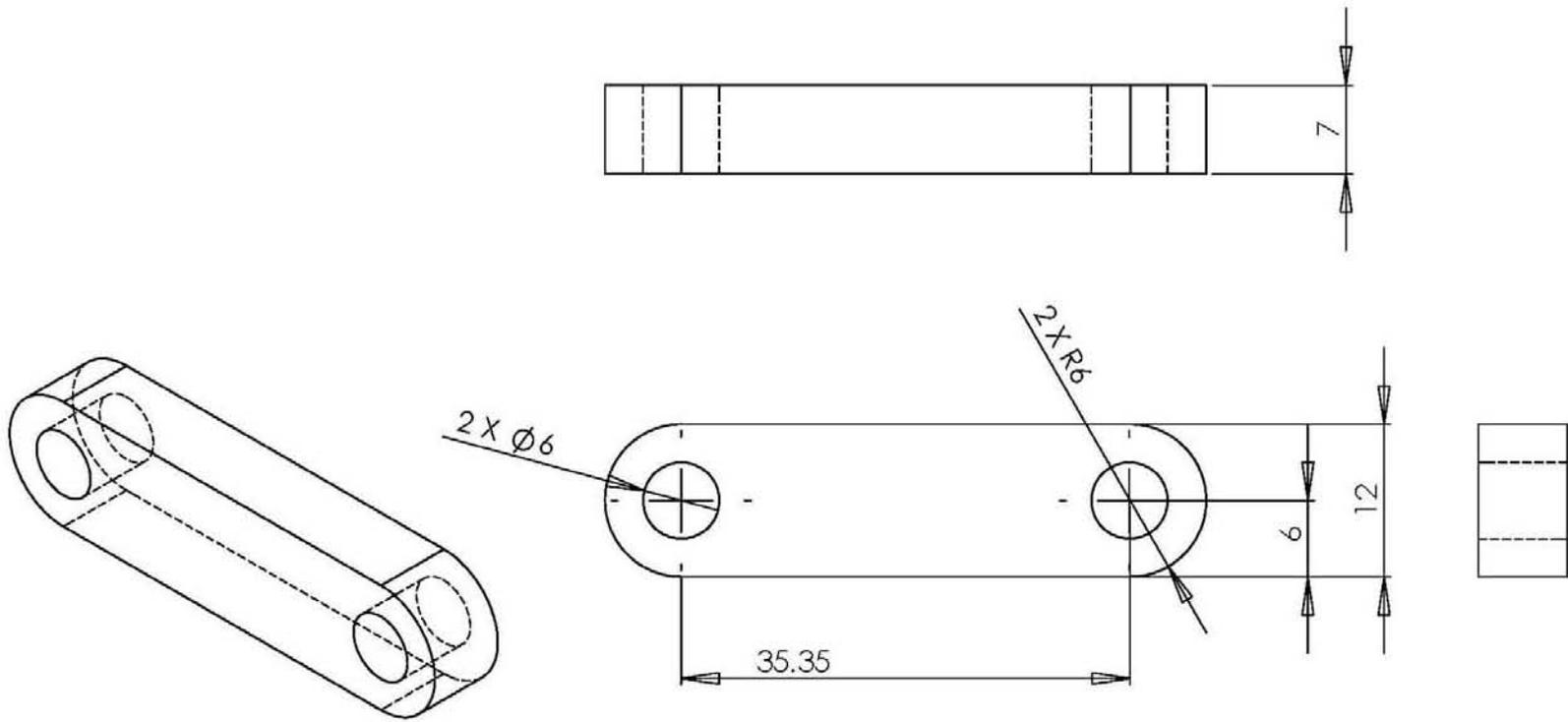
Autor: Peña Medina Erik		Número de plano: 23		Muñeca del Robot
Fecha: 3/07/2007		Número de pieza: M4		
Acotaciones: mm		Tolerancias: mm		
		Material: Aluminio 6061		



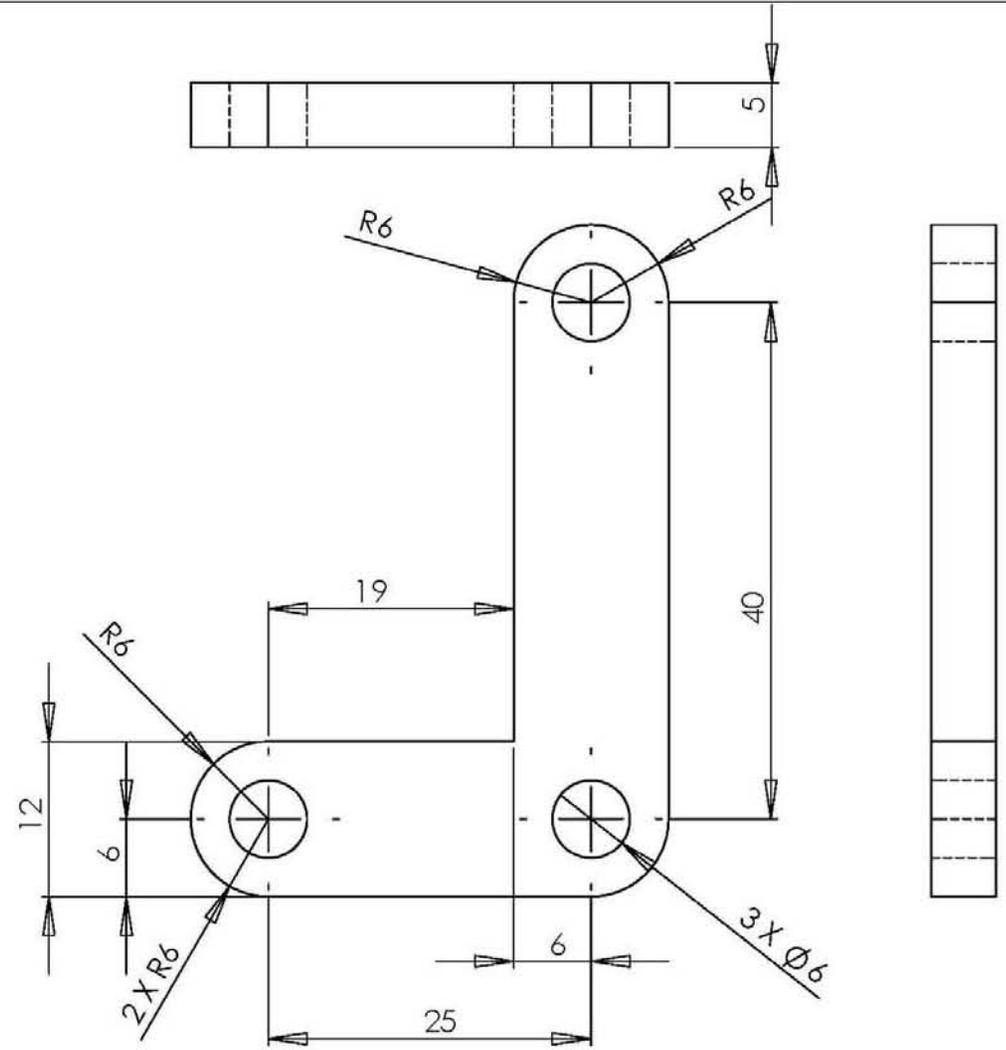
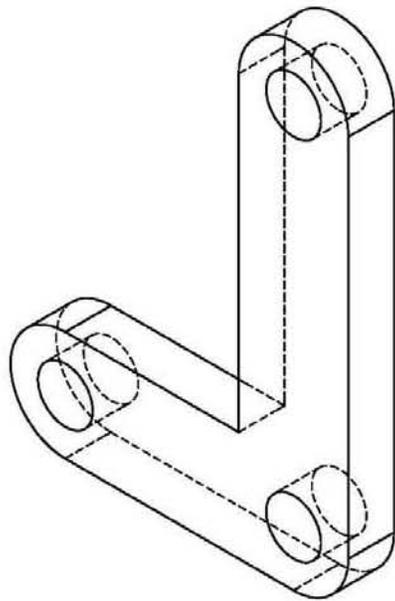
Autor: Peña Medina Erik		Número de plano: 24			OT del Robot
Fecha: 3/07/2007		Número de pieza: G1			
Acotaciones: mm		Tolerancias: mm	Material: ABS		



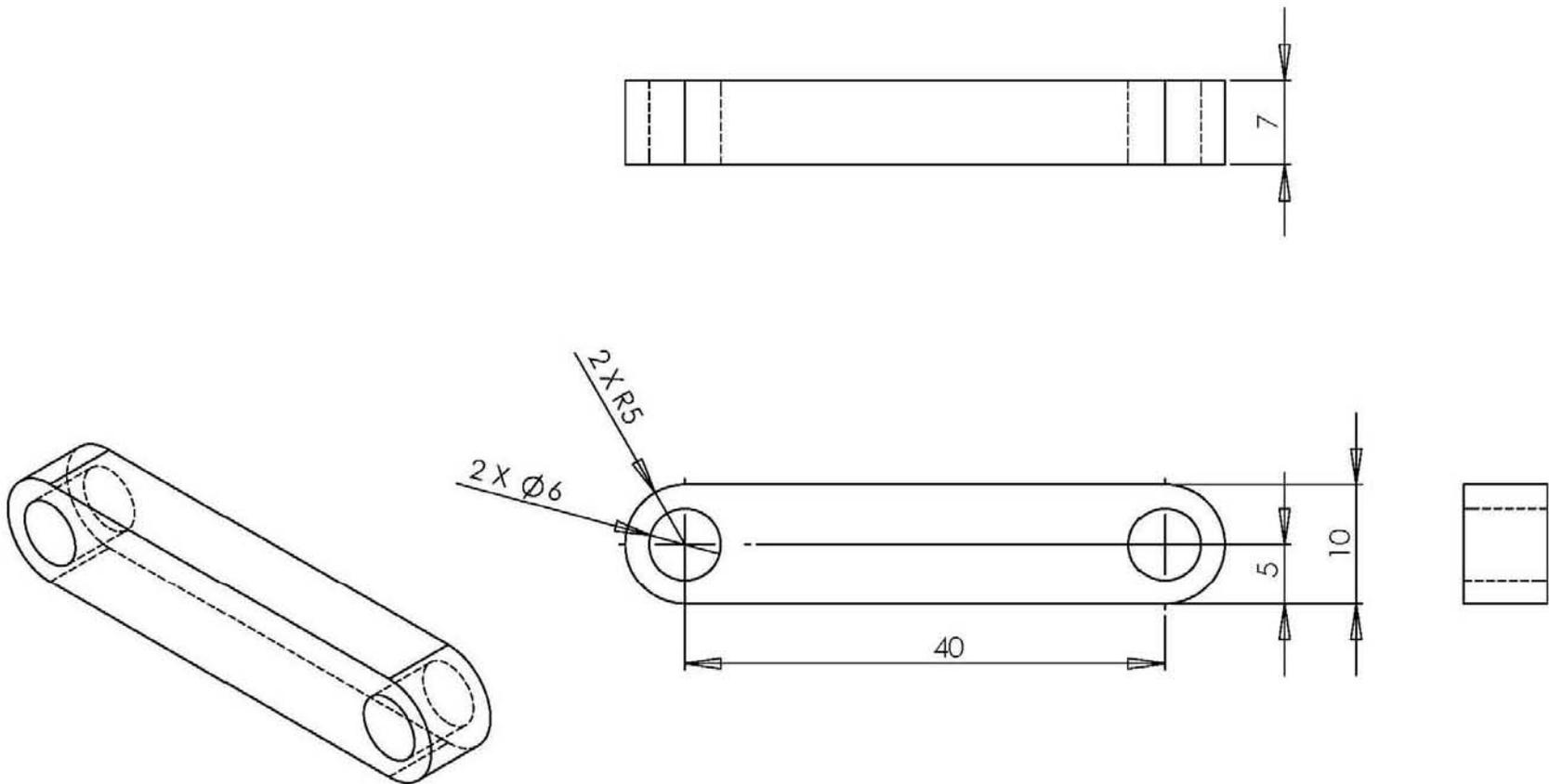
Autor: Peña Medina Erik		Número de plano: 25			OT del Robot
Fecha: 3/07/2007		Número de pieza: G2			
Acotaciones: mm		Tolerancias: mm	Material: Aluminio 6061		



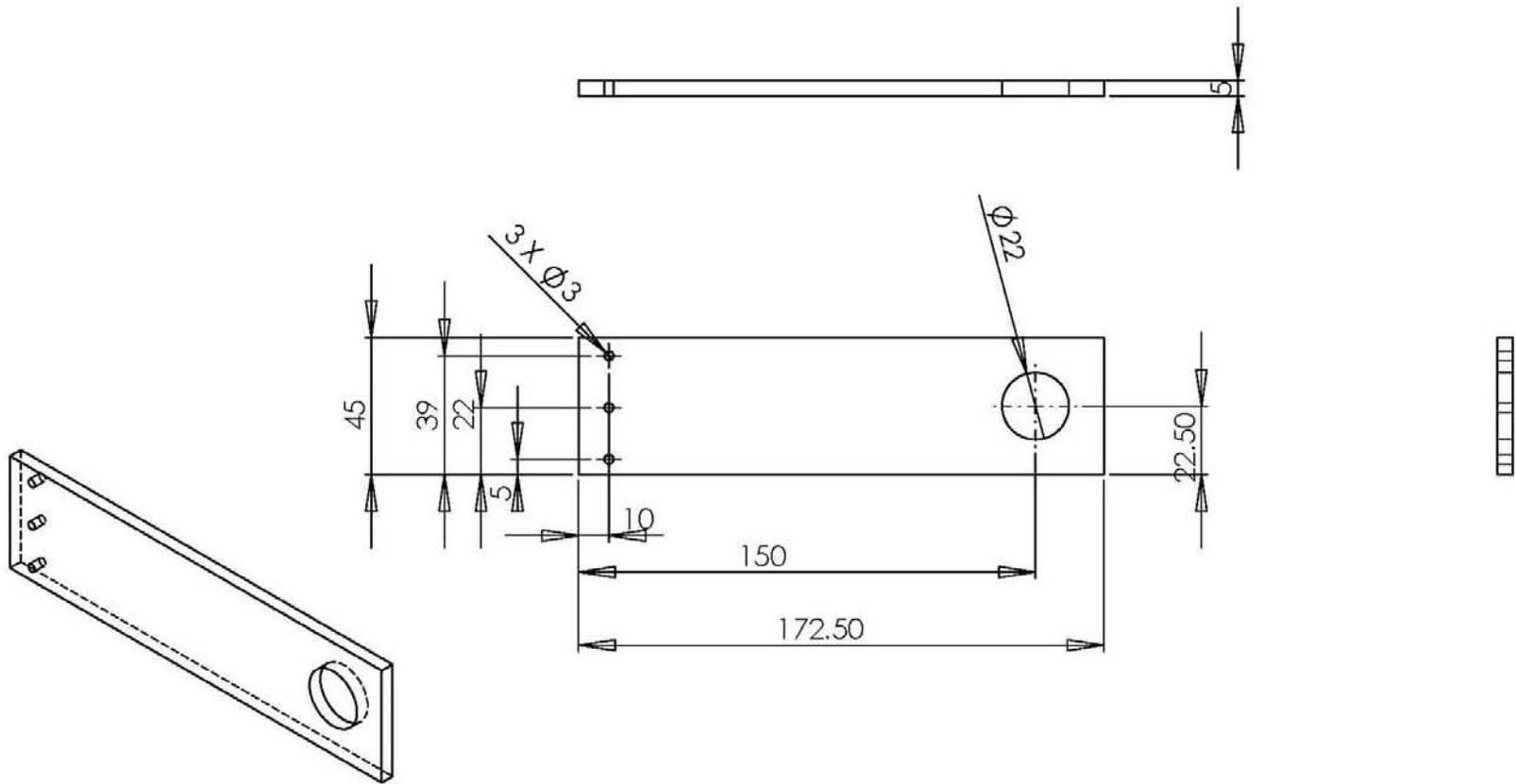
Autor: Peña Medina Erik		Número de plano: 26			OT del Robot
Fecha: 3/07/2007		Número de pieza: G3			
Acotaciones: mm		Tolerancias: mm			



Autor: Peña Medina Erik		Número de plano: 27			OT del Robot
Fecha: 3/07/2007		Número de pieza: G4			
Acotaciones: mm		Tolerancias: mm			



Autor: Peña Medina Erik		Número de plano: 28			OT del Robot
Fecha: 3/07/2007		Número de pieza: G5			
Acotaciones: mm		Tolerancias: mm			



Autor: Peña Medina Erik

Número de plano: 29

Fecha: 3/07/2007

Número de pieza: G6

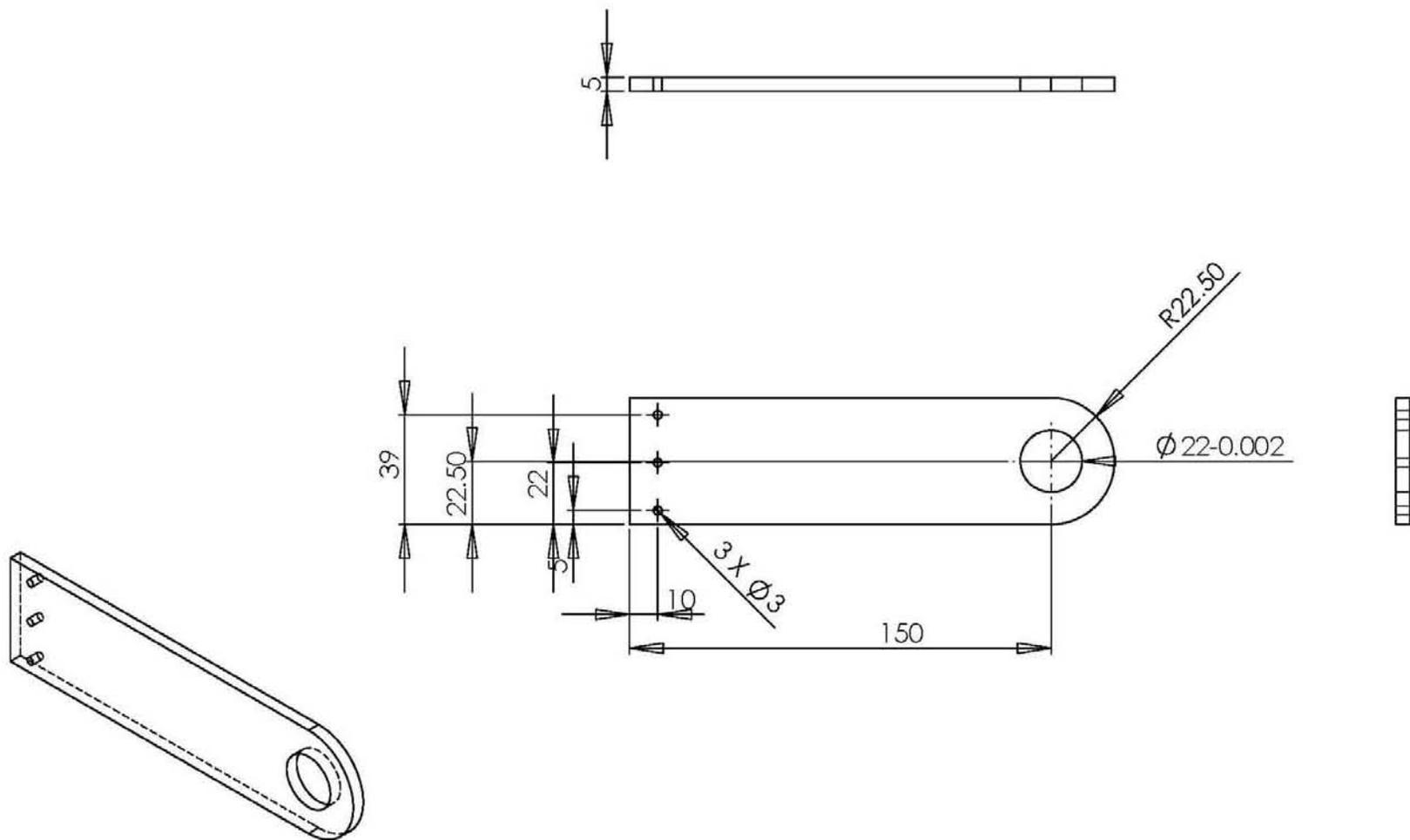


OT del Robot

Acotaciones: mm

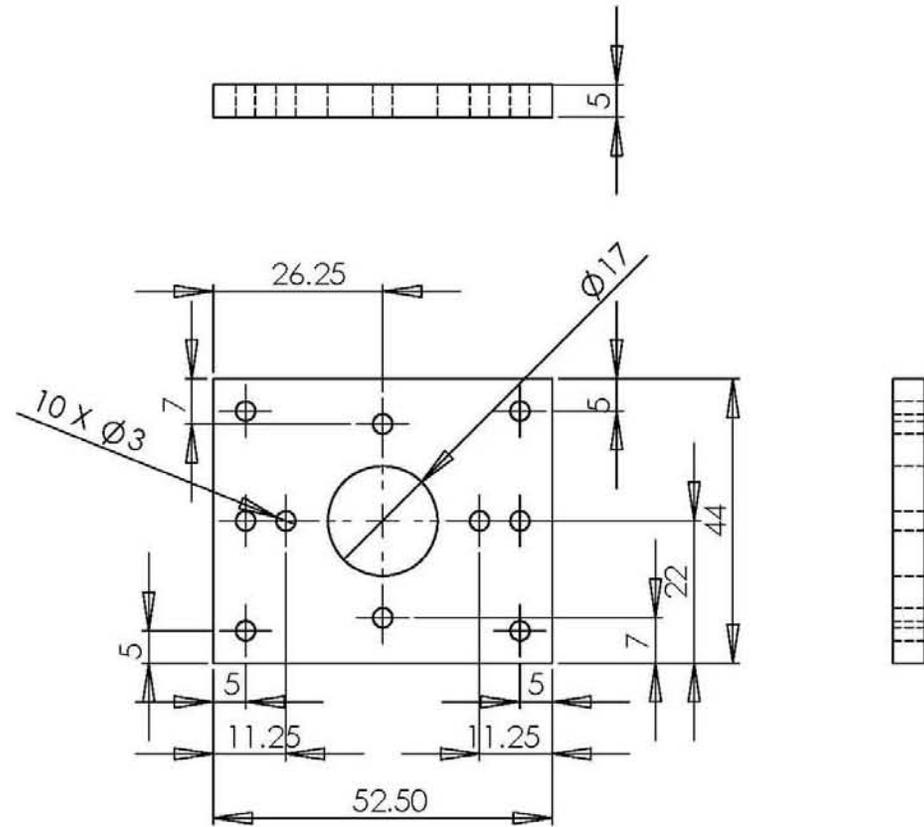
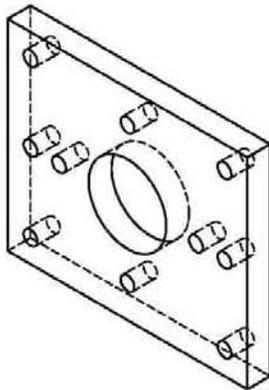
Tolerancias: mm

Material: Aluminio 6063T



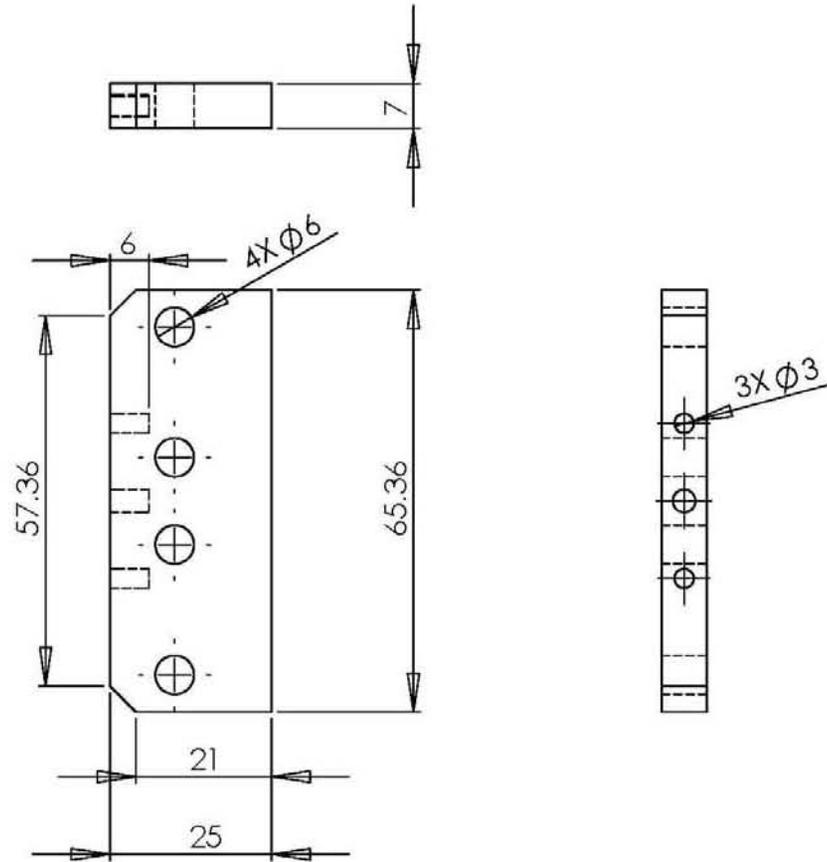
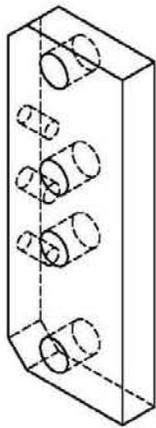
Los barrenos de 3 mm de diametro tienen roca M3

Autor: Peña Medina Erik		Número de plano: 30			OT del Robot
Fecha: 3/07/2007		Número de pieza: G7			
Acotaciones: mm		Tolerancias: mm			



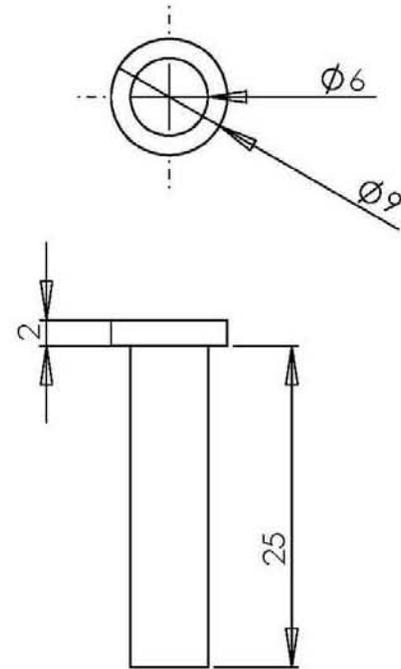
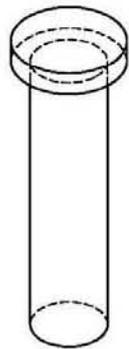
Los barrenos con diametro de 3 mm tienen cuerda M3

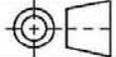
Autor: Peña Medina Erik		Número de plano: 31			OT del Robot
Fecha: 3/07/2007		Número de pieza: G8			
Acotaciones: mm		Tolerancias: mm			

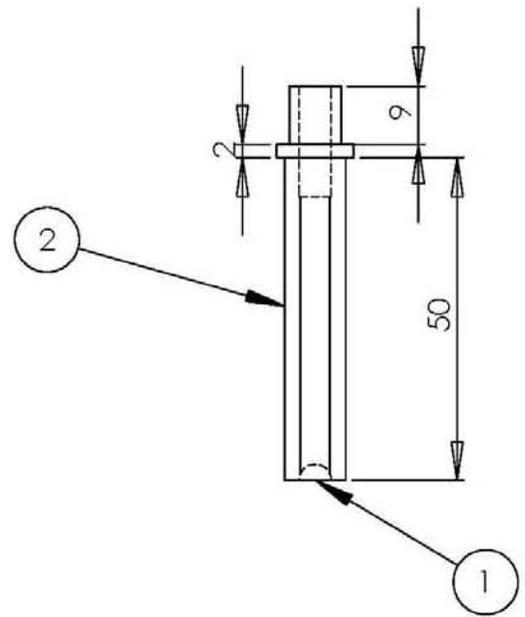
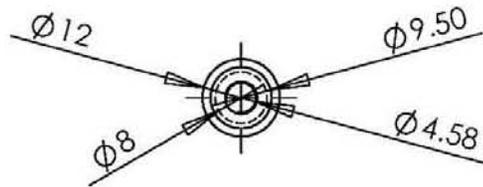


Los barrenos de 3 de diametro tienen cuerda M3

Autor: Peña Medina Erik		Número de plano: 32			OT del Robot
Fecha: 3/07/2007		Número de pieza: G9			
Acotaciones: mm		Tolerancias: mm			

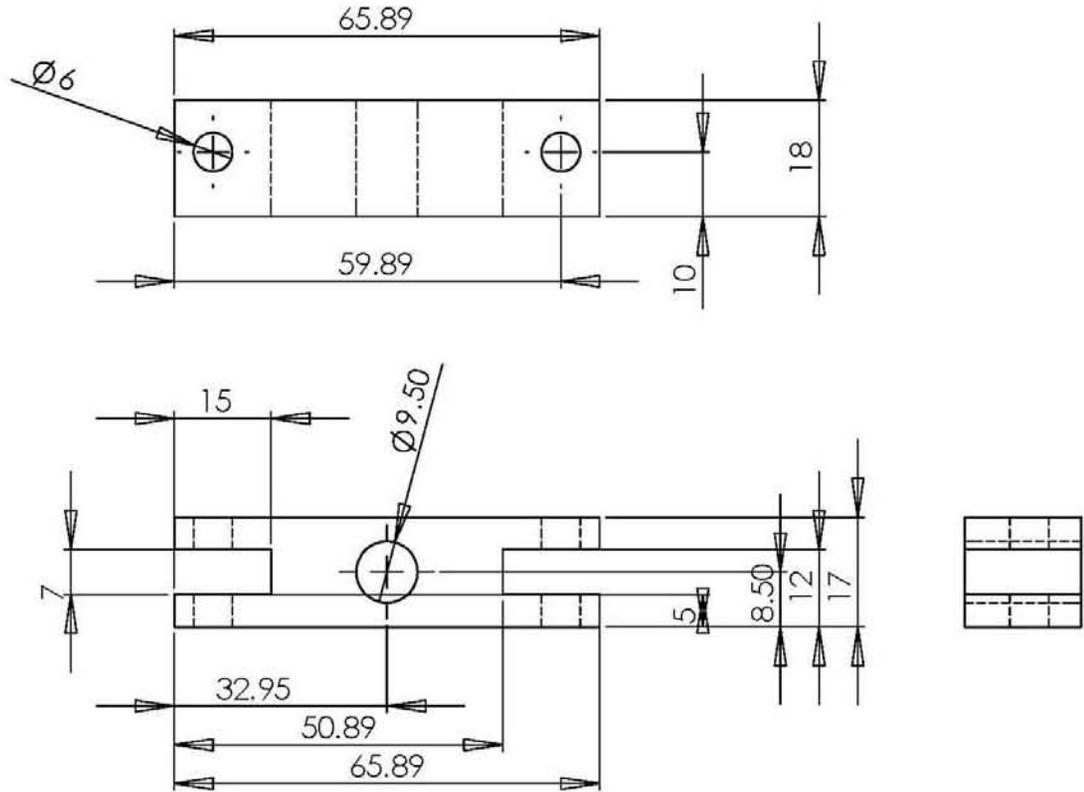
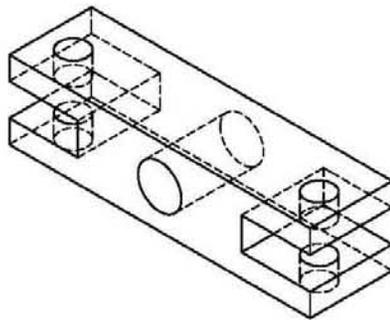


Autor: Peña Medina Erik	Número de plano: 33		OT del Robot
Fecha: 3/07/2007	Número de pieza: G10		
Acotaciones: mm	Tolerancias: mm	Material: Acero 1018	

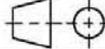


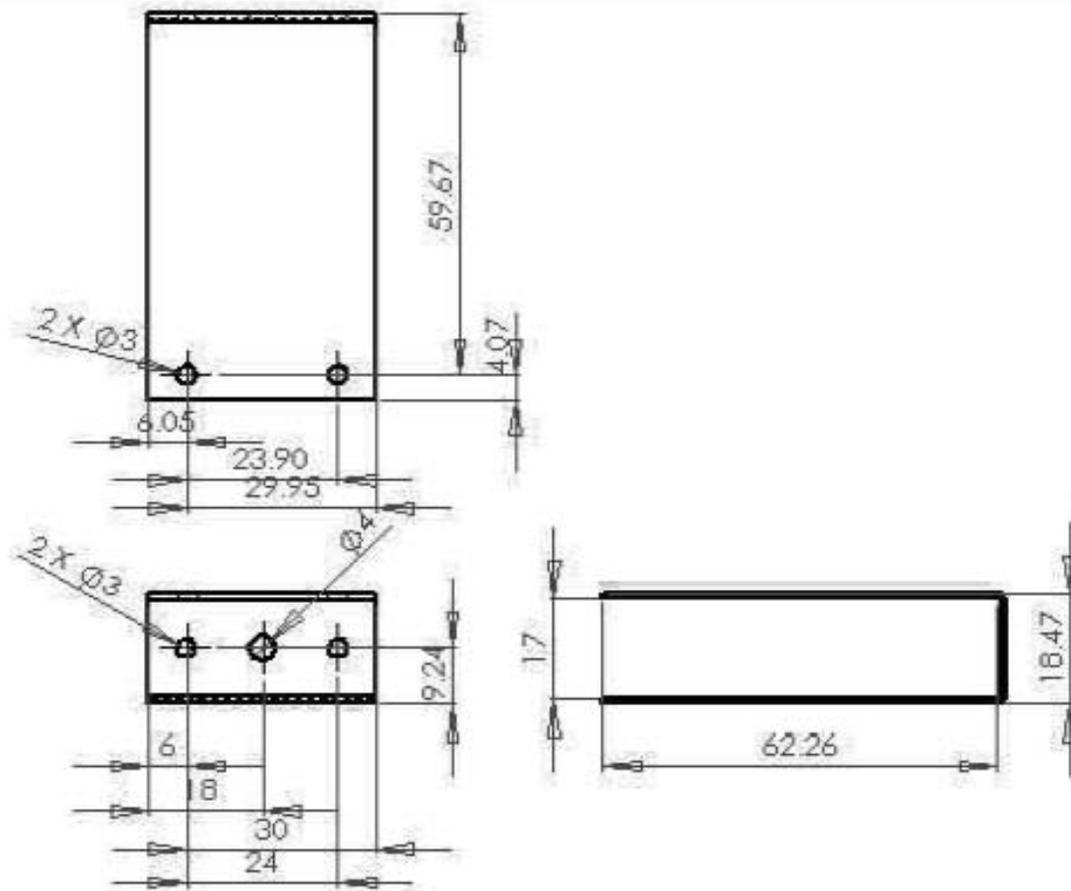
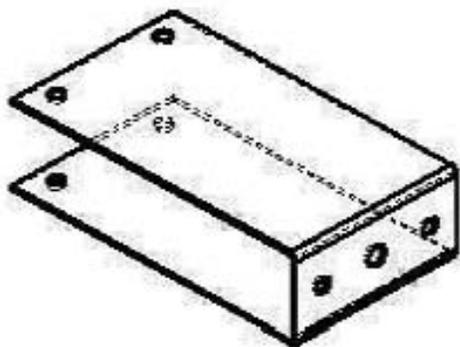
- 1-Barreno con espacio para un bali de 1.5 mm de diametro
- 2-Cuerda de 24 hilo por pulgada

Autor: Peña Medina Erik		Número de plano: 34		
Fecha: 3/07/2007		Número de pieza: G11		
Acotaciones: mm		Tolerancias: mm		



En el barreno de 9.5 lleva una cuerda de 24 hilo por pulgada

Autor: Peña Medina Erik		Número de plano: 35		OT del Robot
Fecha:	Número de pieza: G12			
Acotaciones: mm	Escala:	Material: Aluminio		Tolerancias: mm



La lamina se considera entre calibre 18 y 20

Autor: Peña Medina Erik	Número de plano: 36		OT del Robot
Fecha: 3/07/2007	Número de pieza: G13		
Acotaciones: mm	Tolerancias: mm	Material: Lamina	

Apéndice 1. Planos

Número de plano	Número de pieza	Pieza
1	B1	Placa de la base lateral
2	B2	Placa de la base frontal
3	B3	Tapa de la base
4	H1	Base del Hombro
5	H2	Placa lateral del robot
6	H3	Barra lateral del hombro
7	H4	Ángulo del hombro
8	H5	Cople del Hombro
9	BZ1	Antebrazo
10	BZ2	Brazo
11	BZ3	Eje inferior 1
12	BZ11	Eje inferior 2
13	BZ4	Eje superior 1
14	BZ5	Eje superior 2
15	BZ6	Separador superior 1
16	BZ7	Separador inferior
17	BZ8	Separador superior 2
18	BZ9	Eslabón corto
19	BZ10	Seguro
20	M1	Eje hueco de la muñeca
21	M2	Placa frontal de la muñeca
22	M3	Sujetador del actudor
23	M4	Sujetador del rodamiento
24	G1	Soporte del OT
25	G2	Dedo del OT
26	G3	Eslabón corto del OT
27	G4	Eslabón en escuadra del OT
28	G5	Eslabón largo del OT
29	G6	Eslabón 1 del OT
30	G7	Eslabón 2 del OT
31	G8	Placa del acoplamiento del OT
32	G9	Soporte de los dedos del OT
33	G10	Perno del OT
34	G11	Tornillo actudor del OT
35	G12	Barra transmisora del OT
36	G13	Lamina del OT

Apéndice 2. Análisis de la Trayectoria del OT

El siguiente programa se encuentra en *Mathematica 5.0*. Las operaciones que realiza el programa calculan las ecuaciones de posición del robot con 3 grados de libertad, el posicionamiento del OT se realiza por lo general aparte con más precisión.

Programa:

Colocando como función la matriz de rotación Q y el vector de desplazamiento a.

```
Q[theta_,alpha_]={{Cos[theta],-Sin[theta]*Cos[alpha],Sin[theta]*Sin[alpha]},  
{Sin[theta],Cos[theta]*Cos[alpha],-Cos[theta]*Sin[alpha]},{0,Sin[alpha],Cos[alpha]}};
```

```
a[theta_,b_,d_]={d*Cos[theta],d*Sin[theta],b};
```

Matriz de Rotación y Vector de desplazamiento

```
Q[θ,α]//MatrixForm  
a[θ,b,d]//MatrixForm
```

$$\begin{pmatrix} \cos[\theta] & -\cos[\alpha] \sin[\theta] & \sin[\alpha] \sin[\theta] \\ \sin[\theta] & \cos[\alpha] \cos[\theta] & -\cos[\theta] \sin[\alpha] \\ 0 & \sin[\alpha] & \cos[\alpha] \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \cos[\theta] \\ d \sin[\theta] \\ b \end{pmatrix}$$

Con los parámetros obtenidos de la configuración del manipulador, se sustituyen en cada elemento para obtener el último punto

```
a0=a[0,h,0];  
Q1=Q[θ1,90*Degree];  
a1=a[θ1,r,0];  
Q2=Q[θ2-90*Degree,0];  
a2=a[θ2-90*Degree,0,d];  
Q3=Q[θ3-90*Degree,0];  
a3=a[θ3-90*Degree,0,c];  
u=a0+a1+Q1.a2+Q1.Q2.a3;
```

Solución de la "cinemática inversa" del manipulador

El programa resuelve las ecuaciones mediante el método de Newton-Rahpson:

```
Cleat[resuelve];
h=.40;
r=.35;
d=.40;
c=.30;
x1=0.2;x2=0.4;
y1=0.1;y2=-0.1;
z1=1.15;z2=0.8;
T=3;
Θa=10*Degree;
Θb=10*Degree;
Θc=60*Degree;
For[tp=0,tp≤30,tp+=3,
ttp=(tp/10)//N;
x[tp]=x1+(x2+x1)*(10*(ttp/T)^3-15*(ttp/T)^4+6*(ttp/T)^5);
y[tp]=y1+(y2+y1)*(10*(ttp/T)^3-15*(ttp/T)^4+6*(ttp/T)^5);
z[tp]=z1+(z2+z1)*(10*(ttp/T)^3-15*(ttp/T)^4+6*(ttp/T)^5);
resuelve[tp]=FindRoot[{
u[[1]]==x[tp],u[[2]]==y[tp],u[[3]]==z[tp]},
{θ1,θa},{θ2,θb},{θ3,θc},
MaxIterations→50];(*cierra FindRoot*)
θa=θ1/.resuelve[tp];
θb=θ2/.resuelve[tp];
θc=θ3/.resuelve[tp];
```

Programación de la trayectoria

```
tray=Line[tablaXYZ];
trayecto1=Graphics3D[{ AbsoluteThickness[1],RGBColor[0,1,0], tray}];
Show[trayecto1,ViewPoint->{0.617, -3.318, 0.245}];
```

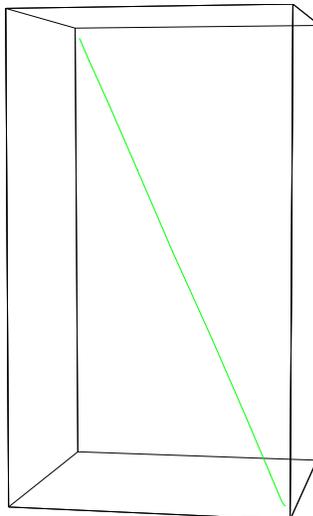


Figura A2-1 Trayectoria Programada

Programación para la visualización del comportamiento matemático de los eslabones siguiendo la trayectoria programada

```
tablaXYZ = Table[{x[i],y[i],z[i]},{i,0,30,3}];
tray = Line[tablaXYZ]
trayecto = Graphics3D[{AbsoluteThickness[1],RGBColor[0,1,0],tray}];
For[tp = 0, tp ≤ 30,tp+=3,
tpp=(tp/10//N;
x[tp]=x1+(x2+x1)*(10*(tpp/T)^3-15*(tpp/T)^4+6*(tpp/T)^5);
y[tp]=y1+(y2+y1)*(10*(tpp/T)^3-15*(tpp/T)^4+6*(tpp/T)^5);
z[tp]=z1+(z2+z1)*(10*(tpp/T)^3-15*(tpp/T)^4+6*(tpp/T)^5);
cero={0,0,0};
a0={0,0,r};
linea1=line[{cero,a0};
linea2=line[{a0,a0+a1}/.resuelve[tp];
linea3=line[{a0+a1, a0+a1+Q1.a2}/.resuelve[tp];
linea4=line[{a0+a1+Q1.a2, a0+a1+Q1.a2+Q1.Q2.a3}/.resuelve[tp];
barra1=Graphics3D[{AbsoluteThickness[2],RGBColor[1,0,0],linea1}];
barra2=Graphics3D[{AbsoluteThickness[2],RGBColor[1,1,0],linea2}];
barra3=Graphics3D[{AbsoluteThickness[2],RGBColor[0,0,1],linea3}];
barra4=Graphics3D[{AbsoluteThickness[2],RGBColor[1,0,0],linea4}];
Show[barra1, barra2, barra3, barra4, trayecto, trayecto1,
Boxed→True,
Axes→True,
AxesLabel→{"X","Y","Z"},
PlotRange→{{-1,1},{-1,1},{-0.2,1.5}},
ViewPoint->{0.833,3.188,0.713}
];
]
```

Apéndice 3. Construcción del prototipo

La construcción del prototipo del robot forma parte del proceso total de diseño. El presente anexo es una breve descripción del proceso de manufactura de las piezas y ajustes hechos en el ensamble.

Descripción del equipo

La manufactura de las piezas fue hecha con los recursos disponibles en los laboratorios de manufactura de la facultad de ingeniería de la UNAM. El equipo de usado constó de máquinas convencionales (torno, fresa y cepillo), maquinas de control numérico y una impresora de prototipos rápidos (impresora en tres dimensiones).



Figura A3.1 Torno usado en la manufactura



Figura A3.2 Fresa Induma usada en la manufactura



Figura A3.3 Máquina de control numérico *EMCO VMD-300*



Figura A3.4 Máquina de prototipos rápidos

Es muy importante conocer el equipo disponible para el proyecto, la calidad de las piezas dependen de sus características y condiciones.

Cortadores

Para conformar las piezas se usaron diferentes tipos de cortadores de acero cobalto dependiendo de la máquina y de la operación realizada.



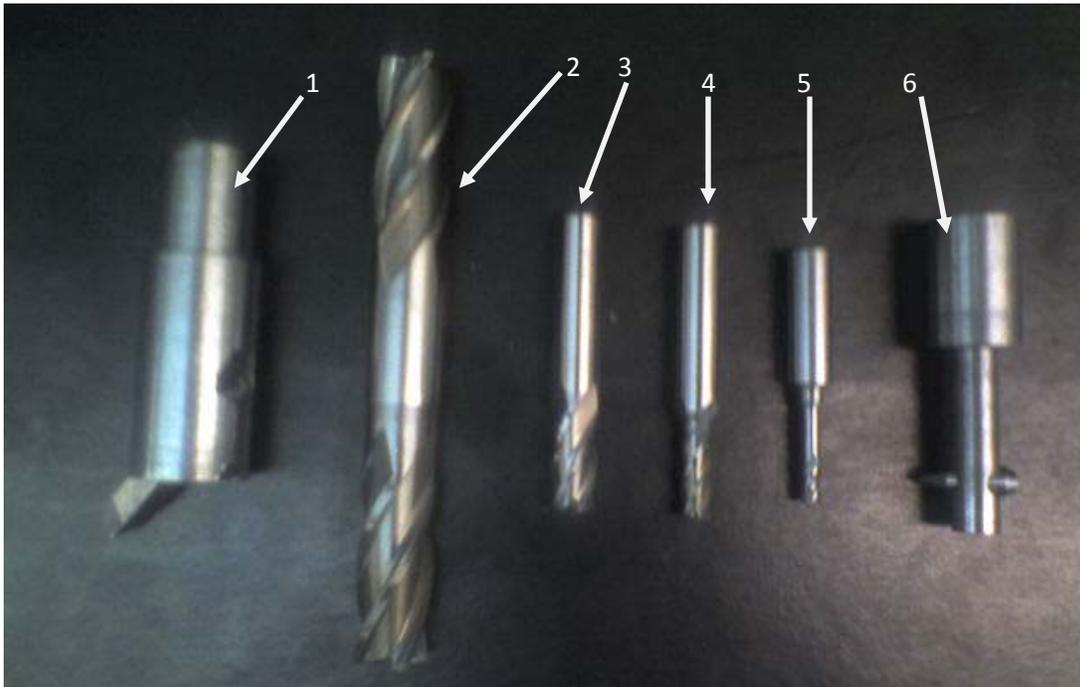
Figura A.3.5 Brocas



Figura A.3.6 Buriles

En la figura A.3.5 aparecen las brocas para acero usadas para realizar barrenos en las diferentes piezas, fueron utilizadas en todas las máquinas excepto en la impresora en tres dimensiones, debido a que las piezas hechas por ese dispositivo son piezas terminales. Una de la modificaciones hechas al diseño se debió a la dificultad de encontrar brocas milimétricas por lo que algunas dimensiones fueron ajustadas a medidas estándar en sistema ingles. Los diámetros de las brocas usadas fueron $3/4$, $5/16$, $1/4$, $3/64$ y $11/32$ de pulgada.

Los buriles en la figura A.3.6 son de $5/16$ y $1/4$ de pulgada. El buril de $5/16$ se usó en el cepillo y los buriles de $1/4$ en el torno.



En la figura A.3.7 se presentan las herramientas usadas para fresar:

1. Buring heat (pata de gallo)
2. Cortador vertical doble de 5/8"
3. Cortador vertical de 1/4"
4. Cortador vertical de 3/8" con sanco de 1/4"
5. Cortador vertical de 4 [mm] de diámetro con sanco de 3/8"
6. Herramienta de interiores

El otro dispositivo donde se usó un cortador vertical fue en la máquina *EMCO VMD-300*, el cortador tiene un diámetro de 4[mm] con un sanco de 3/8".



Figura A.3.8 Machuelos

Los machuelos usados para hacer las cuerdas los barrenos son de las siguientes medidas: 3/8" con 24 hilos por pulgada, 6M y 3M con cuerda estándar. Los machuelos ayudaron a reducir significativamente el número de piezas y brindaron una buena fijación.

Velocidades de corte

La velocidad de maquinado depende del material y del tipo de herramienta, en este caso la mayoría de las piezas son de aluminio y nylon, que se pueden considerar materiales blandos comparados con los aceros. Las únicas piezas de acero 1018 son las de la base.

Las piezas de aluminio y nylon se maquinaron en la fresa, torno y CNC, con velocidades entre 1800 hasta 2790 [*rpm*], el desbaste máximo por pasada fue alrededor de 36 milésimas de pulgada (1 [*mm*]) con un avance aproximado entre 0.5 y 1 [*cm/s*] (aunque en algunos casos el avance fue más lento por la geometría de las piezas). Otro factor que afecta la velocidad de corte es el refrigerante, para

la mayoría de los casos fue aceite convencional para auto y cuando se buscaba un buen acabado se usó petróleo.

Una observación de los materiales usados era su calidad, el aluminio se pegaba a las herramientas lo que pudo ocasionar su atascamiento y su ruptura. El problema con el nylon se presenta cuando la viruta no se rompe y se enreda con la herramienta lo que puede provocar su ruptura. Durante el proceso de maquinado se rompieron dos herramientas, una fresa de 1/4" y un buril con el filo para trabajar interiores en el torno.

Para los ejes de acero la velocidad fue más lenta dependiendo del desbaste que se buscaba en la pieza. Las tolerancias de los ejes fueron de 1 a 2 [μm], para lograr las tolerancias se usaron lijas 80 para hacer una aproximación, el acabado final fue con una lija de 300 usando aceite como lubricante.

CNC

Para las piezas del OT del robot se requirió de precisión, por ellos en su mayoría se maquinaron en la *EMCO VMD-300*. Para usar este dispositivo fue necesario dibujar las piezas en CAD y transformarlas a un formato compatible con *MasterCAM 9.0*. En el CAM se simularon las trayectorias que debía de seguir la herramienta, con una profundidad y avances determinados por el operador de la máquina. El refrigerante que usa el CNC es aceite convencional de auto.

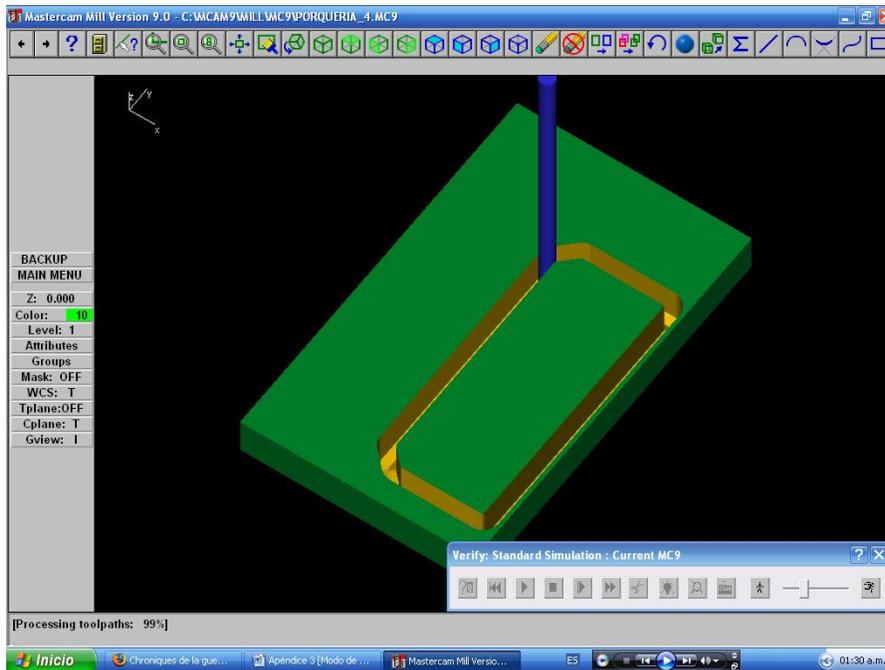


Figura A.3.9 Simulación en *MasterCAM*

En la figura A.3.9 se puede apreciar una simulación de maquinado de una pieza, el bloque representa la pieza en bruto, el cilindro representa el cortador haciendo un ciclo de corte siguiendo una trayectoria de la forma deseada. El programa interpreta una serie de líneas que forman una cadena cerrada, con base a esa información calcula y compensa una trayectoria de acuerdo al diámetro de la pieza. La trayectoria pasa a pos procesamiento donde se determinan una serie de instrucciones compatibles con la máquina de control numérico que maquina las piezas. Antes del maquinado se deben compensar las dimensiones del cortador montado en la torreta del CNC, los únicos parámetros que puede variar el operador durante el proceso son la inyección de lubricante en la pieza y la potencia con la corta la máquina, el avance y la velocidad de corte ya están establecidas en el programa cargado en la memoria del CNC.

Máquina de prototipos rápidos

Para ahorrar tiempo en el maquinado de una pieza complicada, se imprimió en tres dimensiones. La impresión se compone de una serie de trayectorias en línea

recta, esta información se obtiene al transformar una pieza en CAD en formato convencional de pieza a otro formato (.sat) que transforma la información del archivo en líneas, formando figuras elementales.

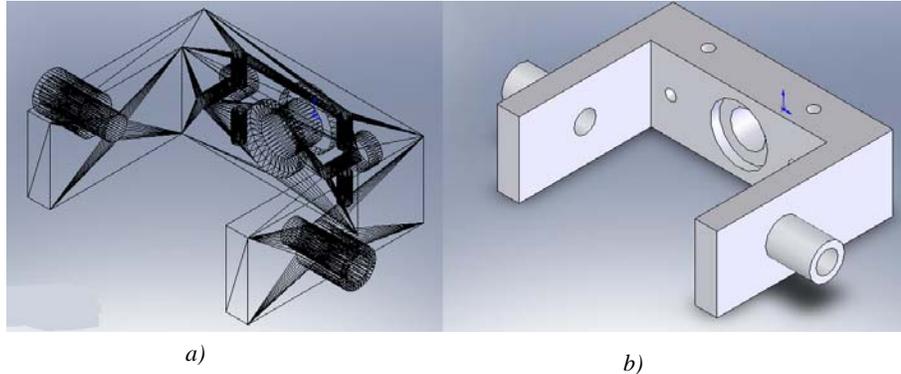


Figura A.3.10 *a)* Figura en formato .sat *b)* figura en formato convencional (.part)

El material con el que se imprime la pieza es Acrilonitrila, Butadieno y Estireno (ABS), este material es inyectado por pequeñas boquillas sujetas a un manipulador que describe las trayectorias del archivo. El material necesita un soporte mientras se endurece, el material de soporte más común es la fécula de maíz que también se inyecta mediante boquillas en el manipulador del ABS. Las propiedades del material ABS dependen del agente catalizador que se use y de la cantidad con la que es inyectado. Esos parámetros son manejados por el operador de la máquina.

Comentario

Este apéndice es una pequeña descripción del proceso de manufactura, el reporte de la construcción del prototipo debe ser más extenso y detallado, por cuestiones de tiempo y trabajo se redujo a esta pequeña descripción.