



# UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ

Facultad de Ingeniería

Centro de Investigación y Estudios de Posgrado

DESARROLLO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE  
MANIPULACIÓN X Y Z DE PROPÓSITO GENERAL

TESIS

Para obtener el grado de:

MAESTRO EN INGENIERÍA MECÁNICA

Presenta:

ING. JOSÉ ÁNGEL JARAMILLO RODRÍGUEZ

Asesor:

DR. HUGO IVÁN MEDELLÍN CASTILLO

SAN LUIS POTOSÍ, S.L.P.

SEPTIEMBRE 2013

15 de agosto de 2013

**AL ING. JOSÉ ÁNGEL JARAMILLO RODRÍGUEZ  
P R E S E N T E.**

En atención a su solicitud de Temario, presentada por el **Dr. Hugo Iván Medellín Castillo**, Asesor de la Tesis que desarrollará Usted, con el objeto de obtener el Grado de **Maestría en Ingeniería Mecánica**. Me es grato comunicarle que en la Sesión de Consejo Técnico Consultivo celebrada el día 15 de agosto del presente año, fue aprobado el Temario propuesto:

**TEMARIO:**

**"DESARROLLO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE  
MANIPULACIÓN X Y Z DE PROPÓSITO GENERAL"**

Introducción.

- I. Generalidades de los sistemas de manipulación cartesianos.
- II. Diseño conceptual del sistema de manipulación cartesiano.
- III. Diseño de detalle del sistema de manipulación cartesiano.
- IV. Construcción, pruebas y evaluación del sistema.

Conclusiones.

Bibliografía.

Apéndice.



**"MODOS ET CUNCTARUM RERUM MENSURAS AUDEBO"**

**A T E N T A M E N T E**

**M.I. JORGE ALBERTO PÉREZ GONZÁLEZ  
DIRECTOR.**



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA  
DE SAN LUIS POTOSÍ  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DIRECCION

**Copia. Archivo.**  
\*etn.



**FACULTAD  
DE INGENIERÍA**

Av. Manuel Nava 8  
Zona Universitaria • CP 78290  
San Luis Potosí, S.L.P.  
tel. (444) 826 2330 al39  
fax (444) 826 2336  
www.uaslp.mx

# Resumen

El proyecto de tesis comprende el diseño y construcción de un robot manipulador cartesiano con movimientos controlados en los ejes X, Y, y Z, de manera que pueda configurarse para cualquier propósito en general. El objetivo es contar con un sistema de manipulación cartesiano en el cual se pueden desarrollar distintas aplicaciones enfocadas a la investigación y experimentación en áreas de manufactura y prototipado rápido. Para ello es preciso generar los diseños de los correspondientes sistemas mecánico, eléctrico, electrónico, y de control.

Para llevar a cabo este proyecto fue necesario hacer una revisión bibliográfica de los manipuladores cartesianos y su funcionamiento. También fue necesario realizar una investigación del estado del arte de los dispositivos que desarrollan tareas similares en aplicaciones de manufactura rápida, y evaluar los progresos que existen en cuanto al diseño de dichos sistemas, su construcción y funcionamiento.

De esta manera se definieron las características principales que el robot manipulador cartesiano debiera satisfacer. Con base en estos requerimientos, el diseño y construcción del robot se dividió en los siguientes subsistemas: mecánico, eléctrico, electrónico y de control. El diseño de detalle y construcción del robot manipulador se muestra en el presente trabajo. Después de la fabricación del robot se realizó un análisis y evaluación del desempeño del prototipo obtenido, los resultados se presentan y discuten en esta tesis.

# Agradecimientos

Quiero agradecer a todas aquellas personas que me brindaron su apoyo durante la realización de este trabajo de Tesis:

A mis compañeros, por ofrecerme su amistad y compartir conmigo sus habilidades y conocimientos, las cuales han enriquecido mi formación académica y profesional durante mi estancia en el posgrado.

A mis profesores por haberme instruido; con sus enseñanzas pude cristalizar los conocimientos en este presente trabajo.

A mi asesor, el Dr. Hugo Medellín por haberme dado la oportunidad de llevar a cabo este proyecto bajo su dirección. Agradezco la confianza que me brindó para desarrollar este trabajo y todo el tiempo durante el cual me brindó su apoyo.

A mi familia por su comprensión, su solidaridad y sus consejos con los cuales encontré en más de una ocasión las respuestas a las dificultades que surgieron a lo largo de todo este tiempo.

Y en especial quiero agradecer mi padre, quien me apoyó durante todo el desarrollo de este trabajo. Para él principalmente mi más profundo agradecimiento y admiración, sin su ayuda no habría sido posible finalizar este proyecto.

# Índice

Resumen .....	i
Agradecimientos .....	ii
Índice.....	iii
Introducción.....	1
Antecedentes.....	1
Justificación.....	2
Objetivo de la tesis .....	3
Objetivos particulares.....	3
Organización de la tesis.....	3
Capítulo 1 .....	4
Generalidades de los sistemas de manipulación cartesianos.....	4
1.1 Sistemas de manipulación cartesianos .....	4
1.1.1 Antecedes históricos .....	5
1.1.2 Principio de funcionamiento .....	8
1.2 Características principales.....	9
1.3 Configuraciones de sistemas de manipulación cartesianos .....	11
1.3.1 Configuración estándar .....	11
1.3.2 Configuración Gantry.....	12
1.3.3 Configuración ASRS .....	13
1.4 Aplicaciones .....	14
1.4.1 Procesos de manufactura tradicionales.....	14
1.4.2 Procesos avanzados de manufactura.....	14
1.4.3 Equipos de impresión.....	15
1.4.4 Grúas Gantry.....	16
1.4.5 Manejo de materiales .....	16
1.4.6 Inspección y medición .....	17
1.4.7 Tecnologías rápidas.....	17
1.5 Estado del arte .....	18
1.5.1 Fab@home .....	18
1.5.2 RepRap.....	20
1.5.3 Otros dispositivos.....	21

1.5.4 Posicionamiento y control.....	23
Capítulo 2 .....	26
Diseño conceptual del sistema de manipulación cartesiano.....	26
2.1 Metodología de diseño .....	26
2.2 Identificación de la necesidad .....	27
2.3 Planteamiento del problema.....	28
2.4 Especificaciones del dispositivo.....	29
2.5 Diseño conceptual .....	29
2.6 Evaluación de diseños conceptuales.....	31
2.6.1 Diseño conceptual del sistema mecánico.....	31
2.6.2 Diseño conceptual del sistema eléctrico y electrónico .....	34
2.6.3 Diseño conceptual del sistema de control.....	35
2.7 Diseño de detalle .....	37
2.8 Fabricación del prototipo .....	38
2.9 Evaluación y pruebas.....	39
2.10 Rediseño .....	39
2.11 Producción del producto.....	40
Capítulo 3 .....	41
Diseño de detalle del sistema de manipulación cartesiano.....	41
3.1 Análisis cinemático .....	41
3.1.1 Cinemática directa.....	41
3.1.2 Cinemática inversa.....	44
3.2 Análisis dinámico .....	45
3.3 Diseño de detalle del sistema mecánico.....	50
3.3.1 Cálculos de diseño para los ejes del SMC.....	50
3.4 Simulación numérica .....	57
3.5 Simulación MEF.....	59
3.6 Diseño de detalle del sistema eléctrico y electrónico del SMC.....	63
3.6.1 Circuito eléctrico y componentes principales .....	63
3.6.2 Alimentación y conexión del manipulador .....	66
3.7 Diseño de detalle del sistema de control del SMC .....	68
3.7.1 Firmware y diagrama de control.....	68
3.7.2 Protocolo de comunicación .....	71
3.7.3 Desarrollo de interface gráfica.....	74

3.8 Lista de materiales.....	76
Capítulo 4 .....	78
Construcción y pruebas del sistema .....	78
4.1 Características finales del manipulador .....	78
4.2 Construcción y ensamble .....	82
4.3 Fase de pruebas .....	89
4.3.1 Resolución .....	90
4.3.2 Exactitud .....	91
4.3.3 Precisión.....	93
4.3.4 Tiempo de respuesta.....	96
4.3.5 Velocidad máxima.....	97
4.3.6 Espacio de trabajo.....	98
4.4 Evaluación del desempeño del SMC .....	98
4.5 Discusión de resultados.....	99
Conclusiones .....	101
Bibliografía .....	105
Apéndice A.....	A-1
A.1 Eje X.....	A-1
A.2 Eje Y.....	A-2
A.3 Eje Z.....	A-3
A.4 Ensamble del SMC.....	A-4
A.5 Lista de materiales mecánicos.....	A-5
Apéndice B.....	B-1
B.1 Conexiones de la tarjeta de potencia.....	B-1
B.2 Circuito de control.....	B-2
B.3 Lista de materiales eléctricos.....	B-3
Apéndice C.....	C-1
C.1 Algoritmo de simulación numérica en MATLAB.....	C-1
C.2 Firmware del PIC 18F4550.....	C-2
C.3 Programación de la interface visual.....	C-3
Apéndice D.....	D-1
D.1 Datos técnicos del tornillo de bolas.....	D-1
D.2 Hoja técnica del motor de pasos.....	D-2

D.3 Datos técnicos de la tarjeta de potencia.....	D-3
D.4 Datos técnicos del PIC 18F4550.....	D-4
D.5 Ficha técnica del programador del PIC.....	D-5



# Introducción

## Antecedentes

Los procesos de manufactura en la actualidad requieren de maquinaria especializada y dispositivos de alto desempeño que permitan fabricar productos de alta calidad, en el menor tiempo posible y al mejor precio. Desde hace varias décadas el uso de robots industriales y manipuladores cartesianos se ha hecho imprescindible en estas actividades debido a que sus características hacen más eficiente el desarrollo de actividades que implican gran precisión en lapsos cortos de tiempo en la producción a gran escala.

El concepto de los manipuladores cartesianos surge después de la Segunda Guerra Mundial con la construcción de la primera máquina de control numérico en 1952, como respuesta a la necesidad de incrementar la productividad y la calidad en los procesos de manufactura, [1]. Ideada originalmente por John Parsons y desarrollada finalmente por el MIT, la primera máquina de control numérico consistía en una máquina herramienta cuyos movimientos eran controlados por medio de tarjetas perforadas que contenían información de las trayectorias de las herramientas de corte y del desplazamiento de la mesa de trabajo. Se impulsaba por mecanismos de piñón y cadenas de transmisión acoplados a engranes que sustituían las manivelas, proporcionando movimiento automático en cada uno de los ejes cartesianos X, Y y Z. Posteriormente se desarrollaron métodos más eficientes de control, reemplazando las tarjetas perforadas por tarjetas magnéticas, dispositivos de memoria y finalmente computadoras. Así mismo se adecuaron dispositivos mecánicos como bandas y poleas dentadas o tornillos de potencia, motores de pasos y servomotores, así como componentes electrónicos y sensores de posición de mayor capacidad y rapidez, que potenciaron las capacidades de los sistemas de manipulación cartesianos permitiendo que su uso se difundiera en un vasto número de campos de aplicación.

Los robots cartesianos pueden efectuar labores muy variadas pasando de las operaciones más demandantes del maquinado tradicional hasta tareas en procesos de manufactura más avanzados como la electroerosión, la soldadura, el corte con láser, plasma o por chorro de agua; en labores de inspección y manejo de productos alimenticios o medicamentos; en tareas de carga y descarga de materiales, ensamble de componentes, y más recientemente en la elaboración de prototipos rápidos por medio de impresoras 3D.

Con la aparición de la estereolitografía en 1986 nace el prototipado rápido, el cual surge ante la necesidad crear de manera rápida modelos tridimensionales reales, facilitando la interacción con el producto durante las fases de desarrollo [3]. De esta manera fueron creadas las primeras máquinas de prototipado rápido, cuya función consistía en la aplicación puntual de radiación UV a través de trayectorias predefinidas solidificando capas superpuestas de resinas líquidas fotosensibles. En un principio estas

máquinas tenían precios de venta muy elevados, sin embargo la flexibilidad de su diseño permitió que los costos de fabricación se redujeran a tal grado que hoy es posible construir máquinas de prototipado rápido basadas en manipuladores cartesianos. Ejemplos de estos aparatos son las impresoras 3D de Fab@home, RepRap y RapMan [2]-[4] que permiten crear prototipos rápidos mediante la impresión tridimensional de modelos CAD usando polímeros.

La característica más atractiva de los manipuladores cartesianos es la simplicidad de su construcción y la variedad de funciones que pueden tener, adoptando formas de pequeños centros de maquinado, máquinas de prototipado y manufactura rápida, e incluso impresoras 3D de tejido humano [5]-[8]. Las capacidades de un manipulador cartesiano son casi ilimitadas, proporcionando una amplia variedad de usos que van más allá de la realización de procesos de manufactura, es decir, puede ser empleado en laboratorios de investigación como herramienta de trabajo, análisis de mediciones y métodos de posicionamiento de gran precisión.

## **Justificación**

Aunque México es un país dedicado mayormente al sector de los servicios, el ramo de la manufactura le sigue en importancia dentro de los indicadores de la economía nacional con una contribución del 31% al PIB [10]. Las inversiones dedicadas a la industria manufacturera son superiores a las que se destinan al comercio, las comunicaciones y transportes, actividades agropecuarias, construcción, energía y otros servicios: esto implica un desarrollo cada vez más importante en actividades que involucren procesos de manufactura de cualquier tipo, principalmente en la industria automotriz, petroquímica, textil, de alimentos y de bebidas.

La necesidad de máquinas y dispositivos como los sistemas de manipulación cartesianos se hace evidente en base a estas estadísticas, más aún cuando se busca aumentar la productividad. La calidad en el producto final debe crecer y los costos de desarrollo y fabricación deben reducirse. Mediante técnicas de manufactura rápida, como el prototipado, se puede lograr este objetivo. Sin embargo, a pesar de las ventajas de estas tecnologías, el acceso a ellas es aun limitado por el precio elevado de los equipos y accesorios. Esta característica restringe la disponibilidad de equipos para desarrollar productos o tecnología.

Por lo anterior, se observa la necesidad de desarrollar un sistema de manipulación cartesiano X Y Z el cual pueda ser utilizado en una gran variedad de aplicaciones de manufactura tradicional y avanzada. En este sentido, se plantea en el diseño la posibilidad de incorporar herramientas o accesorios que agreguen flexibilidad al sistema para desempeñar tareas diversas.

## **Objetivo de la tesis**

El proyecto de tesis comprende el diseño y construcción de un manipulador cartesiano con movimientos X, Y, y Z controlados, de propósito general y de bajo costo. El objetivo es contar con un sistema de manipulación cartesiano en el cual se puedan desarrollar aplicaciones de investigación en manufactura no convencional y prototipado rápido. Para ello se requiere diseñar el sistema mecánico, el sistema eléctrico y electrónico, y el control.

## **Objetivos particulares**

Para lograr el objetivo del proyecto se definieron los siguientes objetivos particulares:

1. Desarrollar el diseño conceptual y de detalle del sistema de manipulación cartesiano.
2. Construir el sistema de manipulación cartesiano.
3. Minimizar los costos de fabricación del sistema utilizando materiales y componentes estándar, económicos y de fácil acceso.
4. Desarrollar e implementar el control de posición desde la computadora (punto a punto) de manera que puedan generarse trayectorias controladas dentro del espacio de trabajo del manipulador.
5. Proporcionar adaptabilidad para aplicaciones de laboratorio, didácticas y de investigación.

## **Organización de la tesis**

La organización de este documento se describe a continuación. El primer capítulo contiene las generalidades de los sistemas de manipulación cartesiana, donde se hace una revisión del estado del arte y de las aplicaciones de estos dispositivos. El segundo capítulo trata sobre el diseño conceptual del manipulador, haciendo una descripción completa del proceso de diseño. En el tercer capítulo se presenta el diseño de detalle del manipulador. El cuarto capítulo describe el proceso de construcción y ensamble, así como los resultados de las pruebas realizadas para evaluar el desempeño del sistema de manipulación. Finalmente se presentan las conclusiones obtenidas del desarrollo del proyecto.

# Capítulo 1

## Generalidades de los sistemas de manipulación cartesianos

Un sistema de manipulación cartesiano (SMC) es un dispositivo automático integrado por 3 ejes, (X, Y y Z), que coinciden con los ejes de un sistema de coordenadas ortogonales. El desarrollo de estos dispositivos comenzó hace más de 30 años, habilitando aplicaciones en una amplia variedad de campos de trabajo y de estudio. En este capítulo se aborda la descripción del concepto de los sistemas de manipulación cartesianos, su funcionamiento y sus aplicaciones.

### 1.1 Sistemas de manipulación cartesianos

Los manipuladores cartesianos tienen una estructura que se compone de articulaciones prismáticas que permiten movimiento lineal mediante el deslizamiento sobre sus ejes, que corresponden precisamente a los del sistema coordenado cartesiano X, Y y Z. La cantidad de juntas prismáticas corresponde al número de grados de libertad, esto significa que las posiciones que se desean alcanzar dependen directamente de los 3 actuadores que impulsan el movimiento en los ejes del dispositivo. Aunque puede tomarse cualquiera de los ejes, el órgano efector final está situado por lo general en el eje Z, restringiendo el trabajo únicamente sobre planos rectos. El espacio de trabajo que caracteriza a estos dispositivos adopta la forma de un prisma rectangular donde se contienen todos los puntos que el manipulador puede alcanzar al desplazarse de manera individual o compuesta sobre cualquiera de sus guías (Figura 1.1). La localización del origen o punto de referencia por lo general se define en alguna de las intersecciones de los 3 ejes de acción, lo que permite medir las distancias con respecto a cada plano coordenado.

Una característica común en estos manipuladores es la gran capacidad de carga que pueden soportar en comparación con la que ofrecen otros robots o sistemas de manipulación con diferentes configuraciones. Esto se debe a la rigidez que presenta la estructura de su bastidor, provisto de apoyos que distribuyen los pesos y fuerzas de tal forma que se disminuyen las reacciones que generan las cargas en el efector final. Los sistemas de manipulación cartesianos son, por lo regular, más fáciles de programar que otros tipos de manipuladores donde sus ejes rotan de manera relativa entre sí mismos. Esto se debe a que el control de la posición que se desea alcanzar se realiza de manera directa, es decir, el controlador del sistema indica directamente a cada uno de los actuadores el desplazamiento que se requiere, por lo que no hay necesidad de emplear matrices de transformación para conocer la ubicación del órgano efector final, simplificando en gran medida los algoritmos de programación para la generación de

trayectorias de punto a punto, y reduciendo a su vez los cálculos mediante el uso de constantes proporcionales.

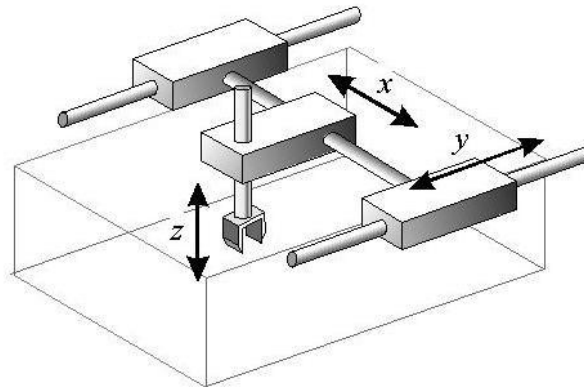


Figura 1.1. Esquema de un manipulador cartesiano.

### 1.1.1 Antecedes históricos

Los manipuladores cartesianos como se conocen en la actualidad aparecieron hace aproximadamente 50 años como respuesta a la creciente necesidad de mejorar la calidad en los procesos de manufactura y reducir el tiempo de producción. Sin embargo, el primer concepto de este tipo de sistemas surgió muchos años atrás. En 1830 se fundó la primera compañía constructora de grúas [11], donde se comenzaron a fabricar máquinas que pudieran transportar y posicionar objetos muy pesados con una estructura que revolucionó la manera en la que, hasta ese entonces, se realizaban este tipo de actividades. Estas plataformas, bautizadas con el nombre de grúa Gantry (grúa pórtico por su traducción en español), se hicieron muy populares en la industria ya que permitían mover cargas muy pesadas dentro de las fábricas con mucha mayor facilidad por medio de un gancho en el que se aseguraba la carga para elevarla; este gancho se sujetaba de un carro deslizante que se desplaza horizontalmente sobre una sola viga, o en su defecto sobre un par de vigas que soportaban el peso al levantarlo del suelo. La grúa se desplazaba entonces por medio de montantes con ruedas en la base de su estructura que le permitían a todo el conjunto moverse en una dirección perpendicular a la del movimiento del carro, completando así el sistema de posicionamiento en 3 dimensiones, es decir, a lo largo, ancho y alto. La producción en masa de estas grúas fue el paso siguiente en su desarrollo, ya que permitían levantar piezas de gran tamaño mediante el uso de poleas impulsadas por humanos. Casi 20 años después se instaló la primera grúa Gantry en la que los movimientos eran proporcionados por una máquina de vapor (Figura 1.2), reemplazando la acción del hombre. Además se incorporaron cambios en su diseño que facilitaron su operación y aumentaron su capacidad de movimiento y de potencia, convirtiéndose en el tipo preferido de grúa industrial. A medida que los requerimientos fueron aumentando, se refinaron los métodos de transmisión de potencia y de posicionamiento introduciendo el uso de componentes eléctricos. En 1910 se comenzó la producción en masa de estas grúas con mecanismos propulsados por motores eléctricos. La evolución de las grúas Gantry aceleró en gran medida el desarrollo industrial y tecnológico en esa época al aumentar la eficiencia económica con los nuevos diseños que incrementaron la capacidad de carga y

afinaron a la vez el sistema de movimiento, permitiendo hacer los procesos con mayor velocidad y facilitando el posicionamiento exacto en operaciones que requerían un mayor grado de exactitud [12].



Figura 1.2. Primera grúa tipo Gantry impulsada por una máquina de vapor.

Posteriormente, el desarrollo de los sistemas de posicionamiento volvería a impulsarse de manera destacada con la invención del control numérico, ideado por John T. Parsons. El dispositivo creado por Parsons, bautizado como Cardamatic [13], consistía de una fresadora en la que las coordenadas de corte eran leídas por un operador desde una tarjeta perforada que contenía las posiciones en los ejes, que a su vez eran movidos por otros dos operadores (Figura 1.3). Este concepto sería mejorado al adaptar directamente los controles de los ejes X y Y de la fresadora a motores eléctricos que recibían instrucciones de las tarjetas perforadas y proveyendo al dispositivo de un sistema de retroalimentación. Los científicos del MIT notaron que el diseño de Parsons podría ser mejorado significativamente al reemplazar el sistema de puntos discretos de corte por uno que trazara trayectorias continuas con el cortador entre las posiciones dadas, reduciendo en gran medida el tiempo de fabricación al disminuir la cantidad de puntos de corte. El MIT comenzó a fabricar su propia máquina de control numérico utilizando engranes acoplados a las manivelas de la fresadora para poder moverlas mediante cadenas accionadas por motores para cada uno de los ejes X, Y y Z. El sistema de control consistía de grandes gabinetes en los que se llevaban a cabo las operaciones de lectura de tarjetas perforadas de manera continua para calcular los movimientos de la herramienta de corte y registrar el avance en cada eje mediante señales de encoders unidos a los actuadores.

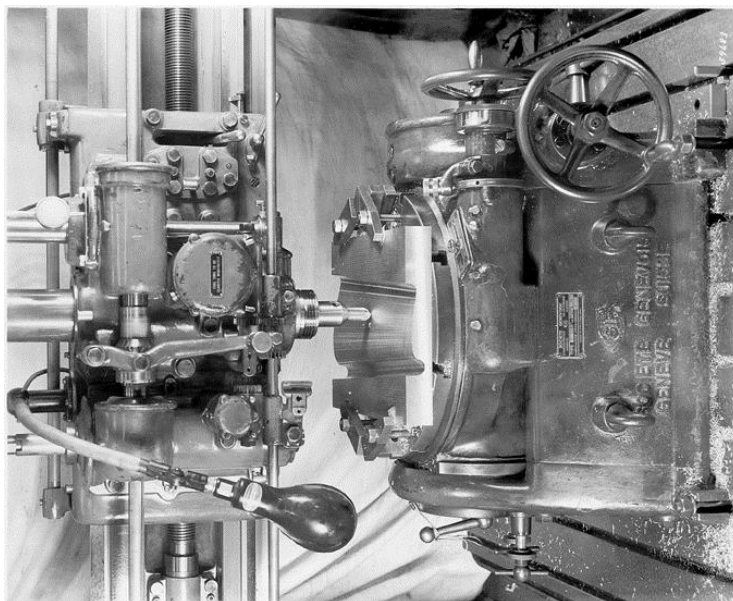


Figura 1.3. Máquina fresadora por control numérico Cardamatic, desarrollada por John T. Parsons.

En 1952 se mostró la máquina terminada por completo, teniendo gran aceptación por las capacidades que ofrecía aunque con un precio de venta muy alto. En la década siguiente el crecimiento de esta tecnología se proliferó considerablemente al introducir lenguajes de máquina que ejecutaran rutinas predeterminadas y agilizaran mucho más los procesos de maquinado, dando lugar al surgimiento de los primeros centros de maquinado de control numérico por computadora (CNC). En 1960 aparecieron las primeras computadoras con transistores que permitirían mejorar el rendimiento de los sistemas CNC y también aparecerían los primeros modelos computarizados tridimensionales, llamados modelos CAD. Finalmente, con la aparición de los microprocesadores a comienzos de la década de 1970, se comenzó a reducir significativamente el costo de los CNC gracias a la reducción de espacio de los sistemas de control y a la difusión del uso de mini computadoras dedicadas exclusivamente para los centros de maquinado. La introducción de los CNC de bajo costo revolucionó la industria de la manufactura gracias a la conjunción de diversas herramientas y dispositivos que facilitaron el maquinado de trayectorias curvas, la generación de sólidos complejos 3D, y principalmente la disminución de la participación del hombre en dichas tareas [14].

Los dispositivos de posicionamiento cartesiano más recientes son los llamados CNC personales, que pueden ser fabricados por cuenta propia para alguna aplicación sencilla. Estos dispositivos, conocidos también como Hobby CNC o DIY (*Do It Yourself* por sus siglas en inglés), se pueden construir con materiales de rehúso y se pueden programar al descargar código libre de internet para controlar los movimientos del dispositivo, lo que reduce su precio y tamaño en gran medida (Figura 1.4).



Figura 1.4. Ejemplos de CNC personal en la actualidad.

### 1.1.2 Principio de funcionamiento

El funcionamiento de los sistemas de manipulación cartesianos consiste de movimientos controlados en los ejes que conforman al dispositivo, los cuales permiten ubicar al efector final dentro de un espacio tridimensional con un alto grado de precisión a tasas elevadas de repetición. Los 3 ejes coordenados: X, Y y Z, son usados como guías móviles sobre las que se desplazan, ya sea, alguno de los otros ejes ó una herramienta, de forma que se pueden obtener desplazamientos discretos y continuos según se requiera en trayectorias rectas, a lo largo de las guías; o compuestas, al accionar varios ejes a la vez. Los actuadores que proporcionan el movimiento son por lo general motores eléctricos rotatorios de corriente directa, siendo los servomotores y los motores de pasos los que más se usan para este tipo de dispositivos. También hay aplicaciones en las que se usan motores hidráulicos o neumáticos que efectúan el movimiento lineal de forma directa al impulsar aire o algún fluido por la presión suministrada y también existen motores eléctricos lineales. El carácter lineal que presenta el movimiento de este tipo de manipuladores en sus ejes es provisto generalmente por motores rotatorios a los que se acoplan elementos mecánicos que permiten transformar el movimiento rotacional en desplazamiento rectilíneo. Las aplicaciones más comunes de este tipo de motores se presentan con el uso de tornillos de potencia o mecanismos de bandas. El rendimiento de este tipo de sistemas puede mejorar sus capacidades si se utiliza un tornillo embalado, el cual reduce en gran medida la fricción que normalmente aparece en los tornillos de rosca cuadrada, elevando la carga máxima permisible. Otro mecanismo de transmisión de movimiento son las poleas dentadas y bandas de tiempo, el cual no permite mover grandes cargas, pero ofrece una velocidad muy alta, por lo que es utilizado en aplicaciones en las que se requiere de movimientos muy rápidos y precisos.

El sistema de control que requieren los sistemas de manipulación cartesianos está relacionado directamente con el tipo de actuadores utilizados, ya que cada uno es alimentado con tipos distintos de señales y de potencia. En el caso de los motores a pasos únicamente se envían los pulsos que energizan las bobinas dentro del motor. Cada paso corresponde entonces a un gradiente de giro en el motor, controlado por la velocidad y configuración de los pulsos proporcionados por el controlador. Por esta razón, la resolución del sistema depende del número máximo de pasos que puede entregar el motor en cada revolución. Para el caso de los servomotores se requiere de un circuito que



controle el voltaje suministrado ya que de esto depende el torque que desarrollará el actuador. Al indicar una posición al servo, se producirá en su interior una señal de error que el circuito interno de control del motor tratará de corregir, moviéndose a la posición ingresada.

Los sistemas de control de los manipuladores pueden ser de lazo abierto o cerrado. Los sistemas de lazo abierto son típicamente los que funcionan por medio de motores a pasos, indicando las posiciones por medio de programación o circuitos electrónicos que calculan la conversión de distancia en pulsos eléctricos. Pueden incluirse encoders rotatorios o lineales para proporcionar una señal de retroalimentación a estos motores y convertir el sistema a uno de lazo cerrado. Los sistemas que se gobiernan mediante servomotores son de lazo cerrado, debido a que este tipo de motores está provisto de un encoder integrado dentro de la carcasa.

Habitualmente se utilizan sensores mecánicos de fin de carrera para poder delimitar el espacio de trabajo que debe contener el manipulador, pero también se utilizan sensores de tipo inductivo o capacitivo que detectan objetos por las propiedades del material del que están hechos. Otros sensores más sofisticados que se utilizan son los que emiten un haz de luz y que detectan la presencia y/o ausencia de objetos al interponerse entre el emisor y el receptor del sensor. Existe también la opción de programar los límites de carrera que debe respetar el sistema de posicionamiento, sin embargo es preferible hacer uso de sensores que estén monitoreando siempre en la misma ubicación. Por lo tanto, los algoritmos que rigen el comportamiento de un sistema de manipulación cartesiano son sencillos dada la relación directamente proporcional que existe entre el movimiento que los actuadores generan y el desplazamiento lineal que se produce dentro del espacio de trabajo. Lo que permite seleccionar una computadora como sistema de mando para el dispositivo, un control manual simple con las órdenes de movimiento en los ejes o incluso mediante un PLC.

## 1.2 Características principales

Los sistemas de manipulación cartesianos se distinguen de otros robots y manipuladores principalmente por la simplicidad de su diseño y la geometría del volumen de trabajo que los caracteriza. A continuación se presentan algunas características de estos manipuladores:

- Rigidez estructural: La estructura se compone de elementos que brindan un gran soporte a todo el sistema ya que los apoyos están dispuestos de forma que los ejes siempre están orientados perpendicularmente entre sí. Esta ventaja permite liberar el peso en los motores, transmitiendo las reacciones al bastidor de la máquina, o en su defecto al suelo [15].
- Diseño simple: La distribución geométrica de los eslabones es muy simple ya que está compuesta por 3 ejes cartesianos, facilitando el diseño y control del sistema.
- Precisión y repetibilidad: Debido a la rigidez y simplicidad de los manipuladores cartesianos, es posible alcanzar niveles de precisión

	superiores a los que ofrecen otros sistemas. Además, la estructura brinda gran estabilidad para realizar las tareas con gran exactitud en repetidas ocasiones [15].
<u>Fácil programación:</u>	La característica lineal de movimiento en sus articulaciones permite simplificar en gran medida la programación que se usa para controlar su funcionamiento, evitando el uso de matrices de transformación.
<u>Bajo costo:</u>	Los manipuladores del tipo cartesiano son altamente redituables y económicos al presentar simplicidad en su diseño y control, factores determinantes en el precio de cualquier máquina.
<u>Capacidad de carga:</u>	La estructura rígida que presentan los sistemas cartesianos permite incrementar la capacidad de carga en comparación con otros sistemas de configuraciones distintas. Lo anterior se debe a que la carga se distribuye de manera más uniforme entre los miembros de apoyo, liberando cargas y esfuerzos adicionales a los motores [16].
<u>Restricciones de montaje:</u>	Poseen una gran facilidad para instalarse o adaptarse en varios lugares, ya sea en el suelo, en el techo, e incluso sobre una pared [17].
<u>Dimensiones:</u>	Pueden ser acondicionados para tener tamaños variados, desde tamaños pequeños, como una mesa o un escritorio, hasta grandes espacios como el de una casa o nave industrial.
<u>Flexibilidad:</u>	Es posible utilizar una amplia gama de accesorios como herramientas en el efector final, pudiendo usar herramientas de corte, cámaras de visión, dispositivos de sujeción, inyectores y un sinnúmero de aditamentos más.
<u>Fácil reparación:</u>	Cuando se presenta una falla, la simplicidad de su diseño y control permite aislar de manera más rápida el problema, lo que en otros manipuladores representa un tiempo mayor [17].

Pese a todos estos atributos, los robots cartesianos no siempre representan la mejor opción para realizar una tarea determinada, esto debido a que no siempre son adaptables dentro de ambientes de trabajo con polvo o humedad ya que las juntas prismáticas son considerablemente susceptibles a éstas condiciones [15],[16]. El espacio de trabajo está limitado a un prisma rectangular; como resultado de esta condición, los movimientos están limitados a planos rectos paralelos. Su estructura rígida presenta el inconveniente de tener que permanecer estacionaria, haciendo imprescindible el uso de otro robot o de una persona que alimente al manipulador con material o lo retire una vez terminado el proceso [17]. En la Tabla 1.1 se comparan las ventajas y desventajas de las configuraciones geométricas actuales para manipuladores robóticos.

CONFIGURACIÓN	ARTICULACIONES	VENTAJAS	DESVENTAJAS
<b>Cartesiana (Gantry)</b>	X - Y - Z	Estructura rígida. Capacidad de carga constante. Resolución constante. Alta precisión. Modelo cinemático sencillo.	Volumen de trabajo menor al volumen de instalación. Acceso limitado por el extremo inferior del dispositivo.
<b>Polar</b>	$\theta_1 - \theta_2 - \rho$	Gran volumen de trabajo. Buena accesibilidad. Bajas inercias.	Inercia variable respecto al extremo del robot. Resolución variable. Precisión Variable. Modelo cinemático complejo. Dificultad en el control de movimientos.
<b>Cilíndrica</b>	$\theta - Z - \rho$	Bajas inercias. Volumen de trabajo > Vol. Trabajo cartesiano. Gran accesibilidad.	Resolución variable. Capacidad de carga variable. Inercia variable. Modelo cinemático complejo. Dificultad en el control de movimientos
<b>SCARA</b>	$\theta_1 - \theta_2 - \theta_3$	Gran volumen de trabajo. Gran accesibilidad dentro del espacio de trabajo. Alta flexibilidad en la realización de tareas. Baja inercia.	Baja rigidez estructural. Modelo cinemático complejo. Dificultad en el control de movimientos.

Tabla 1.1. Características de distintos arreglos geométricos de sistemas de posicionamiento espacial.

### 1.3 Configuraciones de sistemas de manipulación cartesianos

Los sistemas de manipulación cartesiana pueden ser catalogados en 3 diferentes tipos de acuerdo al arreglo que presentan sus ejes: estándar, Gantry y ASRS.

#### 1.3.1 Configuración estándar

La configuración estándar comprende las juntas en un arreglo en el que cada miembro está montado sobre otro de ellos de manera transversal, comenzando por una base sobre la que cualquiera de los ejes X o Y se sitúa, comúnmente, en el suelo. Inmediatamente por encima de este eje está acoplado cualquiera de las otras 2 juntas. Finalmente, se añade el tercer eje de forma que tenga una ubicación normal a la superficie que contienen las guías ya instaladas. Por lo general los arreglos de tipo estándar se componen por guías prismáticas en cantiléver con los ejes unidos a ellas o con un herramental en el efector final. La figuras 1.5 presenta esquemas de configuración geométrica para el tipo estándar, con la variación de la disposición y el sentido del movimiento de las juntas.

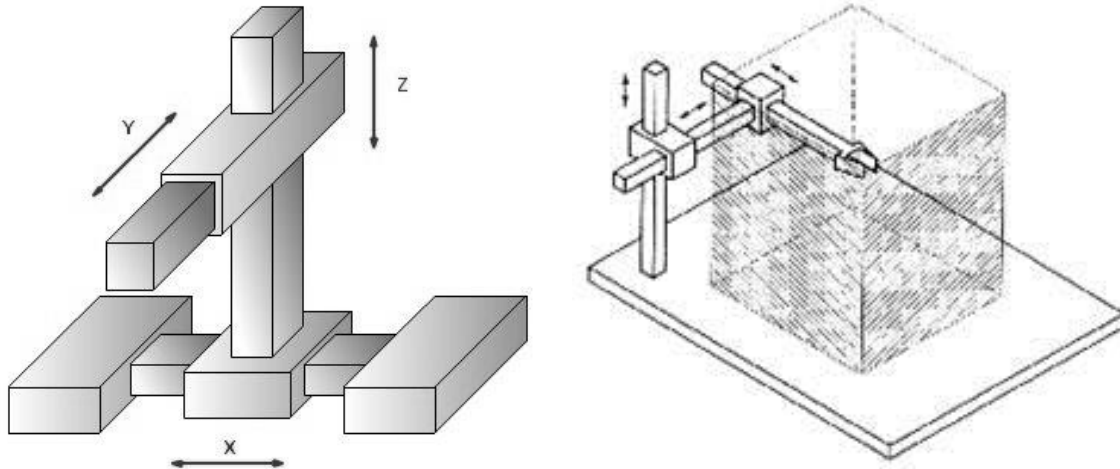


Figura 1.5. Variaciones de configuración estándar para los SMC.

### 1.3.2 Configuración Gantry

Los manipuladores con arreglo geométrico de tipo Gantry, también conocido como pórtico o de portal, son caracterizados por la manera en la que se soportan sus guías. A diferencia de la configuración estándar, los manipuladores Gantry están contruidos de forma que solo es posible interactuar con el eje Z dentro del espacio de trabajo. Los sistemas de tipo Gantry están basados en las grúas que llevan el mismo nombre, cuya configuración consiste en dos guías paralelas que permiten el movimiento a lo largo del eje X. Entre estas dos guías se encuentra ubicado transversalmente el eje Y, que aunado al primero conforman un plano de movimiento que se ve complementado por el movimiento sobre el tercer eje, correspondiente al eje Z cartesiano. Se puede apreciar en la Figura 1.6 el diseño del arreglo Gantry, donde se hace evidente la razón de su denominación al observar el parecido con un portal que se desplaza por completo en una dirección y el efector final se mueve entre sus postes para subir o bajar.

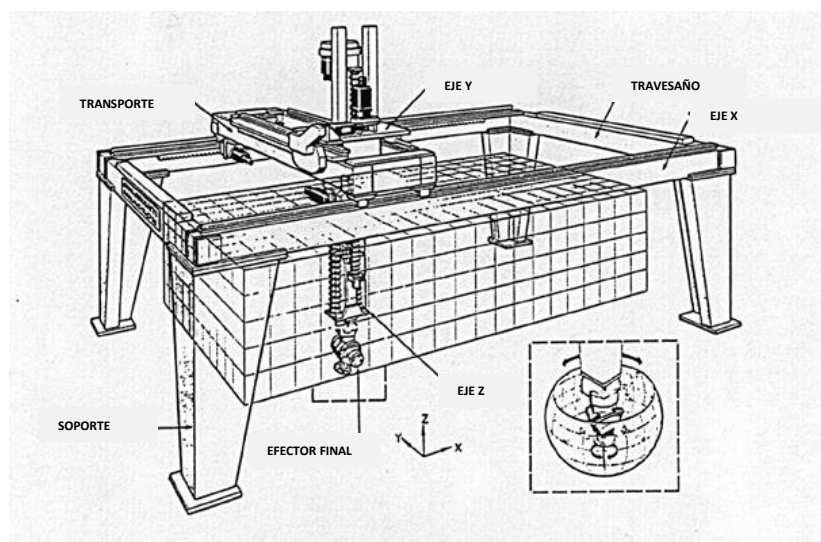


Figura 1.6. Configuración geométrica de tipo Gantry.

Los dispositivos Gantry ofrecen la ventaja de poder ser instalados de manera invertida, es decir, situar su base sobre el techo y permitir desplazamiento de la misma manera que lo haría desde el suelo. El beneficio que se obtiene es liberar el espacio ocupado por la estructura base de soporte.

### 1.3.3 Configuración ASRS

Por último se tiene la configuración ASRS (Automated Storage and Retrieval System, por sus siglas en inglés) o estructura rectilínea, [18]. Estas configuraciones se utilizan de manera más recurrente para tareas específicas. La configuración rectilínea (ASRS) presenta como variación solamente la orientación del plano donde se realizan los movimientos de posicionamiento. Este arreglo geométrico forma parte de la familia del tipo estándar, sin embargo es su aplicación específica la que lo hace tan particular, ya que es utilizado para desarrollar actividades que involucran el almacenamiento de productos, instrumentos o cualquier tipo de objetos. En la Figura 1.17 se observa un ejemplo de sistema ASRS.

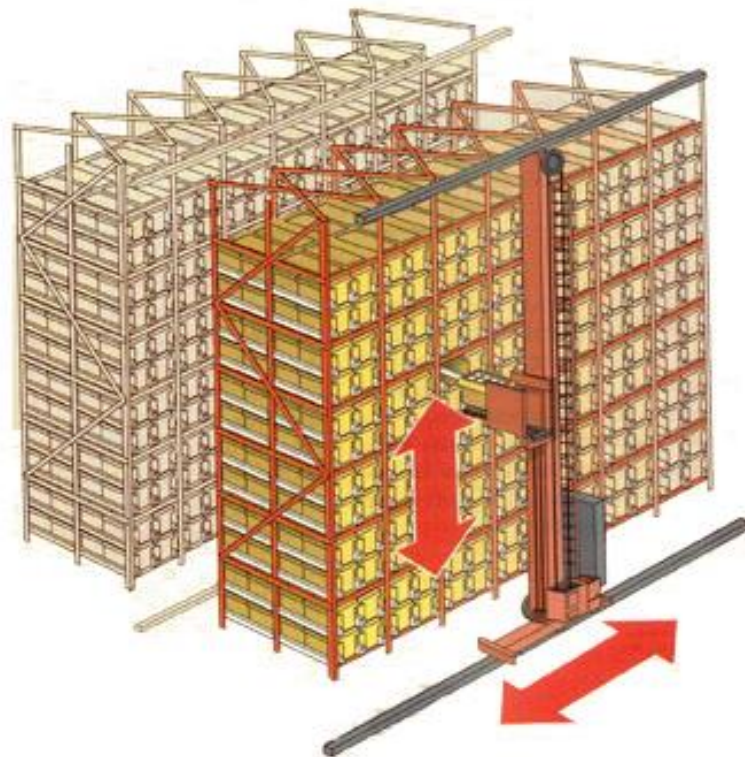


Figura 1.7. Esquema del arreglo espacial para un ASRS.

## 1.4 Aplicaciones

El uso de sistemas de manipulación cartesiano es muy amplio gracias a su flexibilidad en tamaño y su elevada precisión, velocidad, rigidez y capacidad de carga. Las aplicaciones más representativas están relacionadas con manufactura y manejo de materiales. Pero la facilidad de adaptación y sus destacadas características, han hecho posible usar estos dispositivos en aplicaciones médicas, didácticas y de investigación

### 1.4.1 Procesos de manufactura tradicionales

Las operaciones de maquinado tradicional como el fresado y torneado (Figura 1.8), taladrado, cepillado y rectificado, entre otras más, son procesos típicos que se llevan a cabo mediante control numérico computarizado (CNC) utilizando maquinas basadas en manipuladores cartesianos. Esta técnica que no se limita únicamente a piezas metálicas, si no también se puede utilizar en plásticos e incluso en madera [20].



Figura 1.8. Ejemplos de máquinas CNC: a) torno y b) fresadora.

### 1.4.2 Procesos avanzados de manufactura

El principio de funcionamiento del dispositivo de posicionamiento cartesiano es el mismo que el utilizado para los sistemas CNC. Esta configuración geométrica es adoptada por varias máquinas tales como los pantógrafos modernos (Figura 1.9) y los routers usados para el maquinado de madera principalmente. El arreglo dimensional que tienen estos sistemas es del tipo Gantry, abarcando superficies amplias en las que se llevan a cabo las operaciones deseadas. Algunos ejemplos de este tipo de procedimientos son la electroerosión, el maquinado con láser, por chorro de agua y por plasma; la soldadura, y en algunos otros casos se usan para el punzonado, rebabeo y pulido de superficies (Figura 1.10). El corte de superficies y el grabado también se realizan en las máquinas de este tipo.



Figura 1.9. Configuración moderna de un pantógrafo.



a)



b)

Figura 1.10. Procesos de manufactura avanzados por CNC: a) corte por láser a) y b) punzonado.

### 1.4.3 Equipos de impresión

Las máquinas de impresión se usan para imprimir gráficos de varios tamaños. Está basada en el funcionamiento de un robot cartesiano que opera básicamente en un plano por medio del control de 2 ejes: uno corresponde al de avance del papel y el otro se encarga de proporcionar movimiento al dispositivo que imprime las imágenes. Aun así se pueden encontrar aparatos en los que el primer eje puede darse también en la misma forma que el segundo eje, es decir que el papel se encuentre fijo y el cabezal de impresión se desplace por toda el área (Figura 1.11). Las impresoras y los plotters que se usan en oficinas y talleres de impresión son ejemplos de estos sistemas. Las fotocopadoras y los scanner también pertenecen al mismo tipo de dispositivos porque el principio de funcionamiento es básicamente el mismo.

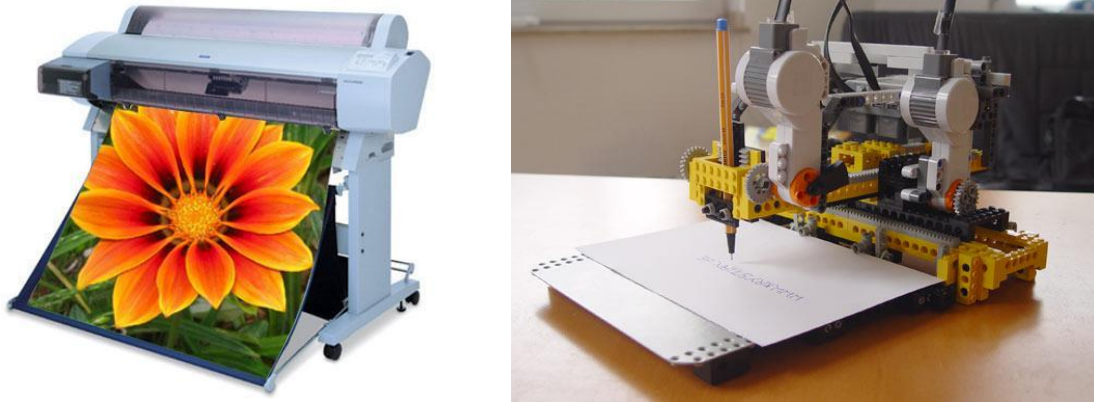


Figura 1.11. Aplicación de SMC's en equipos de impresión.

#### 1.4.4 Grúas Gantry

El uso de grúas Gantry como sistemas de posicionamiento es imprescindible actualmente para llevar a cabo actividades en las que se necesita desplazar cualquier tipo de cargas, ya sean a pequeña escala o grandes volúmenes de manera precisa y rápida. Los dispositivos de configuración gantry ofrecen la estabilidad necesaria para desempeñar tareas en una amplia gama de actividades en cualquier ambiente de trabajo, desde pequeñas fábricas o talleres en donde se transportan manualmente y acomodan piezas de trabajo, hasta estaciones de trenes para mover vagones de forma automática con maquinaria pesada, en construcciones para desplazar grandes bloques o tuberías de concreto e incluso en aserraderos para movilizar los troncos de grandes árboles, Figura 1.12.



Figura 1.12. Aplicaciones de grúas Gantry en distintos campos de trabajo.

#### 1.4.5 Manejo de materiales

Las aplicaciones en manejo de materiales incluyen actividades como la recolección y colocación de objetos como libros en una biblioteca [21], el dispensado de objetos como alimentos o medicamentos, la paletización y el empaque de productos diversos, la carga y descarga de maquinaria, y el ensamble de componentes electrónicos, Figura 1.13.



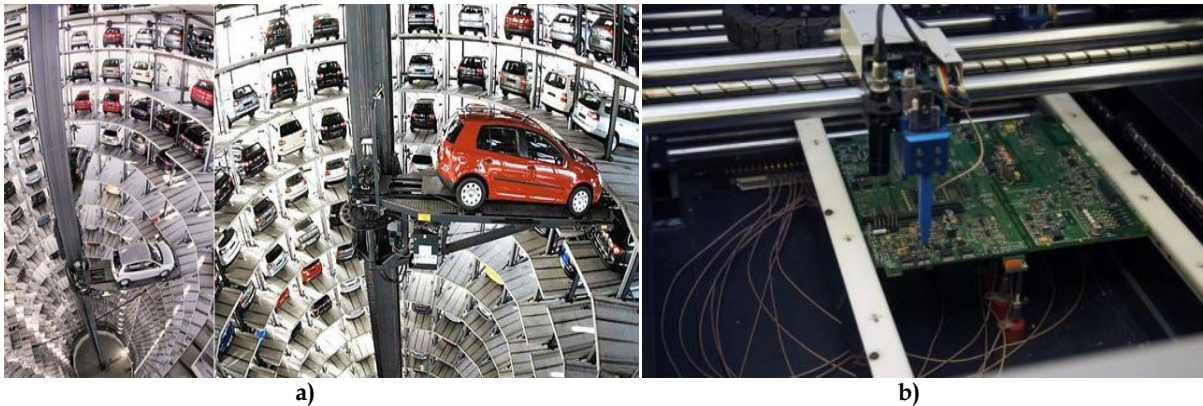


Figura 1.13. Ejemplos de manejo de materiales con manipuladores cartesianos: a) dispensador de Autos en una fábrica de autos, b) manufactura de circuitos electrónicos integrados.

#### 1.4.6 Inspección y medición

Las labores de inspección y medición son aplicaciones muy representativas de los SMC debido a la destacada precisión en su funcionamiento. En la industria son utilizados estos dispositivos para escanear productos en busca de defectos o para verificar que se cumplan las especificaciones, lo que se liga al proceso de medición que, además de este sector, es usado en laboratorios como mesas de coordenadas, Figura 1.14.

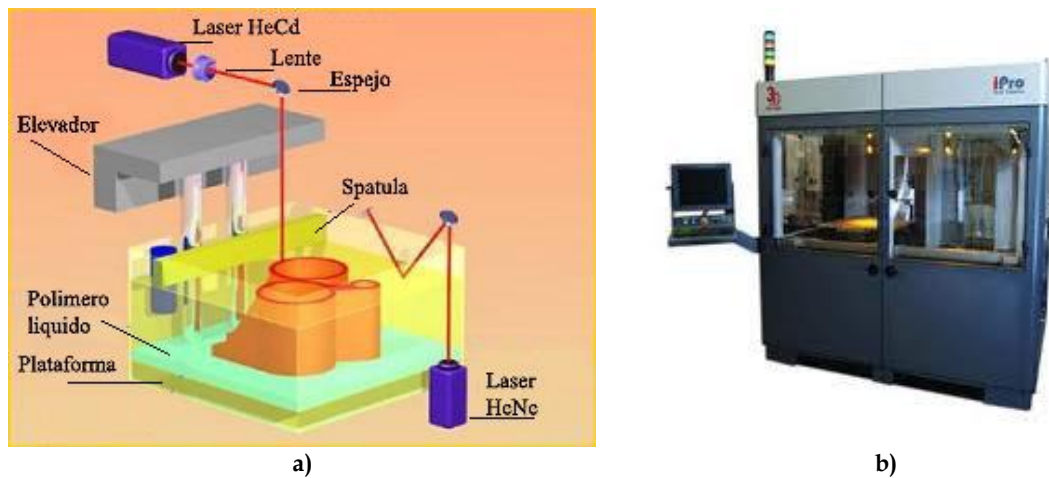
#### 1.4.7 Tecnologías rápidas

El término de tecnologías rápidas se asocia con la definición de los procesos de manufactura basados generalmente en la adición de material para construir piezas que serán usadas directamente como productos terminados, como herramientas o como prototipos. Las técnicas de prototipado rápido (del inglés Rapid Prototyping –RP–) son las más conocidas y pueden ser divididas en dos grandes líneas: tecnologías aditivas y tecnologías sustractivas [30]. En la actualidad su uso se ha extendido a la manufactura de productos finales (Rapid Manufacturing –RM-) e incluso de herramientas en algunos casos (Rapid Tooling –RT-), [28].



a) b)  
 Figura 1.14. Ejemplos de aplicaciones de robots cartesianos: a) en un microscopio para inspección de componentes, b) con una mesa de coordenadas para medición.

Las tecnologías de prototipado rápido involucran el uso de manipuladores cartesianos para añadir o remover material con alto grado de precisión; por ejemplo en las técnicas de curado como la estereolitografía (STL), que consiste en la aplicación de capas de resina con propiedades fotosensibles que posteriormente se irradian con lámparas o láser ultravioleta, produciendo reacciones químicas en el material y resultando en una solidificación del mismo. Un proceso comparable a la estereolitografía es el Sinterizado Láser Selectivo (SLS) que utiliza polvo como material en lugar de resina. También se pueden fabricar prototipos mediante la deposición de hilo fundido (FDM). Este método utiliza un filamento casi fundido como material de trabajo, el cual es extruido a través de una boquilla que tiene movimientos controlados en el plano XY, Figura 1.15



a) b)  
 Figura 1.15. a) Descripción del procedimiento de prototipado rápido por estereolitografía (STL), b) máquina de prototipado por estereolitografía.

## 1.5 Estado del arte

Las tendencias tecnológicas actuales requieren del diseño de dispositivos que sean cada vez más flexibles y más simples en cuanto a su fabricación. Los dispositivos conocidos como DIY (*Do It Yourself* -hágalo usted mismo- por su traducción al español) han tenido mucho éxito en otros países del mundo, principalmente en USA [22], [23] y las aplicaciones que se les dan son muy variadas y extravagantes. Ejemplos notables de estos dispositivos son la impresora 3D de Fab@home y la RepRap. Estas plataformas fueron desarrolladas para que el acceso a sus diseños estructurales, códigos de programación y esquemas eléctricos estuvieran disponibles para el público en general.

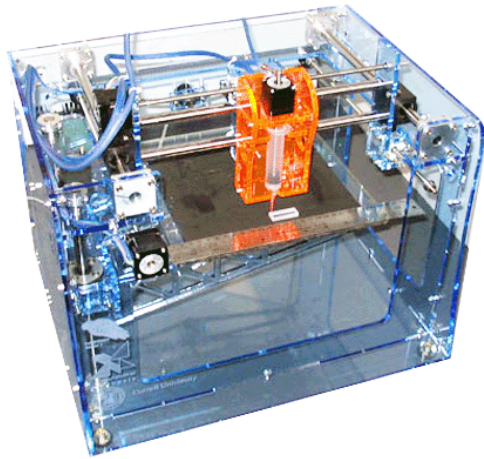
### 1.5.1 Fab@home

La idea de Fab@home surge por el deseo de desarrollar dispositivos individuales para la fabricación que permitieran a cualquier persona la manufactura de objetos

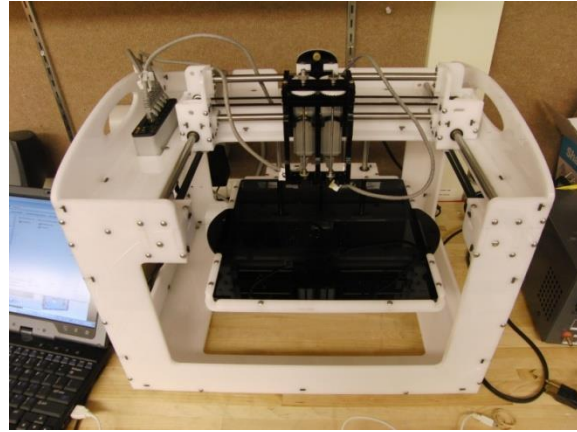
personalizados en el momento requerido. El proyecto presenta una plataforma de impresoras en la que se pueden producir objetos funcionales en 3 dimensiones [24]. La impresora 3D de Fab@home es un ejemplo de los llamados *fabbers*, nombrados así por la capacidad que tienen de hacer una infinidad de objetos como si fuera una pequeña fábrica. El proyecto fue concebido por el Doctor Hod Lipson en la Universidad de Cornell en colaboración con Evan Malone, un estudiante de posgrados asesorado por Lipson. El objetivo que plantearon para Fab@home fue ofrecer un equipo personal para la fabricación de sólidos de forma libre (SFF) a un bajo costo con la característica de ser de código abierto para brindar la oportunidad a cualquier usuario de utilizarlo y de contribuir al proyecto con nuevas ideas y modificaciones al diseño sin restricciones [26].

El primer prototipo de Fab@home fue lanzado a finales del 2006 junto con el sitio en internet donde se publicaron en los siguientes meses los diseños, esquemas y códigos de programación de la máquina. Para Agosto del 2007 fue presentado oficialmente el modelo 1 de Fab@home en Texas. Este primer modelo (Figura 1.16a) está construido en base al diseño de un SMC de configuración Gantry con un inyector montado en el efector final. El movimiento del eje Z se da por una plataforma que se eleva o desciende, lo que constituye una variante en cuanto a la configuración de dispositivos como los centros de maquinado, donde el efector final es el que sube y baja. El sistema de transmisión de movimiento esta dado por mecanismos tornillos sinfín que movilizan a las guías montadas sobre barras redondas con baleros lineales. Se utilizan motores a pasos para proporcionar el movimiento en los tornillos, teniendo un total de 4 grados de libertad controlando cada uno de los 3 ejes y el cuarto correspondiente al inyector que funciona de manera análoga. El control de los motores está dado por un circuito a 24V que recibe señales de 6 interruptores de fin de carrera, repartidos en parejas por cada eje; todo este conjunto es gobernado por un microcontrolador que dicta las instrucciones sobre el posicionamiento de los ejes y permite comunicación bidireccional por medio del puerto USB con la computadora, desde donde se puede visualizar el estado del proceso en una aplicación en tiempo real y que permite al usuario posicionar los ejes manualmente, manipular los formatos de dibujo e indicar las trayectorias de la herramienta para cada tarea. Todo el aparato esta contenido dentro de una carcasa hecha de acrílico que lo hace ligero, teniendo un tamaño comparable al de un horno de microondas.

En el verano del 2008 el equipo de Fab@home lanzó el modelo 2 (Figura 1.16b). Con un diseño aun más simple que el primero, se logró reducir costos y tiempo de construcción además de la introducción de elementos como un sistema de posicionamiento en lazo cerrado y herramientas intercambiables para el efector final. Al igual que en el modelo 1, la mesa de construcción se mueve sobre el eje Z y el efector final sobre el plano XY pero en esta ocasión se realiza por medio de mecanismos de bandas y poleas dentadas. El software de control presenta también un cambio en este segundo modelo con la separación de dos aplicaciones: una para importar los archivos de dibujo y convertirlos en formatos de impresión por capas y trayectorias, y la segunda para controlar los movimientos del sistema al traducir los archivos en formato por capas a comandos de posicionamiento en los ejes [27].



a)



b)

Figura 1.16. Impresora 3D Fab@home: a) modelo 1, b) modelo 2.

### 1.5.2 RepRap

El sistema de Prototipado RepRap tiene la particularidad de producir la mayoría de las partes que lo componen, formando parte de la filosofía y tendencia de la manufactura para realizar máquinas capaces de reproducirse a sí mismas total o parcialmente. Al igual que Fab@home, RepRap cuenta con 2 modelos, ambos desarrollados en la universidad de Bath. El primer prototipo, bautizado como Darwin (Figura 1.17a), se terminó de construir a mediados del 2007; consiste de un robot cartesiano impulsado por motores a pasos cuyos movimientos en los ejes X y Y están dados por bandas dentadas y poleas, mientras que en el eje Z se hace por medio de un mecanismo de tornillo sinfín que se acopla a cuatro tornillos más por una banda de tiempo que sincroniza sus movimientos y que están ubicados en las esquinas de la plataforma de construcción. Está diseñado para realizar el proceso de prototipado rápido por deposición de hilo fundido (FDM), con un sistema de control que es alimentado por una fuente de poder de 12V y está compuesto por un circuito que tiene un micro controlador de la familia PIC como órgano procesador central que gobierna los movimientos de los 3 motores a pasos, en cada eje del manipulador, y el de un motor DC, que se usa en el mecanismo de alimentación de material para el proceso de deposición; así como también las señales de los sensores de posición y el control de la temperatura en el extrusor de hilo fundido. El sistema completo es coordinado por medio de una PC comunicada por USB al circuito de control con el PIC lo que simplifica el diseño en gran medida [31]. La estructura está constituido por espárragos que se atornillan en los extremos a los conectores que hacen las veces de las esquinas, de forma que estas barras roscadas funcionan como postes y soportes en la estructura.

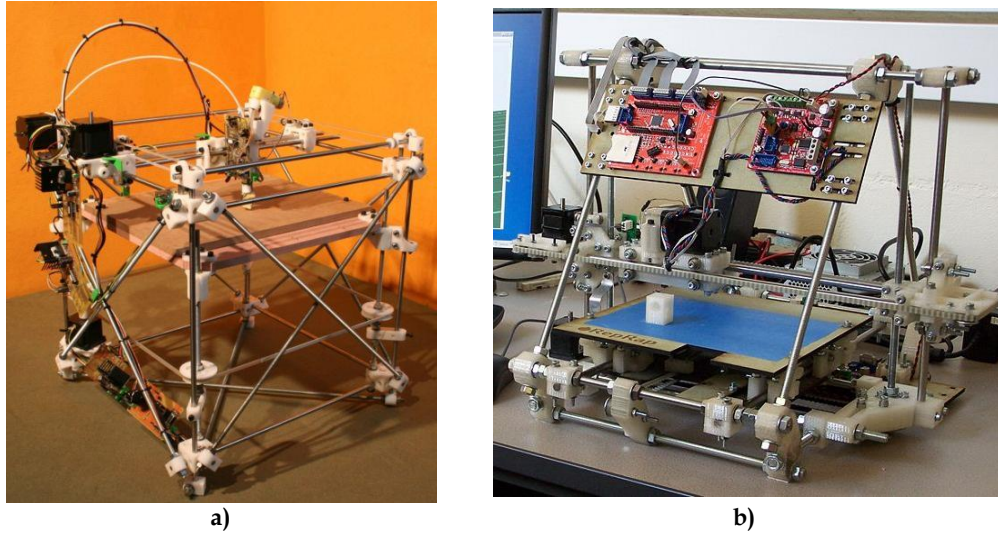
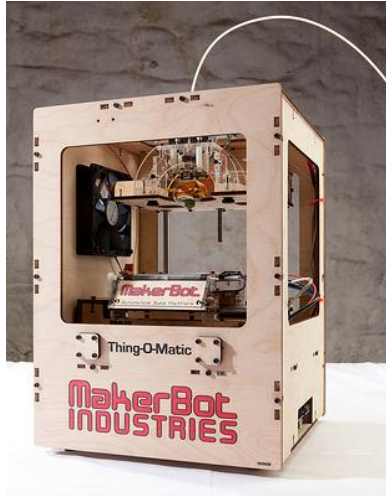


Figura 1.17. Impresora 3D RepRap: a) modelo Darwin , b) modelo Mendel.

La siguiente generación recibió el nombre de Mendel (Figura 1.17b), con nuevas características que se mejoraron respecto del modelo anterior. El diseño presenta una variación significativa, en la que se destaca una mayor área de impresión y eficiencia superior en el movimiento de los ejes además de la opción de intercambiar las herramientas en el efector final [32]. Un aspecto importante que varía en el diseño de este prototipo es el sistema de control, que es controlado por medio de un microcontrolador de la familia Atmel y que ayudó a simplificar la estructura del control de todo el sistema.

### 1.5.3 Otros dispositivos

Con el surgimiento de los dos dispositivos antes mencionados, la aparición de modelos similares se ha incrementado de manera sustancial, algunos basados en las plataformas de Fab@home, otros en la de RepRap, y algunos más están contruidos como los manipuladores cartesianos tradicionales. En la Figura 1.18 se muestran las máquinas Thing -o- Matic, de Makerbot industries, y RapMan, de Bits from Bytes, ejemplos de los modelos nuevos de máquinas de Prototipado que se derivan de los proyectos mencionados. Sin embargo, la construcción de SMC se da en la actualidad con frecuencia para realizar modelos de objetos físicos en materiales como el ABS, resinas epóxicas, silicón e incluso con sustancias inusuales como chocolate o queso [33].



a)



b)

Figura 1.18. Máquinas de Prototipado rápido: a) Thing-O-Matic, b) RapMan.

Aplicaciones como la impresión de tejido vascular representan una de las posibles áreas de oportunidad en el futuro de esta tecnología. Desde hace un par de años se asociaron compañías para desarrollar una bio-impresora 3D, que permite colocar células de casi cualquier tipo en cualquier geometría tridimensional, con un muy alto grado de precisión y repetibilidad, factores que influyen esencialmente para asegurar que cada célula es depositada en el lugar correcto, Figura 1.19 [33].

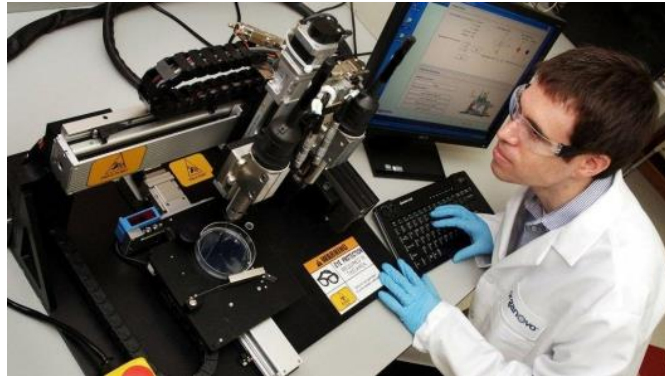


Figura 1.19. Bio-impresora 3D.

Otra aplicación llamativa se presenta en el dispositivo llamado Auto Ink, que consiste de un SMC para realizar tatuajes, Figura 1.20. Igualmente se utiliza un manipulador cartesiano en el sistema de escaneo tridimensional propuesto por Andrew Lewis [34], cuyo funcionamiento se basa en el posicionamiento de una mesa giratoria sobre la que se colocan objetos para ser escaneados mediante LEDs o cámaras.

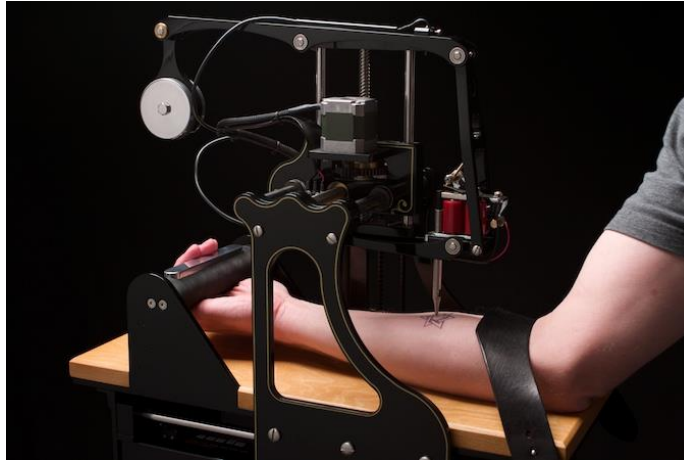


Figura 1.20. SMC utilizado como máquina tatuadora en el modelo Auto Ink.

#### 1.5.4 Posicionamiento y control

Existen diversos métodos de control que son utilizados para manipular los SMC's. De acuerdo a la literatura [35] se pueden identificar 3 tipos principales de técnicas de control para manipuladores robóticos: control de posición, control de trayectoria y control de fuerza/impedancia. Para cada una de estas técnicas se han desarrollado distintos tipos de controladores que contemplan parámetros y algoritmos de control basados en la aplicación del manipulador.

El problema de control de posición consiste en mover el efector final hasta una posición deseada sin importar su ubicación previa. Catalogado en el ámbito del control automático como control de punto a punto, el control de posición no toma en consideración los puntos que recorre el efector final desde la posición inicial hasta la deseada.

El control de trayectoria en los manipuladores robóticos consiste en elaborar algoritmos que permitan regir el movimiento del robot mediante una función con la cual las posiciones y las velocidades correspondientes a los ejes de acción en el manipulador sigan con exactitud a los parámetros de posición y velocidad deseados, respectivamente.

En el caso de los controladores de fuerza/impedancia la aplicación se da principalmente en tareas en donde los robots manipuladores están interactuando dentro de un entorno donde se presentan restricciones en las trayectorias que el efector final pudiera desarrollar. La primera técnica se basa en restringir la fuerza o la posición del robot de acuerdo al movimiento en direcciones ortogonales en las que se mueve el robot dentro del espacio de trabajo. La estrategia de impedancia establece una relación entre la fuerza de interacción y los errores de posición que resultan debido a la aplicación de esta fuerza.

Para las distintas técnicas de control existen varios enfoques con los que se pueden resolver los algoritmos que componen a cada estrategia. Generalmente se adoptan los enfoques de Newton-Euler o de Euler-Lagrange [36] para solucionar los problemas en los

algoritmos de control, siendo éste último el más usado para modelar la dinámica de control con base en la siguiente expresión:

$$M(q)\ddot{q} + V_m(q, \dot{q})\dot{q} + F(\dot{q}) + G(q) + \tau_e = \tau \quad (1.1)$$

donde  $M(q)$  denota la matriz de inercia del sistema de manipulación;  $V_m(q, \dot{q})$  contiene los términos de Coriolis, que para el caso de un manipulador cartesiano es equivalente a cero;  $F(\dot{q})$  expresa los parámetros de fricción estática y dinámica;  $G(q)$  es el vector de gravedad;  $\tau_e$  es un vector de fuerzas ejercidas por el efector final en el medio de trabajo; y  $\tau$  representa el vector de torques aplicados por los actuadores. Esta ecuación expresa de manera general el comportamiento dinámico de un robot manipulador de cualquier tipo tomando en consideración efectos producidos por la gravedad, las fricciones de los componentes mecánicos en el dispositivo e incluso las fuerzas de interacción con el entorno en el que se encuentra.

Los controladores más comunes son aquellos que proporcionan un efecto proporcional-derivativo PD que generalmente se aplica para reducir el error en la señal de control, en adición a un efecto de amortiguamiento. Para reducir al mínimo el error se utilizan los controladores PID (proporcional-integral-derivativo), donde el elemento de integración permite disminuir significativamente el error de estado estacionario en la respuesta del robot. Una técnica de diseño de algoritmos de control, conocida actualmente como moldeo de energía, es una herramienta moderna para diseñar familias de estrategias de control para resolver el problema de control de posición en manipuladores robóticos y establecer relaciones entre las coordenadas articulares y las coordenadas en el espacio cartesiano mediante el uso del Jacobiano [37] (Tabla 1.2); así como estrategias de control de fuerza, tales como el control de rigidez [38]. Otra técnica muy útil hoy en día es el llamado *visual servoing* en la que se cuenta con la ayuda de cámaras que permiten adquirir información visual de la posición y movimientos de un manipulador con la ventaja de incluir los parámetros de las imágenes adquiridas dentro de los algoritmos de control.

Coordenadas articulares	Coordenadas cartesianas
$\dot{q} = J(q)^{-1}\dot{x}$	$\dot{x} = J(q)\dot{q}$
$\ddot{q} = J^{-1}\ddot{x} - J^{-1}\dot{J}(q)J(q)^{-1}\dot{x}$	$\ddot{x} = J(q)\ddot{q} + \dot{J}(q)\dot{q}$

Tabla 1.2. Relación entre coordenadas articulares y cartesianas.

Se han realizado diversos estudios para el caso del control de los manipuladores cartesianos. Las estrategias de control de posición que se usan involucran el uso de diferentes técnicas y métodos de posicionamiento en el desarrollo de manipuladores cartesianos, como lo es el error de posición debido a los desplazamientos producidos por las deformaciones que sufren los miembros estructurales del dispositivo [39], utilizando herramientas de simulación por elemento finito [40] e incluso por métodos estadísticos que permiten evaluar la precisión y repetibilidad de un SMC [41]. Estas estrategias han sido aplicadas a robots industriales para verificar su funcionamiento en el campo de trabajo y usando técnicas basadas en el control robusto adaptivo [42]. Para el caso del control de trayectorias hay casos particulares donde se utilizan estrategias de control como el aprendizaje Iterativo [43], con el cual se mejora la precisión, además de la introducción



de compensaciones de geometría dinámica útiles en aplicaciones de posicionamiento punto a punto [44] y tomando en cuenta parámetros de inercia, velocidades y retraso computacional y en la respuesta de los sensores. Adicionalmente se han utilizado equipos como PLC en donde las estrategias de posicionamiento por medio de servomotores son manejadas con la lógica de relevadores utilizada en estos dispositivos [45]. Otro caso interesante es el desarrollo del control en el ambiente visual de MATLAB [46],[47] para la simulación del comportamiento de los manipuladores cartesianos.

# Capítulo 2

## Diseño conceptual del sistema de manipulación cartesiano

En este capítulo se presenta la descripción detallada de la metodología que se utiliza para el proceso de diseño del manipulador, refiriéndose principalmente a los diseños conceptuales propuestos para cada uno de los subsistemas, mecánico, eléctrico y de control.

### 2.1 Metodología de diseño

La selección del procedimiento de diseño que se usa en este trabajo se basa en una serie de requerimientos para cualquier metodología (Figura 2.1) que se aplique en el diseño de ingeniería [49].

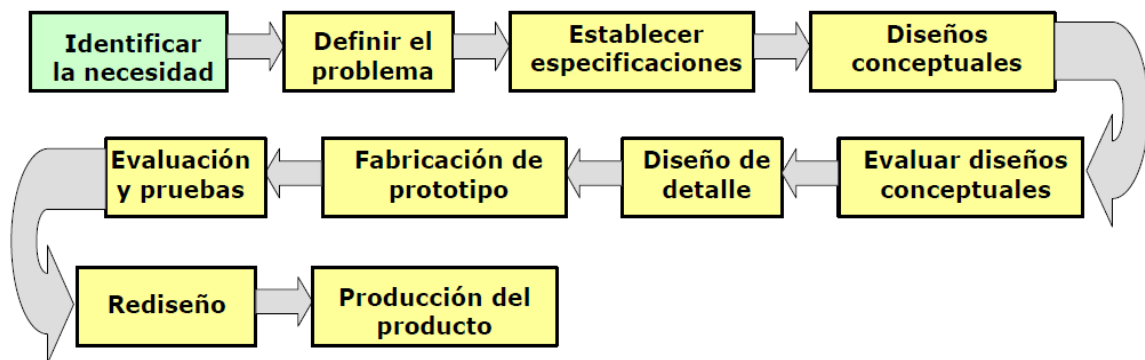


Figura 2.1. Esquema del proceso de diseño propuesto.

El diseño de cualquier producto involucra un procedimiento que es altamente iterativo ya que, de ser requerido, deberán de replantearse las especificaciones y las ideas propuestas en función de la disponibilidad de materiales, equipo e incluso de capital. Dado que el presente proyecto involucra conocimientos de distintas ramas de la ingeniería, es preciso tomar en cuenta modelos dedicados exclusivamente al diseño de dispositivos mecatrónicos. Existen metodologías que se ajustan para llevar a cabo el desarrollo de un sistema mecatrónico, en donde se ven involucrados 3 grandes campos de conocimiento [50], y donde se identifican 3 etapas principales: análisis de los requerimientos del sistema, diseño del sistema y desarrollo de componentes (Figura 2.2). Este esquema se basa en la técnica de diseño del ciclo-V donde se hacen evidentes que la recursión en los subprocesos de la metodología es rápida y no influye en los aspectos

económicos. Sin embargo, a medida que el proyecto avanza, el impacto que tiene el carácter iterativo del procedimiento implica mayores costos y pérdidas de tiempo. Por otra parte, el aprendizaje basado en proyectos (Project Based Learning por sus siglas en inglés) aplicado en un contexto mecatrónico [51] sugiere que la creatividad es una pieza fundamental para el desarrollo de proyectos relacionados con la ingeniería multidisciplinaria. El PBL propone 6 etapas básicas: definición del problema e identificación de las necesidades, recolección de información, propuesta de soluciones alternativas, selección de la solución óptima, diseño y construcción del prototipo. Estas fases coinciden de manera general con las propuestas por el proceso de diseño que se usa en este trabajo y validan la decisión para utilizar dicho procedimiento.

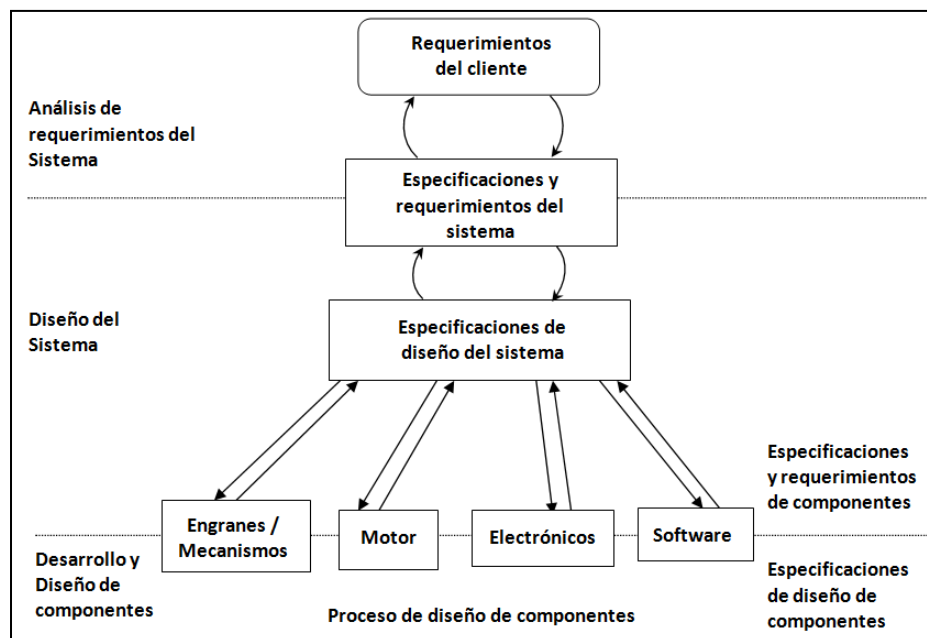


Figura 2.2. Proceso de diseño para sistemas mecatrónicos.

## 2.2 Identificación de la necesidad

La satisfacción de una necesidad es la motivación fundamental del diseño de cualquier producto o sistema. Las necesidades son el fundamento sobre el cual se establecen las funciones que el sistema manipulador deberá desarrollar y, en consecuencia, se clarifica la justificación del proyecto. De acuerdo a este criterio se tienen las siguientes necesidades:

- ✓ Se requiere de un dispositivo de posicionamiento espacial automatizado,
- ✓ Con movimientos controlados dentro de su espacio de trabajo,
- ✓ Para aplicaciones didácticas y de investigación en general,
- ✓ Que sea de bajo costo.

Estos 4 enunciados en conjunto constituyen la descripción del SMC requeridos.

## 2.3 Planteamiento del problema

Al conocer las necesidades se plantea el problema general que es contar con un dispositivo automático capaz de desarrollar movimientos controlados dentro de un espacio tridimensional de tal forma que pueda ser utilizado y adaptado para realizar procesos de manufactura a pequeña escala y sirva como equipo de laboratorio para elaborar prácticas y experimentos relacionados con áreas de la mecatrónica. Como restricción adicional, el costo total para fabricar el dispositivo debe ser mínimo debido a que el apoyo disponible es limitado. Para plantear seriamente el objetivo se buscan soluciones para cada restricción:

- ✓ Sistema de posicionamiento automatizado => Sistema de manipulación
- ✓ Movimientos controlados en 3D => Posicionamiento cartesiano (ejes X, Y y Z)
- ✓ Aplicaciones didácticas y de investigación => Propósito general

La alternativa propuesta de posicionamiento cartesiano fue elegida en base a la funcionalidad simple y práctica que tienen los manipuladores basados en este principio. Además, dado que se requiere de control de posición, es esta opción la que ofrece mejores características debido a la rigidez de la estructura de construcción, que favorece la precisión en los movimientos. Adicionalmente se propone una serie de objetivos particulares que deben cumplirse para que el objetivo general sea a su vez logrado y para identificar por secciones al proyecto. El objetivo general entonces se enuncia así:

*“Desarrollar y construir un sistema de manipulación cartesiano con movimientos controlados en X, Y y Z de propósito general”*

Se proponen también de manera formal los siguientes objetivos particulares:

- ✓ Desarrollar un sistema de manipulación cartesiano
- ✓ Implementar el control de posición desde la computadora
- ✓ Proporcionar adaptabilidad para aplicaciones de laboratorio, didácticas y de investigación
- ✓ Minimizar los costos de producción del sistema

Como se puede observar, la restricción económica no está contenida dentro del objetivo general, sino en los objetivos particulares. Así mismo, se propone en estos objetivos un desglose de actividades para poder organizar las tareas dentro del proceso. El desarrollo del SMC contempla las labores relacionadas con el dimensionamiento, cálculo, fabricación y ensamble. Las tareas relacionadas con el control y suministro de energía se catalogan como otro de los objetivos particulares.

## 2.4 Especificaciones del dispositivo

En esta fase del proceso de diseño se comienza a dar forma al prototipo mediante la asignación de valores a los parámetros obtenidos de las dos etapas anteriores, para evaluar cuantitativa y cualitativamente las restricciones e identificar los requerimientos que puedan determinar las soluciones a los objetivos planteados. El resultado de este paso es una lista de requisitos que representan las especificaciones con las que es posible medir el éxito del diseño del proyecto, Tabla 2.1.

MÉTRICA	VALOR
Configuración geométrica	Manipulador tipo Gantry
Posicionamiento en coordenadas cartesianas	3 ejes ortogonales (X, Y, Z)
Volumen de trabajo	(300mm x 300mm x 300mm)
Resolución	1 mm
Capacidad de carga	20 Kg
Velocidad del efector final (en cada eje)	20 mm/s
Precisión	0.5 mm
Exactitud	1 mm
Costo de total de manufactura	Costo < \$2 500 USD
Control de posicionamiento	Punto a punto

Tabla 2.1. Lista de especificaciones de desempeño para el SMC

Como información adicional a la generación de especificaciones, se obtiene la identificación de tareas a desarrollar basada en los pasos del proceso de diseño que se está siguiendo:

1. Diseño conceptual del sistema de manipulación cartesiano.
2. Evaluación de diseños conceptuales y selección del sistema a desarrollar.
3. Diseño mecánico de detalle del manipulador.
4. Diseño eléctrico y electrónico de detalle del manipulador.
5. Diseño del sistema de control de detalle del manipulador.
6. Construcción del manipulador.
7. Pruebas y evaluación del sistema.

## 2.5 Diseño conceptual

El diseño conceptual del SMC se enfoca particularmente en la toma de decisiones, ya que el producto que se obtiene en este paso debe contener las mejores ideas de la función que realiza el dispositivo y la manera en la que trabaja, tomando en cuenta los componentes principales y la interacción que hay entre ellos [52]. La principal tarea aquí es la investigación y análisis de sistemas similares al que se está desarrollando en fuentes de información como libros, publicaciones de ámbito profesional, catálogos de manufactura y sitios de Internet. En la tabla 2.2 se presenta un compilado de los dispositivos de manipulación cartesiana para prototipado rápido más reconocidos actualmente en el

mercado, comparando algunas características principales que encuadran con el perfil de diseño buscado para el SMC.

Sistema	Rapman 3D - I	Fab@Home Fabber 1	RepRap II: Mendel	Makerbot CupCake CNC
Costo (USD)	1 200	3 700 (modelo ensamblado)	400 (accesorios se adquieren por separado)	750
Técnica de construcción	Fabricación por Fundición de filamentos.	Extrusión a base de jeringas	Fabricación por Fundición de filamentos.	Fabricación por Fundición de filamentos.
Posicionamiento	Sistema cartesiano de 3 ejes (X, Y, Z)	Sistema cartesiano de 3 ejes (X, Y, Z)	Sistema cartesiano de 3 ejes (X, Y, Z)	Sistema cartesiano de 3 ejes (X, Y, Z)
Ingreso de datos	Tarjeta SD	Conexión USB	Conexión USB	Tarjeta SD y conexión USB
Volumen de Impresión (mm)	275 x 205 x 210	203 x 203 x 102	200 x 200 x 140	100 x 100 x 130
Resolución (mm)	0.1	0.1	0.1	0.08
Velocidad de Impresión	17 mm <sup>3</sup> por segundo	Depende de la fluidez del material	15 cm <sup>3</sup> por hora	5000 mm por minuto sobre el plano X-Y, 200 mm por minuto sobre el eje Z
Materia prima	ABS, HDPE, LDPE, PP, uPVC (filamentos de 3mm)	Cualquier líquido que pueda ser inyectado con una jeringa	ABS, PLA, HDPE (filamentos de 3mm)	ABS, PLA, HDPE (filamento de 3mm)

Tabla 2.2. Comparativa de dispositivos de manipulación cartesiana para prototipado rápido existentes.

Diversos trabajos, por ejemplo [39], [41], [55]-[57], se han realizado para el desarrollo de manipuladores robóticos tipo Gantry (Figura 2.3), describiendo el proceso que utilizan para el diseño del dispositivo, los componentes principales que usan y sus aplicaciones. Estas referencias ayudan para poder comparar entre varias configuraciones geométricas para robots manipuladores, y sirven para validar la selección de este tipo de arreglo para el manipulador.

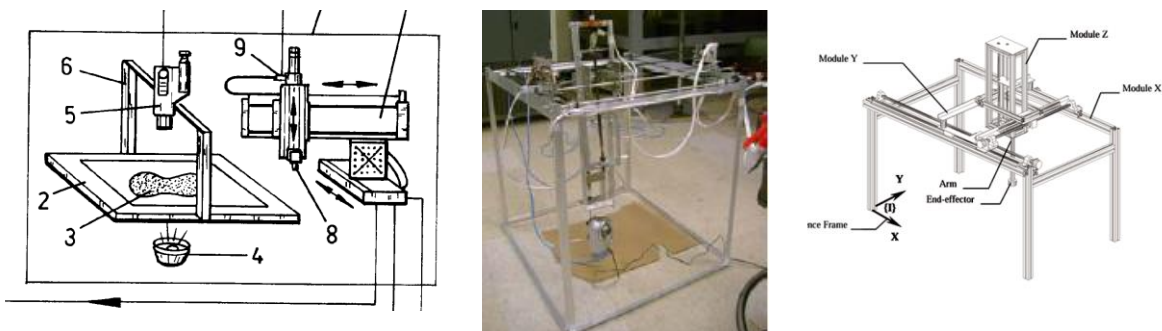


Figura 2.3. Manipuladores robóticos tipo Gantry con distintos tipos de arreglo geométrico.

Varios ejemplos de configuraciones para un manipulador cartesiano han sido expuestos, ahora se procede a identificar posibles principios de funcionamiento en busca de las mejores propuestas. Para esto se requiere de un procedimiento con el que se pueda dividir por subsistemas o secciones el problema, y plantear distintas soluciones para cada una de ellas. Este método sistemático es conocido como análisis morfológico y es útil para generar soluciones mediante el uso de un arreglo matricial en el que se pueden comparar y combinar las respuestas. La Tabla 2.3 presenta el análisis morfológico para el SMC. Cada renglón en esta tabla contiene una alternativa con la que puede ser atacado el problema en cuestión. Los colores indican combinaciones de componentes que, en conjunto, proporcionan un esquema que podría satisfacer las especificaciones de diseño propuestas.

Actuadores	Transmisión de movimiento	Control	Tipo de conector	Programación
Motores a pasos	Husillo	Microcontrolador	Puerto serial	C
Servomotores	Polea y banda dentadas	PLC	Puerto paralelo	Ladder
Neumáticos	Vástago	Tarjeta de adquisición de datos	USB	MATLAB
Hidráulicos	Cadena		RJ-45	LABVIEW

Tabla 2.3. Tabla de combinaciones para el análisis morfológico.

## 2.6 Evaluación de diseños conceptuales

Algunos datos ya han sido valorados en la Tabla 1.1, de donde se desprende el argumento principal para la validación del sistema cartesiano de tipo Gantry como configuración geométrica para utilizar en el SMC al presentar el mayor número de ventajas respecto a los otros arreglos revisados, además de ser el dispositivo robótico que tiene menos defectos en cuanto al criterio de posicionamiento automatizado. La rigidez estructural que lo caracteriza es la base del carácter constante de sus capacidades de carga y precisión, aunados a la sencillez de su modelo cinemático.

### 2.6.1 Diseño conceptual del sistema mecánico

Esta primera decisión permite enfocar el proceso de selección en los principios de funcionamiento y en los componentes necesarios con los que se pretende construir el manipulador. La restricción en cuanto al aspecto económico hace descartar inmediatamente las opciones de los actuadores hidráulico y neumático, que son las dos opciones de mayor costo. En consecuencia, los motores a pasos y los servomotores son los actuadores que se consideran como candidatos porque solo requieren de alimentación eléctrica y circuitería relativamente económica; además son encontrados en la mayoría de las aplicaciones robóticas de pequeña escala. Los elementos de transmisión de movimiento lineal expuestos en el análisis morfológico son evaluados nuevamente en función del costo como especificación y también se busca satisfacer el requisito de resolución y posicionamiento de precisión. En la Tabla 2.4 se comparan las características del husillo de

bolas, la banda dentada y el actuador neumático (vástago), contrastando los parámetros de funcionamiento de cada uno por medio de puntuaciones basadas en sus propiedades.

Claramente se observa que las mejores características son las que presenta el principio de operación del husillo de bolas a costa de sacrificar solamente la velocidad que puede llegar a desempeñar. Esta comparativa toma como base el uso de un servomotor y está sustentada por la información encontrada en catálogos y consultorías de empresas dedicadas a la venta y servicio de equipos automatizados de precisión para aplicaciones de desplazamiento lineal [58].

TIPO DE TRANSMISIÓN \ PROPIEDADES	Actuador neumático	Banda dentada	Husillo de bolas	RANGO
Alta Velocidad	+	+		>> 1 m/s
Alta Aceleración	+	+		> 10 m/s <sup>2</sup>
Velocidad Constante		+	++	< 5% V <sub>max</sub> << 1% (servo)
Velocidad constante baja			+	<< 1% (servo)
Alta precisión		+ (± 0.1 mm)	++ (± 0.02 mm)	± 0.1 mm
Repetición precisa			+	< ± 0.01 mm
Rigidez vs Fuerza/Estabilidad		+	++	Aire(compresible) Banda(expandible)

Tabla 2.4. Comparación de tecnologías de posicionamiento.

Siguiendo con el proceso de evaluación ahora se buscan los elementos utilizados como guías lineales, que en los sistemas cartesianos son de vital importancia y determinan en gran medida el grado de precisión que se puede llegar a obtener. La Figura 2.4 ilustra algunos de los métodos más usados en la actualidad como guías lineales, cuyo funcionamiento es muy similar aunque sus configuraciones y accesorios varían de uno a otro.

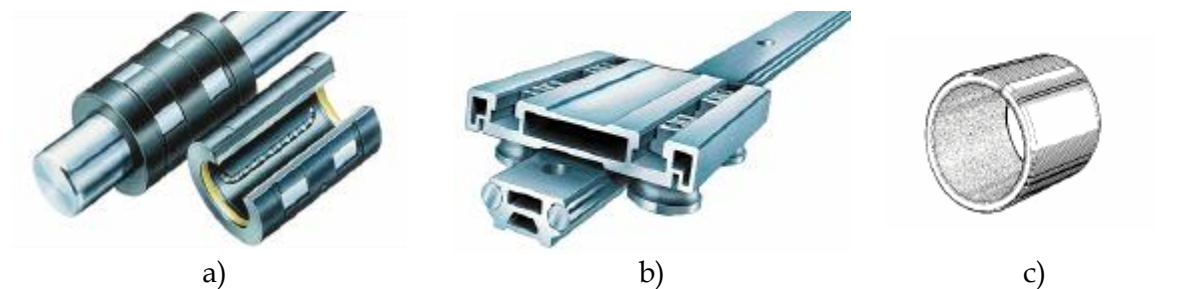


Figura 2.4. Tipos comunes de sistemas de guía para robots cartesianos: a) barra redonda con balero lineal, b) guía prismática con rodillos, c) bujes de corredera.



Los mecanismos principales de transmisión de movimiento que han sido considerados para este dispositivo son husillos de bolas. Estos elementos son similares a los tornillos de potencia, solo que la rosca no es angulada sino semicircular para que sobre ella se desplacen balines contenidos dentro de la tuerca que se mueve longitudinalmente sobre el tornillo, y que mediante un mecanismo interno hace que los elementos de rodadura continúen circulando en su interior (Figura 2.5). Esto minimiza significativamente la fricción de contacto en la interfaz tornillo - tuerca, lo que eleva su eficiencia mecánica hasta un 90% [59].

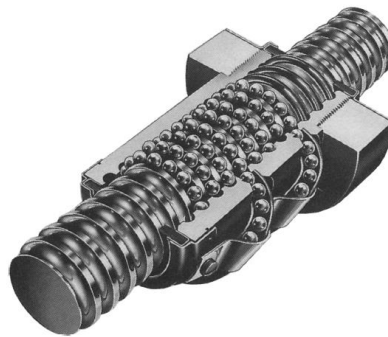


Figura 2.5. Estructura interna del tornillo de bolas.

El funcionamiento del husillo de bolas está basado en el principio del plano inclinado, que es aprovechado para transformar movimiento rotacional, originado por el motor, en movimiento lineal para desplazar cargas en trayectorias rectas. Dicho en otras palabras, el efecto producido por el torque del motor es traducido en una fuerza lineal para mover cargas a una distancia determinada por el paso del tornillo (Figura. 2.6)

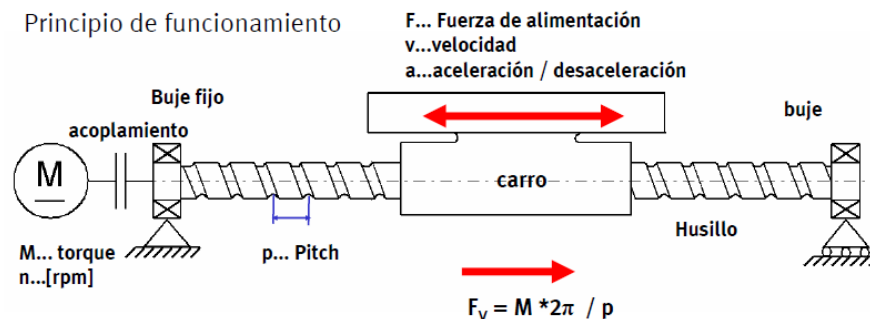


Figura 2.6. Principio de funcionamiento y variables de diseño de un husillo de bolas.

Entre las ventajas adicionales que ofrecen estos mecanismos destacan:

- Mínimo juego axial, de vital importancia en aplicaciones de precisión.
- Gran capacidad de carga, que aumenta la rigidez del sistema y por la tanto su estabilidad.

- Poca fricción, que se traduce en una alta eficiencia que reduce los requerimientos de potencia.

Para el chasis o carcasa que contiene y soporta a los ejes de movimiento se considera el uso de perfiles comerciales de aluminio estructural, cuya versatilidad y rigidez permiten aumentar su funcionalidad y sencillez para el ensamble, así como una configuración modular.

Las guías lineales consideradas son barras redondas de acero, sobre las cuales van montadas chumaceras que permiten acoplar cualquier elemento sobre ellas. El acoplamiento entre los motores y los husillos es directo para dos de los ejes, y para el tercero (eje vertical) se considera el uso de un arreglo de polea y banda dentada que transmite el torque del actuador hacia el tornillo para evitar cargas excesivas sobre el motor.

## 2.6.2 Diseño conceptual del sistema eléctrico y electrónico

El módulo encargado del funcionamiento eléctrico depende en parte del actuador seleccionado. De acuerdo a las dos propuestas más viables para ser aplicadas como actuadores se encontraron opciones con las que se accionan estos motores:

- Motor a pasos:
  - Generación de pulsos eléctricos
  - Driver de potencia para elevar la corriente
  - Resolución controlable mediante técnica de micropaso
  - Rango de alimentación de 5 VDC a 24 VDC
- Servomotor:
  - Controlador de corriente de acuerdo al torque requerido
  - Encoder integrado internamente para control de posición
  - Rango de alimentación de 12 VDC hasta 48 VDC

Estas características de potencia influyen en la selección final porque los modos para energizar y controlar a cada motor son distintos y por ende varían en cuanto al precio de venta, disponibilidad y facilidad para poder ser manipulados. Estas características perfilan como la alternativa más económica al motor de pasos que, a pesar de tener menor precisión, capacidad de torque más reducida y no contar con retroalimentación de posición, es más fácil de controlar y alimentar sin la necesidad de adquirir controladores dedicados y accesorios adicionales.

De esta manera, el motor de pasos, como actuador seleccionado es utilizado en aplicaciones que requieren altos grados de precisión, como lo son los centros de maquinado. Otra motivación que valida la elección de motores a pasos para impulsar los ejes en el SMC es la facilidad de controlar su movimiento con respecto a un servomotor (Figura 2.7), debido a que no requiere de un sistema de control con retroalimentación para poder funcionar, dependiendo únicamente de la inyección de energía en las

correspondientes bobinas del motor. Aunque el servomotor cuenta con características que superan al motor de pasos, el dispositivo a diseñar no necesita de capacidades tan elevadas, además de que el motor a pasos es por lo regular un 50% más barato.

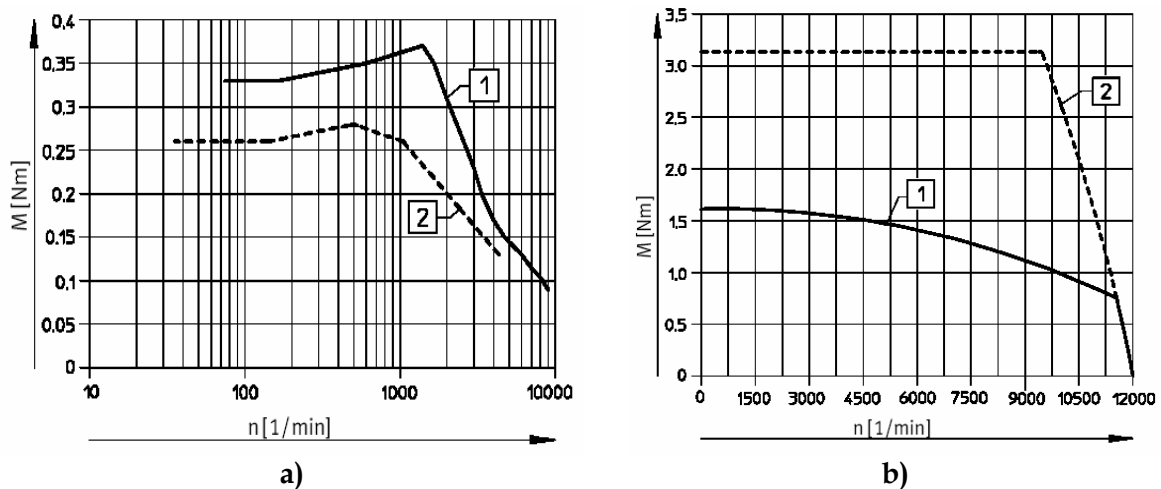


Figura 2.7. Comparativa del desempeño de actuadores. a) motor paso a paso, b) servomotor

Con base a las especificaciones propuestas de resolución, se requiere de un avance mínimo de 1 mm. Un motor a pasos económicamente accesible regularmente puede producir desplazamientos angulares que van desde los 90° hasta 1.8°. Tomando en cuenta que los tornillos de bolas comerciales de tamaño pequeño tienen pasos de entre 5 y 20 mm, la precisión deseada puede lograrse fácilmente.

### 2.6.3 Diseño conceptual del sistema de control

Finalmente se consideran las soluciones para el sistema de control del SMC. Debido a la gran importancia y complejidad del sistema de control, este se ha dividido en 3 secciones principales que se analizan por separado.

El manejo de señales es el primer módulo dentro del sistema de control, que se considera dado que es el elemento que debe administrar las señales de entrada y salida de todo el sistema, es decir, dirige los impulsos eléctricos en el momento preciso al componente que lo necesita y recibe comandos del usuario o provenientes de los sensores que solicitan realizar una acción en específico. Entre los equipos señalados en el análisis morfológico, los más factibles de usarse son los microcontroladores. La razón que fundamenta esta elección es de nueva cuenta el precio y accesibilidad que se tiene en el mercado de estos circuitos integrados. Por otro lado el controlador lógico programable (Programmable Logic Controller, PLC, por sus siglas en inglés) y la Tarjeta de adquisición de datos, son equipos de costo elevado en comparación con los encapsulados electrónicos, a pesar de que pueden llegar a ser más fáciles de manipular.

El enlace entre los dispositivos eléctricos y electrónicos, y el módulo de control es el microcontrolador. Este componente electrónico es un circuito integrado de tamaño reducido utilizado en aplicaciones de control que cuenta con memoria de programación y

de datos interna, dispositivos de entradas/salidas y reloj temporizador. Opera mediante un conjunto de instrucciones que se almacenan en su memoria, donde se organizan y se ejecutan para llevar a cabo las operaciones requeridas. Habitualmente, el lenguaje con el que se programan los microcontroladores es el ensamblador pero también es posible escribir código en lenguajes de alto nivel como PASCAL o C, que son más fáciles de aprender que el ensamblador y simplifican la escritura de programas largos y complejos [61].

Los Microcontroladores de la serie PIC18 de Microchip fueron desarrollados para el uso de aplicaciones de gran complejidad y elevado número de señales, o sea que requieren una gran cantidad de pines para manipular varias señales. Sus características básicas incluyen:

- ✓ 77 instrucciones
- ✓ Memoria de programación de 2 MB y memoria de datos de 4KB
- ✓ Capacidad de frecuencia de procesamiento de hasta 40 MHz
- ✓ Temporizadores de 8 y 16 bits
- ✓ Convertidor analógico - digital de 10 bits
- ✓ Módulos de captura y comparación de señales
- ✓ Módulos de PWM y puerto serial
- ✓ Programación *In-circuit*
- ✓ Manejo de protocolos de comunicación TCP/IP, CAN, ZigBee y USB

El protocolo de comunicación es el segundo módulo del sistema de control y depende de la aplicación que se quiere realizar. La información que se busca obtener se relaciona con las capacidades de velocidad de transmisión y almacenamiento de datos. En consecuencia debe considerarse la forma en que las instrucciones y comandos se suministran al controlador; la manera más común es a través de una computadora. Por lo tanto se requiere de un método para comunicarse con el dispositivo controlador de señales utilizando los puertos de comunicaciones disponibles en una computadora. El USB (Universal Serial Bus por sus siglas en inglés) es una de las interfaces más utilizadas hoy en día en aparatos electrónicos como las computadoras, las cámaras, los GPS's, los reproductores MP3, los módems, las impresoras, los scanners, etc. El USB es un protocolo de comunicación serial de alta velocidad que tiene la capacidad de energizar hasta 127 dispositivos conectados a él. Las especificaciones de esta interfaz manejan 3 velocidades de transmisión de datos: baja velocidad (1.5Mb/s); velocidad completa (12Mb/s); y alta velocidad (480Mb/s). Se dice que es un sistema de conectividad centrado en el dispositivo huésped que controla el tráfico de información hacia los dispositivos conectados mediante la asignación de direcciones para organizar y configurar el tipo de transmisión que se requiere.

Finalmente debe tomarse en cuenta el lenguaje para introducir comandos y funciones en el microcontrolador. El proceso para programar los microcontroladores se lleva a cabo por medio de código generado en lenguaje ensamblador pero actualmente existe una gran cantidad de compiladores, muchos de ellos basado en el lenguaje C, que están disponibles en internet sin costo para su versión estudiantil. Con ellos se facilita la elaboración de los programas para configurar los puertos de entrada y salida, los módulos

de de comunicación, la velocidad del procesador, entre otras características. Para la programación del control desde la computadora se propone el lenguaje C, que actualmente tiene versiones libres disponibles para descargarse sin costo con las que se pueden desarrollar aplicaciones visuales amigables para el usuario. Otras opciones de lenguaje visual para programación de aplicaciones de control como MATLAB® fueron revisadas, sin embargo se rechazaron por el costo que implica adquirir módulos del software exclusivos para la manipulación de datos y control de un dispositivo externo. Una razón adicional que justifica la decisión de usar lenguaje basado en C es poder proporcionar al usuario la facilidad de manipular el código y modificarlo en función de la aplicación que requiera. Esta característica respalda el objetivo general del proyecto en cuanto a la realización de tareas de propósito general:

- Lenguaje abierto: facilidad de cambiar el código y crear nuevas funciones para el desarrollo de aplicaciones diversas con el SMC
- Programación basada en C: acceso gratuito a distintos compiladores y lenguajes pertenecientes a la familia de este lenguaje de programación.

Para la interface gráfica se propone el uso de C++, que es un lenguaje de propósito general orientado a objetos con características de lenguajes de bajo y alto nivel utilizado para el desarrollo de software de aplicación, controladores de dispositivos, software integrado y de entretenimiento, aplicaciones para clientes y servidores de alto desempeño, etc. Actualmente es ofrecido de manera gratuita dentro del entorno de desarrollo de Visual Studio en su versión exprés.

En la Figura 2.8 se muestra el esquema general del SMC propuesto, en el cual se muestran los principales componentes que se utilizarán para la construcción del sistema.

## 2.7 Diseño de detalle

El sistema que se propone es básicamente un robot manipulador y como tal demanda el desarrollo de análisis cinemáticos, directo e inverso, dinámicos, y estructurales para analizar su comportamiento y garantizar su buen desempeño. Los principios de funcionamiento de los mecanismos de transmisión de movimiento, componentes de acoplamiento, piezas de soporte y su aplicación en específico deben ser descritos mediante formulaciones específicas del diseño de elementos mecánicos, considerando que la geometría del dispositivo adopte dimensiones que coincidan con estándares de medición comerciales y sean congruentes con las capacidades disponibles de equipos relacionados. Los elementos eléctricos y electrónicos deben responder a las condiciones operativas y limitaciones físicas impuestas en las restricciones de diseño. La selección de motores debe ser adecuada para desarrollar un torque y velocidad determinado, así como también los circuitos de potencia, de generación de pulsos eléctricos y temporización de los mismos. Se contempla un microcontrolador con las entradas y salidas necesarias para la manipulación de todas las señales. Los sensores para limitar el volumen de trabajo del SMC y protegerlo de chocar con otros elementos de su estructura se deben considerar, así como los detalles de conexión a través del puerto USB,

el cableado total de todos los componentes y el suministro de energía eléctrica requerido por el sistema.

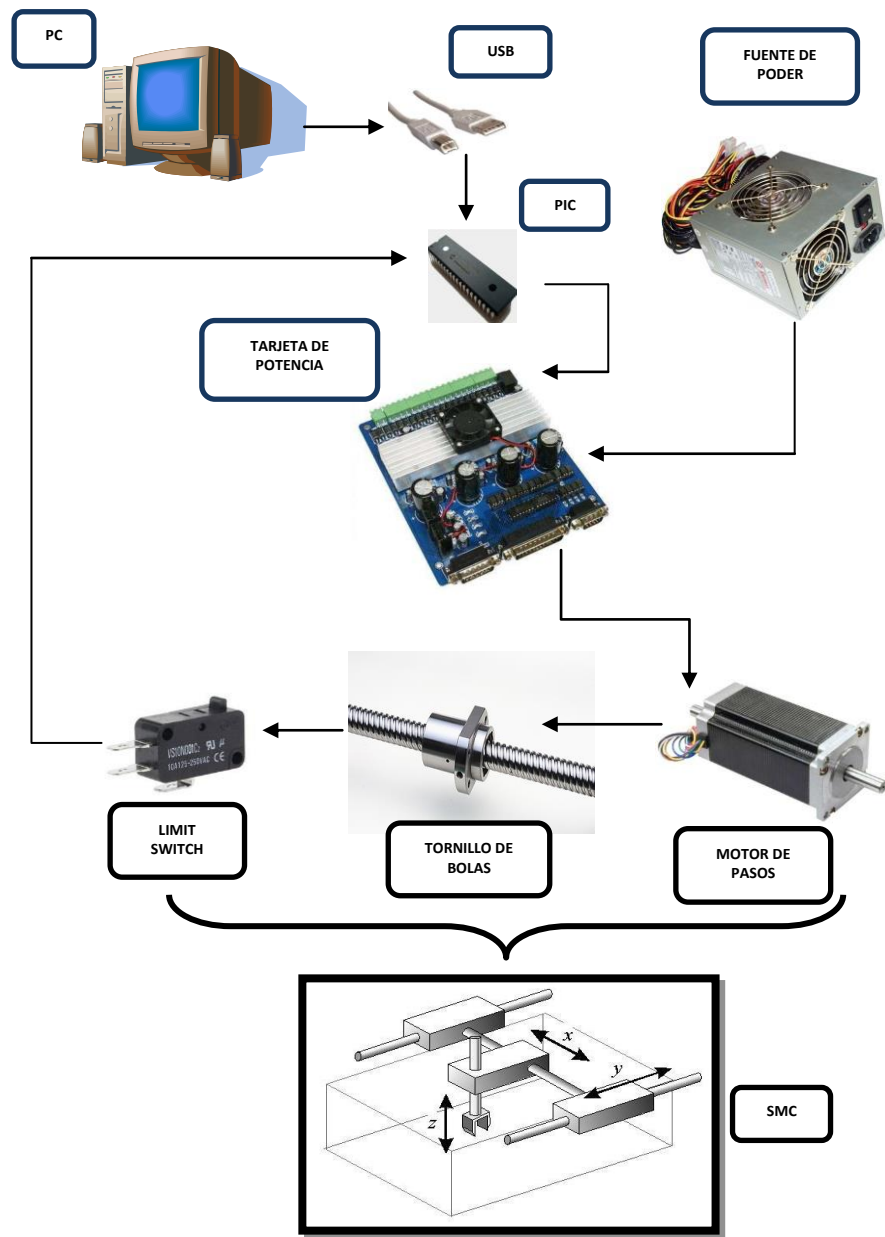


Figura 2.8. Esquema global del funcionamiento del sistema de manipulación cartesiano.

## 2.8 Fabricación del prototipo

La cristalización del diseño de detalle es la construcción de un modelo físico del concepto con la finalidad de evaluar su desempeño, usando varias herramientas que son de utilidad para desarrollar y concretar la generación del prototipo. En esta parte del proceso de

diseño se manejan los procesos de manufactura necesarios para elaborar los componentes con la precisión y ajuste especificados. Los procesos que se ven involucrados en las labores de construcción del manipulador contemplan el corte de barras de acero, aluminio y nylomaq que han de ser fresadas, barrenadas o torneadas. La gran mayoría de las uniones mecánicas se hacen mediante tornillos con la finalidad de facilitar el ensamble y desacoplamiento de cualquier pieza en caso de ser necesario. Los módulos eléctricos requieren de la preparación de tablas de circuitos impresos en los que hay que soldar los componentes y conectar los cables requeridos e incluso construir unos propios para el sistema. Los materiales necesarios para la carcasa del manipulador se constituyen de perfiles de aluminio estructural, que facilitan la construcción modular; los husillos de bolas, motores de pasos y guías lineales se obtienen de un proveedor especializado en la venta de equipo para la fabricación de maquinaria de precisión.

## **2.9 Evaluación y pruebas**

La etapa de evaluación y pruebas consiste en una serie de experimentos que ponen a prueba el desempeño del dispositivo para identificar errores en el diseño que no pudieron prevenirse. Las condiciones de trabajo a las que se somete sirven para revisar aspectos de importancia como la funcionalidad, el costo, la manufacturabilidad, la ergonomía, la seguridad entre otros. En el caso particular del diseño del SMC, los ensayos realizados para valorar las características y desempeño se relacionan con el grado de precisión que puede llegar a obtenerse. Este parámetro es sumamente importante, ya que el posicionamiento exacto dentro del espacio de trabajo es la función básica de este sistema. Otro aspecto determinante es la repetibilidad, debido a que los manipuladores cartesianos en general deben realizar tareas simples durante un elevado número de ciclos; entonces el posicionamiento preciso de un punto dentro del volumen de trabajo debe garantizarse no sólo una vez, sino en repetidas ocasiones. Pruebas adicionales se pueden llevar a cabo para identificar otros parámetros de interés como las velocidades máximas que pueden desarrollarse en los ejes, el espacio de trabajo definitivo considerando compensaciones dimensionales de otros componentes y la resolución máxima posible en función de las capacidades de los motores.

## **2.10 Rediseño**

Una vez que las pruebas fueron hechas, se agrupan los resultados para enfocar la atención en los problemas que surgieron y corregirlos mediante el rediseño. El SMC es factible de ser rediseñado debido a que es un dispositivo que puede ser utilizado para muchas actividades. Cabe mencionar que este proceso no implica forzosamente la corrección de errores, sino que también toma en consideración la adición de nuevas funciones o características que complementen al sistema. Entre los factores más susceptibles de ser reconsiderados están las propiedades de carga máxima admisible y peso del mismo aparato, relacionadas con los materiales y componentes de construcción.

## **2.11 Producción del producto**

Esta es la fase final de cualquier proceso de diseño dado que el objetivo se ha cumplido después de haber pasado por una serie de etapas desde su idealización, hasta su construcción y evaluación. Dado que el SMC en cuestión está destinado exclusivamente para usos académicos y de investigación, la producción del producto se omite.



# Capítulo 3

## Diseño de detalle del sistema de manipulación cartesiano

En este capítulo se abordan los métodos matemáticos que gobiernan los movimientos del SMC, así como los cálculos correspondientes para dimensionar los componentes del sistema de acuerdo a las capacidades establecidas en los requerimientos de diseño. También se presentan los análisis y simulaciones del sistema con base en las formulaciones desarrolladas para proyectar y validar el desempeño del manipulador ante ciertas condiciones de operación. Los circuitos y diagramas eléctricos y de control de información son elaborados para identificar los procesos que lleva a cabo el dispositivo internamente para realizar sus tareas.

### 3.1 Análisis cinemático

El sistema de manipulación cartesiana es un robot manipulador de 3 grados de libertad accionados a través de juntas lineales y como tal requiere de un modelo matemático que represente la forma en la que se da el desplazamiento de los ejes y los actuadores que impulsan los eslabones prismáticos del dispositivo. El análisis cinemático describe los procesos analíticos que se adoptan de manera general para relacionar las posiciones, velocidades y aceleraciones de cualquier robot de  $n$  grados de libertad. Básicamente se cuenta con dos procedimientos: el análisis cinemático directo y el análisis cinemático inverso. La cinemática directa consiste en identificar las posiciones, velocidades y aceleraciones lineales de un punto de interés del manipulador, en este caso el efector final, a partir de los parámetros uno variables de los actuadores que impulsan los ejes o juntas activas. Por el contrario, la cinemática inversa consiste en encontrar los desplazamientos, velocidades y aceleraciones angulares necesarias en uno de los ejes o juntas activas, para generar un movimiento deseado del efector final.

Para el caso particular de este manipulador se desarrollan expresiones basadas en el modelo del control cartesiano [62], [63] el cual es utilizado para interpretar los movimientos de un robot en coordenadas cartesianas referenciadas dentro de un espacio cartesiano definido, en este caso el espacio operativo de trabajo del SMC. El esquema de control se fundamenta en el uso de la matriz Jacobiana transpuesta, que es de gran utilidad para identificar posiciones singulares.

#### 3.1.1 Cinemática directa

El problema consiste en ubicar un punto  $r$  dentro del espacio de trabajo en función de las variables angulares  $\theta_x$ ,  $\theta_y$  y  $\theta_z$  correspondientes a cada uno de los motores de los ejes

cartesianos  $X$ ,  $Y$  y  $Z$ , respectivamente, Figura 3.1. Dado que el funcionamiento del SMC consiste en posicionarse en varios puntos dentro del espacio de trabajo, se adopta la convención del vector  $r_i$  donde el subíndice indica la localización del  $i$ -ésimo punto. A cada vector  $r_i$  le corresponde un vector  $\theta_i$  con las posiciones angulares correspondientes a las rotaciones generadas en los motores.

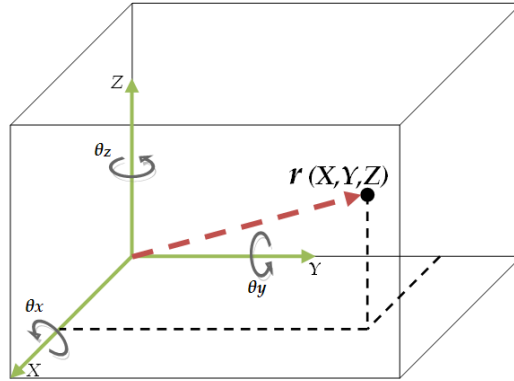


Figura 3.1. Diagrama cinemático auxiliar de la ubicación del punto  $r$  en el espacio de trabajo del SMC.

Las posiciones dentro del espacio de trabajo son funciones de los ángulos en los motores, por lo que se propone la siguiente expresión como fundamento para resolver el problema de posición para la cinemática directa:

$$r_i = K(\theta_i) \quad (3.1)$$

donde  $r_i = \{X_i, Y_i, Z_i\}^T$ ;  $\theta_i = \{\theta_{X_i}, \theta_{Y_i}, \theta_{Z_i}\}^T$  para  $i = 1, 2, \dots, n$

La constante  $K$  es la relación que existe entre el desplazamiento angular, en los motores, y el desplazamiento lineal, en el efector final; depende directamente del elemento de transmisión de movimiento que se utiliza para posicionar los ejes. En el caso de los husillos roscados, el paso  $l$  del husillo es el parámetro que relaciona la rotación con el desplazamiento lineal, por lo que se establece que:

$$K = l/2\pi \quad (3.2)$$

Sin embargo, en el caso más general de manipulación, el movimiento requerido para ir a una posición deseada se calcula a partir de la posición actual del manipulador. En otras palabras, para ir a una posición final  $i$ , es necesario conocer la posición actual  $i-1$ . Así, se propone la siguiente expresión:

$$r_i = K\Delta\theta_i + r_{i-1} \quad (3.3)$$

El valor  $\Delta\theta_i$  referido en la ecuación (3.3) se refiere al cambio o diferencia de posiciones angulares  $\theta_i - \theta_{i-1}$ . Al expandir la expresión (3.3) para cada uno de los ejes se obtiene que el movimiento de los motores afecta de manera proporcional a la posición lineal del efector final:

$$X_i = \frac{l}{2\pi}(\theta_{X_i} - \theta_{X_{i-1}}) + X_{i-1} \quad (3.4)$$

$$Y_i = \frac{l}{2\pi}(\theta_{Y_i} - \theta_{Y_{i-1}}) + Y_{i-1} \quad (3.5)$$

$$Z_i = \frac{l}{2\pi}(\theta_{Z_i} - \theta_{Z_{i-1}}) + Z_{i-1} \quad (3.6)$$

Al reacomodar y agrupar las ecuaciones (3.4) a (3.6) es posible obtener un arreglo matricial para analizar el comportamiento cinemático del SMC. Proponiendo una expresión con la forma  $r_i = f(\theta_i)$ , se obtiene que:

$$\begin{Bmatrix} r_i \\ 1 \end{Bmatrix} = K \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} & \left\{ \frac{1}{K}(r_{i-1}) - \theta_{i-1} \right\} \\ 0 & \frac{1}{K} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \theta_i \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (3.7)$$

donde  $I$  es la matriz identidad de  $3 \times 3$ . La ecuación (3.7) es el modelo cinemático con el que se soluciona el problema de la posición del SMC, tomando en consideración el control punto a punto. La función  $f$  define una relación entre las posiciones en el espacio cartesiano y las rotaciones en los actuadores.

Para resolver las velocidades que se desarrollan en los ejes, es necesario derivar con respecto al tiempo la ecuación obtenida para la posición. La función que relaciona las velocidades desarrolladas por los motores está dada por la matriz Jacobiana  $J(\theta_i)$ . Esta matriz se usa para establecer la dependencia entre las velocidades angulares  $\dot{\theta}_i$  requeridas en los motores para alcanzar cada posición, y las velocidades lineales  $\dot{r}_i$  en los eslabones del efector final. El Jacobiano es útil para identificar algunas propiedades del sistema y en este proyecto se aplica para la formulación de las ecuaciones de movimiento del SMC. El procedimiento para encontrar las velocidades del sistema se realiza al derivar con respecto al tiempo la ec. (3.7):

$$\dot{r}_i = \frac{d}{dt}\{r_i\} = \frac{d}{dt}[f(\theta_i)] \quad (3.8)$$

la cual puede reescribirse como:

$$\frac{\partial}{\partial \theta_i}[f(\theta_i)]\dot{\theta}_i = J(\theta_i)\dot{\theta}_i \quad (3.9)$$

El término  $J(\theta_i)$  de la ecuación (3-9) es denominado como Jacobiano analítico y consiste en un arreglo multidimensional de derivadas parciales que evalúa el comportamiento que existe entre las variables de las posiciones  $X$ ,  $Y$  y  $Z$  del manipulador donde:

$$\frac{\partial}{\partial \theta_i} [f(\theta_i)] = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial \theta_{x_i}} (K\theta_{x_i}) & \frac{\partial}{\partial \theta_{y_i}} (0) & \frac{\partial}{\partial \theta_{z_i}} (0) \\ \frac{\partial}{\partial \theta_{x_i}} (0) & \frac{\partial}{\partial \theta_{y_i}} (K\theta_{y_i}) & \frac{\partial}{\partial \theta_{z_i}} (0) \\ \frac{\partial}{\partial \theta_{x_i}} (0) & \frac{\partial}{\partial \theta_{y_i}} (0) & \frac{\partial}{\partial \theta_{z_i}} (K\theta_{z_i}) \end{bmatrix}; \quad \theta_i = \begin{Bmatrix} \theta_{x_i} \\ \theta_{y_i} \\ \theta_{z_i} \end{Bmatrix}$$

Dado que los datos correspondientes a los estados previos del manipulador  $(r_{i-1}, \theta_{i-1})$  son valores ya conocidos y constantes en el instante actual, se obtiene la siguiente ecuación:

$$\begin{Bmatrix} \dot{X}_i \\ \dot{Y}_i \\ \dot{Z}_i \end{Bmatrix} = K \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\theta}_{x_i} \\ \dot{\theta}_{y_i} \\ \dot{\theta}_{z_i} \end{Bmatrix} \quad (3.10)$$

la cual se puede reescribir como:

$$\dot{r}_i = K[I]\dot{\theta}_i \quad (3.11)$$

De la ecuación (3.11) se deduce que  $J(\theta_i) = K[I]$ , es la matriz Jacobiana y es constante para el caso del manipulador cartesiano. De esta manera queda resuelto el problema de velocidad del manipulador.

Las aceleraciones que se presentan al posicionar el efector final del SMC pueden ser obtenidas de igual manera si se vuelve a derivar la ecuación (3.9):

$$\ddot{r}_i = \frac{d}{dt} \{\dot{r}_i\} = \frac{d}{dt} [J(\theta_i)\dot{\theta}_i] = \frac{d}{dt} [J(\theta_i)]\dot{\theta}_i + J(\theta_i)\ddot{\theta}_i = J(\theta_i)\ddot{\theta}_i \quad (3.12)$$

reescribiendo la ecuación se tiene:

$$\ddot{r}_i = K[I]\ddot{\theta}_i \quad (3.13)$$

La expresión anterior define que la relación entre las aceleraciones que imprimen los motores son directamente proporcionales a las que se desarrollan en los ejes del SMC.

### 3.1.2 Cinemática inversa

El análisis cinemático inverso se ocupa de encontrar los valores de las variables articulares en términos de la posición del efector final del SMC. Para un manipulador cartesiano como este, el cálculo de la cinemática inversa consiste en invertir directamente el proceso llevado a cabo para resolver la cinemática directa, en otras palabras, se resuelve el vector de posiciones angulares de manera que  $\theta_i = f^{-1}(r_i)$ . Siguiendo este proceso, se puede obtener de la ecuación (3-6) la cinemática inversa:

$$\begin{Bmatrix} \theta_i \\ 1 \end{Bmatrix} = \frac{1}{K} \begin{bmatrix} I & \{K\theta_{i-1} - r_{i-1}\} \\ 0 & K \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} r_i \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (3.14)$$

De manera análoga, de la ecuación (3.11) se obtienen las velocidades angulares necesarias para mover los ejes a una velocidad determinada:

$$\dot{\theta}_i = J^{-1}(\theta_i)\dot{r}_i \quad (3.15)$$

reescribiendo:

$$\dot{\theta}_i = \frac{1}{K} [I]\dot{r}_i \quad (3.16)$$

Nuevamente se presenta la ventaja del modelo lineal de un manipulador cartesiano, ya que únicamente se requiere del despeje de variables. Así, la inversión de la matriz Jacobiana no representa las dificultades que comúnmente se asocian a este proceso algebraico, debido a que la inversión de una matriz unitaria da como resultado la misma matriz.

La solución para la aceleración angular se obtiene de forma análoga de la ecuación derivando con respecto al tiempo la ecuación (3-16) respecto al tiempo y considerando que el Jacobiano es constante:

$$\ddot{\theta}_i = J^{-1}(\theta_i)\ddot{r}_i - J^{-1}(\theta_i)\dot{J}(\theta_i)J^{-1}(\theta_i)\dot{r}_i = J^{-1}(\theta_i)\ddot{r}_i \quad (3.17)$$

al reescribir se obtiene:

$$\ddot{\theta}_i = \frac{1}{K} [I]\ddot{r}_i \quad (3.18)$$

donde  $\ddot{\theta}_i$  es el vector de aceleraciones angulares de los motores. La matriz identidad en todos los casos es de 3x3. También es importante hacer notar que  $J(\theta_i) = J^T(\theta_i)$  y que  $J(\theta_i)J^{-1}(\theta_i) = I$ . Estas relaciones serán útiles en el análisis dinámico del manipulador.

### 3.2 Análisis dinámico

El análisis dinámico del SMC es fundamental para el diseño del sistema, realizar simulaciones, construir el prototipo mecánico e incluso para analizar y proponer algoritmos de control. No obstante, determinar el comportamiento dinámico del manipulador no es suficiente al momento de evaluar su desempeño en la vida real, esto debido a que se presentan problemas prácticos en las mediciones y consideraciones de parámetros como los momentos de inercia que dependen de las geometrías de los eslabones, la ubicación de los centros de masa de éstos y los coeficientes de fricción entre los componentes.

Un método usualmente aplicado para determinar el comportamiento dinámico de un manipulador se fundamenta en las ecuaciones de movimiento de Euler-Lagrange [35].

El Lagrangiano  $\mathcal{L}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$  de un robot con  $n$  grados de libertad se define como la diferencia entre la energía cinética  $\mathcal{K}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$  y la energía potencial  $\mathcal{U}(\mathbf{q})$ :

$$\mathcal{L}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \mathcal{K}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) - \mathcal{U}(\mathbf{q}) \quad (3.19)$$

De esta manera el procedimiento para deducir las ecuaciones dinámicas de acuerdo al modelo de Euler-Lagrange de un robot manipulador están dadas por:

$$\frac{d}{dt} \left[ \frac{\partial \mathcal{L}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})}{\partial \dot{\mathbf{q}}} \right] - \frac{\partial \mathcal{L}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})}{\partial \mathbf{q}} = \boldsymbol{\tau} - \mathbf{v}(\dot{\mathbf{q}}, \mathbf{f}_e) \quad (3.20)$$

De la ecuación (3.20) se identifican los vectores  $\mathbf{q} = \{q_x, q_y, q_z\}$ ,  $\dot{\mathbf{q}} = \{\dot{q}_x, \dot{q}_y, \dot{q}_z\}$  y  $\boldsymbol{\tau} = \{\tau_x, \tau_y, \tau_z\}$  correspondientes a las posiciones, velocidades y torques de los motores respectivamente. El término  $\mathbf{v}(\dot{\mathbf{q}}, \mathbf{f}_e)$  es un vector de fuerzas o pares de fricción que está en función de la velocidad angular  $\dot{\mathbf{q}}$  en los actuadores y de la fricción estática  $\mathbf{f}_e$ .

En la Figura 3.1 se aprecia un esquema que representa la ubicación de un punto dentro del espacio de trabajo. Con base en este diagrama, se presenta en la Figura 3.2 un esquema específico que describe la distribución geométrica de los eslabones que habrán de componer al SMC físicamente. El arreglo que se propone consiste de los ejes X y Y ubicados en un plano superior, donde el eje X se encontrará acoplado al eje Y. Por el contrario, el eje Z estará desacoplado de los dos ejes anteriormente mencionados, funcionando como una plataforma independiente.

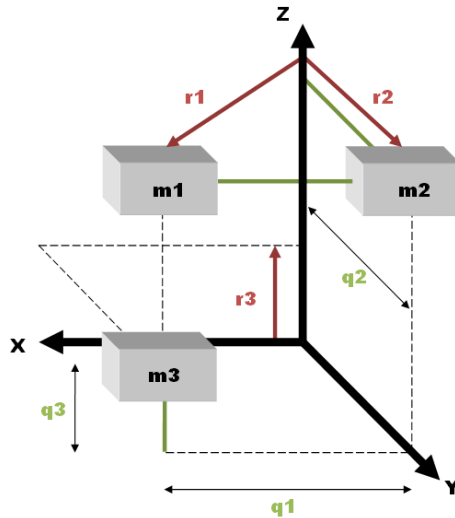


Figura 3.2. Esquema representativo de la distribución física de los ejes en el SMC

De esta forma, se proponen expresiones que representan el movimiento de cada uno de los eslabones, tomando en cuenta el desplazamiento lineal que se produce en ellos y la masa que tiene cada uno. De acuerdo a la ecuación (3.1) se tiene entonces:

$$r_1 = \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ 0 \end{bmatrix}; r_2 = \begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ q_2 \\ 0 \end{bmatrix}; r_3 = \begin{bmatrix} X_3 \\ Y_3 \\ Z_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ q_3 \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

Los vectores  $r_1$ ,  $r_2$  y  $r_3$  representan el movimiento de los ejes X, Y y Z respectivamente. Dado que el acoplamiento del eje X con eje Y indica que la posición del vector  $r_1$  tiene dos componente y con base en el estudio establecido en [62], este planteamiento es usado para determinar el modelo dinámico de un robot cartesiano de tres grados de libertad

La energía cinética de un sistema robótico se define en términos de las velocidades articulares. Sin embargo, debido que los únicos movimientos que se producen en el SMC son de traslación, la energía producida por la rotación es nula. La energía potencial depende únicamente del vector de posición al verse afectado por el campo gravitacional de la tierra.

$$\mathcal{K}(q, \dot{q}) = \frac{mv^2}{2} = \frac{1}{2} \dot{q}^T M(q) \dot{q} \quad (3.22)$$

$$\mathcal{U}(q) = M(q)g(q) \quad (3.23)$$

De la ecuación (3.21) se conocen los vectores de posición para el manipulador, por lo que al derivarlos en el tiempo y elevarlos al cuadrado se encuentran las velocidades correspondientes de cada eslabón:

$$\begin{aligned} v_1^2 &= \dot{r}_1^2 = \dot{q}_1^2 + \dot{q}_2^2 \\ v_2^2 &= \dot{r}_2^2 = \dot{q}_2^2 \\ v_3^2 &= \dot{r}_3^2 = \dot{q}_3^2 \end{aligned} \quad (3.24)$$

Por lo tanto, la energía cinética que corresponde a cada eje del manipulador puede ser deducida. Sumando cada componente vectorial para encontrar la energía cinética total del sistema se tiene:

$$\mathcal{U}(q) = M(q)g(q) \quad (3.25)$$

La energía potencial solamente está dada en función de la altura a la que se encuentre la plataforma del eje Z:

$$\mathcal{U}(q) = m_3 g q_3 \quad (3.26)$$

En la ecuación (3.19) se sustituyen los términos de energía cinética y potencial para encontrar el Lagrangiano.

$$\mathcal{L}(q, \dot{q}) = \frac{1}{2} [m_1 \dot{q}_1^2 + (m_1 + m_2) \dot{q}_2^2 + m_3 \dot{q}_3^2] - m_3 g q_3 \quad (3.27)$$

Al sustituir los términos del Lagrangiano, y resolver en la ecuación de movimiento de Euler-Lagrange, ecuación (3.20), se genera la siguiente expresión para encontrar las fuerzas necesarias en cada eje:

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_1 + m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \\ \ddot{q}_3 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ m_3 \end{Bmatrix} g + \begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{Bmatrix} \quad (3.28)$$

Simplificando, se obtiene el modelo dinámico para el SMC [35] de la forma:

$$F_i = M(q_i)\ddot{q}_i + g(q_i) + f_f(\dot{q}_i, f_e) \quad (3.29)$$

donde:

- $M(q_i)$  es una matriz simétrica, definida positiva que contiene las masas de los ejes del manipulador:

$$M(q_i) = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_1 + m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

- $g(q_i)$  es el vector debido a la fuerzas gravitacionales que afectan al eslabón en cuestión, correspondiente al gradiente de la energía potencial debido a la acción de la gravedad:

$$g(q_i) = \frac{\partial u(q_i)}{\partial q_i} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ m_3 \end{Bmatrix} g \quad (3.31)$$

- $f_f(\dot{q}_i, f_e)$  es el vector de pares de fricción, que contiene los efectos debidos a la fricción viscosa, fricción de Coulomb y fricción estática ( $f_e$ )

$$f_f(\dot{q}_i, f_e) = \begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{Bmatrix} \quad (3.32)$$

El modelo dinámico propuesto en la ecuación (3.29) para el sistema de manipulación cartesiano es tomado como la base matemática para el desarrollo analítico de los efectos físicos a los que se verá sometida la estructura durante su funcionamiento.

Para el sistema de manipulación cartesiano se propone entonces utilizar el modelo dinámico cartesiano, que define su comportamiento en el espacio de trabajo por medio de coordenadas cartesianas. Para desarrollarlo se toman las ecuaciones (3.16) y (3.18) como referencia, ya que en ellas se establece la relación de las variables articulares en términos de los parámetros lineales en el espacio de trabajo. Dichas expresiones se sustituyen en la



ecuación (3.29) para transformar el modelo dinámico a variables angulares. Dado que el término de fuerzas centrípetas y de Coriolis no existe para este caso, se tiene:

$$\begin{aligned}\tau_i &= M(\theta_i)\ddot{\theta}_i + g(\theta_i) + f_f(\dot{\theta}_i, f_e) \\ \tau_i &= M(\theta_i)J^{-1}(\theta_i)\ddot{r}_i + g(\theta_i) + f_f(\dot{\theta}_i, f_e)\end{aligned}\quad (3.33)$$

La potencia empleada para mover al robot a una posición está definida como una variación temporal de la energía total del sistema de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}\dot{\theta}_i^T \tau_i &= \dot{\theta}_i^T \left( M(\theta_i)J^{-1}(\theta_i)\ddot{r}_i + g(\theta_i) + f_f(\dot{\theta}_i, f_e) \right) \\ \dot{r}_i^T J^{-T}(\theta_i)\tau_i &= \dot{r}_i^T J^{-T}(\theta_i)M(\theta_i)J^{-1}(\theta_i)\ddot{r}_i + \dot{r}_i^T J^{-T}(\theta_i)g(\theta_i) + \dot{r}_i^T J^{-T}(\theta_i)f_f(\dot{\theta}_i, f_e) \\ \dot{r}_i^T [J^{-T}(\theta_i)\tau_i] &= \dot{r}_i^T [J^{-T}(\theta_i)M(\theta_i)J^{-1}(\theta_i)\ddot{r}_i + J^{-T}(\theta_i)g(\theta_i) + J^{-T}(\theta_i)f_f(\dot{\theta}_i, f_e)]\end{aligned}\quad (3.34)$$

De esta igualdad se puede simplificar el término  $\dot{r}_i^T$ , que está multiplicando ambos lados de la expresión, y al resolver la ecuación para encontrar el torque  $\tau_i$  se produce:

$$\tau_i = J^T(\theta_i)\mathcal{F}_i \quad (3.35)$$

$$\text{donde } \mathcal{F}_i = M_i\ddot{r}_i + g_i + f_{e_i} \quad (3.36)$$

La ecuación (3.36) se compone de los siguientes términos:

$$- M_i = J^{-T}(\theta_i)M(\theta_i)J^{-1}(\theta_i) \quad (3.37)$$

$$- g_i = J^{-T}(\theta_i)g(\theta_i) \quad (3.38)$$

$$- f_{e_i} = J^{-T}(\theta_i)f_f(\dot{\theta}_i, f_e) \quad (3.39)$$

Al referirse a las ecs. (3.11) y (3.16) es claro que la ecuación (3.35) se transforma en la siguiente expresión:

$$\tau_i = K[I]\mathcal{F}_i \quad (3.40)$$

con los respectivos términos:

$$- M_i\ddot{r}_i = \frac{1}{K}[I]M(\theta_i)\frac{1}{K}[I] \quad (3.41)$$

$$- g_i = \frac{1}{K}[I]g(\theta_i) \quad (3.42)$$

$$- f_{e_i} = \frac{1}{K}[I]f_f(\dot{\theta}_i, f_e) \quad (3.43)$$

La ecuación (3.40) constituye el modelo sobre el cual se sustenta el análisis dinámico para el estudio del SMC; a partir de dicha expresión se puede obtener una

relación inversa con la que se pueda obtener la fuerza en cada eje en función de los torques aplicados en los actuadores. Ya que el modelo es linealmente proporcional, se obtiene:

$$\mathcal{F}_i = \frac{1}{K} [I] \tau_i \quad (3.44)$$

La ecuación (3.40) es de gran importancia, ya que tiene la misma forma que la que se adopta en el principio del trabajo virtual, en donde el trabajo infinitesimal realizado por el efector final, la herramienta, es igual al trabajo infinitesimal realizado por los actuadores, los motores, del manipulador. Considerando este principio es posible obtener una relación fuerza - torque entre las variables del efector final y las variables de los motores. Esta expresión es útil para relacionar las variables de par de torsión, requeridas o suministradas en los actuadores, con las fuerzas que se desarrollarán en el SMC tomando en cuenta los efectos ocasionados por las fuerzas que influyen en el sistema, es decir, las fricciones entre los componentes mecánicos, las masas de las piezas que componen los mecanismos y la acción de la gravedad en el caso que así lo requiera [37].

### 3.3 Diseño de detalle del sistema mecánico

El diseño de detalle del manipulador resulta en el análisis cinemático y dinámico realizado previamente. La información reunida durante dichos procesos permite fundamentar la selección de los elementos mecánicos con la finalidad de complementar el diseño conceptual, proporcionar dimensiones y tolerancias, proponer capacidades límite de operación y establecer principios detallados de funcionamiento del sistema. En la etapa anterior de diseño se planteó una alternativa para adaptar motores paso a paso que impulsen el movimiento de los ejes mediante husillos de bolas. El principio matemático para modelar el comportamiento del SMC fue propuesto en los análisis cinemático y dinámico, de forma que dichas ecuaciones se toman como base para el desarrollo de los cálculos de diseño necesarios para proponer las características que se buscan de acuerdo a las especificaciones de diseño propuestas. Las dimensiones del tornillo de bolas, las guías, los elementos de acoplamiento y la estructura general son los elementos mecánicos que se detallan a en esta etapa.

#### 3.3.1 Cálculos de diseño para los ejes del SMC

El elemento más crítico de diseño en un manipulador cartesiano en general es el torque que se requiere en los motores para posicionar al dispositivo dentro del espacio de trabajo. Los parámetros básicos que definen el criterio de selección para un husillo de bolas son los siguientes:

- Carga axial que ejerce el tornillo durante la rotación
- Velocidad de giro del tornillo
- Carga estática máxima
- Dirección de aplicación la carga
- Manera de soportar los extremos del tornillo
- Longitud del tornillo

- Duración esperada
- Condiciones del ambiente de trabajo

Estos parámetros aparecen en varias metodologías de diseño mecánico para el dimensionamiento de husillos de bolas [59], [64], así como en catálogos de fabricación de este tipo de elementos mecánicos [65]-[67].

Con base en las especificaciones de diseño propuestas (ver Tabla 2.1) se consideran los siguientes parámetros:

- Carga máxima de 20 kg por cada uno de los ejes más 30% adicional.
- Espacio de trabajo de 300 mm x 300 mm x 300 mm.
- Velocidad lineal de 20 mm/s en cada eje.
- Resolución de 1 mm como capacidad mínima de avance.

Como consideración adicional se estableció un factor de carga de 30% extra considerando las pérdidas que pudieran inducirse por la fricción generada en los diversos elementos mecánicos en los motores, en los rodamientos, incluso en los tornillos de bolas y en los elementos de acoplamiento mecánico de la transmisión que, de acuerdo al cálculo de torque para un tornillo de bolas [59], debe ser estimado de un 20% hasta un 100%.

Se propone una velocidad angular para el actuador de 120 rpm. Dado que la velocidad lineal esperada es de 20 mm/s y la velocidad angular es de 2 rev/s, puede inferirse directamente que por cada revolución en el motor, se debe tener un avance en línea recta de 10 mm, es decir, el paso del tornillo de bolas que conserva los parámetros propuestos es 10 mm. Finalmente, es sencillo deducir que para lograr un avance mínimo de 1 mm en cada eje es necesario que el actuador desarrolle 10 pasos durante una vuelta completa.

La capacidad de torque requerida en el motor para poder impulsar una carga neta total de 255 N (20 kg + 30%) en línea recta a una velocidad de 20 mm/s se puede determinar de la siguiente manera:

$$T_u = \frac{FL}{2\pi e} = \frac{(255N)(0.01m)}{2\pi(0.9)} = 0.4513Nm \quad (3.45)$$

$$T_b = \frac{FLe}{2\pi} = \frac{(255N)(0.01m)(0.9)}{2\pi} = 0.3646Nm \quad (3.46)$$

donde: F = Carga de trabajo

L = Paso del husillo

e = Eficiencia mecánica del tornillo de bolas

T<sub>u</sub> = Par torsional por impulsión positiva

T<sub>b</sub> = Par torsional por impulsión negativa

En las ecuaciones (3.45) y (3.46) se aprecia el comportamiento de un husillo de bolas ante diversas condiciones de carga. La primera de estas expresiones contempla el caso en que el tornillo debe impulsar la carga de trabajo hacia arriba. La segunda ecuación que aparece en este contexto se aplica cuando se desea desplazar la carga en sentido contrario, es decir, cuando hay un desplazamiento descendente sobre el tornillo, como es el caso del eje Z que está orientado verticalmente. De forma general, se adoptará el valor de torque por impulsión positiva para diseñar los husillos en todos los ejes del manipulador aun cuando la disposición espacial de dos de los tres ejes (ejes X y Y) sea horizontal. La eficiencia del 90% se debe al contacto de rodadura presente en el mecanismo de la tuerca (Figura 3.3), que al mover constantemente los balines en su interior disminuye la cantidad de fuerza necesaria para desplazar la carga.

Las características encontradas dan la pauta para la búsqueda de actuadores componentes mecánicos que cumplan con las especificaciones y se encuentren disponibles en el mercado. De esta manera se tienen los siguientes datos de entrada:

- Torque del motor @120rpm: 1.0 N-m
- Número de pasos por revolución: 100 pasos
- Paso del tornillo de bolas: 10mm

La selección de un tornillo depende de los datos de carga, que ya se conoce de las especificaciones de diseño, y de recorrido de la tuerca sobre el tornillo en la duración esperada. Para este efecto se propone una duración de 5 años. El recorrido toma en consideración la carrera que realizará la tuerca y el número de ciclos que se realizarán por día. Considerando que un ciclo se compone de 2 carreras de 400 mm (300 mm más 50 mm en cada extremo como margen) y haciendo una suposición de 1000 ciclos diarios (tomando un caso extremo de aproximadamente 11 horas diarias de operación continua durante los 365 días del año) se tiene un recorrido de 1,460 km. De acuerdo con [59] es factible la selección de un tornillo que tenga un diámetro de entre 0.5" y 0.75", por lo que se selecciona un husillo de acero con diámetro nominal de 16 mm y paso de 10mm, comercialmente disponible en México.

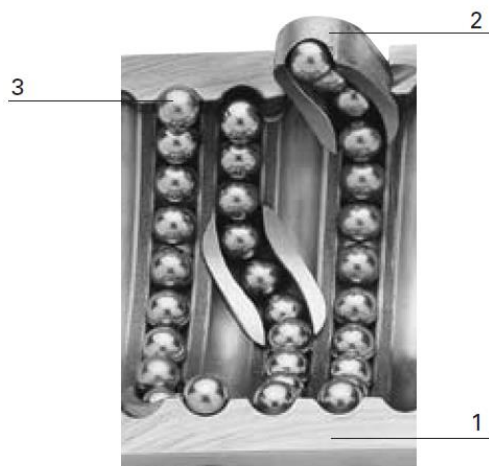


Figura 3.3. Mecanismo de recirculación de una tuerca de bolas: 1. tuerca, 2. deflector, 3. balines.

Dado que el tornillo es un elemento estructural que deberá soportar cargas estáticas y dinámicas, se plantean las capacidades para el eje Z mediante la ecuación de Euler [59], donde se considera el caso de pandeo de columnas. Al verse sometido a una fuerza de compresión axial se adopta la metodología de cálculo que evalúa al husillo como una viga empotrada en el extremo inferior y libre en el extremo superior, donde la carga se encuentra subiendo y bajando.

La carga admisible  $P_a$  se da en función de la ecuación de Euler que considera la carga crítica  $P_{cr}$  aplicada al tornillo de la siguiente manera:

$$P_a = \frac{P_{cr}}{N} \quad (3.46)$$

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2} \quad (3.47)$$

donde: N = Factor de seguridad  
 E = Módulo de elasticidad  
 I = Momento de Inercia  
 K = Factor de empotramiento  
 L = Longitud entre apoyos

De acuerdo con los datos técnicos de un proveedor especializado (ver apéndice D.1) se considera un diámetro de 13.5 mm del núcleo del husillo para efecto de los cálculos (Figura 3.4) así como un módulo elástico de 200 GPa. El factor de seguridad propuesto es de N = 3 y el factor de empotramiento corresponde a un valor de 2.0, por lo tanto la carga admisible para el eje Z del SMC se define como sigue:

$$P_a = \frac{\pi^2 EI}{N(KL)^2} = \frac{\pi^2 (2 \times 10^{11} Pa) \left( \frac{\pi}{64} (0.0135 m)^4 \right)}{3((2.0)(0.4 m))^2} = 1.676 KN \quad (3.48)$$

Tomando en cuenta que la carga máxima de diseño es de 255 N se afirma que la selección es apropiada.

Para los dos ejes restantes se adopta el mismo tipo de tornillo porque las condiciones de carga son menos críticas que en el caso anterior.

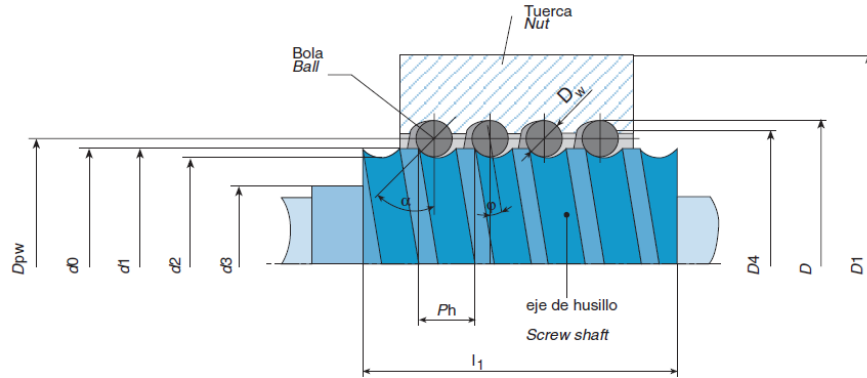


Figura 3.4. Esquema de los parámetros geométricos del tornillo de bolas.

La consideración se hace respecto al eje Y, que es el que soportará las cargas de trabajo (20 Kg), el peso del eje X (5 Kg) y el del órgano efector final (5 Kg). En total suman 30 Kg más el 30% adicional al tomar en cuenta las pérdidas de energía por efectos de la fricción, resultando en una carga neta de 382.6 N. En base a estas suposiciones se asume que el comportamiento de la barra es como el de una viga apoyada en los extremos que se somete a cargas flexión principalmente. Las componentes que afectan a la viga por esfuerzos de axiales, así como las contribuciones por esfuerzo cortante y de torsión pueden considerarse despreciables con respecto a la flexión producida. La flexión se considera en el caso más crítico, esto es al situar la carga total de 382.6 N al centro del tornillo [69]. Este escenario corresponde al caso de momento flector máximo al someter al husillo a una carga simple aplicada en un punto cualquiera [68]. El caso general para este escenario supone distancias  $a$  y  $b$  entre la carga y cada uno de los soportes. De esta manera, el momento máximo resulta del producto entre la fuerza aplicada y las distancias de separación a los extremos dividido por la longitud total entre los apoyos. Una vez encontrado este valor, es posible calcular el esfuerzo normal ocasionado por la flexión en el tornillo. En la ecuación (3.49) se plantea la formulación del momento máximo sustituida en la forma general del esfuerzo por flexión, es decir cuando ambas distancias entre carga y apoyos,  $a$  y  $b$  son iguales:

$$\sigma = \frac{(M_{max})c}{I} = \left[ \frac{Fab}{L} \right] \frac{c}{I} = \frac{Fa^2c}{LI} \quad (3.49)$$

donde:

$$c = \frac{0.0135m}{2}$$

$$I = \frac{\pi(0.0135m)^4}{64}$$

Con  $F = 382.6$  N;  $a = 0.2$  m;  $c = 0.00675$  m;  $I = 1.63 \times 10^{-9}$  m<sup>4</sup>; y  $L = 0.4$  m resulta un esfuerzo de 158.4 MPa. Este valor está muy por debajo del límite de fluencia para el acero seleccionado (AISI 1018), con un valor de 250 MPa [69] por lo que no hay peligro de falla por exceso de carga y estableciendo un factor de seguridad de 3 de acuerdo a la ecuación (3.48).

El valor de la deflexión máxima es de gran interés y nuevamente se toma como referente de diseño el eje Y. De la siguiente expresión se obtiene un aproximado de la deflexión que ocasionarán 382.6 N situados al centro del tornillo:

$$\delta_{max} = \frac{PL^3}{48EI} \quad (3.50)$$

La deflexión máxima  $\delta$  tiene un valor de 1.56 mm. No obstante es preciso considerar barras adicionales que sirven de guía para el elemento móvil que se desplaza a través del eje. Tomando en cuenta que se consideran 2 barras laterales, una a cada lado del tornillo que estará ubicado en el centro, se tiene un total de 3 barras de acero que soportaran la carga y que, por lo tanto, se desplazarán ante dicha fuerza. Al proponer 2 barras de acero de 12 mm de diámetro se puede obtener una barra de sección transversal equivalente con la suma de las 3 secciones de cada elemento, tanto de las 2 barras así como la del tornillo. Los cálculos correspondientes al esfuerzo por flexión y la deflexión ocasionada son entonces:  $\sigma = 52.8$  MPa;  $\delta = 0.52$  mm. Al comparar estos valores contra los que se obtuvieron al considerar únicamente al husillo se observa que dichos esfuerzos disminuyen debido a la rigidez adicional que representan las 2 guías.

La forma en la que se deben soportar los elementos mencionados es primordial para el SMC. La opción más simple y económica que se encontró para conformar una estructura rígida y resistente en la que se puedan ubicar las barras guía y los tornillos de bolas de cada eje consiste en usar travesaños hechos a partir de soleras de acero con barrenos para empotrar las guías y adecuar al husillo de manera que pudiera acoplarse con el motor. Los detalles de las piezas, acoplamientos y ensambles se encuentran en la sección de apéndices (A.1 - A.4). Para referencias detalladas de las capacidades y rangos de operación de los accesorios y mecanismos utilizados, consultar el apartado de apéndices correspondiente a listas de materiales y especificaciones técnicas. También se utilizaron perfiles estructurales de aluminio para poder ubicar los ejes de manera rígida y respetando las restricciones geométricas, es decir, manteniendo la perpendicularidad entre los ejes. Estos perfiles sirven como postes y sus accesorios también se pueden usar como base para el manipulador gracias a su gran rigidez y poco peso, disminuyendo el peso total del dispositivo.

El arreglo general final del SMC puede apreciarse en la Figura 3.5 con un gráfico representativo de la geometría que tiene el manipulador utilizando los componentes y piezas de ensamble. Este modelo es usado para tener una primera aproximación real del espacio de trabajo dentro del cual el manipulador estará funcionando. Los ensambles de los ejes que componen al SMC aparecen en la sección de apéndices (Apéndice A) de manera detallada, así como también los acoplamientos especiales, piezas y sistemas de transmisión de movimiento.

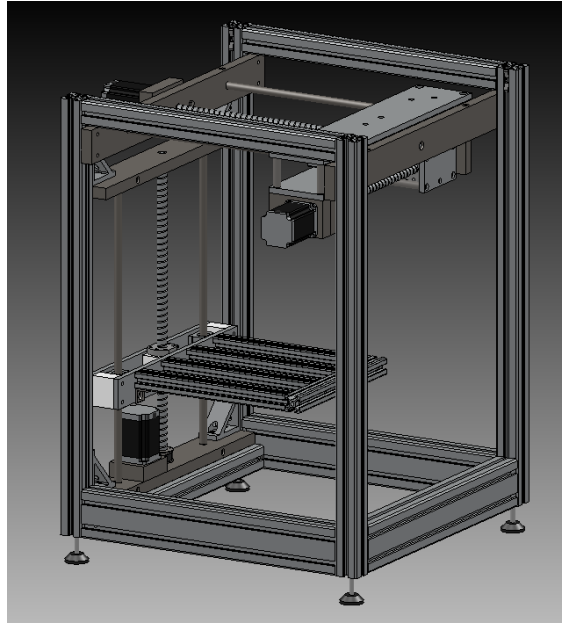


Figura 3.5. Diseño mecánico del manipulador cartesiano.

En la Figura 3.6 se muestran las proyecciones en el plano del SMC con las dimensiones de interés marcadas, es decir, con una acotación de las distancias máximas entre los elementos del dispositivo que definen el espacio operativo.

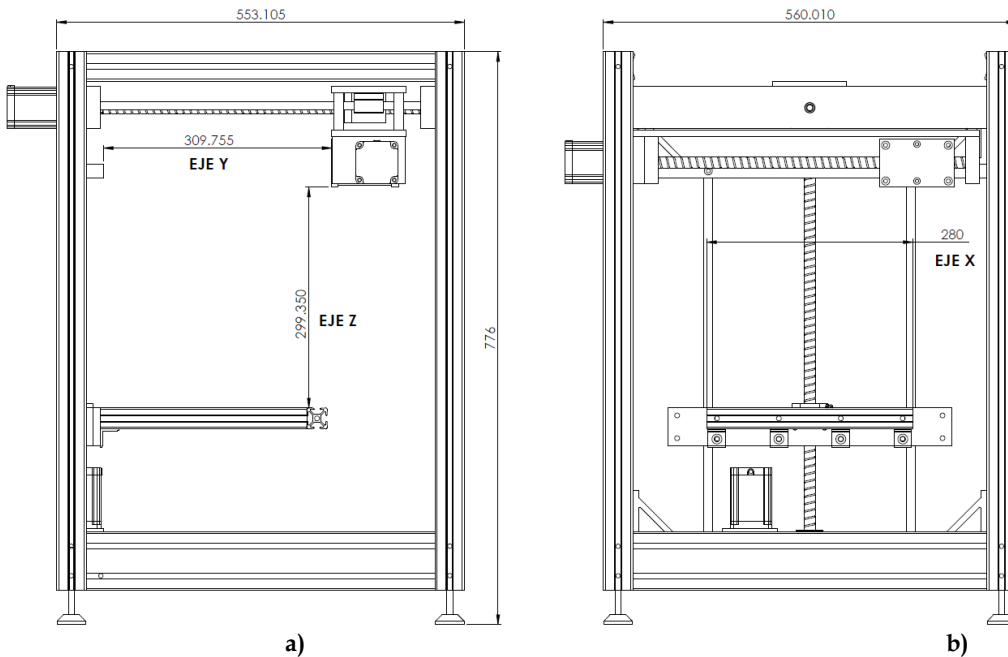


Figura 3.6. Detalle de las dimensiones del espacio de trabajo para el modelo virtual: a) vista lateral del SMC, b) vista frontal del SMC.



### 3.4 Simulación numérica

Para validar las ecuaciones de restricción de la cinemática y dinámica del SMC se realizó una simulación numérica en MATLAB, donde se obtienen gráficas de posición, velocidad y aceleración que permiten cotejar el resultado y confirmar que las consideraciones tomadas para el diseño son correctas y aceptables. De la misma manera se pueden comparar los resultados arrojados por este proceso con los estimados en los cálculos y con el modelo de construcción propuesto a fin de evaluar los parámetros de operación de los actuadores con mayor fiabilidad.

En la simulación numérica se tomarán valores que contemplan ajustes al tomar en cuenta consideraciones de detalles en el ensamble físico del prototipo y también la inclusión del efector final, el cual pudiera tener varias geometrías y tamaños. Los valores considerados se muestran en la Tabla 3.1.

	Desplazamiento máx. modelo 3D [mm]	Desplazamiento máx. simulación [mm]
X	280.0	230.0
Y	309.7	250.0
Z	299.3	250.0

Tabla 3.1. Parámetros máximos para el espacio de trabajo.

En la Figura 3.7 se muestra el volumen de trabajo que se produce al tomar en cuenta los desplazamientos máximos en el manipulador. El espacio obtenido tiene la forma de un prisma rectangular, propio de las configuraciones de los manipuladores cartesianos. Dentro de este espacio se grafica a su vez otro prisma definido por puntos que representan las posiciones límite que puede alcanzar el manipulador de forma que no se presenten colisiones. Este segundo prisma corresponde al espacio de trabajo simulado con los valores de la Tabla 3.1 (tercera columna).

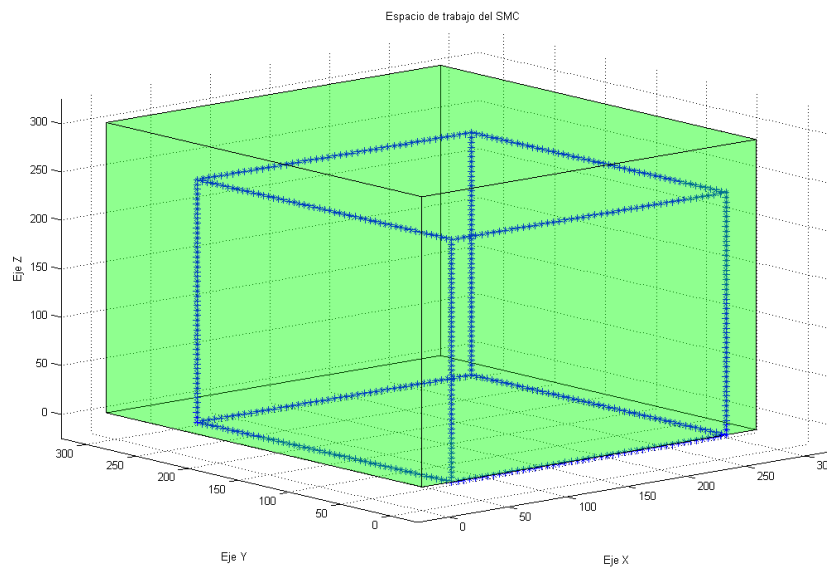


Figura 3.7. Esquema del espacio operativo del modelo virtual (verde) y de la simulación.

Se elaboró un código de programación en el que se generan valores aleatorios de posiciones dentro del espacio de trabajo para calcular la cinemática directa o indirecta según se especifique en el programa. Los parámetros de entrada son lineales para el caso de la cinemática directa y angulares para el cálculo de la cinemática inversa. A continuación (ver Figura 3.8 y Tabla 3.2) se presenta una gráfica que muestra los resultados del algoritmo. Este algoritmo evalúa 2 posiciones, una inicial y una final y calcula para cada punto la cinemática directa, con lo cual se obtienen posiciones angulares en función de las posiciones lineales ingresadas (tabla 3.2). Después de haber realizado el cálculo, se trazan en la gráfica las trayectorias que se siguen en cada eje, y finalmente se muestra el vector resultante generado entre los puntos de muestra inicial y final. El algoritmo calcula a su vez los valores de las normas para conocer la magnitud del vector resultante. En el apéndice C.1 puede consultarse el código completo para esta simulación en particular.

	Posición inicial (mm)	Posición final (mm)
Eje X	180	50
Eje Y	200	250
Eje Z	190	20

Tabla 3.2. Posiciones de muestra para la simulación numérica.

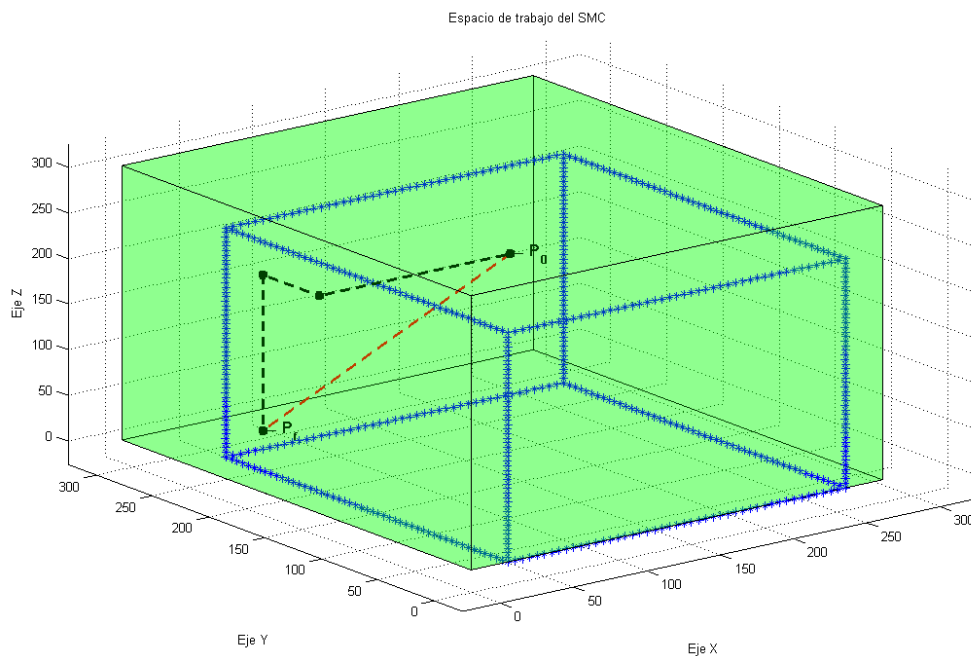


Figura 3.8. Gráfica de desplazamiento entre un punto inicial ( $P_0$ ) y un punto final ( $P_f$ ).

También se presenta una aproximación del torque requerido en los motores utilizando las expresiones propuestas en el modelo dinámico cartesiano. Del modelo tridimensional generado para la construcción del prototipo del SMC es posible obtener el

peso estimado de los componentes del manipulador, de manera que al tomar como base la ecuación (3.28) para sustituir los valores de las masas de los ejes X, Y, y Z se hace un cálculo de la fuerza presente en cada actuador debido a las cargas a las que se verá sometido. El valor de la aceleración para cada eje se evalúa como una diferencia de velocidades en el tiempo, partiendo del reposo hasta la velocidad máxima propuesta de 20 mm/s en un tiempo de 2.5 ms. En este intervalo de tiempo se acelera el actuador del reposo a su máxima velocidad tomando como base el hecho de que el microcontrolador envía un pulso completo en 1.25 ms a una frecuencia de 800Hz hacia los motores de acuerdo a la ecuación (3.53). Por lo tanto, el eje del motor se acelera de 0 a 20 mm/s en 2.5 ms, resultando una aceleración de 8 m/s<sup>2</sup>.

La evaluación de la fuerza de fricción se toma en el punto de contacto en los rodamientos considerando un coeficiente de fricción estática de 0.02 de acuerdo a la hoja de datos del tornillo de bolas [66]. El peso para cada elemento del manipulador en este cálculo toma en consideración únicamente los componentes que se mueven, es decir los carros transportadores. De esta forma, para el eje X se tiene una masa aproximada de 1 kg considerando la suma de los pesos del carro transportador y del efector final. Para el eje Y se sumara el peso de todo el eje X, tanto los elementos de soporte como el módulo de transporte con un peso de 5kg., como el propio transporte del eje Y sumando 6.5 kg en total. En el eje Z se toma en cuenta el peso de la plataforma y de la carga de trabajo de 20kg propuesta en un inicio, sumando en conjunto 23kg. Las reacciones por las cargas en cada eje se consideran como la fuerza normal para hacer el cálculo de la fuerza de fricción. Con base en la ecuación (3.28) se determina el vector de fuerzas en el efector final:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 5 + 1.5 & 0 \\ 0 & 0 & 3 + 20 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 8 \\ 8 \\ 8 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 3 + 20 \end{Bmatrix} 9.81 + \begin{Bmatrix} 0.24 \\ 2.93 \\ 5.88 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 1.24 \\ 54.93 \\ 415.51 \end{Bmatrix} \quad (3.51)$$

Sustituyendo en la ecuación (3.40) el vector de fuerzas obtenido, se determina el torque total aproximado que será necesario aplicar en cada motor para mover el respectivo eje del SMC y así comparar el resultado con el que se obtuvo en la ec. (3.45).

$$\begin{Bmatrix} \tau_x \\ \tau_y \\ \tau_z \end{Bmatrix} = \frac{0.010}{2\pi} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1.24 \\ 54.93 \\ 415.51 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0.001 \\ 0.087 \\ 0.661 \end{Bmatrix} \quad (3.52)$$

Es claro que el resultado para el caso más crítico se acerca al obtenido del cálculo por las formulaciones de la literatura.

### 3.5 Simulación MEF

Adicionalmente al análisis numérico presentado anteriormente y al conjunto de cálculos de diseño realizado, se presenta una simulación por el Método de Elemento Finito, con la que se pretende verificar que los valores obtenidos como parámetros máximos permisibles de esfuerzos y desplazamientos, son aceptables y similares con

respecto a los ya obtenidos. Con la ayuda del módulo de simulación estructural que contiene el software de diseño Siemens NX6® fue posible hacer un modelo aproximado con la geometría de los ejes del manipulador y con las propiedades físicas de los materiales que los componen. Concretamente, se presenta el análisis del eje Y, y del eje Z del manipulador ya que son los elementos en donde se presentan las cargas más críticas que pueden hacer susceptible de fallas al dispositivo.

El modelo que se propone para el eje Y se compone de 3 barras cilíndricas paralelas, dos laterales (las guías del eje) y una central (husillo de bolas), que están fijas en ambos extremos representando el empotramiento en soportes los rígidos (soleras). Encima de estas barras se ubica una placa de Aluminio que une al eje Y con el eje X. De esta forma la condición de carga que se adopta es de una fuerza uniformemente distribuida que se aplica sobre esta solera de Aluminio. Dicha carga se sitúa al centro de las barras como se muestra en la Figura 3.9.

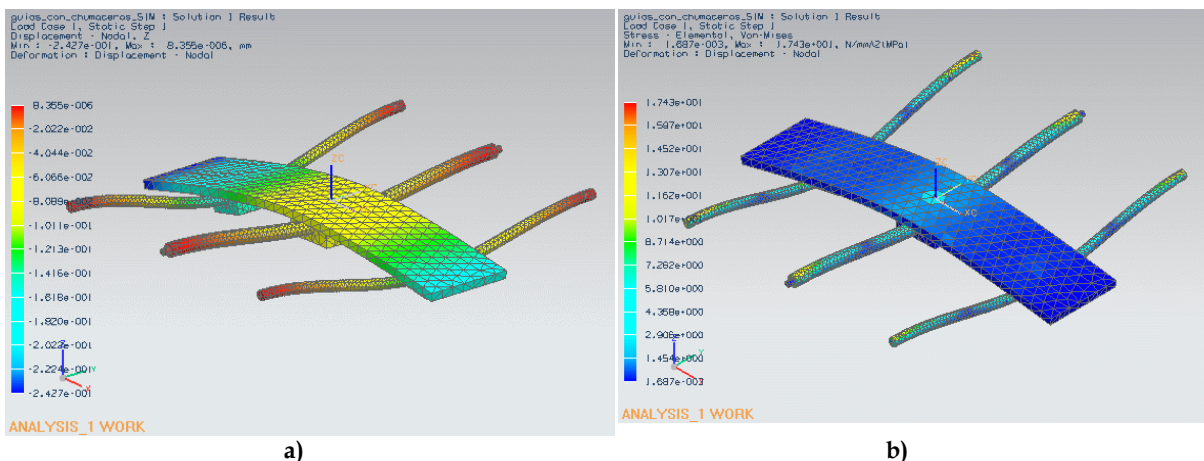


Figura 3.9. Resultados de la simulación MEF para el eje Y del SMC: a) simulación del desplazamiento, b) simulación del esfuerzo.

Para el caso del eje Z del manipulador el modelo que se propone es nuevamente de 3 barras, que de igual forma representan las guías y el tornillo de bolas. Estas barras se fijan en sus extremos para emular las restricciones del empotramiento en los soportes superior e inferior. El modelo de la plataforma se simplifica mediante una placa rígida de aluminio que abraza las 3 barras cilíndricas.

La condición de carga que se considera para esta simulación es de una carga uniformemente distribuida sobre la superficie de la placa que representa el peso máximo permitido de acuerdo a las especificaciones de diseño. De igual forma se obtienen los comportamientos de esfuerzo y desplazamiento ante dichas restricciones, Figura 3.10.

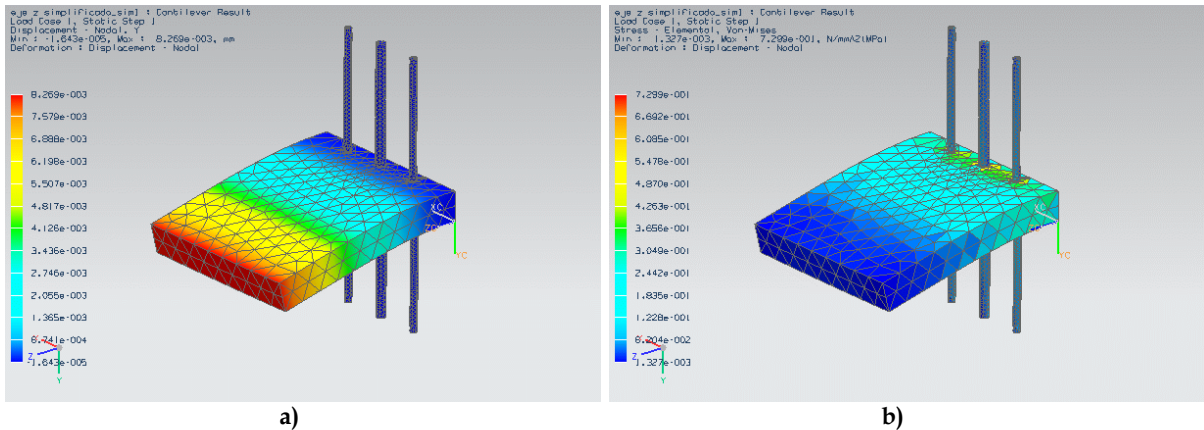


Figura 3.10. Resultados de la simulación MEF para el eje Z del SMC: a) simulación del desplazamiento, b) simulación del esfuerzo.

En la tabla 3.3 se presentan los valores de desplazamiento y esfuerzo obtenidos para el eje Y.

Desplazamiento (mm)				
	X	Y	Z	Resultante
<b>Máximo</b>	$1.37 \times 10^{-2}$	$6.61 \times 10^{-3}$	$1.84 \times 10^{-5}$	$2.45 \times 10^{-1}$
<b>Mínimo</b>	$1.15 \times 10^{-2}$	$-6.62 \times 10^{-3}$	$-2.45 \times 10^{-1}$	0
Esfuerzo (MPa)				
	Von-Mises	Min Principal	Max Principal	Cortante máximo
<b>Máximo</b>	23.9	7.208	25.87	12.17
<b>Mínimo</b>	$1.12 \times 10^{-3}$	-25.79	-7.18	$6.42 \times 10^{-4}$

Tabla 3.3. Resultados de la simulación por el método de elemento finito para la condición de carga en el eje Y el SMC.

En la tabla 3.4 se presentan los valores observados durante la simulación por MEF para el eje Z del manipulador.

Desplazamiento (mm)				
	X	Y	Z	Resultante
<b>Máximo</b>	$1.06 \times 10^{-4}$	$8.26 \times 10^{-3}$	$8.11 \times 10^{-4}$	$8.31 \times 10^{-3}$
<b>Mínimo</b>	$-1.05 \times 10^{-4}$	$-1.65 \times 10^{-5}$	$-7.94 \times 10^{-4}$	0
Esfuerzo (MPa)				
	Von-Mises	Min Principal	Max Principal	Cortante máximo
<b>Máximo</b>	$9.28 \times 10^{-1}$	$2.84 \times 10^{-1}$	$9.66 \times 10^{-1}$	$4.75 \times 10^{-1}$
<b>Mínimo</b>	$6.71 \times 10^{-4}$	$-9.31 \times 10^{-1}$	$-4.82 \times 10^{-1}$	$3.86 \times 10^{-4}$

Tabla 3.4. Resultados de la simulación por el método de elemento finito para la condición de carga en el eje Z el SMC.

Para el caso del eje Z se presenta un análisis adicional para la evaluación de su comportamiento. En la Figura 3.11 se presenta un esquema de cuerpo libre en el cual se muestran las fuerzas que se ven involucradas durante el movimiento del eje.

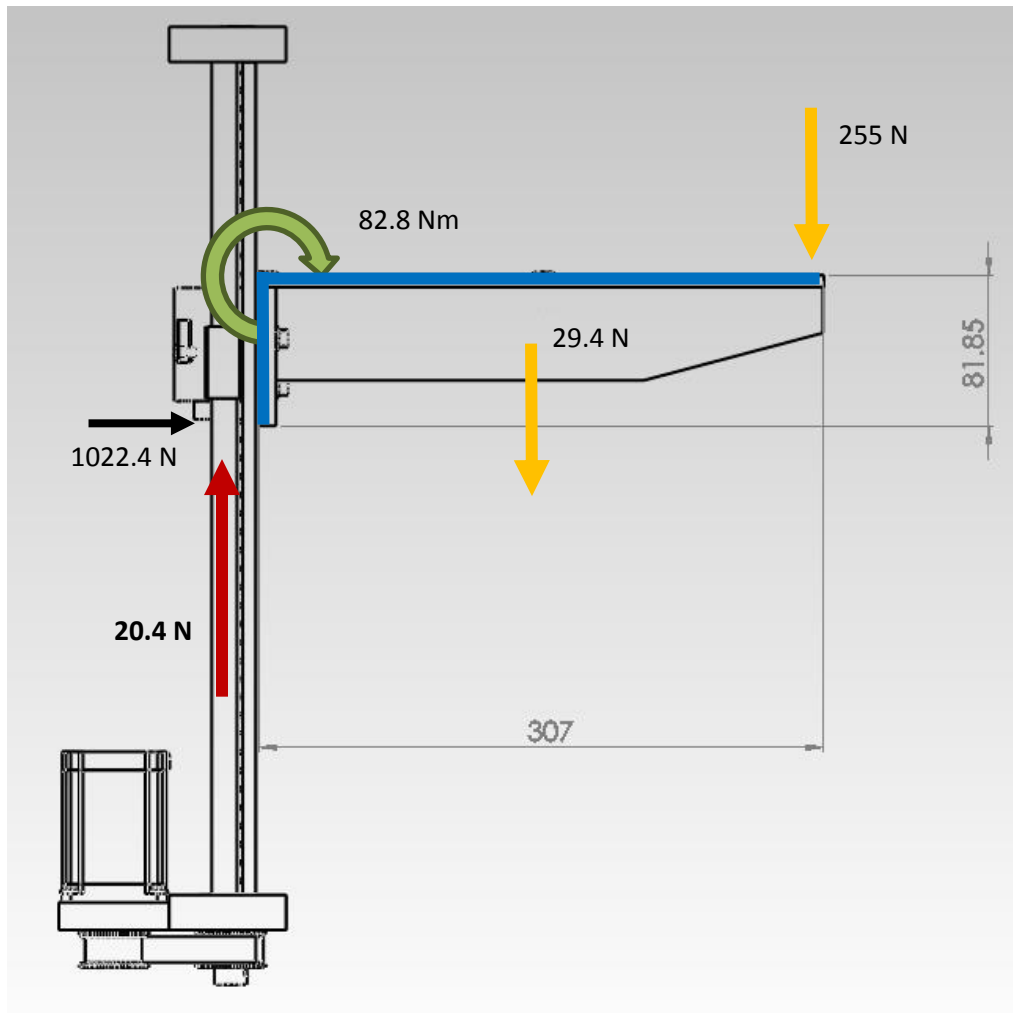


Figura 3.11. Análisis de carga para el eje Z

Este análisis permite identificar el escenario más crítico de carga y las reacciones en los elementos, en este caso la plataforma, del eje Z. La figura muestra una carga puntual de 255N en el extremo de la plataforma de 307mm de largo medidos desde su base (color azul). También se presenta el peso de la propia plataforma actuando al centro de la plataforma. La suma de estas fuerzas multiplicadas por sus respectivos brazos de palanca arrojan como resultado un momento en la base de 82.8 Nm. Se aprecia el soporte, también en color azul, de la plataforma con una longitud de 81.85mm.

El mismo momento de flexión generado por las fuerzas que actúan en la plataforma induce una reacción en la base de 1022.4 N, lo que induce sobre las guías un efecto de fricción entre ellas y los cojinetes. Para encontrar el valor de la fuerza que se produce sobre la guía se multiplica dicha reacción por el coeficiente de fricción que se

utilizó en la ecuación (3.51) equivalente a 0.02 para rodamientos con balines. El resultado que se obtiene es de una fuerza de 20.4 N adversa al movimiento de la plataforma.

### **3.6 Diseño de detalle del sistema eléctrico y electrónico del SMC**

La realización del diseño de detalle del sistema eléctrico tiene como objetivo identificar la manera más efectiva y sencilla de proporcionar energía a los motores que mueven al manipulador tomando en cuenta los niveles de potencia que requiere, y al mismo tiempo, el sistema electrónico que gobierna al SMC.

#### **3.6.1 Circuito eléctrico y componentes principales**

El circuito que se desarrolló se compone de tres secciones. El primer módulo se compone de dispositivos que reciben señales del exterior, integrado por sensores que detectan cuando los ejes han llegado al límite de su trayecto y complementado por una interface visual en una computadora con la que se pueden ingresar valores para alcanzar posiciones deseadas. Este módulo se complementa con botones (push button) que permiten accionar cada motor por separado o de manera simultánea en cualquiera de las dos direcciones disponibles con la finalidad de habilitar al manipulador con un control manual que ayude a la calibración y posicionamiento de los ejes a voluntad para establecer puntos de ajuste con retroalimentación visual por parte del usuario final. La segunda sección está encargada del suministro y control de potencia hacia los actuadores mediante un circuito dedicado exclusivamente para este fin. En tercer lugar se encuentra la parte central de todo el sistema eléctrico donde se concentra el órgano que procesa todas las señales que provienen del exterior, las interpreta y ejecuta instrucciones de acuerdo a un código de programación elaborado para gobernar el comportamiento del manipulador. Los sensores utilizados son interruptores de límite de carrera que envían un pulso o interrumpen la señal de control para indicar que se ha alcanzado el extremo de un eje del manipulador. Para procesar la señal que emite o interrumpe este sensor no se requiere de alta sofisticación en el elemento que procesa las señales, facilitando su interpretación.

El circuito dedicado para aumentar la potencia de los actuadores es una tarjeta de control diseñada para el manejo específico de motores de paso. Su funcionamiento está centrado en un circuito integrado diseñado para la administración de señales y suministro de energía a motores paso a paso. El controlador TB560AHQ es un modulador de ancho de pulso capaz de manejar motores de pasos bipolares utilizando únicamente un tren de pulsos, Figura 3.12. Las funciones de la tarjeta permiten conectar hasta 4 motores de paso a la vez y controlar factores como:

- Cantidad de corriente suministrada a cada uno de los motores, que se refleja directamente en la capacidad de torque en los motores.
- Velocidad en los actuadores por separado en caso de requerir movimientos más ágiles o más suaves según sea necesario.

- Ajuste en la resolución del giro del motor mediante las técnicas de micropaso, permitiendo incrementos finos en la marcha de manera controlada.
- Cambio en el sentido de giro para proporcionar movimientos bidireccionales en los ejes del manipulador.

La tarjeta cuenta con optoacopladores que separan la fase de potencia de la de control para evitar dañar el microcontrolador o el puerto USB de la PC. También cuenta con varios puertos de conexión disponibles para su uso de acuerdo a la aplicación que se requiera. Utiliza una fuente de 12V para energizar todo el circuito y cuenta con relevadores de protección contra voltaje inverso y aumento de temperatura además de disipadores de calor y un ventilador que reduce el efecto de sobrecalentamiento.

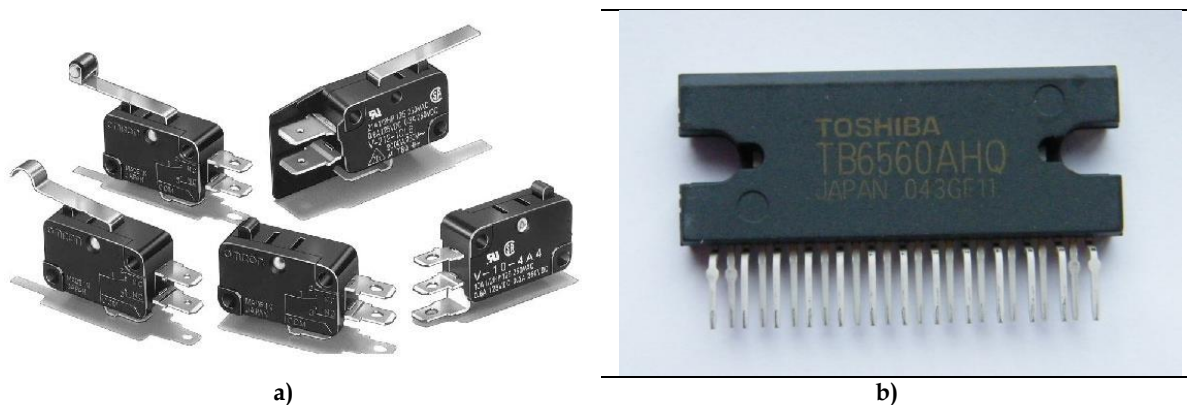


Figura 3.12. Componentes eléctricos usados para el sistema eléctrico del SMC. a) interruptor de fin de carrera. b) driver de potencia TB6560AHQ

Las especificaciones completas de la tarjeta para el control de los motores y del driver dedicado PWM se encuentran en el apéndice D.

El órgano que procesa todas las señales es el microcontrolador. Este circuito integrado tiene la capacidad de gobernar el comportamiento de una gran variedad de señales y de administrarlas de acuerdo a una serie de instrucciones previamente programadas en él. Específicamente, el PIC 18F4550 ofrece características de gran utilidad para el propósito planteado al ser capaz de generar señales de voltaje controladas a frecuencias elevadas, requeridas precisamente por el circuito de potencia que alimenta los motores. A la vez es capaz de monitorear los cambios de estado en todos los sensores que protegen al SMC. Estas actividades se presentan dentro de un entorno visual amigable que proporciona los valores reales de interés que el propio microcontrolador manipula, registrando los cambios en los parámetros de posición con gran precisión y almacenando información si así se le requiere. Esta tarea puede ser realizada por el PIC 18F4550 gracias al puerto auxiliar USB dedicado con el que cuenta, diseñado de manera específica para el desarrollo de aplicaciones de control a través de este puerto desde la PC. Un resumen de la hoja de datos donde se expone de manera más detallada el funcionamiento y capacidades del microcontrolador se encuentra disponible también en el apéndice D.



Los elementos que hacen posible el posicionamiento de los ejes del manipulador son los motores eléctricos paso a paso de corriente directa. Este tipo de actuador funciona como cualquier otro motor eléctrico, solo que los movimientos que se producen al energizarlo son discretos, ya que en su interior cuentan con un número determinado de bobinas que retienen la flecha en una posición dada, Figura 3.13. Cada movimiento es producto de un pulso eléctrico que energiza una bobina a la vez y hace girar en consecuencia la flecha del motor; esta característica es fundamental en las aplicaciones de control de movimiento lineal donde se busca un alto grado de control en la posición y, a la vez, relaciones de avance específicas de orden milimétrico o incluso más precisas. Los actuadores que se adquirieron son motores paso a paso bipolares modelo 57BYGH408 de 4 hilos y cuentan con una resolución de 200 pasos por revolución, lo que resulta en un avance radial mínimo de  $1.8^\circ$  por paso completo, que puede ser reducido mediante la técnica de micropaso. El torque máximo que pueden ofrecer es de 2.1 kg-m a una corriente de 3A, y sus parámetros operativos son compatibles con la tarjeta de control de potencia con la que se cuenta.

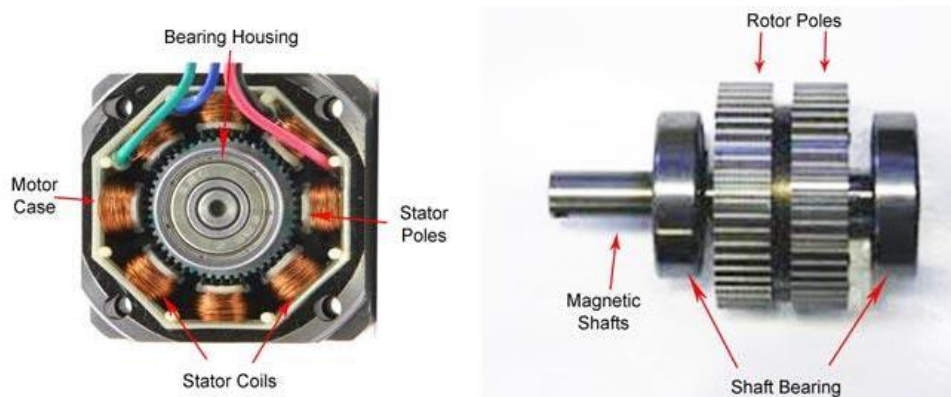


Figura 3.13. Estructura interna del motor de pasos.

Una fuente de poder de 300W complementa al sistema, proporcionando el suministro de energía requerido para cada elemento en los rangos correctos. Esta fuente tiene la capacidad de energizar con 12V a la tarjeta de potencia para los motores de pasos con variaciones de corriente que llegan hasta los 12A. A su vez, es posible obtener una señal por separado para hacer funcionar al microcontrolador con 5V. Adicionalmente, la fuente de voltaje tiene la posibilidad de proporcionar señales de voltaje de 3.3V, -5V y -12V. El modelo de la fuente que se usa es similar a los que se utilizan en las computadoras de escritorio, de forma que en caso de que así sea requerido puede ser reemplazada con facilidad por cualquier modelo compatible.

El esquema simplificado del circuito eléctrico completo se presenta en la Figura 3.14. Los símbolos que identifican a cada componente pueden apreciarse de acuerdo a la nomenclatura eléctrica y electrónica correspondiente, de tal forma que se puede interpretar la función que desempeña un dispositivo en específico, visualizar el tipo de señal que manejan y ubicarlos dentro del módulo correspondiente del sistema.

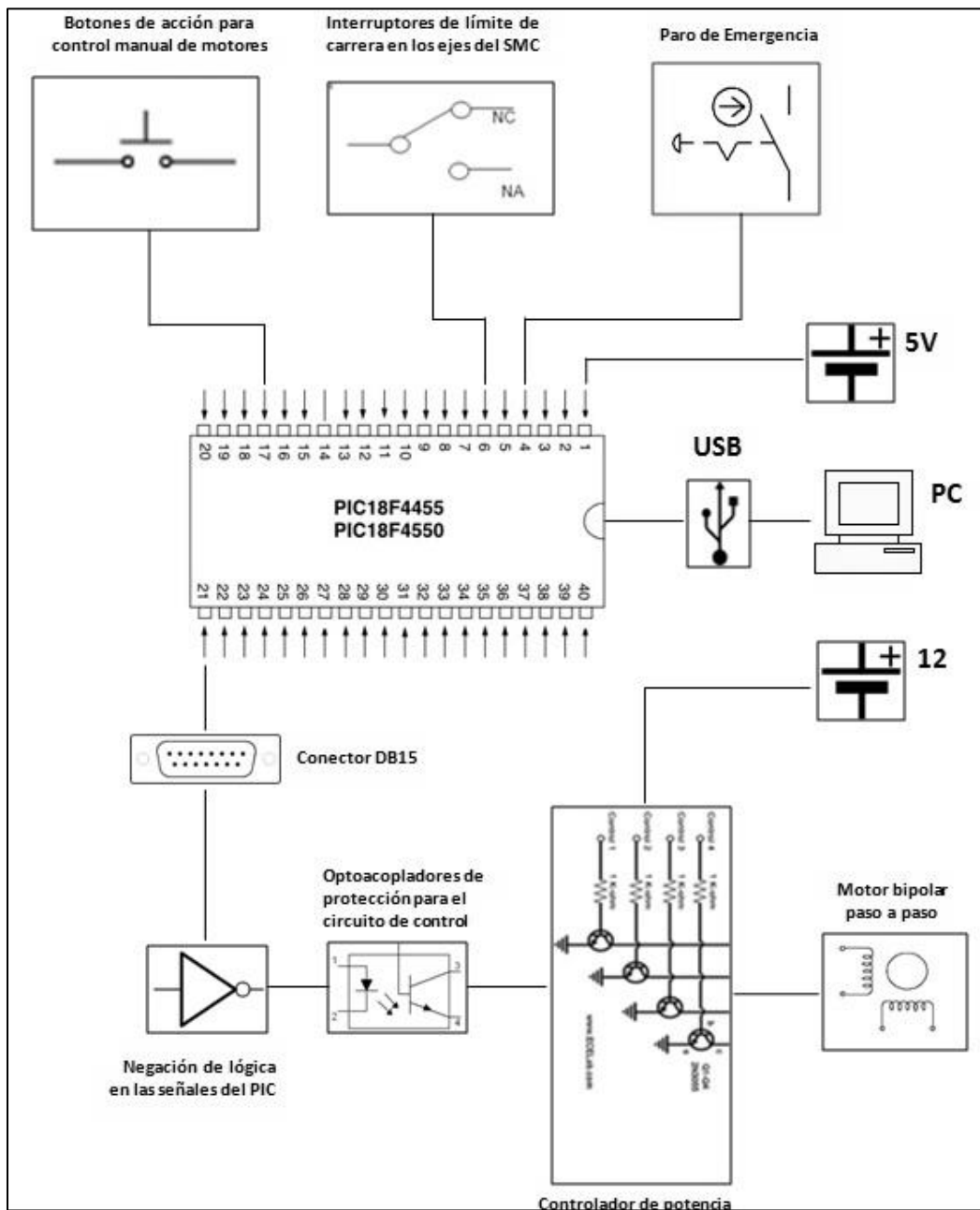


Figura 3.14. Representación esquemática del circuito y de los módulos eléctricos del manipulador.

### 3.6.2 Alimentación y conexión del manipulador

El rango de potencia que se maneja en el circuito del manipulador es relativamente bajo. Los motores de paso que se utilizan tienen un consumo máximo de corriente eléctrica equivalente a 3A con un voltaje de 3.6V. Gracias a las capacidades de la fase de potencia, es posible suministrar esta cantidad de energía utilizando únicamente la fuente de voltaje de 300W. De los cálculos de torque requerido para transportar las cargas de diseño se

estima el consumo de corriente necesario en los motores de acuerdo a las especificaciones de la tarjeta de potencia. Mediante combinaciones binarias accesibles al usuario por medio de un dip switch se regula la cantidad de corriente eléctrica en rangos de 25% (ver apéndice D.3). Durante la operación del SMC se ajusta este suministro a un 50% de capacidad total para obtener un torque aproximado de 1 N-m.

Los componentes del manipulador y sus suministros de voltaje son los siguientes:

- Botones / Interruptores de límite de carrera / Paro de emergencia. Son elementos pasivos que permiten o interrumpen el suministro de corriente entre dos dispositivos al ser presionados. Los botones pueden manejar corrientes pequeñas y se usan para enviar señales en un rango de 5V al microcontrolador para indicar que se requiere del movimiento de alguno de los ejes en tanto estén presionados; Los switches de límite de carrera y de paro de emergencia son dispositivos más robustos y tienen mayor capacidad para interrumpir señales de alta potencia, lo que los hace ideales para el manipulador al operar con señales controladas de 12V.
- Puerto USB. Capaz de energizar por sí mismo al microcontrolador mediante el suministro de corriente proveniente de la PC en un rango que va de los 3V a los 5V.
- PIC18F4550. Circuito integrado que controla todas las operaciones, comunicaciones, señales e instrucciones del SMC. su rango de operación llega hasta los 5V en esta configuración y puede manejar señales por sus puertos de E/S digitales y análogos.
- Compuerta lógica NOT. Con este circuito integrado se facilita el envío de señales hacia la tarjeta controladora de potencia desde el microcontrolador, ya que las señales de entrada que espera recibir son activadas al establecer la conexión a tierra (0V).
- Optoacopladores. Este dispositivo permite mantener separados físicamente los módulos de alto flujo de corriente (motores) de los dispositivos de bajo consumo (microcontrolador) y también hace posible la transmisión de señales entre estos circuitos que pueden tener diferentes rangos de voltaje (5V y 12V).
- Circuito de potencia. Es alimentado por la fuente de 12V aunque puede utilizarse una fuente con capacidad de hasta 24V. La capacidad de la tarjeta de potencia es tal que puede operar hasta 4 motores de pasos a la vez.
- Motores bipolares de pasos. Estos actuadores demandan un voltaje de 3.6V para su activación con un flujo de corriente que alcanza como máximo 3A por fase.

Todas las señales se concentran en una placa en donde están ubicados los componentes permanentemente con sus respectivos conectores para facilitar el manejo del circuito completo sin la necesidad de desactivarlo en caso de que sea necesario.

## 3.7 Diseño de detalle del sistema de control del SMC

### 3.7.1 Firmware y diagrama de control

Se conoce como firmware a la serie de instrucciones que se programan en un dispositivo electrónico directamente en la memoria ROM. Es el código de programación con el que se configura el funcionamiento del hardware, en este caso el PIC18F4550, para que pueda procesar las señales y actuar de acuerdo a los requerimientos de distintas aplicaciones del usuario final. Esta programación se encuentra en el nivel más básico de lógica para gobernar el comportamiento de circuitos electrónicos variados, haciendo posible modificaciones en su estructura para mejorar su eficiencia o aumentar las capacidades del dispositivo.

Para poder generar el firmware del PIC es posible escribir el código en lenguaje ensamblador, sin embargo dentro de los requerimientos de diseño fue especificado el uso de un lenguaje amigable que facilitara modificaciones por distintos usuarios. Por esta razón se buscó un compilador basado en lenguaje C con el cual se puede hacer la programación con facilidad usando instrucciones y librerías de la familia ANSI C, conocidas ampliamente y amigables en su aplicación. El compilador seleccionado es Hi-Tech C para la familia PIC18 de los microcontroladores PIC de Microchip, disponible de manera gratuita para su descarga.

El firmware permite configurar diferentes opciones del microcontrolador tales como:

- Frecuencia de operación
- Activación de puertos de entrada y salida
- Habilidad de entradas analógicas y/o digitales
- Selección de opciones especiales del PIC (activación del puerto USB)
- Manejo de interrupciones
- Utilización de temporizadores dedicados

Aunado a estas configuraciones, el compilador funciona de la misma manera que el lenguaje C permitiendo dar de alta variables de varios tipos, definir funciones que desempeñen tareas específicas, manejar ciclos y condiciones lógicas y también generar librerías para hacer que el código de la rutina principal sea más amigable, teniendo que incluirlas solamente. Información detallada respecto a las librerías y funciones del firmware se presentan en el apéndice

La ejecución del programa principal está basada en la comunicación que se establece entre el PIC y la PC. Todas las instrucciones se desarrollan a partir de que se ha detectado la conexión del puerto USB con un dispositivo compatible. La estructura del programa principal del firmware se compone de casos que pueden darse durante su ejecución mientras el PIC se encuentra conectado a la computadora. Dichos casos son representados por combinaciones hexadecimales; dentro de cada caso se encuentran

distintas funciones que se programaron para mover todos los motores del manipulador, ya sea por separado o en conjunto y contemplando las combinaciones de avance y retroceso en cada eje. Los números hexadecimales son almacenados en un arreglo de variables o buffer que se transmite vía USB para su interpretación ante una petición de datos por parte de la PC. En caso de que el usuario requiera ingresar una posición determinada para ubicar al SMC, también se envía un buffer de datos con valores hexadecimales que dentro del firmware corresponden a un determinado movimiento. El sistema de control está provisto también de un control manual que no requiere de instrucciones explícitas desde la PC, mediante el uso de uno de los puertos del PIC dedicado para la manipulación de las señales para mover hacia adelante y hacia atrás a los ejes X, Y y Z.

Las funciones internas que hacen posible el movimiento de un eje, convierten las variables del buffer en una cantidad de pulsos que al ser enviados al motor producirán un avance igual al solicitado por el usuario. Se establece una décima de milímetro como avance mínimo para cada eje, separando en dos cantidades la distancia deseada: en milímetros y en décimas de milímetro. De esta forma pueden procesarse por separado ambas cantidades para convertirse a su equivalente en pulsos por revolución y sumarse al final para conformar la cantidad de pasos necesaria.

Cada rutina de movimiento en los motores verifica que, antes de enviar un pulso al motor, las señales provenientes de los sensores de límite de carrera no se hayan interrumpido para evitar dañar los mecanismos del eje y sus componentes ante una eventual colisión y consecuente sobre esfuerzo. Para efectos de temporización se crearon subrutinas con las cuales se establecieron intervalos de tiempo de un segundo, una milésima de segundo y de un microsegundo. Estos periodos de tiempo se requieren para lograr enviar la cantidad de pulsos por segundo necesarios para desarrollar en cada eje la velocidad propuesta como especificación de diseño de 20 mm/seg. Para ello se utilizan las siguientes relaciones (tomando en cuenta que por cada paso se deben enviar en total dos pulsos al motor: uno para energizar y otro para desenergizar):

$$1 \text{ rev} = 200 \text{ pasos} = 10 \text{ mm}$$

$$20 \frac{\text{mm}}{\text{seg}} = 400 \frac{\text{pasos}}{\text{seg}} = 800 \frac{\text{pulsos}}{\text{seg}}$$

$$T = \text{periodo} = \frac{1}{800 \text{ pulsos/seg}} = 1.25 \times 10^{-3} \text{ seg} = 1.25 \text{ ms} \quad (3.53)$$

El sistema cuenta también con funciones para hacer avanzar a cualquiera de los ejes en cantidades discretas lineales que pueden ser calculadas en base a las relaciones expuestas en la ec. (3.53), y que se pueden visualizar en la tabla 3.5.

Distancia lineal	Número de pasos
1 décima de milímetro	2
1 milímetro	20
1 centímetro	200

Tabla 3.5. Calculo de avances para el algoritmo de control

El diagrama de flujo de la Figura 3.15 corresponde al algoritmo del firmware del sistema de control del manipulador.

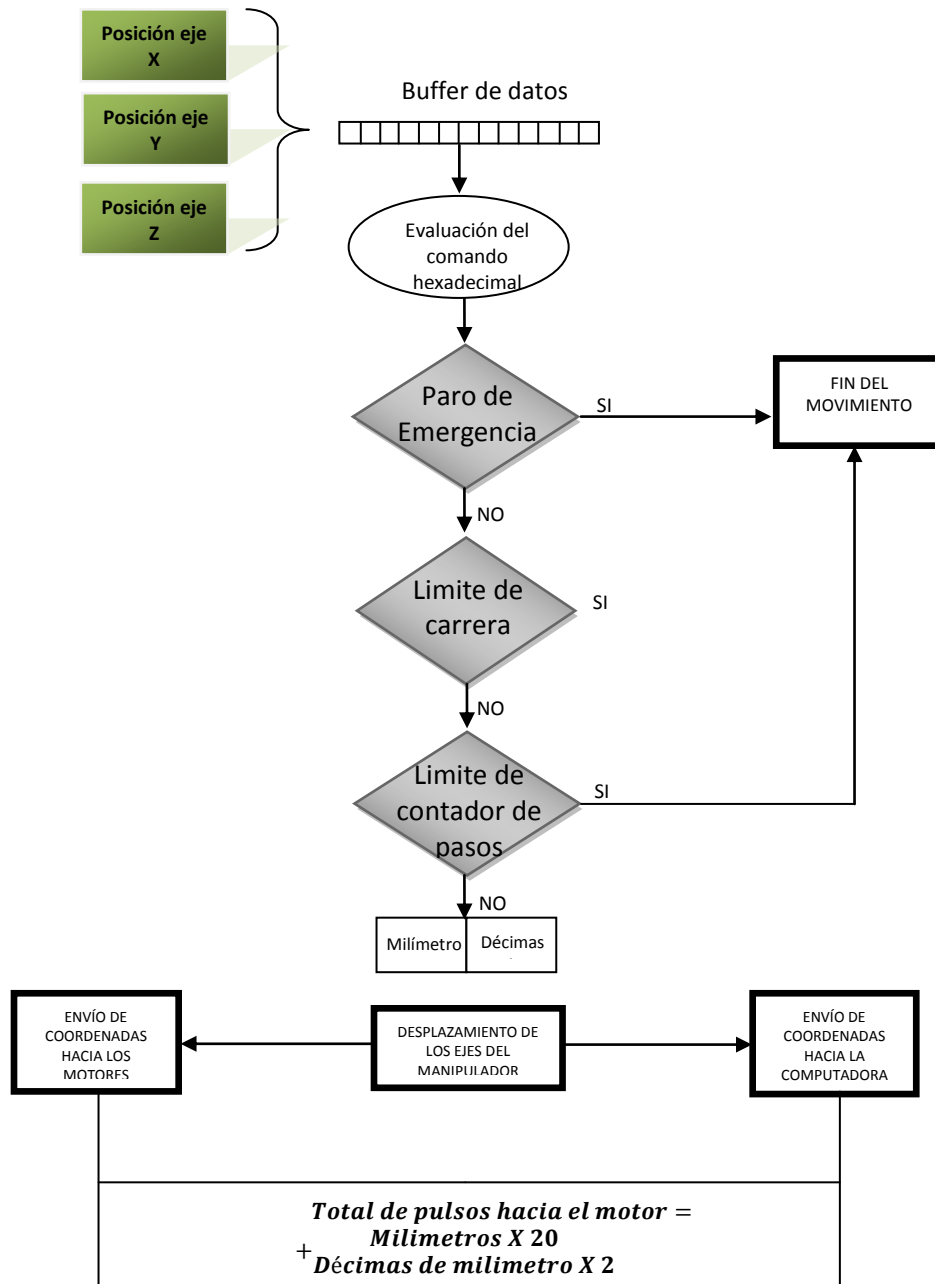


Figura 3.15. Diagrama de flujo que rige el comportamiento del firmware.

En esta figura se identifica la manera en la que los pulsos son enviados al manipulador una vez que se ha recibido la orden desde la PC; los valores en milímetros de la posición en cada eje son segmentados y relacionados en función de la resolución del motor. Dado que el motor avanza 200 pasos cada 10mm, es evidente que una décima de

milímetro es equivalente a 2 pasos del actuador (ver tabla 3.5). Además, ante cada movimiento se revisa la posición anterior para identificar el sentido en el que deben de girar los motores de forma que se alcance la posición deseada.

Para programar el PIC es necesario un grabador de microcontroladores, el cual es un circuito diseñado para enviar el código del firmware hacia el PIC con las configuraciones específicas requeridas por el programa. Para el manipulador se tiene un circuito por separado que se conecta a la PC por medio del puerto USB para descargar el código hacia el PIC de una manera fácil y sencilla mediante una interface que permite seleccionar el código para la aplicación definida por el usuario. La manera en la que se debe realizar este proceso así como las consideraciones del manejo de este dispositivo de programación se encuentran dentro del apéndice D.

### 3.7.2 Protocolo de comunicación

Para establecer un enlace entre el sistema eléctrico del SMC y su homólogo de control es preciso el uso de un medio de comunicación rápido y de uso práctico. El protocolo de comunicación seleccionado para este proyecto es el USB debido a:

- Capacidad de conexión con distintos dispositivos.
- Configuración automática del dispositivo conectado y facilidad para conectarlo y desconectarlo sin peligro de daño (plug & play).
- Por lo general no requiere de una fuente de voltaje y ahorra energía mientras no hay transmisión de datos.
- Eliminación del ruido durante la transmisión de datos para eliminar errores que, en caso de ser detectados, son corregidos automáticamente por el hardware.
- Rangos variados de velocidad para aplicaciones y dispositivos periféricos diversos.
- Bajo costo de implementación y mantenimiento.
- Compatibilidad con prácticamente cualquier tipo de sistema operativo.

El diseño de un dispositivo USB para la PC involucra la selección de un circuito integrado de control, que en este caso es el PIC 18F4550, con una interface disponible para la comunicación a través del USB y de un módulo inteligente que se comuniquen con el microcontrolador, es decir la propia PC. Típicamente, se le conoce al dispositivo inteligente o maestro como anfitrión, y al dispositivo de control o esclavo como huésped. Adicionalmente, es necesaria la generación de códigos de programación para el PIC (firmware) de modo que se pueda configurar la transmisión de datos para leer señales de entrada y escribir señales de salida; para la PC (controlador) con el que se configure la operación del puerto para comunicarse con el dispositivo y un software de aplicación (interface gráfica) para poder interactuar con el dispositivo. También se requiere de identificar la velocidad de operación más adecuada para la aplicación del dispositivo y el correspondiente tipo de transmisión de datos [70].

Existen 4 tipos de transferencia de datos para un dispositivo USB que dependen del propósito que se le quiera dar a la aplicación final: transferencia de control, transferencia masiva (bulk), transferencia simultánea (isochronous) y transferencia por interrupción. Las transferencias de control son usadas por todos los dispositivos USB para la transmisión de la información básica que requiere el dispositivo anfitrión para configurar al huésped. Las transferencias masivas se emplean cuando se busca enviar una gran cantidad de información, por ejemplo al leer datos de una memoria o disco. Una transferencia simultánea es aquella que debe darse de manera continua y en tiempo real donde los datos se transmiten de manera constante como es el caso de la reproducción de música en tiempo real. Finalmente, las transferencias por interrupción son útiles en los casos donde se tienen transferir datos sin retraso hacia el dispositivo huésped. Dispositivos que generalmente usan este tipo de transferencia son el teclado y el ratón de la computadora, ya que el retraso que hay desde que se presiona una tecla o se mueve el ratón debe ser imperceptible.

El protocolo de comunicación USB clasifica a los dispositivos que puede controlar en varios grupos (tabla 2.6). Para controlar al manipulador cartesiano se utiliza la transferencia de interrupciones, lo que cataloga al SMC como un dispositivo de interfaz humana. En los dispositivos de tipo HID (Human Interface Device) el huésped monitorea y actúa en consecuencia a los estímulos provenientes de la persona, es decir de un humano, lo suficientemente rápido para que el usuario no perciba el retraso que existe entre su acción y la respuesta del dispositivo. Mediante el envío de reportes, el dispositivo USB identifica la manera en la que debe utilizar los datos recibidos desde la PC.

La importancia del conocimiento del protocolo USB radica en la necesidad de generar código para configurar las aplicaciones en ambos lados del canal de comunicación. Para preparar al dispositivo USB, representado por el microcontrolador 18F4550, es preciso crear una serie de instrucciones con las que el dispositivo pueda emitir datos usando variables de un tipo compatible con la velocidad de transmisión y el tamaño del buffer de datos seleccionado de acuerdo al tipo de transferencia (por interrupciones) y la clase de dispositivo (HID). Una vez que se tiene esta programación, o incluso durante la elaboración de la misma, se crea el código para la PC con el cual se configura de igual forma la velocidad y el tipo de datos con los que se va a trabajar durante la conexión. Éste, deberá interpretar la información proveniente del PIC y posteriormente habrá de para administrar y procesar las señales de respuesta requeridas por el funcionamiento del proceso. En la Figura 3.16 se presenta un diagrama de flujo que explica la manera en la que comienza el proceso de comunicación por USB entre un dispositivo de control y su respectivo anfitrión [71].

Específicamente, el PIC comenzará a funcionar una vez que se conecte a la PC por medio del USB. Inmediatamente después se ejecutan las directivas de reconocimiento para poder establecer al flujo de datos entre los dispositivos anfitrión y huésped. Una vez realizado, el proceso se mantiene al pendiente de cualquier estímulo que se presente en el SMC, ya sea en el control manual o en la interface gráfica. Al estar programado como un dispositivo de interfaz humana, la respuesta es virtualmente instantánea. Por ejemplo, si se acciona el eje X en el control manual, los datos de los pulsos son calculados y convertidos por el firmware del PIC en valores milimétricos para ser transmitidos a través



del USB hacia la PC, que reconoce la información y la procesa de tal forma que pueden registrarse los cambios de posición dentro de los cuadros de diálogo de la interface al instante. El proceso funciona de manera inversa ya que, al presionar dentro de la interface el botón con el que se envían las coordenadas deseadas, los datos son procesados por el código en el lado de la PC y transmitidos de inmediato hacia el PIC para traducir la información en cantidades de movimiento y sentidos de dirección en forma de impulsos eléctricos que se envían hacia los motores a través de la tarjeta de potencia.

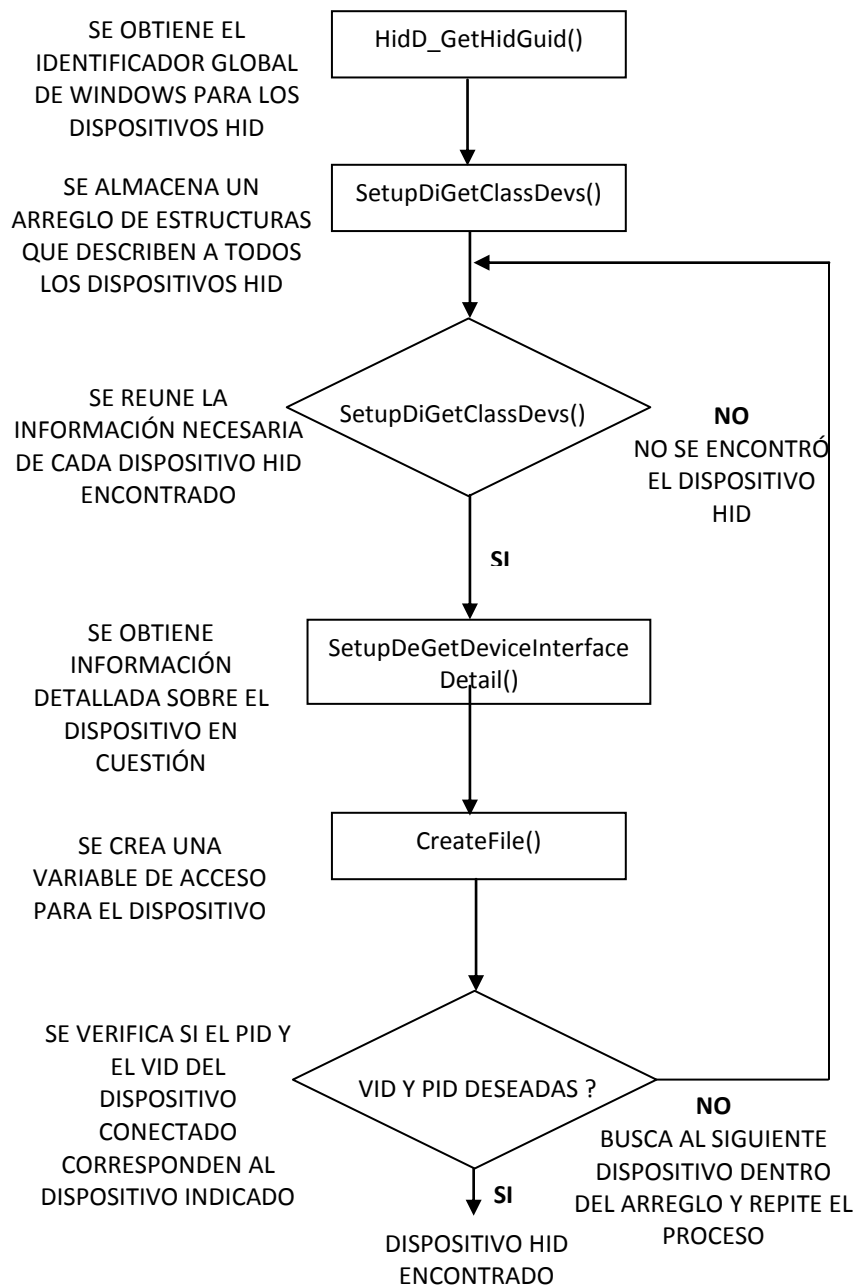
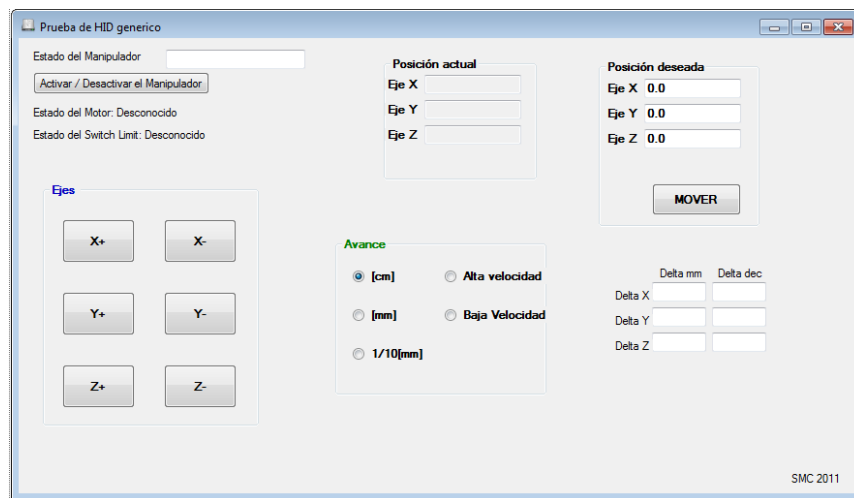


Figura 3.16. Diagrama de flujo para reconocer un dispositivo de interfaz humana por USB.

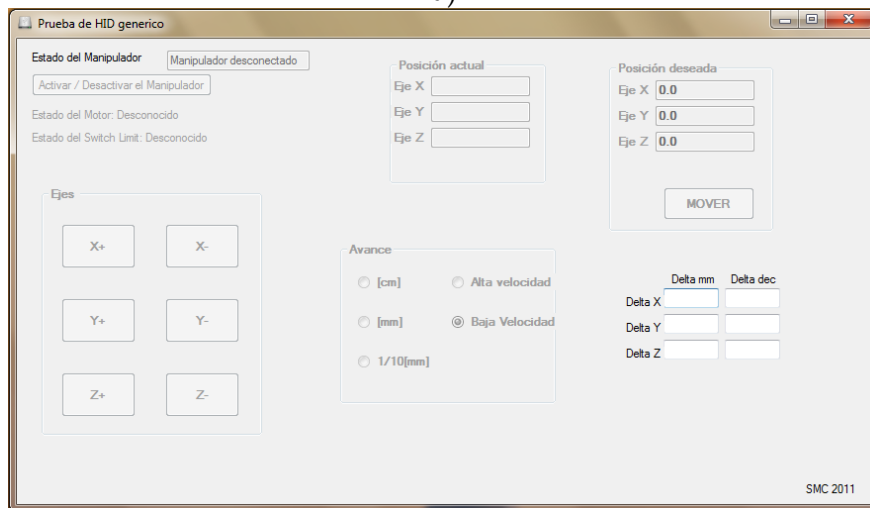
### 3.7.3 Desarrollo de interface gráfica

Al igual que cualquier otro dispositivo mecatrónico, el sistema de manipulación cartesiano tiene que estar provisto de un medio a través del cual el usuario final tenga la facultad de interactuar con él. La interface gráfica que se elaboró para al SMC cumple con este propósito y a la vez se encarga de mantener el vínculo con el dispositivo que procesa la información de las señales.

La interface gráfica es una aplicación informática con la cual es posible visualizar en la pantalla de la PC la evolución de los movimientos del manipulador. Adicionalmente, este programa está provisto de controles interactivos que permiten manipular al SMC desde la PC, ver Figura 3.17.



a)



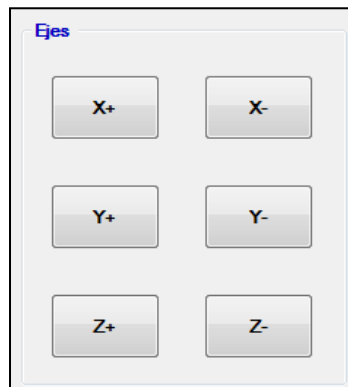
b)

Figura 3.17. Interface gráfica del SMC: a) activación de los controles de la interface, b) selector de avance y velocidad para el manipulador, c) visor de posiciones.

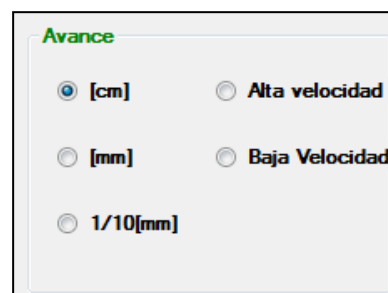
Los controles están contenidos dentro de una aplicación en una ventana que representa, mediante botones y cuadros de texto, a los ejes del manipulador y las

coordenadas de posición dentro del espacio de trabajo. La interface se desarrolló de tal manera que todos los elementos presentes dentro de ella permanecerán deshabilitados en tanto no se haya detectado la conexión con el sistema de manipulación. Al conectarse, la aplicación reconoce al dispositivo al instante y activa sus controles para poder comenzar a utilizarlos. Para este propósito se desarrolló un código de programación basado en ventanas en lenguaje Microsoft Visual C++ 2008, que es una interface para la programación de aplicaciones gráficas (*API por sus siglas en inglés*) contenida en la plataforma .NET Framework de Microsoft, que proporciona acceso a los elementos nativos de programación de Microsoft Windows [73]. La administración de los procesos que corren a partir de la detección del equipo se divide en dos subrutinas de ejecución simultánea realizadas por la interface: una para actualizar al momento los valores recibidos desde el microcontrolador y otra para mantener la transmisión y recepción de datos por USB con el mismo. La aplicación envía periódicamente paquetes hacia el microcontrolador que verifican el estado en el que se encuentra el dispositivo. En el momento que se conecta el SMC a la PC se inicia el proceso de reconocimiento de los dispositivos huésped y anfitrión mediante dos valores: PID (Product ID) y VID (Vendor ID). Estos identificadores son imprescindibles para la comunicación de un dispositivo USB ya que distinguen al controlador para que sea el único con la configuración establecida por la aplicación en el PIC y la PC. En caso de que estos dos parámetros coincidan en ambos dispositivos, se da inicio al protocolo de comunicación para poder establecer el intercambio de datos y configuran la velocidad y cantidad de información que se va a manejar [72]. Después de que la configuración ha terminado, la aplicación gráfica se activa y comienza a monitorear los cambios en el manipulador transmitiendo y recibiendo datos de reconocimiento de estado en el PIC, es decir que al activar los botones de la ventana en la interface se envían hacia el microcontrolador las posiciones deseadas mientras que paralelamente se recibe la actualización de movimiento correspondiente a cada eje por el conteo de pasos en los motores.

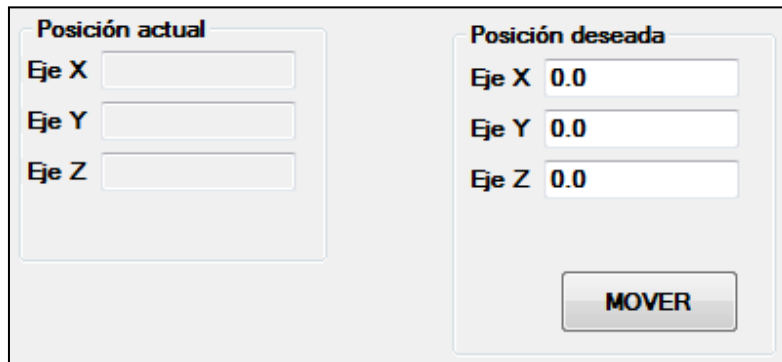
A cada botón de la interface le corresponde un caso identificado por un número hexadecimal, que coincide con los programados en el firmware del controlador y representan de manera similar un comando distinto que corresponde a los botones de activación de los ejes en ambos sentidos, los tipos de avance o el envío de coordenadas tecleadas en los cuadros de texto, ver Figura 3.18.



a)



b)



c)

Figura 3.18. Controles principales de la interface gráfica: a) botonera de control para los ejes del SMC, b) selector de avance y velocidad para el manipulador, c) visor de posiciones.

La programación de la interface del SMC contempla la generación de un buffer de datos al igual que el del firmware, dentro del cual se concentra toda la información de los procesos del sistema en conjunto. El monitoreo continuo del USB se hace entonces sobre este buffer de datos de forma que al detectar información dentro de él procede a la transmisión. Cabe mencionar que en la comunicación USB únicamente un dispositivo puede ser el anfitrión, esto significa que únicamente la aplicación de la PC puede enviar instrucciones para la ejecución de alguna sentencia hacia el PIC o bien puede enviar una petición de datos que se encuentran en la memoria del PIC. El microcontrolador por sí solo no puede pedir información alguna de la PC.

### 3.8 Lista de materiales

La fase del diseño de detalle concluye con la elaboración de la lista de materiales que se requieren para la construcción del manipulador. Las cantidades y descripciones de los componentes se especifican de manera clara para proceder con su adquisición y comenzar con los procesos de fabricación, conexión y programación de los sistemas mecánico, eléctrico y de control respectivamente.

La lista completa de todos los materiales mecánicos se puede consultar en el apéndice A. Para el caso de los componentes eléctricos, referirse al apéndice B. En esta sección en particular se presenta un resumen de los materiales que se usarán a grandes rasgos:

Lista de materiales para el sistema mecánico:

- Perfiles de Aluminio estructural IPS
- Barras de Acero 1018
- Placas de Aluminio 6061
- Tornillos de bolas con tuerca embalerada

- Barras redondas de acero 1018
- Rodamientos lineales
- Bandas dentadas de transmisión
- Poleas
- Tornillería

Lista de materiales para el sistema eléctrico:

- Motores de pasos
- Tarjeta de potencia
- Elementos eléctricos pasivos (resistencias, capacitores, botones)
- PIC 18F4550
- Conector USB
- Fuente de poder
- Programador de microcontroladores PIC
- Cables y conectores
- Placa y hojas para la impresión del circuito

Lista de materiales para el sistema de control:

- Compilador Hi-Tech 18 de Microchip
- Visual Express C++ 2008
- PC con sistema operativo Windows

Los materiales del sistema de control son gratuitos, ya que es software disponible para descarga gratuita. El resto de los componentes eléctricos y los materiales mecánicos fueron adquiridos con proveedores nacionales a un bajo costo.

# Capítulo 4

## Construcción y pruebas del sistema

En este capítulo se presenta la construcción del prototipo así como los procedimientos de prueba realizados para verificar y evaluar el desempeño del SMC. También se presentan las características del SMC, los rangos de operación y parámetros máximos de carga, velocidad, resolución y espacio de trabajo. Se explican de manera general los principales problemas que se presentaron durante la construcción y el ensamble del manipulador y la solución que se adoptó para solventar estas dificultades.

### 4.1 Características finales del manipulador

El sistema de manipulación cartesiano fue diseñado en base a un conjunto de especificaciones para poder dimensionar al dispositivo con base en parámetros de operación típicos en los sistemas de posicionamiento automatizados. Después de haber generado toda la información en el proceso de diseño conceptual y de detalle se encontraron restricciones que dificultaron alcanzar el objetivo establecido en dichas especificaciones. Las limitaciones más relevantes en el desarrollo de este proyecto se enlistan como sigue:

- **Presupuesto limitado.** Los elementos mecánicos, materiales especiales y fabricación de alta precisión son parámetros indispensables para la elaboración de dispositivos de alta precisión. En este caso los materiales y equipo seleccionado para construir el manipulador fueron grandes limitantes que influyeron en la manufactura de las piezas mecánicas. En cuanto a los componentes eléctricos, fueron seleccionados aquellos con mayor disponibilidad en el mercado y, por consiguiente, de menor precio. Los elementos como el microcontrolador no son óptimos para aplicaciones en donde se ven involucradas tareas de uso industrial, como lo podría sugerir este proyecto, sin embargo la facilidad para conseguirlo, reemplazarlo y configurarlo fueron determinantes al decidir usarlo.
- **Manufactura limitada.** Para poder fabricar una máquina de estas características es necesario, además de contar con los materiales y componentes apropiados, llevar a cabo la manufactura con herramientas e instrumentos cuyas variaciones influyan de manera mínima en las características físicas del dispositivo, mismas que podría afectar de manera negativa directa o incluso proporcionalmente en el desempeño del manipulador. Ya que los laboratorios y el taller en el cual se fabricaron todas las partes del sistema cuentan con equipo de maquinado tradicional, personal poco capacitado o herramental inadecuado,

las variaciones inducidas por el rango de tolerancias de estas máquinas son un factor adverso en la evaluación de desempeño del SMC. Cabe mencionar que una medición puntual del error provocado por los medios de fabricación empleados no está cuantificado y queda fuera del alcance de este proyecto.

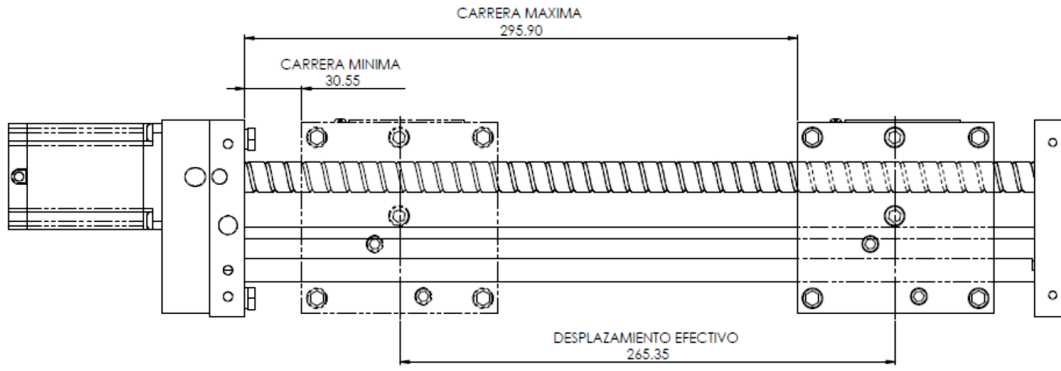
- **Objetivo y alcance ambicioso.** El diseño de un sistema de manipulación relaciona a su vez el diseño de los elementos mecánicos que darán forma y soportarán al mismo, el diseño de los circuitos que deben mantener en operación al dispositivo y el diseño de un medio de control mediante el cual se pueda verificar el comportamiento de la máquina y a su vez que permita comunicar el sistema mecánico con el eléctrico de manera apropiada. El diseño de cada una de estos módulos requiere de un estudio amplio en cada una de las respectivas disciplinas, lo que se traduce en tiempo para profundizar en cada una de ellas. Adicionalmente, la construcción de una máquina, el proceso para cablear y conectar sus componentes además de la creación de un medio con el cual se pudiera gobernar el comportamiento de todo el sistema suponen la realización de tareas por varios miembros en un equipo de trabajo, el cual no se tenía en este caso.

De esta manera, las características finales del manipulador que se exponen en esta sección abarcan los datos técnicos finales que definen al sistema.

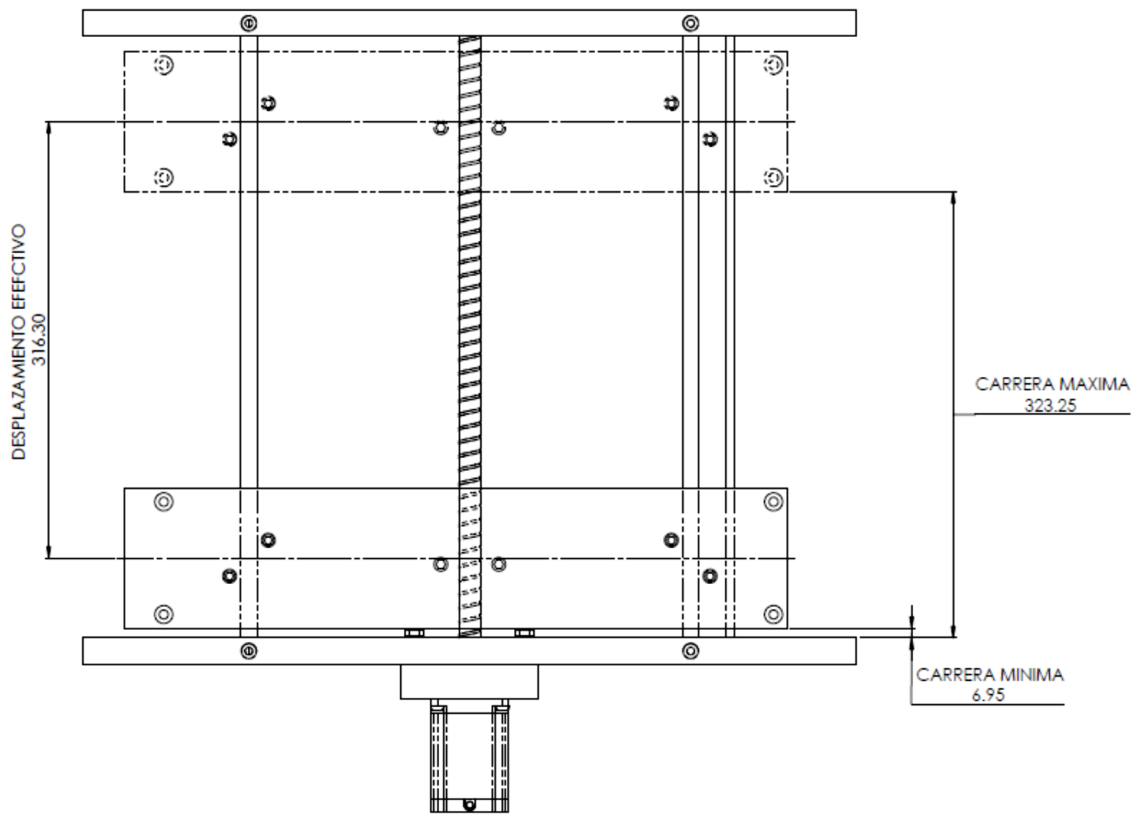
Las dimensiones del SMC incluyen los elementos que componen la estructura exterior por la parte frontal y lateral, así como la altura máxima desde los soportes en los que descansa todo el dispositivo (Figura 4.1). El peso total del manipulador incluye los elementos de la estructura de soporte, los ejes lineales y los motores de pasos. Utilizando las herramientas de cálculo del software de diseño SolidWorks® en el cual se modelaron todas las piezas del SMC se obtuvo el peso aproximado del manipulador y de cada uno de sus ejes, Tabla 4.1. Componentes como la tornillería y el cableado no se consideran dentro de los cálculos del peso de cada módulo ni en la sumatoria que expresa el peso total del manipulador.

Componente del SMC	Peso [Kg]
Eje X	5.2
Eje Y	13.6
Eje Z	14.9
Estructura	20.1
Motores	1.5 (c/u)
<b>Sistema completo</b>	<b>58.3</b>

Tabla 4.1. Peso registrado de cada componente del manipulador



a)



b)



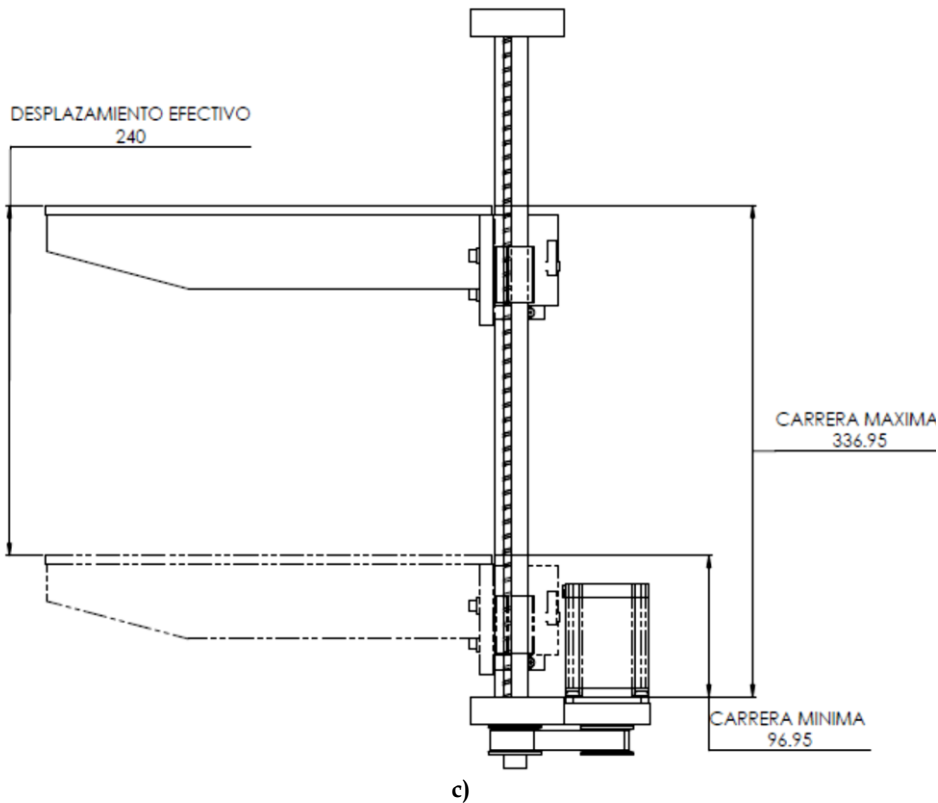


Figura 4.1. Espacio de trabajo del SMC: a) eje X, b) eje Y, c) eje Z.

La capacidad de carga de cada eje por separado y de todo el sistema en conjunto contempla el caso en el que la demanda de fuerza sea maximiza. Este escenario se da cuando el manipulador debe elevar una carga en el eje Z y mantenerlo en el punto más alto posible. Para los ejes X y Y se coloca una carga sobre el eje Y que transporta a su vez al eje X, simulando el peso que debería soportar ante la presencia de un órgano efector final. De antemano la capacidad de carga está calculada para poder impulsar el peso de los elementos que componen a los ejes del manipulador, por lo que los valores mínimos y máximos de fuerza y de torque pueden evaluarse con las formulaciones matemáticas propuestas en el capítulo 3 y con ensayos para verificar en la realidad los resultados.

Para verificar las capacidades de carga de los ejes del manipulador, se hizo una prueba con un peso de 4.5 kg, el cual fue sujetado a cada eje para verificar en primer lugar que resistieran tal carga sin ceder, es decir, sin moverse por causa de este peso. Este ensayo se repitió una vez más pero en esta ocasión con 2 pesos de 4.5 kg, es decir 9 kg en total, observando que los ejes X y Y comenzaban a moverse ante esta condición de carga. El eje Z por su parte logró resistir esta carga de 9 kg sin moverse, Figura 4.2, llegando a agregar otra pieza adicional para un total de aproximado de 15 kg situación ante la cual comenzó a moverse la plataforma.

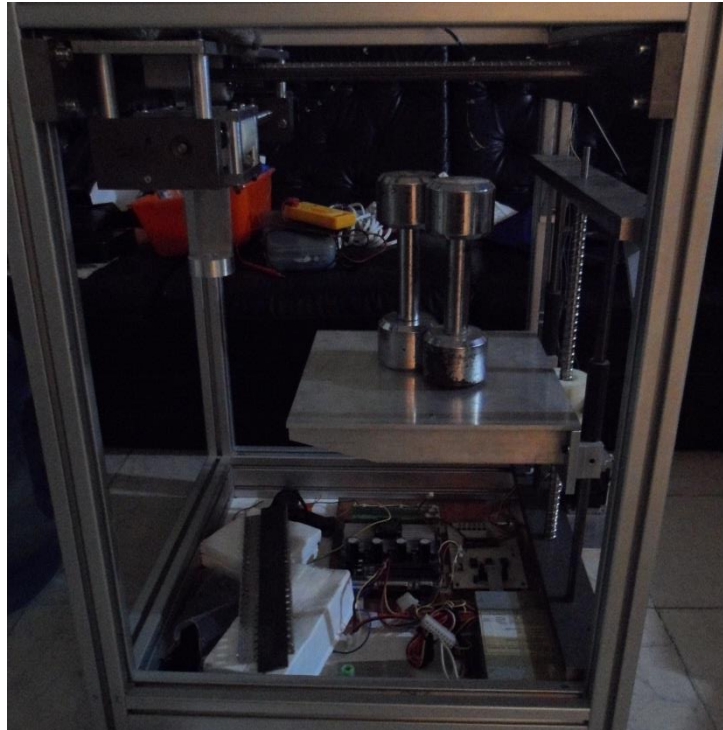


Figura 4.2. Prueba de capacidad de carga para el eje Z.

Después de haber resistido esta primera prueba se realizó el mismo ensayo solo que en esta ocasión el propio movimiento del manipulador en sus ejes debía ser capaz de desplazar los pesos mencionados.

Con base en el comportamiento observado se muestran las capacidades de carga estática registradas en los ensayos y las cargas máximas ideales, un 25% menores a las cargas registradas, Tabla 4.2.

	Carga máxima registrada	Carga máxima ideal
Eje X	88.29	66.21
Eje Y	88.29	66.21
Eje Z	147.15	110.36

Tabla 4.2. Capacidades de carga para los ejes del SMC, en Newtons.

## 4.2 Construcción y ensamble

La construcción de un equipo de posicionamiento como el SMC restringe el rango de tolerancias, ya que se buscan variaciones mínimas en los movimientos para generar la mayor precisión posible. Además, los materiales seleccionados para construcción requieren de procesos dedicados en máquinas especializadas para obtener la menor

variación desde su fabricación. La manufactura de la mayor parte de las piezas del manipulador se realizó en una fresadora y un torno de operación manual. Parámetros críticos como el acabado de las guías sobre las que se desplaza el manipulador requieren normalmente de un proceso de rectificado, en este caso de barras redondas, para lograr variaciones mínimas en el avance de cada eje.

Con un proveedor especializado se adquirieron las barras de diámetro a la medida de los cojinetes lineales por lo que este proceso fue innecesario, reduciendo costos y tiempo. El corte de las barras de acero y aluminio, así como también de los perfiles estructurales se realizaron con sierras y seguetas ya que las geometrías base de las piezas no tienen gran complejidad. Las operaciones de manufactura del resto de las piezas se componen básicamente de barrenos pasados y con cajas para la sujeción con tornillería comercial.

El ensamble de la estructura es un procedimiento muy práctico debido a que se cuenta con las conexiones y accesorios propios de este tipo de perfiles, lo que asegura una buena fijación con poco juego mecánico. Es muy importante el ensamble del manipulador porque las características de precisión están estrechamente relacionadas con la estabilidad, ortogonalidad y rigidez de la estructura básica.

En la Figura 4.3 se presenta una comparativa entre el primer diseño elaborado y el diseño final del manipulador. La diferencia entre ambos diseños consiste en la manera de soportar la estructura del sistema. Este cambio se debió a la necesidad de brindar la mayor rigidez posible al dispositivo con la finalidad de asegurar la estabilidad de la máquina. De esta manera, se agregaron soportes en la base del manipulador entre los 4 postes al igual que en la parte superior de la estructura, cerrando un marco con forma de cubo dentro del cual se contienen y soportan los ejes de la máquina.



a)



b)

Figura 4.3. Evolución en el ensamble de la estructura básica. a) primer diseño; b) diseño mejorado.

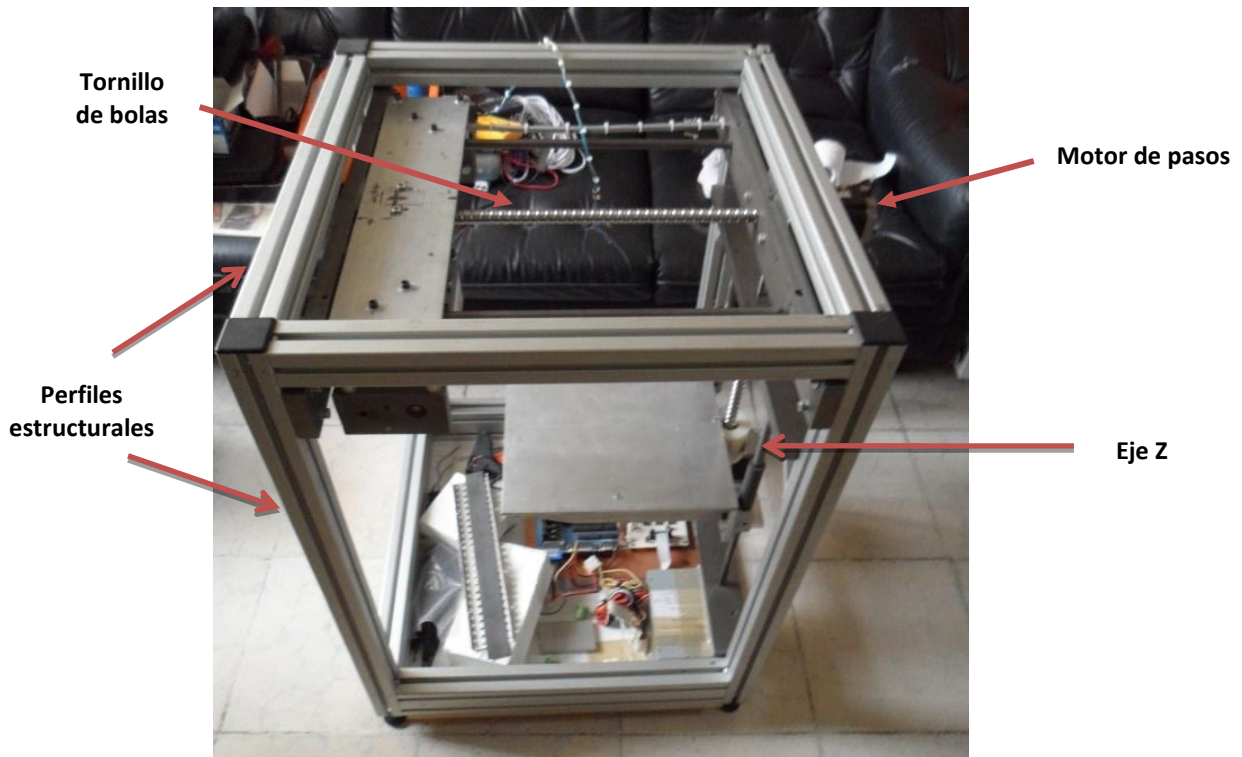
Aunque la construcción del manipulador logró llevarse a cabo de forma exitosa, se presentaron una serie de dificultades que a continuación se detallan:

- **Sujeción de piezas mediante barrenos roscados.** Diferentes piezas de soporte en cada eje fueron provistas de barrenos que requirieron de ser roscadas para evitar el uso excesivo de sujeción por medio de configuraciones tuerca-rondana-tornillo. Por esta razón varios de los soportes, en su mayoría de acero, se atornillaron a la misma pieza en las preparaciones con cuerda. Dado que el acero es un material de gran dureza, los machuelos usados para hacer las roscas correspondientes se rompieron en varias ocasiones, ocasionando retrasos en la etapa de fabricación, gastos extra para adquirir nuevamente esta herramienta e incluso rediseños para cambiar las posiciones de dichos barrenos.
- **Organización de las etapas de diseño.** El diseño de detalle es el paso previo a la manufactura en cualquier caso de acuerdo a la metodología seleccionada para este manipulador. Aun así, debido al retraso en la etapa de construcción, en algunos ensambles se decidió comenzar a fabricar las respectivas piezas sin contar con el correspondiente diseño final. Esto ocasionó retrabajos posteriores al encontrar interferencias mecánicas y errores de acoplamiento. En otros casos más críticos se tuvieron que hacer adaptaciones al diseño de otros ensambles ya terminados para dar solución a la problemática encontrada.
- **Elemento de transmisión no convencional.** Para el movimiento de cada eje del manipulador se seleccionó un tornillo de bolas como mecanismo de transmisión mecánica. La dificultad con los tornillos se presentó al momento de maquinarlos para su correcto montaje en cada eje. En cada extremo se realizaron preparaciones para poder acoplar al tornillo con rodamientos lineales que permitieran su instalación en los soportes de cada eje, requiriéndose desacoplar la tuerca embalera de los tornillos de bolas para poder montar la pieza en el torno. El proceso para desensamblar y volver a ensamblar la tuerca con el tornillo resultó de gran dificultad porque ambos elementos están ajustados de fábrica, por lo cual se recomienda evitar en la medida de lo posible el desacoplamiento de estos dos elementos.
- **Espacio reducido para conexiones.** La problemática principal en la implementación del diseño eléctrico se debe al poco espacio para poder concentrar todas las señales requeridas en un solo lugar. Esto quiere decir que el microcontrolador, como el cerebro que administra el funcionamiento del SMC, debe conjuntar todas las señales relacionadas con la operación de los motores de pasos, los sensores de fin de carrera y alimentación correspondiente para cada componente. Varios circuitos en placa fenólica fueron implementados sin éxito, llegando incluso a quemarse algunos encapsulados o en un caso similar, estropeando las pistas en las que se conducen las señales del circuito. El cableado también representa un gran problema por la falta de elementos especializados para el ruteo de los mazos de cableado eléctrico y también por el poco espacio para guiar dichos cables, obligando de esta forma a usar los propios elementos de la estructura de la máquina para este efecto.

- **Aplicación de protocolo USB.** La comunicación por puerto USB resultó un proceso complicado debido a la necesidad de estudiar la manera en la que debe ser configurado el dispositivo USB, en este caso el microcontrolador, para evitar errores en la transferencia de datos. También debe cuidarse el protocolo de transmisión de datos ya que, aún si estos son compatibles entre sí, la comunicación no puede darse entre dispositivos que envían y reciben señales en distintos idiomas y velocidades de transmisión. Varias pruebas con diferentes códigos de programación se realizaron sin lograr obtener el resultado esperado. Fue por eso que el código que finalmente se implementó es el resultado de la combinación de varios otros códigos probados.

En las figuras 4.4 a 4.6 se presentan imágenes del SMC terminado en las cuales se ilustran los principales componentes que conforman al manipulador, así como también los detalles más importantes del ensamble.

En la Figura 4.4 se pueden apreciar una vista lateral y una vista frontal, respectivamente, de todo el manipulador desde un ángulo superior con los componentes principales de los ejes y la disposición espacial dentro de la estructura.



a)

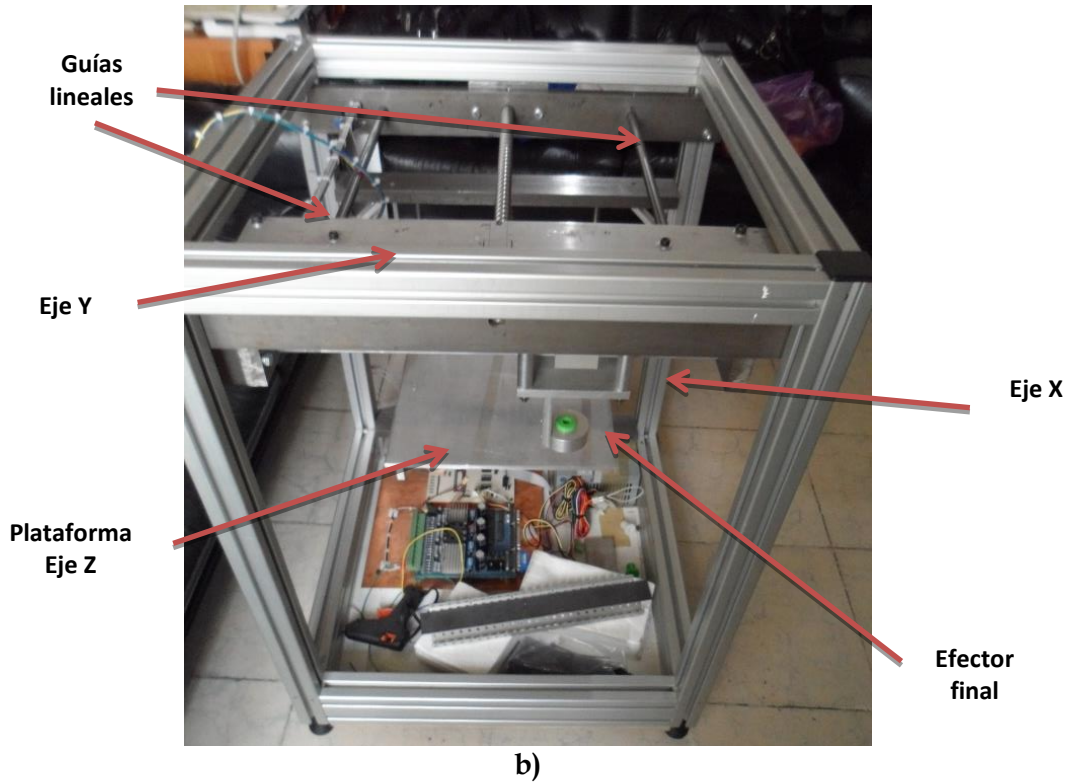
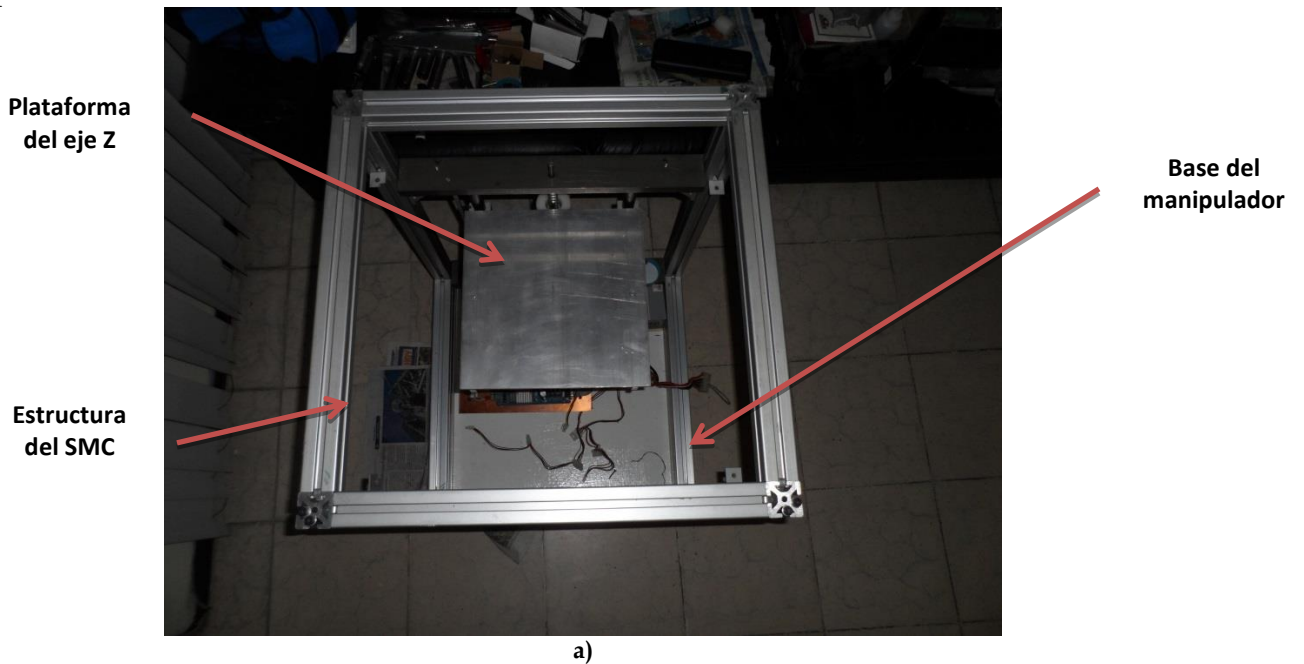
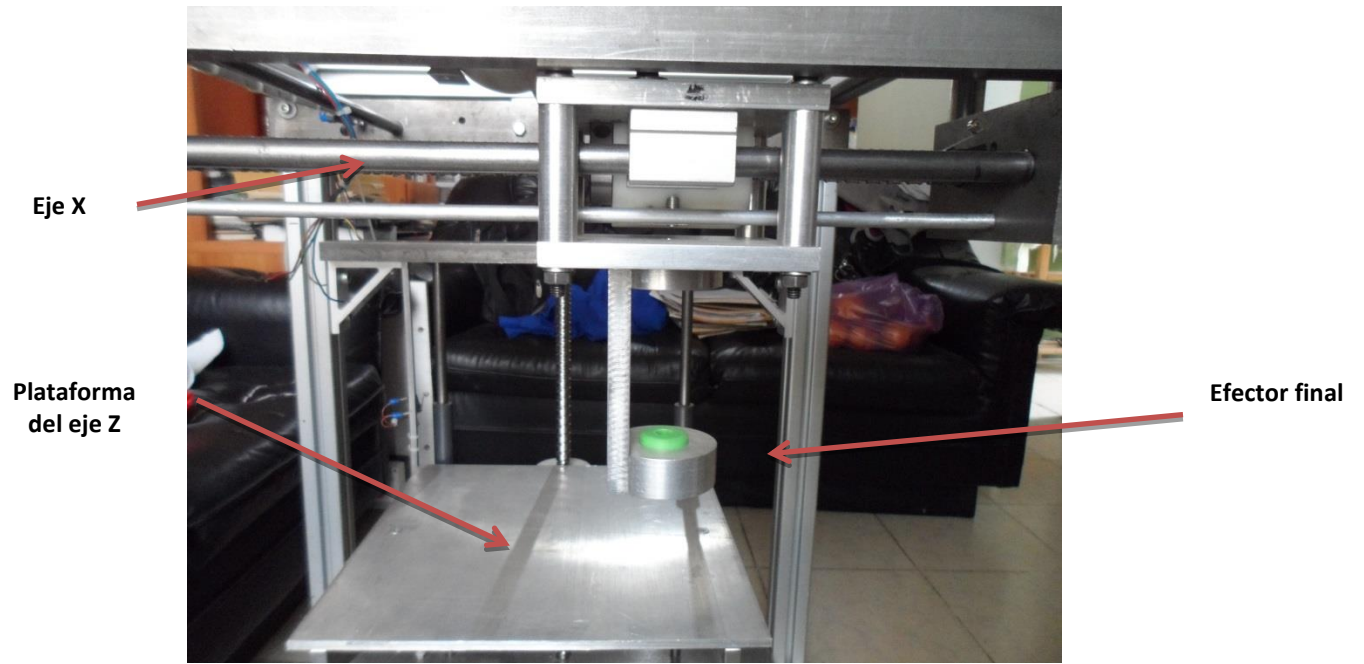


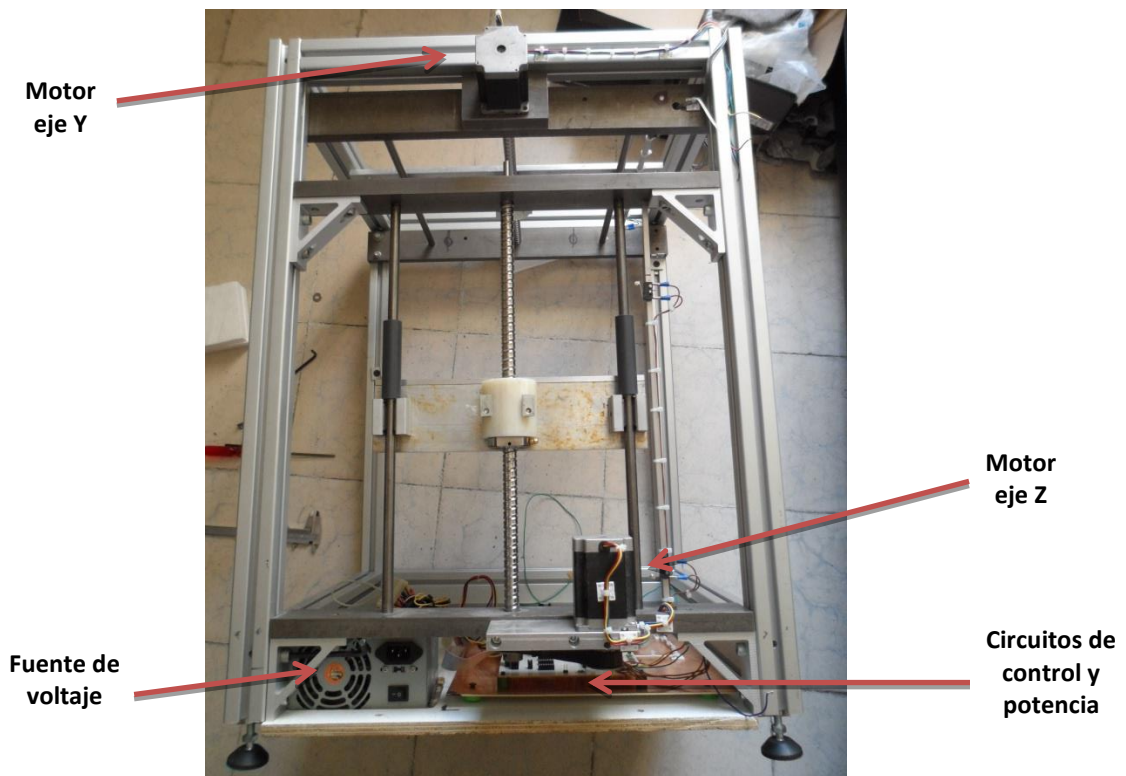
Figura 4.4. Vistas del manipulador: a) lateral superior, b) lateral frontal.

La Figura 4.5 contiene vistas más detalladas de los ejes que muestran la manera en la que están configurados dentro de la estructura. Este gráfico permite ver el tamaño de la plataforma dentro del manipulador, la posición que tiene el efector final respecto a ella y la forma en que las conexiones de los motores se dirigen hacia la parte inferior del manipulador, donde se encuentran los circuitos de control, de potencia y la fuente de poder.





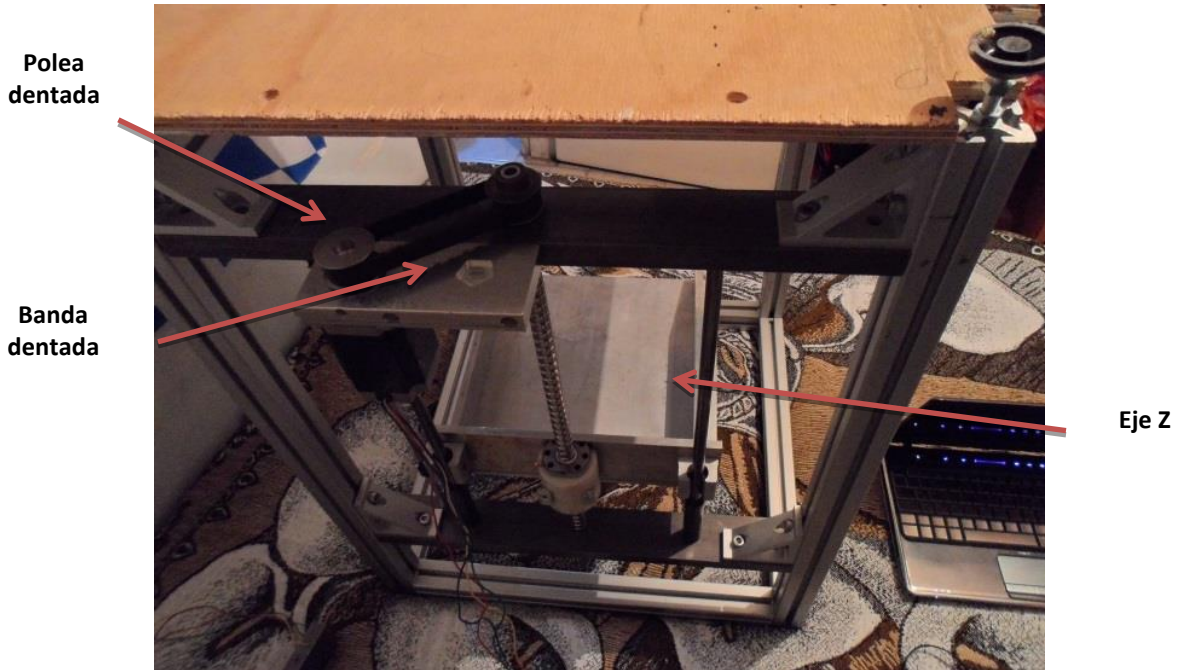
b)



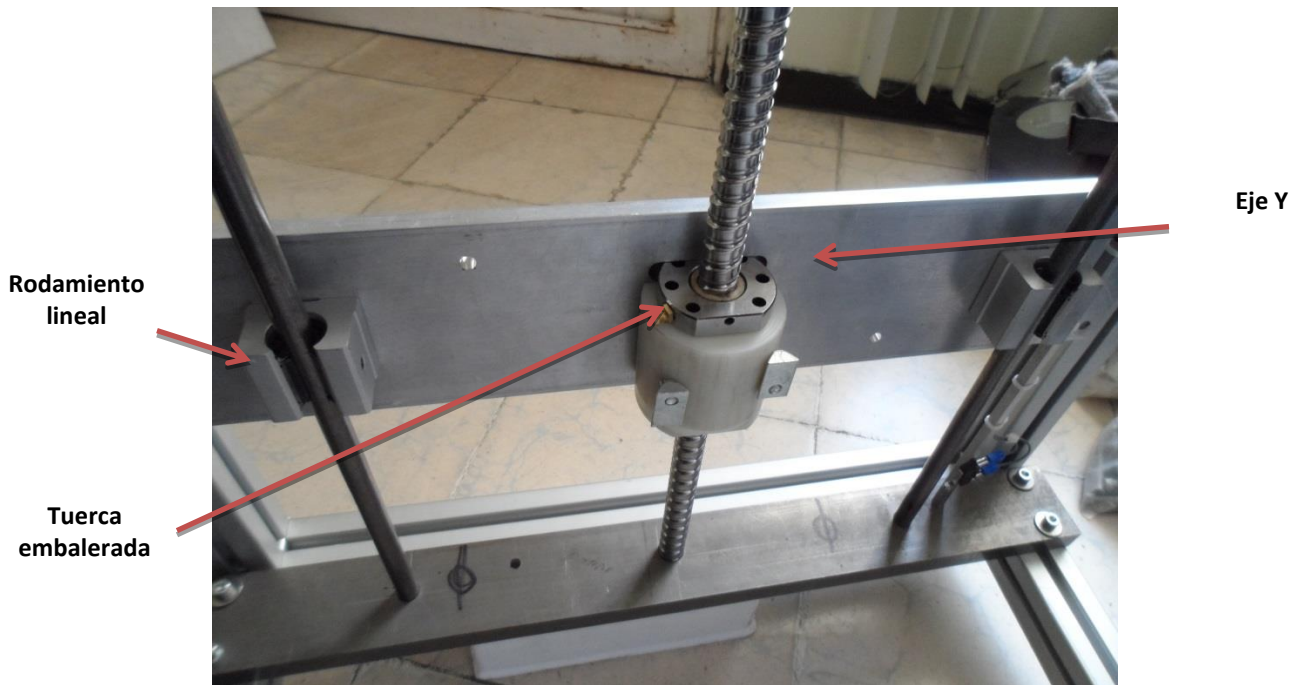
c)

Figura 4.5. Detalles de ensamble del SMC: a) posición de la plataforma del eje Z, b) distancia del efector final montado en el eje X a la plataforma del eje Z, c) conexiones de los motores de pasos.

En la Figura 4.6 se muestran detalles de la transmisión de movimiento utilizada en el eje Z, que a diferencia de los otros 2 ejes restantes, se hizo mediante poleas dentadas y no por acoplamiento directo entre la flecha del motor y el tornillo de bolas. Asimismo, se presentan el ajuste típico entre la tuerca del tornillo de bolas y los ejes del sistema.



a)



b)



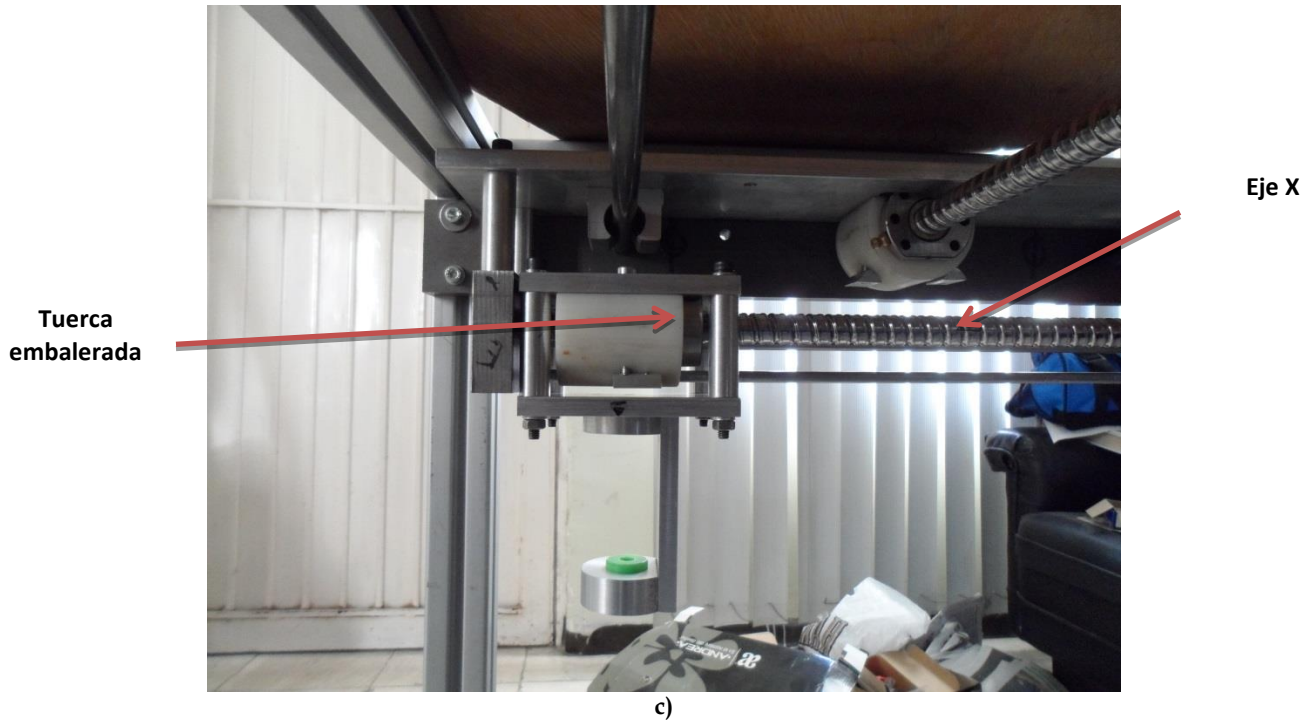


Figura 4.6. Detalles de ajuste mecánico del manipulador: a) transmisión por polea del eje Z, b) acoplamiento entre el tornillo de bolas y los ejes X y Y, c) acoplamiento entre el tornillo de bolas y el eje Z.

### 4.3 Fase de pruebas

Para validar el sistema es necesario contar con una evaluación de su funcionamiento. Mediante una serie de pruebas que a continuación se describen se calificaron los aspectos que caracterizan a este manipulador cartesiano. Los parámetros involucrados son:

- Resolución
- Exactitud
- Precisión
- Repetibilidad
- Tiempo de respuesta
- Velocidad máxima
- Espacio de trabajo

Otros dispositivos similares [2],[74],[75] presentan en sus especificaciones esta información pero no describen los métodos que usaron para obtener dichos parámetros. Por esta razón se presenta un análisis de muestras y experimentos que conducen a la obtención de datos para dar sustento a los resultados que se presentan como características técnicas del SMC.

La disciplina de la metrología involucra la toma de mediciones para cuantificar el desempeño de un sistema y está estrechamente ligada al proceso de calibración. Estas mediciones se toman de acuerdo a normas internacionales, como la ISO 9283 e ISO/TR 13309, que incluyen ensayos de calibración como por ejemplo [76]:

- Métodos de evaluación de posicionamiento
- Métodos de comparación de trayectorias
- Métodos para la triangulación de puntos
- Métodos para la medición en coordenadas polares
- Métodos de rastreo óptico
- Métodos de medición de inercia
- Métodos de medición en coordenadas cartesianas
- Métodos de trazado de trayectorias

La calibración del manipulador es también el resultado de la realización de los ensayos de evaluación que se presentan. El ajuste de los componentes del dispositivo está entonces definido en función de las pruebas que conducen a la identificación de los parámetros de estudio establecidos. Sin embargo, con estos datos no es posible identificar el origen de todos los errores que influyen en el sistema, por ejemplo el error debido a los procesos de manufactura de las piezas mecánicas, el error debido a la fijación y acoplamiento de los ensambles que componen al manipulador, el error debido al tiempo de respuesta y ruido en los componentes eléctricos e incluso en los algoritmos de conteo y conversión de pasos. Debido a lo anterior el desempeño y calidad del SMC se verá comprometida. La disminución del grado de errores y variaciones es propuesta para trabajo a futuro tomando como base este estudio.

#### 4.3.1 Resolución

La resolución se define en general como el cambio más pequeño que puede medirse en una magnitud, producida por una variación perceptible en la indicación correspondiente [82]. Entonces, para el caso del manipulador, puede describirse como el movimiento incremental mínimo que puede ser registrado en función de las características de los componentes del sistema. Al estar utilizando motores de pasos para impulsar al SMC, la resolución puede ser calculada tomando en cuenta el paso del tornillo de bolas y el avance angular mínimo en los motores en función de la capacidad de la tarjeta de potencia. Como resultado de este cálculo, se presenta la Tabla 4.3, que concentra las posibles resoluciones con base en la siguiente expresión:

$$Resolución = \frac{Avance\ en\ mm / revolución}{No.\ de\ pasos / revolución} = \frac{10\ mm}{200\ pasos} = \frac{0.05mm}{paso} \quad (4.1)$$

PASO	RESOLUCIÓN [mm]
1	$5 \times 10^{-2}$
1/2	$2.5 \times 10^{-2}$
1/8	$6.25 \times 10^{-3}$
1/16	$3.125 \times 10^{-3}$

Tabla 4.3. Resolución del manipulador según el avance del motor.

Los resultados obtenidos están sujetos a diversos tipos de variaciones, comenzando por los elementos internos de los motores que presentan un rango de desviación en el avance angular de  $1.8^\circ \pm 5\%$  [77], es decir,  $2.5 \times 10^{-3}$  mm de variación por paso. Adicionalmente se debe tomar en cuenta el juego axial inherente al movimiento dentro de la tuerca de bolas, que es de 0.03mm [65], [66].

#### 4.3.2 Exactitud

Dado que en diversas fuentes bibliográficas se presentan términos ambiguos sobre las definiciones para términos como la exactitud y la precisión, se tomará como referencia la terminología empleada en el Vocabulario Internacional de Metrología [82] para evitar confusiones en este aspecto.

De acuerdo a la terminología empleada en [82], la exactitud es un parámetro que indica el grado en que la medición de una magnitud se aproxima al valor verdadero de una característica dada. De acuerdo a [82], no es correcto atribuir una cantidad para evaluar la exactitud, ya que esta propiedad es de carácter más bien cualitativo. Un valor que permite evaluar apropiadamente la exactitud de un sistema es el error, ya que expresa la cantidad que existe entre la medición realizada y el valor que se fijó como objetivo del estudio. Para el caso del manipulador, la exactitud se traduce como la capacidad para alcanzar una determinada ubicación dentro del volumen de trabajo. Este parámetro está estrechamente ligado con la resolución que es capaz de ofrecer el manipulador, ya que típicamente se establece que el valor de la exactitud es equivalente a la mitad de la resolución espacial, que contempla las variaciones presentes en los elementos mecánicos del robot [78]. Este parámetro es el que más se ve afectado porque además de las variaciones inherentes a la manufactura y ensamble, se toman en cuenta las contribuciones por fuerzas de fricción, cargas y momentos de inercia externos, deformaciones, fluctuaciones de temperatura, entre otras, Figura 4.7 [79].

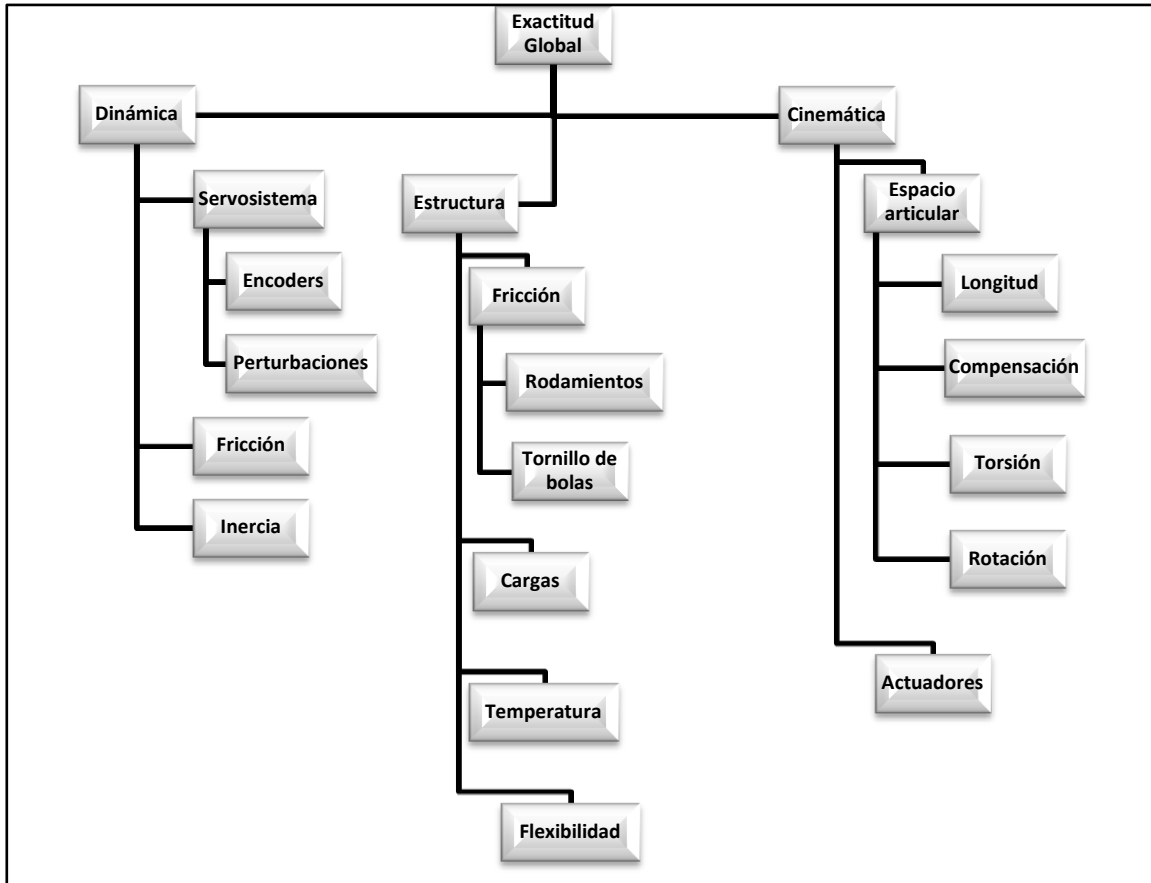


Figura 4.7. Factores que afectan la exactitud de un sistema robótico.

Para evaluar el grado de exactitud que ofrece el manipulador cartesiano se propone realizar una prueba en la que un eje del dispositivo deba desplazarse hacia una serie de posiciones para verificar el grado de desviación que existe. Como base de este ensayo se toma el eje X para realizar las pruebas que se llevarán a cabo ubicando al eje en una posición de referencia a partir de la cual se desplaza el eje hasta una determinada distancia para posteriormente medir el desplazamiento alcanzado. Mediante indicadores de carátula se registra dicho valor para analizar los resultados a detalle y compararlos con el valor de estudio. La prueba considera un total de 5 posiciones para registrar la exactitud en cada caso de la evaluación y cada una de estas posiciones es realizada en 10 ocasiones consecutivas. Los resultados de esta prueba se resumen en la Tabla 4.4. Estos resultados son utilizados a su vez para la evaluación del parámetro de precisión del manipulador, como un índice de la repetibilidad que puede ofrecer el manipulador bajo las condiciones de esta misma prueba de desempeño.

Muestras		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Posiciones											
1	40	39.75	40.15	39.80	39.75	40.10	39.75	40.20	40.35	40.10	39.85
2	100	100.25	100.10	100.20	99.85	99.65	100.00	100.15	99.75	100.05	100.20
3	135	135.35	134.85	134.95	135.05	135.15	135.20	135.15	134.80	135.20	135.10
4	170	170.10	170.00	170.25	169.75	170.25	170.30	169.65	170.25	170.05	170.15
5	200	200.00	199.80	200.05	200.20	199.85	200.05	199.75	200.15	199.80	200.30

**Tabla 4.4. Cuadro de datos para pruebas de exactitud y repetibilidad, distancias en mm.**

Los resultados de esta prueba deben ser evaluados para cada uno de los ejes restantes a fin de encontrar la exactitud y la precisión como una magnitud resultante en el espacio de trabajo tridimensional del manipulador. Sin embargo, dado que no se logró un comportamiento consistente en el movimiento de los ejes Y y Z, se tomará como aproximación el mismo valor registrado de precisión y exactitud para cada eje.

#### **4.3.3 Precisión**

De acuerdo con el VIM [82] (Vocabulario Internacional de Metrología) la precisión se define como la proximidad de concordancia entre valores de magnitud obtenidos por mediciones repetidas de una muestra en determinadas condiciones. En otras palabras, un dato será preciso en tanto sea medido en repetidas ocasiones con resultados similares bajo circunstancias controladas. Dichas circunstancias corresponden en este caso al mismo procedimiento de medición llevado a cabo por la misma persona bajo las mismas condiciones de operación en un mismo lugar de manera repetida. Las mediciones deben ser tomadas consecutivamente en un lapso de tiempo reducido. De esta forma, las circunstancias para evaluar la precisión son conocidas como condiciones de repetibilidad [82].

Con base en estas definiciones se puede dar el caso en el que el manipulador no pueda alcanzar un punto especificado por el usuario, pero si en cada ocasión que se mueve el error o sesgo cuantificado es el mismo entonces se afirma que la exactitud no es buena y, en contraste, la precisión si lo es. En este sentido, la precisión de un sistema puede ser expresada numéricamente encontrando la desviación estándar del conjunto de datos de estudio. Con la desviación estándar se obtiene un valor numérico que expresa la forma en la que las mediciones se comportan respecto al promedio de las mismas, Figura 4.8.

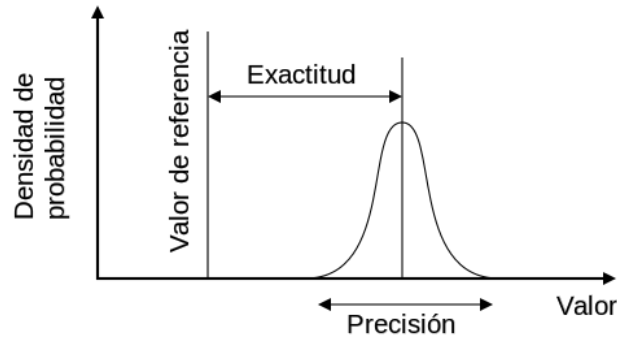


Figura 4.8. Diferencia entre los conceptos de exactitud y precisión.

Comúnmente se asocia el concepto de precisión como el grado de repetibilidad que tiene un sistema, lo cual queda ejemplificado más claramente con los cuatro casos mostrados en la Figura 4.9.

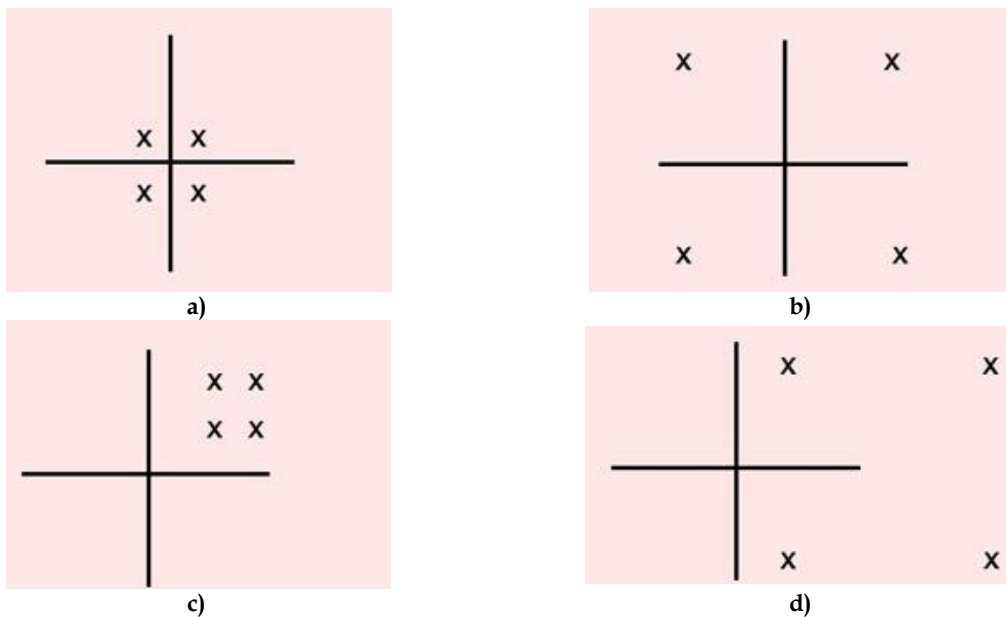


Figura 4.9. Casos de exactitud y precisión: a) exacto y preciso, b) exacto e impreciso, c) preciso e inexacto, d) inexacto e impreciso.

Estos cuatro casos se describen a continuación:

- Exacto y preciso: los cuatro resultados obtenidos son similares y son cercanos al valor esperado
- Exacto e impreciso: los resultados se aproximan al valor esperado pero están dispersos entre sí
- Preciso e inexacto: los resultados son similares entre sí, pero no se acercan al valor esperado
- Inexacto e impreciso: los resultados están dispersos y fuera del rango del valor esperado

De la Tabla 4.4 se pueden obtener las variaciones en las mediciones registradas con respecto al valor de estudio en cada muestra, lo cual es útil para identificar un valor numérico para la exactitud en términos del error que se presenta respecto a la medición en turno.

El experimento que se propone para evaluar el grado de repetibilidad del SMC consiste básicamente en repetir el ensayo realizado para calcular la precisión. Esto significa que la prueba se debe reproducir un determinado número de veces para registrar las posiciones alcanzadas en cada corrida. Los resultados ya han sido colectados y almacenados en una tabla en la que se dispone un total de 5 posiciones aleatorias que corresponden a 10 repeticiones o muestras de estudio que el manipulador habrá de realizar para ubicarse en las posiciones descritas en el ensayo de exactitud, ver Tabla 4.4.

De los resultados de la Tabla 4.4 se determinan el valor promedio de las muestras obtenidas y el rango de dispersión presente durante la prueba, obteniéndose valores que representan los parámetros de exactitud y precisión respectivamente. Las condiciones de repetibilidad incluyen particularmente la realización del mismo método de medición por la misma persona en las mismas condiciones cada vez que se realice el experimento [80]. Tomando un promedio en cada uno de los 5 muestreos para las 10 posiciones se obtiene un valor medio que permite identificar que tan exacto es el manipulador, Tabla 4.5. De esta tabla se tiene que la exactitud del manipulador es de  $\pm 0.35\text{mm}$ .

Valor de estudio	Valor medio registrado
40	39.98
100	100.02
135	135.10
170	170.15
200	200.35

**Tabla 4.5. Resultados registrados en el experimento de exactitud, mm.**

El valor de la exactitud de  $\pm 0.35\text{mm}$  considera únicamente el caso del eje X. Considerando el mismo valor para los ejes Y y Z, se puede obtener un vector de error de posición resultante que indica una magnitud de  $\pm 0.606\text{ mm}$  para la exactitud en tres dimensiones del sistema.

De igual forma, para cada posición se evalúa la dispersión de los datos respecto al promedio obtenido en la Tabla 4.5 mediante el cálculo de la desviación estándar (sigma) para el conjunto de datos correspondiente, Tabla 4.6. De esta manera la precisión del sistema es  $0.17\text{ mm}$ .

Posición	SIGMA
1	0.22385511
2	0.20575066
3	0.17029386
4	0.22142217
5	0.18922356

Tabla 4.6. Evaluación de la desviación estándar en el experimento de precisión, mm.

De los resultados obtenidos se deduce que el sistema es exacto e impreciso, tomando como referencia el caso expuesto en la Figura 4.8. Aun cuando la resolución del sistema es de  $\pm 0.05\text{mm}$  por la relación entre el tornillo de bolas y el motor de pasos, es notable que los valores obtenidos se acercan en cada ensayo al valor de la muestra experimental. De igual forma, cabe destacar el efecto que se presenta a medida que el valor de la muestra se hace más grande; los pasos inyectados al motor varían a medida que el actuador se mantiene girando por lo que al funcionar por más tiempo, el número de pasos se ve alterado lo que resulta en una mayor dispersión en las posiciones que más se alejan de la posición de referencia.

Tomando como referencia los resultados de la tabla 4.4, se concluye que se presenta un valor máximo de error equivalente a  $\pm 0.35\text{mm}$ . Este dato corresponde a la exactitud del sistema, debido a que este valor numérico representa la diferencia más grande entre el valor esperado en cada ensayo y el valor obtenido.

#### 4.3.4 Tiempo de respuesta

El tiempo de respuesta del manipulador es función de la capacidad del microcontrolador para reaccionar ante los estímulos del usuario, ya sea a través de la interface gráfica o del control manual y los sensores. Sin embargo, la fuerza que debe superarse cada vez que el manipulador requiera moverse a partir del reposo puede representar un retraso en el tiempo de reacción. Dicho rezago resulta en realidad imperceptible ante la capacidad que tiene el manipulador debido a la frecuencia con la que trabaja el microcontrolador. En la expresión (3.49) se calcula el tiempo que tarda el microcontrolador en responder de acuerdo a la frecuencia de oscilación del cristal, que es el reloj del sistema de control (PIC) y a la velocidad especificada en el motor de 120 rpm.

De acuerdo al cálculo, el PIC responde en un lapso de  $1,250\ \mu\text{s}$  para movilizar en cualquier dirección al SMC o para detenerlo. Sin embargo, la capacidad del microcontrolador 18F4550 debe ser de 48MHz para poder utilizar el puerto USB. Teniendo como referencia la condición de que por cada instrucción se requieren 4 pulsos de reloj y considerando que en promedio las funciones generadas para el algoritmo de control del microcontrolador se componen de 20 instrucciones en promedio, se concluye que el mínimo tiempo de respuesta que puede ofrecer el microcontrolador es de aprox.  $1.5\ \mu\text{s}$ . Tal cantidad de tiempo es inapreciable para la aplicación que se le dará al manipulador, sin



mencionar que la capacidad de los motores paso a paso no podría satisfacer una velocidad de conmutación de esta magnitud.

#### 4.3.5 Velocidad máxima

La velocidad permisible para el SMC está determinada en función de las capacidades de los motores de pasos. Esto se debe a que este tipo de actuadores tiene un límite de sensibilidad a la frecuencia de pulsos que se le inyectan para hacer girar el rotor. Usualmente el motor está fabricado para trabajar dentro de un rango de frecuencias determinado, de manera que al exceder los límites de dicha zona el rotor no es capaz de seguir las variaciones del campo magnético, provocando una pérdida en la sincronización y haciendo que el motor se detenga o que comience a vibrar. Incluso, en algunos casos se da la aparición de frecuencias de resonancia que son inferiores al valor máximo y que producen el mismo fenómeno de vibración.

Los datos técnicos que se obtuvieron para los actuadores del manipulador no incluyen los límites de frecuencia máxima permisible, sin embargo existen gráficas características (ver Figura 4.10) que ayudan a la identificación de los parámetros de velocidad máxima en relación con el torque que puede ofrecer el motor en un caso general y de su comportamiento en los casos de arranque y de frenado. La gráfica de la Figura 4.9 compara el torque de un motor de pasos genérico a medida que la velocidad angular aumenta y por ende la frecuencia de pulsos. Dos parámetros de la gráfica representados por curvas son de particular interés [81]:

- *Pull-in* Torque: torque de carga con el que el motor puede acelerar desde el reposo sin perder pasos a velocidad constante
- *Pull out* Torque: torque máximo al cual puede girar un motor sin entrar en resonancia.

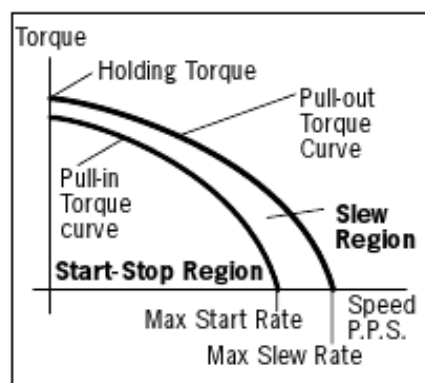


Figura 4.10. Gráfica de torque contra velocidad para un motor paso a paso.

La velocidad máxima para el SMC es entonces dependiente de estos parámetros y dado que no se cuenta con las especificaciones técnicas se encuentra este valor de manera empírica incrementando la frecuencia de los pulsos hasta que el motor pierda sincronía.

Se realizaron una serie de ensayos con la velocidad máxima a la que se pueden inyectar pasos sin alterar el comportamiento de los motores. Como resultado de estos ensayos se obtuvo que la velocidad máxima promedio del SMC por eje es de 22 mm/s aproximadamente.

#### 4.3.6 Espacio de trabajo

El volumen total de trabajo del manipulador resulta de la ubicación final de los componentes que restringen el movimiento en sus ejes. En un inicio, se propuso como especificación un espacio de trabajo con la forma de un prisma rectangular, característico de los manipuladores cartesianos, que tuviera 300 mm por lado. Una vez construidos los ejes del SMC y después de ser ensamblados en la estructura principal, se miden directamente las distancias verdaderas alcanzadas y se comparan con las estimaciones previas para establecer un criterio de aceptación. En la tabla 4.7 se presentan las longitudes efectivas finales del prototipo construido.

Eje	Desplazamiento efectivo [mm]
X	265.35
Y	316.30
Z	240.00

Tabla 4.7. Espacio de trabajo registrado en el SMC.

#### 4.4 Evaluación del desempeño del SMC

De acuerdo a los resultados obtenidos durante la fase de pruebas, en la Tabla 4.8 se presentan un resumen de los parámetros del desempeño global del sistema de manipulación cartesiano construido.

PARÁMETRO	VALOR OBTENIDO
Resolución	$\pm 50 \mu\text{m}$
Exactitud	$\pm 0.35\text{mm}$
Precisión	0.17mm
Tiempo de respuesta	1.5 $\mu\text{s}$
Velocidad máxima	22 mm/s
Capacidad de carga	
Eje X	9.7 Kg
Eje Y	9.7 Kg
Eje Z	15 Kg
Espacio de trabajo	
Eje X	265.35 mm
Eje Y	316.30mm
Eje Z	240.00 mm

Tabla 4.8. Parámetros desempeño del SMC desarrollado.

## 4.5 Discusión de resultados

Partiendo de los resultados obtenidos durante esta última etapa de diseño se puede afirmar que se desarrolló un sistema de manipulación X, Y, Z de propósito general que satisface las restricciones impuestas durante la fase de diseño conceptual (ver Tabla 2.1). Aun cuando no fue de la misma manera en todas las categorías, las evaluaciones han resultado en general de manera positiva.

Tomando como referencia los datos de la tabla 4.8 se puede afirmar lo siguiente con respecto al desempeño del manipulador cartesiano:

- ✓ **Resolución.** El mínimo grado de avance registrado es de 0.05 mm. Este desplazamiento es muy superior en relación al que se propuso en un principio (1 mm), lo cual es señal de un desempeño satisfactorio en el parámetro de resolución.
- ✓ **Capacidad de carga.** La carga que puede soportar el manipulador en sus ejes se mantiene de manera aceptable con respecto a la impuesta en la fase de diseño de detalle. Los valores obtenidos en este punto de la evaluación son relativamente halagadores, ya que fueron tomadas las cargas ideales y no las permisibles en base a los cálculos de diseño. Esta deducción permite validar como aceptable el comportamiento del SMC en cuanto a cargas máximas se refiere, habiendo observado rangos en los valores obtenidos que se encuentran dentro de lo esperado
- ✓ **Exactitud.** Un valor propuesto para la exactitud no se estableció al inicio del proyecto. Dado que no hay parámetro de referencia inicial contra el cual comparar los resultados generados durante los experimentos, se considera como aceptable el comportamiento del dispositivo en este aspecto. Sin embargo es preciso contemplar mejoras en el desempeño de este parámetro.
- ✓ **Tiempo de respuesta.** Un lapso mínimo de tiempo en el cual se esperaría que reaccionara el manipulador no fue contemplado. Por lo tanto el criterio de aceptación será aceptable en cuanto a tiempo de respuesta del SMC.
- ✓ **Velocidad máxima.** La velocidad máxima que se registró durante los ensayos de funcionamiento fue en promedio 2 mm/s, superior a la propuesta en un principio. Por lo tanto, el comportamiento del manipulador es aceptable al haber superado las expectativas de velocidad para el movimiento en los ejes.
- ✓ **Espacio de trabajo.** Los desplazamientos máximos registrados en cada uno de los ejes del sistema están dentro de los límites de aceptación impuestos para la fase de pruebas. Estos desplazamientos conforman al espacio de trabajo del SMC.
- ✓ **Precisión.** El parámetro de precisión, usado para evaluar la repetibilidad del sistema, arrojó una dispersión de 0.17 mm en las mediciones tomadas respecto

a los valores de estudio. Dado que el funcionamiento del sistema está basado en la combinación de las capacidades del microcontrolador para emitir pulsos en combinación con la capacidad de los motores para transmitirlos en desplazamiento discreto angular, existe una alta probabilidad de error en el posicionamiento de manera repetida por la influencia de estos dos parámetros.

Con base en estas afirmaciones y tomando en cuenta que el funcionamiento para este proyecto se tomó considerando uno solo de los ejes, se puede decir que el desempeño de este sistema de manipulación cartesiano es aceptable. Aun cuando no se obtuvieron resultados favorables en todos los aspectos evaluados, el funcionamiento de este sistema se considera apropiado en función de las especificaciones establecidas en el diseño.

# Conclusiones

Con el desarrollo del presente proyecto se logró el diseño y construcción de un sistema de manipulación cartesiano. Para ello se desarrollaron los sistemas: mecánico, eléctrico, electrónico y de control, que requiere una aplicación de ingeniería en un dispositivo como éste. Se propusieron ecuaciones de restricción para definir el comportamiento dinámico del sistema robótico cartesiano, con las que se encontraron los parámetros principales para calcular las posiciones, velocidades y aceleraciones en el sistema así como también las capacidades de carga y las fuerzas que involucra el funcionamiento del manipulador en conjunto. También se desarrolló un sistema de comunicación a través del puerto USB entre el sistema de control y una PC para dar facilidad en la forma de conexión con cualquier otro equipo ya sea de escritorio o portátil. Se desarrolló la programación de código abierto para permitir modificaciones, mejoras y expansiones del sistema. Escrito en lenguaje C, el código que administra las instrucciones en el microcontrolador puede ser adaptado con funciones matemáticas y lógicas para adecuar el comportamiento de las señales de control.

El sistema ha sido dotado de una interfaz gráfica para el usuario final a través de la cual puede interactuar leyendo e ingresando datos con los cuales es posible identificar el estado del dispositivo y controlar de manera directa sus movimientos. Dicha aplicación gráfica fue generada igualmente en código abierto basado en lenguaje C a fin de facilitar adecuaciones posteriores.

Un costo bajo de fabricación del dispositivo se impuso como restricción de diseño desde un inicio. El valor aproximado del manipulador se acerca a los \$13,000.00. Este costo incluye únicamente los materiales y componentes del dispositivo. Costos adicionales de fabricación e ingeniería no se contemplan en esta aproximación. Al comparar este precio con el de otros dispositivos de prototipado similares, con precios que oscilan entre los USD 1,200 hasta los USD 2,000, se afirma que el objetivo fue alcanzado. Componentes mecánicos de bajo costo fueron adquiridos con proveedores locales y nacionales para minimizar el gasto. Al igual que la parte estructural, las partes eléctricas son comunes en el mercado y por lo tanto, de bajo costo. La parte referente a las aplicaciones computacionales y de programación se cuidó por igual, utilizando software gratuito para generar los códigos que controlan al manipulador.

Un herramental para el manipulador fue instalado en el cabezal del eje X. Este efector final está provisto de tal forma que puede ser montado en él alguna herramienta, un palpador, o un plumón para poder trazar una trayectoria o un inyector para aplicaciones de prototipado rápido. Este aditamento es fácilmente modificable y puede ser desmontado para otras aplicaciones con lo cual se cumple el requisito de ser adaptado para distintos propósitos.

Sin embargo, el alcance de este proyecto fue subestimado en cuanto al grado de complejidad que implica el desarrollo de un sistema como lo es el manipulador de 3 ejes. En base a las dificultades encontradas, se exponen las siguientes conclusiones:

- Se realizó un rediseño del sistema mecánico del manipulador, principalmente en el eje Z debido a las dificultades en el movimiento que se presentaron en un primer prototipo. Se cambió el acoplamiento directo entre la flecha del motor y el husillo para solucionar el problema de la fricción excesiva concentrada precisamente en este punto de unión. El ajuste proporcionado no permitía una holgura suficiente para poder transmitir el giro del motor hacia el husillo. La solución consistió en adaptar una transmisión por banda y polea dentada, desacoplando la flecha del motor y el tornillo. El diseño en los acopladores para las poleas se realizó con un ajuste más abierto para permitir que el husillo no presentara el mismo problema nuevamente.
- En general se presentaron diversos problemas de montaje en todos los ejes y en la estructura del manipulador. Las tolerancias de diseño fueron especificadas de tal forma que el ensamble de todas las piezas influyera lo menos posible en el funcionamiento de los ejes del manipulador. Sin embargo, este ajuste no permite solventar problemas de pequeñas interferencias mecánicas o el atascamiento en los mecanismos, como el caso del eje Z.
- Se utilizó un circuito implementado en protoboard para el sistema terminado. El sistema electrónico requiere del diseño de un circuito que debe concentrar un gran número de señales en un espacio reducido. La placa fenólica en la cual se realizó el circuito presentó problemas de conexión y continuidad en las señales debido a que las pistas de cobre debían ser muy pequeñas para poder llegar a todos los componentes. Esto también ocasionó que se desprendieran algunos puntos en las terminales de los pines de conexión para las señales, e incluso de las propias pistas del circuito. Por esta razón fue adaptado el circuito en protoboard, usado al inicio del proyecto para verificar el funcionamiento de los motores y validar su comportamiento al funcionar en conjunto con la aplicación de control.
- El circuito en protoboard instalado en el SMC presentó problemas durante las pruebas de funcionamiento de los ejes del manipulador. Se revisaron las conexiones sin encontrar problemas de intercambio en las señales de control para eliminar posibles errores. El principal problema encontrado fue el comportamiento errático en el movimiento de los ejes Y y Z. Al accionar estos ejes desde la aplicación en la computadora se observó que los pulsos eran enviados, ya que se aprecia el cambio de posiciones en la información de la computadora, más no en la máquina. El eje X se mueve de manera consistente y es por eso que se realizaron las pruebas de desempeño sobre este módulo.
- Una problemática que persistió durante el funcionamiento del manipulador fue el manejo de señales a distintos niveles de voltaje. Por un lado se tiene el sistema de potencia que proporciona energía a los motores a 12V. El sistema de control que mantiene al PIC funcionando se energiza con un una señal de 5V. Ambos sistemas deben estar conectados dentro de un mismo circuito global con un mismo punto de referencia. Dicho punto es la tierra del sistema eléctrico, en este caso tomada directamente de la misma fuente de voltaje utilizada para la máquina. Aun así, se

hizo evidente que una vez conectado alguno de los dos módulos, había una fuerte interferencia al conectar los 2 o incluso también al conectar el cable de USB a la PC, que en la mayoría de los casos interrumpía el funcionamiento del SMC, teniendo que reiniciar el sistema completo.

- A pesar de las limitantes impuestas al proyecto en cuanto al material de bajo costo, las restricciones de uso de herramientas poco especializadas, el equipo obsoleto para construir el manipulador aunados al exceso de trabajo que implica el desarrollo de un sistema mecatrónico especializado como éste, se diseñaron los sistemas mecánico, eléctrico y de control para un sistema de manipulación cartesiano. Dichos sistemas fueron construidos e implementados habiendo excedido el límite de tiempo establecido para la ejecución del proyecto.

Aun cuando las pruebas de desempeño no fueron realizadas en el sistema como un conjunto, su construcción permite seguir trabajando para implementar el funcionamiento de dispositivo.

### **Trabajo a futuro**

Como trabajo a futuro se proponen los siguientes puntos:

- Reconsiderar en el ensamble de los componentes del manipulador un ajuste más abierto para evitar problemas de fricciones excesivas en las bases de los ejes, los soportes para los mismos, el acoplamiento de los motores y los módulos de transporte. Con esto es posible facilitar el movimiento en los ejes al haber mayor holgura cuando se presenten los movimientos en los motores y en los husillos.
- Reproducir las pruebas de desempeño en los 3 ejes del manipulador de forma que se validen las restricciones de diseño impuestas en la fase inicial del proyecto en cada uno de los ejes del manipulador. El funcionamiento de los ejes X, Y y Z en conjunto permitirá la evaluación de los parámetros de diseño como la exactitud, la precisión, la velocidad, etc.
- Generar una placa de cobre con el circuito final impreso y verificar su correcto funcionamiento cuando el sistema se encuentre en operación. Verificar el funcionamiento de cada uno de los motores acoplados con los husillos por separado para validar posteriormente el funcionamiento combinado de todos los ejes a la vez.
- Dotar de protecciones eléctricas más eficaces al sistema de control para solventar la problemática que suponen las interferencias y ruidos que afectan a las señales debido a la alta frecuencia de transmisión de datos. Replantear el uso de fuentes separadas con una etapa de transición en la cual se mantengan unidos los circuitos de potencia y control en un mismo punto de aterrizaje eléctrico, pero manteniéndolos separados el uno del otro.

- Montar herramientas para maquinado o medición con los cuales pueda probarse el funcionamiento del manipulador como un sistema adaptable a actividades diversas utilizando el efector final acoplado en el eje X.
- Proveer al sistema de un lazo retroalimentado para conocer las posiciones en cada eje sin depender del conteo de pasos en los motores si no de la distancia real que cada uno de los ejes se ha desplazado. El uso de encoders o de sensores infrarrojos utilizados para medir la distancia puede incluirse para tal efecto.
- Implementar un control de movimientos por trayectorias, adicional al control propuesto de posiciones punto a punto como una variante para el funcionamiento del sistema.



# Bibliografía

- [1] Niku Saeed, "Introduction to Robotics Analysis, Systems, Applications", 2001, Prentice Hall.
- [2] Malone E., "Fab@home, An Open-Source Personal Desktop Fabricator Kit", 2007.
- [3] Mendel. Año de consulta: Septiembre 2010. <http://reprap.org/wiki/Mendel>
- [4] A1 Technologies. "RapMan V3.1.0.", Manual de construcción, 2010.
- [5] MakerBot Industries Thing-O-Matic 3D Printer. Año de consulta: Abril 2011. <http://wiki.makerbot.com/thingomatic>.
- [6] CupcakeCNC. Año de consulta: Abril 2011. <http://wiki.makerbot.com/cupcake>.
- [7] 3D Bio-printer to create arteries and organs. Año de consulta: Abril 2011. <http://www.gizmag.com/3d-bio-printer/13609>.
- [8] Auto Ink. Año de consulta: Abril 2011. [http://chriseckert.com/Sculpture/036\\_auto\\_ink/gallery.html](http://chriseckert.com/Sculpture/036_auto_ink/gallery.html)
- [9] Ardila Juan, "Manufactura por capas: Prototipado rápido", 2007.
- [10] Economía de México. Año de consulta: Abril 2011. [http://es.wikipedia.org/wiki/Econom%C3%ADa\\_de\\_M%C3%A9xico](http://es.wikipedia.org/wiki/Econom%C3%ADa_de_M%C3%A9xico)
- [11] What are Gantry cranes. Año de consulta: Abril 2011. <http://cranegantry.net/what-are-gantry-cranes>
- [12] Kurrer Karl-E., "The history of the theory of the structures". 2008, Ernst & Sohn.
- [13] Arnold H., "The recent history of the machine tool industry and the effects of technological change". 2001.
- [14] Numerical control. Año de consulta: Mayo 2011. [http://en.wikipedia.org/wiki/Numerical\\_control](http://en.wikipedia.org/wiki/Numerical_control)
- [15] Cartesian Robots. Año de consulta: Mayo 2011. <http://www.allonrobots.com/cartesian-robots.html>
- [16] Gantry Robots. Año de consulta: Mayo 2011. <http://searchwarp.com/swa686384-Gantry-Robots.htm>
- [17] Sprovieri J., X-Y-Z: "The Modular Robot", Assembly Magazine. 2002.
- [18] Rodríguez F., Olivares G., "Robot cartesiano XYZ". Instituto Politécnico Nacional. México.
- [19] What is a Cartesian Robot ?. Año de consulta. <http://www.wisegeek.com/what-is-a-cartesian-robot.htm>
- [20] Mütterich H., "Konzeption und Entwicklung von robotergeführten Werkzeugsystemen zur Fertigung von Holzbauteilen in kleinen Losgrößen", Tesis de Maestría, Universidad de Dortmund, Stuttgart, 2005.
- [21] Bullard R., Wrosch J., "Eastern Michigan University's Automated Storage and Retrieval System, 10 years later". Journal of access services, 6, 2009, pp. 388-395.

- [22] Fabbers. Año de consulta: Mayo 2011. <http://www.100kgarages.com/fabbers>
- [23] Fab@home: fabbers of the world. Año de consulta: Mayo 2011. [http://www.fabathome.org/wiki/index.php/Fab%40Home:Fabbers\\_of\\_the\\_World](http://www.fabathome.org/wiki/index.php/Fab%40Home:Fabbers_of_the_World)
- [24] fab@home, the open-source personal fabricator project. Año de consulta: Mayo 2011. <http://www.fabathome.org>
- [25] Kamrani, Ali K., Nasr, Emad S., Abouel., "Collaborative Engineering - Theory and Practice". 2008. Springer - Verlag.
- [26] Malone, E., "Fab@home, An Open-Source Personal Desktop Fabricator Kit", 2007.
- [27] Fab@home: Model 2 Overview. Año de consulta: Mayo 2011. [http://www.fabathome.org/wiki/index.php/Fab@Home:\\_Model\\_2\\_Overview](http://www.fabathome.org/wiki/index.php/Fab@Home:_Model_2_Overview)
- [28] Medellín, H. "Manufactura rápida y sistemas avanzados de manufactura", Notas del curso, México, Mayo 2010.
- [29] Leistner M., "Neue Verfahren zur modelllosen Herstellung großer Sandformen mit Robotern". 2001, Centro de investigación Karlsruhe GmbH. Alemania.
- [30] Coba M., Serres E., "Tecnologías de fabricación rápida. Optimización y mejora de la tecnología de mecanizado rápido - Coproinmold", Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquía, 36, 2006, pp. 7-20.
- [31] Jones R., Haufe P., Sells E., Irvani P., Olliver V., Palmer C., Bowyer A., "RepRap- the replicating rapid prototype", Cambridge University Press, 29, 177-191, 2011.
- [32] Mendel. Año de consulta: Mayo 2011. <http://reprap.org/wiki/Mendel>
- [33] 3D Bio-printer to create arteries and organs. Año de consulta: Mayo 2011. <http://www.gizmag.com/3d-bio-printer/13609/>
- [34] 3D Scanning System. Año de consulta: Mayo 2011. <http://makeprojects.com/Project/3D-Scanning-System/98/1>
- [35] Reyes F., "Robótica: Control de Robots Manipuladores", México, 2011, Alfaomega.
- [36] Spong M. W., Hutchinson S., Vidyasagar M., "Robot Dynamics and Control", 2004, Wiley.
- [37] Reyes F., Sánchez P., "A Polynomial Family of PD-Type Cartesian Controllers", International Journal of Robotics and Automation, 2008.
- [38] Kurfess T., "Robotics and Automation Handbook", 2005, CRC Press.
- [39] Ferreira C. V., Romano V. F., "A Design Methodology for the Compensation of Positioning Deviation in Gantry Manipulators", Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences, 24 2002, pp. 83-92.
- [40] Marinescu D., Nicolescu A., "Gantry volumetric error evaluation using analytical and FEM modeling", Proceedings of the 21<sup>st</sup> International DAAAM Symposium, 21, 2010.
- [41] Korayem M. H., Shiehbeiki N., Khanali T., "Design, Manufacturing and experimental Tests of a prismatic Robot for Assembly line", The International Journal for Advanced Manufacturing Technology, 29, 2006, pp. 379-388.
- [42] Lu L., Zheng C., Bin Y., Qingfeng W., "Desired Compensation Adaptive Robust Control of a Linear-Motor-Driven Precision Industrial Gantry with Improved Cogging Force Compensation", IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 13, 2008.

- [43] Ratcliffe J., Lewin P., Rogers E., Hätönen J., Owens D., "Norm-Optimal Iterative Learning Control Applied to Gantry Robots for Automation Applications", IEEE Transactions on Robotics, 22, 2006.
- [44] Chek-Sing T., Kok-Kiong T., Ser-Yong L., "Dynamic Geometric Compensation for Gantry Stage Using Iterative Learning Control", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 57, 2008.
- [45] Yasir A., "Developing PLC based Gantry Robot Using Positioning Servo Drive with PROFIBUS-DP Communication Protocol", Faculty of Electrical Engineering Universiti Teknologi Malaysia, 2009.
- [46] Altintas A., "A New Approach to 3-Axis Cylindrical and Cartesian Type Robot Manipulators in Mechatronics Education", Education in Electronics and Electrical Engineering, 10, 2010.
- [47] Aslam M., Farrukh, Gardezi A. R., Hayat N., "Design, Development and Analysis of Automated Storage and Retrieval System with Single and Dual Command Dispatching using MATLAB", World Academy of Sciences, Engineering and Technology, 60, 2009.
- [48] Medellín H., "Diseño en Ingeniería Mecánica" Notas del curso, México, Julio 2008.
- [49] Pahl G., Beitz W., Feldhusen J., Grote K. H., "Engineering Design, A systematic approach". 3a ed. Londres, 2007, Springer.
- [50] Rothfuss R., Lasa M., Heinkel H. M., Türgari P., "Systems Engineering in the Design of Mechatronics Systems", International Journal of Vehicle Design, 28(1/2/3), 2002. pp. 18-36.
- [51] Doppelt Y., "Assessment of Project-Based Learning in a Mechatronics Context", Journal of Technology Education, 16(2), 2005, pp. 7-24.
- [52] Stacey M., Sharp H., Petre M., Rzevski G., Buckland R., "A Representation Scheme to support Conceptual Design of Mechatronic Systems", Artificial Intelligence un Design, 1995.
- [53] Pei E., Campbell R. I., Beer D, "Entry-level RP machines: how well can they cope with geometric complexity?", Assembly Automation Journal, 31(2), 2011, pp.153 - 160.
- [54] Comparison Chart of All 3D Printer Choices for approximately \$20,000 or Less, Año de consulta: Septiembre 2011, [http://www.additive3d.com/3dpr\\_cht.htm](http://www.additive3d.com/3dpr_cht.htm).
- [55] Surinder Pal, "Design and Remote Control of a Gantry Mechanism for the SCARA Robot", Tesis de Maestría, Texas A & M University, 2007.
- [56] Rojas J., Mahla I., Muñoz G., Castro D., "Diseño de un Sistema Robótico Cartesiano para Aplicaciones Industriales", Revista Facultad de Ingeniería, 11(2), 2003, pp. 11-16.
- [57] Tomás Balibrea Luis M., Mateo Aroca Antonio, "Robot con Visión Artificial para Encolado Automático de Suelas de Zapato", Oficina Española de Patentes y Marcas, Patente de Invención, ES2142239B1, 2001.
- [58] Barragán C., "Entrenamiento en Servoposicionamiento", Festo Didactic - Entrenamiento y consultoría, 2007.
- [59] Mott R. L., "Diseño de elementos de Máquinas", 4ª. Ed. México, 2006, Prentice Hall.

- [60] Limón J., Calleja F., "Laboratorio de diseño de sistemas lógicos, Manual del curso", Departamento de Mecatrónica y Automatización del ITESM, México, 2002.
- [61] Ibrahim D., "Advanced PIC Microcontroller Projects in C: from USB to RTOS with the PIC18F series", 2008, Elsevier.
- [62] Sánchez P., Reyes F., "Cartesian Control for Robot Manipulators", Robot manipulators, trends and development., 2010, In-tech.
- [63] Takegaki M., Arimoto S., "A New Feedback Method for Dynamic Control of Manipulators", ASME Transactions Journal of Dynamic Systems, Measurements and Control, 102, 1981, pp. 119-125.
- [64] Shigley Joseph E., Mischke Charles R., "Diseño en Ingeniería Mecánica", 6ª. Ed. McGraw Hill.
- [65] Korta S. A., Husillo a bolas, catálogo dimensional, 2009.
- [66] Korta S. A., Husillo a bolas, catálogo técnico, 2009.
- [67] Roton, quality screws & nuts for power transmission: Useful formulas, Año de consulta: Febrero 2011, <http://www.roton.com/formulas.aspx>.
- [68] Pytel Andrew, Singer Ferdinand L., "Resistencia de Materiales, Introducción a la mecánica de sólidos", 4ª. Ed. Oxford University Press.
- [69] Hibbeler R. C., "Mecánica de Materiales", 3ª. Ed. Pearson Education.
- [70] Axelson Jan, "USB Complete: The Developer's guide ", 4ª. Ed. Lakeview Research LLC.
- [71] Allman Stuart, "Using the HID class eases the job of writing USB device drivers", [www.edn.com](http://www.edn.com), Septiembre 2012, pp. 83-90.
- [72] Getting a Vendor ID, Año de consulta: Enero 2012, <http://www.usb.org/developers/vendor/>
- [73] Building a PIC18 USB device, Año de consulta: Noviembre 2011, [http://www.waitingforfriday.com/index.php/Building\\_a\\_PIC18F\\_USB\\_device](http://www.waitingforfriday.com/index.php/Building_a_PIC18F_USB_device)
- [74] BFB 3D Touch, Technical specifications, Año de consulta: Marzo 2012, <http://www.desktopfab.com/techspecs.php#BFB-3D-Touch>
- [75] Especificaciones de la fresadora MDX - 40ª, Año de consulta: Marzo 2012, <http://es.rolanddga.com/products/milling/mdx40/specifications.asp>
- [76] Conrad K. L., Shiakolas P. S., Yih T. C., "Robotic calibration issues: accuracy, repeatability and calibration", Proceedings of the 8th Mediterranean Conference on Control & Automation, 2000.
- [77] Kysan electronics, Año de consulta: Agosto 2011, [http://www.kysanelectronics.com/Products/datasheet\\_display.php?recordID=7581](http://www.kysanelectronics.com/Products/datasheet_display.php?recordID=7581)
- [78] Resolution, Accuracy, Repeatability, Compliance., Año de consulta: Abril 2012, <http://www.fortunecity.com/campus/law/365/definitions.htm>
- [79] Conrad K. L., Shiakolas P. S., Yih T. C., "On the accuracy, repeatability and degree of influence of kinematics parameters for industrial robots", International Journal of Modeling and Simulation, Vol 22, No. 3, 2002.

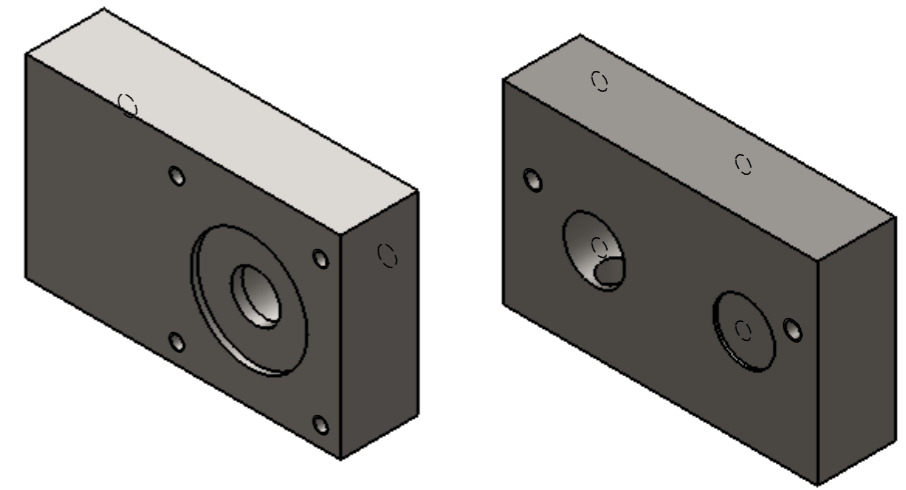
- [80] Llamosa Luis, E., Meza Luis, G., Botero Marcela, "Estudio de repetibilidad y reproducibilidad utilizando el método de promedio y rangos para el aseguramiento de la calidad de los resultados de calibración de acuerdo con la norma técnica NTC-ISO/IEC 127025", *Sciencia et Technica*, Universidad Tecnológica de Pereira, 35, 2007 , pp. 455 - 460.
- [81] Martinez Mario, "Motores paso a paso", *Instrumentación para las comunicaciones*, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación, 2003.
- [82] Reyes Silvia, "International vocanbulary of metrology- Basic anf general concepts and associated terms (VIM) JCGM 200:2008 Sección de algunos conceptos más communes o familiarizados con las actividades de los laboratorios de Física y Metrología", *Laboratorio de Física y Unidad de Metrología*, UNAM, Intersemenstre 2009-2.

# Apéndice A

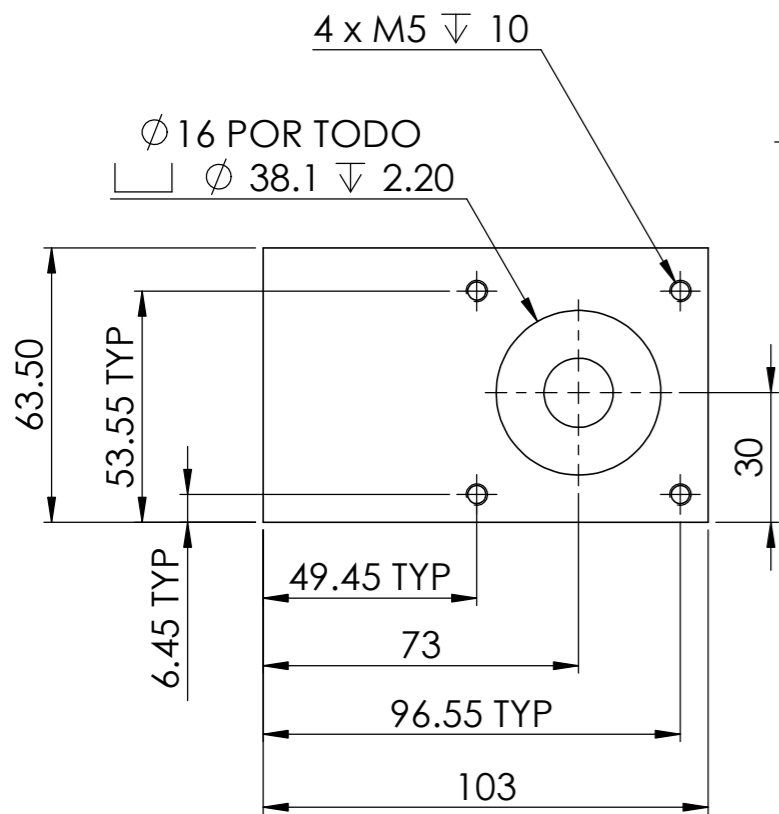
Este apéndice contiene los planos del diseño mecánico de los componentes del manipulador de los ejes X, Y y Z y los correspondientes ensambles. En la parte final se muestra el listado de los materiales que fueron utilizados.

## A.1. Eje X

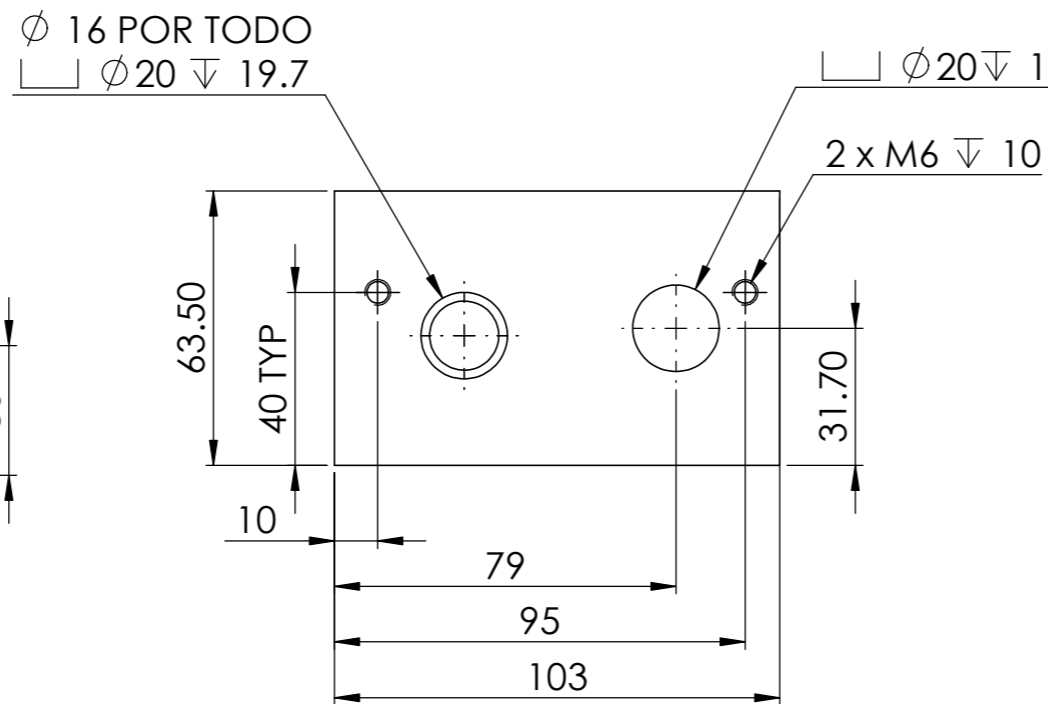
Acero rolado en frío  
 AISI 1018  
 Solera: 2.5" x 1"



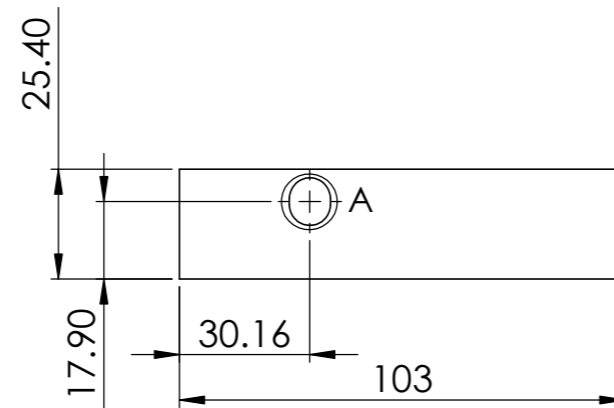
VISTA ISOMÉTRICA



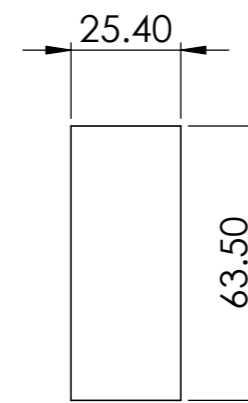
VISTA POSTERIOR



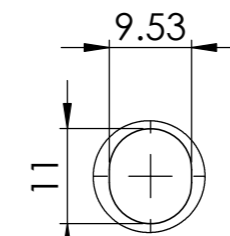
VISTA FRONTAL



VISTA SUPERIOR



VISTA LATERAL DERECHA

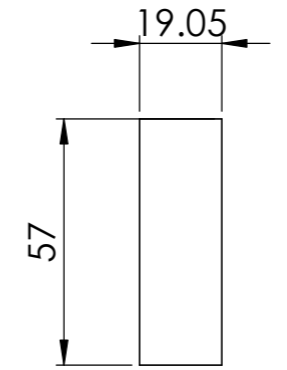
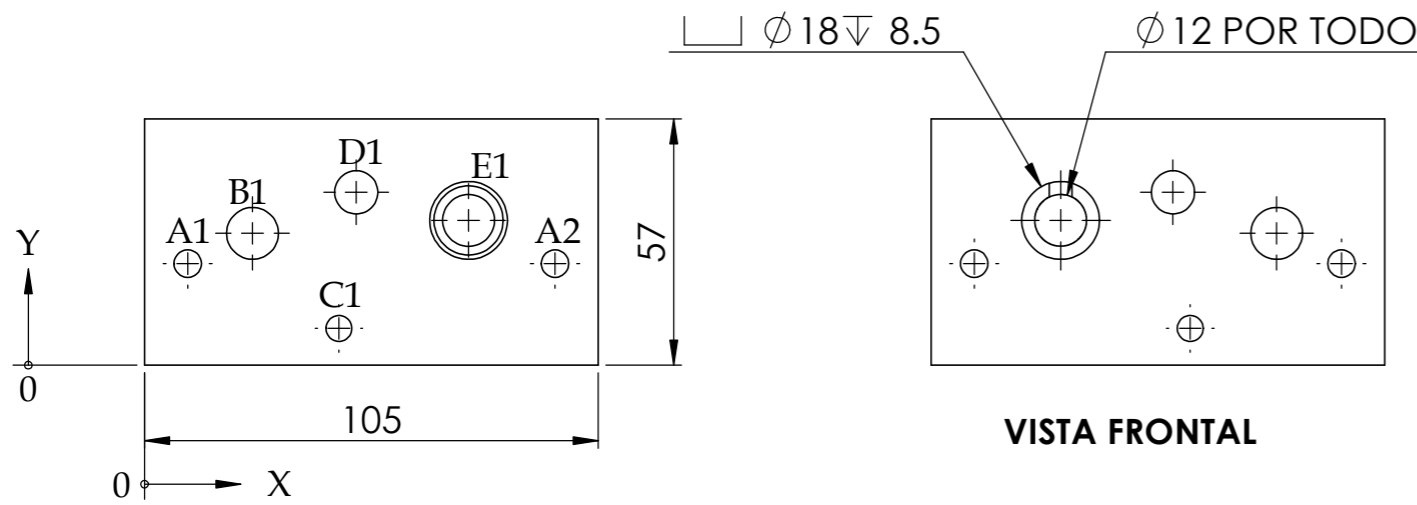
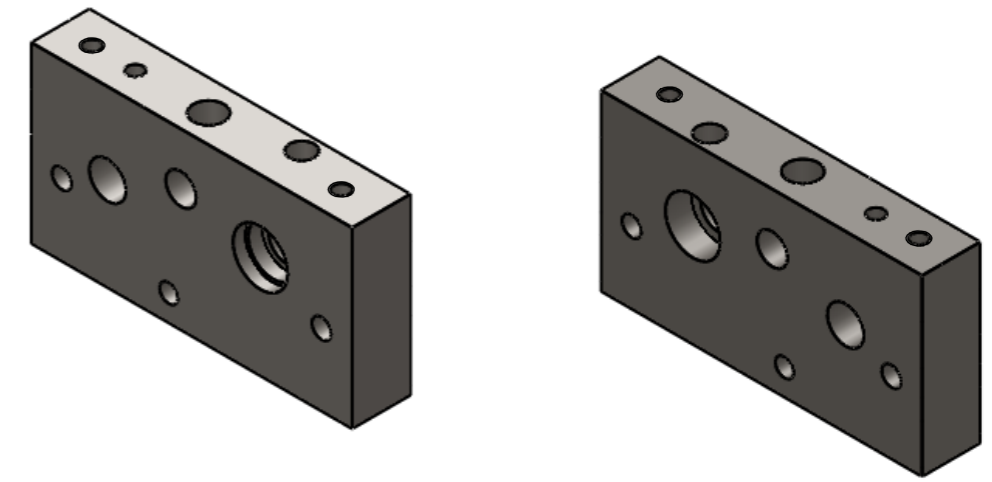
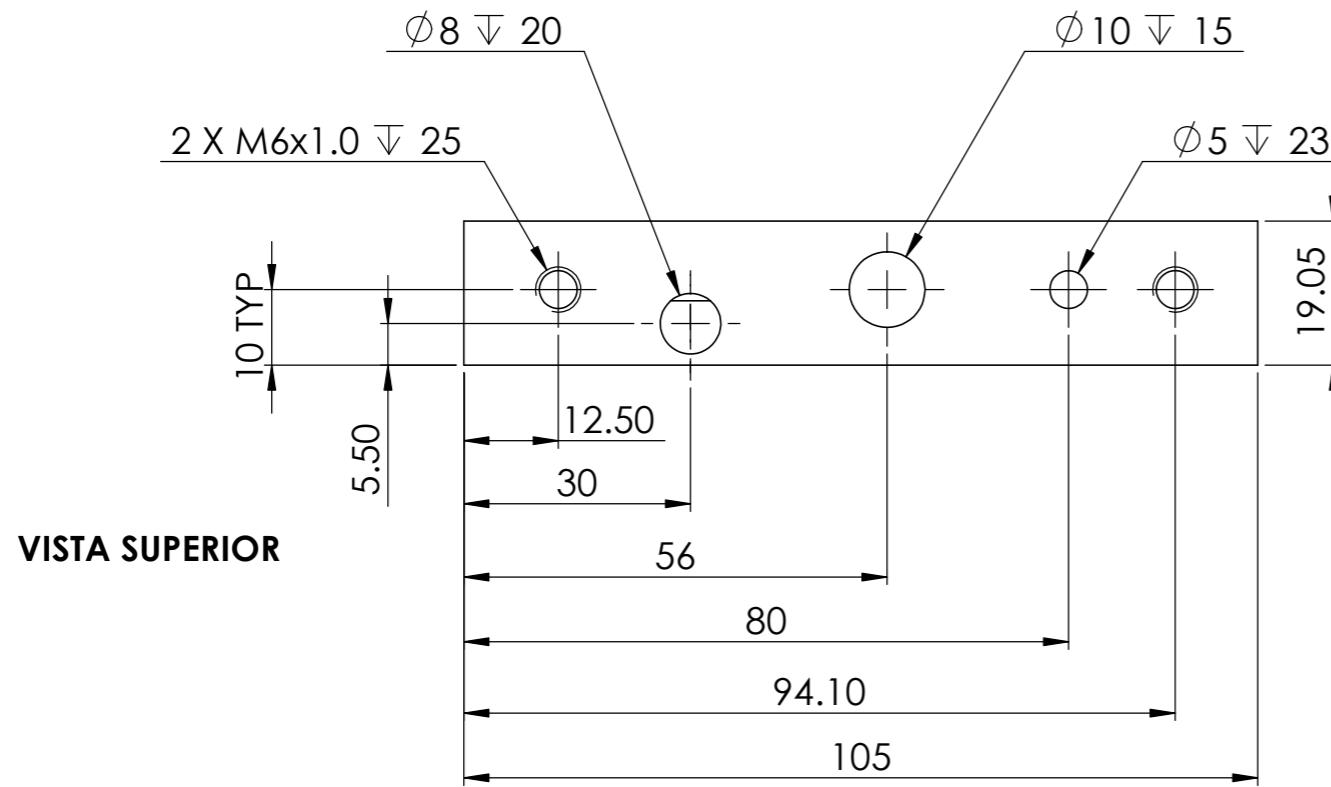


DETALLE A

NOTA:  
 A menos que se especifique lo contrario, todas las dimensiones están expresadas en milímetros.

<b>POSGRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA</b>		Diseñado por: A. JARAMILLO	Título: <b>SOPORTE DE ACOPLAMIENTO EJE X</b>	Formato A3	
Revisión: 0	Fecha de creación: 17/02/2013	Aprobado por: H. MEDELLIN		Idioma E	
Diseño y construcción de un sistema de manipulación X, Y, Z de propósito general					
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO			Doc. No.: 008-002		Hoja 1/1

Acero rolado en frío  
 AISI 1018  
 Solera: 2.25" x .75"



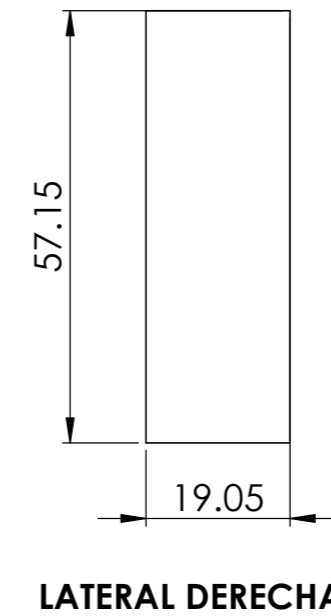
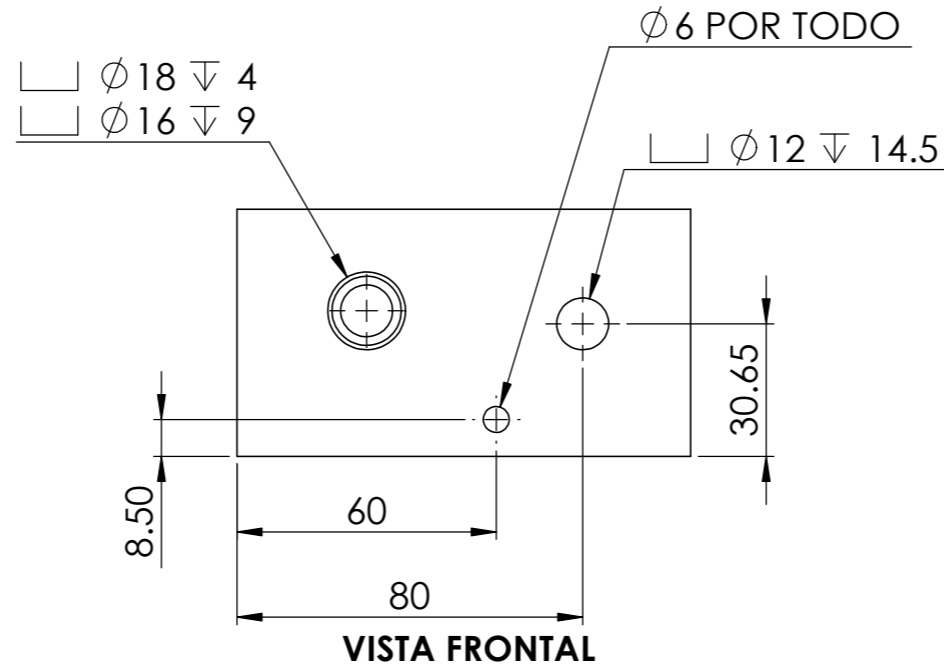
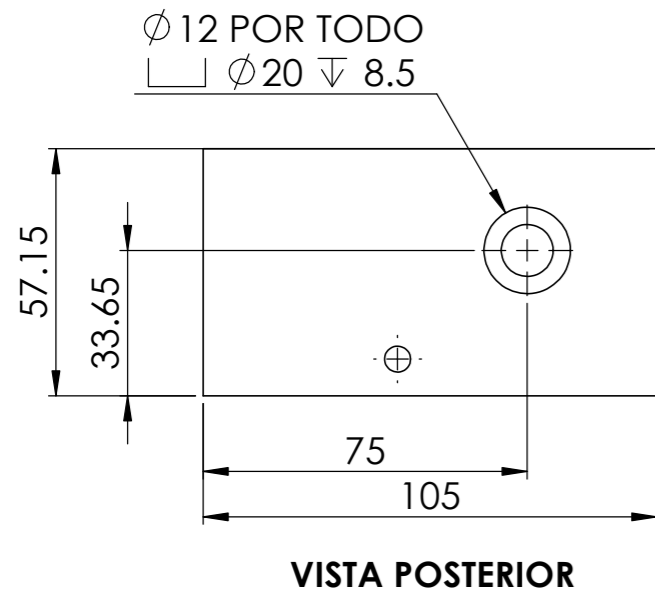
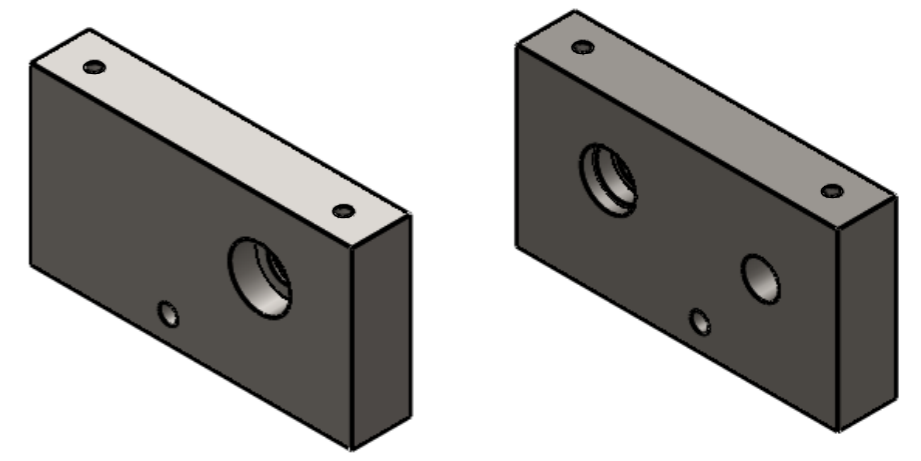
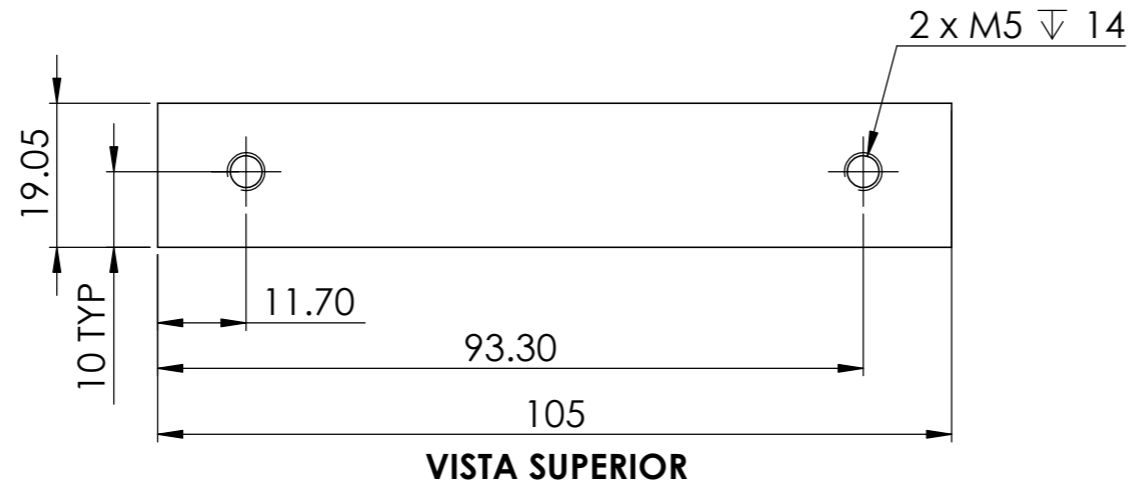
RÓTULO	UBIC X	UBIC Y	TAMAÑO
A1	10	23.50	Ø 6.35 POR TODO
A2	95	23.50	Ø 6.35 POR TODO
B1	25	30.50	Ø 12 POR TODO
C1	45	8.50	Ø 6 POR TODO
D1	49	40	Ø 10 POR TODO
E1	75	33.50	Ø 16 ∇ 8.55 Ø 18 ∇ 4

**NOTA:**  
 A menos que se especifique lo contrario, todas las dimensiones están expresadas en milímetros.

<b>POSGRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA</b>		Diseñado por: A. JARAMILLO	Título: <b>SOPORTE DE HUSILLO Y GUÍAS EJE X</b>	Formato A3
Revisión: 0	Fecha de creación: 08/06/2013	Aprobado por: H. MEDELLIN		Idioma E
Diseño y construcción de un sistema de manipulación X, Y, Z de propósito general			Doc. No.: 012-001	
				Hoja 1/1



Acero rolado en frío  
 AISI 1018  
 Solera: 2.25" x 0.75"



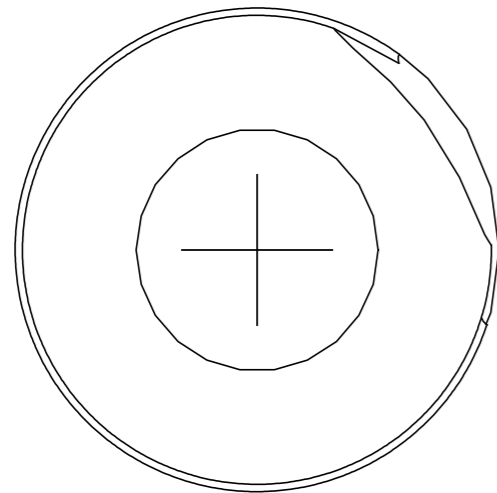
NOTA:  
 A menos que se especifique lo contrario, todas las dimensiones están expresadas en milímetros.

<b>POSGRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA</b>		Diseñado por: A. JARAMILLO	Título:  <b>SOPORTE PARA TORNILLO Y GUÍAS</b>	Formato A3	
Revisión: 0	Fecha de creación: 03/03/2013	Aprobado por: H. MEDELLIN		Idioma E	
Diseño y construcción de un sistema de manipulación X, Y, Z de propósito general			Doc. No.: 012-002	Hoja 1/1	
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO					

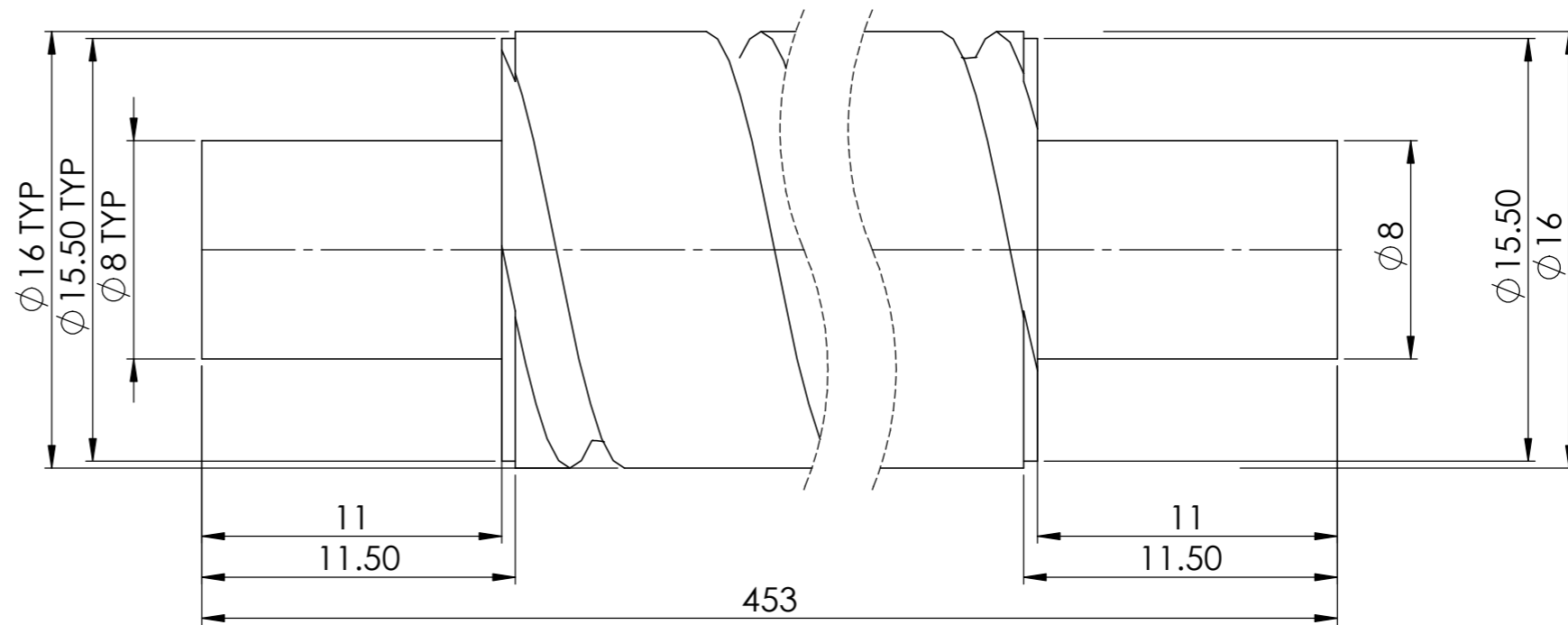
Husillo de bolas  
16mm 10mm



VISTA ISOMÉTRICA




VISTA FRONTAL

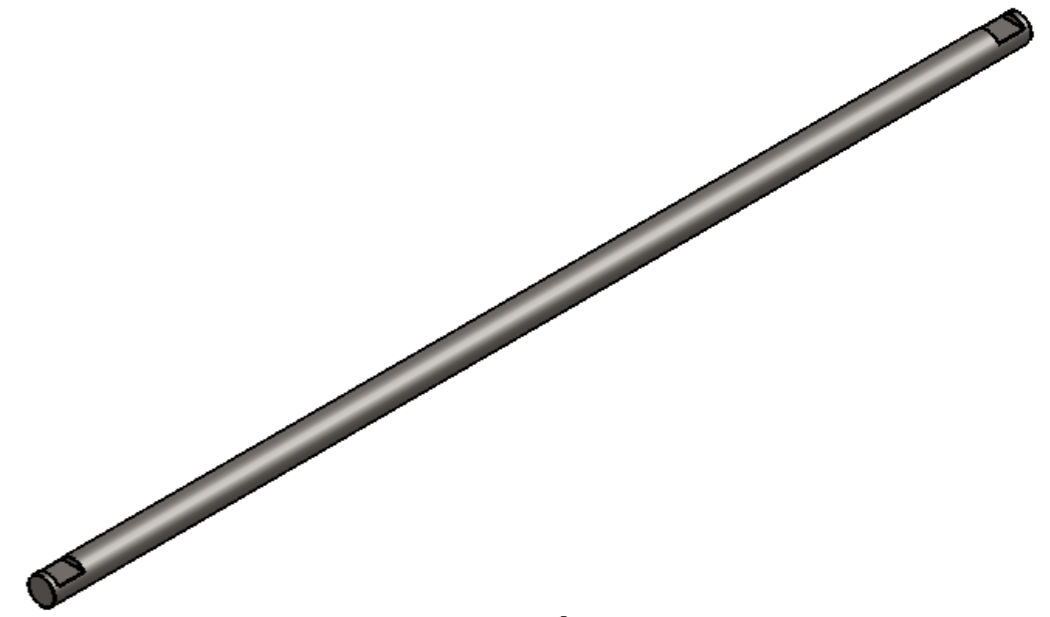


LATERAL DERECHA

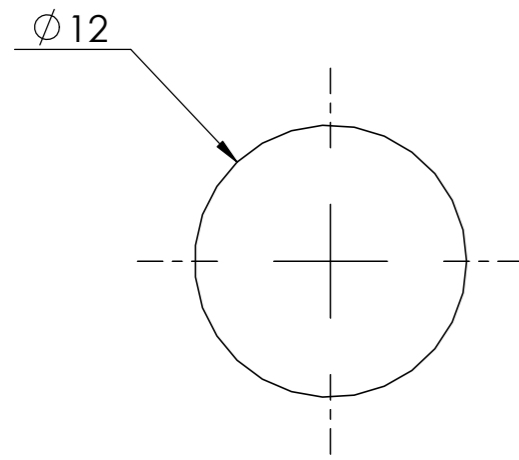
NOTA:  
A menos que se especifique lo contrario, todas las dimensiones están expresadas en milímetros.

<b>POSGRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA</b>		Diseñado por: A. JARAMILLO	Título: <b>HUSILLO DE BOLAS EJE X</b>	Formato A3	
Revisión: 0	Fecha de creación: 24/02/2013	Aprobado por: H. MEDELLIN		Idioma E	
Diseño y construcción de un sistema de manipulación X, Y, Z de propósito general					Hoja 1/1
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO			Doc. No.: 13-001		

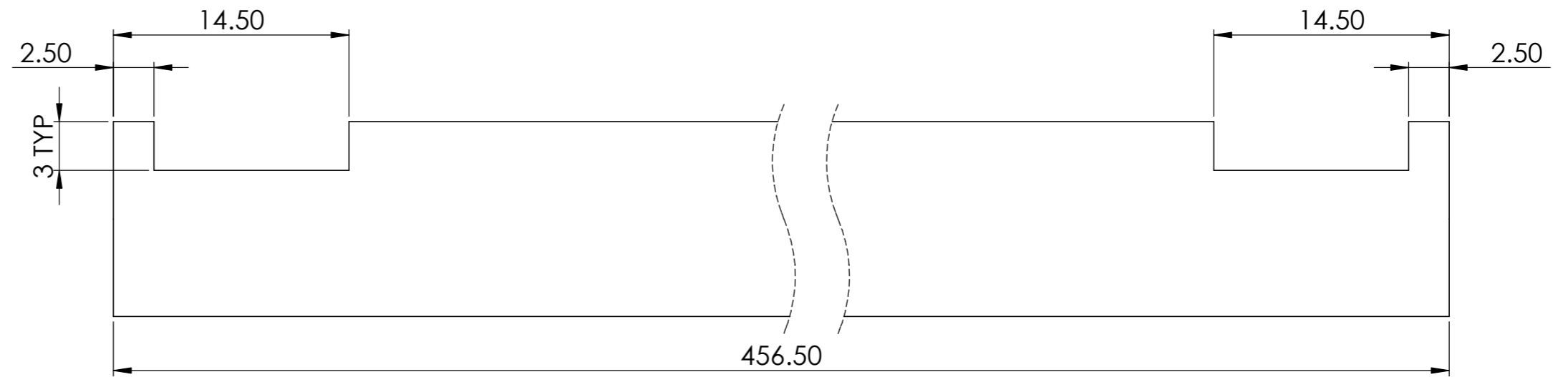
Acero rolado en frío  
 AISI 1018  
 Barra redonda de 12mm



VISTA ISOMÉTRICA






VISTA FRONTAL

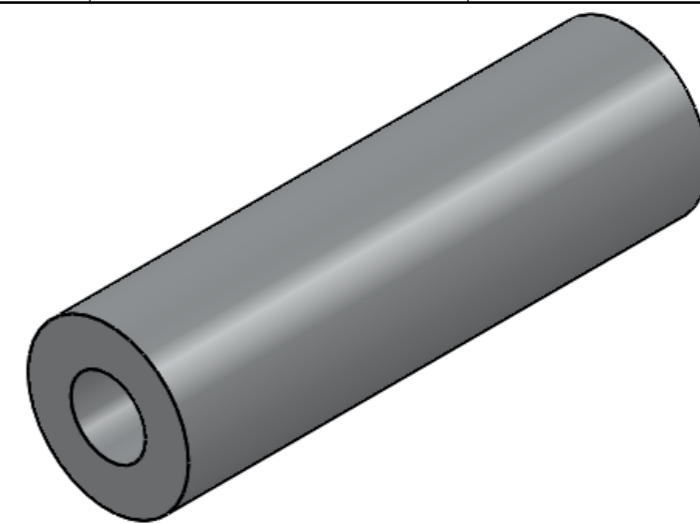


VISTA LATERAL DERECHA

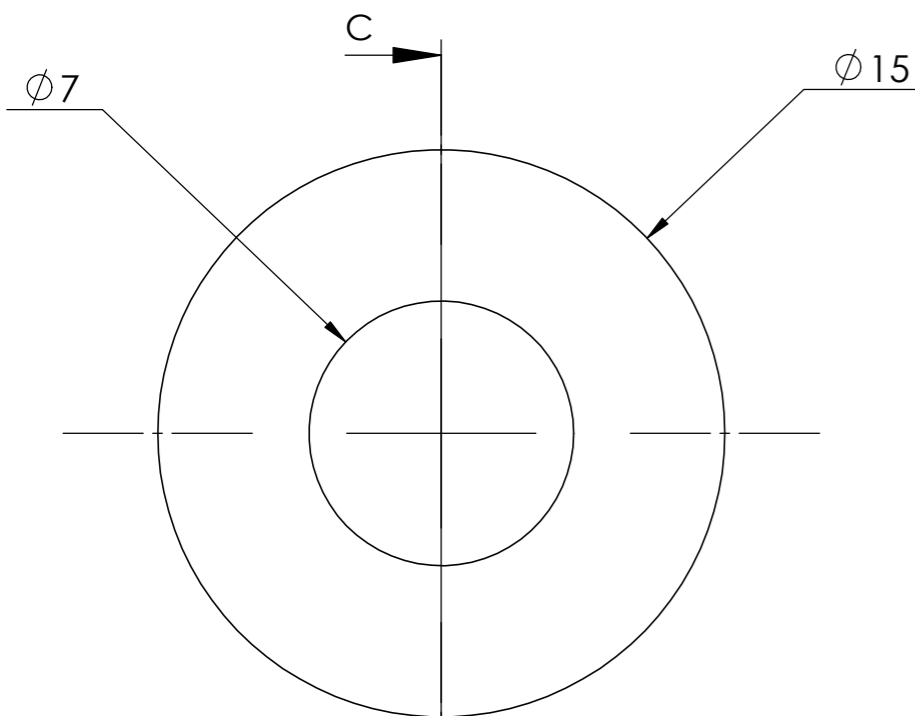
NOTA:  
 A menos que se especifique lo contrario, todas las dimensiones están expresadas en milímetros.

<b>POSGRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA</b>		Diseñado por: A. JARAMILLO	Título: GUÍA LINEAL EJE X	Formato: A3	
Revisión: 0	Fecha de creación: 18/02/2013	Aprobado por: H. MEDELLIN		Idioma: E	
Diseño y construcción de un sistema de manipulación X, Y, Z de propósito general			Doc. No.: 014-001		Hoja: 1/1
					

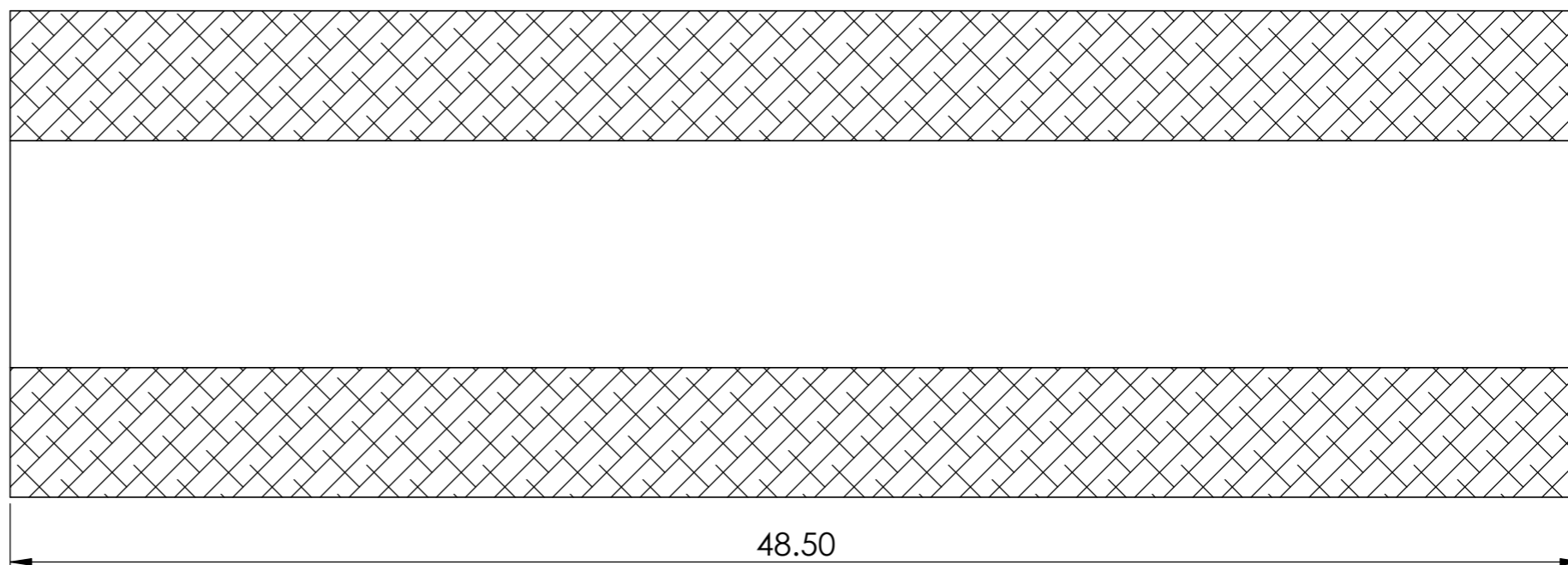
Aleación de Aluminio 6061  
Barra redonda de 20mm



VISTA ISOMÉTRICA



VISTA FRONTAL

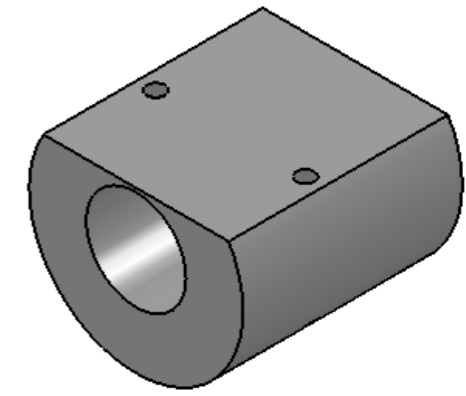
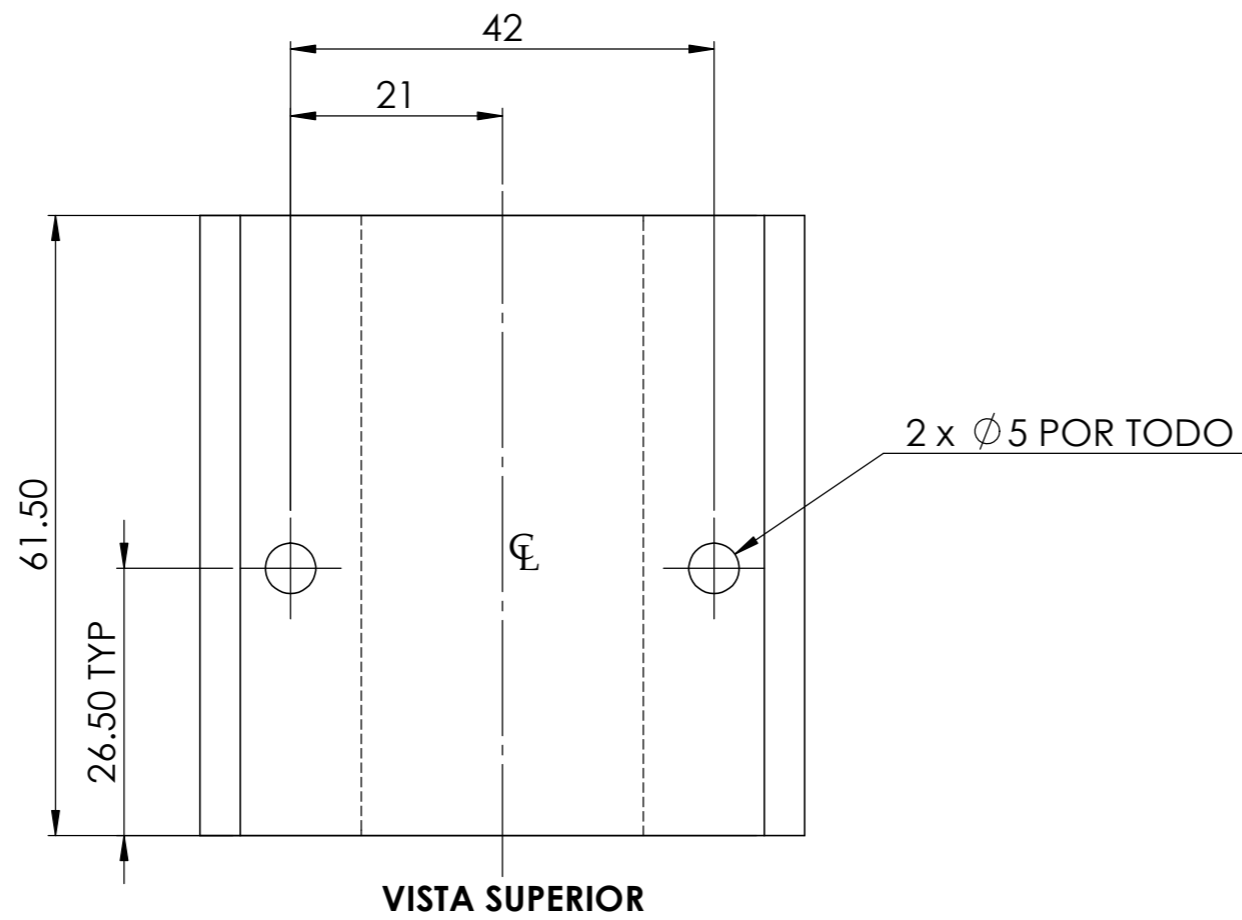


SECCIÓN C-C

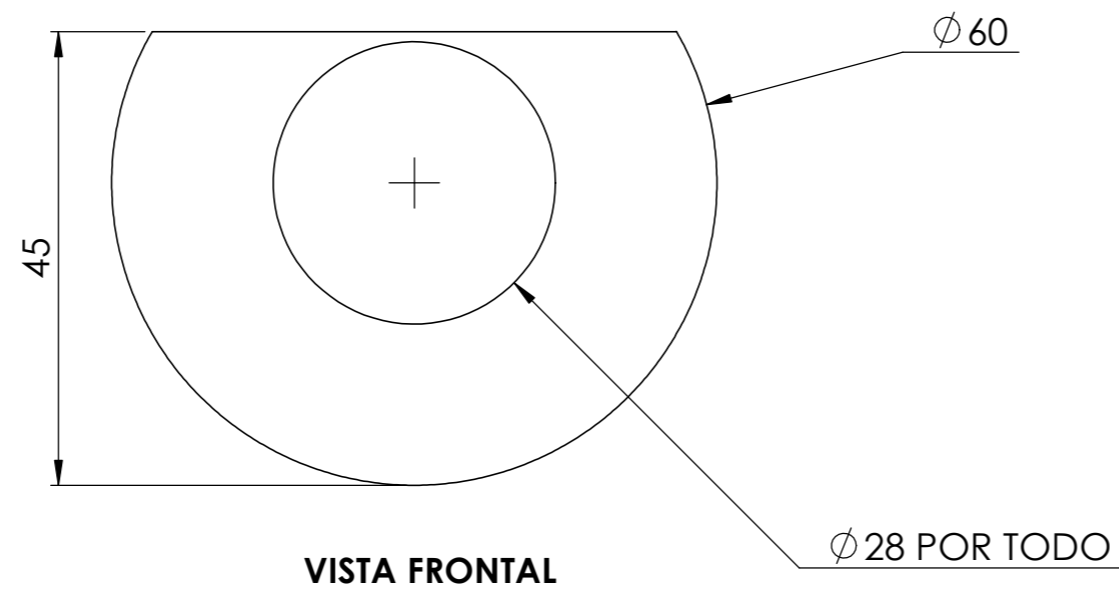
NOTA:  
A menos que se especifique lo contrario, todas las dimensiones están expresadas en milímetros.

<b>POSGRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA</b>		Designed: A. JARAMILLO	<b>Título:</b>  <b>ESPACIADOR DE ALUMINIO EJE X</b>	Formato A3	
Revisión: 0	Fecha de creación: 17/02/2013	Approved: H. MEDELLIN		Idioma E	
<b>Diseño y construcción de un sistema de manipulación X, Y, Z de propósito general</b>			<b>Doc. No.:</b> 015-003	Hoja 1/1	
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO					

Nylamid Blanco  
Barra redonda de 60mm



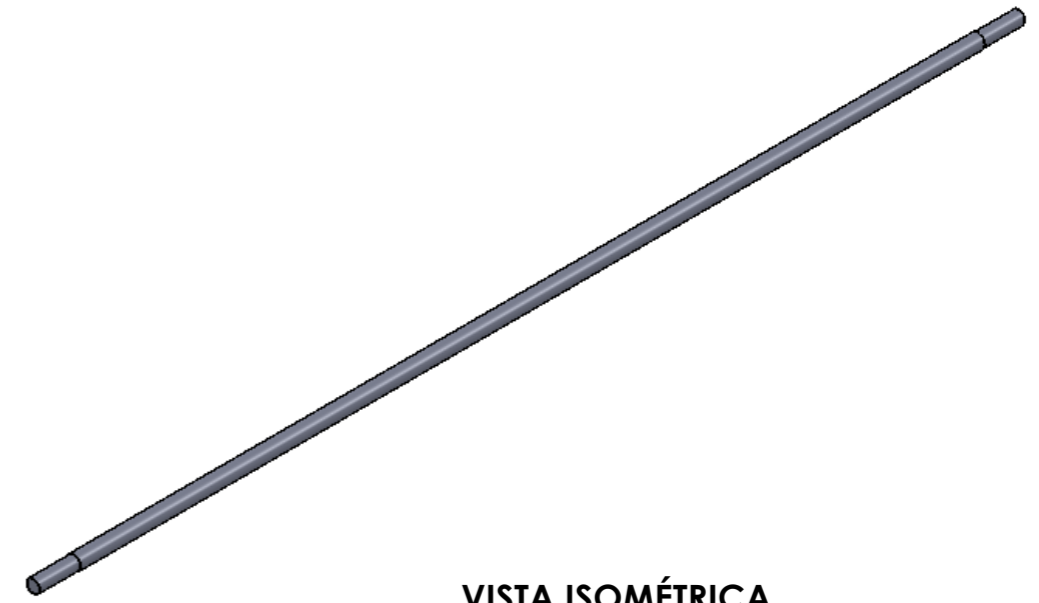
VISTA ISOMÉTRICA



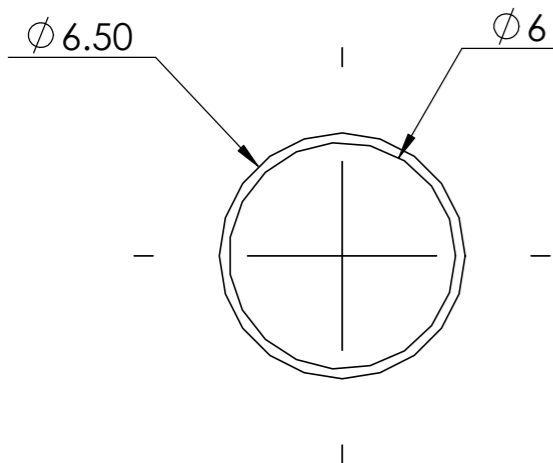
NOTA:  
A menos que se especifique lo contrario, todas las dimensiones están expresadas en milímetros.

POSGRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA		Diseñado por: A. JARAMILLO	Título:	Formato A3	
Revisión: 0	Fecha de creación: 18/02/2013	Aprobado por: H. MEDELLIN	SOPORTE DE NYLAMID PARA TUERCA DE BOLAS	Idioma E	
Diseño y construcción de un sistema de manipulación X, Y, Z de propósito general				Doc. No.: 034-001	
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO					

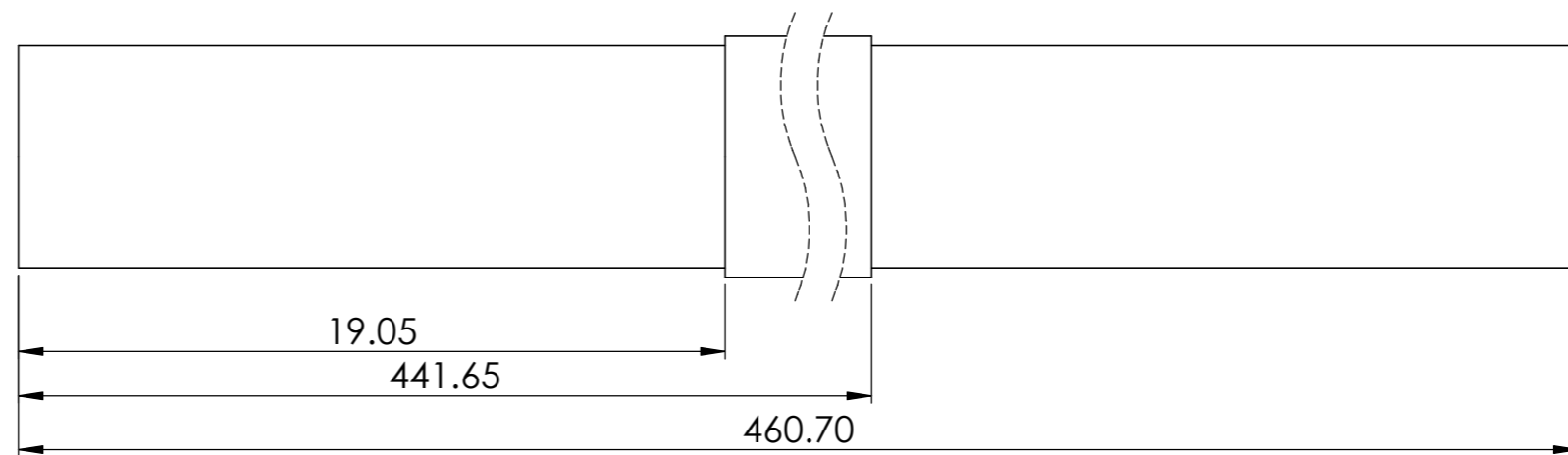
Aleación de Aluminio 6061  
Barra redonda de 7mm



VISTA ISOMÉTRICA



VISTA FRONTAL

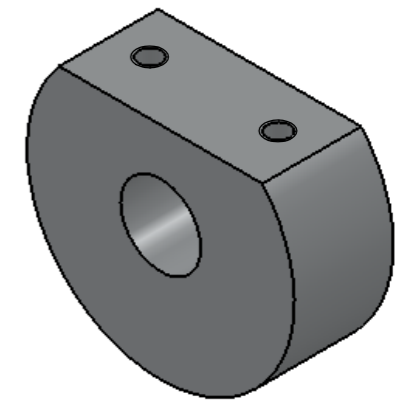
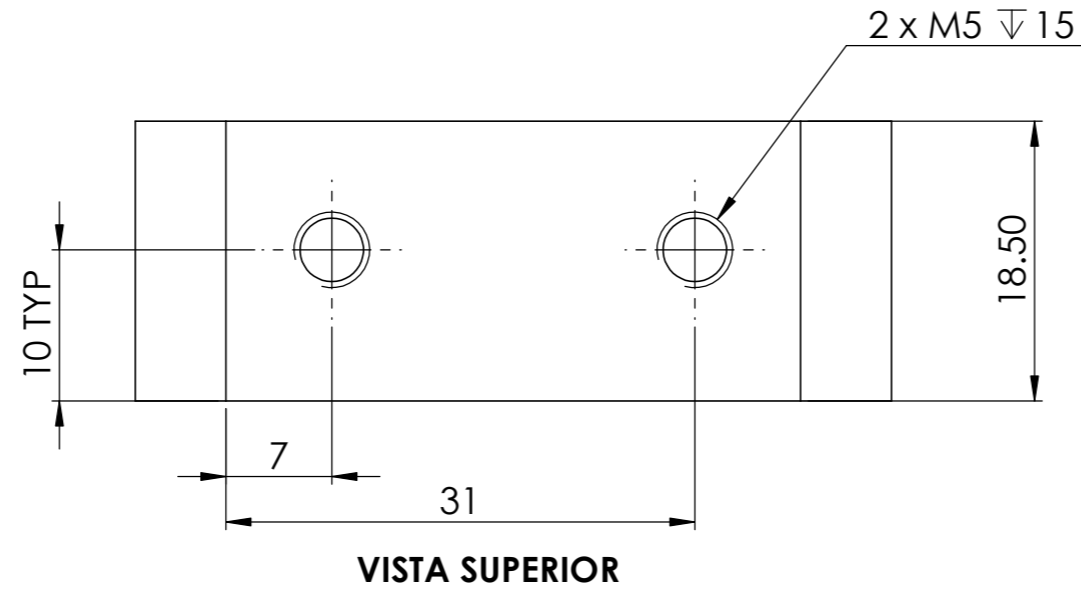


LATERAL DERECHA

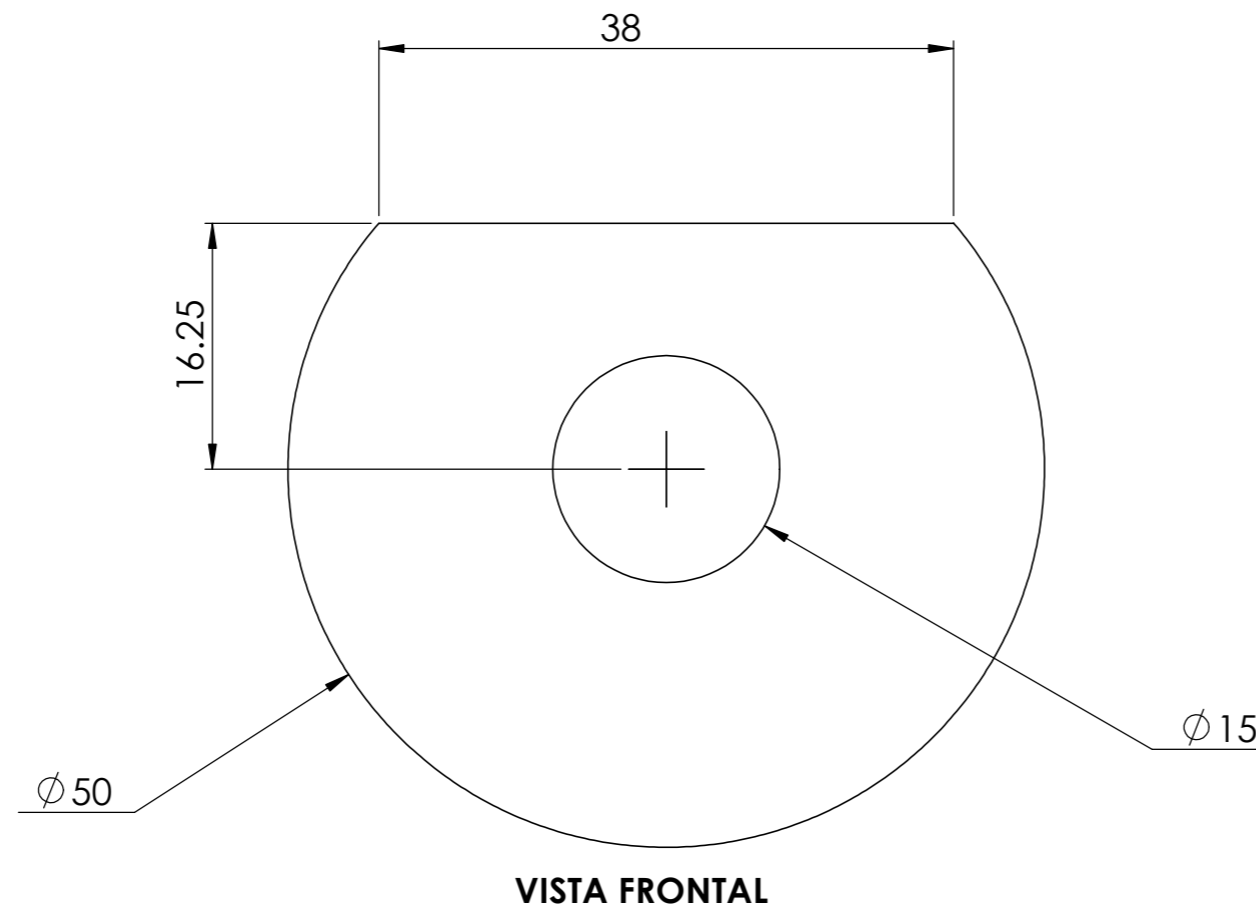
NOTA:  
A menos que se especifique lo contrario, todas las dimensiones están expresadas en milímetros.

POSGRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA		Diseñado por: A. JARAMILLO	Título:	Formato A3	
Revisión: 0	Fecha de creación: 03/03/2013	Aprobado por: H. MEDELLIN	SOPORTE PARA SENSORES EJE X	Idioma E	
Diseño y construcción de un sistema de manipulación X, Y, Z de propósito general				Doc. No.: 054-003	 Hoja 1/1
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO					

Aluminio 6061  
Barra redonda de 2"



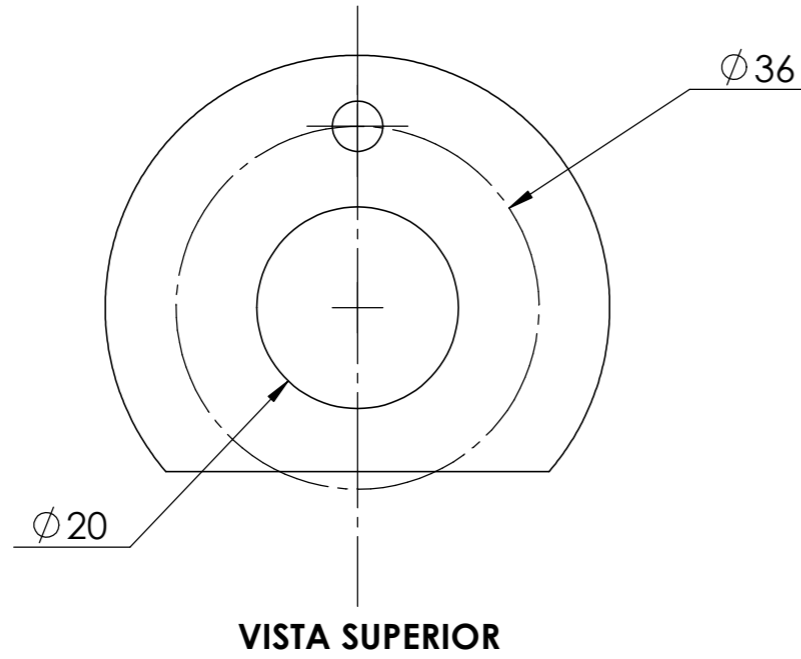
VISTA ISOMÉTRICA



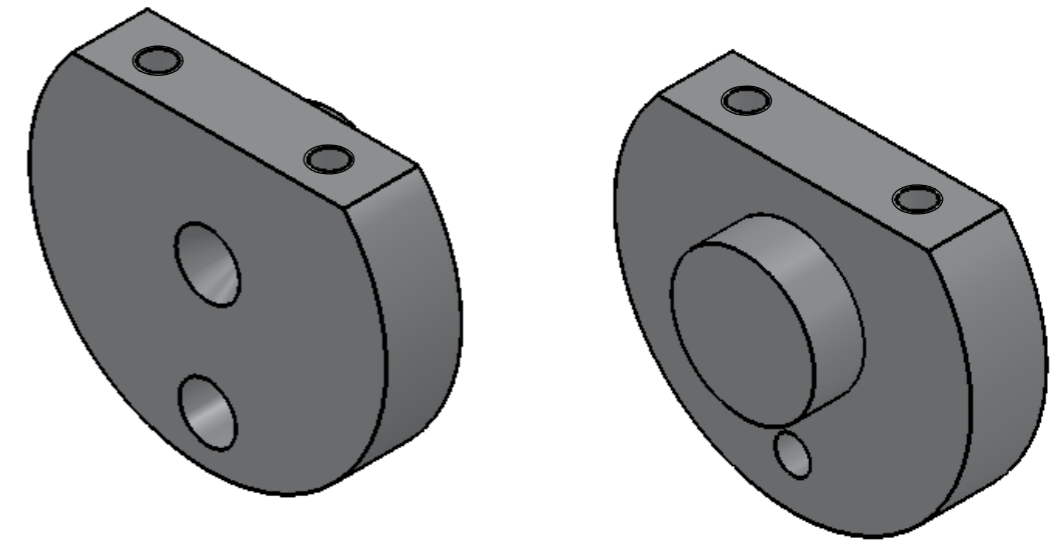
NOTA:  
A menos que se especifique lo contrario, todas las dimensiones están expresadas en milímetros.

POSGRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA		Diseñado por: A. JARAMILLO	Título:	Formato A3	
Revisión: 0	Fecha de creación: 17/02/2013	Aprobado por: H. MEDELLIN	SOPORTE INFERIOR CABEZAL EJE X	Idioma E	
Diseño y construcción de un sistema de manipulación X, Y, Z de propósito general				Doc. No.: 055-001	Hoja 1/1
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO					

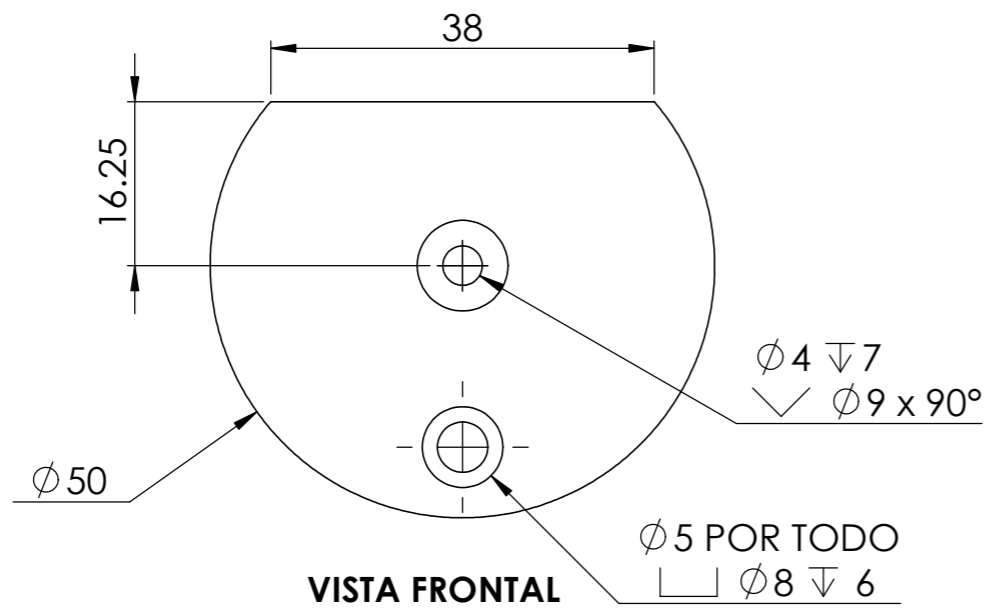
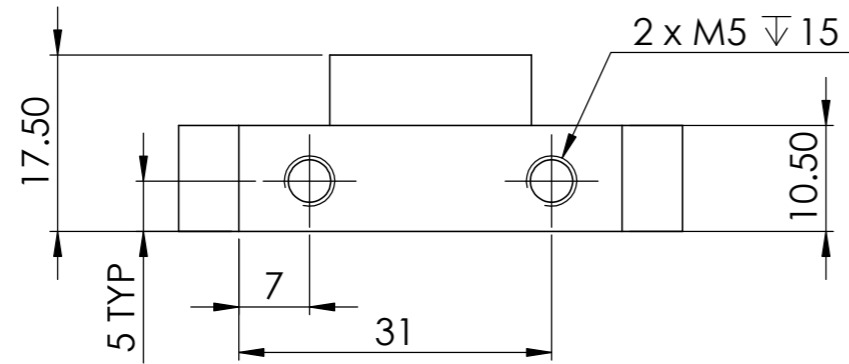
Aluminio 6061  
Barra redonda de 2"



VISTA SUPERIOR



VISTA ISOMÉTRICA



VISTA FRONTAL

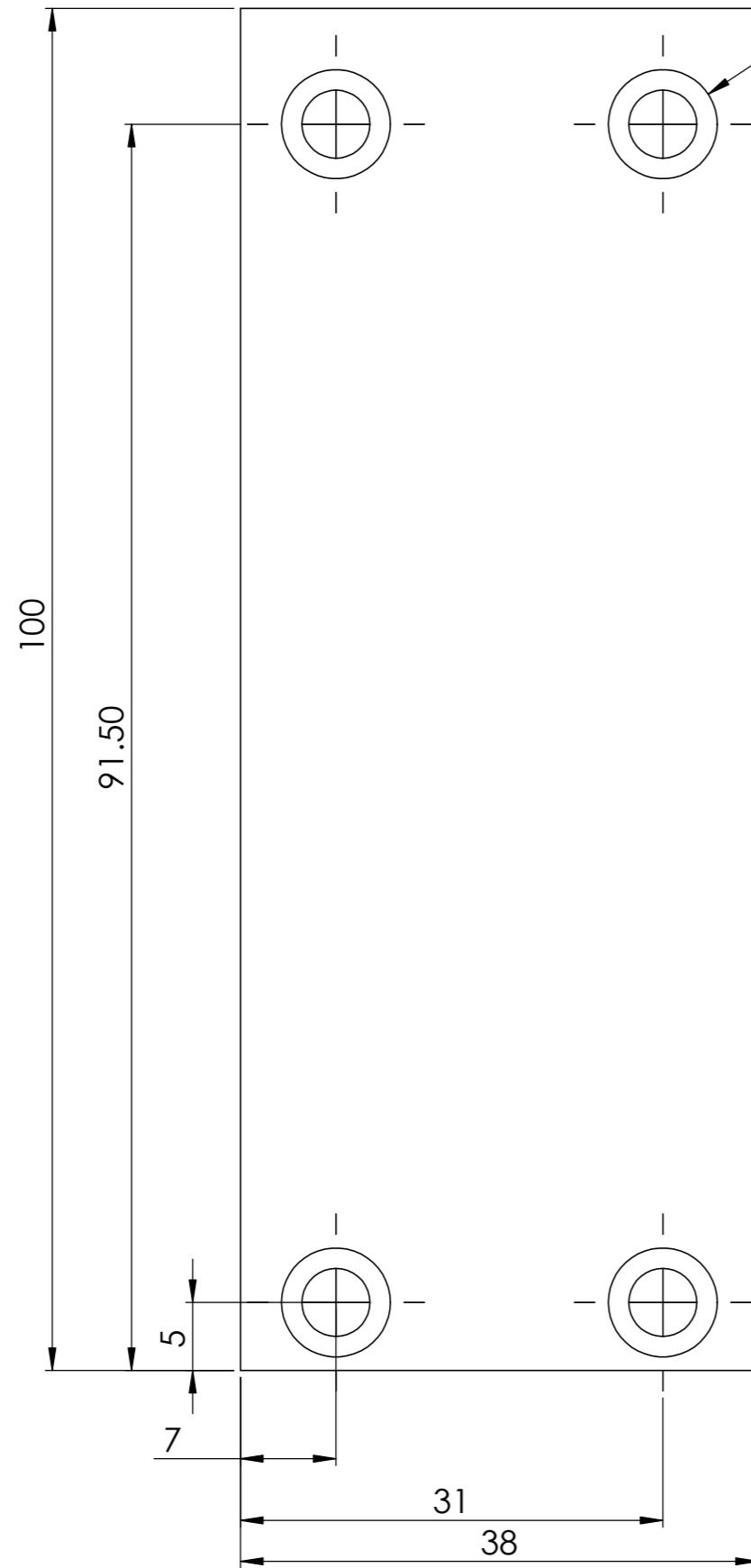
NOTA:  
A menos que se especifique lo contrario, todas las dimensiones están expresadas en milímetros.

POSGRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA		Diseñado por: A. JARAMILLO	Título:	Formato A3	
Revisión: 0	Fecha de creación: 17/02/2013	Aprobado por: H. MEDELLIN	<b>SOPORTE SUPERIOR CABEZAL EJE X</b>	Idioma E	
Diseño y construcción de un sistema de manipulación X, Y, Z de propósito general			Doc. No.:	055-002	Hoja 1/1
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO					

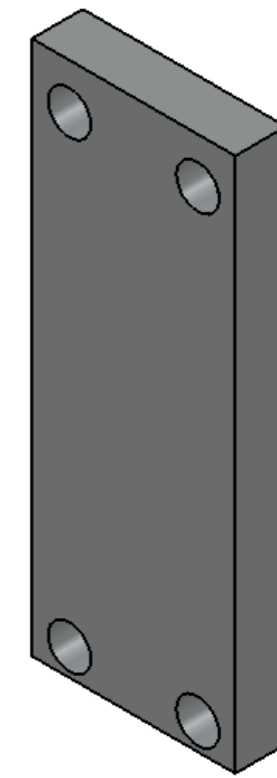


Aleación de Aluminio 6061  
Solera: 1.5" x 0.375"

4 X Ø5 POR TODO  
□ Ø8 ∇ 6






VISTA FRONTAL

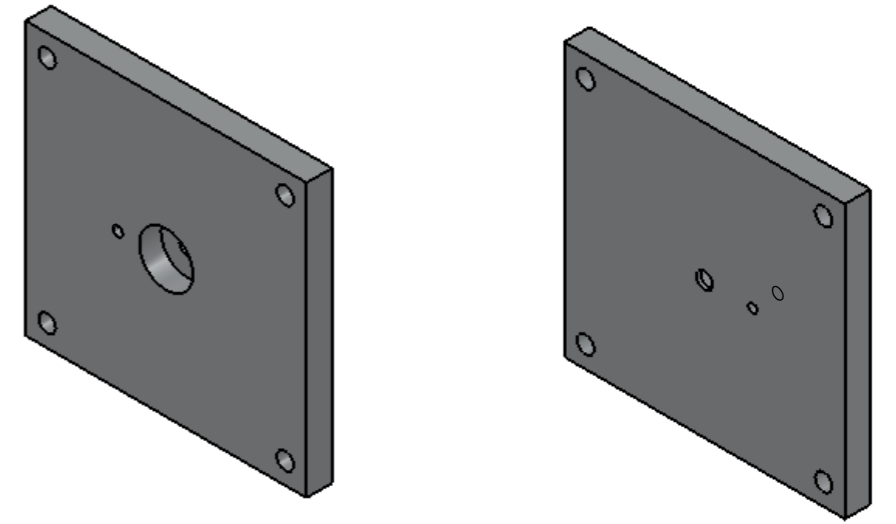


VISTA ISOMÉTRICA

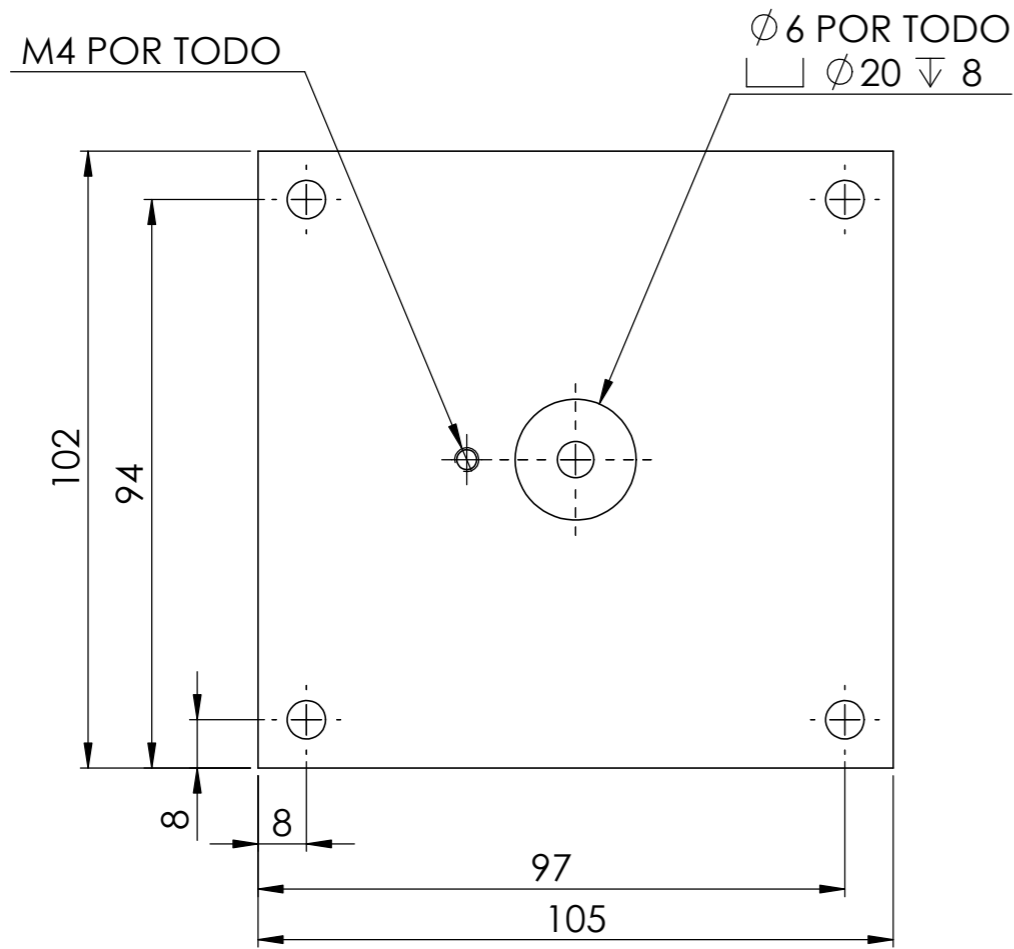
NOTA:  
A menos que se especifique lo contrario, todas las dimensiones están expresadas en milímetros.

<b>POSGRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA</b>		Diseñado por: A. JARAMILLO	Título: <b>SOPORTE TRANSVERSAL          CABEZAL EJE X</b>	Formato A3	
Revisión: 0	Fecha de creación: 18/02/2013	Aprobado por: H. MEDELLIN	Doc. No.: 056-001	Idioma E	
Diseño y construcción de un sistema de manipulación X, Y, Z de propósito general					Hoja 1/1
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO					

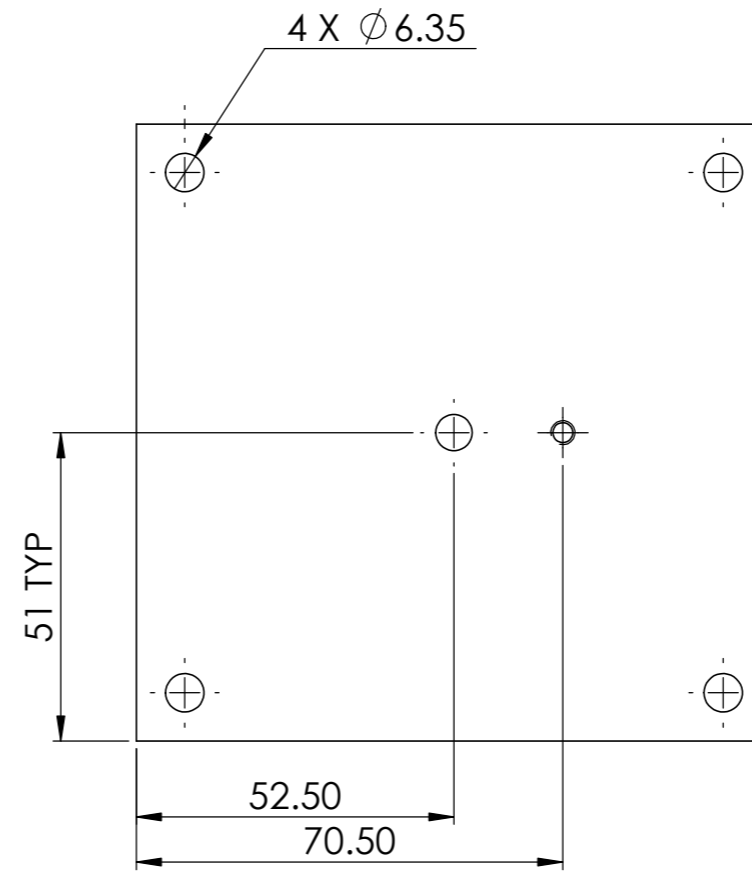
Aleación de Aluminio 6061  
Solera: 2.5" x 0.75"



VISTA ISOMÉTRICA



VISTA FRONTAL

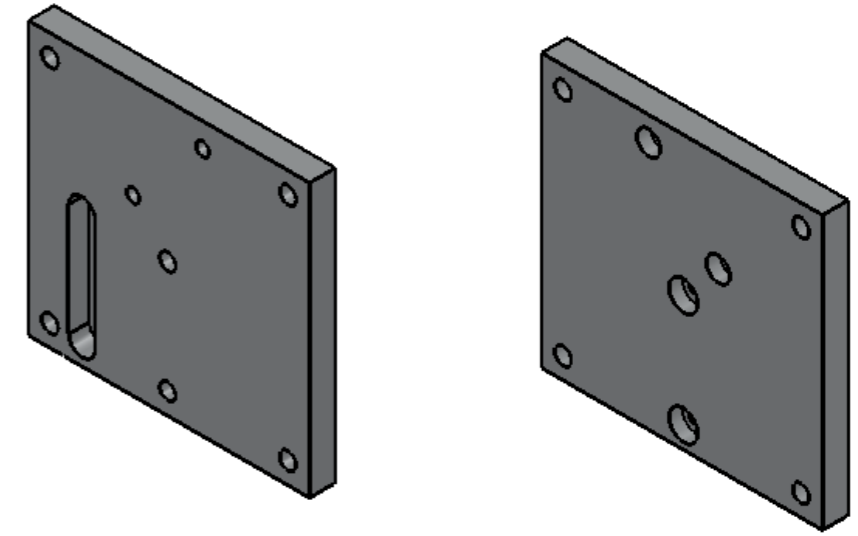


VISTA POSTERIOR

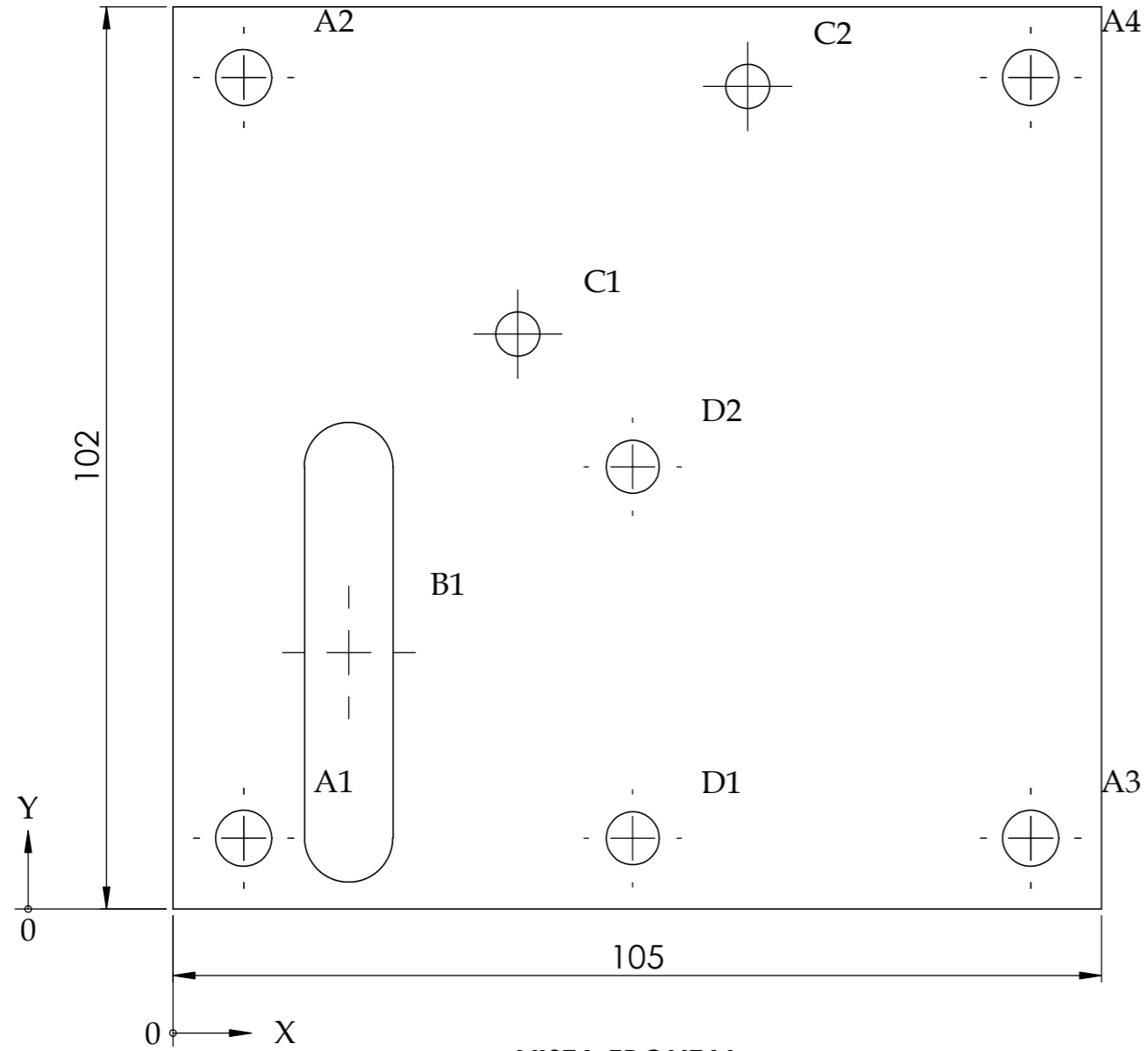
NOTA:  
A menos que se especifique lo contrario, todas las dimensiones están expresadas en milímetros.

POSGRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA		Diseñado por: A. JARAMILLO	Título:	Formato A3	
Revisión: 0	Fecha de creación: 17/02/2013	Aprobado por: H. MEDELLIN	PLACA INFERIOR EJE X	Idioma E	
Diseño y construcción de un sistema de manipulación X, Y, Z de propósito general			Doc. No.:	057-001	Hoja 1/1
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO					

Aleación de Aluminio 6061  
Solera: 4" x 3/8"





VISTA ISOMÉTRICA



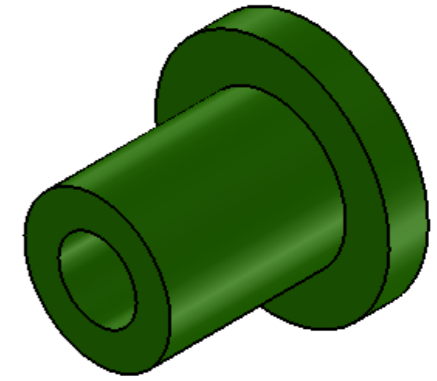
VISTA FRONTAL

RÓTULO	UBIC X	UBIC Y	TAMAÑO
A1	8	8	Ø 6.35 POR TODO
A2	8	94	Ø 6.35 POR TODO
A3	97	8	Ø 6.35 POR TODO
A4	97	94	Ø 6.35 POR TODO
B1	19.90	8	└ 10 X 52 ▽ 7.7
C1	39	65	Ø 5 POR TODO └ Ø 9 ▽ 5
C2	65	93	Ø 5 POR TODO └ Ø 9 ▽ 5
D1	52	8	Ø 6 POR TODO └ Ø 11 ▽ 5
D2	52	50	Ø 6 POR TODO └ Ø 11 ▽ 5

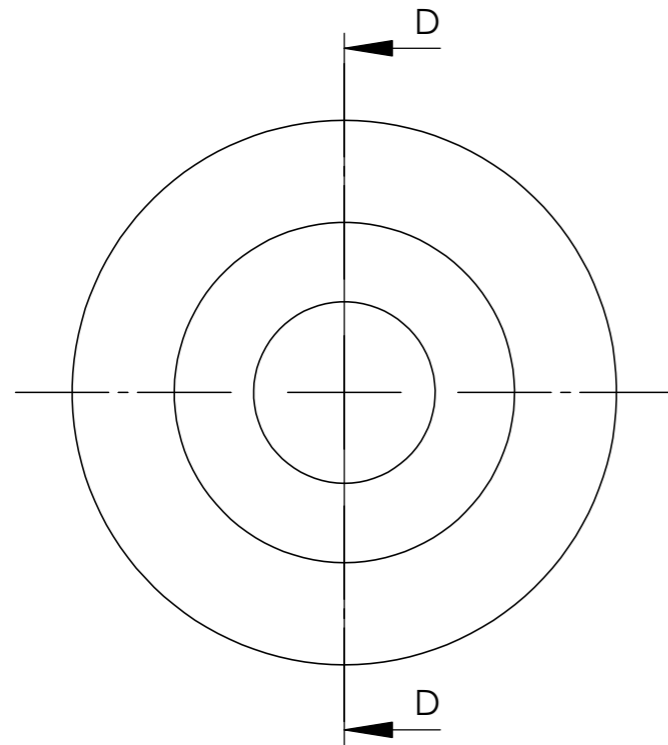
<b>POSGRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA</b> Revisión: 0    Fecha de creación: 09/06/2013		Diseñado por: <b>A. JARAMILLO</b> Aprobado por: <b>H. MEDELLIN</b>	Título: <b>PLACA SUPERIOR EJE X</b>	Formato: <b>A3</b> Idioma: <b>E</b>	 Hoja 1/1
<b>Diseño y construcción de un sistema de manipulación X, Y, Z de propósito general</b>		Doc. No.: 057-002			

NOTA:  
A menos que se especifique lo contrario, todas las dimensiones están expresadas en milímetros.

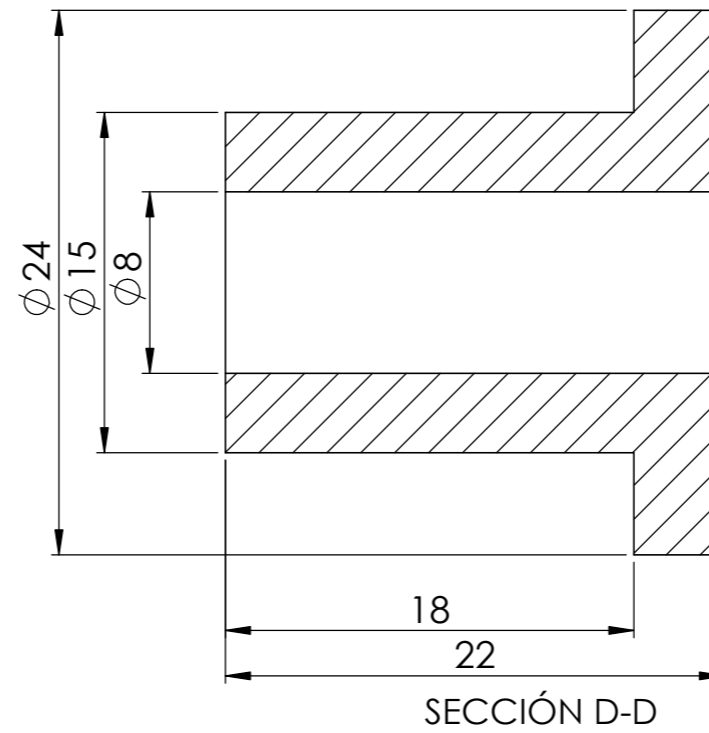
Nylamid verde  
Barra redonda de 1"



VISTA ISOMÉTRICA






VISTA FRONTAL

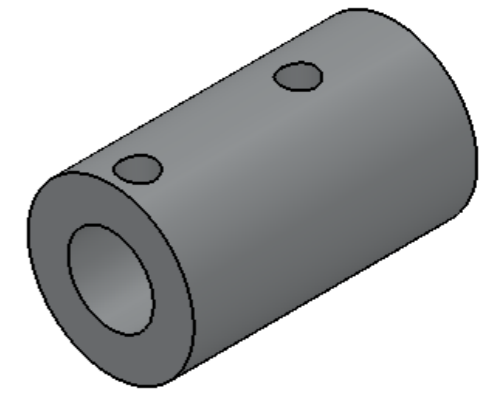
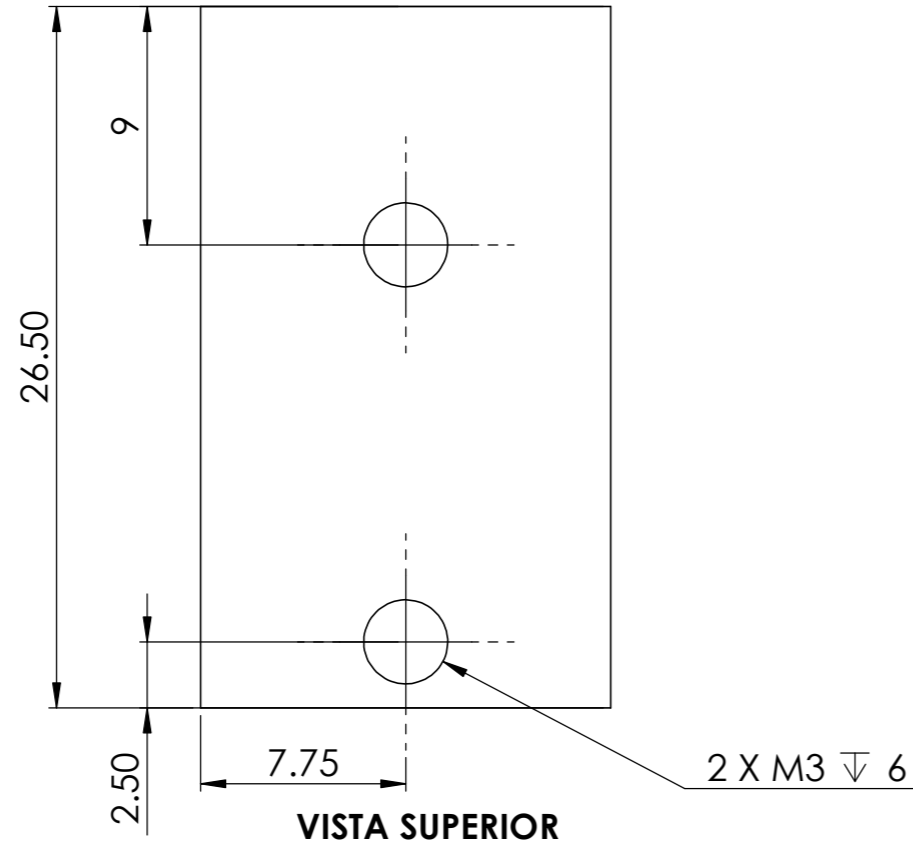


SECCIÓN D-D

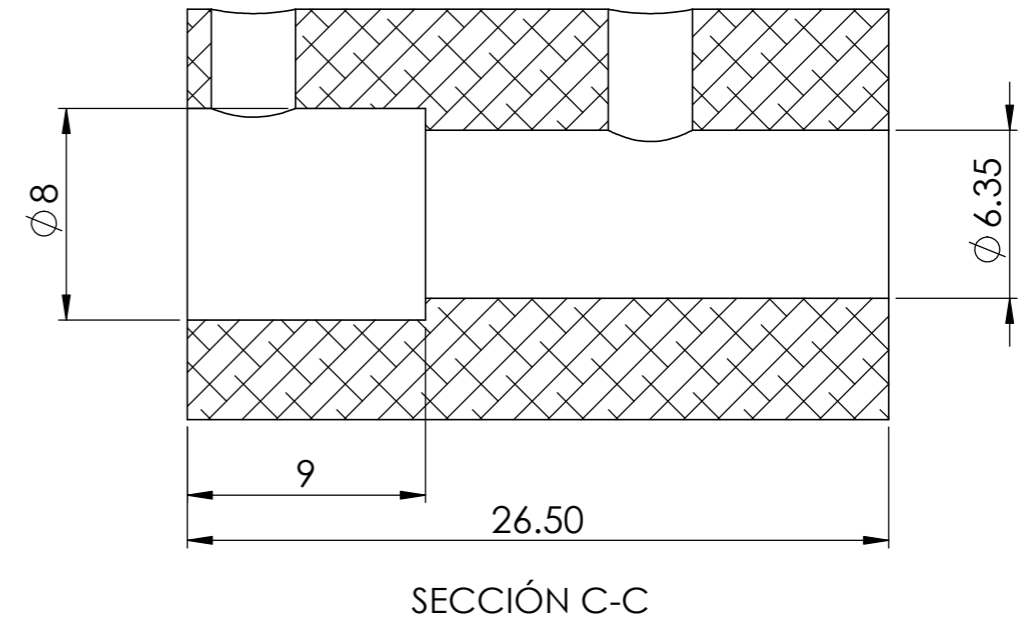
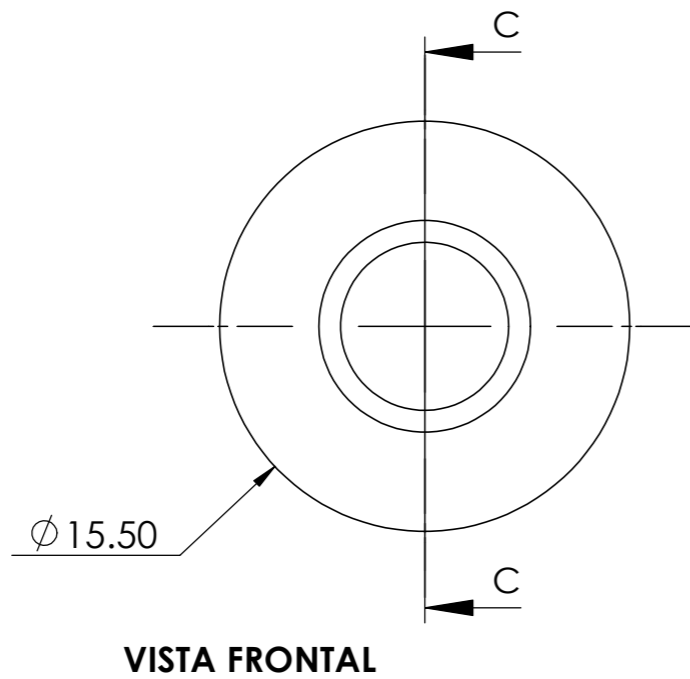
NOTA:  
A menos que se especifique lo contrario, todas las dimensiones están expresadas en milímetros.

<b>POSGRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA</b>		Diseñado por: A. JARAMILLO	Título:  <b>ACOPLADOR DE NYLAMID PARA CABEZAL</b>	Formato A3	
Revisión: 0	Fecha de creación: 18/02/2013	Aprobado por: H. MEDELLIN		Idioma E	
Diseño y construcción de un sistema de manipulación X, Y, Z de propósito general			Doc. No.: 058-001	Hoja 1/1	
					

**Acación deAluminio 6061  
Barra redonda de 16mm**

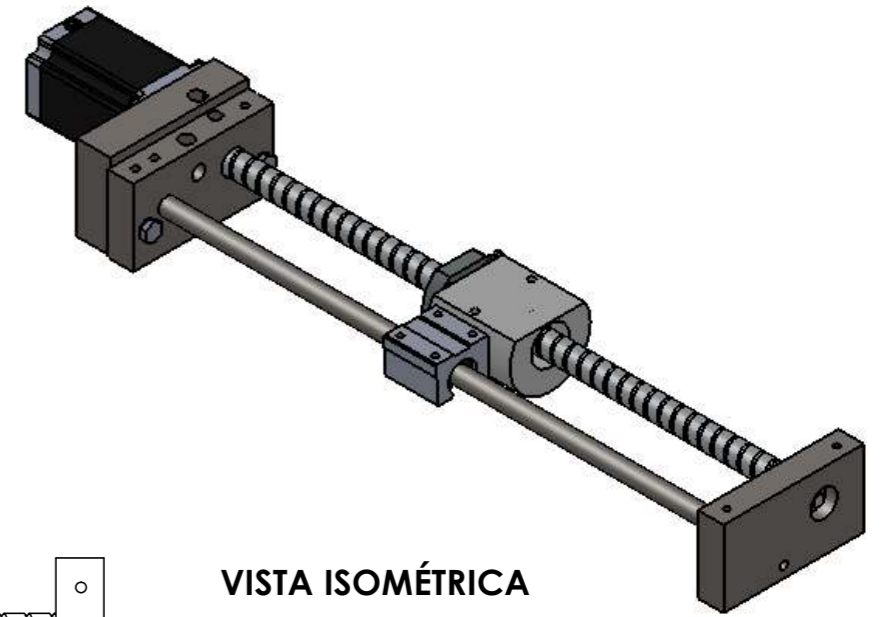


**VISTA ISOMÉTRICA**

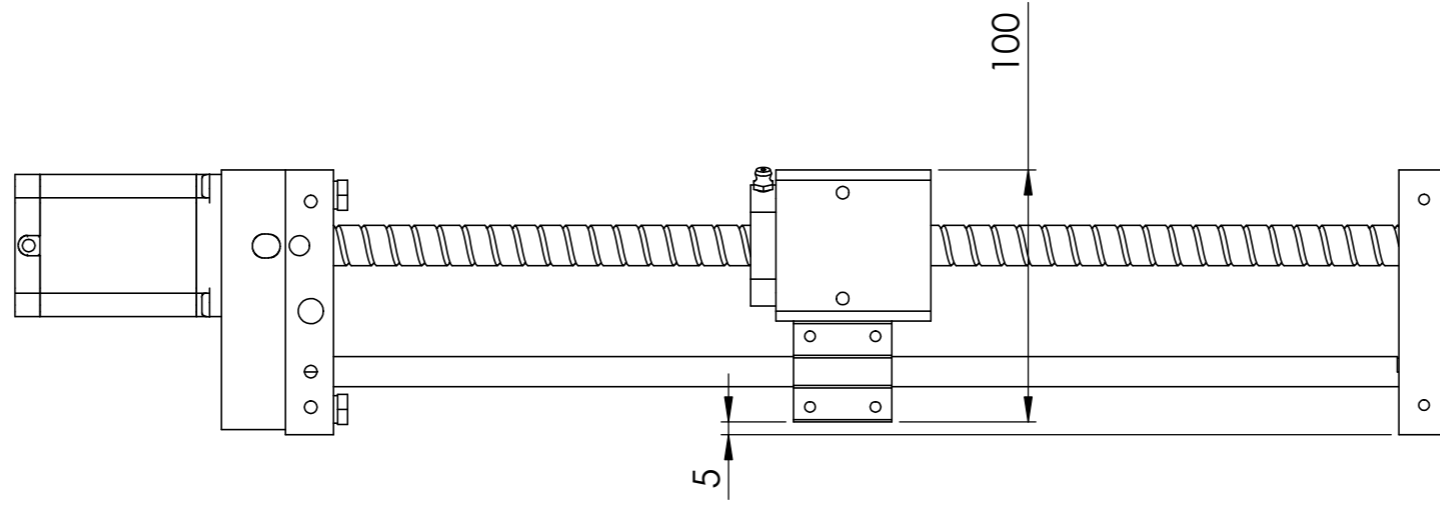


**NOTA:**  
A menos que se especifique lo contrario, todas las dimensiones están expresadas en milímetros.

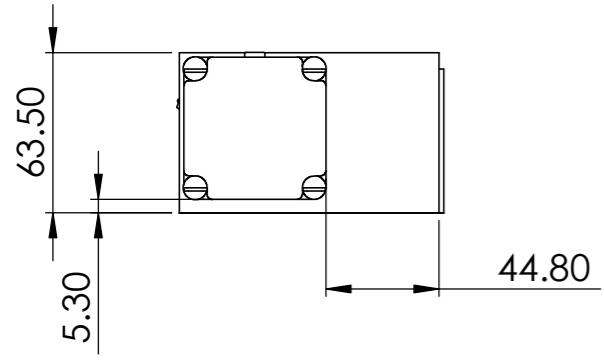
<b>POSGRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA</b>		Diseñado por: A. JARAMILLO	Título:	Formato A3	
Revisión: 0	Fecha de creación: 03/06/2013	Aprobado por: H. MEDELLIN	<b>BUJE DE ACOPLAMIENTO EJE X</b>	Idioma E	
Diseño y construcción de un sistema de manipulación X, Y, Z de propósito general				Doc. No.: 059-001	
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO					



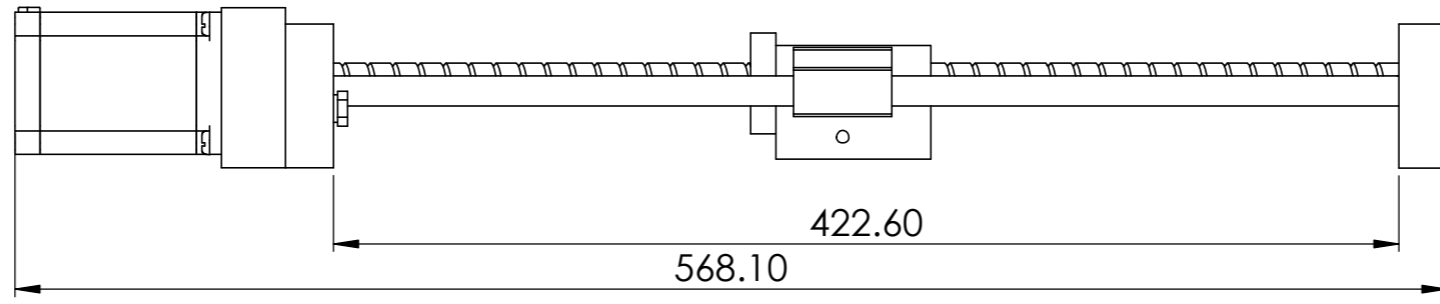
VISTA ISOMÉTRICA



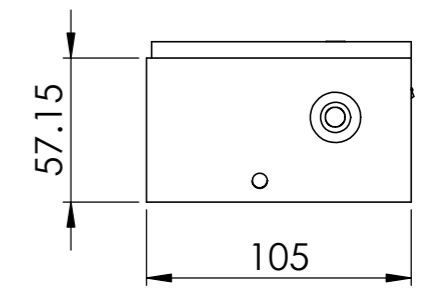
VISTA SUPERIOR



VISTA LATERAL IZQUIERDA



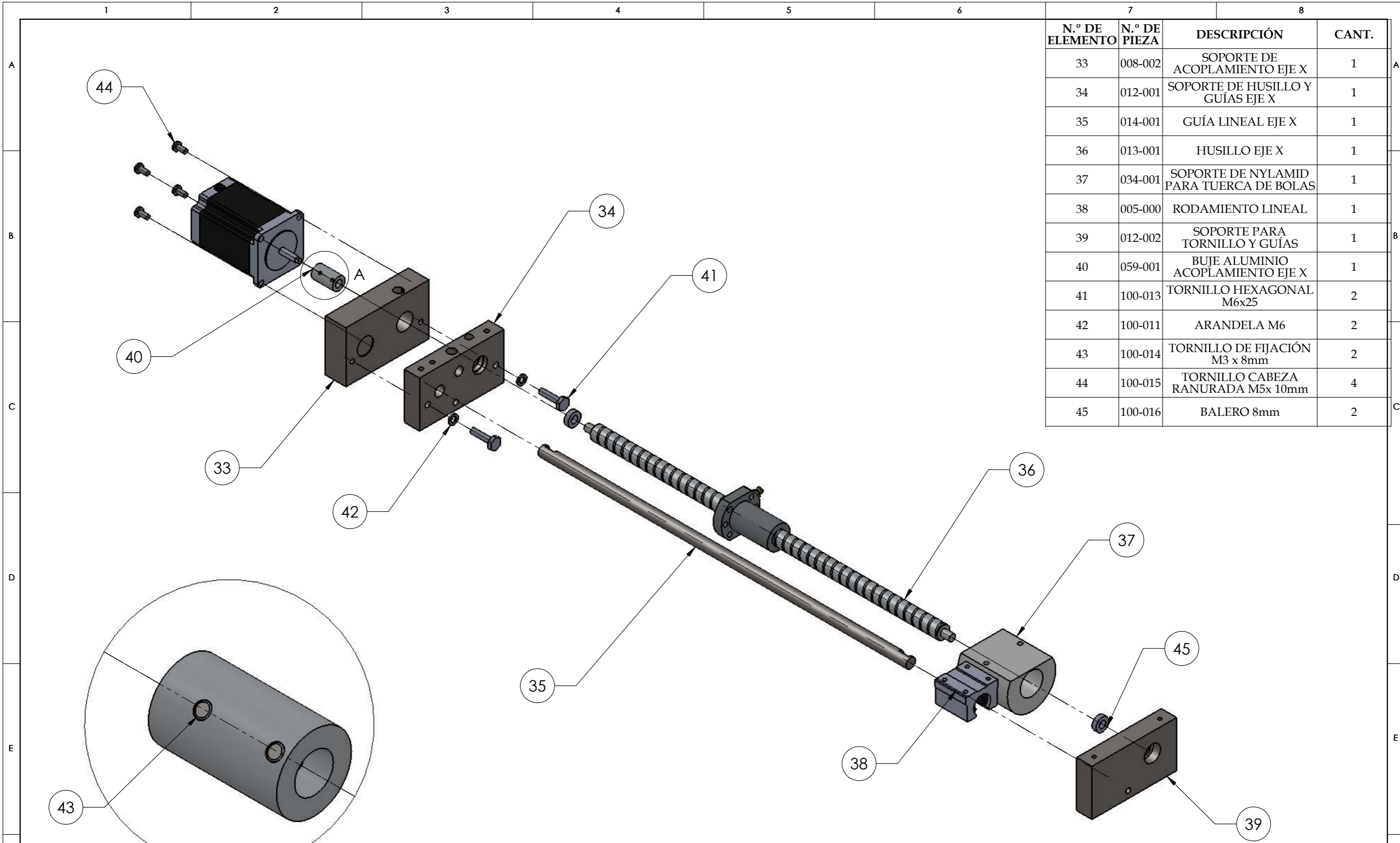
VISTA FRONTAL



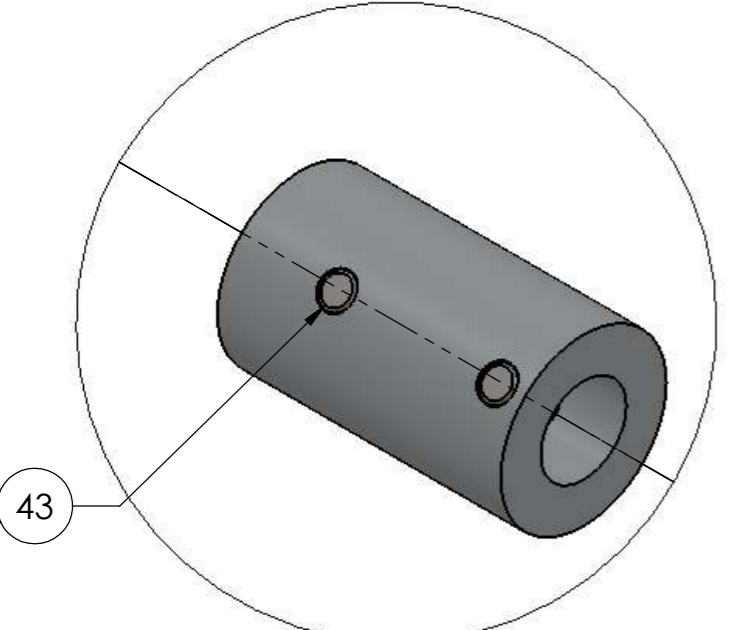
LATERAL DERECHA

**NOTA:**  
 A menos que se especifique lo contrario, todas las dimensiones están expresadas en milímetros.  
 A fin de evitar errores durante el funcionamiento del manipulador, se deben respetar tolerancias dimensionales para el ensamble de los componentes de  $\pm 0.25\text{mm}$

<b>POSGRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA</b>		Diseñado por: A. JARAMILLO	Título: SOPORTE EJE X	Formato: A3	
Revisión: 0	Fecha de creación: 10/06/2013	Aprobado por: H. MEDELLIN	Doc. No.: 001-010	Idioma: E	
Diseño y construcción de un sistema de manipulación X, Y, Z de propósito general					Hoja: 1/2
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO					



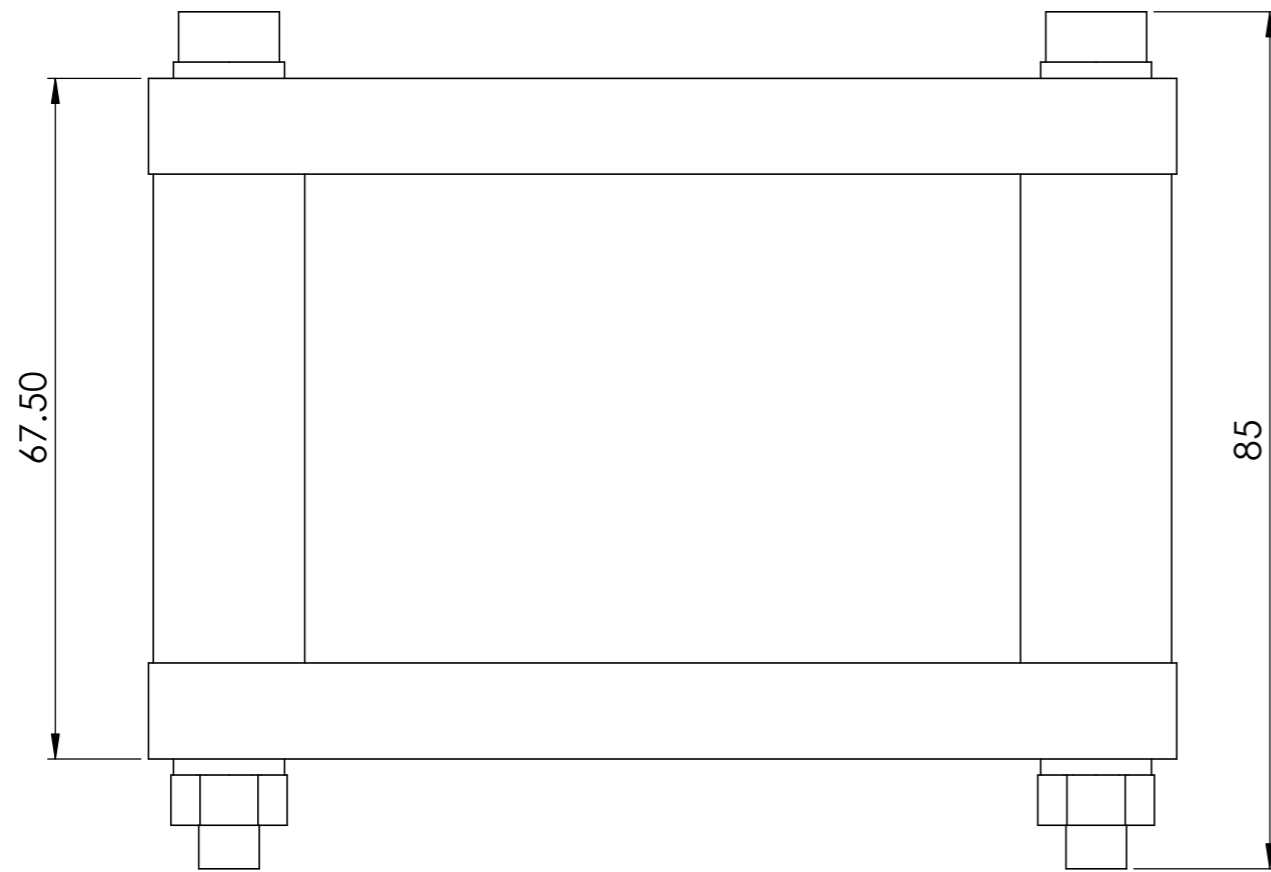
7		8	
N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANT.
33	008-002	SOPORTE DE ACOPLAMIENTO EJE X	1
34	012-001	SOPORTE DE HUSILLO Y GUÍAS EJE X	1
35	014-001	GUÍA LINEAL EJE X	1
36	013-001	HUSILLO EJE X	1
37	034-001	SOPORTE DE NYLAMID PARA TUERCA DE BOLAS	1
38	005-000	RODAMIENTO LINEAL	1
39	012-002	SOPORTE PARA TORNILLO Y GUÍAS	1
40	059-001	BUJE ALUMINIO ACOPLAMIENTO EJE X	1
41	100-013	TORNILLO HEXAGONAL M6x25	2
42	100-011	ARANDELA M6	2
43	100-014	TORNILLO DE FIJACIÓN M3 x 8mm	2
44	100-015	TORNILLO CABEZA RANURADA M5x 10mm	4
45	100-016	BALERO 8mm	2



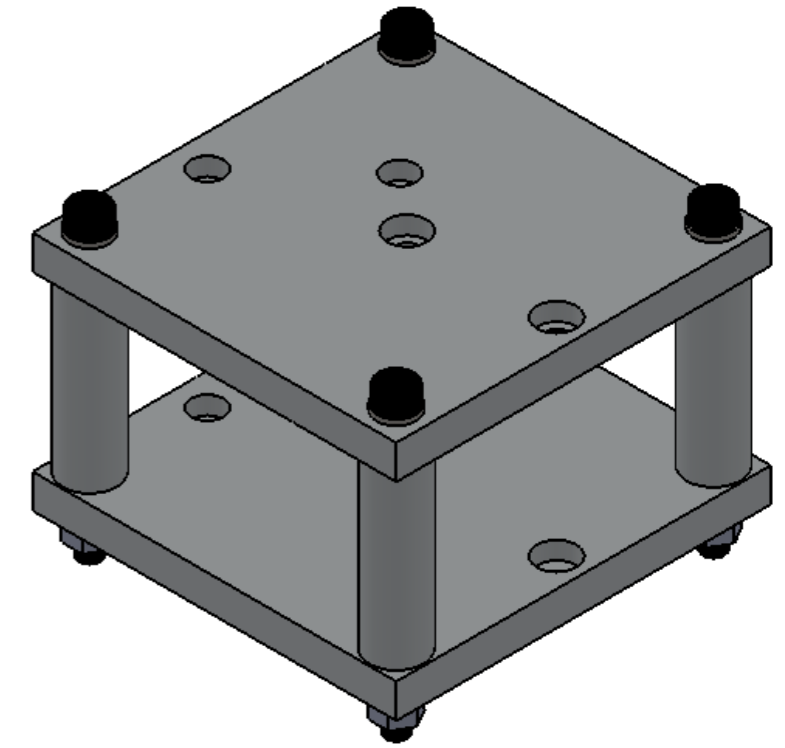
DETALLE A  
ESCALA 2 : 1

**NOTA:**  
A menos que se especifique lo contrario, todas las dimensiones están expresadas en milímetros.  
A fin de evitar errores durante el funcionamiento del manipulador, se deben respetar tolerancias dimensionales para el ensamble de los componentes de  $\pm 0.25\text{mm}$

<b>POSGRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA</b> Revisión: 0    Fecha de creación: 10/06/2013		Diseñado por: A. JARAMILLO Aprobado por: H. MEDELLIN	Título:  <b>SOPORTE EJE X</b>	Formato A3 Idioma E	
<b>Diseño y construcción de un sistema de manipulación X, Y, Z de propósito general</b>			Doc. No.: 001-010	Hoja 2/2	
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO					



VISTA FRONTAL



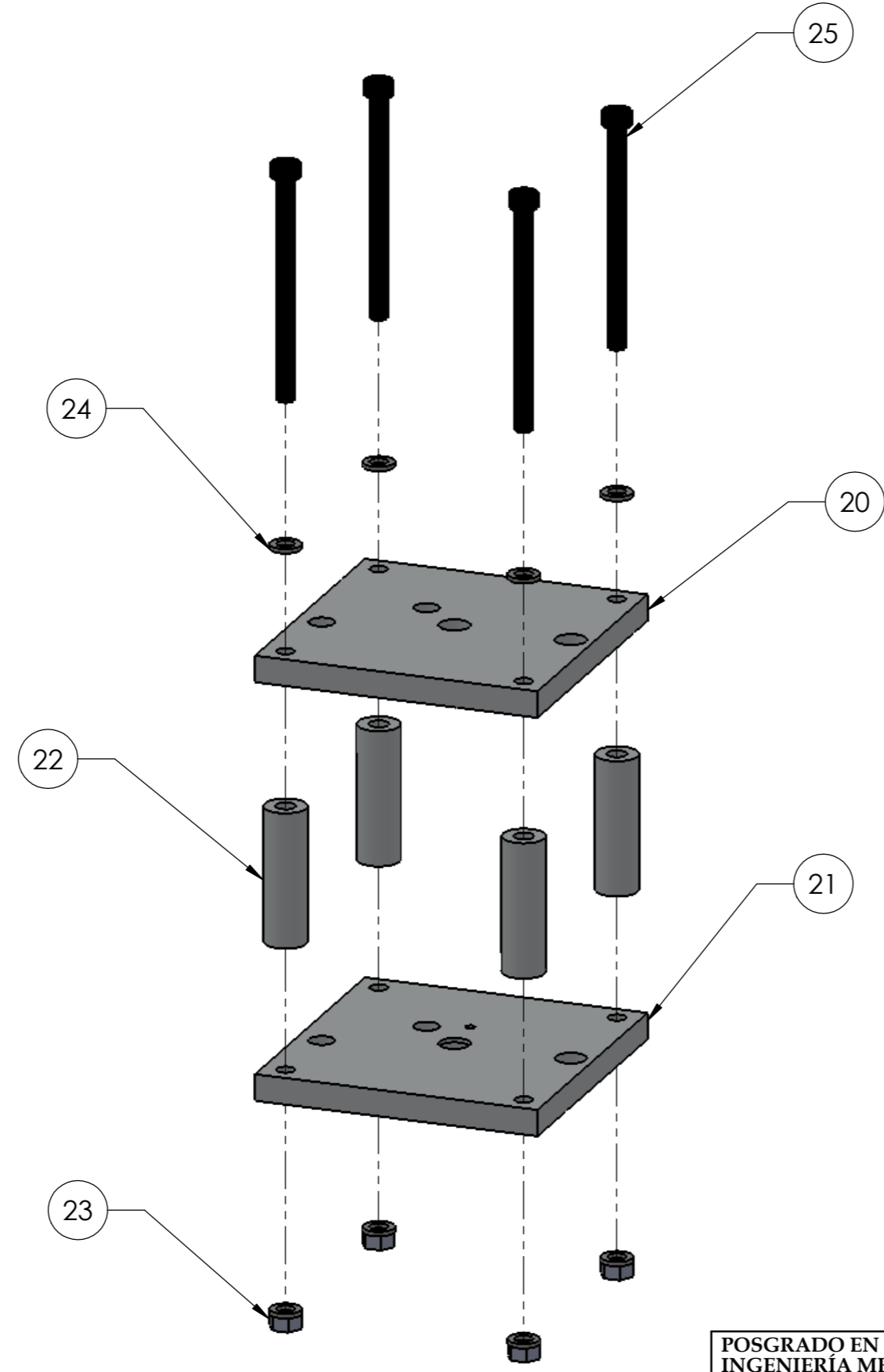
VISTA ISOMÉTRICA

**NOTA:**  
 A menos que se especifique lo contrario, todas las dimensiones están expresadas en milímetros.  
 A fin de evitar errores durante el funcionamiento del manipulador, se deben respetar tolerancias dimensionales para el ensamble de los componentes de  $\pm 0.25\text{mm}$


<b>POSGRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA</b>		Diseñado por: A. JARAMILLO	Título:	Formato A3	
Revisión: 0	Fecha de creación: 29/06/2013	Aprobado por: H. MEDELLIN	TRANSPORTE EJE X	Idioma E	
Diseño y construcción de un sistema de manipulación X, Y, Z de propósito general			Doc. No.:	001-012	Hoja 1/2
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO					

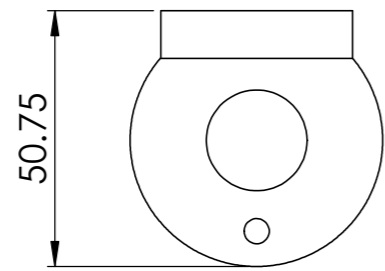


7		8	
N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANT.
20	057-002	PLACA SUPERIOR EJE X	1
21	057-001	PLACA INFERIOR EJE X	1
22	015-003	ESPACIADOR DE ALUMINIO EJE X	4
23	100-010	TUERCA M6	4
24	100-011	ARANDELA M6	8
25	100-009	TORNILLO ALLEN M6x80	4

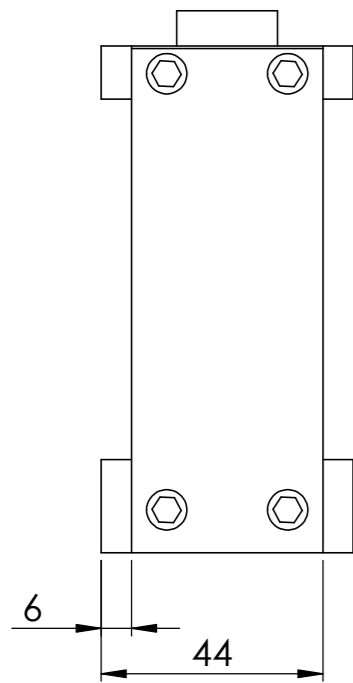


**NOTA:**  
 A menos que se especifique lo contrario, todas las dimensiones están expresadas en milímetros.  
 A fin de evitar errores durante el funcionamiento del manipulador, se deben respetar tolerancias dimensionales para el ensamble de los componentes de  $\pm 0.25\text{mm}$

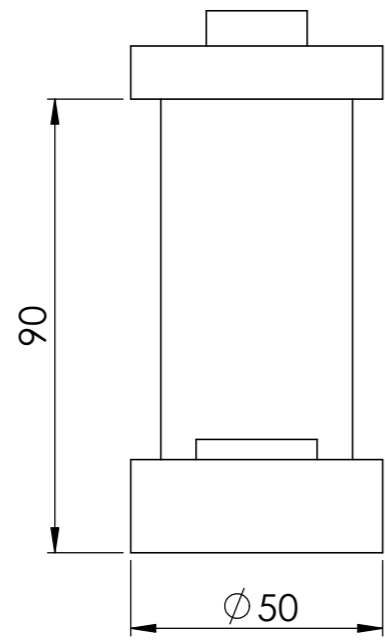
<b>POSGRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA</b> Revisión: 0    Fecha de creación: 29/06/2013		Diseñado por: <b>A. JARAMILLO</b> Aprobado por: <b>H. MEDELLIN</b>	Título: <b>TRANSPORTE EJE X</b>	Formato A3 Idioma E	 Hoja 2/2
<b>Diseño y construcción de un sistema de manipulación X, Y, Z de propósito general</b> 			Doc. No.: 001-012		



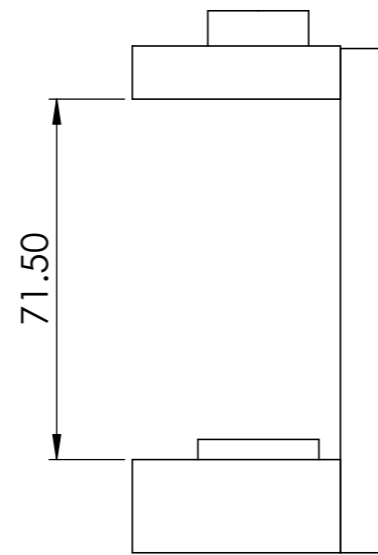
VISTA SUPERIOR



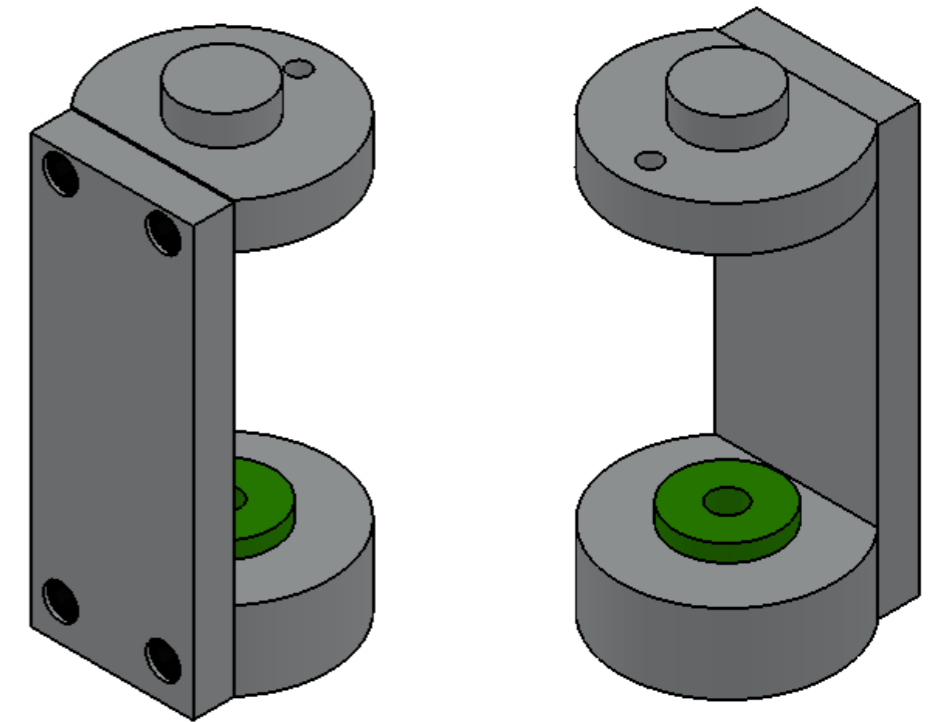
VISTA POSTERIOR



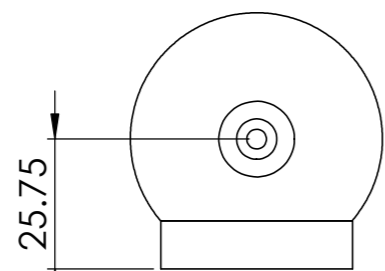
VISTA FRONTAL



LATERAL DERECHA





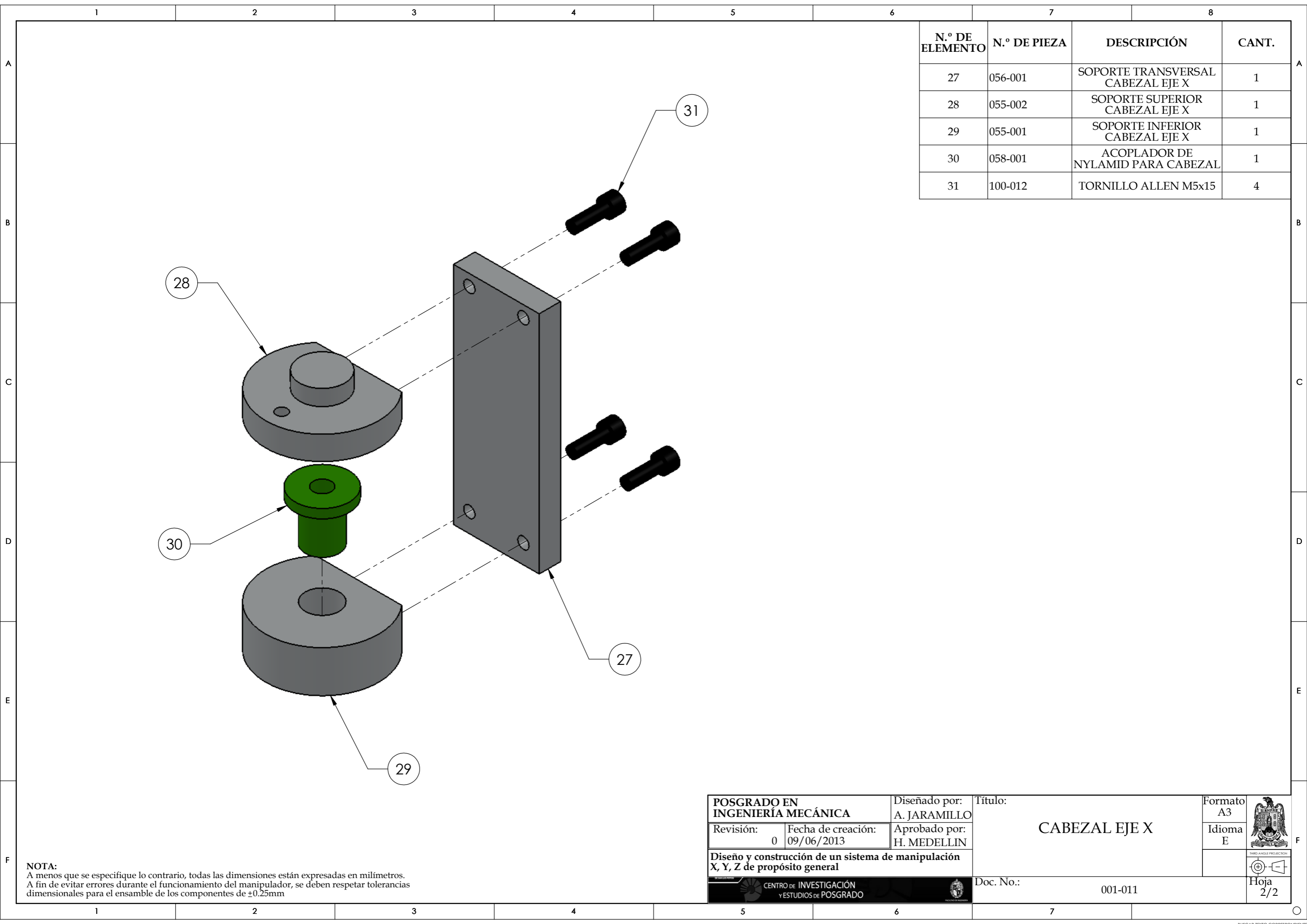
VISTA ISOMÉTRICA



VISTA INFERIOR




**NOTA:**  
 A menos que se especifique lo contrario, todas las dimensiones están expresadas en milímetros.  
 A fin de evitar errores durante el funcionamiento del manipulador, se deben respetar tolerancias dimensionales para el ensamble de los componentes de  $\pm 0.25\text{mm}$

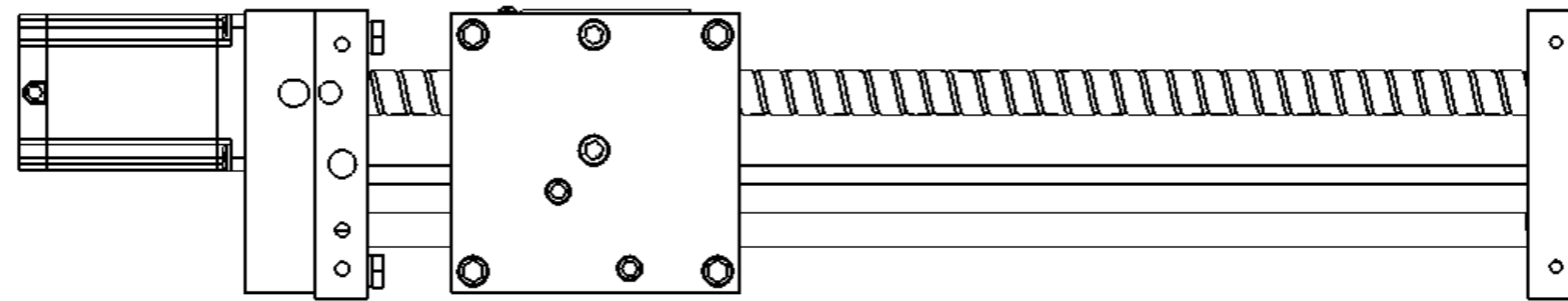
<b>POSGRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA</b>		Diseñado por: A. JARAMILLO	Título:	Formato A3	
Revisión: 0	Fecha de creación: 09/06/2013	Aprobado por: H. MEDELLIN	<b>CABEZAL EJE X</b>	Idioma E	
<b>Diseño y construcción de un sistema de manipulación X, Y, Z de propósito general</b>			Doc. No.:	Hoja 1/2	
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO			001-011		



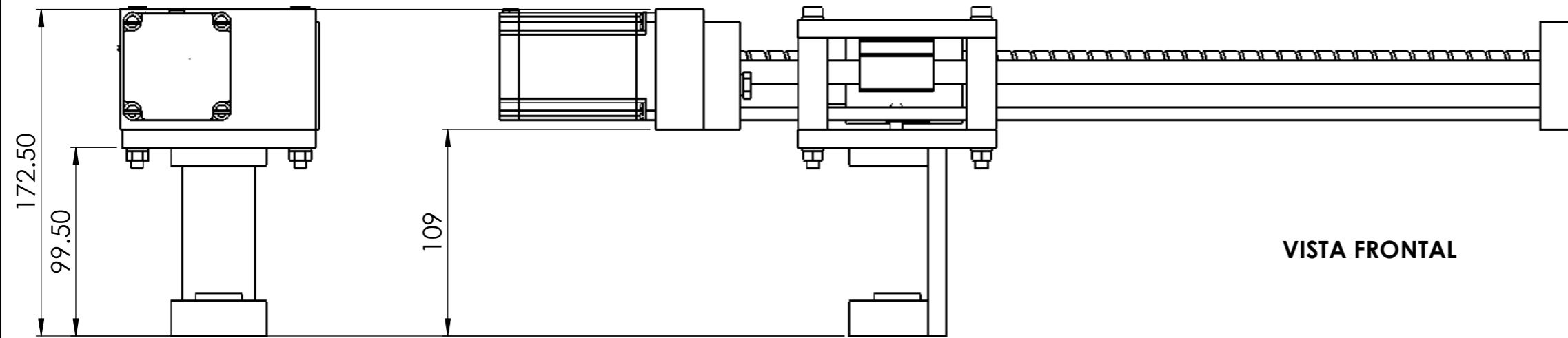
N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANT.
27	056-001	SOPORTE TRANSVERSAL CABEZAL EJE X	1
28	055-002	SOPORTE SUPERIOR CABEZAL EJE X	1
29	055-001	SOPORTE INFERIOR CABEZAL EJE X	1
30	058-001	ACOPLADOR DE NYLAMID PARA CABEZAL	1
31	100-012	TORNILLO ALLEN M5x15	4

**NOTA:**  
 A menos que se especifique lo contrario, todas las dimensiones están expresadas en milímetros.  
 A fin de evitar errores durante el funcionamiento del manipulador, se deben respetar tolerancias dimensionales para el ensamble de los componentes de  $\pm 0.25\text{mm}$

<b>POSGRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA</b> Revisión: 0    Fecha de creación: 09/06/2013		Diseñado por: A. JARAMILLO Aprobado por: H. MEDELLIN	Título: <h2 style="text-align: center;">CABEZAL EJE X</h2>	Formato A3 Idioma E	 <small>THIRD ANGLE PROJECTION</small> 
Diseño y construcción de un sistema de manipulación X, Y, Z de propósito general 			Doc. No.: 001-011	Hoja 2/2	

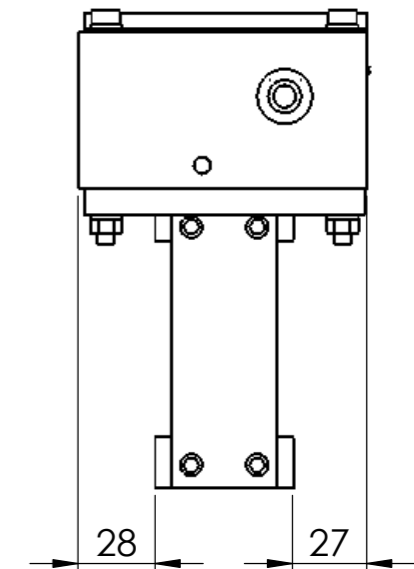


VISTA SUPERIOR



VISTA LATERAL DERECHA

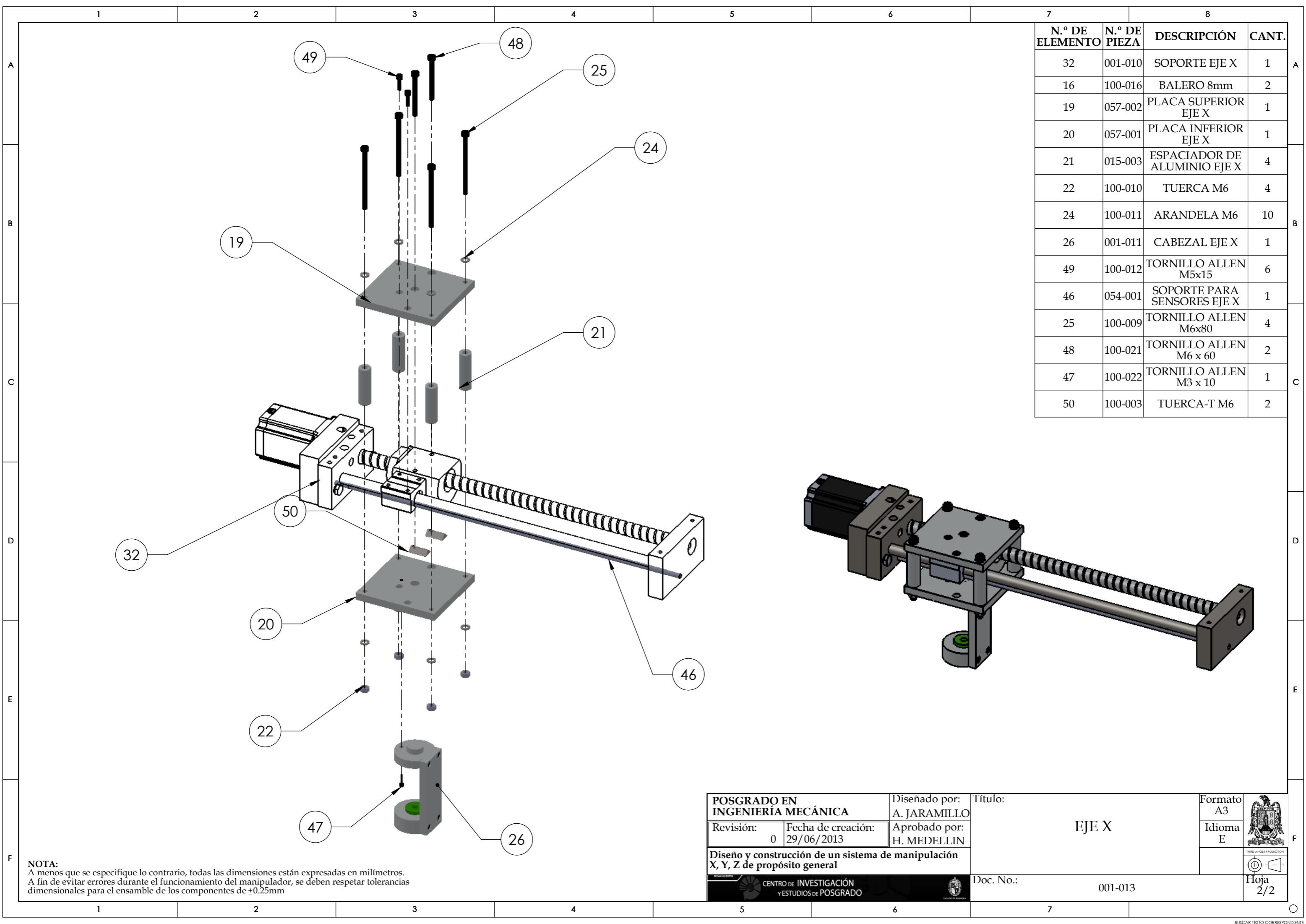
VISTA FRONTAL




VISTA INFERIOR

**NOTA:**  
 A menos que se especifique lo contrario, todas las dimensiones están expresadas en milímetros.  
 A fin de evitar errores durante el funcionamiento del manipulador, se deben respetar tolerancias dimensionales para el ensamble de los componentes de  $\pm 0.25\text{mm}$

POSGRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA		Diseñado por: A. JARAMILLO	Título:	Formato A3	
Revisión: 0	Fecha de creación: 29/06/2013	Aprobado por: H. MEDELLIN	EJE X	Idioma E	
Diseño y construcción de un sistema de manipulación X, Y, Z de propósito general			Doc. No.:	001-013	Hoja 1/2
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO					



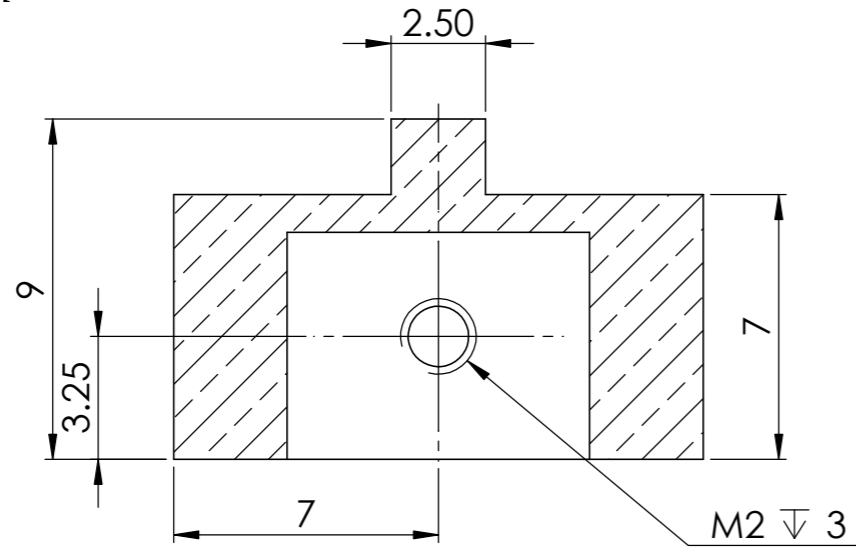
N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANT.
32	001-010	SOPORTE EJE X	1
16	100-016	BALERO 8mm	2
19	057-002	PLACA SUPERIOR EJE X	1
20	057-001	PLACA INFERIOR EJE X	1
21	015-003	ESPACIADOR DE ALUMINIO EJE X	4
22	100-010	TUERCA M6	4
24	100-011	ARANDELA M6	10
26	001-011	CABEZAL EJE X	1
49	100-012	TORNILLO ALLEN M5x15	6
46	054-001	SOPORTE PARA SENSORES EJE X	1
25	100-009	TORNILLO ALLEN M6x80	4
48	100-021	TORNILLO ALLEN M6 x 60	2
47	100-022	TORNILLO ALLEN M3 x 10	1
50	100-003	TUERCA-T M6	2

<b>POSGRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA</b> Revisión: 0    Fecha de creación: 29/06/2013		Diseñado por: <b>A. JARAMILLO</b>	Título: <h2 style="text-align: center;">EJE X</h2>	Formato A3	
<b>Diseño y construcción de un sistema de manipulación X, Y, Z de propósito general</b>		Aprobado por: <b>H. MEDELLIN</b>		Idioma E	
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO			Doc. No.: 001-013	Hoja 2/2	

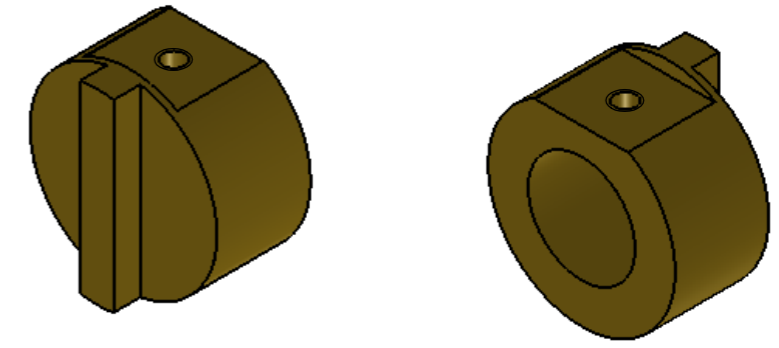
**NOTA:**  
 A menos que se especifique lo contrario, todas las dimensiones están expresadas en milímetros.  
 A fin de evitar errores durante el funcionamiento del manipulador, se deben respetar tolerancias dimensionales para el ensamble de los componentes de  $\pm 0.25\text{mm}$

## A.2. Eje Y

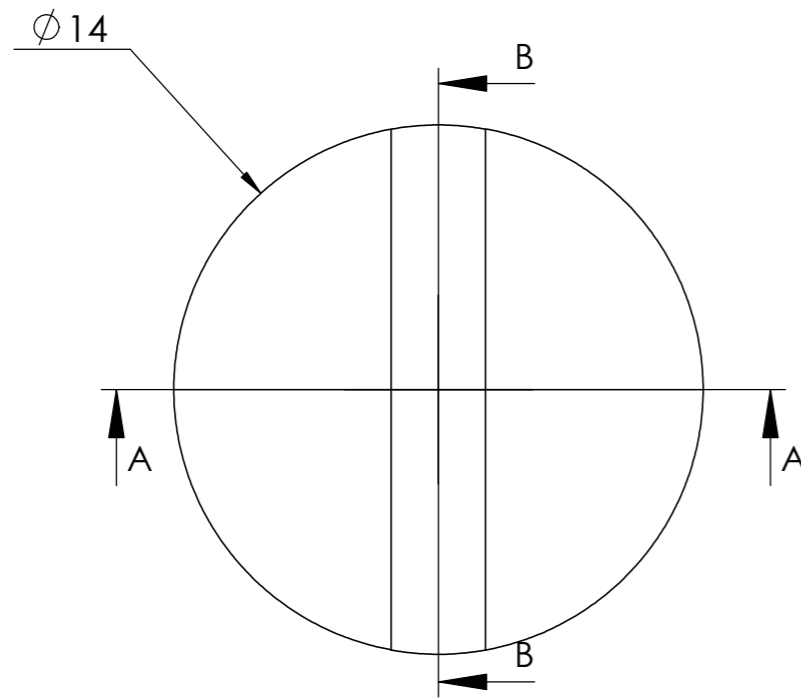
Latón  
Barra redonda de 14mm



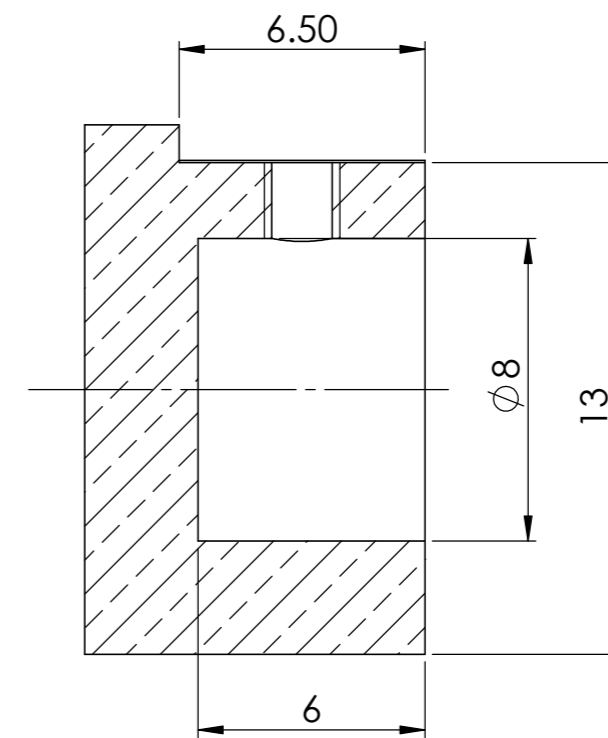
SECCIÓN A-A



VISTA ISOMÉTRICA



VISTA FRONTAL

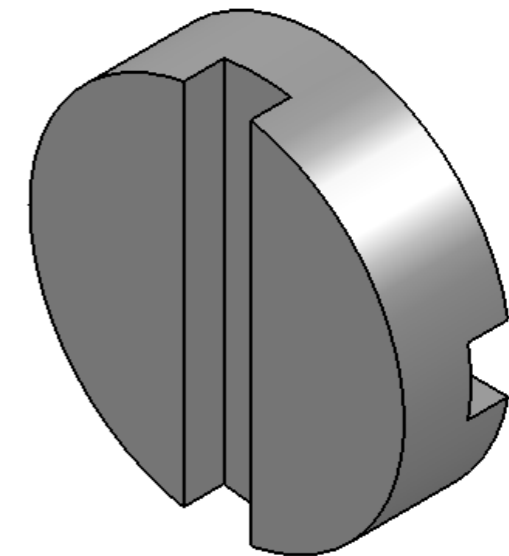


SECCIÓN B-B

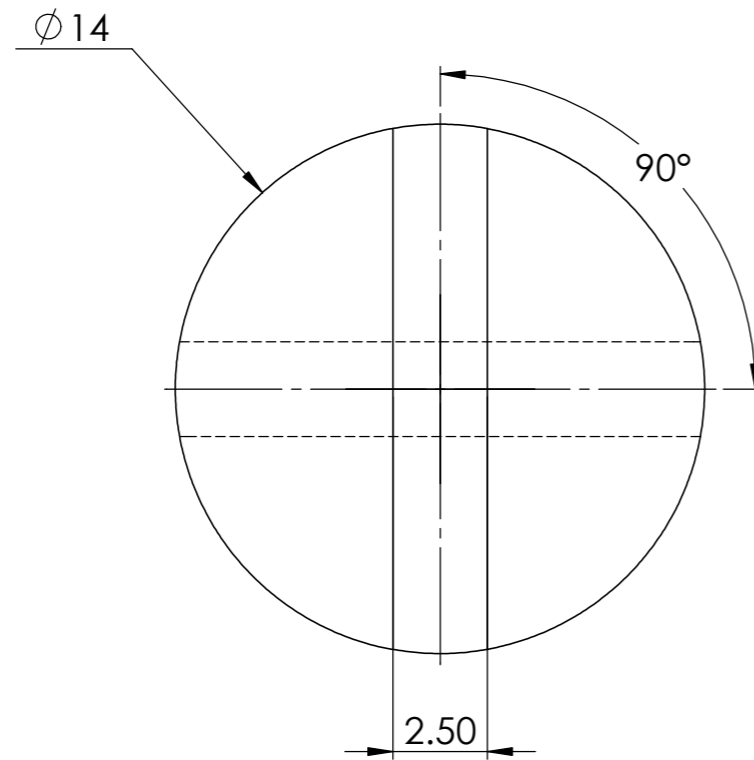
NOTA:  
A menos que se especifique lo contrario, todas las dimensiones están expresadas en milímetros.

POSGRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA		Diseñado por: A. JARAMILLO	Título:	Formato A3	
Revisión: 0	Fecha de creación: 24/02/2013	Aprobado por: H. MEDELLIN	ACOPLAMIENTO OLDHAM PARA HUSILLO DE BOLAS	Idioma E	
Diseño y construcción de un sistema de manipulación X, Y, Z de propósito general				Doc. No.: 007-001	Hoja 1/1
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO					

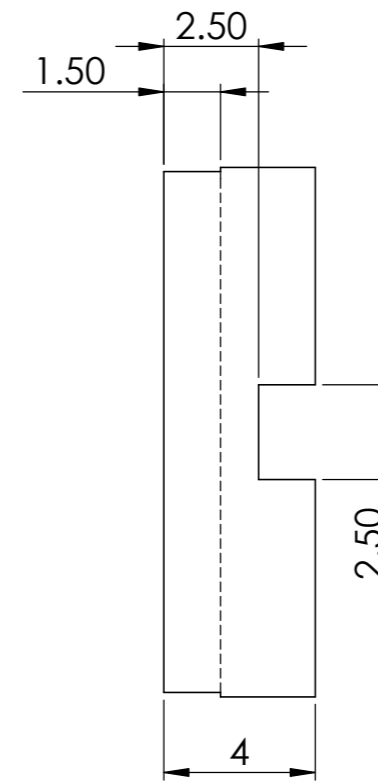
Nylamid blanco  
Barra redonda de 14mm



VISTA ISOMÉTRICA





VISTA FRONTAL



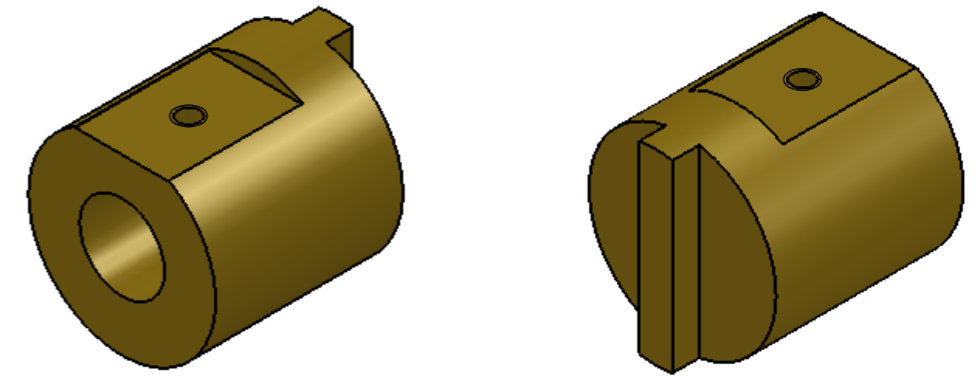
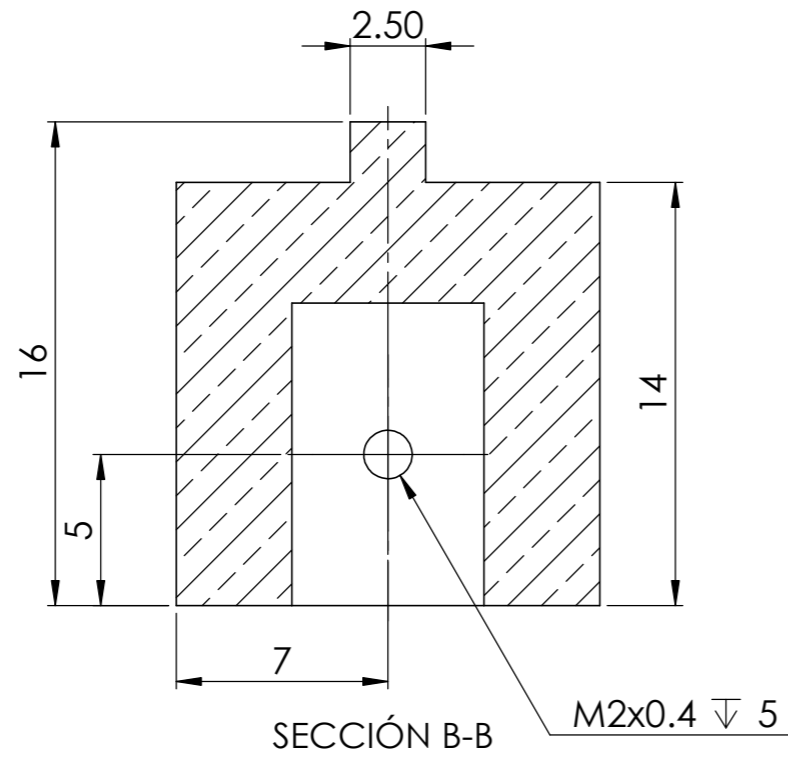
LATERAL DERECHA

NOTA:  
A menos que se especifique lo contrario, todas las dimensiones están expresadas en milímetros.

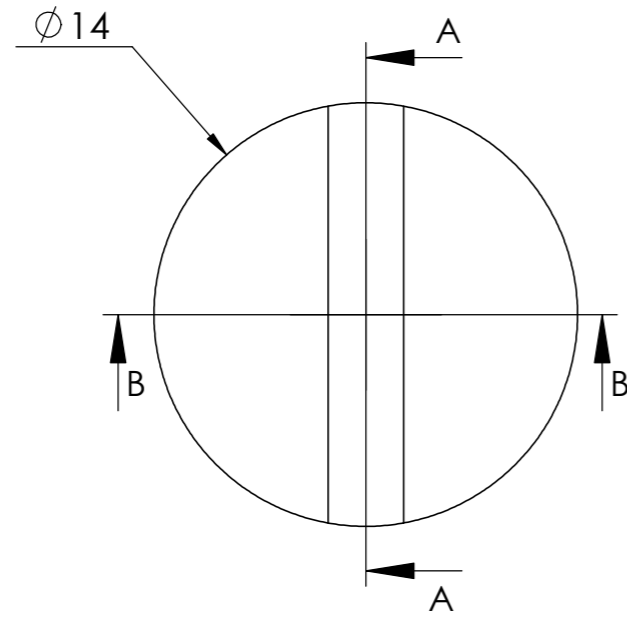
<b>POSGRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA</b>		Diseñado por: A. JARAMILLO	Título:  <b>BUJE DE ACOPLAMIENTO OLDHAM</b>	Formato A3	
Revisión: 0	Fecha de creación: 24/02/2013	Aprobado por: H. MEDELLIN		Idioma E	
Diseño y construcción de un sistema de manipulación X, Y, Z de propósito general			Doc. No.: 007-002	Hoja 1/1	
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO					



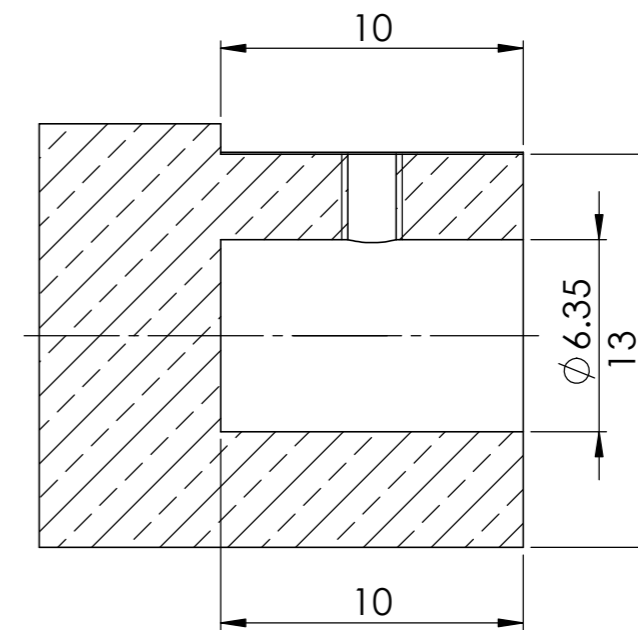
Latón  
Bara redonda de 14mm



VISTA ISOMÉTRICA



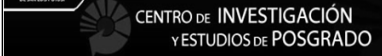


VISTA FRONTAL

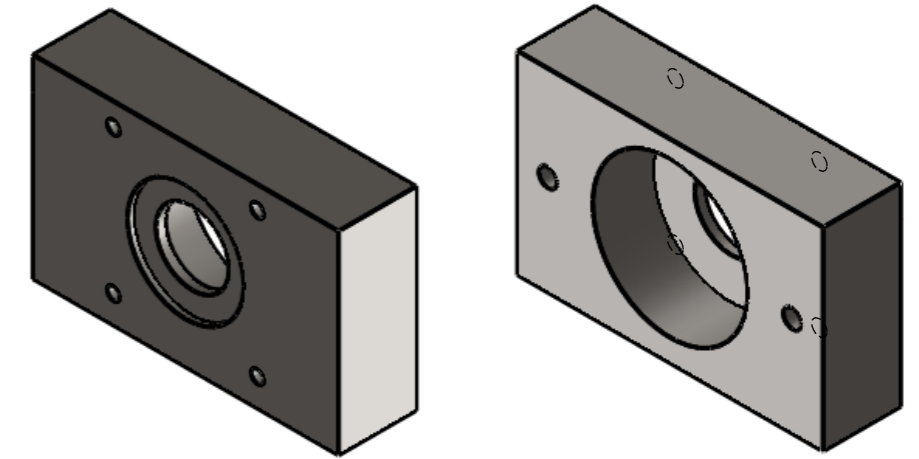


SECCIÓN A-A

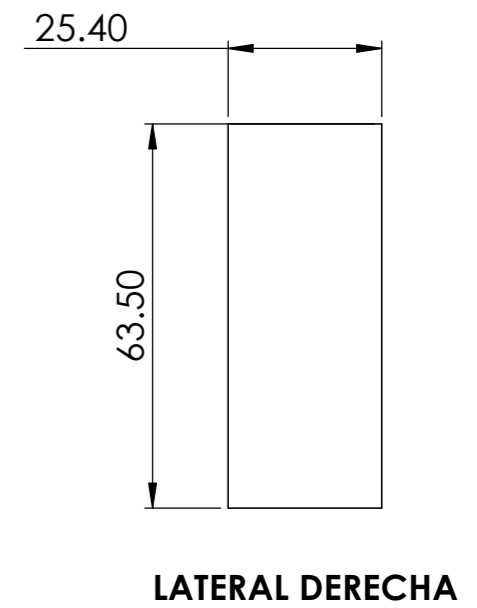
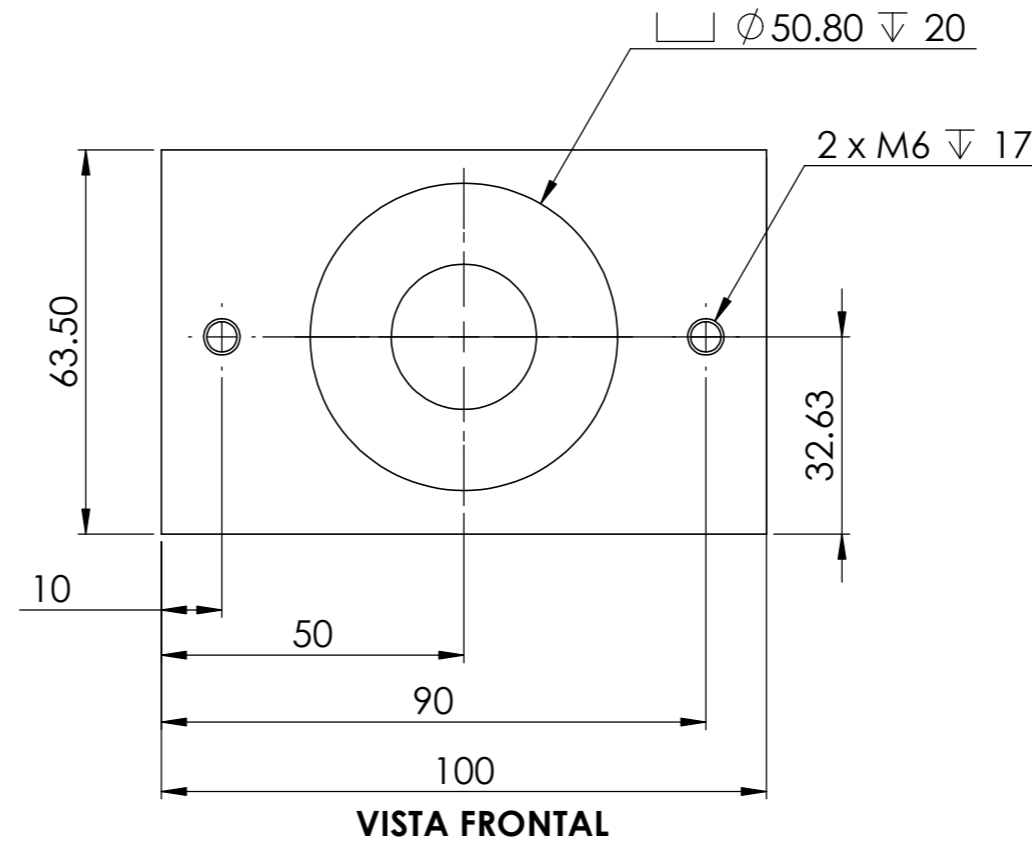
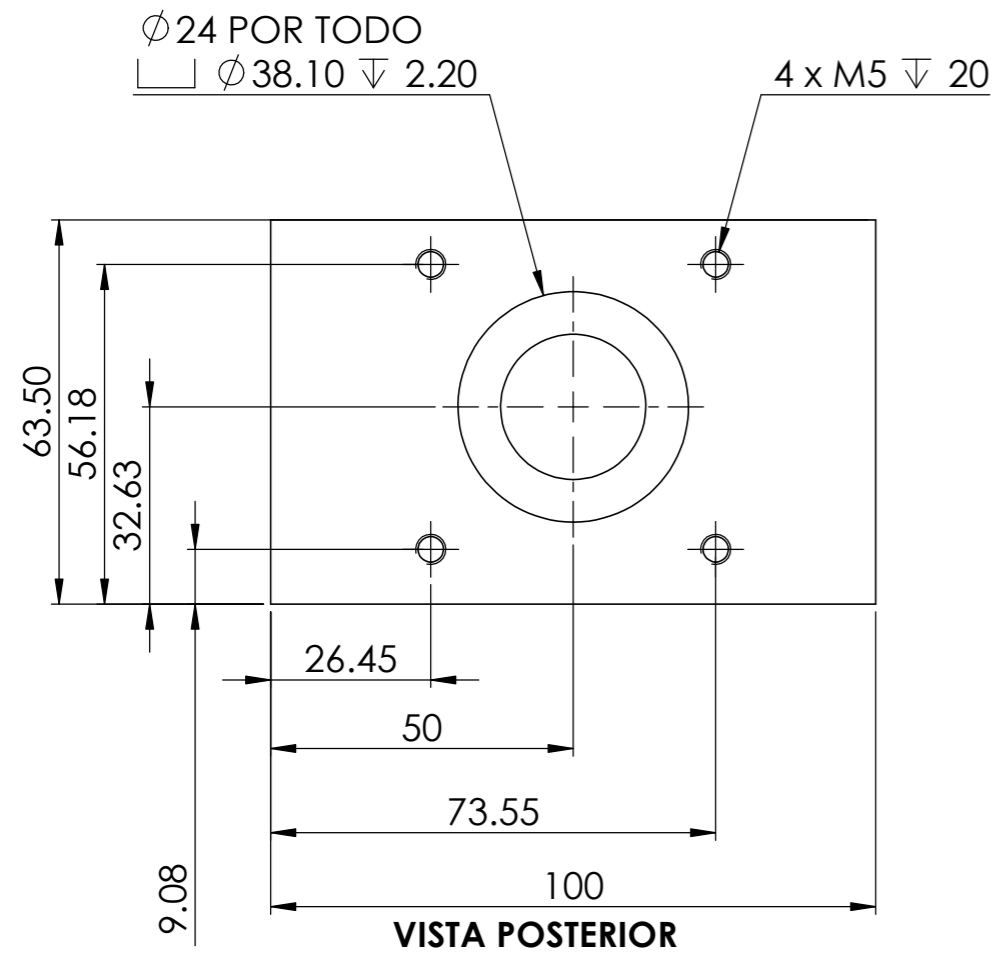
NOTA:  
A menos que se especifique lo contrario, todas las dimensiones están expresadas en milímetros.

POSGRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA		Diseñado por: A. JARAMILLO	Título:	Formato A3	
Revisión: 0	Fecha de creación: 24/02/2013	Aprobado por: H. MEDELLIN	<p style="text-align: center;"><b>ACOPLAMIENTO OLDHAM PARA FLECHA DE MOTOR</b></p>	Idioma E	
Diseño y construcción de un sistema de manipulación X, Y, Z de propósito general				Doc. No.: 007-003	
					Hoja 1/1

Acero rolado en frío  
 AISI 1018  
 Solera: 2.5" x 1"






VISTA ISOMÉTRICA

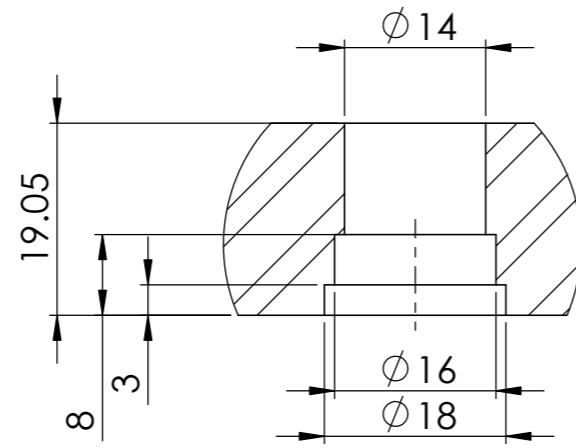


LATERAL DERECHA

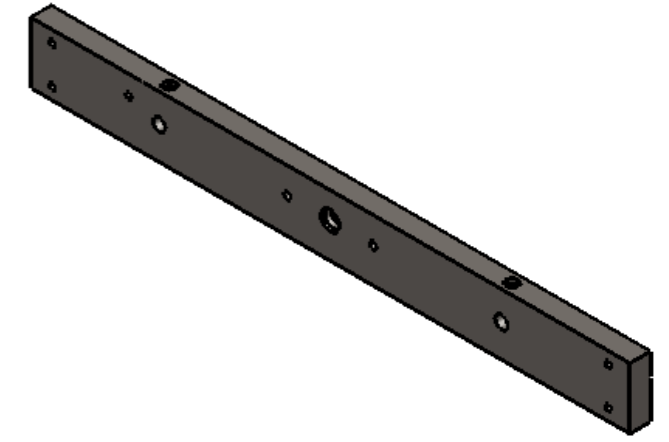
NOTA:  
 A menos que se especifique lo contrario, todas las dimensiones están expresadas en milímetros.

<b>POSGRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA</b> Revisión: 0    Fecha de creación: 03/03/2013		Designed: A. JARAMILLO Approved: H. MEDELLIN	Título: <b>SOPORTE ACOPLAMIENTO PARA MOTOR EJE Y</b>	Formato A3	
Diseño y construcción de un sistema de manipulación X, Y, Z de propósito general 				Idioma E	
			Doc. No.: 008-001		

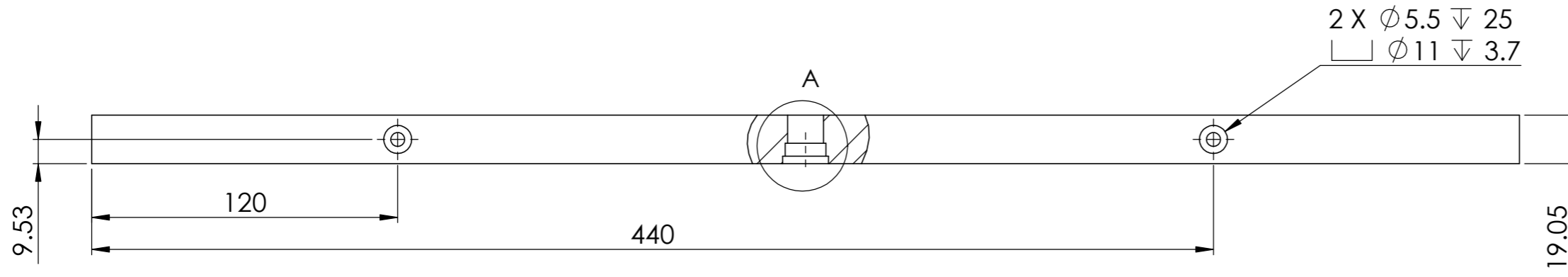
Acero rolado en frío  
 AISI 1018  
 Solera: 2.25" x 0.75"



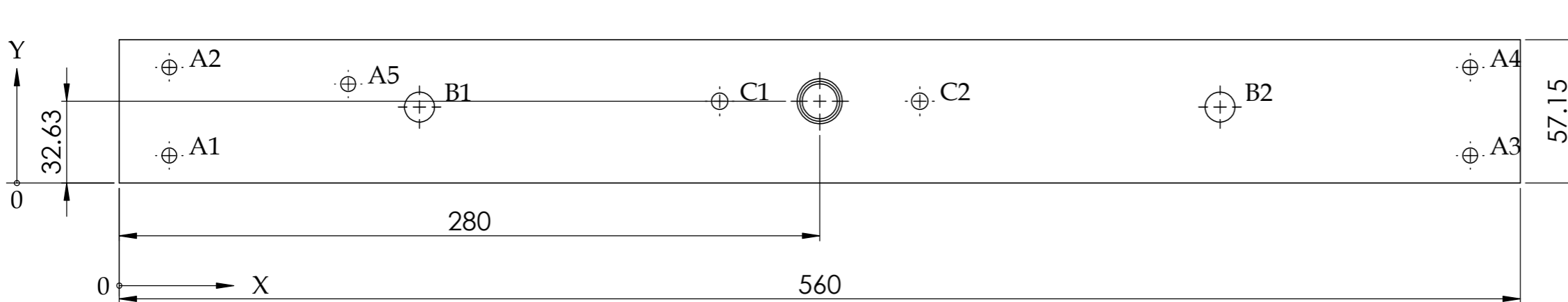
DETALLE A



VISTA ISOMÉTRICA



VISTA SUPERIOR



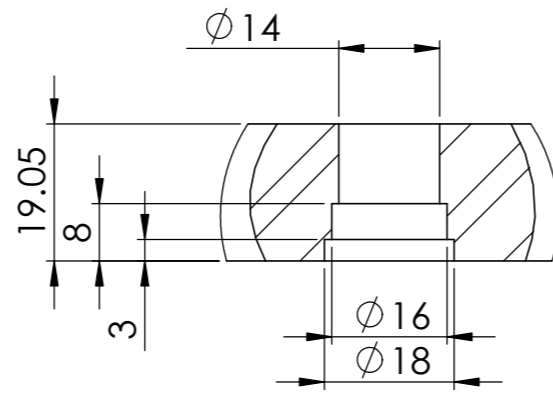
VISTA FRONTAL

RÓTULO	UBIC X	UBIC Y	TAMAÑO
A1	20	11	Ø6 POR TODO
A2	20	46.15	Ø6 POR TODO
A3	540	11	Ø6 POR TODO
A4	540	46.15	Ø6 POR TODO
A5	91.50	39.50	Ø6 POR TODO
B1	120	30.33	Ø12∇15
B2	440	30.33	Ø12∇15
C1	240	32.63	Ø6.60 POR TODO
C2	320	32.63	Ø6.60 POR TODO

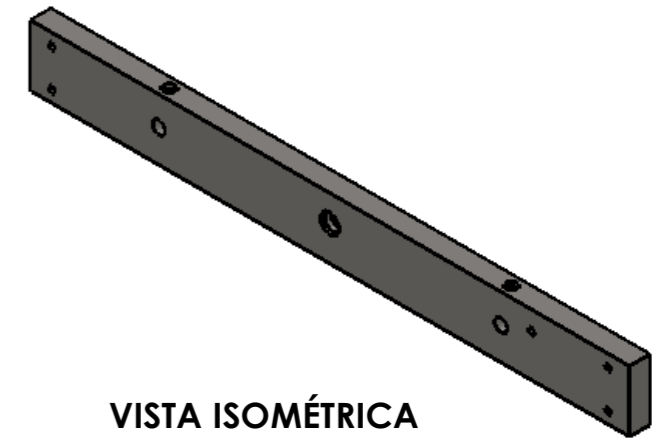
POSGRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA	Diseñado por: A. JARAMILLO	Título:	Formato A3
Revisión: 0	Fecha de creación: 03/03/2013	Aprobado por: H. MEDELLIN	Idioma E
Diseño y construcción de un sistema de manipulación X, Y, Z de propósito general			 Hoja 1/1
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO			
		Doc. No.: 009-001	

NOTA:  
 A menos que se especifique lo contrario, todas las dimensiones están expresadas en milímetros.

Acero rolado en frío  
 AISI 1018  
 Solera: 2.25" x 0.75"

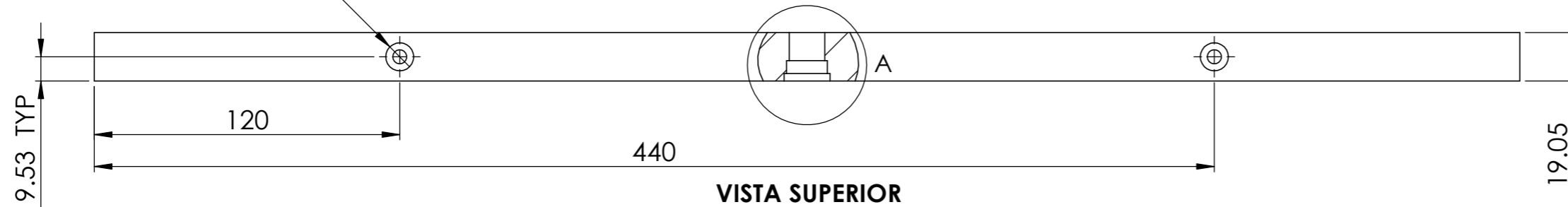


DETALLE A

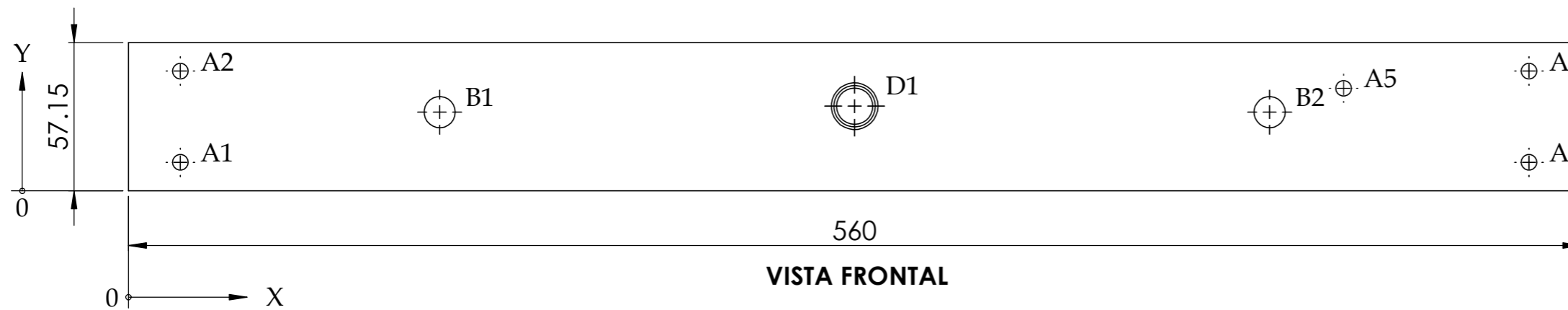


VISTA ISOMÉTRICA

2 X  $\varnothing 5.5 \nabla 25$   
 $\square \varnothing 11 \nabla 4$



VISTA SUPERIOR



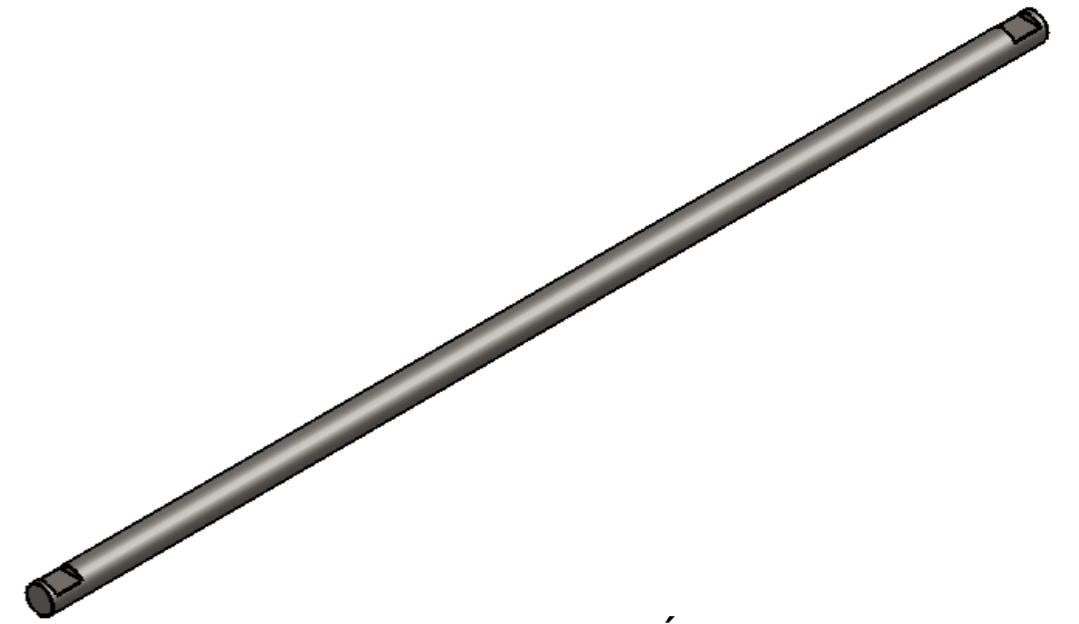
VISTA FRONTAL

RÓTULO	UBIC X	UBIC Y	TAMAÑO
A1	20	11	$\varnothing 6$ POR TODO
A2	20	46.15	$\varnothing 6$ POR TODO
A3	540	11	$\varnothing 6$ POR TODO
A4	540	46.15	$\varnothing 6$ POR TODO
A5	468.50	39.50	$\varnothing 6$ POR TODO
B1	120	30.33	$\varnothing 12 \nabla 15$
B2	440	30.33	$\varnothing 12 \nabla 15$
D1	280	32.63	$\varnothing 14$ POR TODO $\varnothing 16 \nabla 8$ $\square \varnothing 18 \nabla 3$

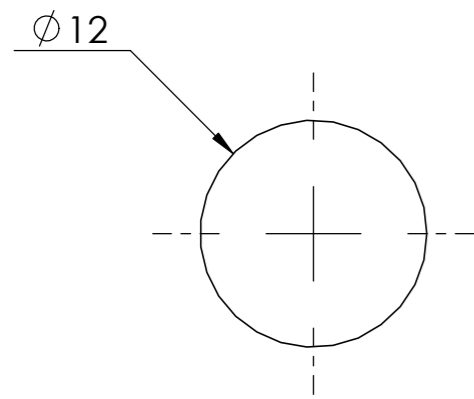
POSGRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA		Diseñado por: A. JARAMILLO	Título:  <b>SOPORTE FINAL DE CARRERA EJE Y</b>	Formato A3
Revisión: 0	Fecha de creación: 03/03/2013	Aprobado por: H. MEDELLIN		Idioma E
Diseño y construcción de un sistema de manipulación X, Y, Z de propósito general			Doc. No.: 009-002	
				Hoja 1/1

NOTA:  
 A menos que se especifique lo contrario, todas las dimensiones están expresadas en milímetros.

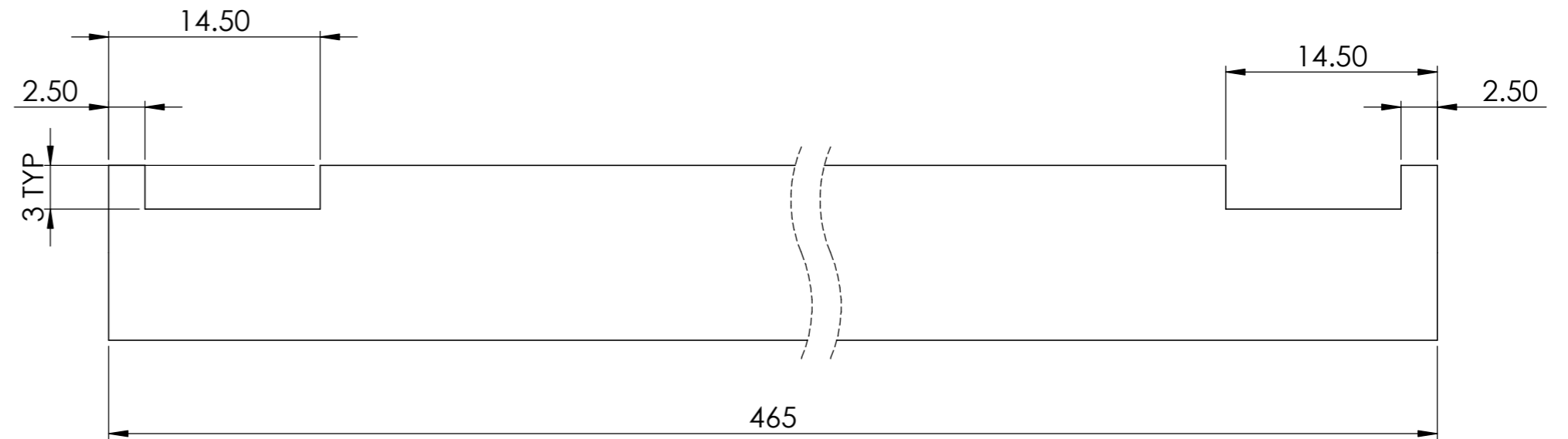
Acero rolado en frío  
 AISI 1018  
 Barra redonda de 12mm



VISTA ISOMÉTRICA





VISTA FRONTAL



VISTA LATERAL DERECHA

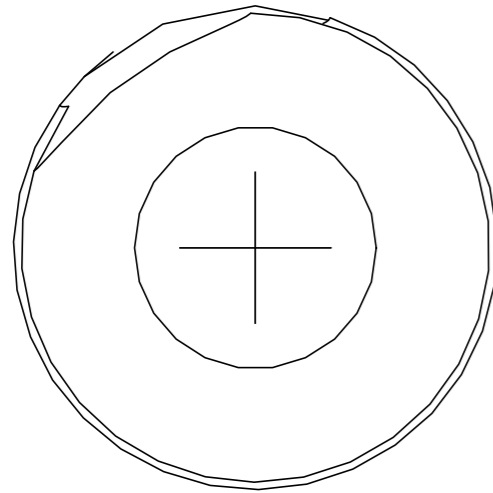
NOTA:  
 A menos que se especifique lo contrario, todas las dimensiones están expresadas en milímetros.

<b>POSGRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA</b>		Designed: A. JARAMILLO	<b>Título:</b> GUÍA LINEAL EJE Y	Formato A3	
Revisión: 0	Fecha de creación: 24/02/2013	Approved: H. MEDELLIN		Idioma E	
Diseño y construcción de un sistema de manipulación X, Y, Z de propósito general			<b>Doc. No.:</b> 010-001	Hoja 1/1	
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO					

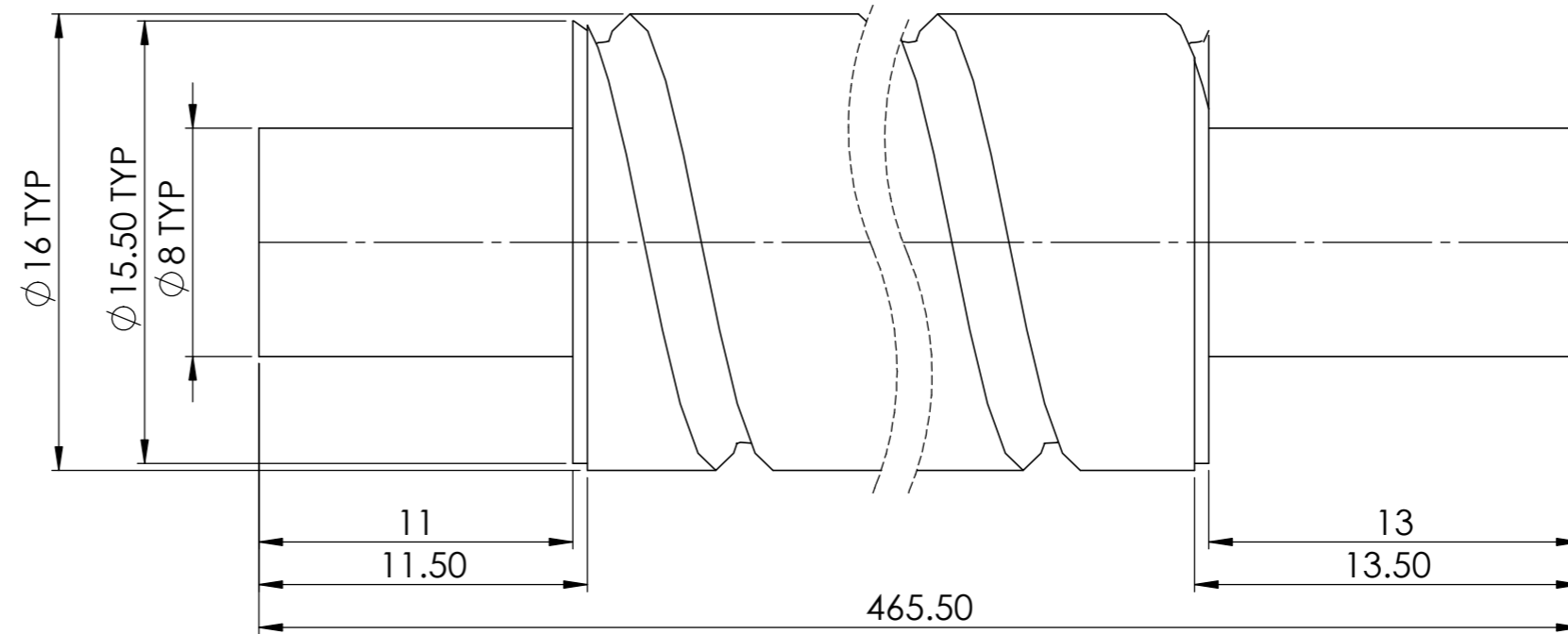
Husillo de bolas  
16mm x 10mm



VISTA ISOMÉTRICA



VISTA FRONTAL

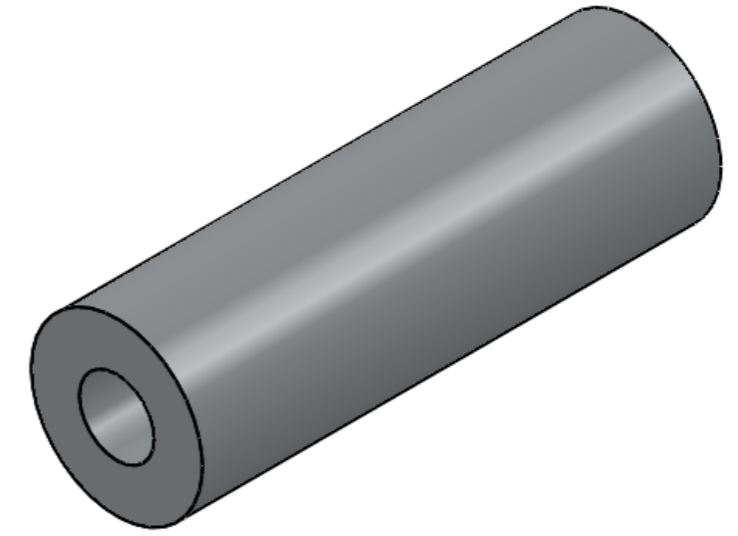


LATERAL DERECHA

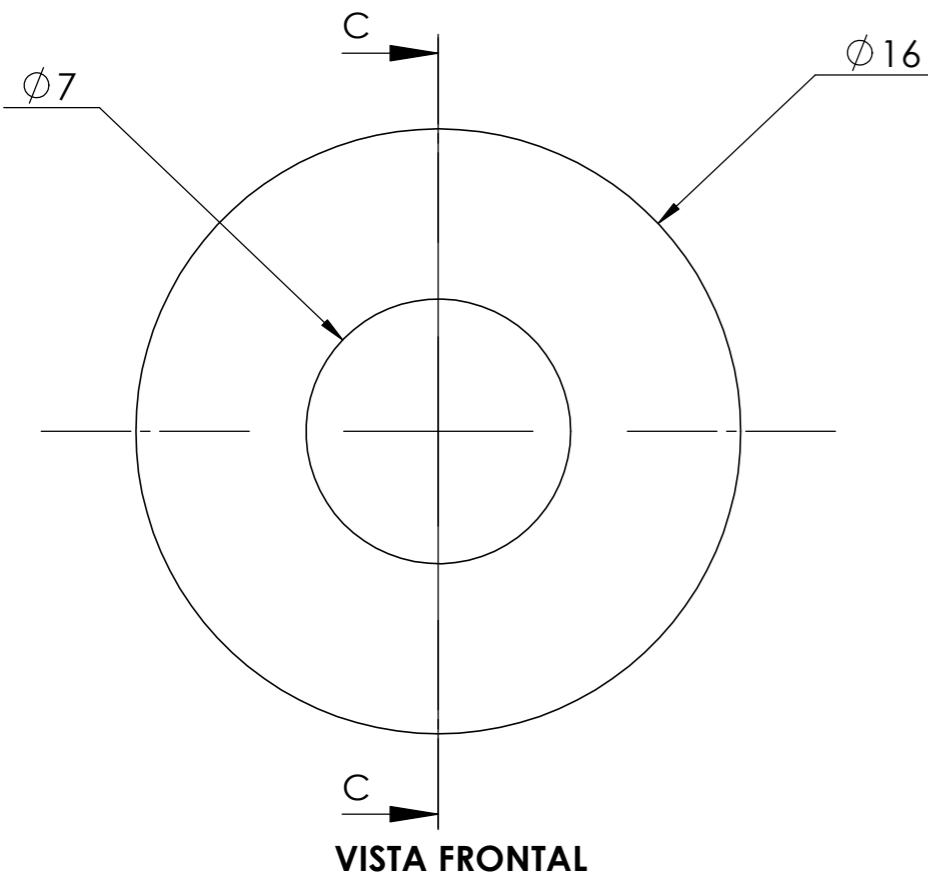
NOTA:  
A menos que se especifique lo contrario, todas las dimensiones están expresadas en milímetros.

POSGRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA		Diseñado por: A. JARAMILLO	Título:	Formato A3	
Revisión: 0	Fecha de creación: 24/02/2013	Aprobado por: H. MEDELLIN	HUSILLO DE BOLAS EJE Y	Idioma E	
Diseño y construcción de un sistema de manipulación X, Y, Z de propósito general			Doc. No.:	011-001	Hoja 1/1
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO					

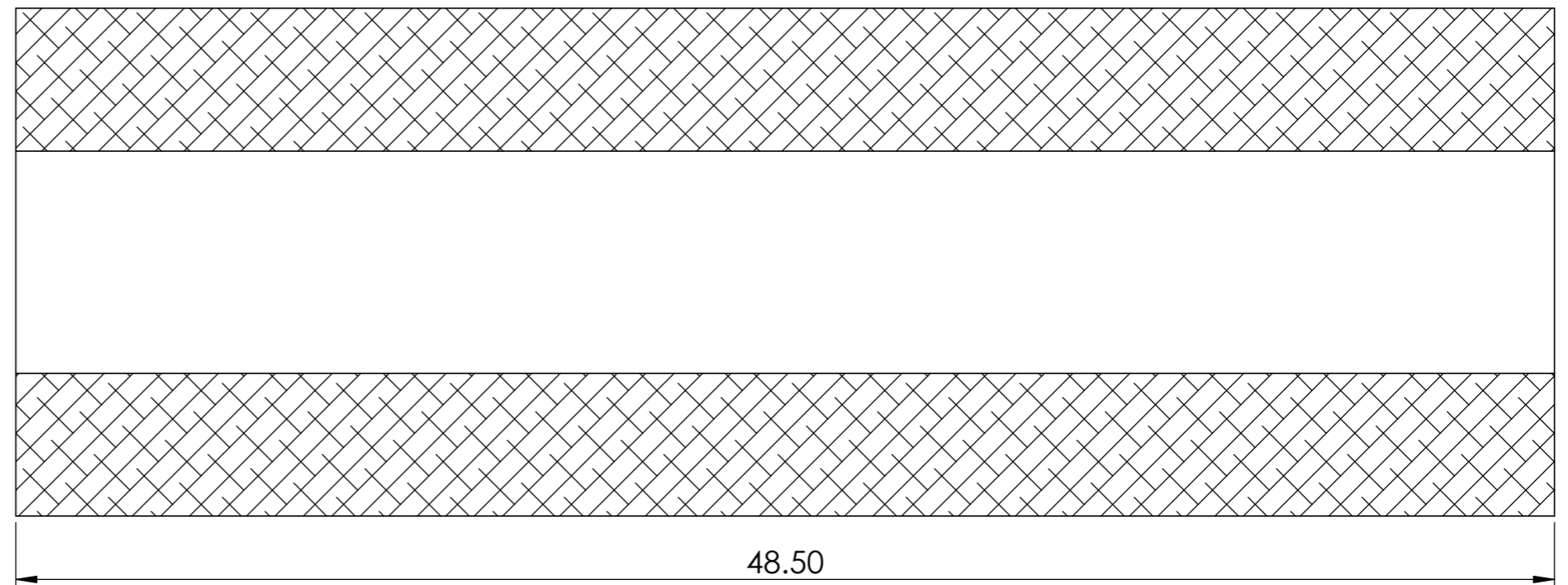
Aleación de Aluminio 6061  
Barra redonda de 20mm



VISTA ISOMÉTRICA




VISTA FRONTAL

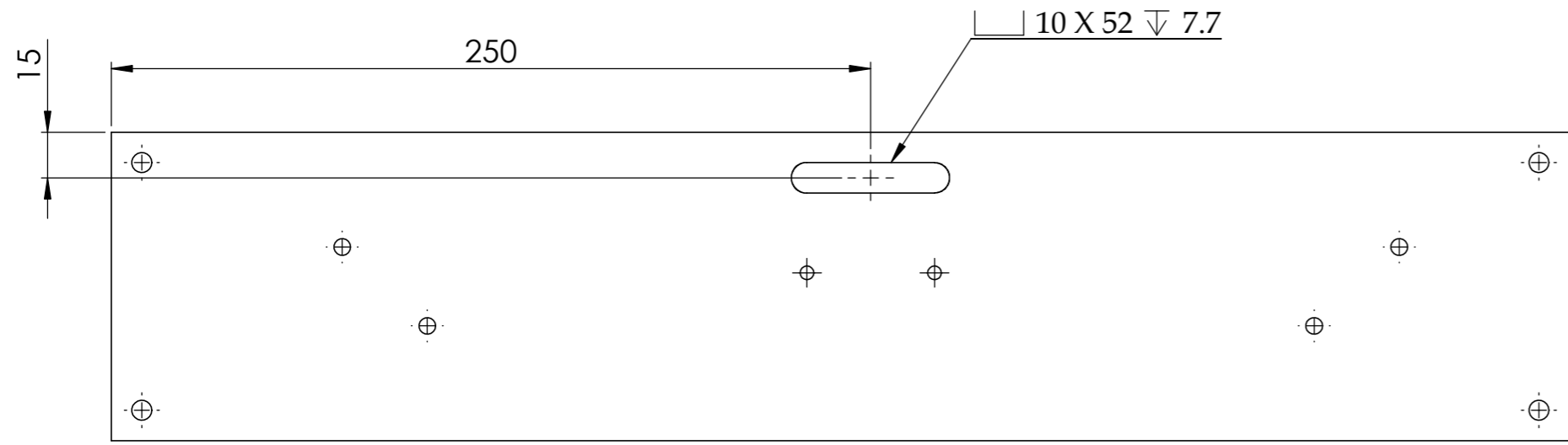


SECCIÓN C-C

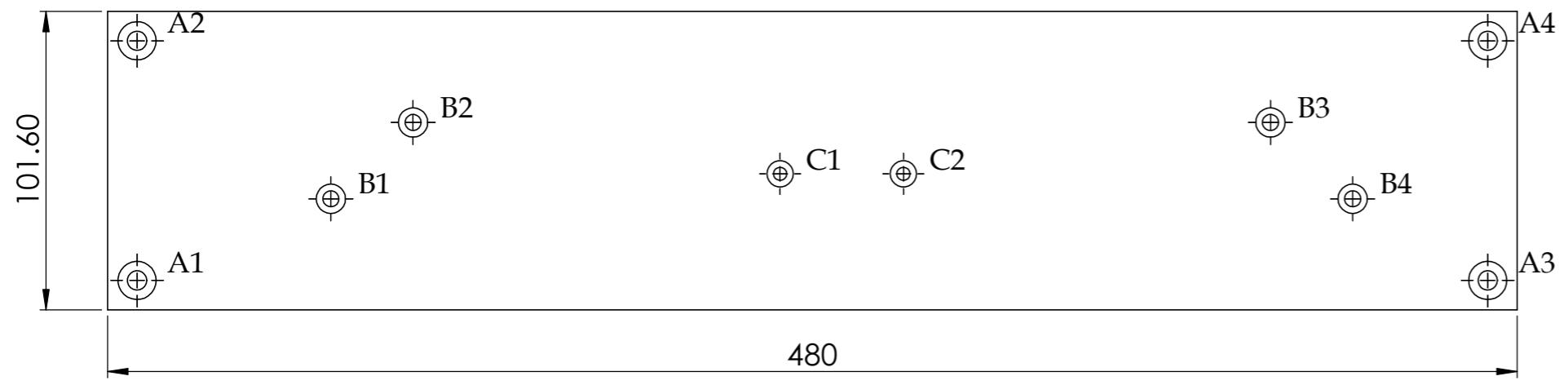
NOTA:  
A menos que se especifique lo contrario, todas las dimensiones están expresadas en milímetros.

<b>POSGRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA</b>		Designed: A. JARAMILLO	<b>Título:</b> <b>ESPACIADOR DE ALUMINIO EJE Y</b>	Formato A3	
Revisión: 0	Fecha de creación: 17/02/2013	Approved: H. MEDELLIN		Idioma E	
<b>Diseño y construcción de un sistema de manipulación X, Y, Z de propósito general</b>			<b>Doc. No.:</b> 015-010	Hoja 1/1	
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO					

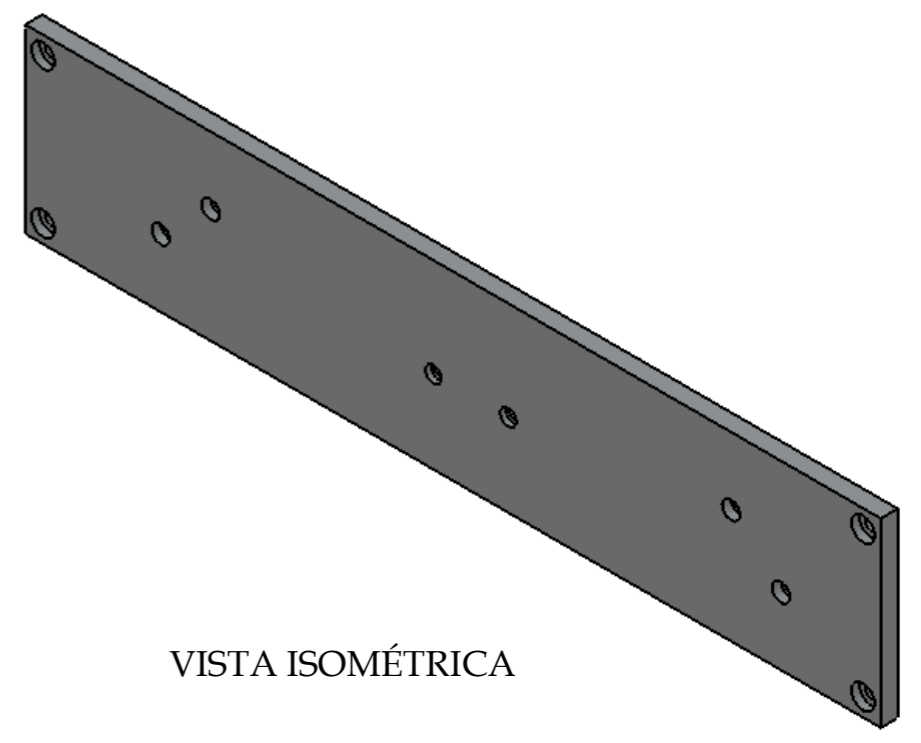
**Aleación de Aluminio 6061**  
**Solera: 3/8" X 4"**



VISTA POSTERIOR





VISTA FRONTAL



VISTA ISOMÉTRICA

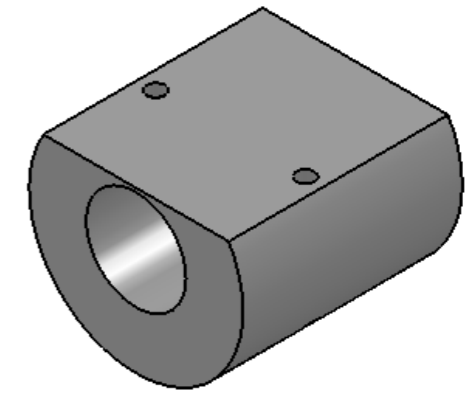
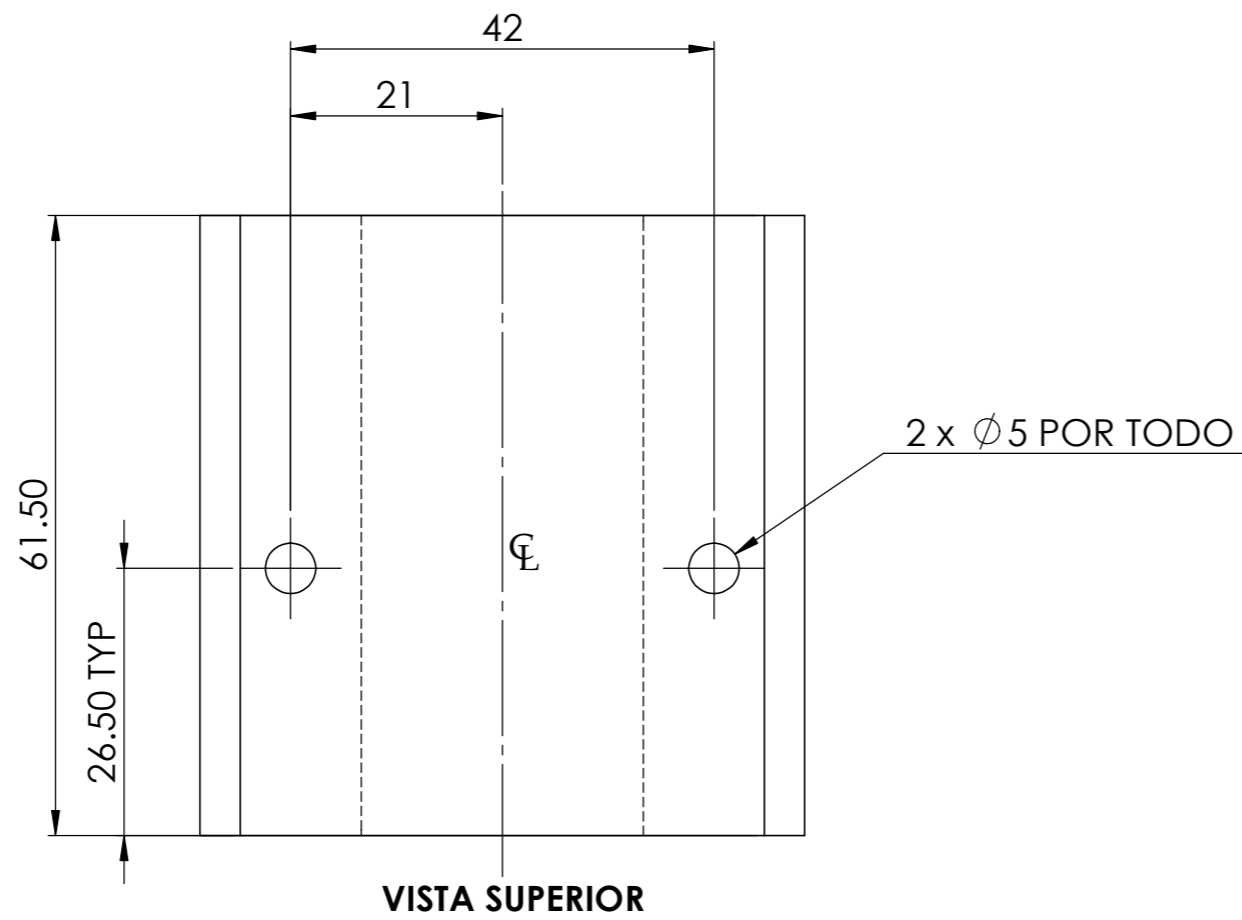
RÓTULO	UBIC X	UBIC Y	TAMAÑO
A1	10	10	Ø6.60 POR TODO └─┘ Ø13┴4.60
A2	10	91.60	Ø6.60 POR TODO └─┘ Ø13┴4.60
A3	470	10	Ø6.60 POR TODO └─┘ Ø13┴4.60
A4	470	91.60	Ø6.60 POR TODO └─┘ Ø13┴4.60
B1	76	37.80	Ø5.50 POR TODO 0 └─┘ Ø10 -1┴5
B2	104	63.80	Ø5.50 POR TODO 0 └─┘ Ø10 -1┴5
B3	396	63.80	Ø5.50 POR TODO 0 └─┘ Ø10 -1┴5
B4	424	37.80	Ø5.50 POR TODO 0 └─┘ Ø10 -1┴5
C1	229	46.30	Ø4.50 POR TODO └─┘ Ø9┴3.10
C2	271	46.30	Ø4.50 POR TODO └─┘ Ø9┴3.10

**NOTA:**  
 A menos que se especifique lo contrario, todas las dimensiones están expresadas en milímetros.

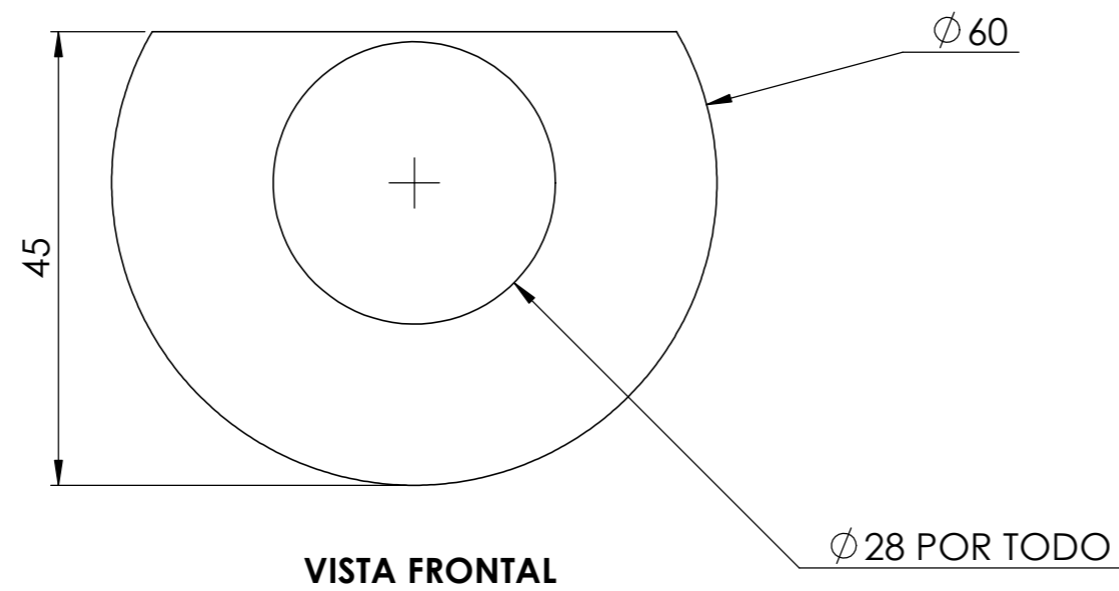
<b>POSGRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA</b>		Designed: A. JARAMILLO	Título: <b>SOPORTE TRANSVERSAL EJE Y</b>	Formato A3
Revisión: 0	Fecha de creación: 17/02/2013	Approved: H. MEDELLIN		Idioma E
Diseño y construcción de un sistema de manipulación X, Y, Z de propósito general			Doc. No.: 027-000	 Hoja 1/1
 CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO				



Nylamid Blanco  
Barra redonda de 60mm



VISTA ISOMÉTRICA



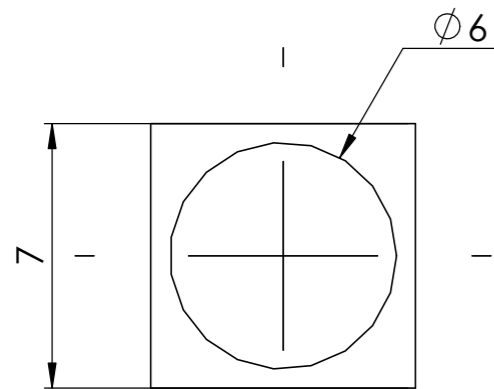
NOTA:  
A menos que se especifique lo contrario, todas las dimensiones están expresadas en milímetros.

POSGRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA		Diseñado por: A. JARAMILLO	Título:	Formato A3	
Revisión: 0	Fecha de creación: 18/02/2013	Aprobado por: H. MEDELLIN	SOPORTE DE NYLAMID PARA TUERCA DE BOLAS	Idioma E	
Diseño y construcción de un sistema de manipulación X, Y, Z de propósito general				Doc. No.: 034-001	
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO					

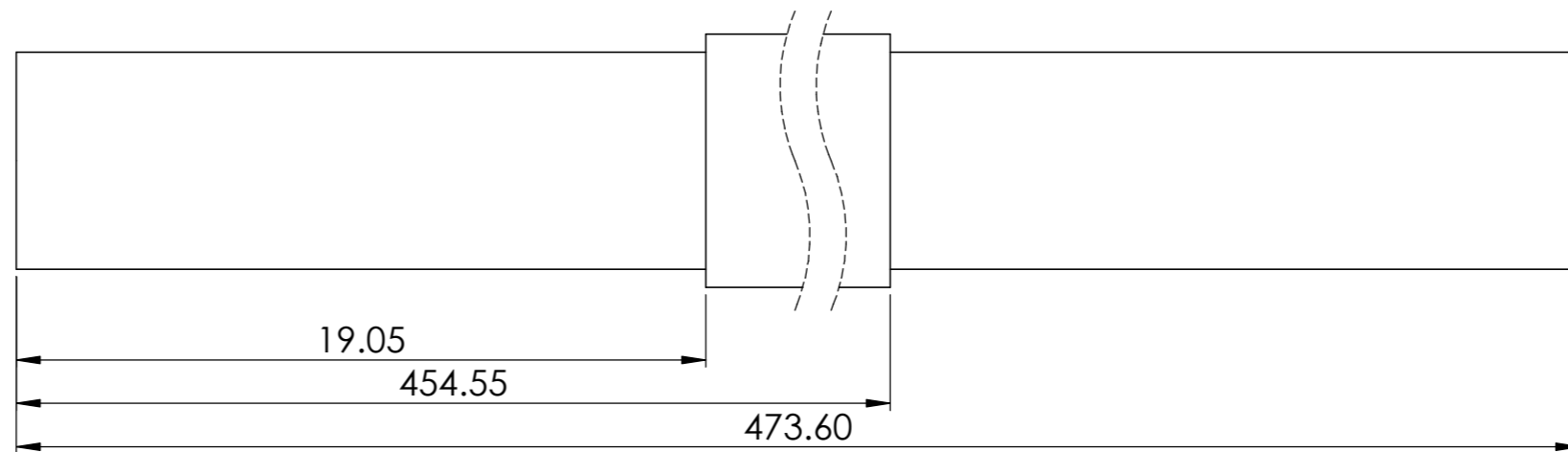
Aleación de Aluminio 6061  
 Barra cuadrada de 7mm x 7mm



VISTA ISOMÉTRICA



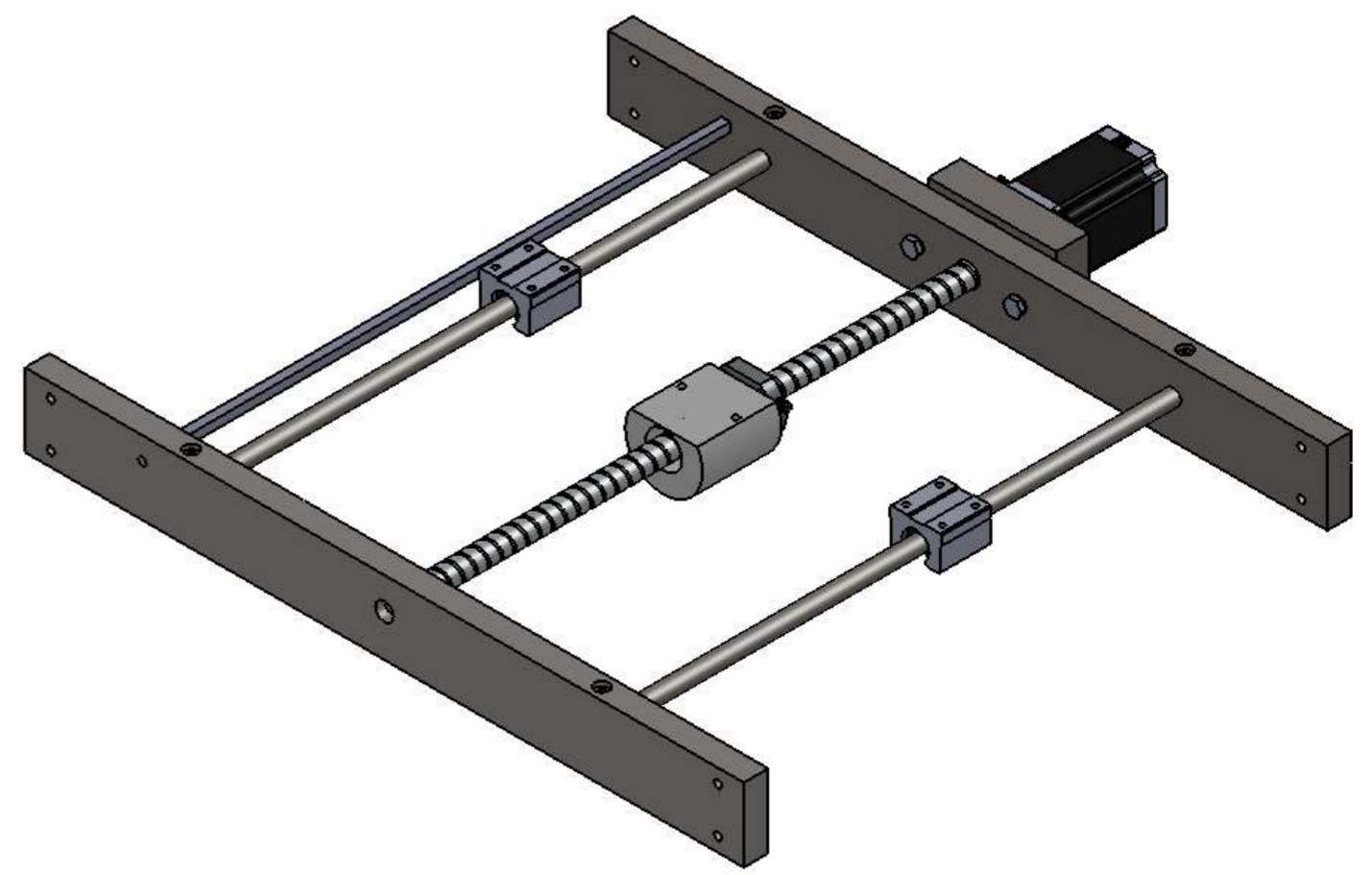
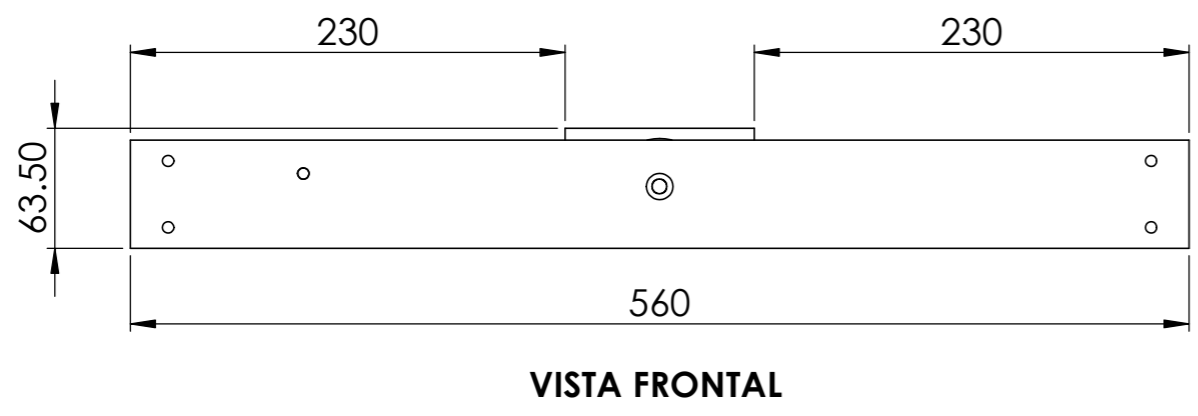
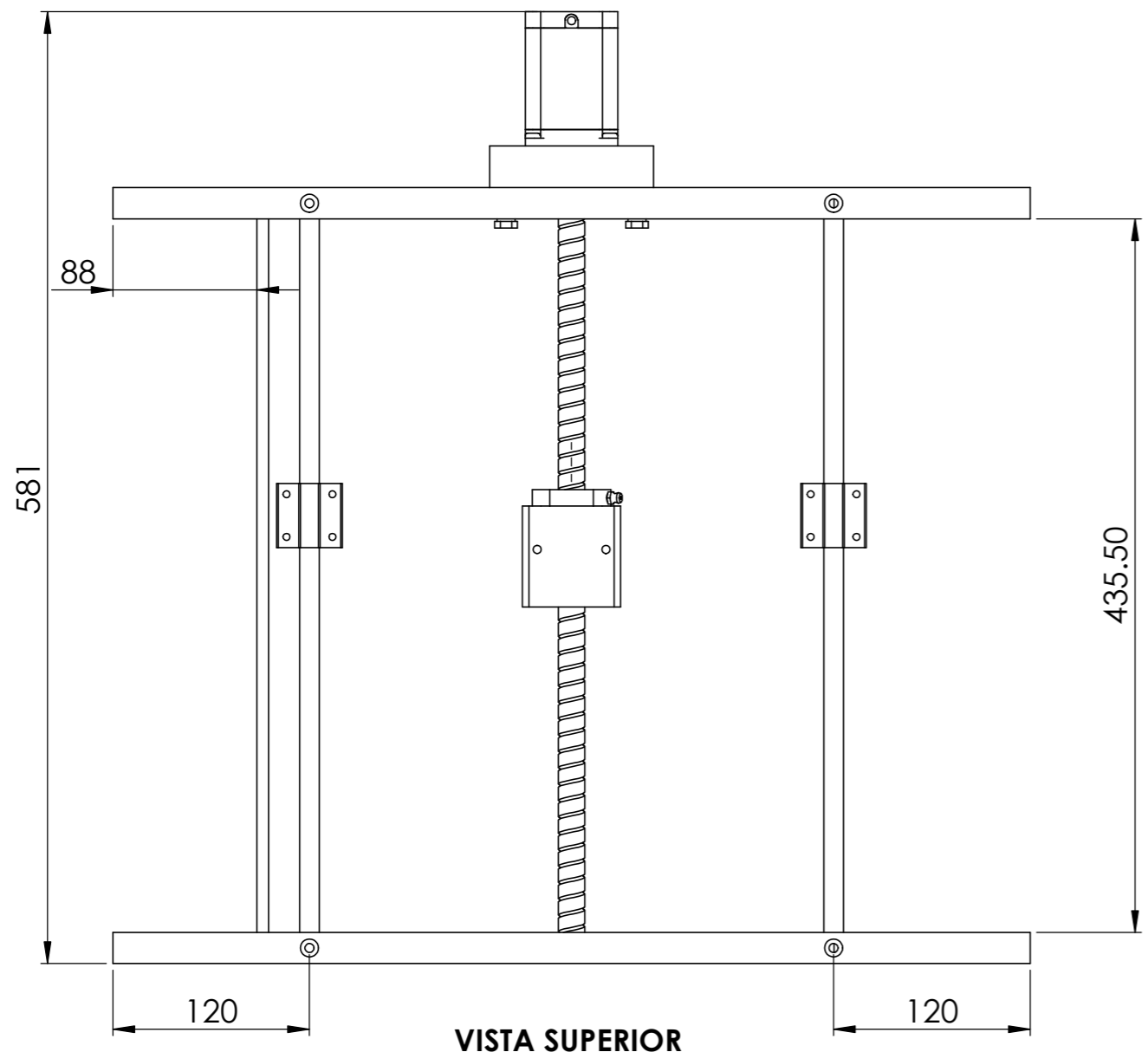
VISTA FRONTAL



LATERAL DERECHA

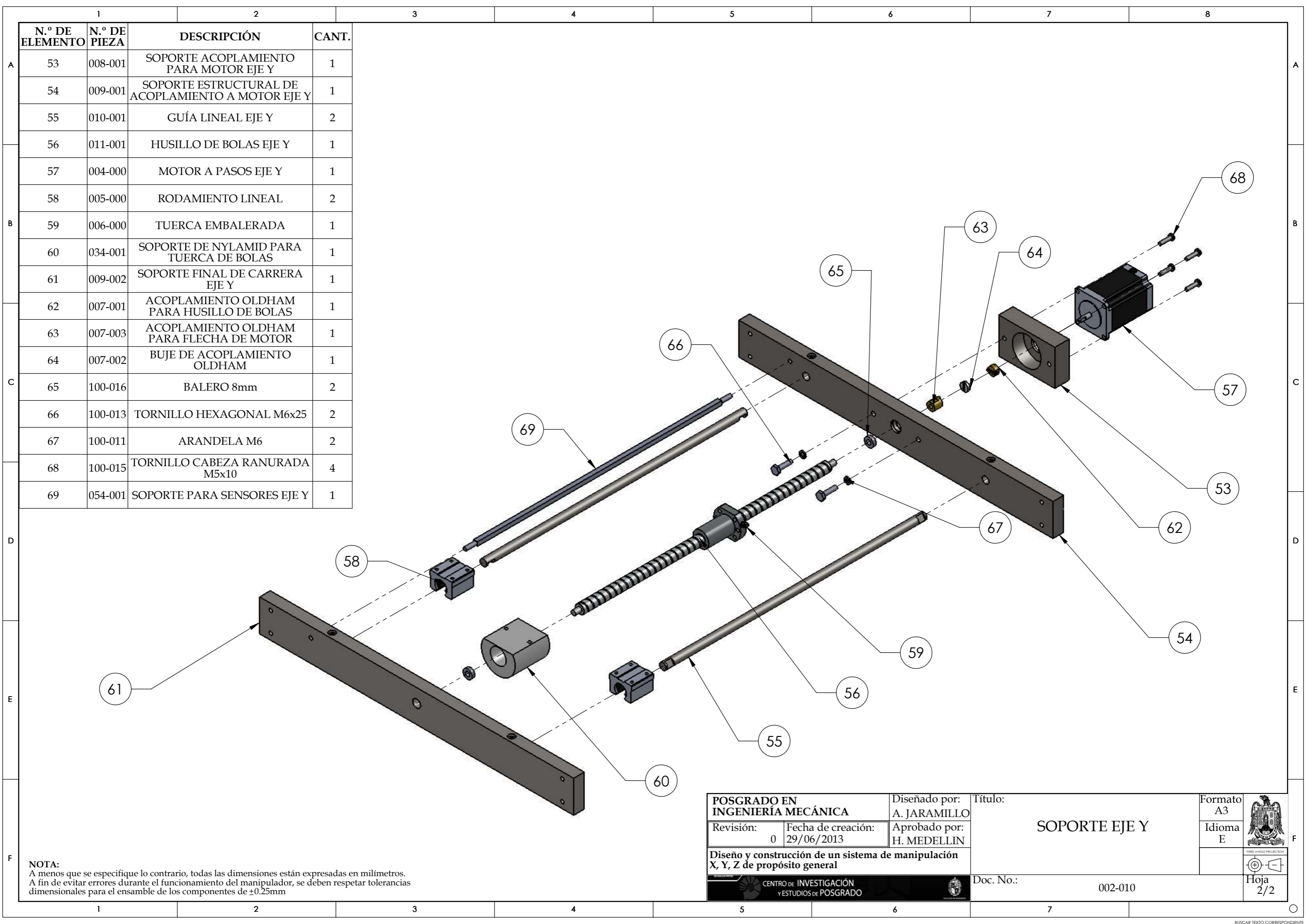
NOTA:  
 A menos que se especifique lo contrario, todas las dimensiones están expresadas en milímetros.

POSGRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA		Diseñado por: A. JARAMILLO	Título:	Formato A3	
Revisión: 0	Fecha de creación: 03/03/2013	Aprobado por: H. MEDELLIN	SOPORTE PARA SENSORES EJE Y	Idioma E	
Diseño y construcción de un sistema de manipulación X, Y, Z de propósito general				Doc. No.: 054-002	 Hoja 1/1
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO					



**NOTA:**  
 A menos que se especifique lo contrario, todas las dimensiones están expresadas en milímetros.  
 A fin de evitar errores durante el funcionamiento del manipulador, se deben respetar tolerancias dimensionales para el ensamble de los componentes de  $\pm 0.25\text{mm}$

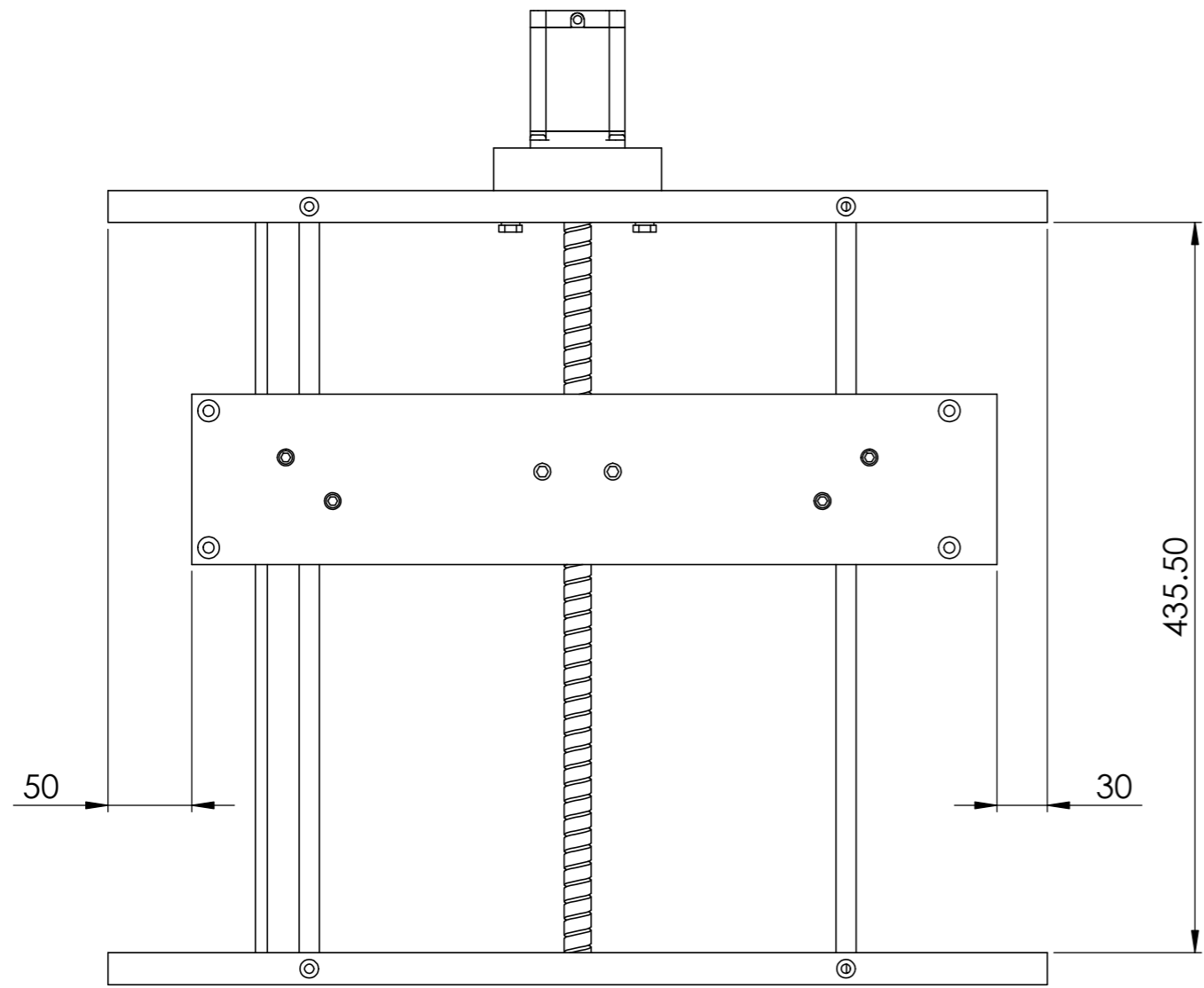
<b>POSGRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA</b>		Diseñado por: A. JARAMILLO	Título:	Formato A3	
Revisión: 0	Fecha de creación: 29/06/2013	Aprobado por: H. MEDELLIN	<b>SOPORTE EJE Y</b>	Idioma E	
<b>Diseño y construcción de un sistema de manipulación X, Y, Z de propósito general</b>			Doc. No.:	002-010	Hoja 1/2
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO					



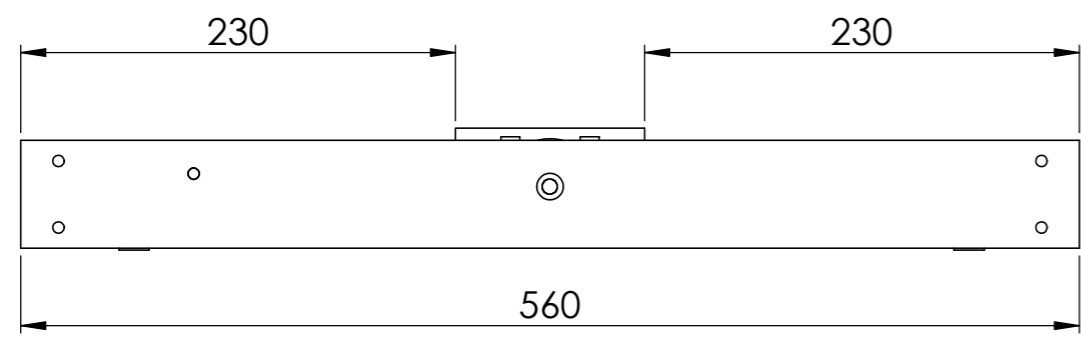
N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANT.
53	008-001	SOPORTE ACOPLAMIENTO PARA MOTOR EJE Y	1
54	009-001	SOPORTE ESTRUCTURAL DE ACOPLAMIENTO A MOTOR EJE Y	1
55	010-001	GUÍA LINEAL EJE Y	2
56	011-001	HUSILLO DE BOLAS EJE Y	1
57	004-000	MOTOR A PASOS EJE Y	1
58	005-000	RODAMIENTO LINEAL	2
59	006-000	TUERCA EMBALERADA	1
60	034-001	SOPORTE DE NYLAMID PARA TUERCA DE BOLAS	1
61	009-002	SOPORTE FINAL DE CARRERA EJE Y	1
62	007-001	ACOPLAMIENTO OLDHAM PARA HUSILLO DE BOLAS	1
63	007-003	ACOPLAMIENTO OLDHAM PARA FLECHA DE MOTOR	1
64	007-002	BUJE DE ACOPLAMIENTO OLDHAM	1
65	100-016	BALERO 8mm	2
66	100-013	TORNILLO HEXAGONAL M6x25	2
67	100-011	ARANDELA M6	2
68	100-015	TORNILLO CABEZA RANURADA M5x10	4
69	054-001	SOPORTE PARA SENSORES EJE Y	1

**NOTA:**  
 A menos que se especifique lo contrario, todas las dimensiones están expresadas en milímetros.  
 A fin de evitar errores durante el funcionamiento del manipulador, se deben respetar tolerancias dimensionales para el ensamble de los componentes de  $\pm 0.25\text{mm}$

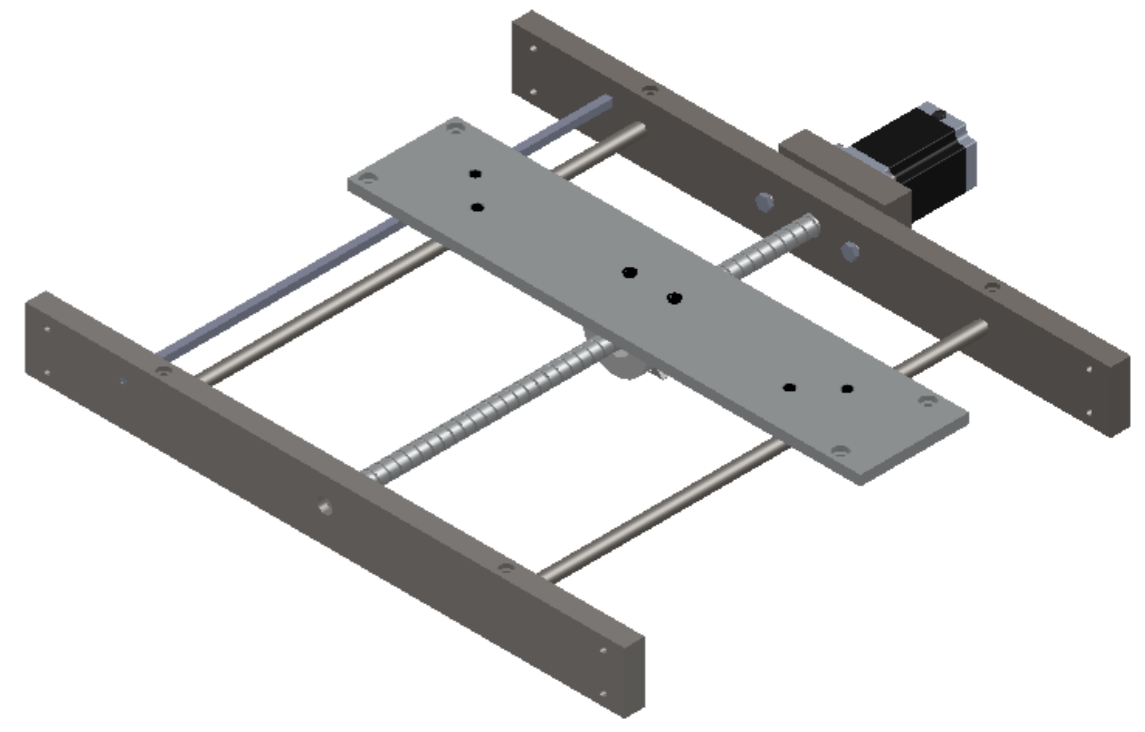
<b>POSGRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA</b>		Diseñado por: A. JARAMILLO	Título: <b>SOPORTE EJE Y</b>	Formato A3	
Revisión: 0	Fecha de creación: 29/06/2013	Aprobado por: H. MEDELLIN	Doc. No.: 002-010	Idioma E	
<b>Diseño y construcción de un sistema de manipulación X, Y, Z de propósito general</b>					Hoja 2/2
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO					



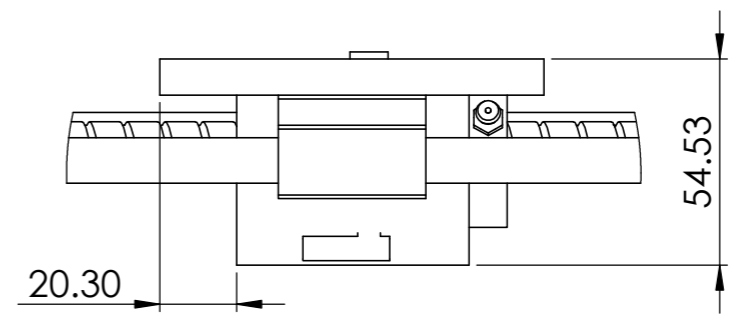
VISTA SUPERIOR



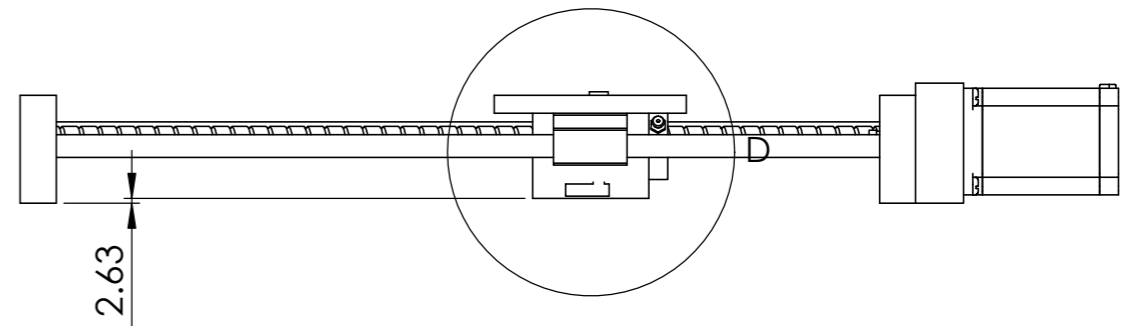
VISTA FRONTAL



VISTA ISOMÉTRICA



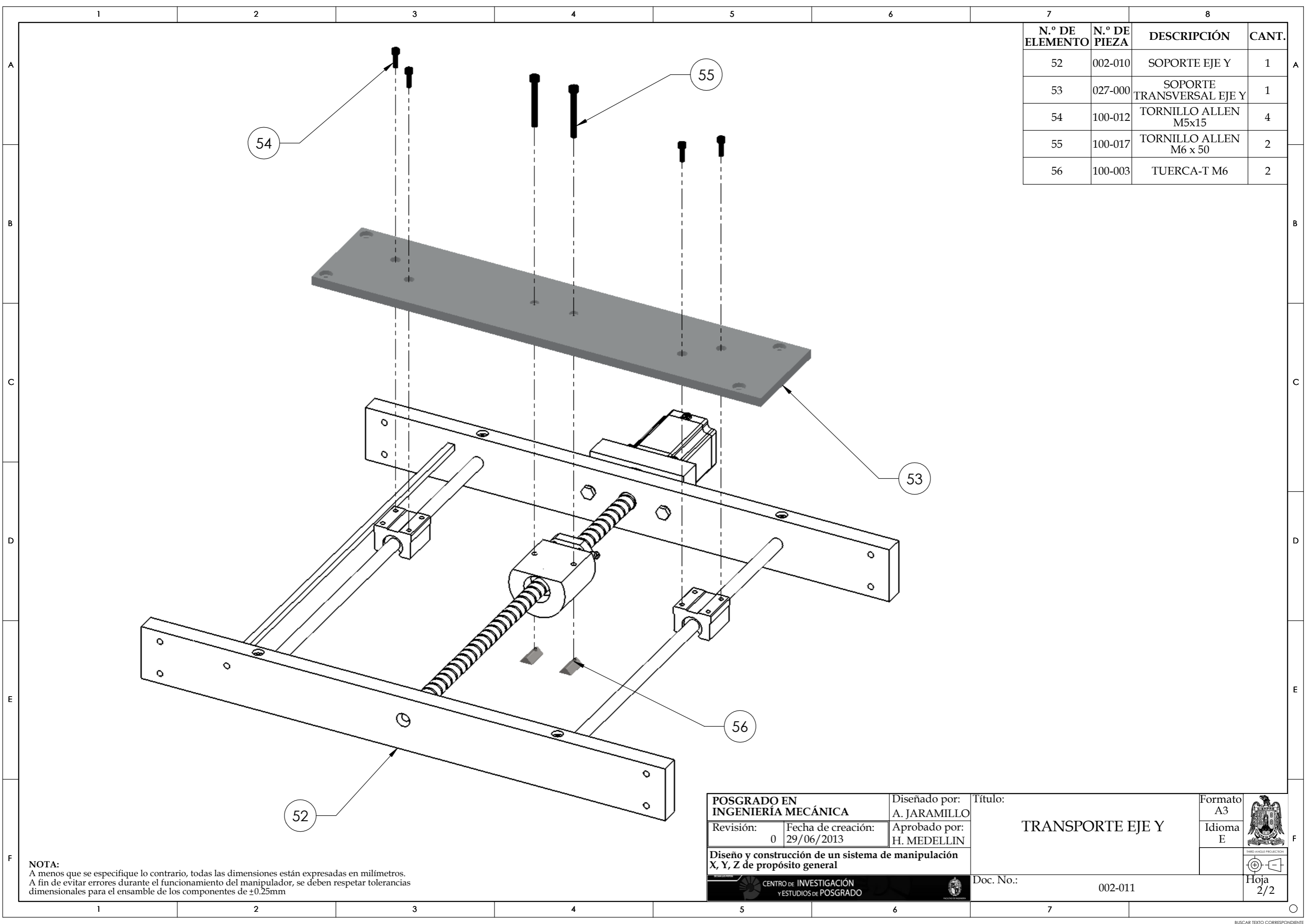
DETALLE D  
ESCALA 1 : 2



VISTA LATERAL DERECHA

**NOTA:**  
A menos que se especifique lo contrario, todas las dimensiones están expresadas en milímetros.  
A fin de evitar errores durante el funcionamiento del manipulador, se deben respetar tolerancias dimensionales para el ensamble de los componentes de  $\pm 0.25\text{mm}$

<b>POSGRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA</b>		Diseñado por: <b>A. JARAMILLO</b>	Título: <b>TRANSPORTE EJE Y</b>	Formato A3	
Revisión: 0	Fecha de creación: 29/06/2013	Aprobado por: <b>H. MEDELLIN</b>	Doc. No.: 002-011	Idioma E	
<b>Diseño y construcción de un sistema de manipulación X, Y, Z de propósito general</b>					Hoja 1/2
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO					



7		8	
N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANT.
52	002-010	SOPORTE EJE Y	1
53	027-000	SOPORTE TRANSVERSAL EJE Y	1
54	100-012	TORNILLO ALLEN M5x15	4
55	100-017	TORNILLO ALLEN M6 x 50	2
56	100-003	TUERCA-T M6	2

A  
B  
C  
D  
E  
F

A  
B  
C  
D  
E  
F

**NOTA:**  
A menos que se especifique lo contrario, todas las dimensiones están expresadas en milímetros.  
A fin de evitar errores durante el funcionamiento del manipulador, se deben respetar tolerancias dimensionales para el ensamble de los componentes de  $\pm 0.25\text{mm}$

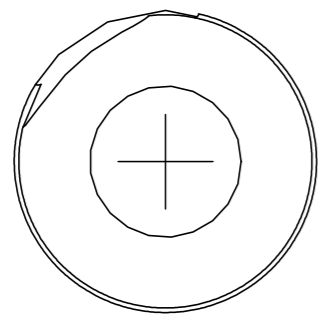
<b>POSGRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA</b>		Diseñado por: A. JARAMILLO	Título:  <b>TRANSPORTE EJE Y</b>	Formato A3	
Revisión: 0	Fecha de creación: 29/06/2013	Aprobado por: H. MEDELLIN	Doc. No.:  002-011	Idioma E	
Diseño y construcción de un sistema de manipulación X, Y, Z de propósito general					Hoja 2/2
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO					

### A.3. Eje Z

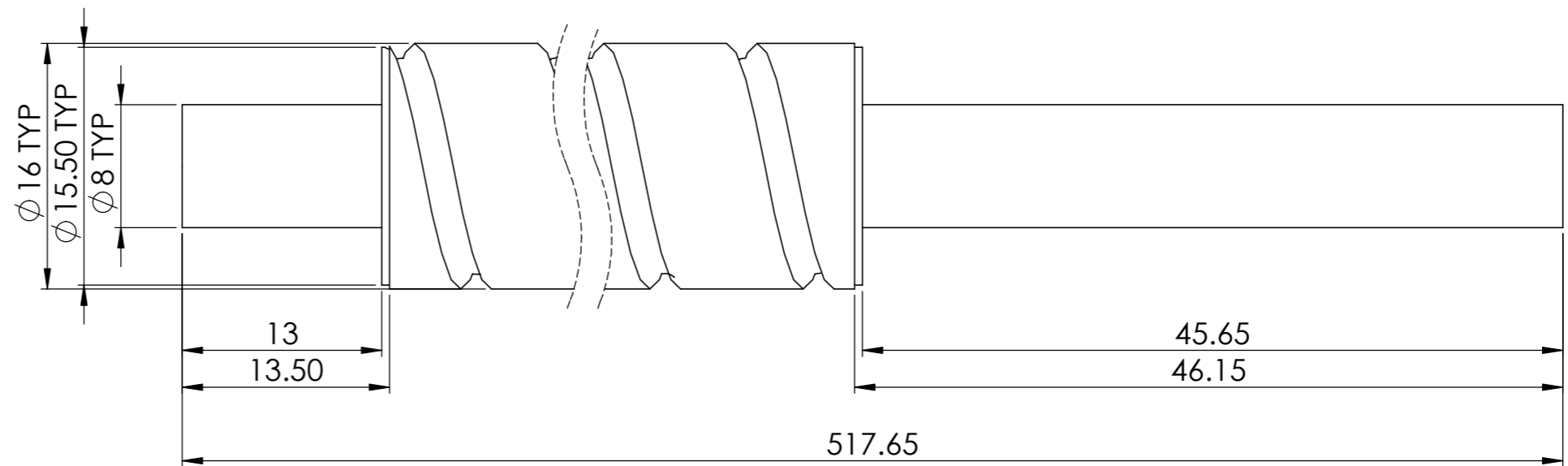
Husillo de bolas  
16mm x 10mm



VISTA ISOMÉTRICA



VISTA FRONTAL



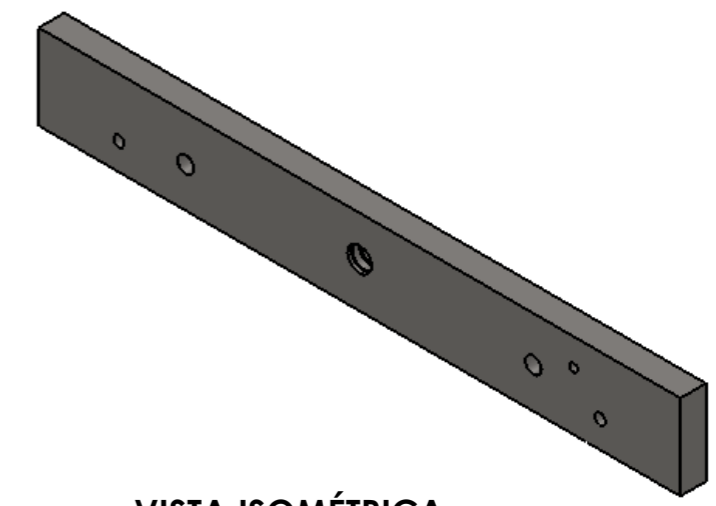
LATERAL DERECHA

**NOTA:**  
A menos que se especifique lo contrario, todas las dimensiones están expresadas en milímetros.

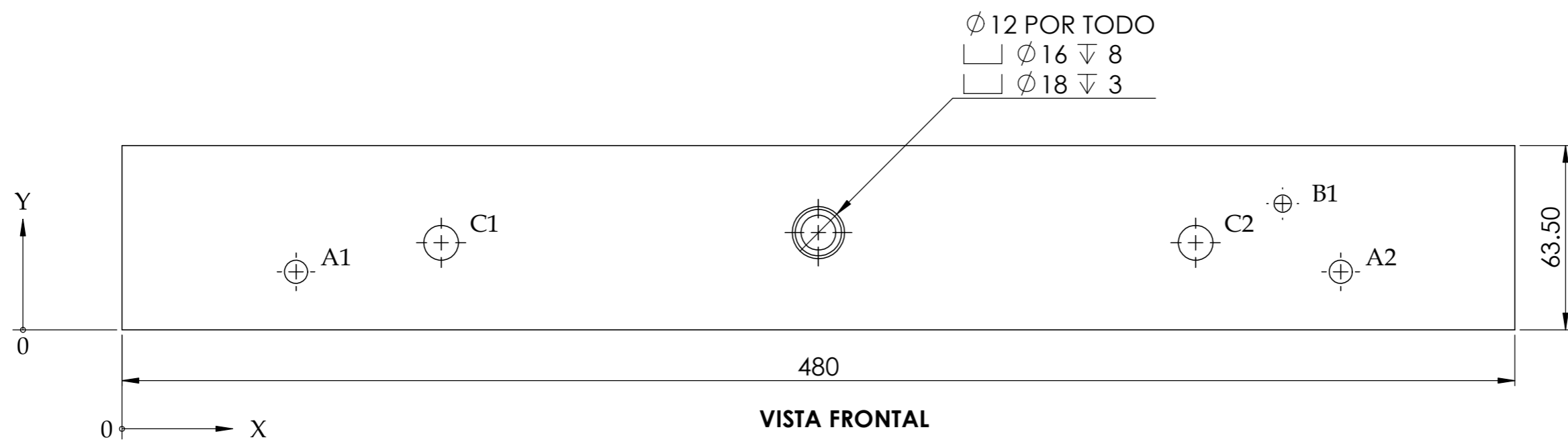
POSGRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA		Diseñado por: A. JARAMILLO	Título:	Formato A3	
Revisión: 0	Fecha de creación: 24/02/2013	Aprobado por: H. MEDELLIN	HUSILLO DE BOLAS EJE Z	Idioma E	
Diseño y construcción de un sistema de manipulación X, Y, Z de propósito general			Doc. No.:	13-002	Hoja 1/1
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO					



Acero rolado en frío  
 AISI 1018  
 Solera: 2.5" x 0.75"





VISTA ISOMÉTRICA



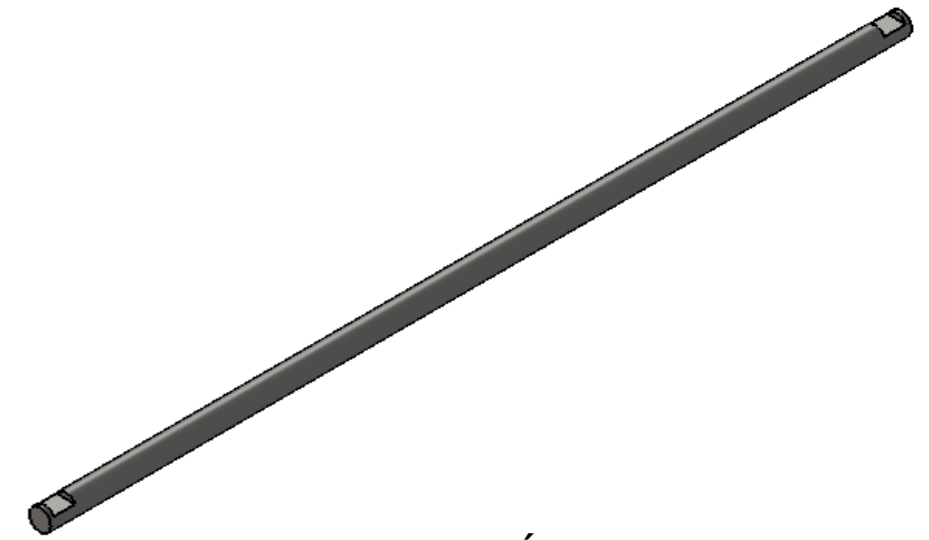
VISTA FRONTAL

RÓTULO	UBIC X	UBIC Y	TAMAÑO
A1	60	20	Ø 8 POR TODO
A2	420	20	Ø 8 POR TODO
B1	400	43.50	Ø 6 POR TODO
C1	110	30	Ø 12 ∇ 15
C2	370	30	Ø 12 ∇ 15

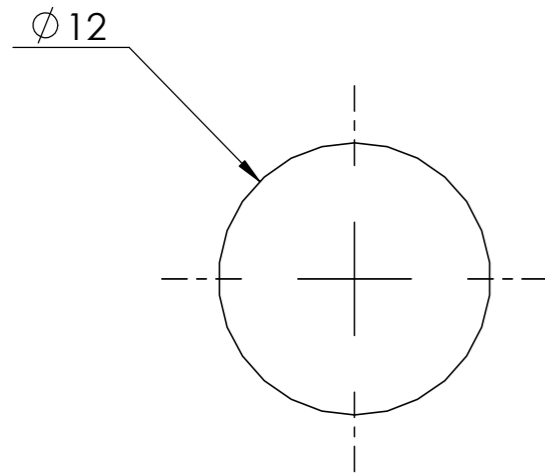
<b>POSGRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA</b> Revisión: 0    Fecha de creación: 24/02/2013		Diseñado por: A. JARAMILLO Aprobado por: H. MEDELLIN	Título: <b>SOPORTE INFERIOR EJE Z</b>	Formato: A3 Idioma: E	 Hoja 1/1
Diseño y construcción de un sistema de manipulación X, Y, Z de propósito general CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO			Doc. No.: 018-002		

NOTA:  
 A menos que se especifique lo contrario, todas las dimensiones están expresadas en milímetros.

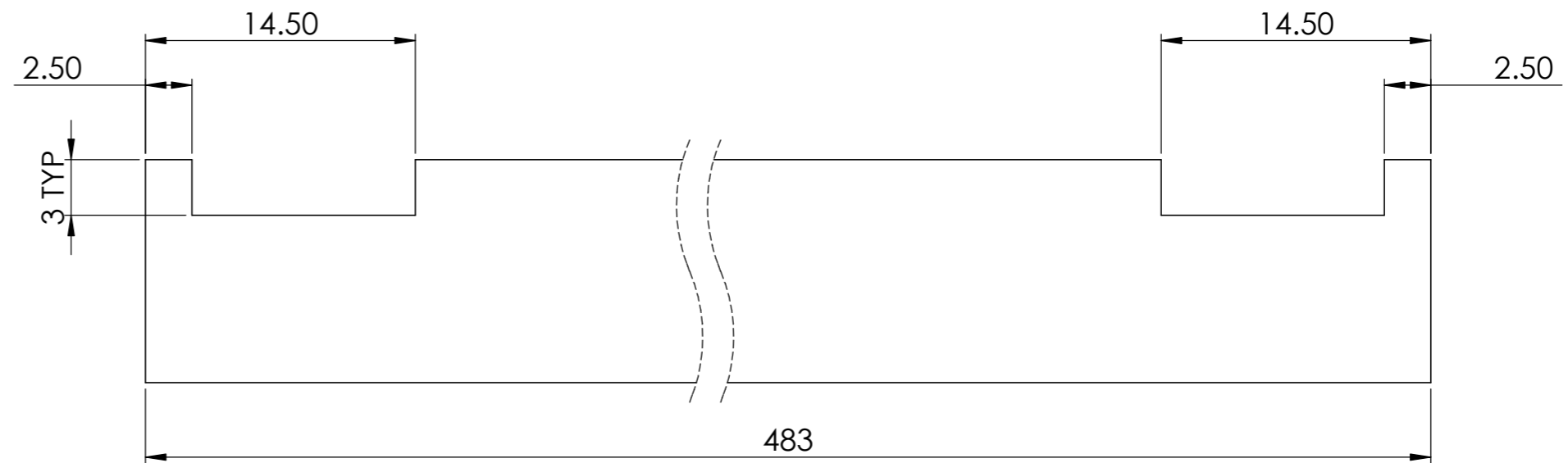
Acero rolado en frío  
 AISI 1018  
 Barra redonda de 12mm



VISTA ISOMÉTRICA






VISTA FRONTAL

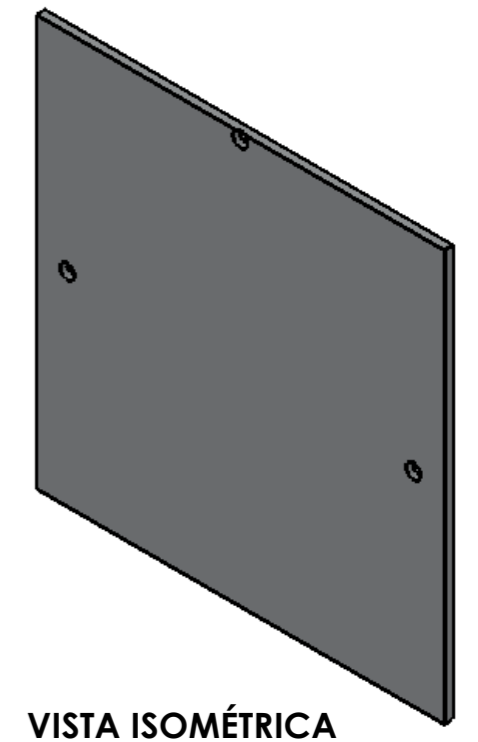
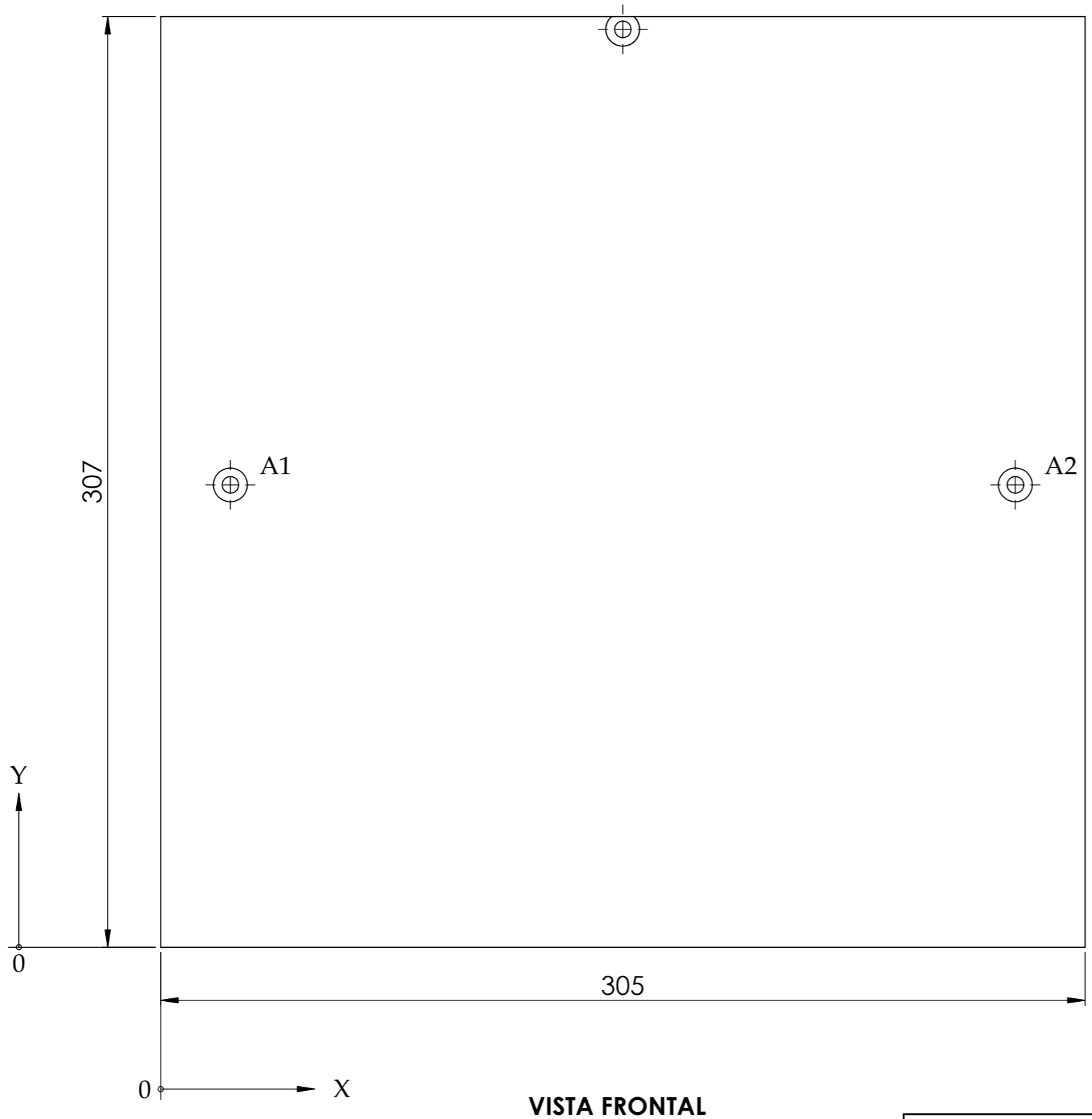


LATERAL DERECHA

NOTA:  
 A menos que se especifique lo contrario, todas las dimensiones están expresadas en milímetros.

<b>POSGRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA</b>		Diseñado por: A. JARAMILLO	Título: <b>GUIA LINEAL EJE Z</b>	Formato A3	
Revisión: 0	Fecha de creación: 24/02/2013	Aprobado por: H. MEDELLIN		Idioma E	
Diseño y construcción de un sistema de manipulación X, Y, Z de propósito general					
			Doc. No.: 022-001	Hoja 1/1	

Aleación de Aluminio 6061  
Placa de 1/4"



VISTA ISOMÉTRICA

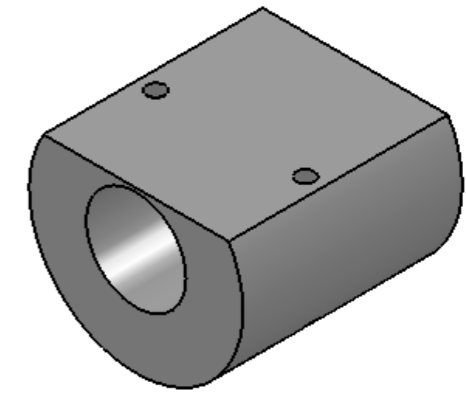
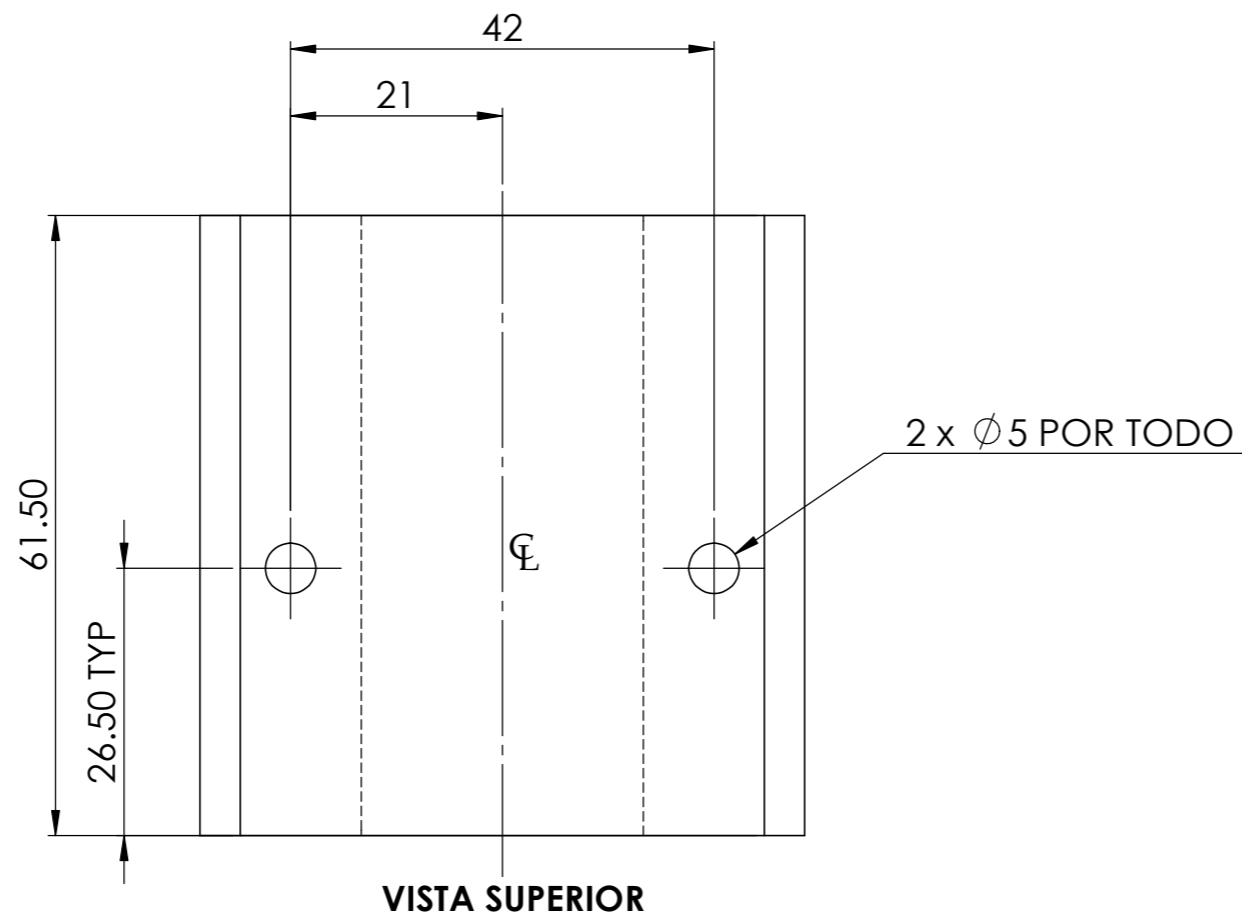
RÓTULO	UBIC X	UBIC Y	TAMAÑO
A1	23	152.50	Ø 5.50 POR TODO ✓ Ø 11.20 X 90°
A2	282	152.50	Ø 5.50 POR TODO ✓ Ø 11.20 X 90°

<b>POSGRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA</b> Revisión: 0      Fecha de creación: 17/02/2013		Designed: A. JARAMILLO Approved: H. MEDELLIN
<b>Diseño y construcción de un sistema de manipulación X, Y, Z de propósito general</b>		
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO		

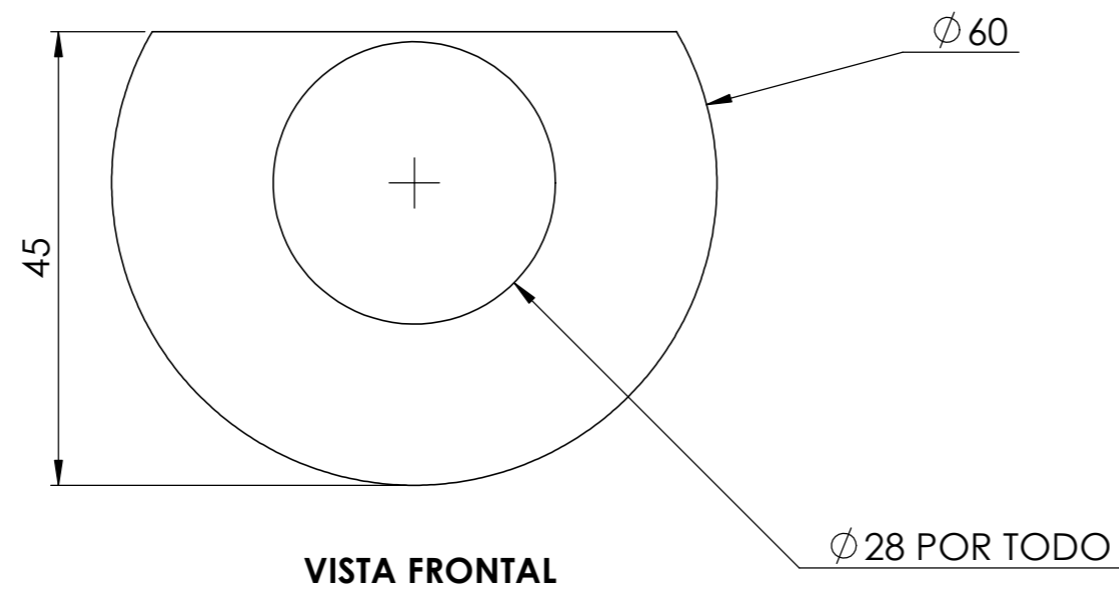
<b>Título:</b> PLACA PLATAFORMA EJE Z		Formato: A3 Idioma: E
Doc. No.: 032-001		Hoja 1/1 

**NOTA:**  
A menos que se especifique lo contrario, todas las dimensiones están expresadas en milímetros.

Nylamid Blanco  
Barra redonda de 60mm



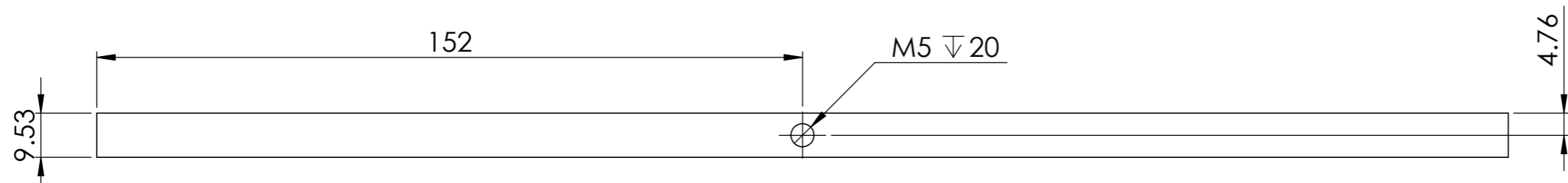
VISTA ISOMÉTRICA



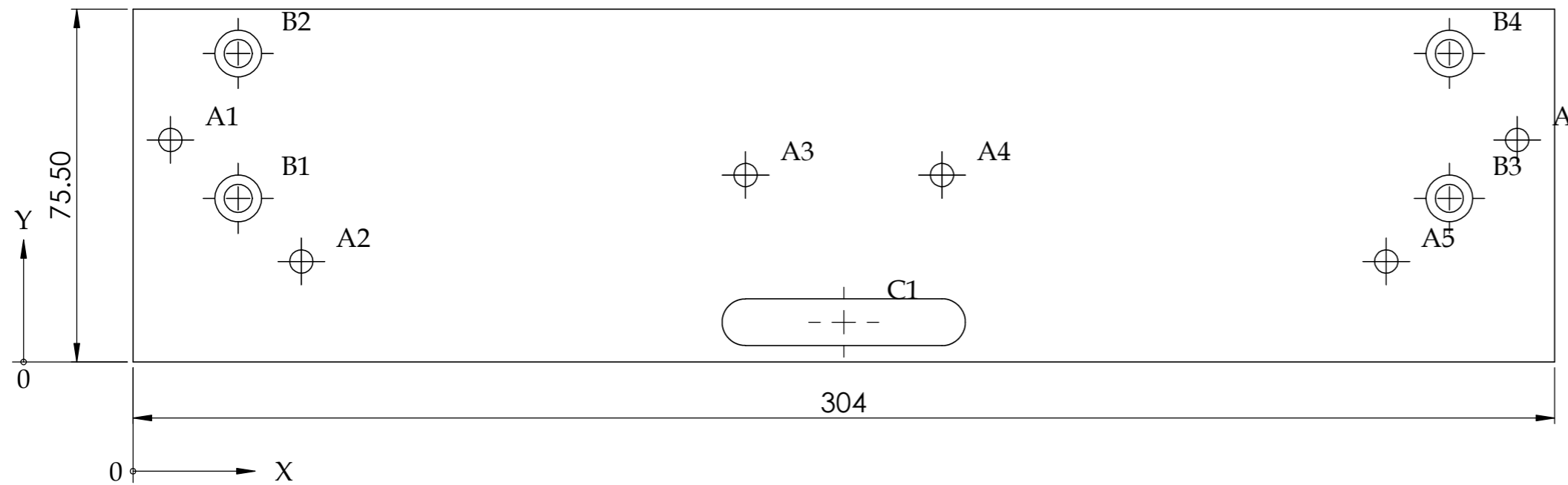
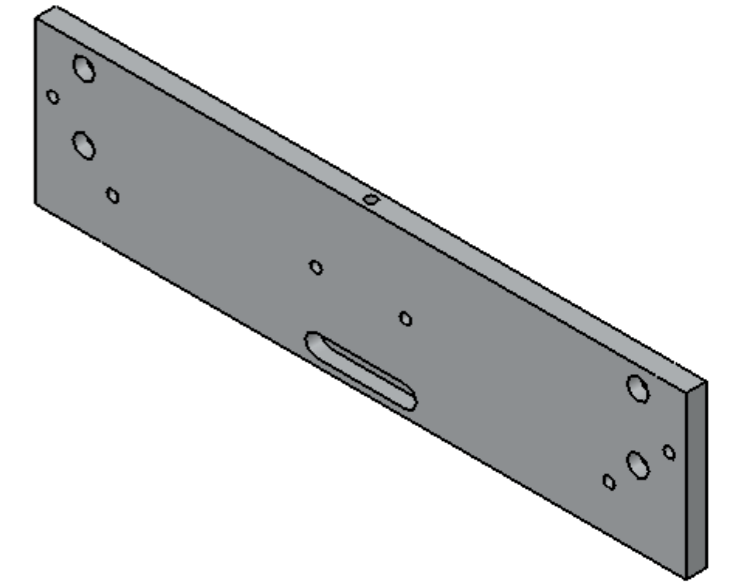
NOTA:  
A menos que se especifique lo contrario, todas las dimensiones están expresadas en milímetros.

POSGRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA		Diseñado por: A. JARAMILLO	Título:	Formato A3	
Revisión: 0	Fecha de creación: 18/02/2013	Aprobado por: H. MEDELLIN	SOPORTE DE NYLAMID PARA TUERCA DE BOLAS	Idioma E	
Diseño y construcción de un sistema de manipulación X, Y, Z de propósito general				Doc. No.: 034-001	
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO					

**Aleación de Aluminio 6061**  
**Solera: 3" x 3/8"**



VISTA SUPERIOR



VISTA FRONTAL

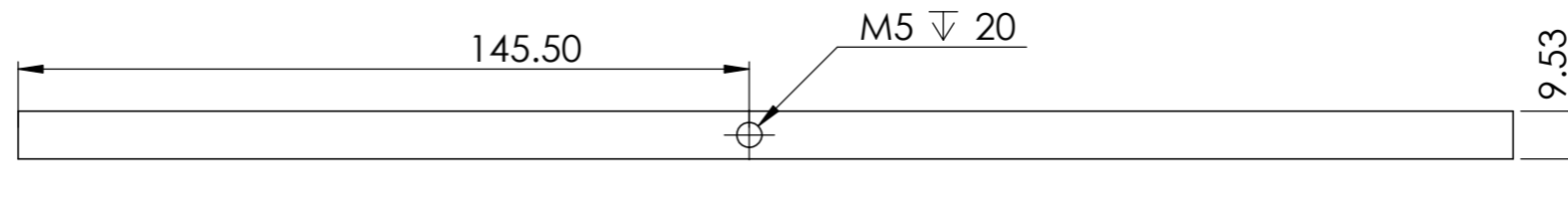
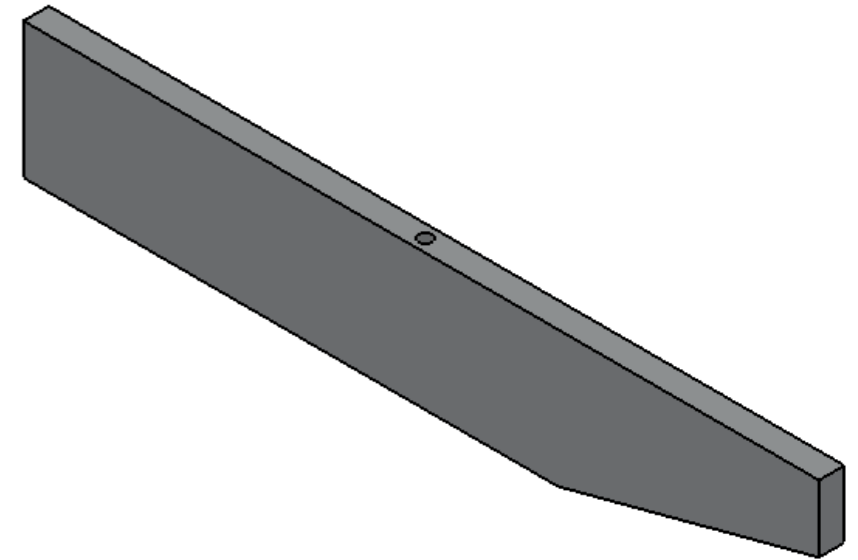
RÓTULO	UBIC X	UBIC Y	TAMAÑO
A1	8	47.50	Ø5 POR TODO
A2	36	21.50	Ø5 POR TODO
A3	131	40	Ø5 POR TODO
A4	173	40	Ø5 POR TODO
A5	268	21.50	Ø5 POR TODO
A6	296	47.50	Ø5 POR TODO
B1	22.50	35	Ø6 POR TODO └─┘ Ø10 ∇ 6
B2	22.50	66	Ø6 POR TODO └─┘ Ø10 ∇ 6
B3	281.50	35	Ø6 POR TODO └─┘ Ø10 ∇ 6
B4	281.50	66	Ø6 POR TODO └─┘ Ø10 ∇ 6
C1	131	8.50	└─┘ 10 X 52 ∇ 7.7

**NOTA:**  
 A menos que se especifique lo contrario, todas las dimensiones están expresadas en milímetros.

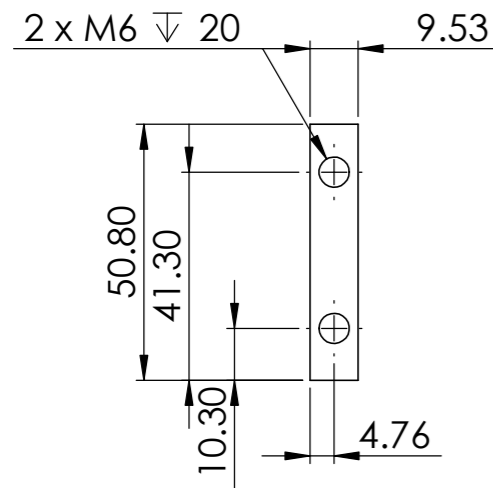
<b>POSGRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA</b>		Designed: A. JARAMILLO
Revisión: 0	Fecha de creación: 17/02/2013	Approved: H. MEDELLIN
Diseño y construcción de un sistema de manipulación X, Y, Z de propósito general		
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO		

Título: <b>SOPORTE DE PLATAFORMA EJE Z</b>		Formato A3
		Idioma E
Doc. No.: 050-001		Hoja 1/1

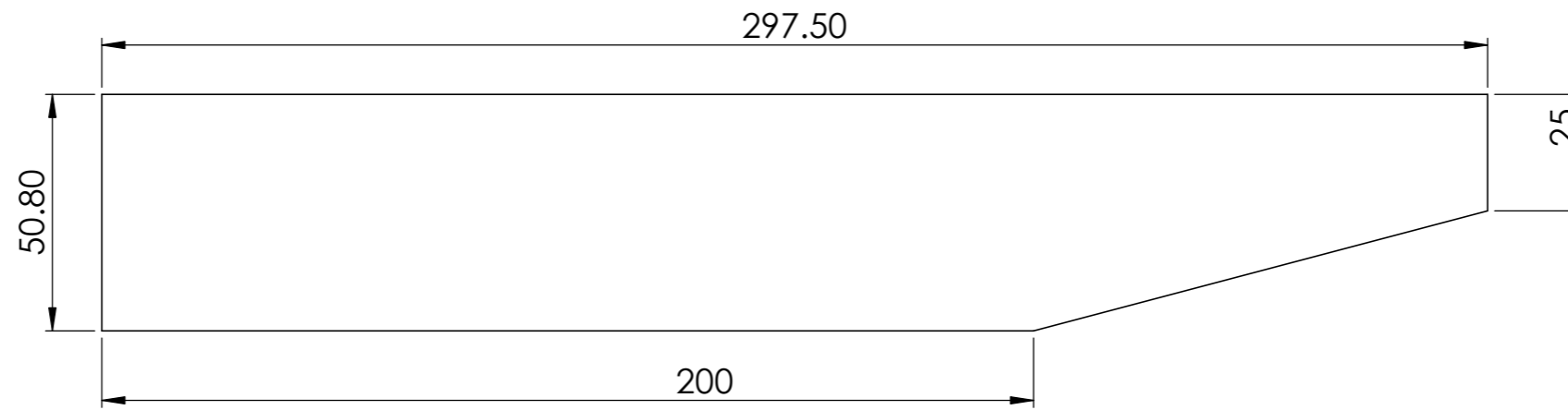
Aleación de Aluminio 6061  
Solera: 2" x 3/8"



VISTA SUPERIOR





VISTA LATERAL IZQUIERDA

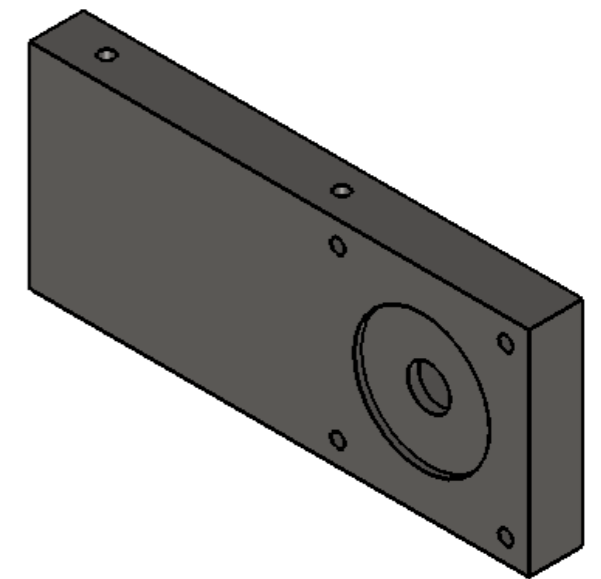
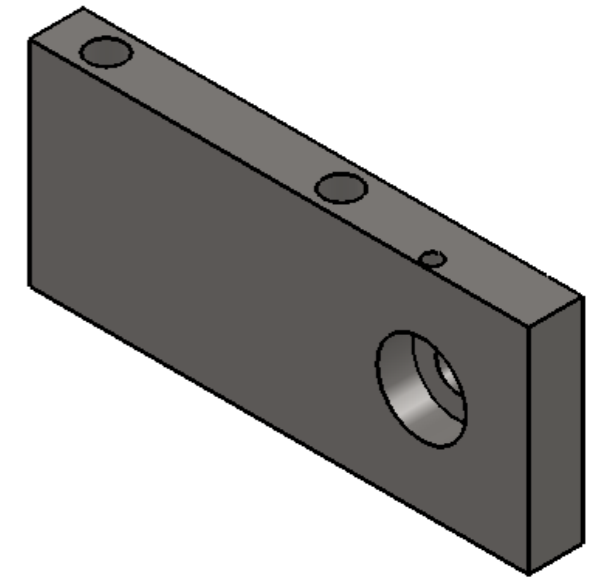
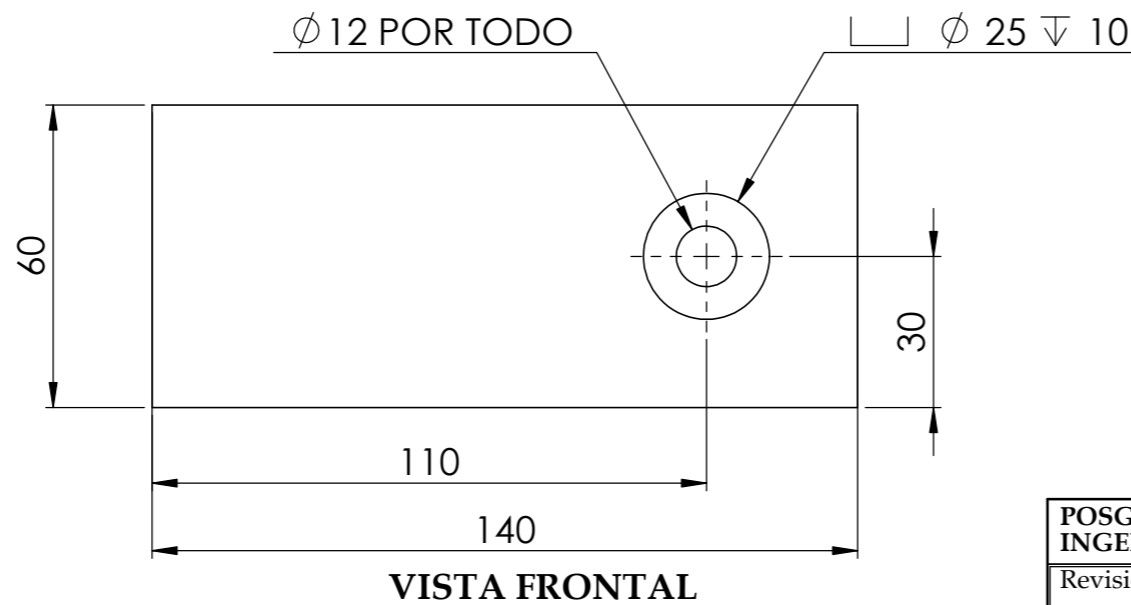
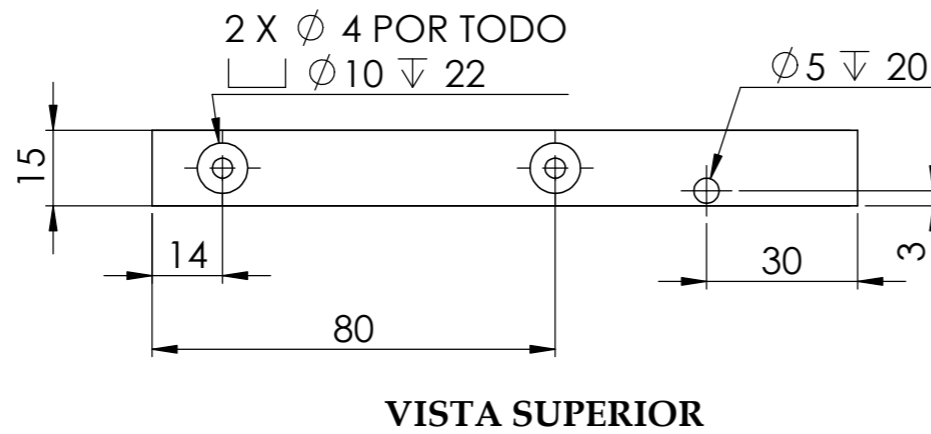
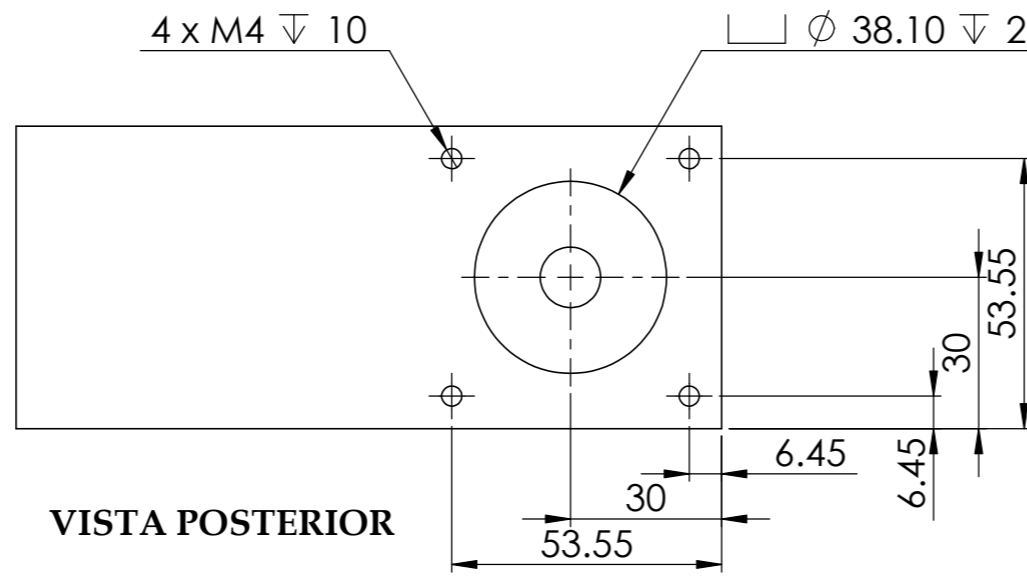


VISTA FRONTAL

NOTA:  
A menos que se especifique lo contrario, todas las dimensiones están expresadas en milímetros.

<b>POSGRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA</b>		Designed: A. JARAMILLO	<b>Título:</b> CARTABON DE PLATAFORMA EJE Z	Formato A3	
Revisión: 0	Fecha de creación: 17/02/2013	Approved: H. MEDELLIN		Idioma E	
<b>Diseño y construcción de un sistema de manipulación X, Y, Z de propósito general</b>			<b>Doc. No.:</b> 051-001	Hoja 1/1	
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO					

Aleación de Aluminio 6061  
Solera: 60mm x 15mm

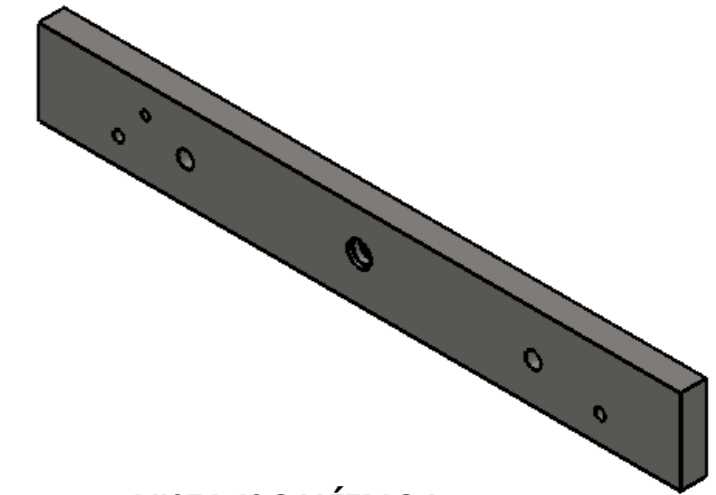


VISTA ISOMÉTRICA

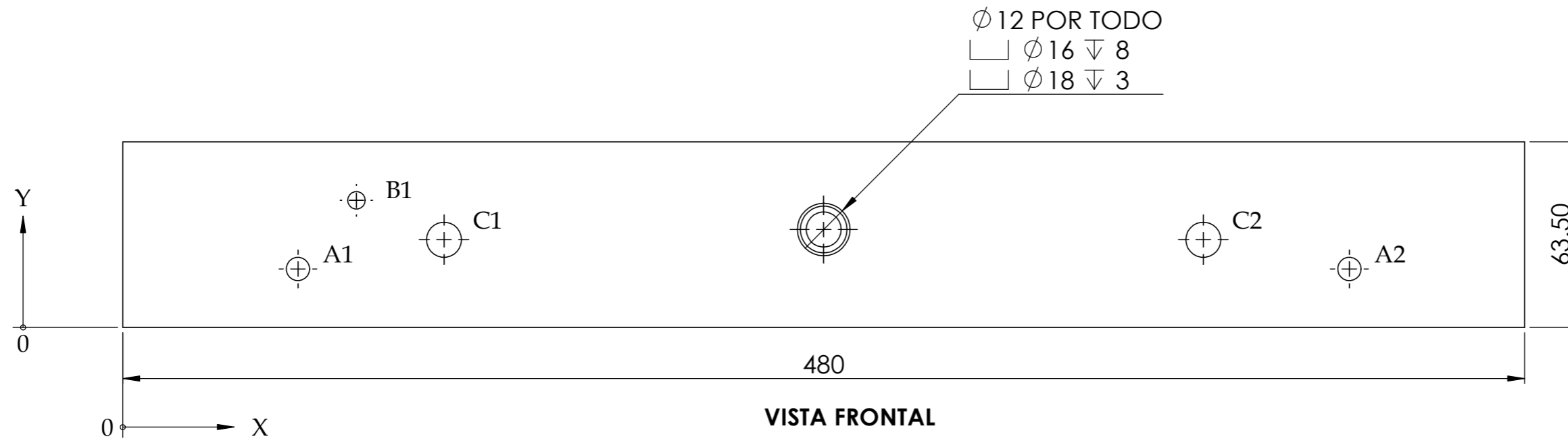
NOTA:  
A menos que se especifique lo contrario, todas las dimensiones están expresadas en milímetros.

POSGRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA		Designed: A. JARAMILLO	Título: SOPORTE MOTOR EJE Z	Formato A3	
Revisión: 0	Fecha de creación: 12/06/2013	Approved: H. MEDELLIN		Idioma E	
Diseño y construcción de un sistema de manipulación X, Y, Z de propósito general					THIRD ANGLE PROJECTION
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO			Doc. No.:	052-001	Hoja 1/1

Acero rolado en frío  
 AISI 1018  
 Solera: 2.5" x 0.75"



VISTA ISOMÉTRICA



RÓTULO	UBIC X	UBIC Y	TAMAÑO
A1	60	20	$\phi 8$ POR TODO
A2	420	20	$\phi 8$ POR TODO
B1	80	43.50	$\phi 6$ POR TODO
C1	110	30	$\phi 12 \nabla 15$
C2	370	30	$\phi 12 \nabla 15$

<b>POSGRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA</b>		Diseñado por: A. JARAMILLO	Título: <b>SOPORTE SUPERIOR EJE Z</b>	Formato A3
Revisión: 0	Fecha de creación: 24/02/2013	Aprobado por: H. MEDELLIN		Idioma E
Diseño y construcción de un sistema de manipulación X, Y, Z de propósito general			Doc. No.: 053-001	
				Hoja 1/1

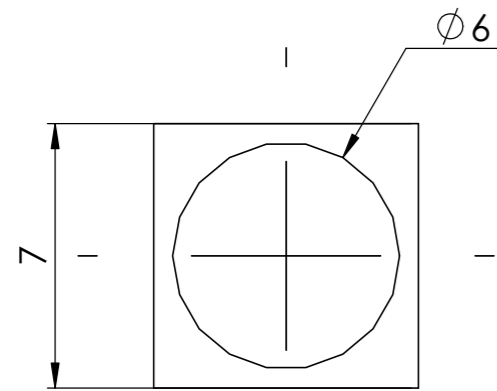
NOTA:  
 A menos que se especifique lo contrario, todas las dimensiones están expresadas en milímetros.



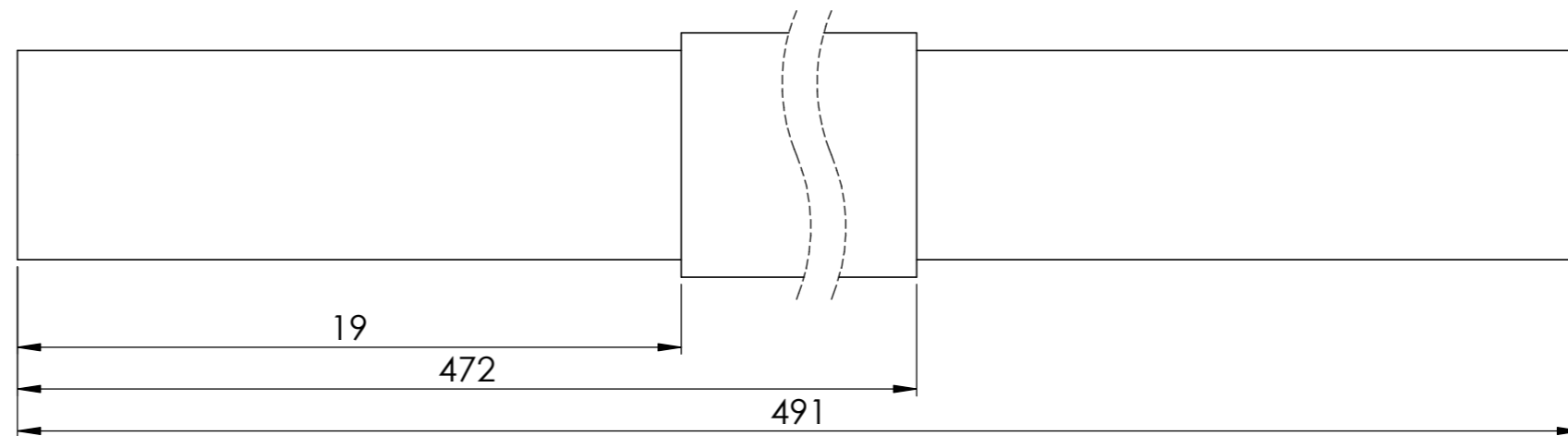
Aleación de Aluminio 6061  
Barra cuadrada de 7mm x 7mm



VISTA ISOMÉTRICA



VISTA FRONTAL

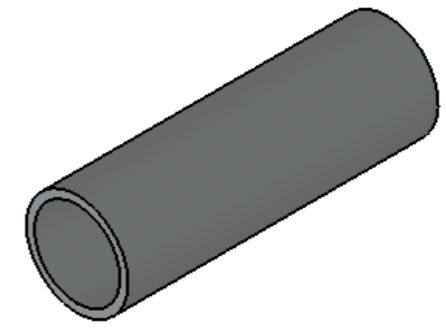


LATERAL DERECHA

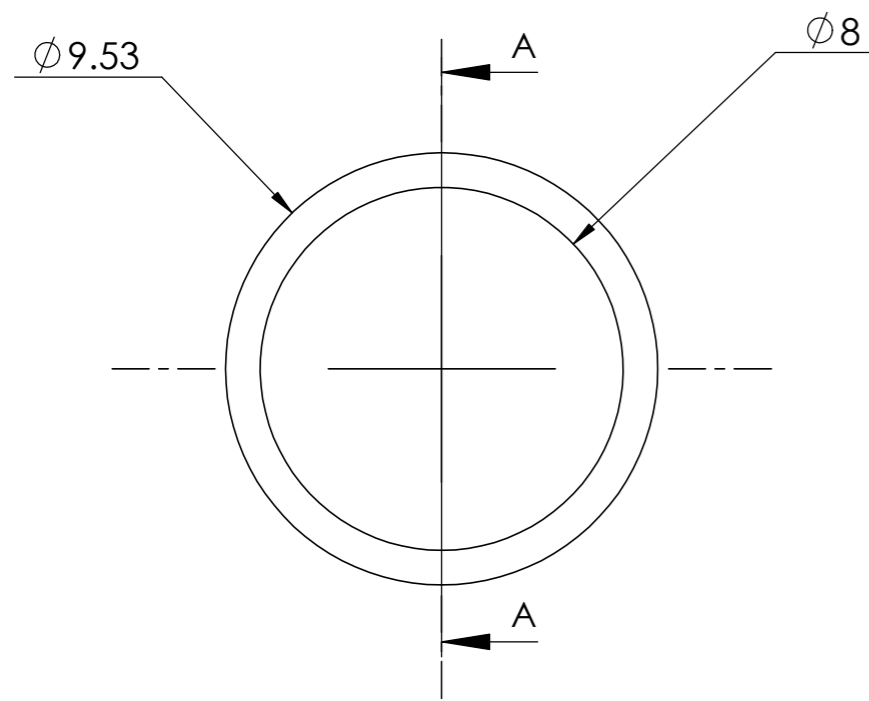
NOTA:  
A menos que se especifique lo contrario, todas las dimensiones están expresadas en milímetros.

POSGRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA		Diseñado por: A. JARAMILLO	Título:	Formato A3	
Revisión: 0	Fecha de creación: 24/02/2013	Aprobado por: H. MEDELLIN	SOPORTE PARA SENSORES EJE Z	Idioma E	
Diseño y construcción de un sistema de manipulación X, Y, Z de propósito general				Doc. No.: 054-001	 Hoja 1/1
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO					

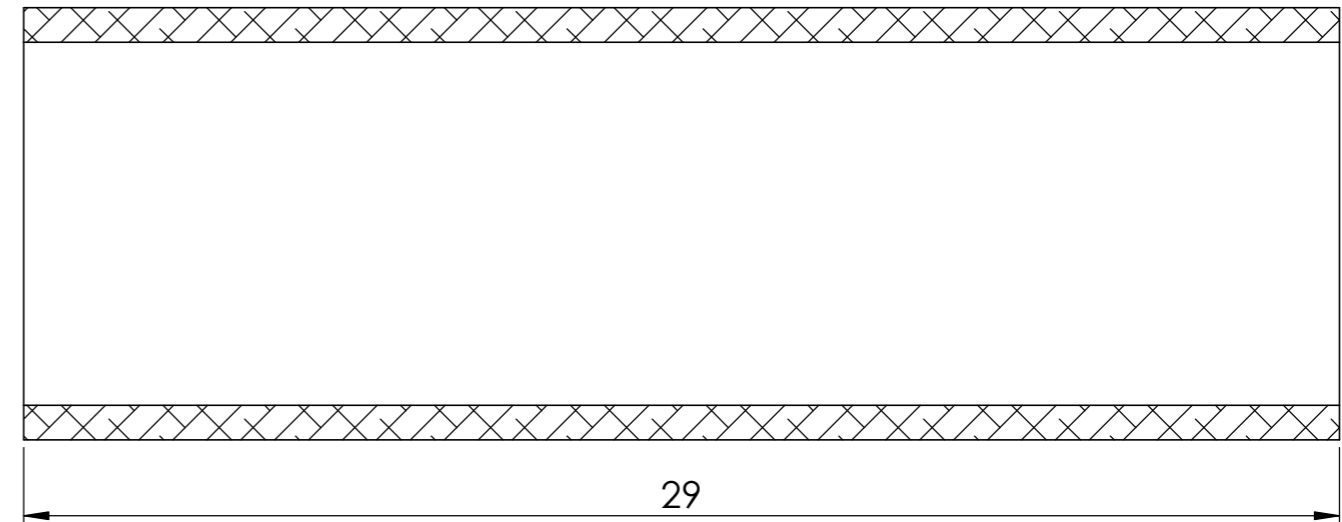
Aleación de Aluminio 6061  
Barra redonda de 3/8"



VISTA ISOMÉTRICA





VISTA FRONTAL

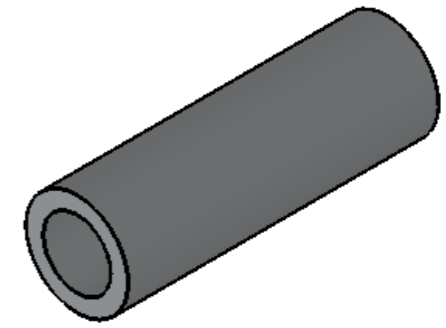


SECCIÓN A-A

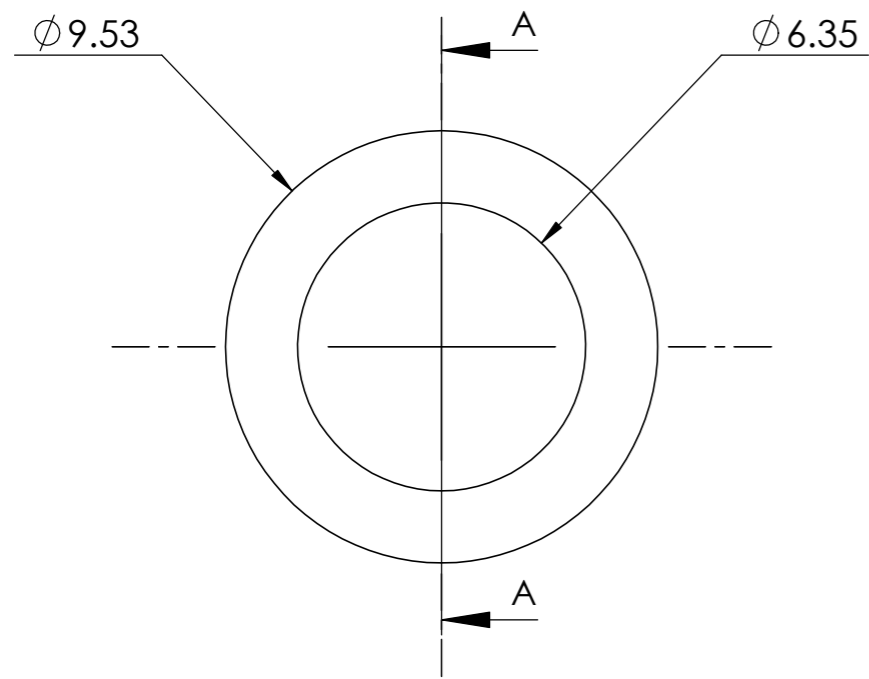
**NOTA:**  
A menos que se especifique lo contrario, todas las dimensiones están expresadas en milímetros.

<b>POSGRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA</b>		Diseñado por: A. JARAMILLO	Título:	Formato A3	
Revisión: 0	Fecha de creación: 24/02/2013	Aprobado por: H. MEDELLIN	<b>BUJE DE ACOPLAMIENTO HUSILLO POLEA EJE Z</b>	Idioma E	
Diseño y construcción de un sistema de manipulación X, Y, Z de propósito general				Doc. No.: 060-001	
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO					

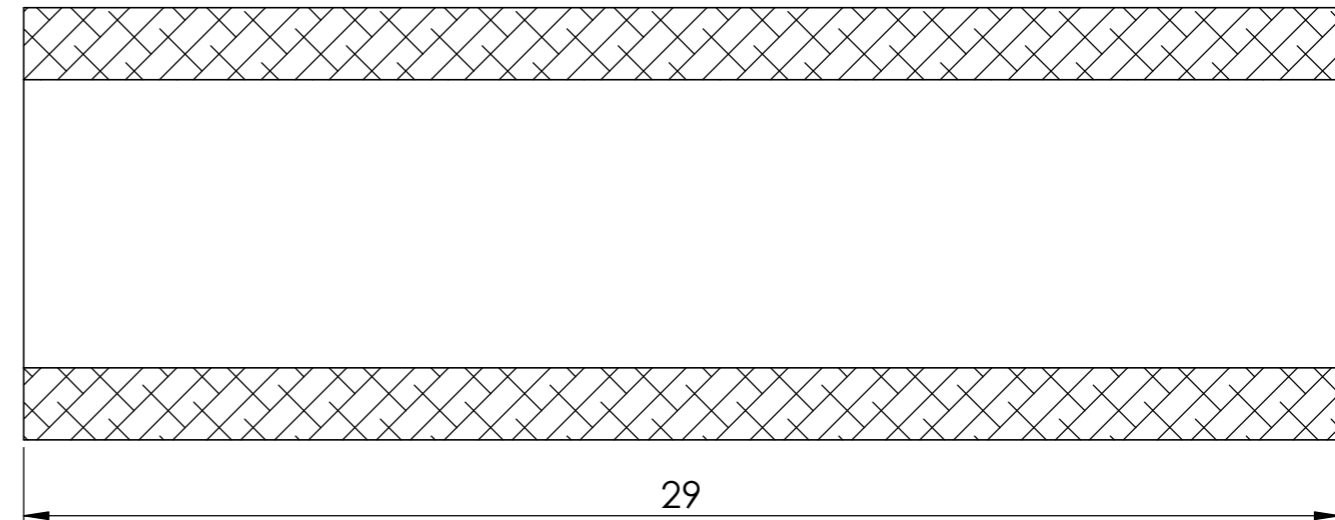
Aleación de Aluminio 6061  
Barra redonda de 3/8"



VISTA ISOMÉTRICA





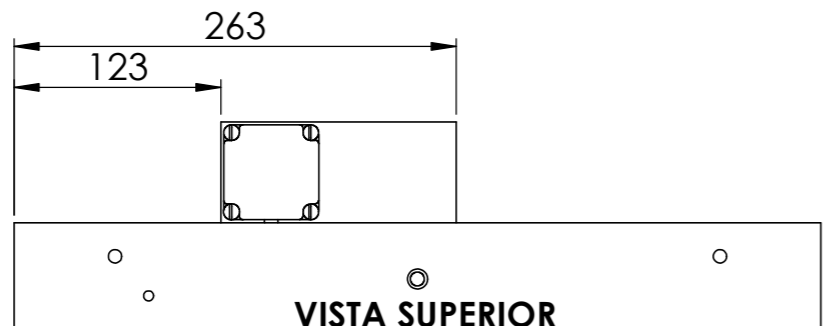
VISTA FRONTAL



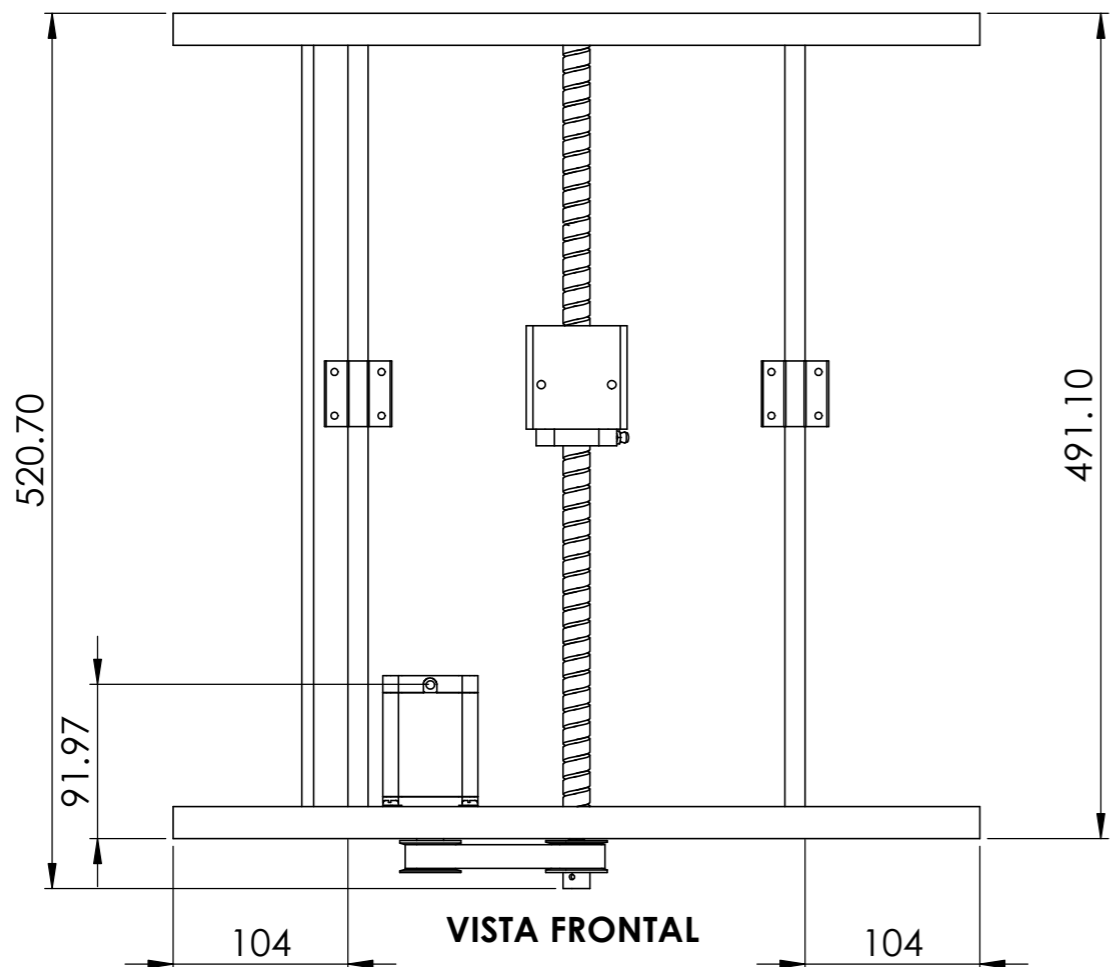
SECCIÓN A-A

**NOTA:**  
A menos que se especifique lo contrario, todas las dimensiones están expresadas en milímetros.

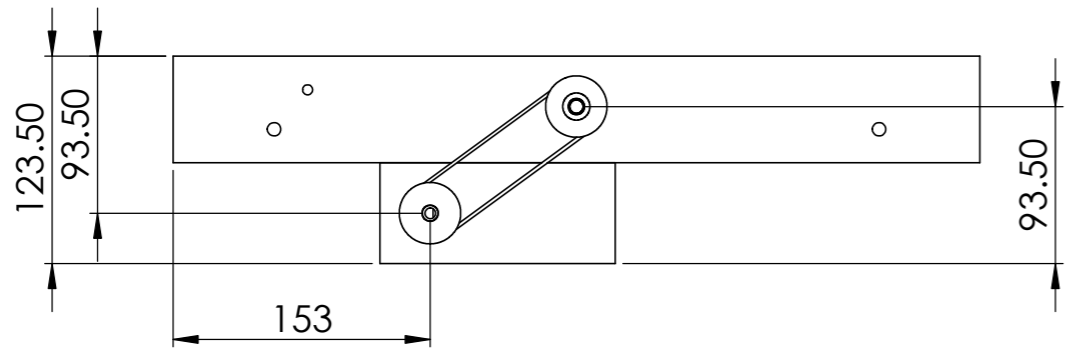
<b>POSGRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA</b>		Diseñado por: A. JARAMILLO	Título:	Formato A3	
Revisión: 0	Fecha de creación: 24/02/2013	Aprobado por: H. MEDELLIN	<b>BUJE DE ACOPLAMIENTO MOTOR POLEA EJE Z</b>	Idioma E	
Diseño y construcción de un sistema de manipulación X, Y, Z de propósito general				Doc. No.: 061-001	
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO					



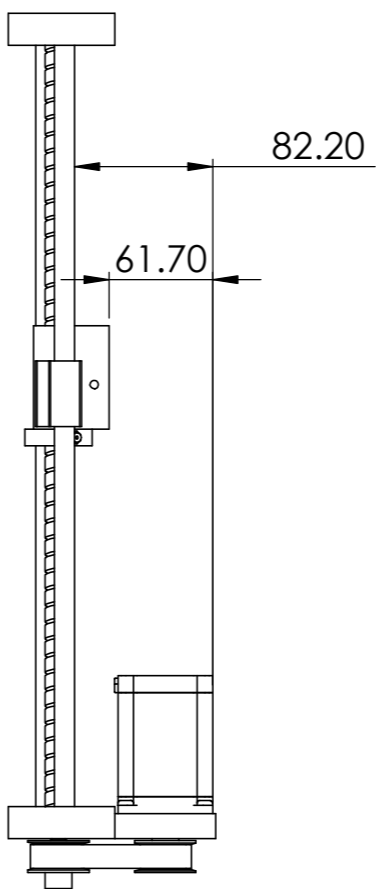
VISTA SUPERIOR



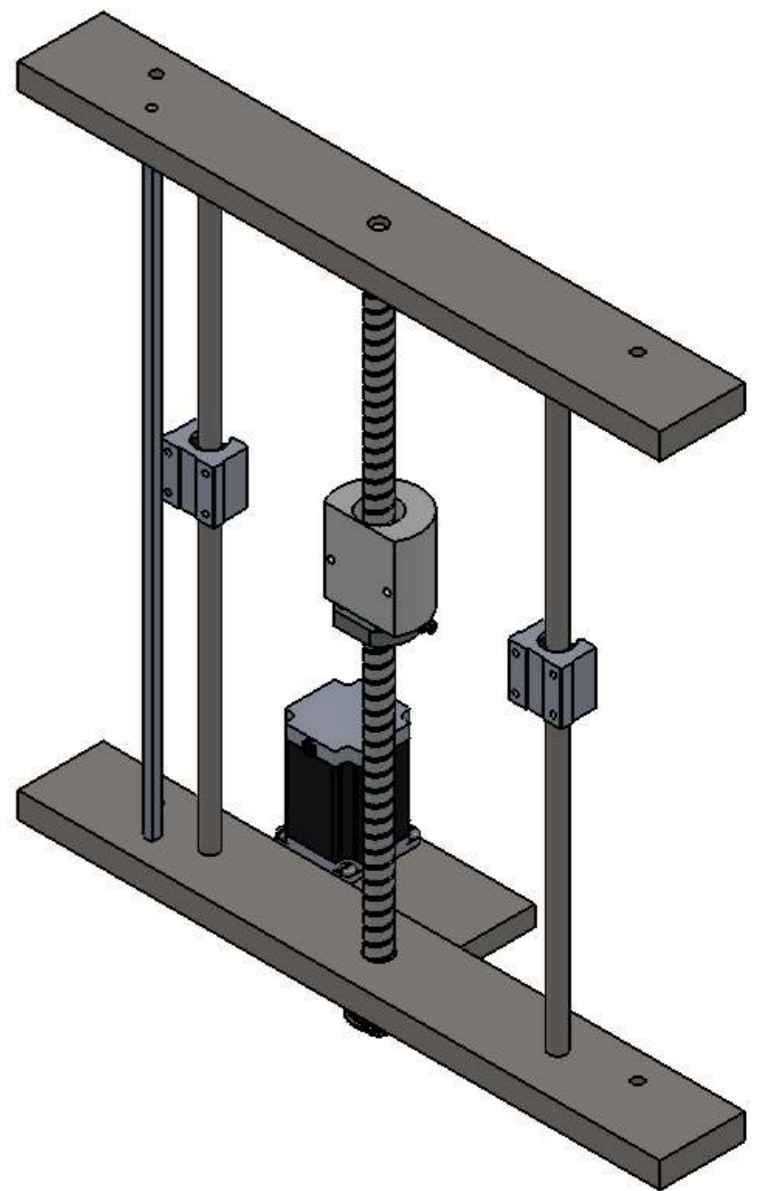
VISTA FRONTAL



VISTA INFERIOR



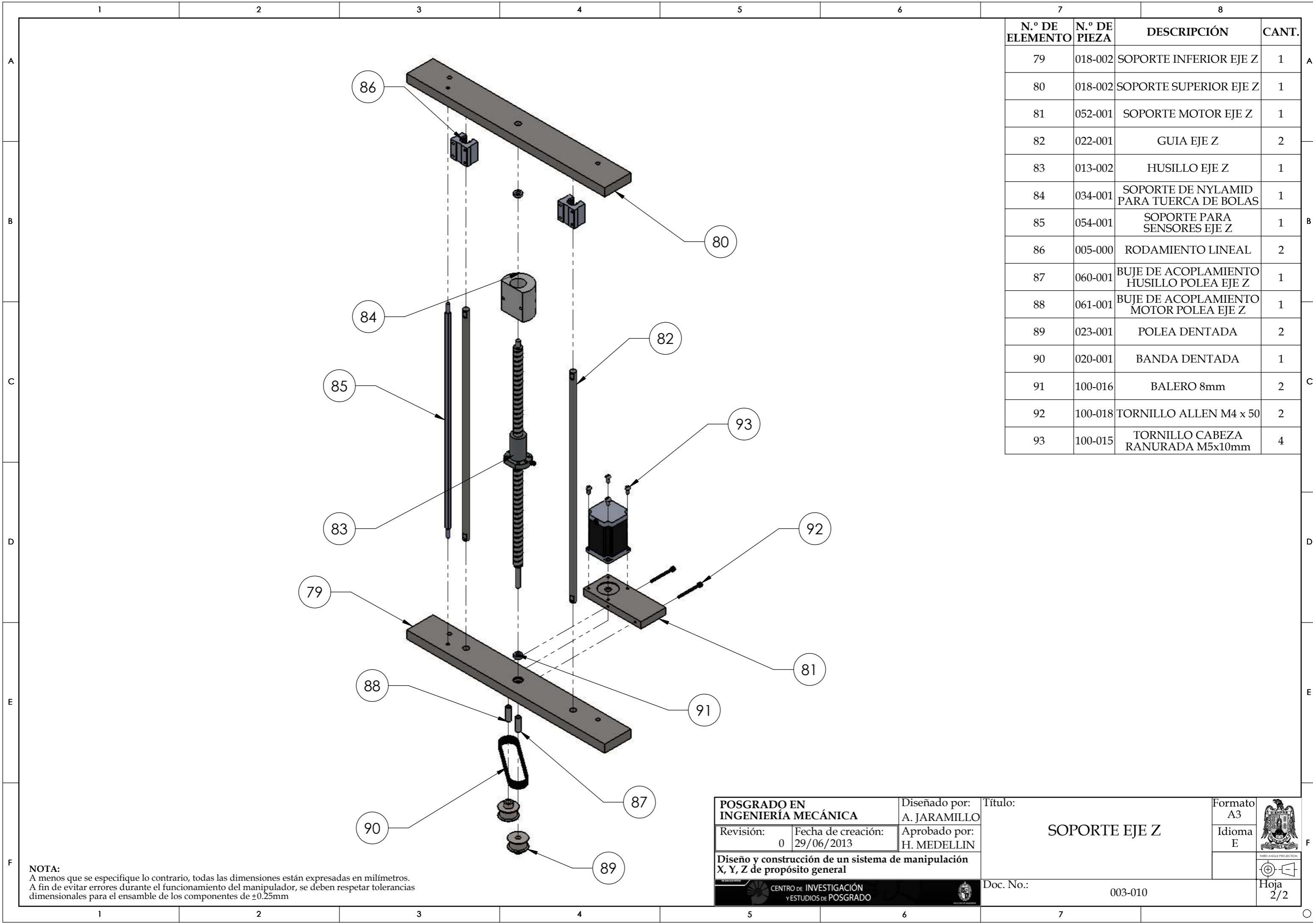
VISTA LATERAL DERECHA



VISTA ISOMÉTRICA

**NOTA:**  
 A menos que se especifique lo contrario, todas las dimensiones están expresadas en milímetros.  
 A fin de evitar errores durante el funcionamiento del manipulador, se deben respetar tolerancias dimensionales para el ensamble de los componentes de  $\pm 0.25\text{mm}$

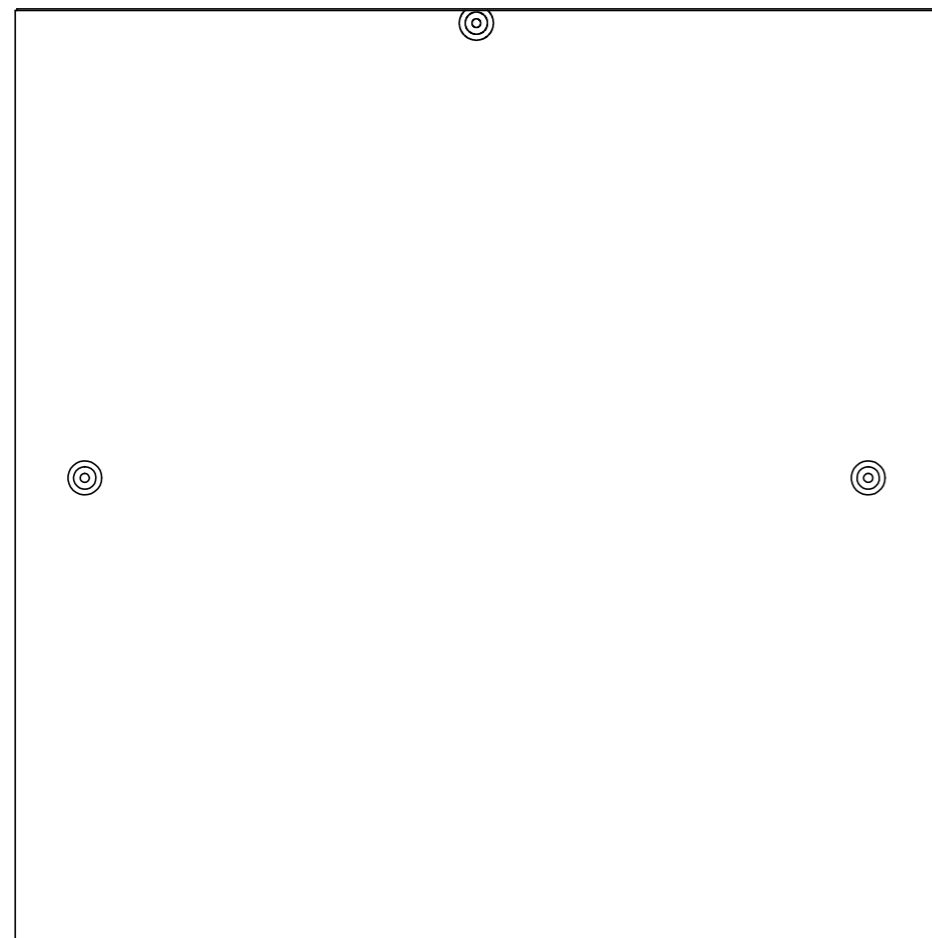
<b>POSGRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA</b>		Diseñado por: <b>A. JARAMILLO</b>	Título: <b>SOPORTE EJE Z</b>	Formato <b>A3</b>	
Revisión: <b>0</b>	Fecha de creación: <b>29/06/2013</b>	Aprobado por: <b>H. MEDELLIN</b>	Idioma <b>E</b>	Hoja <b>1/2</b>	
<b>Diseño y construcción de un sistema de manipulación X, Y, Z de propósito general</b>			Doc. No.: <b>003-010</b>		



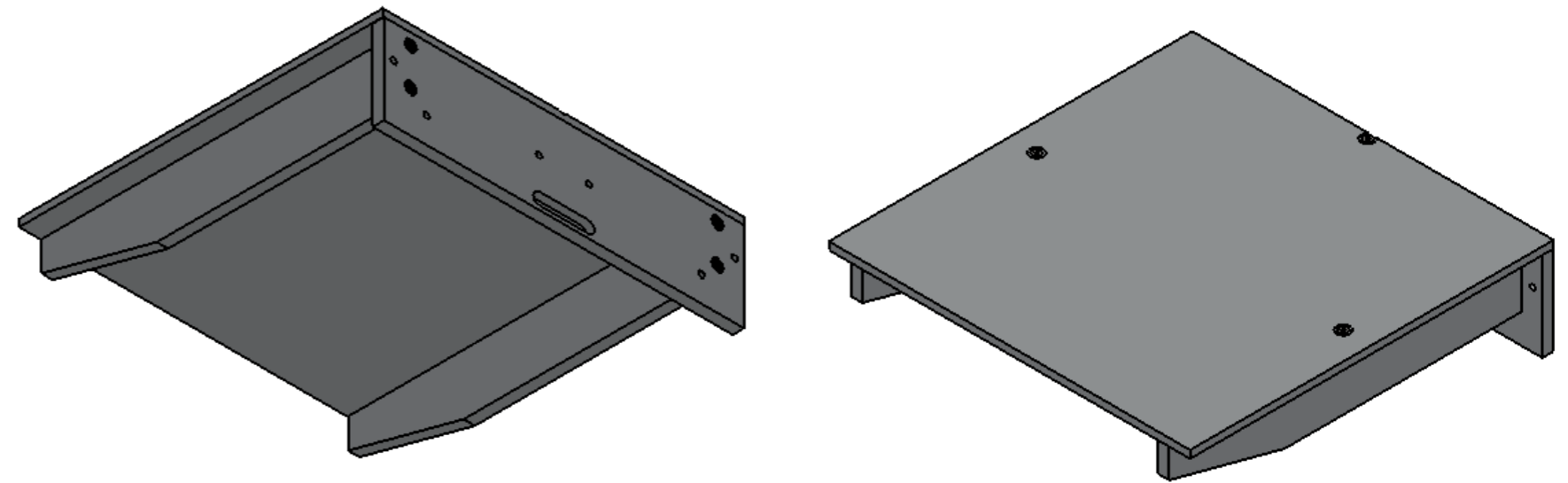
N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANT.
79	018-002	SOPORTE INFERIOR EJE Z	1
80	018-002	SOPORTE SUPERIOR EJE Z	1
81	052-001	SOPORTE MOTOR EJE Z	1
82	022-001	GUIA EJE Z	2
83	013-002	HUSILLO EJE Z	1
84	034-001	SOPORTE DE NYLAMID PARA TUERCA DE BOLAS	1
85	054-001	SOPORTE PARA SENSORES EJE Z	1
86	005-000	RODAMIENTO LINEAL	2
87	060-001	BUJE DE ACOPLAMIENTO HUSILLO POLEA EJE Z	1
88	061-001	BUJE DE ACOPLAMIENTO MOTOR POLEA EJE Z	1
89	023-001	POLEA DENTADA	2
90	020-001	BANDA DENTADA	1
91	100-016	BALERO 8mm	2
92	100-018	TORNILLO ALLEN M4 x 50	2
93	100-015	TORNILLO CABEZA RANURADA M5x10mm	4

**NOTA:**  
 A menos que se especifique lo contrario, todas las dimensiones están expresadas en milímetros.  
 A fin de evitar errores durante el funcionamiento del manipulador, se deben respetar tolerancias dimensionales para el ensamble de los componentes de  $\pm 0.25\text{mm}$

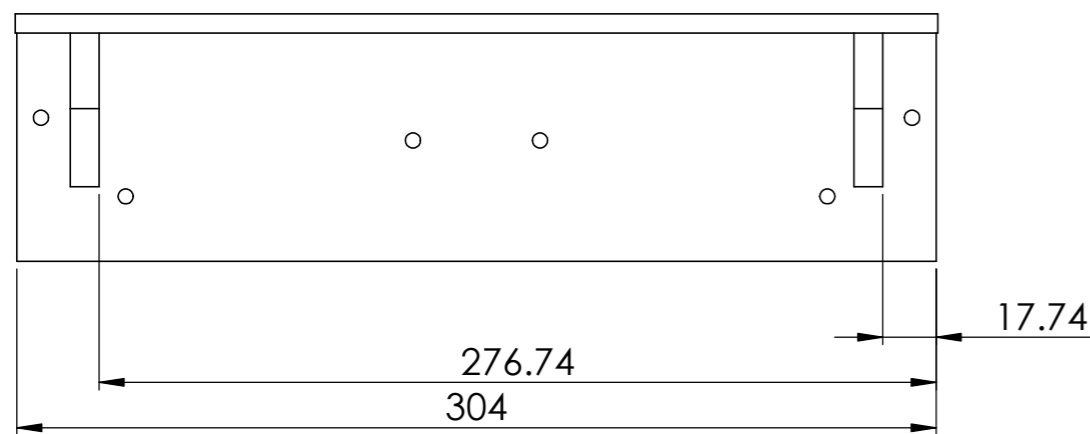
<b>POSGRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA</b>		Diseñado por: A. JARAMILLO	Título:	Formato A3	
Revisión: 0	Fecha de creación: 29/06/2013	Aprobado por: H. MEDELLIN	<b>SOPORTE EJE Z</b>	Idioma E	
<b>Diseño y construcción de un sistema de manipulación X, Y, Z de propósito general</b>			Doc. No.:	003-010	Hoja 2/2
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO					



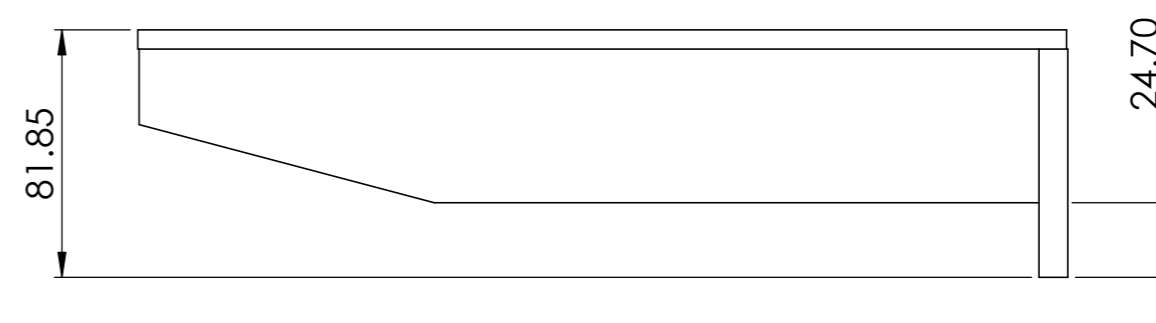
VISTA SUPERIOR



VISTA ISOMÉTRICA



VISTA FRONTAL

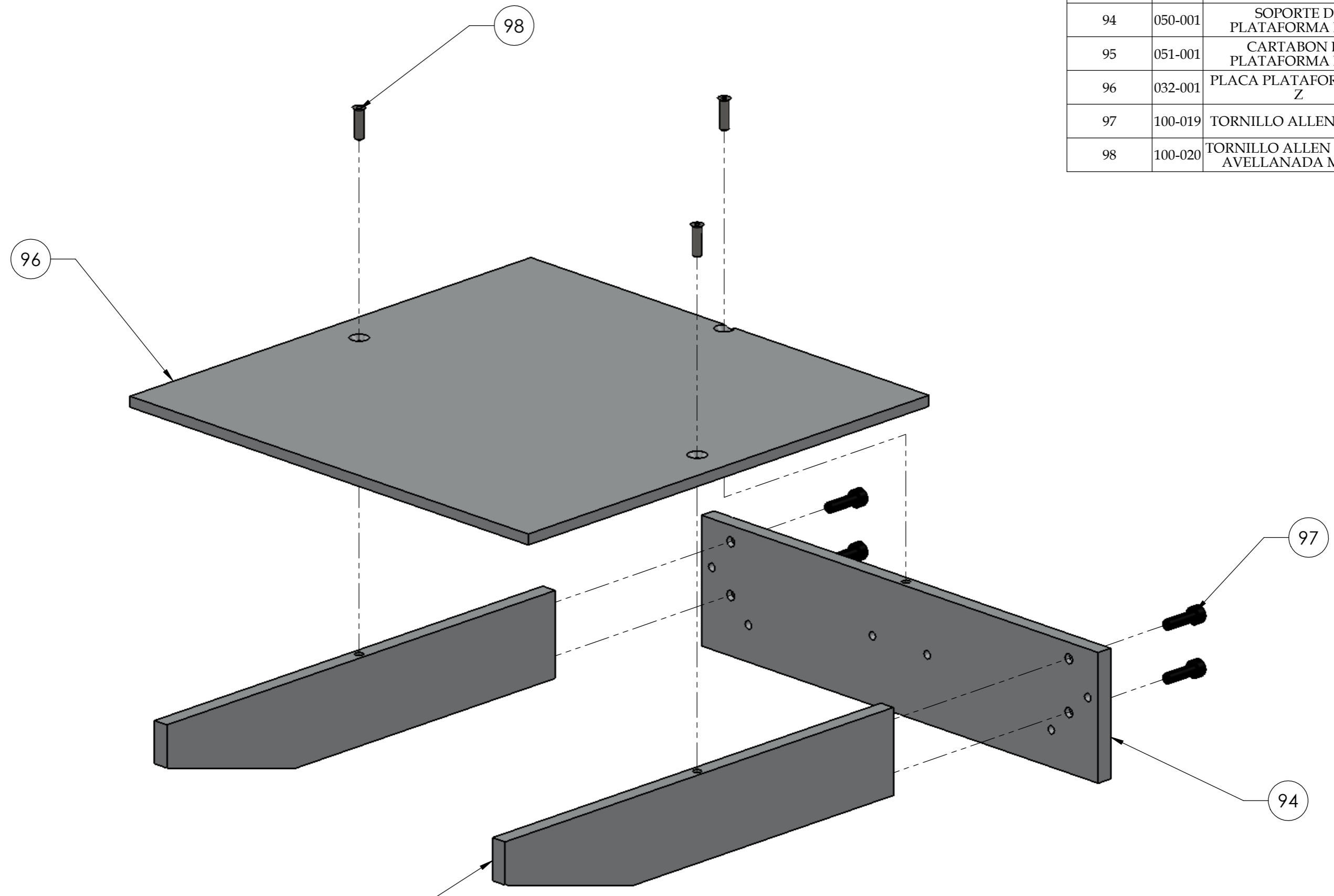


LATERAL DERECHA

**NOTA:**  
 A menos que se especifique lo contrario, todas las dimensiones están expresadas en milímetros.  
 A fin de evitar errores durante el funcionamiento del manipulador, se deben respetar tolerancias dimensionales para el ensamble de los componentes de  $\pm 0.25\text{mm}$



<b>POSGRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA</b>		Diseñado por: A. JARAMILLO	Título:  <b>TRANSPORTE EJE Z</b>	Formato A3	
Revisión: 0	Fecha de creación: 29/06/2013	Aprobado por: H. MEDELLIN		Idioma E	
<b>Diseño y construcción de un sistema de manipulación X, Y, Z de propósito general</b>					Hoja 1/2
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO			Doc. No.: espacio de trabajo		

N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANT.
94	050-001	SOPORTE DE PLATAFORMA EJE Z	1
95	051-001	CARTABON DE PLATAFORMA EJE Z	2
96	032-001	PLACA PLATAFORMA EJE Z	1
97	100-019	TORNILLO ALLEN M6 x 20	4
98	100-020	TORNILLO ALLEN CABEZA AVELLANADA M5 x 20	3

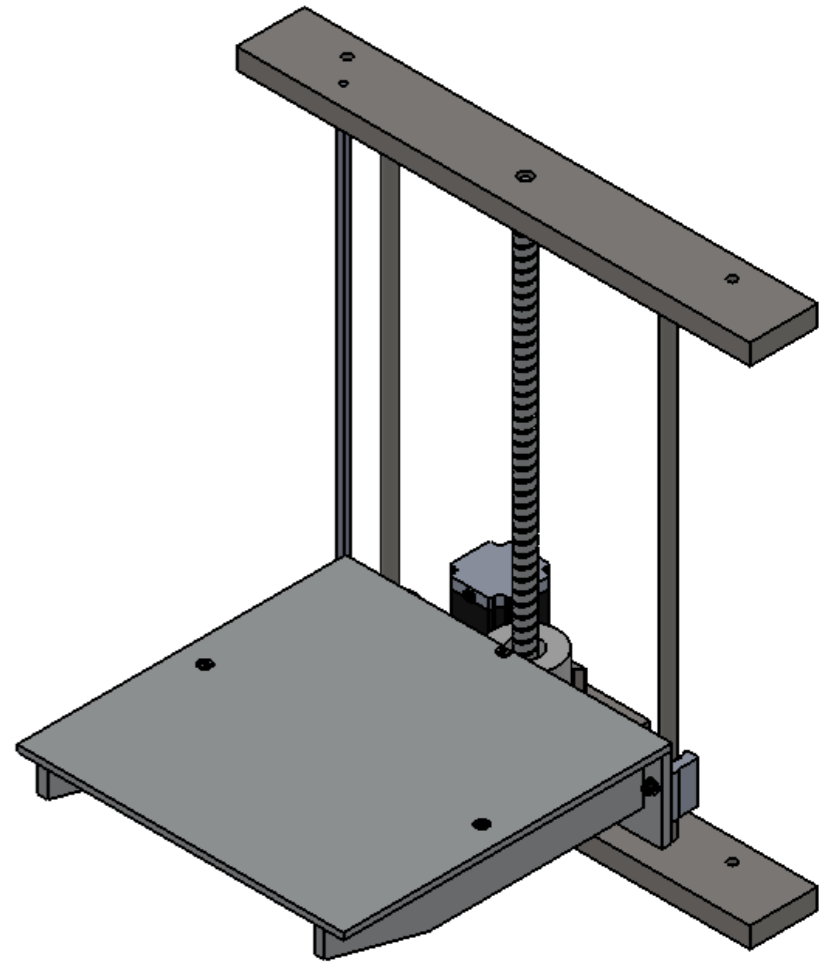


95

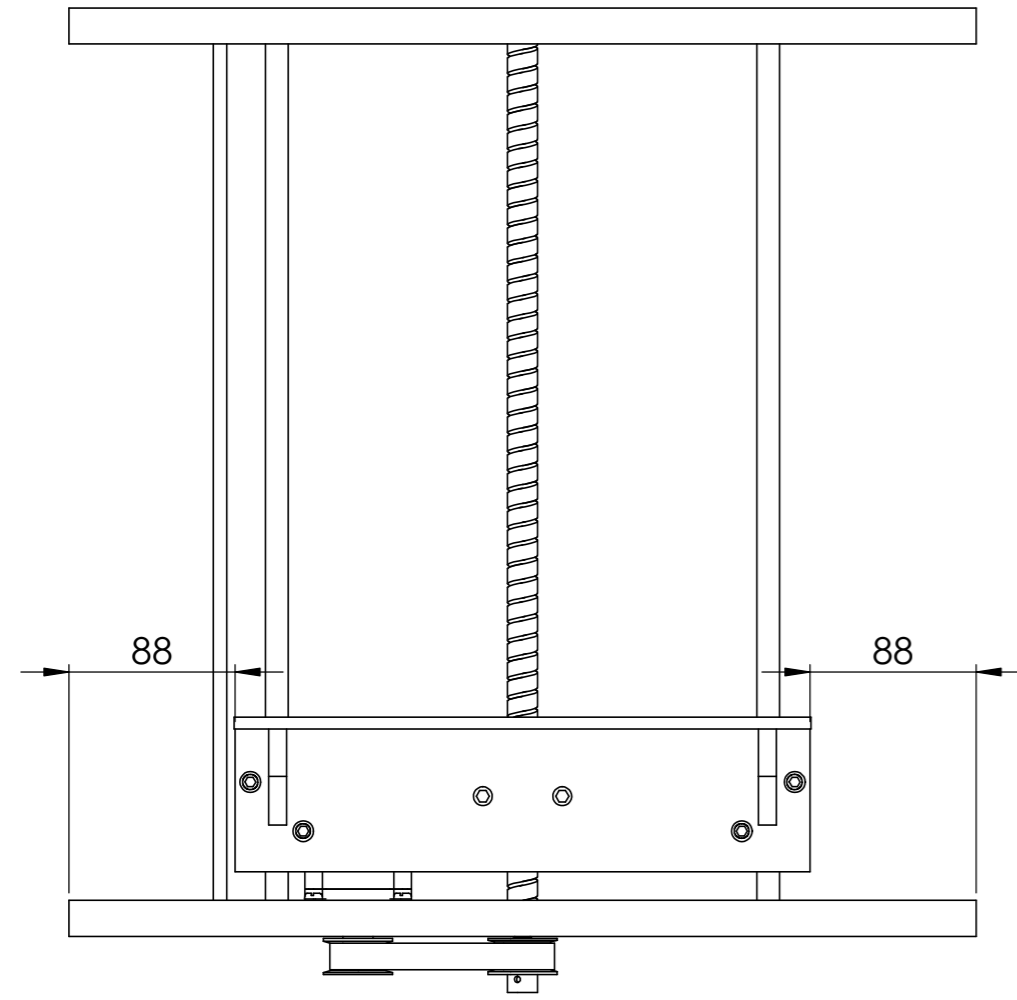
**NOTA:**  
A menos que se especifique lo contrario, todas las dimensiones están expresadas en milímetros.  
A fin de evitar errores durante el funcionamiento del manipulador, se deben respetar tolerancias dimensionales para el ensamble de los componentes de  $\pm 0.25\text{mm}$

<b>POSGRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA</b> Revisión: 0    Fecha de creación: 29/06/2013		Diseñado por: A. JARAMILLO Aprobado por: H. MEDELLIN	Título: <b>TRANSPORTE EJE Z</b>	Formato A3 Idioma E	 
<b>Diseño y construcción de un sistema de manipulación X, Y, Z de propósito general</b> 			Doc. No.: espacio de trabajo	Hoja 2/2	

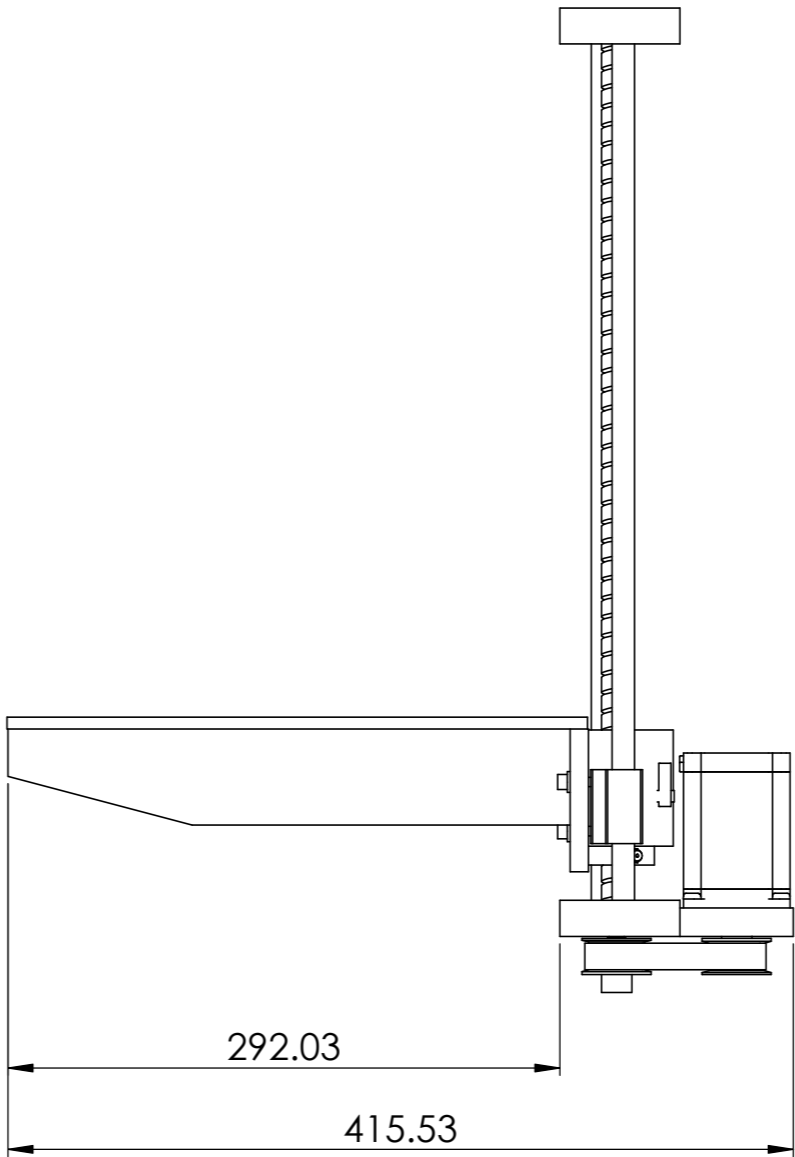
LATERAL DERECHA




VISTA ISOMÉTRICA



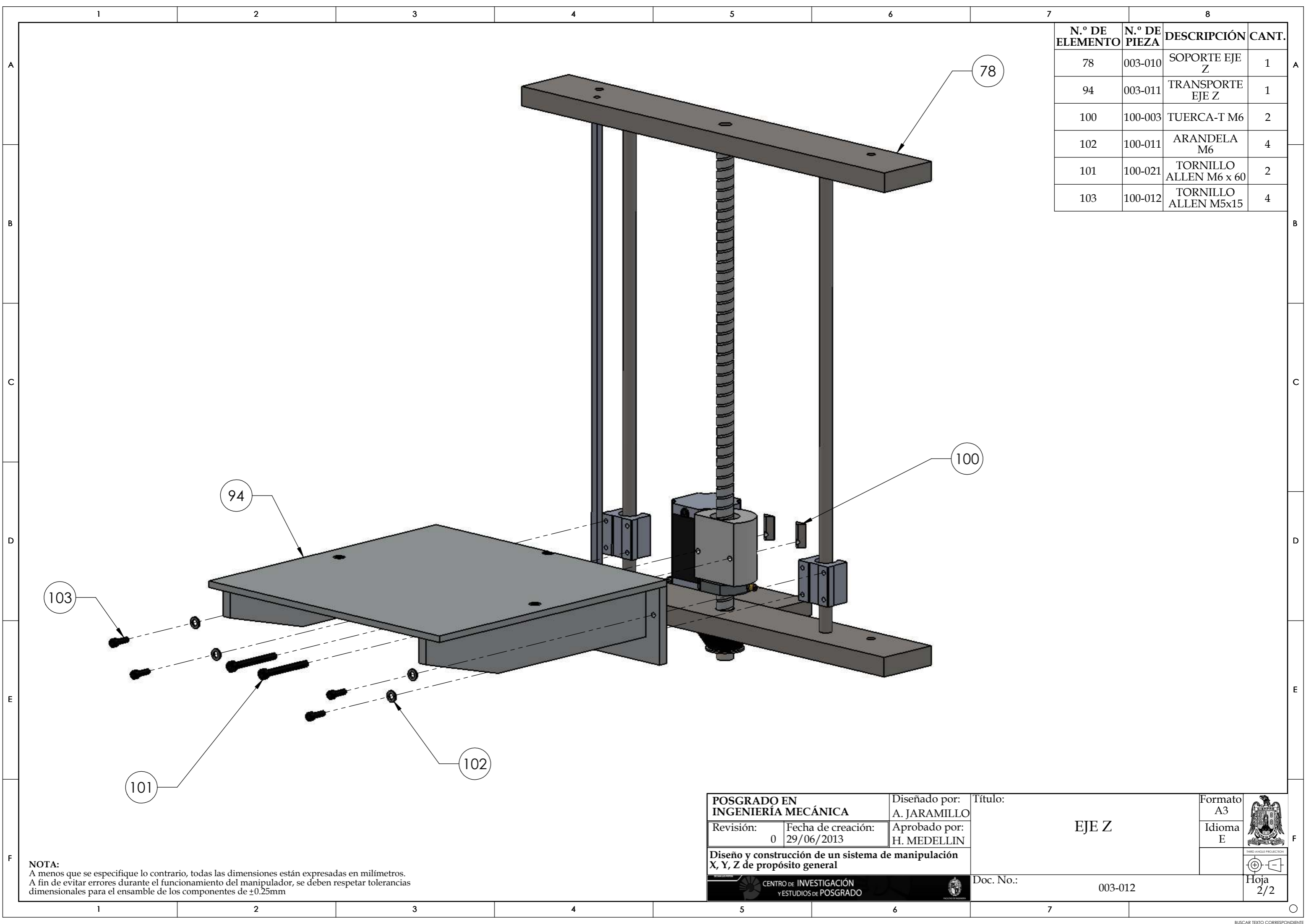
VISTA FRONTAL



**NOTA:**  
 A menos que se especifique lo contrario, todas las dimensiones están expresadas en milímetros.  
 A fin de evitar errores durante el funcionamiento del manipulador, se deben respetar tolerancias dimensionales para el ensamble de los componentes de  $\pm 0.25\text{mm}$


<b>POSGRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA</b>		Diseñado por: A. JARAMILLO	Título:  EJE Z	Formato A3	
Revisión: 0	Fecha de creación: 29/06/2013	Aprobado por: H. MEDELLIN		Idioma E	
Diseño y construcción de un sistema de manipulación X, Y, Z de propósito general					Hoja 1/2
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO			Doc. No.: 003-012		



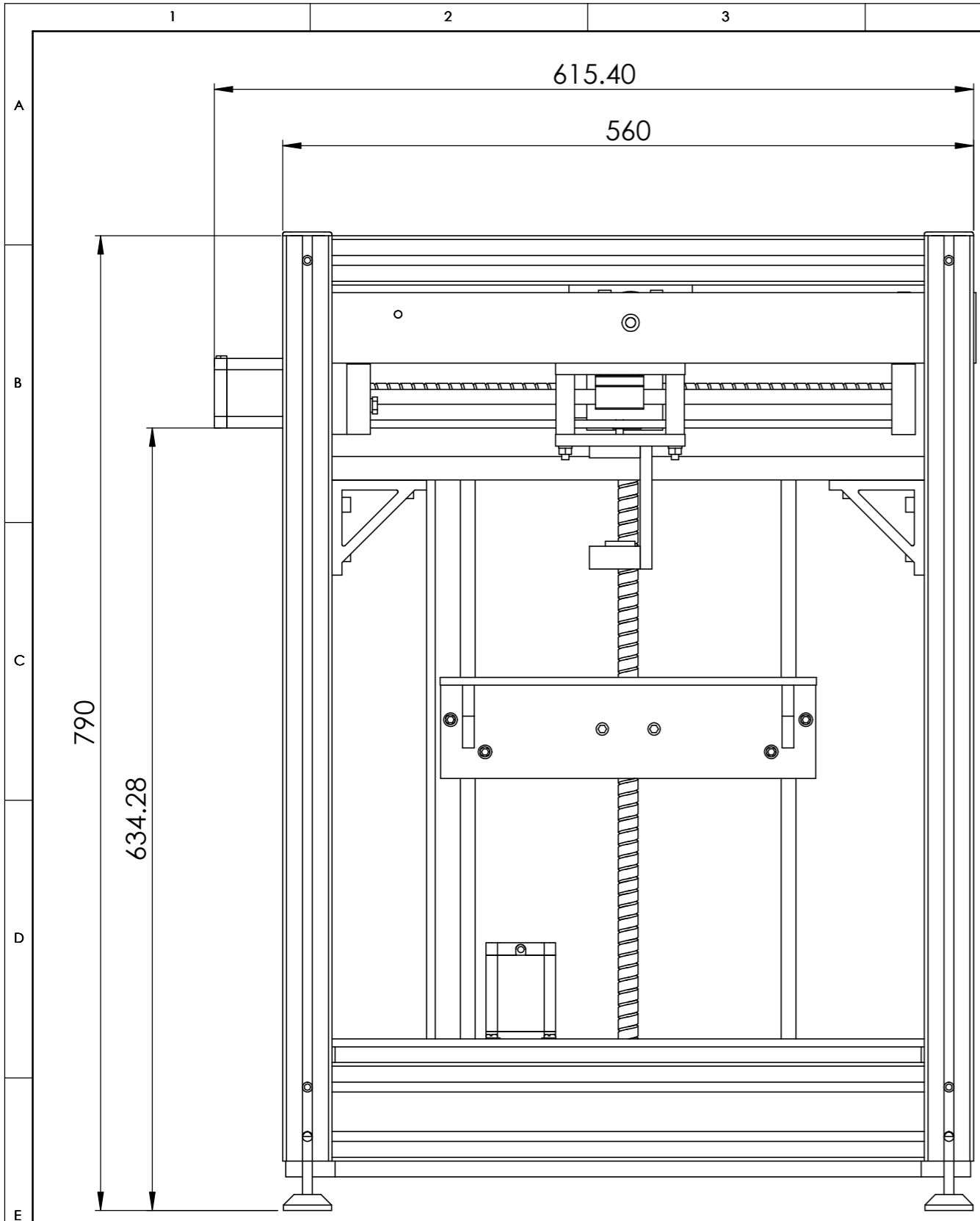


N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANT.
78	003-010	SOPORTE EJE Z	1
94	003-011	TRANSPORTE EJE Z	1
100	100-003	TUERCA-T M6	2
102	100-011	ARANDELA M6	4
101	100-021	TORNILLO ALLEN M6 x 60	2
103	100-012	TORNILLO ALLEN M5x15	4

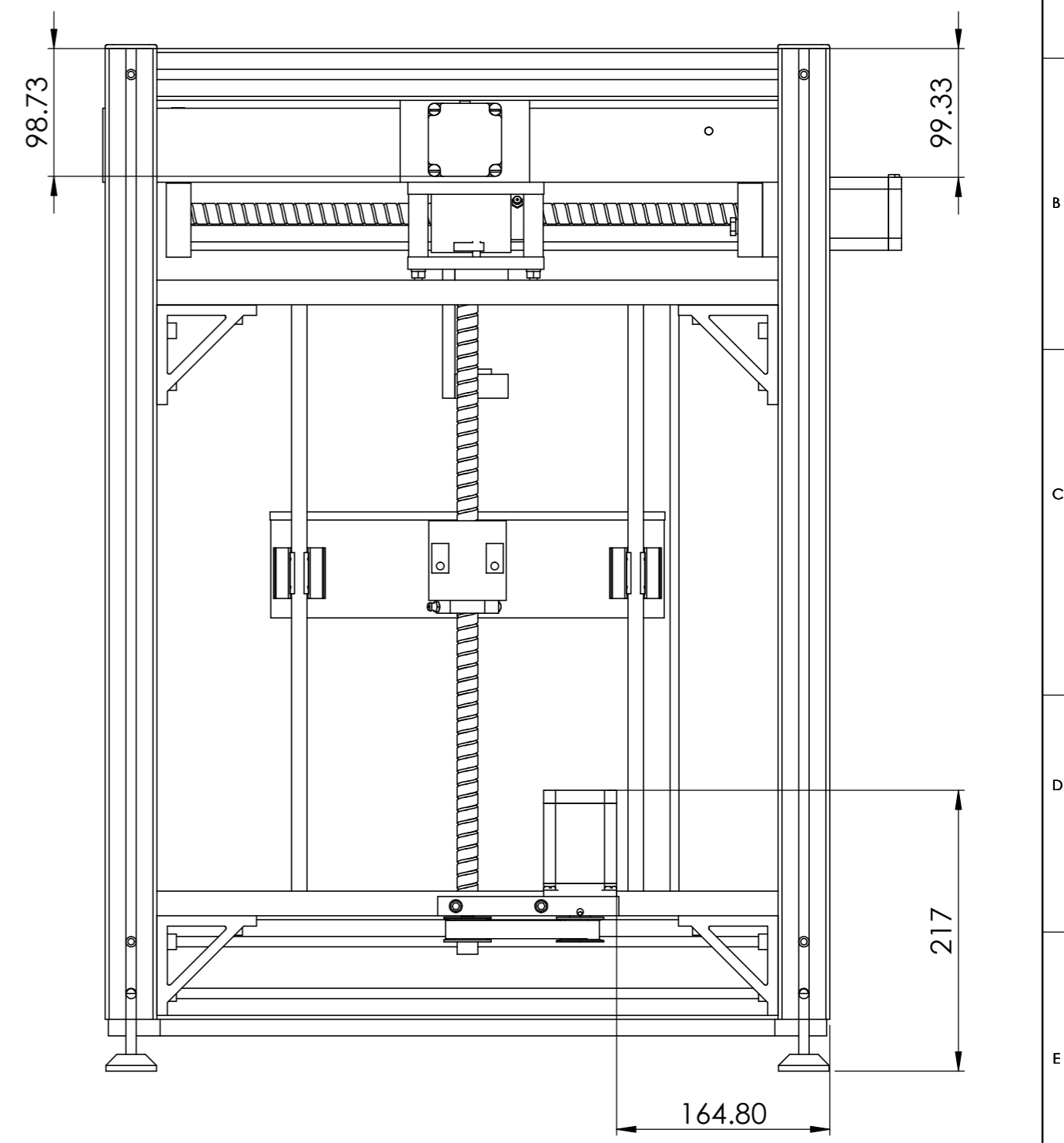
**NOTA:**  
 A menos que se especifique lo contrario, todas las dimensiones están expresadas en milímetros.  
 A fin de evitar errores durante el funcionamiento del manipulador, se deben respetar tolerancias dimensionales para el ensamble de los componentes de  $\pm 0.25\text{mm}$

<b>POSGRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA</b>		Diseñado por: A. JARAMILLO	Título:  EJE Z	Formato A3	
Revisión: 0	Fecha de creación: 29/06/2013	Aprobado por: H. MEDELLIN		Idioma E	
Diseño y construcción de un sistema de manipulación X, Y, Z de propósito general			Doc. No.: 003-012	Hoja 2/2	
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO					

## A.4. Ensamble del SMC





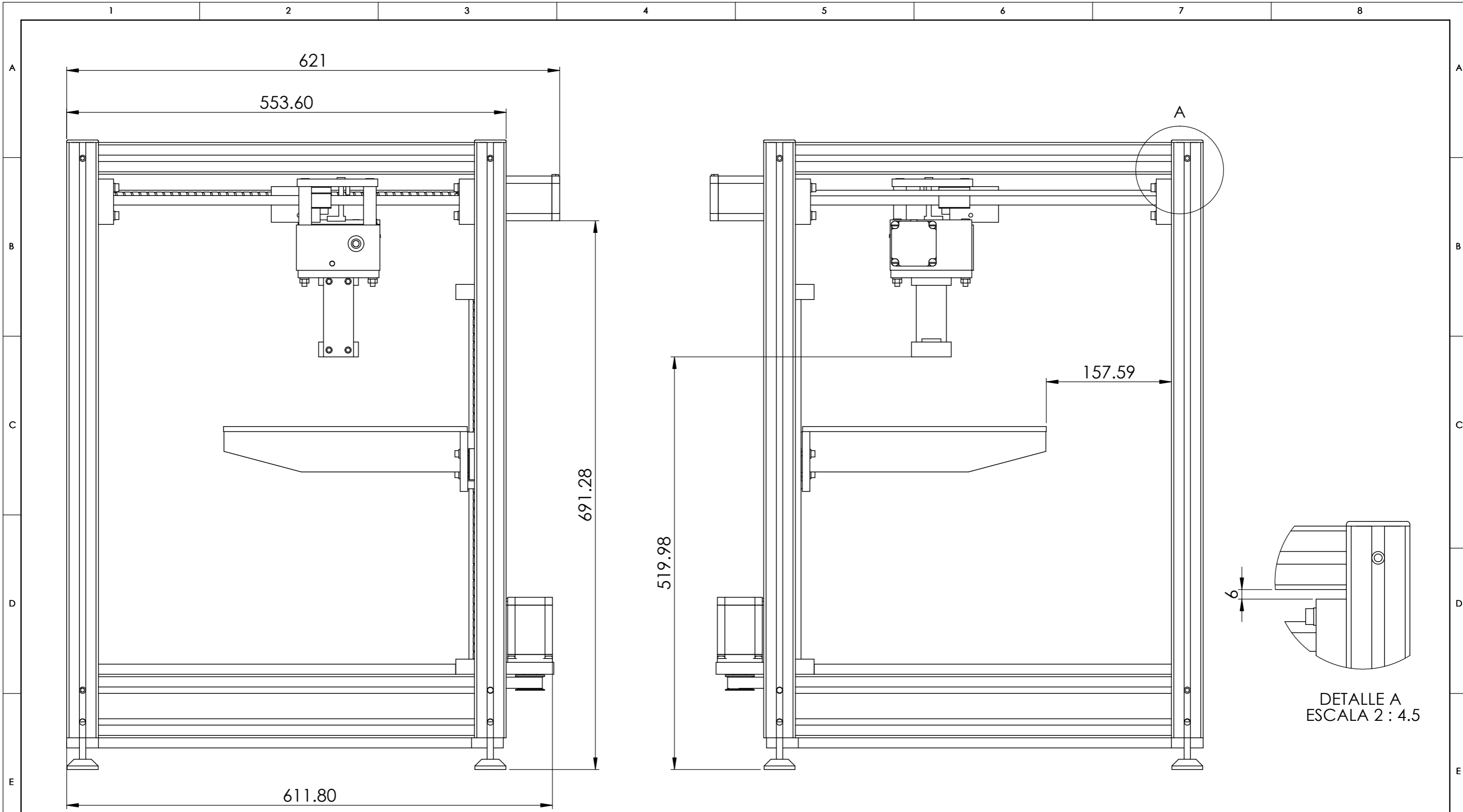
VISTA FRONTAL



VISTA POSTERIOR

**NOTA:**  
 A menos que se especifique lo contrario, todas las dimensiones están expresadas en milímetros.  
 A fin de evitar errores durante el funcionamiento del manipulador, se deben respetar tolerancias dimensionales para el ensamble de los componentes de  $\pm 0.25\text{mm}$

<b>POSGRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA</b>		Diseñado por: A. JARAMILLO	Título:	Formato A3	
Revisión: 0	Fecha de creación: 14/06/2013	Aprobado por: H. MEDELLIN	<b>SISTEMA DE MANIPULACIÓN CARTESIANO</b>	Idioma E	
Diseño y construcción de un sistema de manipulación X, Y, Z de propósito general				Doc. No.: SMC-001	
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO					






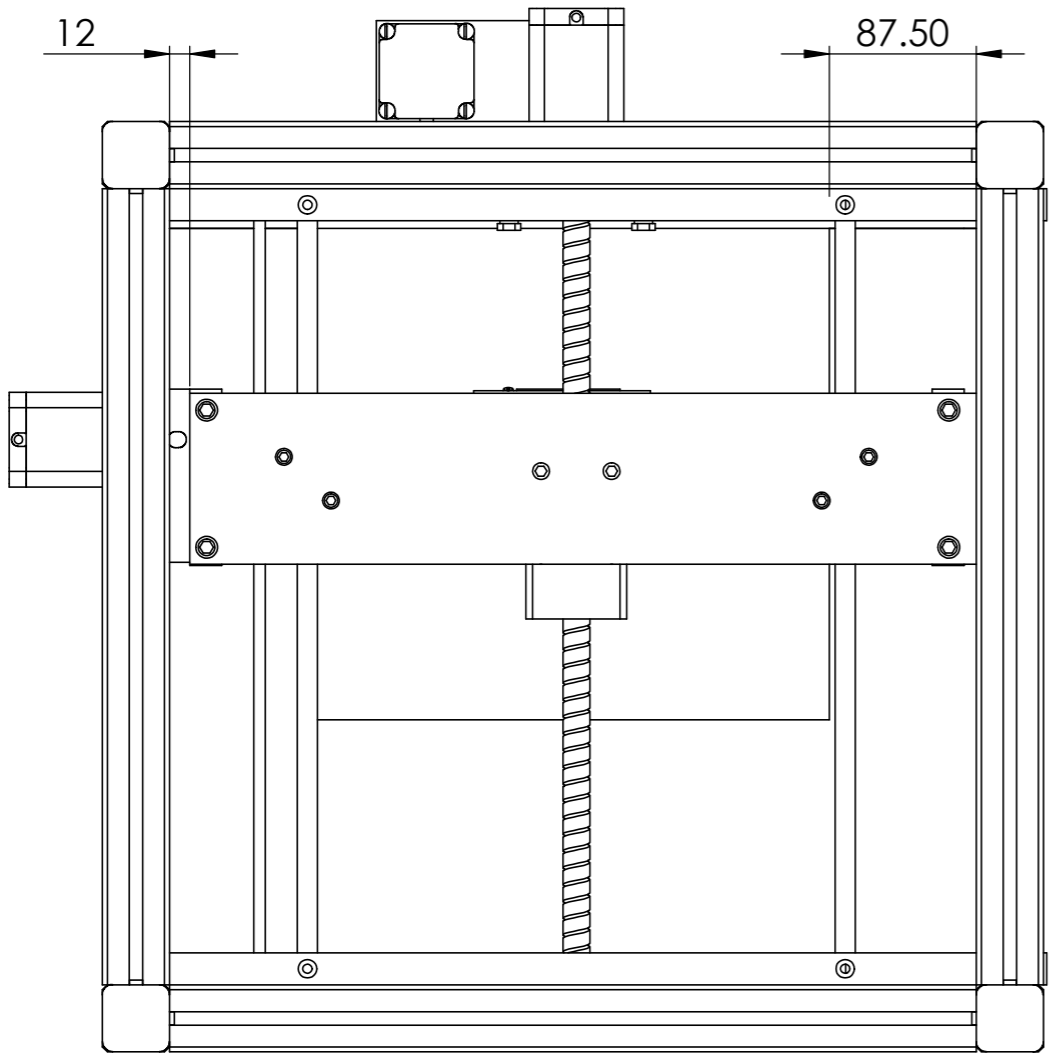
VISTA LATERAL DERECHA

VISTA LATERAL IZQUIERDA

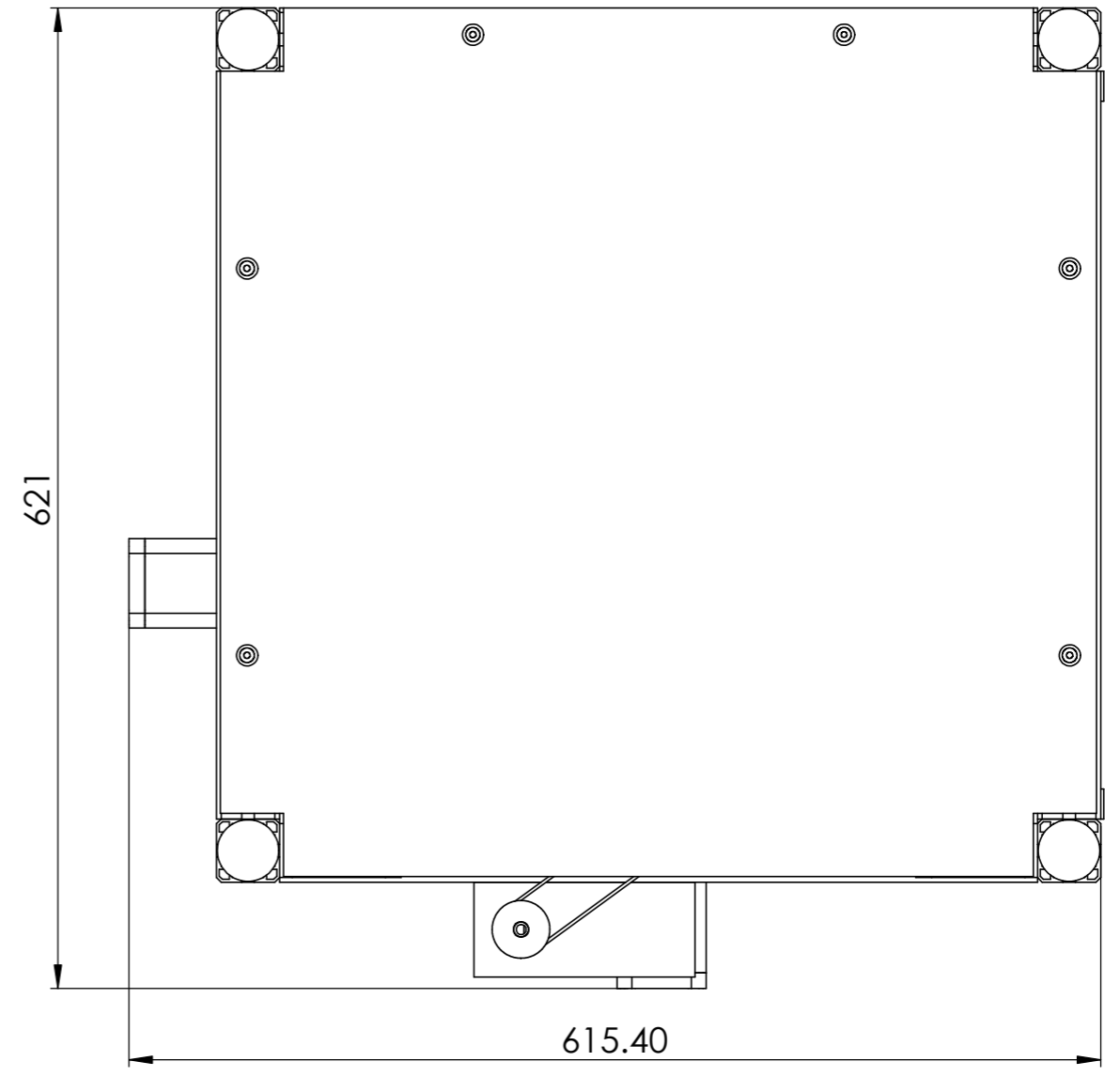
DETALLE A  
ESCALA 2 : 4.5

**NOTA:**  
A menos que se especifique lo contrario, todas las dimensiones están expresadas en milímetros.  
A fin de evitar errores durante el funcionamiento del manipulador, se deben respetar tolerancias dimensionales para el ensamble de los componentes de  $\pm 0.25\text{mm}$

<b>POSGRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA</b>		Diseñado por: <b>A. JARAMILLO</b>	Título:	Formato <b>A3</b>	
Revisión: 0	Fecha de creación: 14/06/2013	Aprobado por: <b>H. MEDELLIN</b>	<b>SISTEMA DE MANIPULACIÓN CARTESIANO</b>	Idioma <b>E</b>	
<b>Diseño y construcción de un sistema de manipulación X, Y, Z de propósito general</b>				Doc. No.: <b>SMC-001</b>	
					





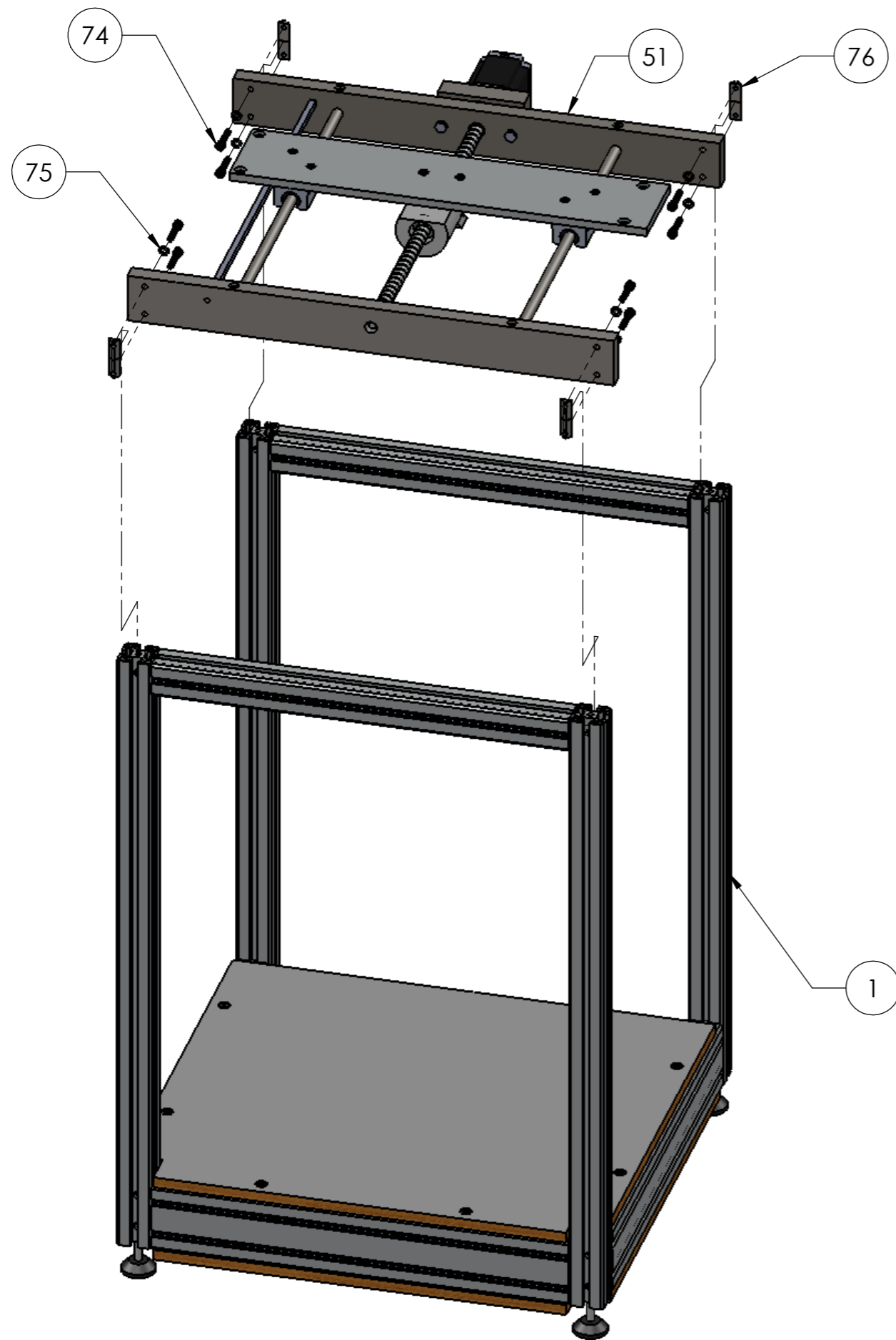
VISTA SUPERIOR



VISTA INFERIOR

**NOTA:**  
 A menos que se especifique lo contrario, todas las dimensiones están expresadas en milímetros.  
 A fin de evitar errores durante el funcionamiento del manipulador, se deben respetar tolerancias dimensionales para el ensamble de los componentes de  $\pm 0.25\text{mm}$

<b>POSGRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA</b>		Diseñado por: A. JARAMILLO	Título:  <b>SISTEMA DE MANIPULACIÓN CARTESIANO</b>	Formato A3	
Revisión: 0	Fecha de creación: 14/06/2013	Aprobado por: H. MEDELLIN		Idioma E	
Diseño y construcción de un sistema de manipulación X, Y, Z de propósito general			Doc. No.: SMC-001	Hoja 3/7	
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO					





N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANT.
1	036-001	ESTRUCTURA BÁSICA	1
51	002-011	EJE Y	1
74	100-023	TORNILLO ALLEN M6 x 30	8
75	100-011	ARANDELA M6	8
76	100-003	TUERCA-T M6	8

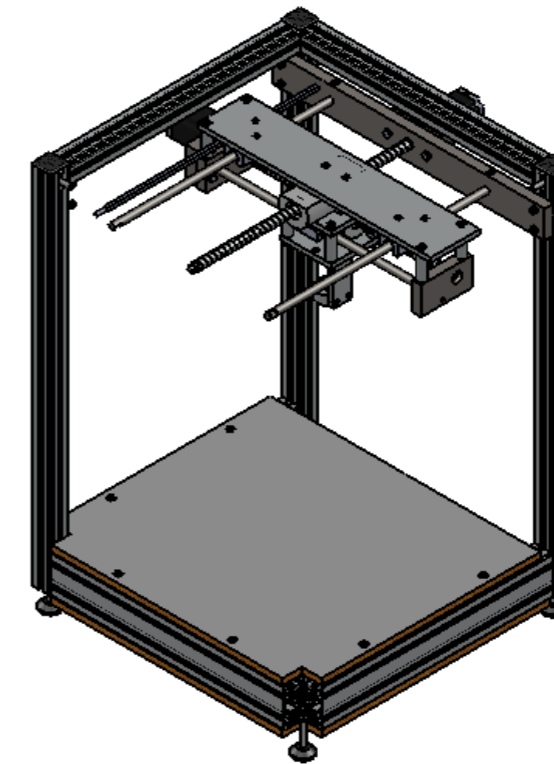
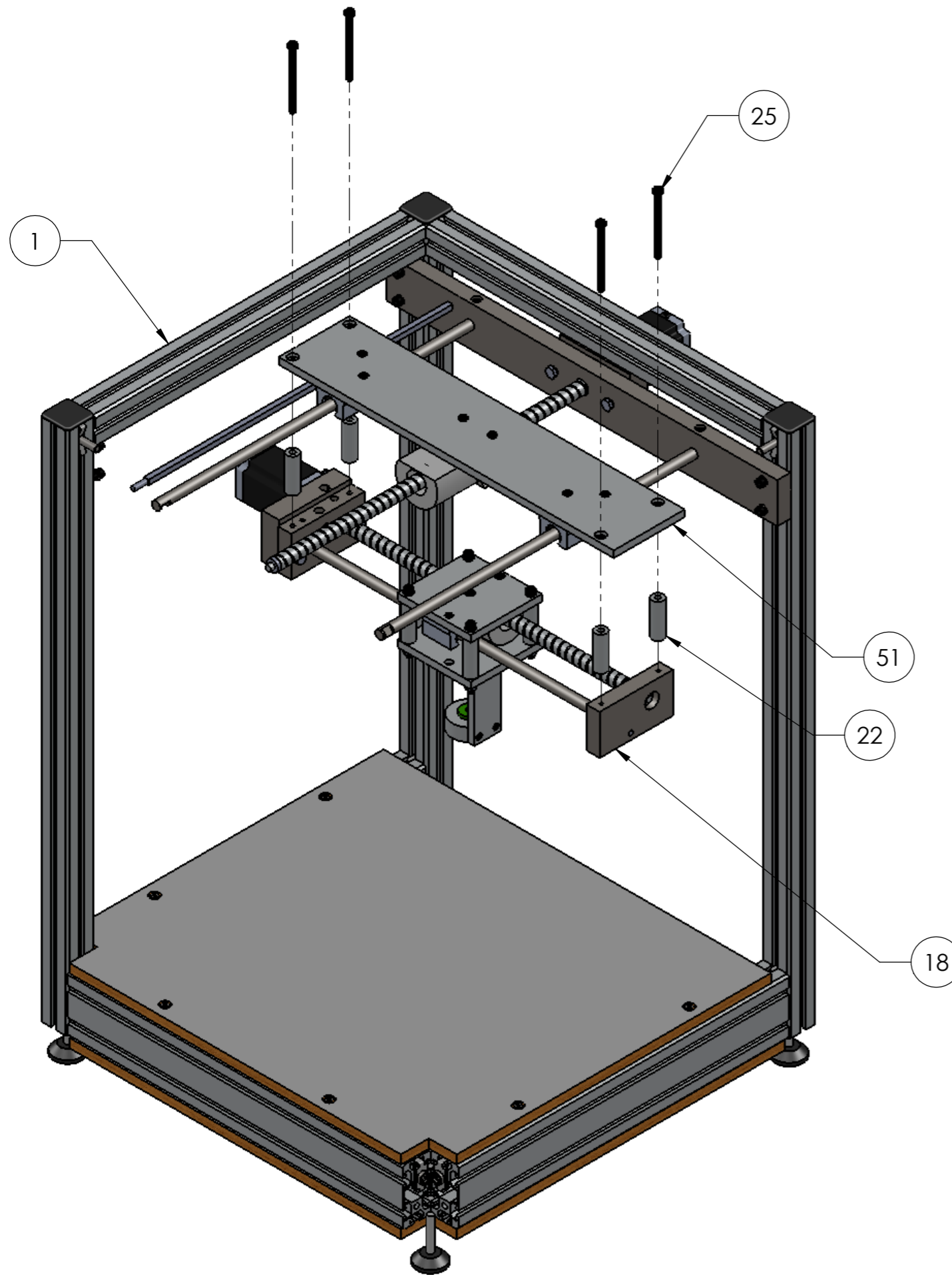
**NOTA DE ENSAMBLE:**

Para instalar el Eje Y en la estructura del manipulador, retirar primeramente los perfiles longitudinales superiores de manera que el eje completo se posicione por la parte de arriba del manipulador y se deslice con las tuercas-T previamente fijadas para guiar el eje y sujetarlo ligeramente. Una vez montado dicho eje, colocar de nueva cuenta los perfiles longitudinales inicialmente retirados y una vez fijados, proceder con el posicionamiento del eje de acuerdo a la medida indicada en este documento.

**NOTA:**  
 A menos que se especifique lo contrario, todas las dimensiones están expresadas en milímetros.  
 A fin de evitar errores durante el funcionamiento del manipulador, se deben respetar tolerancias dimensionales para el ensamble de los componentes de  $\pm 0.25\text{mm}$

POSGRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA	Diseñado por: A. JARAMILLO	Título:	Formato A3
Revisión: 0	Fecha de creación: 14/06/2013	Aprobado por: H. MEDELLIN	Idioma E
Diseño y construcción de un sistema de manipulación X, Y, Z de propósito general		<b>SISTEMA DE MANIPULACIÓN CARTESIANO</b>	 Hoja 4/7
 CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO			



N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANT.
1	036-001	ESTRUCTURA BÁSICA	1
18	001-013	EJE X	1
25	100-009	TORNILLO ALLEN M6x80	4
51	002-011	EJE Y	1



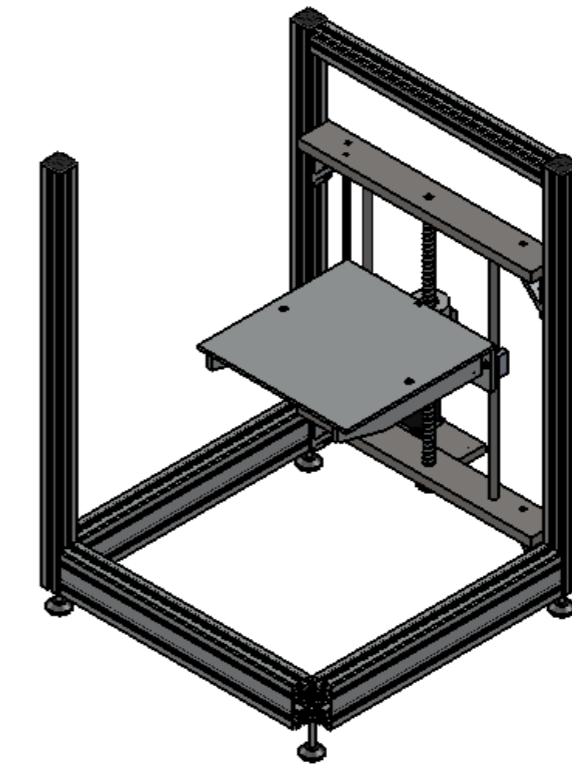
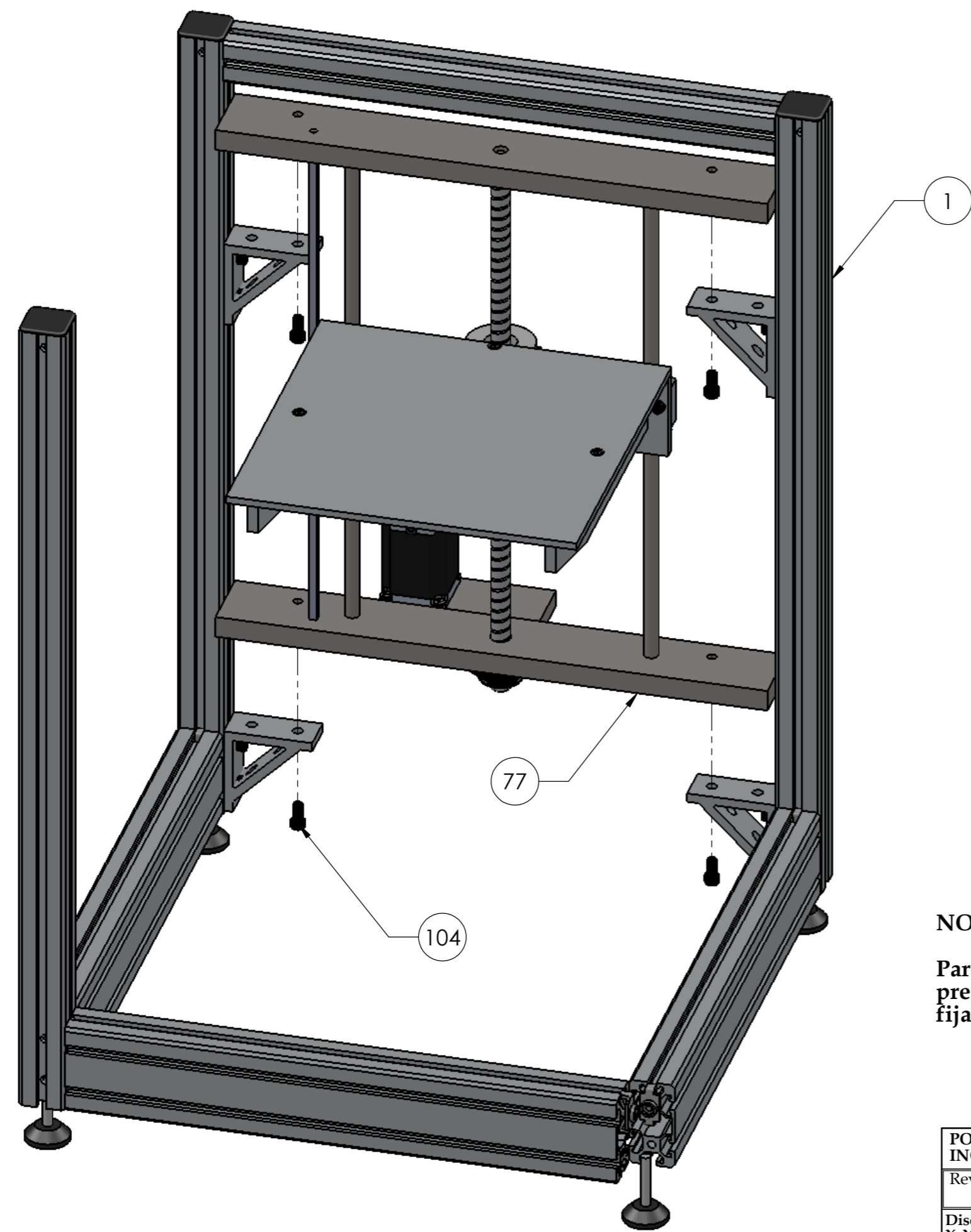
**NOTA DE ENSAMBLE:**

La instalación del eje X debe hacerse después de haber montado el eje Y, ya que este último sujeta al primero y lo transporta al mismo tiempo que se mueve. Únicamente se requiere atornillar los soportes del eje X en los extremos del soporte transversal del eje Y usando los espaciadores de aluminio.

**NOTA:**  
A menos que se especifique lo contrario, todas las dimensiones están expresadas en milímetros.  
A fin de evitar errores durante el funcionamiento del manipulador, se deben respetar tolerancias dimensionales para el ensamble de los componentes de  $\pm 0.25\text{mm}$

POSGRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA	Diseñado por: A. JARAMILLO	Título:	Formato A3
Revisión: 0	Fecha de creación: 14/06/2013	Aprobado por: H. MEDELLIN	Idioma E
Diseño y construcción de un sistema de manipulación X, Y, Z de propósito general		SISTEMA DE MANIPULACIÓN CARTESIANO	 Hoja 5/7
 CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO			


N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANT.
1	036-001	ESTRUCTURA BÁSICA	1
77	003-012	EJE Z	1
104	100-006	TORNILLO ALLEN M8x16	4



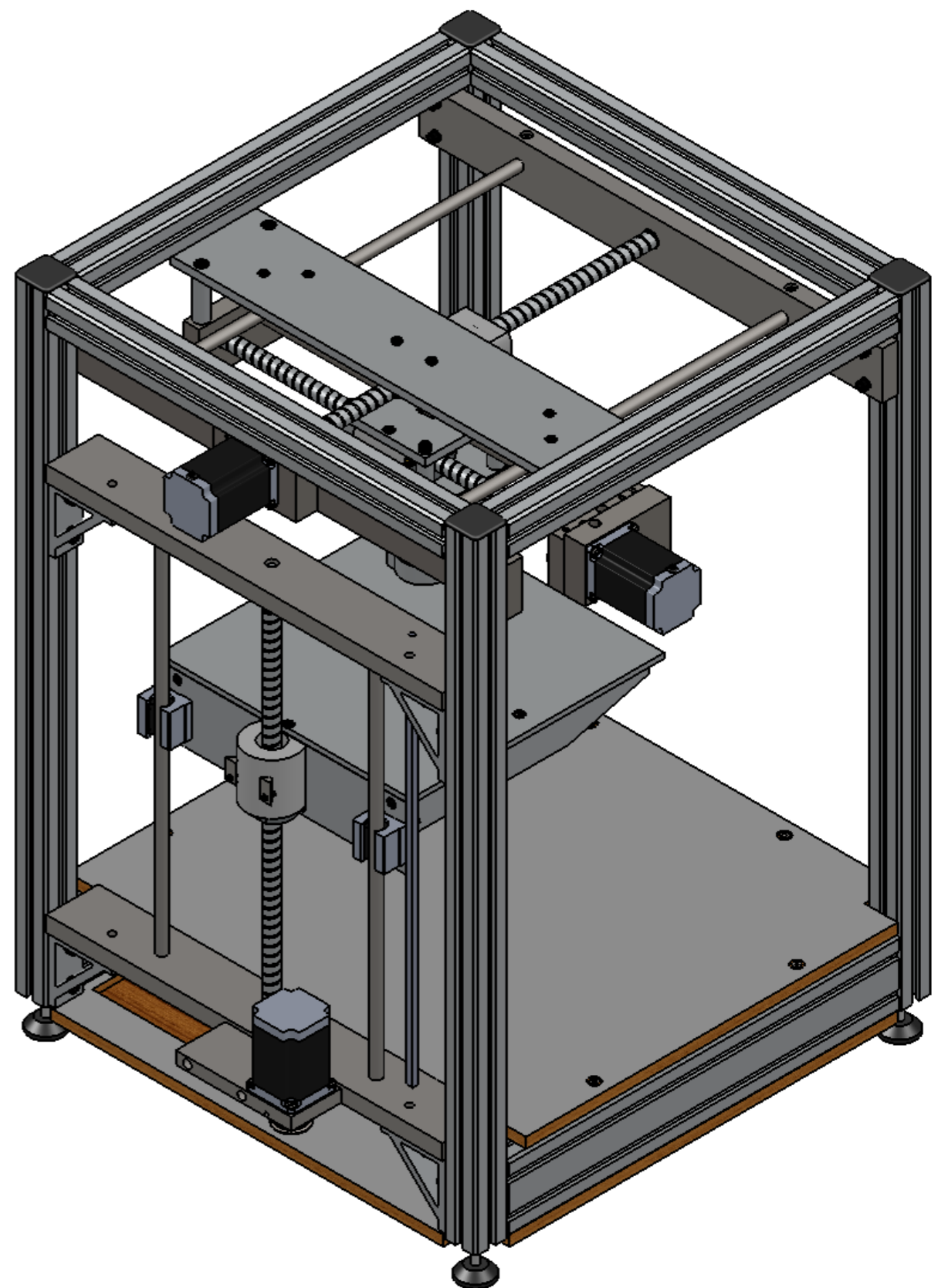
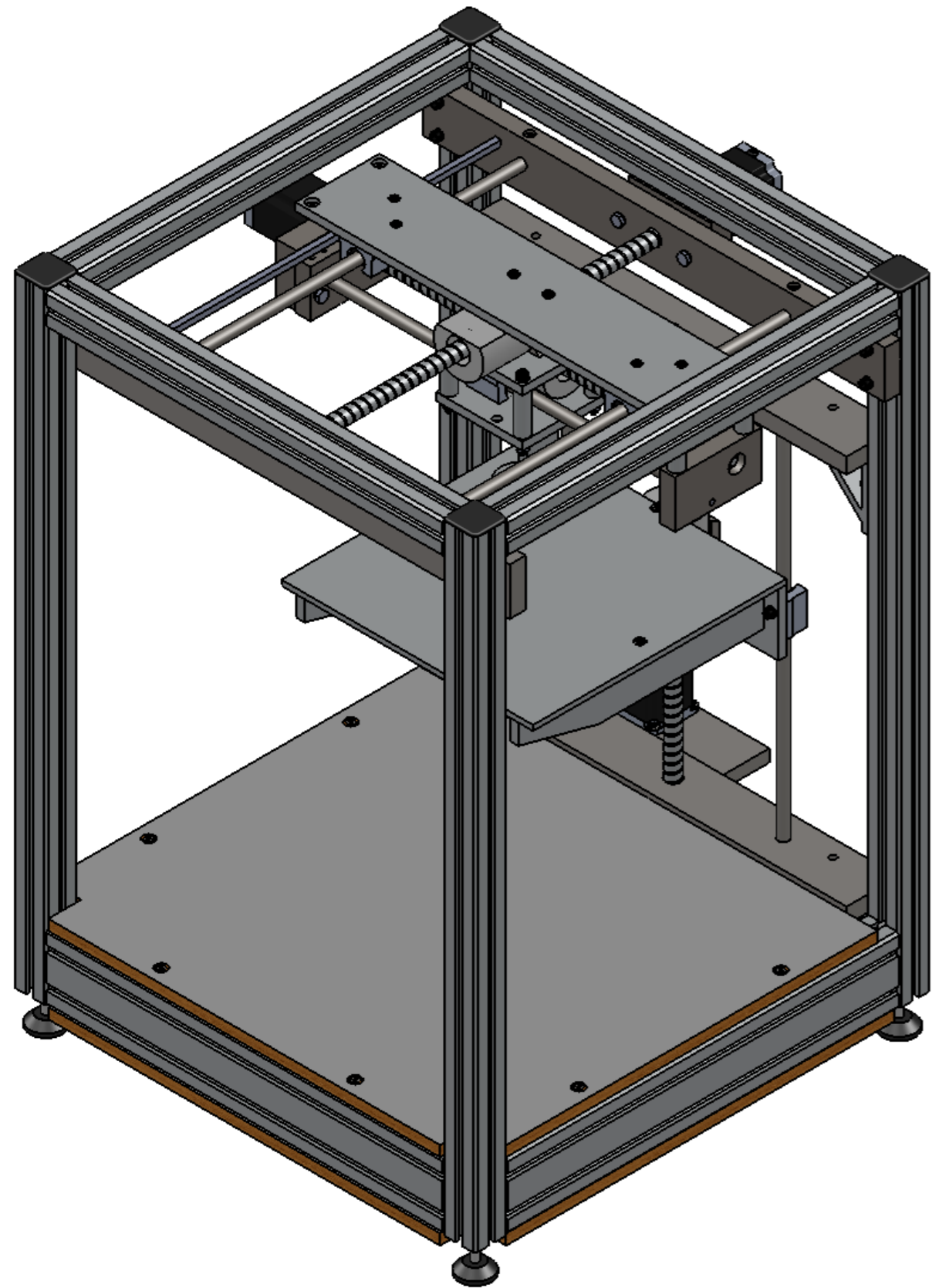
**NOTA DE ENSAMBLE:**

Para montar el eje Z en la estructura básica se requiere unicamente presentar las preparaciones en los soportes del eje Z contra los soportes tipo esquina previamente fijados en la estructura. Posteriormente atornillar los soportes como se indica.




**NOTA:**  
 A menos que se especifique lo contrario, todas las dimensiones están expresadas en milímetros.  
 A fin de evitar errores durante el funcionamiento del manipulador, se deben respetar tolerancias dimensionales para el ensamble de los componentes de  $\pm 0.25\text{mm}$

POSGRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA	Diseñado por: A. JARAMILLO	Título:	Formato A3
Revisión: 0	Fecha de creación: 14/06/2013	Aprobado por: H. MEDELLIN	Idioma E
Diseño y construcción de un sistema de manipulación X, Y, Z de propósito general		SISTEMA DE MANIPULACIÓN CARTESIANO	 Hoja 6/7
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO			





**NOTA:**  
 A menos que se especifique lo contrario, todas las dimensiones están expresadas en milímetros.  
 A fin de evitar errores durante el funcionamiento del manipulador, se deben respetar tolerancias dimensionales para el ensamble de los componentes de  $\pm 0.25\text{mm}$

<b>POSGRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA</b>		Diseñado por: A. JARAMILLO	Título:	Formato A3	
Revisión: 0	Fecha de creación: 14/06/2013	Aprobado por: H. MEDELLIN	<b>SISTEMA DE MANIPULACIÓN CARTESIANO</b>	Idioma E	
<b>Diseño y construcción de un sistema de manipulación X, Y, Z de propósito general</b>				Doc. No.: SMC-001	
					

## A.5. Lista de materiales mecánicos

Nombre de

Proyecto:

SMC

Revision

1

Autor:

José Angel Jaramilo Rodríguez

Fecha:

14.06.2013

LISTA DE MATERIALES MECÁNICOS PARA EL SMC				
Nivel	No. De parte	Descripción	Cantidad	No. De Elemento
<b>A</b>	<b>SMC-001</b>	<b>SISTEMA DE MANIPULACIÓN CARTESIANO</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
<b>B</b>	<b>036-001</b>	<b>ESTRUCTURA BASICA</b>	<b>1</b>	<b>1</b>
C	025-001	POSTE PARA SOPORTE DE ESTRUCTURA	4	2
C	025-003	PERFIL TRANSVERSAL SUPERIOR	2	3
C	025-010	PERFIL LONGITUDINAL SUPERIOR	2	4
C	026-001	PERFIL LONGITUDINAL INFERIOR	2	5
C	026-002	PERFIL TRANSVERSAL INFERIOR	1	6
C	062-001	CUBIERTA SUPERIOR DE INSTRUMENTOS	1	7
C	062-002	CUBIERTA INFERIOR DE INSTRUMENTOS	1	8
C	100-001	SOPORTE ESQUINA 80x80x40	4	9
C	100-002	SOPORTE ARTICULADO BASE	4	10
C	009-005	TAPA DE PERFIL 40x40	4	11
C	100-003	TUERCA-T M6	12	12
C	100-004	TORNILLO ALLEN CABEZ AVELLANADA M6x20	12	13
C	100-005	TUERCA-T M8	8	14
C	100-006	TORNILLO ALLEN M8x16	8	15
C	100-007	CONECTOR ORTOGONAL PARA PERFIL	16	16
C	100-008	TORNILLO ALLEN CABEZA GOTA M8x30	16	17
<b>B</b>	<b>001-013</b>	<b>EJE X</b>	<b>1</b>	<b>18</b>
<b>C</b>	<b>001-0012</b>	<b>TRANSPORTE EJE X</b>	<b>1</b>	<b>19</b>
D	057-002	PLACA SUPERIOR EJE X	1	20
D	057-001	PLACA INFERIOR EJE X	1	21
D	015-003	ESPACIADOR DE ALUMINIO EJE X	4	22
D	100-010	TUERCA M6	4	23
D	100-011	ARANDELA M6	8	24
D	100-009	TORNILLO ALLEN M6x80	4	25
<b>C</b>	<b>001-011</b>	<b>CABEZAL EJE X</b>	<b>1</b>	<b>26</b>
D	056-001	SOPORTE TRANSVERSAL CABEZAL EJE X	1	27
D	055-002	SOPORTE SUPERIOR CABEZAL EJE X	1	28
D	055-001	SOPORTE INFERIOR CABEZAL EJE X	1	29
D	058-001	ACOPLADOR DE NYLAMID PARA CABEZAL	1	30
D	100-012	TORNILLO ALLEN M5x15	4	31
<b>C</b>	<b>001-010</b>	<b>SOPORTE EJE X</b>	<b>1</b>	<b>32</b>
D	008-002	SOPORTE DE ACOPLAMIENTO EJE X	1	33

D	012-001	SOPORTE DE HUSILLO Y GUIAS EJE X	1	34
D	014-001	GUÍA LINEAL EJE X	1	35
D	013-001	HUSILLO DE BOLAS EJE X	1	36
D	034-001	SOPORTE DE NYLAMID PARA TUERCA DE BOLAS	1	37
D	005-000	RODAMIENTO LINEAL	1	38
D	012-002	SOPORTE PARA HUSILLO Y GUIAS EJE X	1	39
D	059-001	BUJE DE ACOPLAMIENTO EJE X	1	40
D	100-013	TORNILLO HEXAGONAL M6x25	2	41
D	100-011	ARANDELA M6	2	42
D	100-014	TORNILLO DE FIJACIÓN M3x8	2	43
D	100-015	TORNILLO CABEZA RANURADA M5x10	4	44
D	100-016	BALERO 8mm	2	45
C	054-003	SOPORTE PARA SENSORES DE EJE X	1	46
C	100-022	TORNILLO ALLEN M3 x 10	1	47
C	100-021	TORNILLO ALLEN M6 x 60	2	48
C	100-012	TORNILLO ALLEN M5x15	4	49
C	100-003	TUERCA-T M6	2	50
<b>B</b>	<b>002-011</b>	<b>EJE Y</b>	<b>1</b>	<b>51</b>
<b>C</b>	<b>002-010</b>	<b>SOPORTE EJE Y</b>	<b>1</b>	<b>52</b>
D	009-001	SOPORTE ESTRUCTURAL DE ACOPLAMIENTO A MOTOR EJE Y	1	53
D	009-002	SOPORTE FINAL DE CARRERA EJE Y	1	54
D	008-001	SOPORTE ACOPLAMIENTO PARA MOTOR EJE Y	1	55
D	010-001	GUÍA LINEAL EJE Y	2	56
D	011-001	HUSILLO DE BOLAS EJE Y	1	57
D	034-001	SOPORTE DE NYLAMID PARA TUERCA DE BOLAS	1	58
D	005-000	RODAMIENTO LINEAL	2	59
D	007-001	ACOPLAMIENTO OLDHAM PARA HUSILLO DE BOLAS	1	60
D	007-003	ACOPLAMIENTO OLDHAM PARA FLECHA DE MOTOR	1	61
D	007-002	BUJE DE ACOPLAMIENTO OLDHAM	1	62
D	100-016	BALERO 8mm	2	63
D	100-013	TORNILLO HEXAGONAL M6x25	2	64
D	100-011	ARANDELA M6	2	65
D	100-015	TORNILLO CABEZA RANURADA M5x10	4	66
<b>C</b>	<b>002-002</b>	<b>TRANSPORTE EJE Y</b>	<b>1</b>	<b>67</b>
D	015-010	ESPACIADOR DE ALUMINIO EJE Y	4	68
D	027-000	SOPORTE TRANSVERSAL EJE Y	1	69
C	100-017	TORNILLO ALLEN M6 x 50	2	70
C	100-012	TORNILLO ALLEN M5x15	4	71
C	100-003	TUERCA-T M6	2	72
C	054-002	SOPORTE PARA SENSORES DE EJE Y	1	73
B	100-023	TORNILLO ALLEN M6 x 30	8	74

B	100-011	ARANDELA M6	8	75
B	100-003	TUERCA-T M6	8	76
<b>B</b>	<b>003-012</b>	<b>EJE Z</b>	<b>1</b>	<b>77</b>
<b>C</b>	<b>003-010</b>	<b>SOPORTE EJE Z</b>	<b>1</b>	<b>78</b>
D	018-002	SOPORTE INFERIOR EJE Z	1	79
D	053-001	SOPORTE SUPERIOR EJE Z	1	80
D	052-001	SOPORTE MOTOR EJE Z	1	81
D	022-001	GUIA LINEAL EJE Z	2	82
D	013-002	HUSILLO DE BOLAS EJE Z	1	83
D	034-001	SOPORTE DE NYLAMID PARA TUERCA DE BOLAS	1	84
D	054-001	SOPORTE PARA SENSORES DE EJE Z	1	85
D	005-000	RODAMIENTO LINEAL	2	86
D	060-001	BUJE DE ACOPLAMIENTO HUSILLO POLEA EJE Z	1	87
D	061-001	BUJE DE ACOPLAMIENTO MOTOR POLEA EJE Z	1	88
D	023-001	POLEA DENTADA	2	89
D	020-001	BANDA DENTADA	1	90
D	100-016	BALERO 8mm	2	91
D	100-018	TORNILLO ALLEN M4 x 50	2	92
D	100-015	TORNILLO CABEZA RANURADA M5x10	4	93
<b>C</b>	<b>003-011</b>	<b>TRANSPORTE EJE Z</b>	<b>1</b>	<b>94</b>
D	050-001	SOPORTE DE PLATAFORMA EJE Z	1	95
D	051-001	CARTABON DE PLATAFORMA EJE Z	2	96
D	032-001	PLACA PLATAFORMA EJE Z	1	97
D	100-019	TORNILLO ALLEN M6 x 20	4	98
D	100-020	TORNILLO ALLEN CABEZ AVELLANADA M5x20	3	99
C	100-003	TUERCA-T M6	2	100
C	100-021	TORNILLO ALLEN M6 x 60	2	101
C	100-011	ARANDELA M6	4	102
C	100-012	TORNILLO ALLEN M5x15	4	103
B	100-006	TORNILLO ALLEN M8x16	4	104

# Apéndice B

## B.1 Conexiones de la tarjeta de potencia

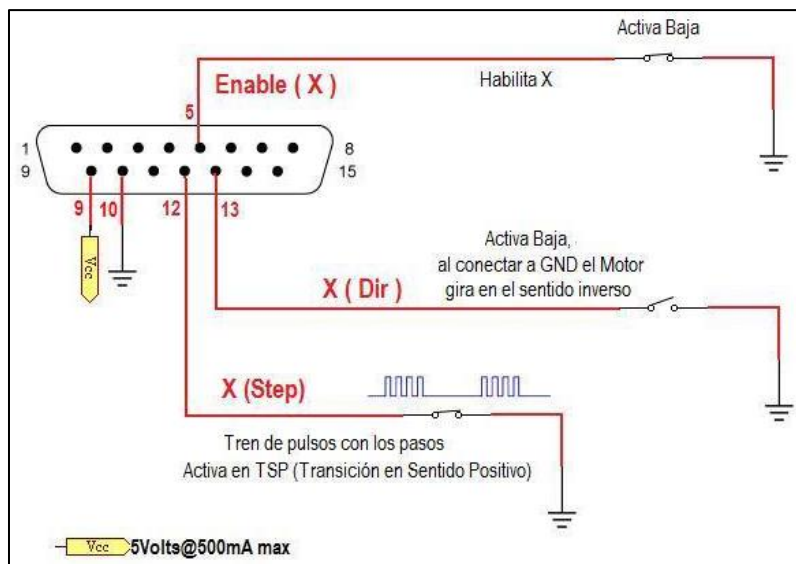
A continuación se presenta el diagrama eléctrico diseñado para las conexiones de las señales que involucran al microcontrolador: señales de entrada provenientes de:

- Los sensores de límite de carrera
- Paro de emergencia
- Puerto USB

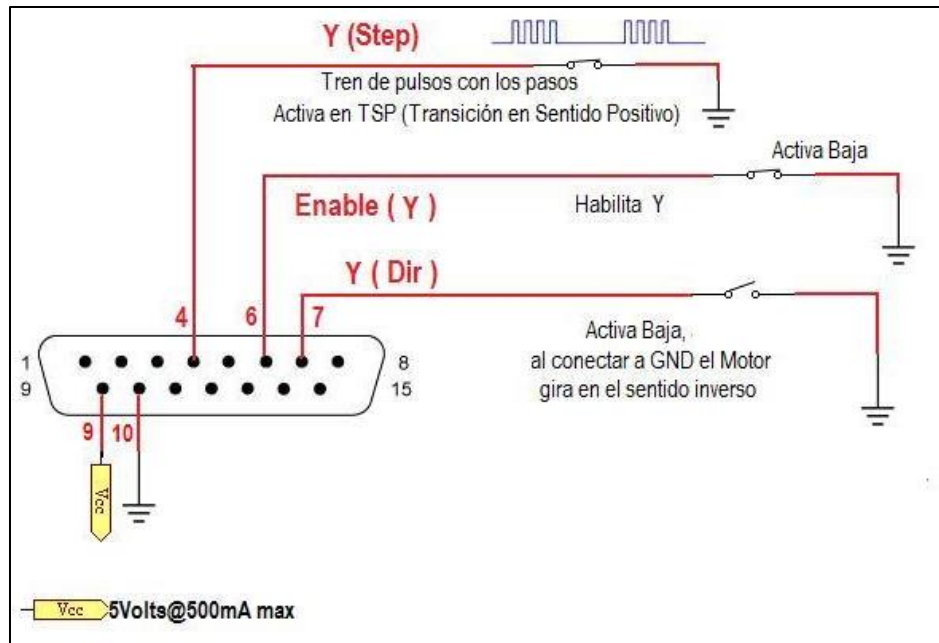
Las señales de salida, en contraparte, comprenden solamente el puerto DB15 que se conecta a la tarjeta de potencia para los motores y el puerto USB.

El conector DB15 concentra las señales de encendido y sentido de rotación de los motores, así como también el envío de pulsos:

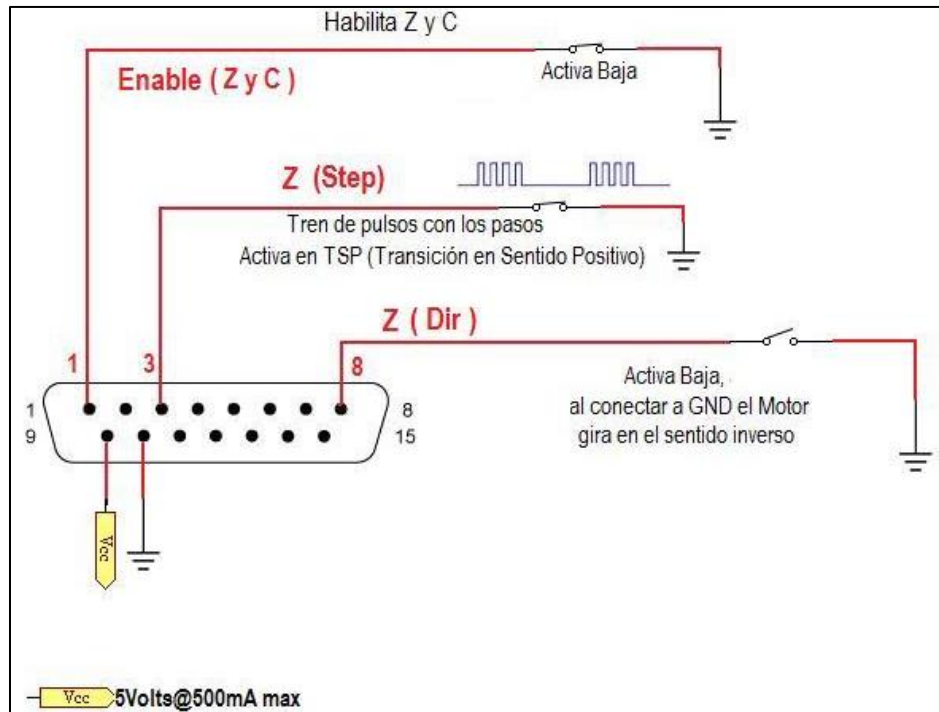
### EJE X



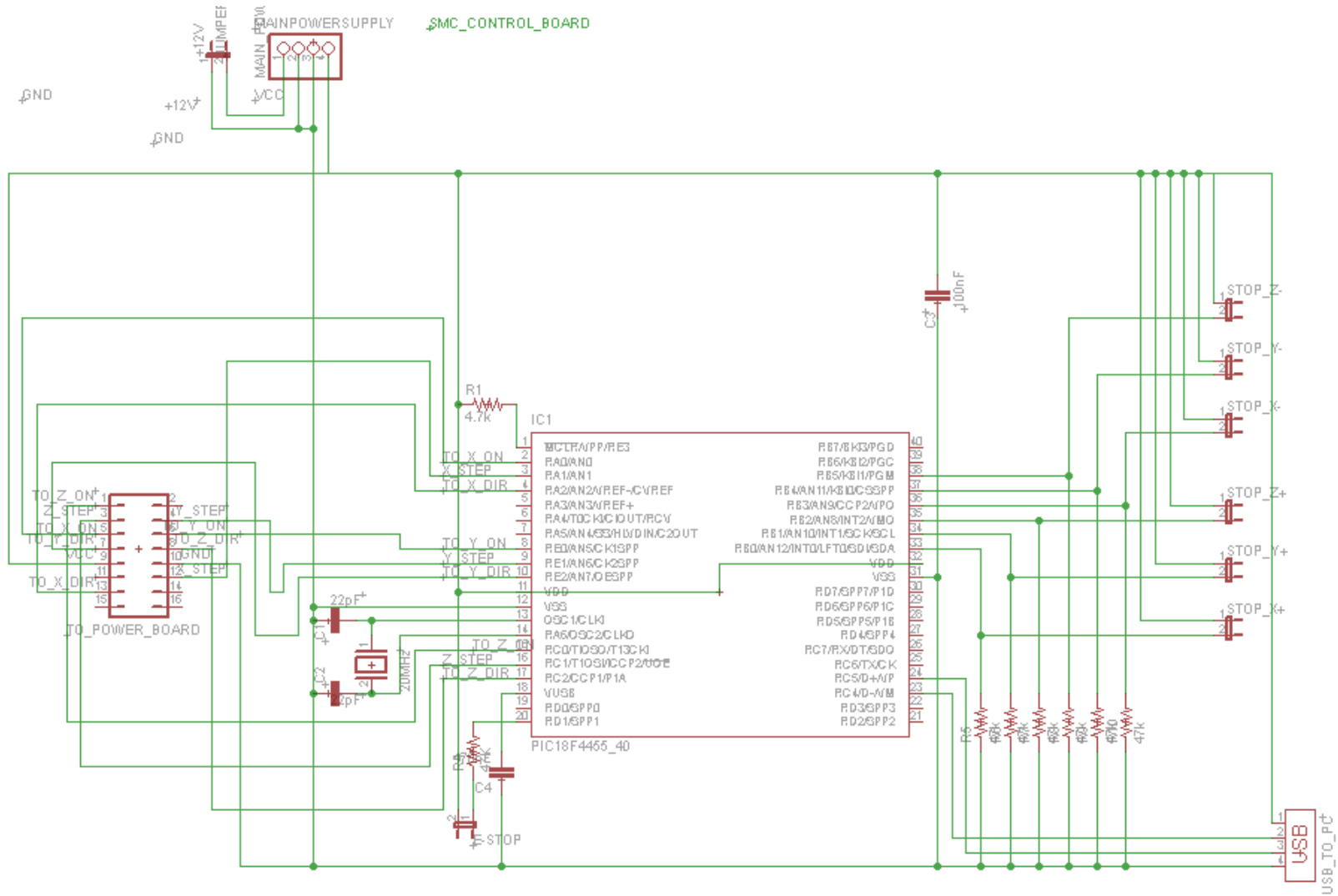
## EJE Y



## EJE Z



## B.2 Circuito de control



### B.3 Lista de materiales eléctricos

Proyecto SMC

Revision

1

Autor: José Angel Jaramilo Rodríguez

Fecha:

14.06.2013

LISTA DE MATERIALES ELÉCTRICOS PARA EL SMC			
NIVEL	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNIDAD
<b>A</b>	<b>CIRCUITO DE CONTROL</b>	<b>1</b>	<b>PZ</b>
B	MICROCONTROLADOR PIC 18F4550	1	PZ
B	CRISTAL DE CUARZO DE 20MHz	1	PZ
B	CAPACITOR ELECTROLÍTICO DE 22pF	2	PZ
B	CAPACITOR ELECTROLÍTICO DE 470nF	1	PZ
B	CAPACITOR ELECTROLÍTICO DE 100nF	1	PZ
B	RESISTOR DE 4.7K	1	PZ
B	RESISTOR DE 47K	7	PZ
B	PUERTO USB HEMBRA TIPO A	1	PZ
B	JUMPER 2 PINES DE UNA HILERA	8	PZ
B	JUMPER 4 PINES DE UNA HILERA	1	PZ
B	JUMPER 16 PINES DE DOS HILERAS	1	PZ
B	CONECTOR DB-15 DE 2 HILERAS TIPO HEMBRA	2	PZ
B	CABLE PLANO DE 16 HILOS	1	MT
B	CONECTOR PARA CABLE PLANO DE 16 HILOS	1	PZ
B	CONECTOR DE 2 PINES TIPO MOLEX	8	PZ
B	CONECTOR DE 4 PINES TIPO MOLEX	1	PZ
B	SENSOR DE LIMITE DE CARRERA	6	PZ
B	ZAPATA PONCHABLE PLANA CALIBRE 2	12	PZ
B	CABLE PVC GRIS CAL # 2	4	MT
B	CABLE PVC MORADO CAL # 2	4	MT
B	CABLE PVC CAFÉ CAL # 2	4	MT
<b>A</b>	<b>CIRCUITO DE POTENCIA</b>	<b>1</b>	<b>PZ</b>
B	TARJETA DE POTENCIA	1	PZ
B	TERMINAL TIPO BAYONETA CAL. #2	14	PZ
B	CABLE PVC ROJO CAL. #2	3	MT
B	CABLE PVC AMARILLO CAL. #2	3	MT
B	CABLE PVC VERDE CAL. #2	3	MT
B	CABLE PVC AZUL CAL. #2	3	MT
B	CABLE PVC BLANCO CAL. #2	3	MT
B	CABLE PVC NEGRO CAL. #2	3	MT
B	THERMOFIT 1/8"	2	MT
B	BASE PARA CINCHO 20x20mm	60	PZ
B	CINCHO 2.5 X 14mm BLANCO	150	PZ



# Apéndice C

En este apéndice se contienen todos los códigos de programación realizados para el control del SMC. Se presentan con detalle los programas que se utilizaron para interactuar desde la computadora con los actuadores que componen al dispositivo; mediante una interface gráfica generada en C++ se puede visualizar numéricamente la posición en los ejes del manipulador y enviar señales para posicionarlos según se requiera. Para esto se utilizó un compilador basado en C que sirviera de enlace en la comunicación con un dispositivo que pudiera administrar las señales de entrada provenientes de la PC y reenviarlas adecuadamente a cada motor. También se presenta el algoritmo con el que se hace la simulación numérica en MATLAB para validar las ecuaciones de restricción propuestas en los análisis cinemáticos del manipulador.

## C.1 Algoritmo de simulación numérica en MATLAB

```
%%                               ANÁLISIS CINEMÁTICO DIRECTO E INVERSO                               %%

% Código de programación que permite calcular la cinemática directa del
% manipulador cartesiano (encontrar posiciones en el espacio a partir de
% revs en los motores) así como la cinemática inversa (conocer el
% número de revs necesarias para llegar a una posición dada)

% José Angel Jaramillo Rodríguez
% "Análisis, diseño y simulación de un sistema de manipulación X Y Z de
% propósito general"
% 31.03.2011

%%                               DEFINICIÓN DE VARIABLES                               %%

clc
clear all

l = 10;           % paso del tornillo de bolas (l) -> 10mm
K = 1/(2*pi);    % constante para transformar a radianes
VRmax = 120;     % Vel máx [rpm] de los motores (puede ser mas!)
VLmax = 20;      % Vel máx [mm/s] de los motores (puede ser mas!)
tac = 4;         % tiempo aceleración (0 a 120 rpm en 4 seg)
m = 10;         % numero de datos
C = 1;          % C=1: Calculo de cinemática directa
                % C!=1: Calculo de cinemática inversa

Th = ones(4,3,m); % Se crea el espacio en la memoria para la generación
% de todos los datos aleatorios que corresponden a las posiciones, velocidades
% y aceleraciones angulares en los motores

P = ones(4,3,m); % Se crea el espacio en la memoria para la generación
% de todos los datos aleatorios que corresponden a las posiciones,
% velocidades y aceleraciones lineales en los ejes

T = ones(3,1,m); % Espacio que se crea en la memoria para almacenar el
% vector de Torques

F = ones(3,1,m); % Espacio que se crea en la memoria para almacenar el
% vectod de Fuerzas
```

```

%      |Posición|Velocidad|Aceleración|
%-----|-----|-----|-----|
% X |           |           |           |
%-----|-----|-----|-----|
% Y |           |           |           |
%-----|-----|-----|-----|
% Z |           |           |           |
%-----|-----|-----|-----|

%%                                %%

% CÁLCULO DE LA CINEMÁTICA DIRECTA. Los valores de theta deben conocerse
% para esta sección del código.

if C == 1
    'Cinemática Directa'

    Th(1,1,:) = 2*pi*randi([0 25],1,1,m);           % Generación del Vector
    % de posiciones angulares aleatorias del Motor X
    Th(2,1,:) = 2*pi*randi([0 28],1,1,m);           % Generación del Vector
    % de posiciones angulares aleatorias del Motor Y
    Th(3,1,:) = 2*pi*randi([0 21],1,1,m);           % Generación del Vector
    % de posiciones angulares aleatorias del Motor Z

    Th(1:3,2,:) = pi/30*randi([0 VRmax],3,1,m);     % Generación del Vector
    % de Velocidades angulares aleatorias en X, Y y Z
    Th(1:3,3,:) = pi/(30*tac)*randi([0 VRmax],3,1,m); % Generación del
    % Vector de Angulares angulares aleatorias en X, Y y Z

    P = zeros(4,3,m); % Se genera un vector para almacenar los resultados
    % con las posiciones en los ejes X, Y y Z

    F(1:3,1,:) = randi([0 1099],3,1,m); % Vector de Fuerzas generadas
    % de manera aleatoria para los ejes X, Y y Z(CHECAR!!)

    T = zeros(3,1,m); % Se genera un vector para almacenar los resultados
    % con los Torques en los motores de cada eje.

    for j = 1:3
        for i = 1:m
            if i >= 2
                J = [eye(3) (1/K)*P(1:3,j,i-1)-Th(1:3,j,i-1);0 0 0 1/K];
                P(:,j,i) = K*J*Th(:,j,i);
                J2 = eye(3);
                T(:, :, i) = 1.2*K*J2*F(:, :, i);
            else
                J = [eye(3) (1/K)*P(1:3,j,i);0 0 0 1/K];
                P(:,j,i) = K*J*Th(:,j,i);
                J2 = eye(3);
                T(:, :, i) = 1.2*K*J2*F(:, :, i);
            end
        end
    end

    P;

    figure;
    Pos(1,1:m) = P(1,1,:);
    Tht(1,1:m) = 1/(2*pi)*Th(1,1,:);
    plot(Tht,Pos,'rs','MarkerFaceColor','b');
    grid on
    xlabel('Posicion angular motor de eje X [rev]')
    ylabel('Posicion lineal en X [mm]')
    title('Cinemática directa: Posicion')

    figure

```

```

Vel(1,1:m) = P(1,2,:); % Velocidad lineal de cada instante
Ome(1,1:m) = 1/(2*pi)*Th(1,2,:); % Omega (velocidad angular) de cada instante
plot(Ome,Vel,'rs','MarkerFaceColor','g');
grid on
xlabel('Velocidad angular motor de eje X [rps]')
ylabel('Velocidad lineal en X [mm/s]')
title('Cinemática directa: Velocidad')

figure
Tor(1,1:m) = T(3,1:)/1000; %
Fza(1,1:m) = F(3,1,:);
plot(Fza,Tor,'rs','MarkerFaceColor','k');
grid on
xlabel('Fuerza en el efector final sobre el eje Z [N]')
ylabel('Torque en el motor [N-m]')
title('Análisis Dinámico: Torque requerido')

else
% CÁLCULO DE LA CINEMÁTICA INVERSA. Los valores de las posiciones son
% proporcionados en esta sección.

'Cinemática Inversa'
P(1,1,:) = randi([0 250],1,1,m); % Generación de valores aleatorios para
% la posición angular en el motor X
P(2,1,:) = randi([0 280],1,1,m); % Generación de valores aleatorios
% para la posición angular en el motor Y
P(3,1,:) = randi([0 210],1,1,m); % Generación de valores aleatorios
% para la posición angular en el motor Z

P(1:3,2,:) = randi([0 VLmax],3,1,m); % Generación de valores aleatorios
% para las velocidades angulares en los motores X, Y y Z

P(1:3,3,:) = (30*tac)/pi*randi([0 VLmax],3,1,m); % Generación de
% valores aleatorios para las aceleraciones angulares en los motores X,
% Y y Z

P2 = P(1:3, :, :);
Th = zeros(4,3,m);
Th2 = Th(1:3, :, :);

T(1:3,1,:) = randi([0 2100],3,1,m);
F = zeros(3,1,m);
for j = 1:3
    for i = 1:m
        if i >= 2
            J = [eye(3) K*Th(1:3,j,i-1)-P(1:3,j,i-1);0 0 0 K];
            Th(:,j,i) = (1/K)*J*P(:,j,i);
            J2 = eye(3);
            Th2(:,j,i) = (1/K)*J2*P2(:,j,i);
            F(:,i) = 1/(1.2*K)*J2*T(:,i);
        else
            J = [eye(3) K*Th(1:3,j,i);0 0 0 K];
            Th(:,j,i) = (1/K)*J*P(:,j,i);
            J2 = eye(3);
            Th2(:,j,i) = (1/K)*J2*P2(:,j,i);
            F(:,i) = 1/(1.2*K)*J2*T(:,i);
        end
    end
end
Th;Th2;

figure;
Pos(1,1:m) = P(1,1,:);
Th(1,1:m) = 1/(2*pi)*Th(1,1,:);
plot(Pos,Th,'rs','MarkerFaceColor','b');
grid on
xlabel('Posición lineal en X [mm]')
ylabel('Posición angular motor de eje X [rev]')
title('Cinemática inversa: Posición')

figure

```

```

Vel(1,1:m) = P(1,2,:);
Ome(1,1:m) = 1/(2*pi)*Th(1,2,:);
plot(Vel,Ome,'rs','MarkerFaceColor','g');
grid on
xlabel('Velocidad lineal en X [mm/s]')
ylabel('Velocidad angular motor de eje X [rps]')
title('Cinemática Inversa: Velocidad')

figure
Tor(1,1:m) = T(3,1:)/1000;
Fza(1,1:m) = F(3,1,:);
plot(Tor,Fza,'rs','MarkerFaceColor','k');
grid on
xlabel('Torque aplicado en el motor del eje Z [N-m]')
ylabel('Fuerza en el efector final [N]')
title('Análisis Dinámico: Capacidad de carga')
end

%%                                GRÁFICAS Y SIMULACIÓN                                %%

% ESPACIO DE TRABAJO Y DEFINICION DE VARIABLES CORRESPONDIENTES

% X | Y | Z
%----|-----|-----
% 280 | 309.755 | 299.35
% 230 | 250 | 250

% Aquí se dan los límites entre los cuales se graficará el espacio de
% trabajo para la Simulación

limXlow = 25;   limXup = 255;
limYlow = 0;   limYup = 250;
limZlow = 0;   limZup = 250;

figure
grid on

%% Se crea el volumen de trabajo máximo posible (modelo 3D).
voxel([0 0 0],[280 309.755 299.35],'g',0.25); % La definición de la función voxel es:
% voxel: ([xmin ymin zmin],[xmax ymax zmax], 'color', porcentaje de
% transparencia.
axis([-25 325 -25 325 -25 325]);
xlabel('Eje X') % Etiqueta de identificación para el eje X
ylabel('Eje Y') % Etiqueta de identificación para el eje Y
zlabel('Eje Z') % Etiqueta de identificación para el eje Z
title('Espacio de trabajo del SMC') % Etiqueta de identificación para el
% título de la gráfica

hold on

% A continuación se grafican las líneas que definen el espacio de trabajo
% para la simulación

%% [X frontal inferior]
xbd = (limXlow:5:limXup); % se crea un vector en el eje X que va del limite inferior
% al limite superior. Se toman en cuenta tolerancias en los extremos de los
% ejes
ybd = limYlow*ones(1,length(xbd)); % se crea un vector de unos en el eje Y que va
% multiplicado por el valor del limite inferior para que se mantenga en la
% misma línea a lo largo del eje X. Debe tener el mismo rango que el vector xbd.
% Se toman en cuenta tolerancias en los extremos de los ejes (25).
zbd = limZlow*ones(1,length(xbd)); % se crea un vector de unos en el eje Z que va
% multiplicado por el valor del limite inferior para que se mantenga en la
% misma línea a lo largo del eje X. Debe tener el mismo rango que el vector xbd.
% Se toman en cuenta tolerancias en los extremos de los ejes (25).
plot3(xbd,ybd,zbd,'*') % Se grafican los vectores anteriores en unos solo
% comet3(xbd,ybd,zbd);

%% [X trasera inferior]
xbi = (limXlow:5:limXup);
ybi = limYup*ones(1,length(xbi));

```

```

zbi = limZlow*ones(1,length(xbi));
plot3(xbi,ybi,zbi,'*')
% comet3(xbi,ybi,zbi);

%% [X frontal superior]
xud = (limXlow:5:limXup);
yud = limYlow*ones(1,length(xud));
zud = limZup*ones(1,length(xud));
plot3(xud,yud,zud,'*')
% comet3(xud,yud,zud);

%% [X trasera superior]
xui = (limXlow:5:limXup);
yui = limYup*ones(1,length(xui));
zui = limZup*ones(1,length(xui));
plot3(xui,yui,zui,'*')
% % comet3(xui,yui,zui);

%% [Y izquierda inferior]
%
ybf = (limYlow:5:limYup);
xbf = limXlow*ones(length(ybf));
zbf = limZlow*ones(1,length(ybf));
plot3(xbf,ybf,zbf,'b*')
% % comet3(xbf,ybf,zbf);

%% [Y derecha inferior]
ybt = (limYlow:5:limYup);
xbt = limXup*ones(length(ybt));
zbt = limZlow*ones(1,length(ybt));
plot3(xbt,ybt,zbt,'b*')
% % comet3(xbt,ybt,zbt);

%% [Y izquierda superior]
yuf = (limYlow:5:limYup);
xuf = limXlow*ones(length(yuf));
zuf = limZup*ones(1,length(yuf));
plot3(xuf,yuf,zuf,'b*')
% % comet3(xuf,yuf,zuf);

%% [Y derecha superior]
yut = (limYlow:5:limYup);
xut = limXup*ones(length(yut));
zut = limZup*ones(1,length(yut));
plot3(xut,yut,zut,'b*')
% comet3(xut,yut,zut);

%% [Z frontal izquierda]
zpl = (0:5:250);
xpl = 25*ones(1,length(zpl));
ypl = 0*ones(1,length(zpl));
plot3(xpl,ypl,zpl,'b*')
% % comet3(xpl,ypl,zpl);

%% [Z frontal derecha]
zp2 = (limZlow:5:limZup);
xp2 = limXlow*ones(1,length(zp2));
yp2 = limYup*ones(1,length(zp2));
plot3(xp2,yp2,zp2,'b*')
% % comet3(xp2,yp2,zp2);

%% [Z trasera izquierda]
zp3 = (limZlow:5:limZup);
xp3 = limXup*ones(1,length(zp3));
yp3 = limZlow*ones(1,length(zp3));
plot3(xp3,yp3,zp3,'b*')
% % comet3(xp3,yp3,zp3);

```

```

%% [Z trasera derecha]
zp4 = (limZlow:5:limZup);
xp4 = limXup*ones(1,length(zp4));
yp4 = limYup*ones(1,length(zp4));
plot3(xp4,yp4,zp4,'b*')
% % comet3(xp4,yp4,zp4);

%%          Para trazo de 2 puntos

Pf = P(1:3,1,2); %Punto Final de la trayectoria
P0 = P(1:3,1,1); %Punto inicial de la trayectoria

Vf = P(1:3,2,2); %Velocidad final en el recorrido
V0 = P(1:3,2,1); %Velocidad inicial en el recorrido

% Grafica de las trayectorias seguidas en los ejes por el manipulador de
% acuerdo con las coordenadas aleatorias generadas por el algoritmo.

% Se grafica primero el Vector resultante, con una linea recta roja punteada
% que une el punto inicial (P0) de la trayectoria con el punto final (PF)
plot3([Pf(1,1,1) P0(1,1,1)],[Pf(2,1,1) P0(2,1,1)],[Pf(3,1,1) P0(3,1,1)],...
    '--rs','LineWidth',2,'MarkerFaceColor','k','MarkerSize',5)
% Se grafica la componente del Vector resultante a lo largo del eje X.
plot3([Pf(1,1,1) P0(1,1,1)],[P0(2,1,1) P0(2,1,1)],[P0(3,1,1) P0(3,1,1)],...
    '--ks','LineWidth',2,'MarkerFaceColor','k','MarkerSize',5)
% Se grafica la componente del Vector resultante a lo largo del eje Y.
plot3([Pf(1,1,1) Pf(1,1,1)],[Pf(2,1,1) P0(2,1,1)],[P0(3,1,1) P0(3,1,1)],...
    '--ks','LineWidth',2,'MarkerFaceColor','k','MarkerSize',5)
% Se grafica la componente del Vector resultante a lo largo del eje Z.
plot3([Pf(1,1,1) Pf(1,1,1)],[Pf(2,1,1) Pf(2,1,1)],[Pf(3,1,1) P0(3,1,1)],...
    '--ks','LineWidth',2,'MarkerFaceColor','k','MarkerSize',5)

% Se añaden etiquetas que indican cual es el punto inicial del recorrido y
% cual es el punto final.
text(P0(1,1,1),P0(2,1,1),P0(3,1,1),'\leftarrow
P_0','FontSize',12,'LineWidth',4,'FontWeight','bold','HorizontalAlignment','left')
text(Pf(1,1,1),Pf(2,1,1),Pf(3,1,1),'\leftarrow
P_f','FontSize',12,'LineWidth',4,'FontWeight','bold','HorizontalAlignment','left')

% Aquí se obtienen las normas de posición y velocidad
N = Pf - P0; % Se obtiene la magnitud del Vector de posición
% resultante (Pfinal - Picial)
VN = P(1:3,2,2)-P(1:3,2,1); % Se obtiene la magnitud del Vector de velocidad
% resultante (Vfinal - Vinicial)
norm(N) % Resultante vector posición
norm(VN) % Resultante vector velocidad

% voxel([25 10 0],[275 290 210],'g',0.8);

```

## C.2 Firmware del PIC18F4550

El código de programación que se graba en el PIC es una rutina principal que invoca diversas funciones con las cuales se configuran varios parámetros, como lo son la velocidad de transmisión de datos por USB, el protocolo de comunicación que ha de usarse para la transmisión de datos y el tamaño del buffer de datos, entre otros. Dicha programación está escrita en el compilador “HI-TECH C PRO for PIC18” basado en el lenguaje C proporcionado de manera gratuita por Microchip.

En un primer bloque de instrucciones se configuran los parámetros de operación para el PIC 18F4550 que permiten al microcontrolador, por ejemplo, funcionar a la frecuencia adecuada para mantener en funcionamiento la funcionalidad del puerto USB. Enseguida, se hace el planteamiento de todas las variables que se ven involucradas durante el desarrollo de las tareas del manipulador, tales como:

- Variables para establecer el retraso entre cada pulso que se envía al motor.
- Variables para enviar la cantidad de pulsos necesarios ante un desplazamiento deseado hacia los motores.
- Variables para almacenar la cantidad y el sentido de un movimiento solicitado desde la PC.
- Variables para registrar el avance total que se ha dado en cualquiera de los motores.
- Variables para convertir las cantidades de pulsos en unidades de longitud y viceversa.

Un segundo bloque contiene la rutina de ejecución principal que verifica en todo momento el estado del USB y que, en función de su disponibilidad, envía o recibe datos. En base a estos datos se prosigue con la el análisis de las tareas que debe controlar el microcontrolador invocando a su vez a otra rutina (referirse a la función “ProcessIO” del código). En la parte final de este bloque se inicializan los valores de todas las variables declaradas a un valor que en la mayoría de los casos es cero, para evitar comportamientos no deseados.

Dado que existen varias tareas que el dispositivo debe realizar, se generó el tercer bloque de instrucciones en donde se plantea una estructura de casos. Cada uno de estos casos corresponde a una de las tareas del manipulador y es el primer valor que se recibe o envía a través del puerto USB. Este valor es verificado y se procede con la asignación especificada que puede indicar solamente el movimiento y sentido en cualquiera de los ejes o, dependiendo del proceso, recibir una serie de posiciones proveniente de la interface en la PC para transformarla en las correspondientes posiciones y enviar los pulsos a cada motor de pasos.

Finalmente está el bloque en el que se contienen todas las subrutinas que se encargan de procesar la información recibida o que se va a enviar por el puerto. Dichas subrutinas se encuentran detalladas mediante condiciones lógicas que evalúan los datos

registrados y mediante ciclos verifican básicamente que los valores de posición hayan sido alcanzados.

Es importante aclarar que los tipos de variables y sus tamaños corresponden con las variables configuradas en el código de la interface de la PC para que la transmisión de datos y su interpretación fuera coherente en ambos códigos.



### **C.3 Programación de la interface visual**

De la misma manera que para el firmware elaborado para el microcontrolador, se generó un código principal en el lenguaje C++ que controla la ejecución de diversas rutinas destinadas a configurar el puerto USB de la computadora de forma que esté disponible y sea compatible con la configuración generada en el microcontrolador en cuanto a la velocidad, el tamaño de buffer y el tipo de transmisión de datos.

Esta interface, además, monitorea el estado (posiciones de los ejes) y administra las señales necesarias para operar el SMC; a su vez permite establecer relaciones entre dichos datos y variables de proceso que se traducen en envío de datos a través del USB hacia el microcontrolador, ya sea para leer los desplazamientos y posiciones que se registran en ese momento en el dispositivo o bien para enviar posiciones deseadas hacia el mismo.

De manera general la rutina de instrucciones que controlan el funcionamiento del sistema es similar en sus funciones a la programación del firmware. Las variaciones se presentan en la sintaxis y en la configuración de la interface, ya que se genera automáticamente un código para poder controlar el comportamiento de los elementos dentro de la aplicación tales como los botones de acción, cuadros de texto y menús contextuales.

# Apéndice D

## D.1 Datos técnicos del tornillo de bolas

De acuerdo con la Figura 3.2 se tienen los siguientes parámetros geométricos que son útiles para determinar los factores de diseño del tornillo de bolas [66]:

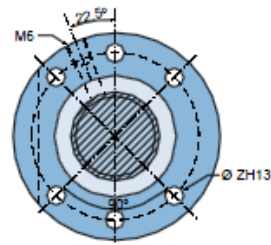
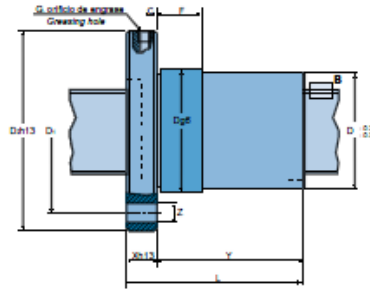
- $d_0$  = diámetro nominal
- $d_1$  = diámetro exterior del husillo
- $d_2$  = diámetro del núcleo del husillo a bolas
- $d_3$  = diámetro del asiento del cojinete
- $D$  = diámetro exterior del cuerpo de la tuerca
- $D_4$  = diámetro del núcleo del cuerpo de la tuerca
- $D_3$  = diámetro interior del cuerpo de la tuerca
- $D_{pw}$  = diámetro del círculo de centros de bola
- $D_w$  = diámetro nominal de la bola
- $l_1$  = longitud de rosca
- $P_h$  = paso
- $\alpha$  = ángulo de contacto entre bola y pista
- $\phi$  = ángulo de hélice

En la tabla D.1.1 se aprecian los modelos de tornillos de bolas con algunas especificaciones técnicas de interés así como las dimensiones inherentes a cada tipo de husillo. Para el caso del SMC los tres tornillos que conforman a los ejes del dispositivo son del modelo BS-1610-3, que corresponde a un tornillo de bolas de brida simple con 16mm de diámetro, paso de 10mm y 3 pistas en el interior de la tuerca por donde circulan un total de 48 bolas [65].

Algunas de las dimensiones que aparecen en los diagramas de referencia de esta tabla son idénticas a las del husillo adquirido con el proveedor seleccionado. Los parámetros que no corresponden no afectan los cálculos realizados y sirven simplemente para dimensionar el modelo tridimensional de los ejes y del manipulador.

# Husillos a bolas laminados y rectificados

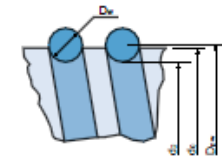
## Rolled and Ground Ball Screws



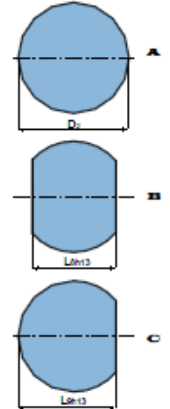
Diámetro Diameter	Paso Lead										
	4	5	6	8	10	12	16	20	25	32	40
12											
16											
20											
25											
32											
40											

**TUERCA SIMPLE CON BRIDA**  
**Tipo : BS**  
**SINGLE NUT WITH FLANGE**  
**Type: BS**

Referencia Type	Diámetro Diameter D <sub>2</sub>	Paso Lead P	Diam. bolas Ball diameter D <sub>p</sub>	D <sub>pw</sub>	C <sub>2</sub>	Laminados / Rolled B.S.		Rectificados / Ground B.S.			Dimensiones de la tuerca / Nut dimensions										Referencia Type		
						C <sub>2</sub> (N)	C <sub>2</sub> (N)	R <sub>2</sub> (N/mm)	R <sub>2</sub> (N/mm)	C <sub>2</sub> (N)	C <sub>2</sub> (N)	D	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	X	Y	L	L <sub>a</sub>	L <sub>b</sub>	Z		C	F
BS-1204-2	12	4	2,381	12,66	10,279	2	5032	2849	0,05	19,9	82,5	5591	3165	24	34	31	35,5	5,5	5	10	BS-1204-2		
BS-1204-3	12	4	2,381	12,66	10,279	3	7548	4037	0,05	19,9	121,6	8387	4485	29	39	31	35,5	5,5	5	10	BS-1204-3		
BS-1204-4	12	4	2,381	12,66	10,279	4	10065	5170	0,05	19,9	160,0	11183	5744	33	43	31	35,5	5,5	5	10	BS-1204-4		
BS-1205-2	12	5	2,381	12,66	10,279	2	5018	2846	0,05	19,9	83,2	5576	3162	28	38	31	35,5	5,5	5	10	BS-1205-2		
BS-1205-3	12	5	2,381	12,66	10,279	3	7528	4033	0,05	19,9	122,5	8364	4481	33	43	31	35,5	5,5	5	10	BS-1205-3		
BS-1604-2	16	4	2,381	16,66	14,279	2	7794	3641	0,05	37,0	112,0	8660	4045	24	34	40	44	5,5	5	10	BS-1604-2		
BS-1604-3	16	4	2,381	16,66	14,279	3	11690	5159	0,05	37,0	165,1	12989	5732	29	39	40	44	5,5	5	10	BS-1604-3		
BS-1604-4	16	4	2,381	16,66	14,279	4	15587	6607	0,05	37,0	217,4	17319	7341	33	43	40	44	5,5	5	10	BS-1604-4		
KBS-1605	16	5	3,5	17	13,5	2	10881	5759	0,05	34,8	116,3	12090	6399	28	38	40	44	5,5	5	10	KBS-1605		
BS-1605-3	16	5	3,5	17	13,5	3	16322	8162	0,05	34,8	171,4	18135	9069	33	43	40	44	5,5	5	10	BS-1605-3		
BS-1605-4	16	5	3,5	17	13,5	4	21762	10454	0,05	34,8	225,6	24190	11615	38	48	40	44	5,5	5	10	BS-1605-4		
BS-1610-2	16	10	3,5	17	13,5	2	10742	5735	0,05	34,8	119,2	11935	6372	43	53	40	44	5,5	5	16	BS-1610-2		
BS-1610-3	16	10	3,5	17	13,5	3	16113	8127	0,05	34,8	175,6	17903	9030	57	67	40	44	5,5	5	16	BS-1610-3		
BS-1610-4	16	10	3,5	17	13,5	4	21484	10409	0,05	34,8	231,1	23871	11565	67	77	40	44	5,5	5	16	BS-1610-4		
BS-2004-2	20	4	2,381	20,66	18,279	2	10096	4128	0,05	59,4	142,4	11218	4587	24	34	44	51	6,6	5	10	BS-2004-2		
BS-2004-3	20	4	2,381	20,66	18,279	3	15144	5851	0,05	59,4	210,0	16827	6501	29	39	44	51	6,6	5	10	BS-2004-3		
BS-2004-4	20	4	2,381	20,66	18,279	4	20192	7493	0,05	59,4	276,6	22436	8326	33	43	44	51	6,6	5	10	BS-2004-4		
BS-2005-2	20	5	3,5	21	17,5	2	13869	6578	0,05	56,6	141,9	15410	7309	28	38	44	51	6,6	5	10	BS-2005-2		
KBS-2005	20	5	3,5	21	17,5	3	20804	9323	0,05	56,6	209,1	23116	10359	33	43	44	51	6,6	5	10	KBS-2005		
BS-2005-4	20	5	3,5	21	17,5	4	27739	11940	0,05	56,6	275,4	30621	13267	38	48	44	51	6,6	5	10	BS-2005-4		
BS-2010-2	20	10	3,5	21	17,5	2	14734	6869	0,05	56,6	148,6	16371	7632	43	53	44	51	6,6	5	16	BS-2010-2		
BS-2010-3	20	10	3,5	21	17,5	3	22101	9734	0,05	56,6	218,9	24557	10816	57	67	44	51	6,6	5	16	BS-2010-3		
BS-2010-4	20	10	3,5	21	17,5	4	29469	12467	0,05	56,6	288,2	32743	13852	67	77	44	51	6,6	5	16	BS-2010-4		
BS-2020-2	20	20	3,5	21	17,5	2	16163	7385	0,05	56,6	165,8	17959	8206	58	68	44	51	6,6	5	25	BS-2020-2		



Detalle B  
Detail B



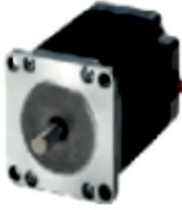
KBS Tuerca de STOCK con brida tipo xx  
STOCK nut. Flange type xx

• Standard únicamente rosca derecha. Rosca izquierda bajo consulta.  
 • R<sub>2</sub> = Rigidez del eje del husillo a bolas en el caso de un extremo fijo y otro libre por 1m de longitud. Para el caso de los dos extremos fijos multiplicar por 4.  
 • R<sub>2</sub> = Rigidez de la tuerca para una carga de servicio media del 30% de la capacidad de carga dinámica y una calidad IT5.

• Standard thread RH only. Left hand thread on request.  
 • R<sub>2</sub> = Rigidity of the ball screw shaft with one end fixed and one end free, per unit length of one meter. For two end fixed systems, multiply by 4.  
 • R<sub>2</sub> = Rigidity of the nut for a working load equal to 30% of the dynamic load rating and for a tolerance grade of IT5.

Tabla D.1.1. Tabla de especificaciones geométricas y mecánicas del husillo a bolas

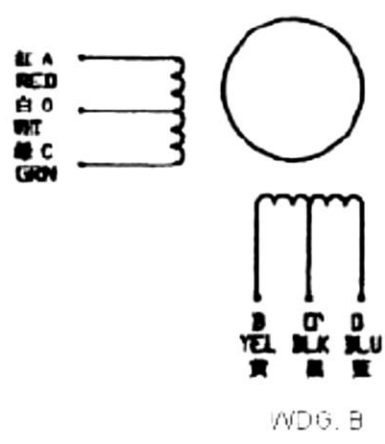
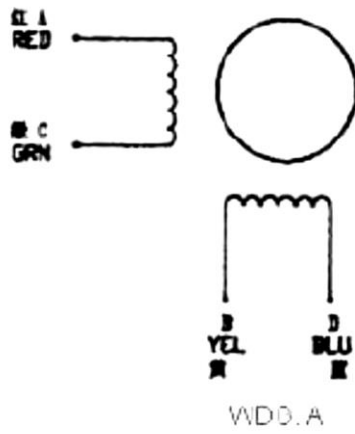
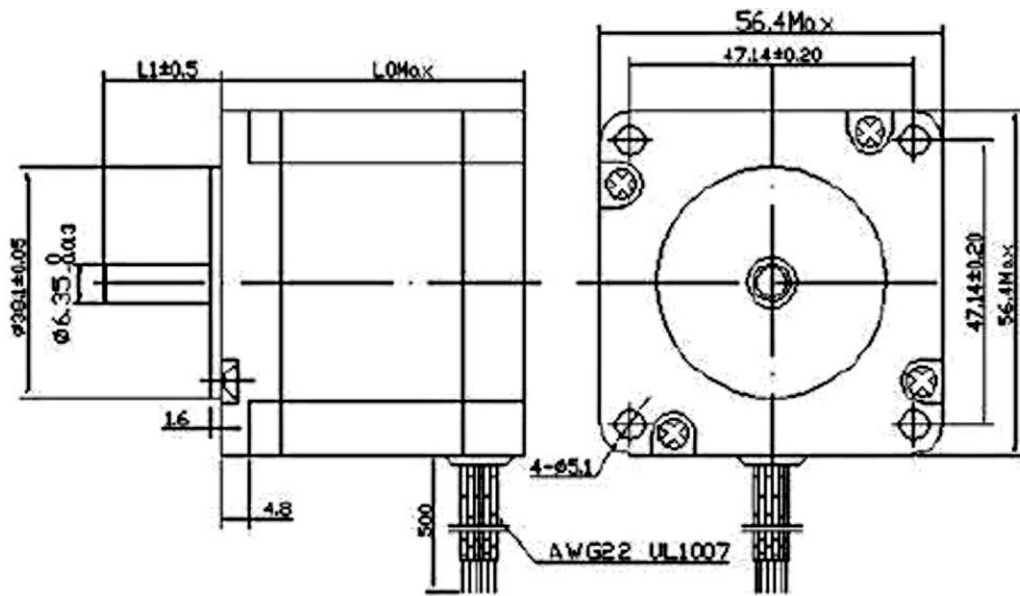
## D.2 Hoja técnica del motor de pasos



- Data Group: 535
- SKU: 1126035
- Weight (Kg): 3,0000
- Description: 57BYGH408
- HS Code: 8501,10,4040
- Applications: Stage lights, medical equipment, security control

KYSAN SKU	MFG Model	No. of Phase	Voltage Phase (V)	Current Phase (A)	Resistance Phase (Ω)	Induct, Phase (mH)	Holding Torque (Kg,cm)	Detent Torque (g,cm)	Weight (Kg)	Size (mm)		Wire Connect.
										L0	L1	
1126001	57BYGH001	4	5	1	5	5	4	220	0,42	41	21	WDG, B
1126008	57BYGH006	4	24,14	0,34	71	90	4,4	?	0,42	41	22	WDG, B
1126009	57BYGH007	2	14,2	0,4	35,5	52	5,6	?	0,42	41	22	WDG, A
1126010	57BYGH008	4	2,8	2	1,4	1,2	4,2	?	0,42	41	21	WDG, B
1126007	57BYGH101	2	7,2	0,6	12	32	7	320	0,55	50	21	WDG, A
1126006	57BYGH102	2	2,4	3	0,8	2,4	7	320	0,55	50	22	WDG, A
1126011	57BYGH103	4	12,16	0,38	32	38	6	320	0,65	50	21	WDG, B
1126012	57BYGH104	4	2,53	2,3	1,1	1,4	8,2	?	0,65	50	21	WDG, B
1126005	57BYGH201	2	2,8	2,5	1,1	3,6	9	400	0,6	54	25,4	WDG, A
1126013	57BYGH202	4	2,25	3	0,75	1,2	9	400	0,65	54	21	WDG, B
1126014	57BYGH207	4	12	0,4	30	60	8	?	0,7	56	21	WDG, B
1126015	57BYGH208	4	3,52	1,6	2,2	3,4	8	?	0,65	53	25,5	WDG, B
1126017	57BYGH211	4	4,16	1,6	2,6	5	9	?	0,65	50	21	WDG, B
1126018	57BYGH212	2	3,5	1	3,5	12,5	9	?	0,65	54	21	WDG, A
1126019	57BYGH213	4	6,2	1	6,2	10	9	?	0,65	54	21	WDG, B
1126020	57BYGH218	2	8,2	1	8,2	16,8	10	?	0,7	56	31,5	WDG, A
1126050	57BYGH291	4	3,25	2,5	1,3	4,5	8	?	0,7	54	21	WDG, B
1126022	57BYGH301	2	5,88	1,4	4,2	15	15	700	1,1	76	21	WDG, A
1126023	57BYGH302	4	3	3	1	2,1	13	700	0,65	76	21	WDG, B
1126024	57BYGH303	4	5,75	2,3	2,5	5,3	13	700	0,65	76	21	WDG, B
1126025	57BYGH310	2	8,6	2	4,3	16,2	24	?	1,1	76	21	WDG, A
1126026	57BYGH311	4	3,6	3	1,2	2,2	15	?	1,1	76	25,5	WDG, B
1126027	57BYGH315	4	3	3	1	1,6	13,5	?	1,1	76	25,5	WDG, B
1126028	57BYGH316	2	4,2	3	1,4	3,5	18	?	1,1	76	21	WDG, A
1126029	57BYGH317	4	4,5	2,5	1,8	3	18	?	1,1	76	21	WDG, B
1126030	57BYGH318	2	3,3	3,3	1	2	18	?	1,1	76	21	WDG, A
1126031	57BYGH320	2	15,2	0,4	38	150	18	?	1,1	76	21	WDG, A
1126032	57BYGH323	2	32	0,4	80	18,5	16	?	1,1	76	21	WDG, A
1126033	57BYGH402	4	5,5	2,5	2,2	3,8	18	?	1,5	82	30	WDG, B
1126034	57BYGH405	4	3,6	3	1,2	2,4	21	?	1,3	82	21	WDG, B
1126035	57BYGH408	2	3,6	3	1,2	4	21	?	1,5	82	21	WDG, A
1126002	57BYGH801	4	3,3	1,5	2,2	22	5,6	?	1,14	50	21	WDG, B
1126003	57BYGH802	4	4,8	1,5	3,2	2,9	8,1	?	1,14	50	21	WDG, B
1126004	57BYGH803	4	6,3	1,5	4,2	8,5	14,3	?	1,14	76	21	WDG, B

Step Angle-----1,8 ° ±5%  
 Insulation Resistance-----500V DC 100MΩ Min  
 Insulation Strength-----50Hz 1Minute 500V Min  
 Ambient Temperature ----- -20 ~ +50 Degree C  
 Temperature Rise-----80 Degree C Maximum  
 Radial Play-----0,02 mm Maximum  
 End Play-----0,1-0,3 mm



### D.3 Datos técnicos de la tarjeta de potencia

La tarjeta de potencia que se utiliza para energizar los motores de pasos fue adquirida dentro de un paquete con los propios actuadores, el tornillo de bolas y los cojinetes lineales. El proveedor es una empresa mexicana que vende equipo para fabricación de mesas de coordenadas, pequeños CNC's y aplicaciones de automatización.

Esta tarjeta de control tiene la capacidad para energizar hasta 4 ejes (motores) y consta de un circuito de control para motores paso a paso que posee las siguientes características:

- Controladora para 4 motores bipolares paso a paso de 4, 6 u 8 hilos.
- Fuente de alimentación de corriente directa. Se recomienda que la fuente suministre 24 V.
- Circuitos integrados Toshiba TB6560AHQ 3.5 Amperes por eje para suministrar la potencia necesaria a los actuadores.
- Capacidad variable en el desplazamiento desde 1 hasta 1/16 micro-pasos para mayor precisión.
- Corriente ajustable por eje - 25%,50%,75%,100% para suministrar la energía requerida.
- Protección contra sobre-Carga, Sobre-corriente y temperatura
- Interface paralela opto-aislada que evita daños a la PC o dispositivo desde el que se envía y administran las señales.
- Relevador mecánico interno para controlar una salida de 36V 7.5<sup>a</sup> como parámetros máximos.
- 4 Canales de entrada para la habilitación de interruptores de límites de carrera o Paro de emergencia.
- Soporta la mayoría de los software de control CNC por puerto paralelo MACH3, KCAM4, EMC2 etc. en caso de querer probar una aplicación de ese tipo.

La tarjeta cuenta con un puerto serial para poder conectar un dispositivo de control manual con el cual se puedan manipular los motores. Para el SMC se utiliza el control de los motores mediante el PIC, que envía las señales necesarias para los pulsos (pasos), para energizar a los motores que deben funcionar y para cambiar el sentido de giro de los actuadores. Todas estas señales se introducen a la tarjeta de control a través de este puerto en la tarjeta.

En la Figura D.3.1 se pueden visualizar físicamente los componentes que componen la tarjeta, los puertos de los que está provista y los accesorios que pueden ser conectados. La tabla D.3.1 es útil para identificar las combinaciones de ajuste de la tarjeta para modificar los parámetros de micro-paso, corriente y velocidad de giro. Dichos ajustes se realizan por medio de un DIP Switch para cada motor.

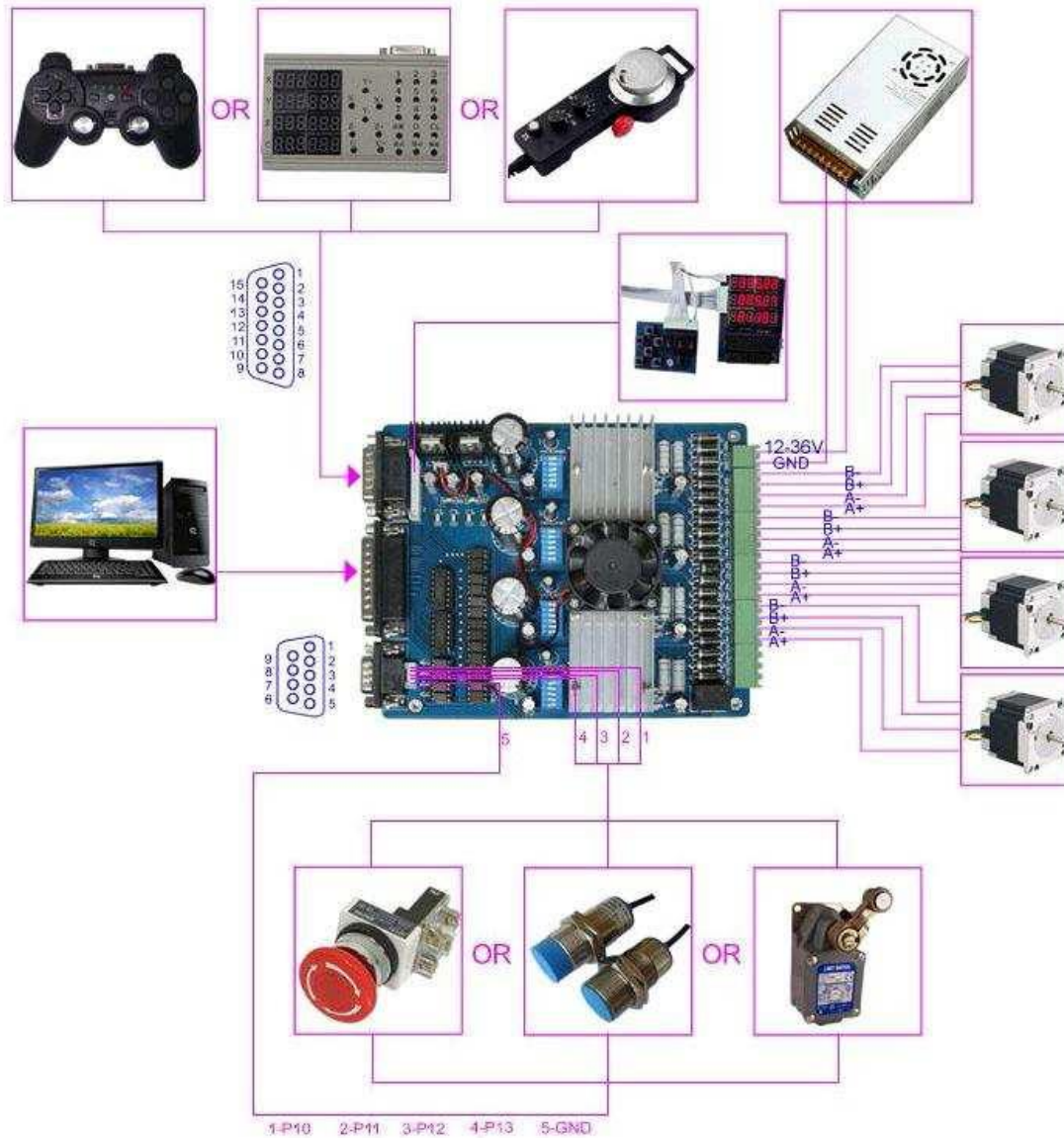


Figura D.3.1. Esquema del arreglo físico de la tarjeta de potencia.

Corriente	1	2	Modo	3	4	Micro-paso	5	6
100%	ON	ON	Rápido	ON	ON	1	ON	ON
75%	ON	OFF	25%	ON	OFF	1/2	ON	OFF
50%	OFF	ON	50%	OFF	ON	1/16	OFF	ON
25%	OFF	OFF	Lento	OFF	OFF	1/8	OFF	OFF

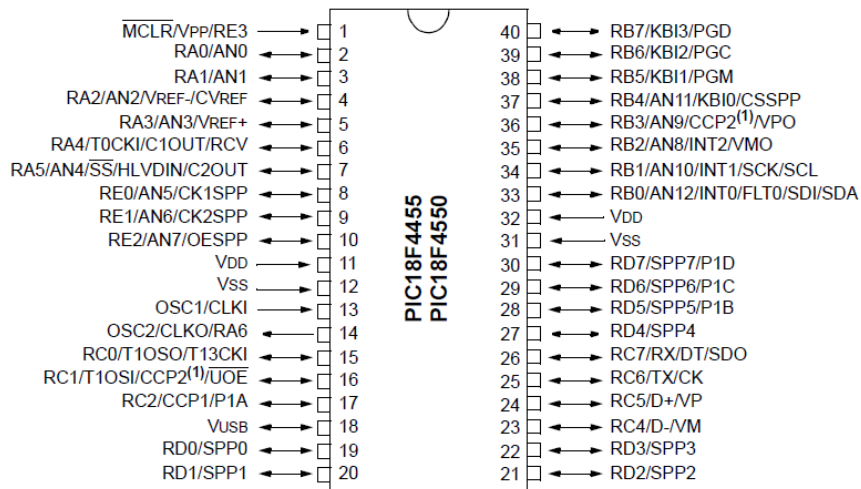
Tabla D.3.1. Cuadro de configuraciones DIP Switch para el ajuste de parámetros de operación.

## D.4 Datos técnicos del PIC18F4550

Los microcontroladores PIC de microchip ofrecen una serie de ventajas que influyeron en la selección de este dispositivo entre las cuales destacan:

- Gran variedad de familias que permiten adaptar el microcontrolador a las necesidades de cada proyecto
- Herramientas para el desarrollo de aplicaciones
- Amplia gama de unidades funcionales embebidas (Temporizadores, PWM, convertidores A/D, USB, etc.)
- Extensa disponibilidad de bibliografía, ejercicios, hojas de datos y manuales para desarrollo de proyectos.

### 40-Pin PDIP



El PIC18F4550 dispone de 5 puertos de entradas y salidas que incluyen un total de 35 líneas digitales de E/S:

PUERTO	LINEAS DE Entrada / Ssalida
PORTA	7 líneas E/S
PORTB	8 líneas E/S
PORTC	6 líneas E/S + 2 líneas E
PORTD	8 líneas E/S
PORTE	3 líneas E/S + 1línea E

De manera particular, el PIC18F4550 fue elegido por la capacidad de este microcontrolador para emplear comunicación serial a través del puerto USB. Esta característica es importante para proporcionar flexibilidad al manipulador en las modificaciones de su funcionalidad y conectividad con cualquier dispositivo, ya sea portátil o de escritorio.



## D.5 Ficha técnica del programador del PIC

Para poder grabar el firmware en el microcontrolador es preciso contar con un dispositivo programador para poder configurar el PIC con nuevos programas, borrar códigos erróneos, limpiar toda la memoria y verificar el correcto funcionamiento del circuito integrado.

El programador “Master-Prog” fue adquirido para este efecto ya que cuenta con una conexión por medio del puerto USB para poder grabar los códigos desde cualquier computadora. Está provisto de una aplicación gráfica ejecutable mediante la cual es posible realizar diversas tareas:

- Leer el contenido de la memoria del PIC
- Escribir algún código en la memoria del microcontrolador
- Verificar que el contenido en la memoria del PIC haya sido correctamente grabado
- Borrar el contenido total de la memoria del PIC
- Asegurar que el dispositivo esté completamente borrado para nuevas tareas

Además de estas opciones, esta aplicación permite entrar en diversos modos de configuración para varias familias de microcontroladores PIC, herramientas de programación y un menú de ayuda que puede ser consultado ante eventuales problemáticas.

