



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

"BALANCEO AUTOMÁTICO DE UN SIMULADOR PARA
CONTROL DE ORIENTACIÓN DE SATELITES."

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA
(AREA MECÁNICA)

P R E S E N T A :
JOSÉ ALEJANDRO JUÁREZ DURÁN.

DIRECTOR DE TESIS: M. en Ing. JORGE PRADO MOLINA.



MÉXICO, D.F. 2001.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

DEDICATORIA

A mis padres y hermano:

por el apoyo y la confianza que depositaron en mí durante mis estudios.

A mis profesores:

por compartir sus conocimientos.

A mis amigos y compañeros:

por la amistad desinteresada que me brindaron.

A cada uno de mis familiares de los cuales recibí apoyo, consejos y amistad fundamentales para mi completa formación.

RECONOCIMIENTOS

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería por los conocimientos adquiridos en el transcurso de mis estudios.

Al Instituto de Geografía de la UNAM, por las facilidades y apoyo brindados.

A la Facultad de Ingeniería de la UNAM, Laboratorio de Manufactura Avanzada por el apoyo brindado para la fabricación del balero de aire esférico.

Al M. en Ing. Jorge Prado Molina por haber compartido sus conocimientos, así como sus valiosos comentarios y asesorías para el desarrollo de esta tesis.

INDICE.

RESUMEN

1.-INTRODUCCION.

1.1.-Necesidades de un simulador físico .

1.2.-Diferentes opciones de simuladores.

1.2.1.-Configuración más adecuada a nuestras necesidades, o tipo de simulador a desarrollar.

1.3.-Balanceo estático.

1.4.-Determinación del centro de masa.

1.5.-Reubicación del centro de masa.

2.-DETERMINACION DEL CENTRO DE MASA (CM).

2.1.-Determinación del estado inercial de la plataforma.

2.2.-Cálculo del centro de masa.

3.-DISEÑO Y FABRICACIÓN DE LA PLATAFORMA Y EL BALERO DE AIRE ESFÉRICO.

3.1.-Diseño de la plataforma.

3.2.-Diseño de la plataforma con materiales compuestos. (Matriz carbono-epoxy).

3.2.1.-Método de fabricación.

3.3.-Baleros de aire.

3.3.1.-Baleros de aire planos.

3.3.2.-Baleros de aire esféricos.

3.3.2.1.-Baleros de aire esféricos monoflujo.

3.3.2.2.-Baleros de aire multiflujo.

3.4.-Diseño de un balero de aire esférico multiflujo.

3.4.1.-Determinación de las distribuciones de presión.

3.4.2.-Cálculo de la carga máxima que puede sustentar el balero.

3.4.3.-Cálculo del coeficiente de fricción.

3.5.-Maquinado de la esfera y la copa.

3.5.1.-Diseño CAD-CAM .

3.5.2.-Máquina de control numérico.

3.5.3.-Resultados del maquinado. Mediciones hechas con una máquina de medición por coordenadas.

3.6.-Perforaciones capilares.

3.7.-Tallado y pulido entre superficies.

3.8.-Diseño de la brida y soporte del balero y plataforma.

3.9.-Pruebas de funcionamiento.

4.-DISEÑO Y FABRICACIÓN DE LOS ACTUADORES Y SU INCORPORACIÓN A LA PLATAFORMA DE SIMULACIÓN.

- 4.1.-Diseño y fabricación de los sistemas de masas deslizantes.
- 4.2.-Determinación del centro de masa.
- 4.3.-Determinación del vector que une el CM con el centro de rotación (CR).
- 4.4.-Reubicación del centro de masa.
- 4.5.-Sistema de control realimentado.
- 4.6.-Brújula electrónica .
 - 4.6.1.-Curvas de respuesta de los inclinómetros.
- 4.7.-Interfases de potencia con los motores de pasos.

5.-RESULTADOS.

- 5.1.-Prueba del sistema de balanceo automático.

6.-CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

APÉNDICES

A.-PROGRAMA DE CONTROL NUMÉRICO UTILIZADO PARA LA FABRICACIÓN DEL BALERO DE AIRE ESFÉRICO.

- A.1.-Programa para la fabricación de la copa del balero de aire.
- A.2.-Programa para la fabricación de la esfera del balero de aire.

B.- PLANOS DE CONSTRUCCIÓN DE LA PLATAFORMA DE SIMULACIÓN Y ACTUADORES.

REFERENCIAS.

RESUMEN

En este trabajo presenta el diseño, la construcción y las pruebas de funcionamiento realizadas a una plataforma de simulación para control de orientación de satélites pequeños. Este simulador permite evaluar de una manera realista y objetiva el desempeño de sensores, actuadores y algoritmos que serán incorporados posteriormente en satélites artificiales.

Este sistema permite también simular una de las condiciones orbitales más importantes desde el punto de vista de sistemas dinámicos: la falta de fricción; además que sirve como plataforma para llevar a cabo la integración de los sensores, actuadores, baterías, controladores y todos los aditamentos necesarios para reproducir un estado de inercia dado, así como efectuar un balanceo estático automático, con masas deslizantes, para cancelar en la medida de lo posible los efectos de la gravedad.

Se determinó que el simulador que mejor se adapta a las necesidades de trabajo, consiste básicamente de una plataforma de forma circular con multiperforaciones radiales, que permite la sujeción de los diferentes componentes de control en prácticamente cualquier posición; y suspendida sobre un balero de aire esférico que permite el movimiento en tres ejes, con fricción despreciable.

Es de gran importancia resaltar la utilidad del balanceo de la plataforma (manual y automático) particularmente éste último, ya que sin él, las pruebas de control de orientación no pueden realizarse de manera adecuada; debido a que el simulador se precipita súbitamente hacia abajo, debiendo pivotarlo en dos puntos, lo que restringe los movimientos a un solo eje. Esto introduce por supuesto fricción, lo que no permite cuantificar correctamente los resultados, estando éstos muy poco cercanos a la realidad.

Se presentan los modelos matemáticos que definen su comportamiento estático de la plataforma y las pruebas de detección de orientación efectuadas. Se discuten los diseños de detalle, la construcción y se presentan los resultados obtenidos con pruebas experimentales y su comparación con los modelos desarrollados.

1.- INTRODUCCIÓN.

Los instrumentos y equipos de teledetección o comunicaciones a bordo de satélites, adquieren un aumento muy significativo en su capacidad operativa, comparados con los instalados en tierra o a bordo de aeronaves; debido a la cobertura tan amplia que tienen de una porción del planeta. En nuestros días es muy común utilizar servicios como la telefonía, la televisión y la radio, proporcionados por los satélites de comunicaciones. Los satélites meteorológicos y los de percepción remota son extensamente utilizados para monitoreo de condiciones ambientales o estudios territoriales de diversa índole. Las constelaciones de satélites de geoposicionamiento para ayuda a la navegación son de gran importancia para los pilotos, ya que con la información que proporcionan es posible conocer la posición del vehículo, su velocidad, su rumbo, así como la hora exacta, entre otros datos, actualizando la información cada segundo durante todo el trayecto.

Existe una clase de satélites pequeños que están siendo desarrollados principalmente por algunas universidades y centros de investigación en varios países: los microsátélites, que son de bajo peso, bajo costo de construcción y lanzamiento, y son generalmente de tipo experimental; es en esta clase de proyectos en donde estarán concentrados nuestros esfuerzos en el corto y mediano plazo.

Los satélites pequeños constituyen una oportunidad de desarrollo de equipo espacial a bajo costo, y además presentan una serie de ventajas muy interesantes, ya que es posible llevar a cabo en ellos experimentos no solo en el campo de las comunicaciones, que es donde se encuentran algunas de sus aplicaciones principales, sino también en otras áreas del conocimiento como son la astronomía, la física, la percepción remota y otras.

La puesta en órbita de un equipo espacial, constituye en sí misma una oportunidad muy importante para la realización de experimentos, sin embargo la diversidad y complejidad de éstos se ve reducida al no contar con un sistema que permita mantener la orientación de la nave de manera continua hacia la tierra, hacia algún otro planeta o astro del sistema solar o hacia el espacio. La inclusión de un sistema de orientación, fijo al cuerpo del satélite, como parte integral del mismo, permite ampliar de manera significativa la cantidad de experimentos que es posible llevar a cabo en órbita terrestre a bordo de estas naves. Ya que mediante el empleo de

coordenadas relativas, se podrá conocer la posición exacta de la nave durante toda su vida útil.

Este proyecto tiene como objetivo diseñar, construir y proveer de los medios adecuados para lograr un balanceo estático de la plataforma empleada para control de orientación de satélites.

Se pretende desarrollar un sistema que permita equilibrar de manera automática la plataforma de simulación y controlar la orientación de los ejes de alabeo y cabeceo con un desfase máximo de $\pm 1^\circ$ con respecto a la horizontal, y así poder realizar pruebas de orientación para satélites pequeños (de hasta 100 kg) adecuadamente.

Cabe mencionar que adicionalmente, como resultado de este proyecto, se prevé lo siguiente:

- 1.- En el simulador se podrán visualizar directamente los resultados del modelado y de las soluciones numéricas o analíticas para actuadores, sensores y algoritmos.
- 2.- Se determinarán los posibles esquemas de control con diferentes actuadores o combinaciones de éstos, para lograr la estabilización en uno, dos o tres ejes en los satélites.
- 3.- Se fomentará el desarrollo de la línea de investigación en tecnología espacial en México.

1.1.- Necesidades de un simulador físico.

Para poder llevar a cabo el desarrollo y las pruebas de funcionamiento de los sistemas de control de orientación de satélites, es necesario contar con un simulador que nos permita tener grandes momentos de inercia, movimiento angular en los tres ejes y un equilibrio neutral bajo cualquier ángulo de deflexión [1].

El diseño básico de este tipo de simuladores, consiste de una plataforma móvil donde se colocarán los componentes de los sistemas de control, suspendida sobre un soporte que permita el movimiento en los tres ejes de rotación con fricción despreciable. Esto nos lleva a la utilización de un balero de aire esférico como una muy buena solución para soportar a la plataforma [1].

Los movimientos traslacionales no son esenciales para esta aplicación, sin embargo la fricción y el desbalanceo en la plataforma, con los componentes de control incluidos, deben mantenerse en un mínimo. El simulador debe ser totalmente autónomo, es decir, la energía para funcionar debe venir de él mismo, y la transmisión de información sólo es permisible a través de señales electromagnéticas, ya que el uso de cables excedería los límites de desbalanceo permitidos[1].

El simulador debe contar con un sistema de balanceo automático, que mueva el centro de gravedad de la plataforma, hacia el centro de rotación. Para facilitar la

operación de este tipo de equipos, el satélite completo no debe colocarse en la plataforma, solamente el sistema de control de orientación con el estado inercial del satélite reproducido o escalado [2].

La plataforma es usada en primera instancia como un medio de integración y prueba de sensores, electrónica y sistemas de cómputo. De esta manera un número muy significativo de problemas de integración pueden ser identificados y resueltos fácilmente, por ejemplo cuando un algoritmo es demasiado lento para enviar la acción de control, éste debe ser reescrito con un código más eficiente, o los comandos de las toberas pueden ser verificados para que realmente abran o cierren las válvulas, etc. [7].

1.2.- Diferentes opciones de simuladores.

Las plataformas de simulación han sido ampliamente utilizadas por los ingenieros diseñadores de sistemas de control de orientación de satélites, en los laboratorios de los gobiernos, en la industria y las universidades. Un simulador de movimiento de satélites basado en un balero de aire esférico, fue diseñado y construido en 1959 en el Centro de Vuelo Espacial Marshall, por Haussermann y Kennel [1], este simulador fue diseñado y construido con estrictas tolerancias de balanceo (5 g-cm máximo), con un balero de 25.4 cm de diámetro con tolerancia de 0.127 mm, para una masa total del simulador de 408 kg. Esta plataforma fue construida con placas de aluminio soldadas para formar una caja con la máxima rigidez y fué tratada térmicamente (revenido) para evitar que perdiera su forma después de maquinada. Una plataforma muy similar a esta fue desarrollada por la NASA en el Centro de Investigación Langley, para probar en tierra un sistema de control de orientación seguidor de sol, reportado por Fontana et al. [3]. Tabata et al. [4] desarrolló un sistema de simulación para control de orientación, con un modelo de satélite sujeto a un balero de aire esférico, para la Agencia Japonesa de Desarrollo Espacial. A diferencia de otros investigadores que utilizan una plataforma y después reproducen un estado inercial dado, Tabata colocó un modelo de ingeniería con el balero de aire en el centro de masa de éste, lo que limita grandemente las posibilidades de realización de pruebas y cambios en los diseños. La Organización Europea de Desarrollo Espacial (ESRO), desarrolló también un simulador sobre un balero de aire para estudiar los sistemas de control, como lo describe Rizos et al. [2], en los años 70. Esta plataforma tiene un desbalanceo máximo permitido de 3.3 g-cm y cuenta con un sistema de balanceo automático, la resolución que maneja es de 1 minuto de arco y la repetibilidad es de ± 1 minuto de arco. La Universidad de Stanford desarrollo un simulador para vehículos espaciales estabilizados por giro, que ha sido utilizado para probar sistemas de control de orientación de satélites simétricos [5]. La Universidad estatal de Utah desarrolló también un simulador para probar sistemas de control de orientación de satélites pequeños [6], la carga útil de simulación es de 80 kg. aproximadamente, con una plataforma circular de 76 cm de diámetro, un balero de aire esférico de 10.16 cm., tres pares de toberas con gas a presión y un sistema de válvulas de solenoide que permiten llevar a cabo la orientación de la plataforma bajo un esquema de control de lazo cerrado de tipo abierto-cerrado (ON-OFF).

1.2.1.- Configuración más adecuada a nuestras necesidades, o tipo de simulador a desarrollar.

Después de la revisión bibliográfica y de entablar conversaciones con investigadores de la Universidad Estatal de Utah, con la finalidad de intercambiar opiniones y establecer la factibilidad de diseñar y construir el mismo tipo de simulador desarrollado por ellos; se determinó que su simulador es el que mejor se adapta a las necesidades de nuestro trabajo. Aunque nosotros recomendamos utilizar materiales compuestos en la plataforma para obtener una superficie con un coeficiente de expansión térmica cercano a cero y una rigidez mecánica suficientemente grande para evitar deformaciones con la máxima carga. El otro componente principal del simulador, un balero de aire esférico, será multiflujo, con diámetro de 10 cm., maquinado en bronce SAE 62 para obtener un acabado muy fino y con tolerancias muy cerradas con una capacidad de carga de 80 kg y que generará un medio con fricción despreciable.

1.3.- Balanceo estático.

A pesar de la expresión, la noción de equilibrio estático se aplica también a objetos en movimiento. Las fuerzas de interés en desequilibrio, se deben a aceleraciones de masas en el sistema. Los requisitos para el equilibrio estático son simplemente que la suma de todas las fuerzas en el sistema móvil (incluidas las fuerzas de inercia de d'Alambert) sean igual a cero.

$$\Sigma F - ma = 0 \quad (1.1)$$

Otro nombre para el balanceo estático es: *equilibrio en un plano*, lo cual significa que todas las masas que generan las fuerzas inerciales están prácticamente en el mismo plano. Esencialmente se tiene un problema en dos dimensiones. Algunos ejemplos de dispositivos comunes que cumplen con este criterio, y pueden ser equilibrados estáticamente con éxito son: un engrane o una polea montados en un eje, una rueda de bicicleta o motocicleta, un volante delgado, una hélice de aeroplano, un álabe de turbina (pero no la turbina completa). El común denominador de todos estos aparatos es que son de corta extensión en la dirección axial, comparada con su magnitud en la dirección radial, y por tanto pueden ser considerados como cuerpos en un solo plano.

Cualquier eslabón o elemento que se encuentre en rotación pura puede, teóricamente, estar perfectamente equilibrado para eliminar todas las fuerzas y momentos de vibración. Es aceptado, en la práctica del diseño, equilibrar todos los elementos o piezas de rotación en una máquina, a menos que la vibración o sacudimiento sean necesarios (como en un mecanismo de vibración, por ejemplo).

Un elemento rotatorio puede estar equilibrado (o balanceado) tanto estática como dinámicamente. El equilibrio estático es una variante del equilibrio dinámico. Para lograr un equilibrio completo se requiere establecer el equilibrio (o balance) dinámico.

$$\Sigma F=0$$

$$\Sigma M=0$$

En algunos casos, el estático puede ser un sustituto aceptable para el equilibrio dinámico y generalmente es más fácil de alcanzar.

El grado al que un rotor se debe balancear dinámicamente depende de la velocidad a la que va a operar. A pequeñas velocidades es tolerable un pequeño desbalanceo de masa debido a que la fuerza de inercia que representa el desbalanceo puede ser pequeña, pero ya que la fuerza desbalanceadora aumenta conforme al cuadrado de la velocidad, el desbalanceo transmitido a los cojinetes puede ser grande a altas velocidades.

Uno de los primeros criterios de diseño que se establecieron en este proyecto, fue el que la plataforma pudiera servir para una gran variedad de pruebas de orientación, es decir, utilizar en ella diferentes métodos de control de orientación como pueden ser: gradiente gravitacional, par magnético, toberas de reacción, ruedas inerciales; o sistemas combinados. Sin embargo, como lo menciona Rizos [2], la realización de un equipo capaz de proveer un medio de simulación que cubra los diferentes sistemas de orientación, introduciría tremendas dificultades técnicas. Debe ser considerado más realista el utilizar más de un simulador para cubrir completamente la gama completa de opciones de simulación espacial.

Atendiendo a esta consideración, de ser necesario se diseñarán y construirán diferentes simuladores para cubrir el espectro de las diferentes opciones de control de orientación.

Como se menciona en el párrafo anterior, la capacidad de carga máxima del balero de aire esférico es de 80 kg. Esto no quiere decir que este sea el límite de masa que podamos simular, ya que es posible hacer un escalamiento del tensor de inercia del satélite bajo prueba y de esta manera hacer las pruebas experimentales de satélites mayores; aunque esto no es lo más recomendable porque se puede incurrir en errores, ya que los actuadores estarían operando a una capacidad diferente a la que tendrán en órbita. Una de las principales ventajas de utilizar este tipo de simuladores, es que es posible visualizar en tierra que los actuadores son capaces de llevar a cabo la tarea de orientación o alguna maniobra de apuntamiento, en un tiempo dado, y verificar su alineamiento, etc.

Se ha establecido la hipótesis, de que la utilización de materiales compuestos en la plataforma, será un factor que permitirá disminuir los pares residuales, al no existir problemas de elongaciones o contracciones con el cambio de temperatura. En la

sección 3.2 se describen los cálculos realizados y se muestran los resultados de las mediciones efectuadas con la plataforma construida.

Como objetivo inicial se tratará de llegar a balancear la plataforma para obtener un par residual de 10 g-cm.

1.4.- Determinación del centro de masa.

Las partes en rotación pueden, y generalmente deben, ser diseñadas como inherentemente equilibradas por su configuración geométrica. Sin embargo, las variaciones debidas a las tolerancias de producción hacen que haya algún pequeño desequilibrio (o desbalance) en cada una de ellas. Así que en cada parte debe ser aplicado un procedimiento de equilibramiento después de su manufactura. La magnitud y localización de cualquier desbalance pueden ser determinadas con bastante exactitud, y compensadas al agregar o quitar material en las ubicaciones correctas.

Las piezas maquinadas cuidadosamente tienen mayor probabilidad de estar mejor balanceadas que las piezas fundidas. En muchos casos es más económico permitir cierto desbalanceo durante la manufactura y balancear la pieza agregando o quitando material. Existen disponibles comercialmente máquinas para balancear que permiten el balanceo de piezas a tasas de producción masiva.

Con frecuencia es conveniente que un objeto de forma complicada se modele como varios objetos interconectados de formas más sencillas, y cuyas configuraciones individuales permitan calcular fácilmente sus masas y las ubicaciones de sus centros de gravedad (CG) o centro de masa propio. El CG del conjunto se puede localizar luego, a partir de los primeros momentos de las partes simples igualados a cero.

1.5.- Reubicación del centro de masa.

El grado al que un rotor se debe balancear dinámicamente depende de la velocidad a la que va a operar. Por ejemplo, el rotor de un motor a chorro que opere a más de 10,000 rpm se debe balancear con un alto grado de exactitud. Para balancear estos rotores, los álabes individuales del compresor y la turbina se balancean en pares diametralmente opuestos, de manera que si se llega a dañar un álabe, el par se reemplaza para restaurar el balanceo.

La reubicación del centro de masa (CM) en la plataforma de simulación se realizará por medio de un sistema de masas deslizantes. Dichas masas llevan a cabo el ajuste fino de localización del CM. Se cuenta con dos actuadores, cada uno de ellos consiste en una platina de aluminio que tiene una masa de 615 gramos que se mueve a lo largo de una varilla roscada, milimétricamente, por medio de un motor de pasos, este al recibir una señal desplaza la platina una distancia de 0.0025 mm por paso; es de mencionarse que el desplazamiento máximo de cada unidad es de 11.082 cm, por lo que es indispensable llevar a cabo un balanceo estático manual previo al balanceo automático, para situarnos dentro de este intervalo.

DETERMINACIÓN DEL CENTRO DE MASA.

El conocimiento del punto donde se localiza el centro de masa de nuestro sistema es de vital importancia, ya que como se ha mencionado, un balanceo adecuado es lo que nos permitirá poder llevar a cabo pruebas confiables en nuestro simulador. En este capítulo se describe la forma en que se determina el centro de masa de nuestro sistema, para reubicarlo por medio de las masas deslizantes.

2.1.- Determinación del estado inercial de la plataforma.

El conocimiento de las fuerzas de inercia que actúan en la plataforma es esencial para determinar la orientación, así como también para poder llevar a cabo un balanceo estático o dinámico de la misma, con todos los componentes de simulación integrados. Es importante tomar en cuenta las pruebas a que serán sometidos los componentes sobre la plataforma y hacer las consideraciones necesarias para poder establecer el tipo de balanceo que se debe hacer.

El grado al que debemos balancear: estática o dinámicamente, depende básicamente de la velocidad angular a la que se va a operar. A pequeñas velocidades es tolerable un pequeño desbalanceo, pero a medida que la velocidad aumente, el desbalanceo será intolerable.

La utilización de la plataforma de simulación será principalmente para simular el comportamiento de satélites de órbita baja, cuya estabilización será por gradiente gravitacional y bobinas magnéticas, esto implica que girará aproximadamente a razón de 1 revolución por cada 90 a 104 minutos, lo que resulta en una velocidad angular (ω) muy pequeña.

Si un sistema gira con una velocidad angular constante ω , la aceleración de las masas será entonces estrictamente centrípeta, y las fuerzas inerciales serán centrífugas. Tomando en cuenta lo anterior y sabiendo que la fuerza centrífuga esta dada por:

$$F = mr\omega^2 \quad (2.1)$$

Donde :

m = masa puntual o centro de masa.

r = distancia de la masa puntual al eje de giro.

ω = velocidad angular.

y que el momento de inercia para una masa puntual esta dado por:

$$m = \frac{I}{r^2} \quad (2.2)$$

Al manejar las ecuaciones 2.1 y 2.2 podemos obtener una expresión que relacione la fuerza centrífuga con el momento de inercia y la velocidad angular de la plataforma:

$$F = \frac{I\omega^2}{r} \quad (2.3)$$

Si se sabe que la velocidad angular de la plataforma es demasiado pequeña (4° por minuto), de la ecuación 2.3, podemos observar que la fuerza centrífuga de las masas que se encuentran en la plataforma también es muy pequeña, por lo que podemos considerar que la fuerza centrífuga es despreciable.

Una característica común de los cuerpos que necesitan ser balanceados estáticamente es que son de corta extensión en la dirección axial, comparada con su magnitud en la dirección radial, y por tanto, pueden ser considerados como cuerpos en un solo plano. Esto es, una relación aproximada de tres veces mas la dimensión en la dirección radial que en la axial. De esto se desprende que el balanceo de las fuerzas inerciales es más que suficiente para cumplir con los objetivos que se han planteado para construcción del simulador; por lo que para su utilización práctica es necesario realizar un balanceo estático manual y después un balanceo automático de precisión por medio del sistema de masas deslizantes.

2.2.- Cálculo del centro de masa.

En la figura 2-1a se muestra un eslabón con forma de "V" que es parte de un conjunto eslabonado y se desea equilibrarlo estáticamente. Es posible modelar dinámicamente este eslabón como dos puntos de masa m_1 y m_2 ubicadas en el CG local de cada "pierna" del eslabón, como se muestra en la figura 2-1b. Cada uno de estos puntos materiales tiene una masa igual a la de la "pierna" que remplaza, y están sostenidas por varillas sin masa en la posición (R1 y R2) del CG de la pierna. Podemos determinar la magnitud y la localización necesarias de una tercera "masa de equilibrio o balance" m_b , sumándola al sistema en alguna ubicación, R_b con el fin de satisfacer la ecuación 1.1.

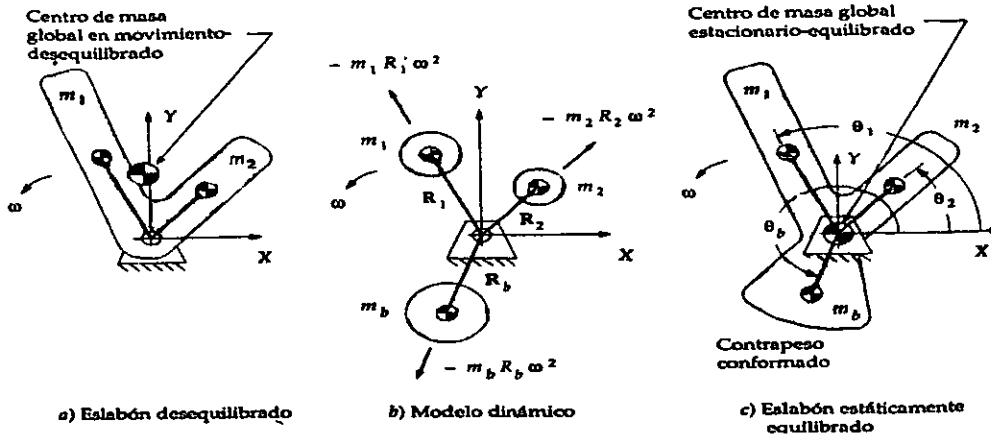


Figura 2.1.- Eslabón en V.

Supóngase nuevamente que el sistema gira con una velocidad angular constante ω . La aceleración de las masas será entonces estrictamente centrípeta, y las fuerzas inerciales serán centrífugas. La posición en la cual “detuvimos la acción” con el propósito de dibujarla y efectuar los cálculos, es arbitraria e irrelevante para el caso. Estableceremos un sistema coordinado con su origen en el centro de rotación, y descompondremos las fuerzas inerciales en sus componentes según ese sistema. Al escribir la ecuación vectorial 1.1 para esto último, obtenemos:

$$-m_1 R_1 \omega^2 - m_2 R_2 \omega^2 - m_b R_b \omega^2 = 0 \quad (2.4)$$

Nótese que las únicas fuerzas que actúan sobre dicho sistema son las fuerzas de inercia. Para el equilibrio, no importa que fuerzas externas actúen sobre el sistema. Tales fuerzas no pueden ser equilibradas mediante algún cambio en la geometría interna del sistema. Obsérvese que se cancelan los términos de ω^2 . Para equilibrar, tampoco importa cuán rápido gire el sistema, y solamente tiene importancia que esté en rotación (La ω determinara las magnitudes de estas fuerzas, pero de todas maneras se hará que la suma sea igual a cero ya que todas estas fuerzas varían proporcionalmente a la ω).

Al dividir entre ω^2 y reordenar obtenemos:

$$m_b R_b = -m_1 R_1 - m_2 R_2 \quad (2.5)$$

Se resuelve en las componentes X y Y :

$$m_b R_{bx} = -(m_1 R_{1x} + m_2 R_{2x}) \quad (2.6)$$

$$m_b R_{by} = -(m_1 R_{1y} + m_2 R_{2y})$$

Los términos del lado derecho son conocidos. Podemos determinar fácilmente los productos de los términos mR_x y mR_y , necesarios para equilibrar el sistema. Por simplicidad, es conveniente convertir los resultados a expresiones polares:

$$\theta_b = \arctan \frac{m_b R_{by}}{m_b R_{bx}} \tag{2.7}$$

$$\theta_b = \arctan \frac{-(m_1 R_{1y} + m_2 R_{2y})}{-(m_1 R_{1x} + m_2 R_{2x})}$$

$$R_b = \sqrt{(R_{bx}^2 + R_{by}^2)}$$

$$m_b R_b = m_b \sqrt{(R_{bx}^2 + R_{by}^2)}$$

$$m_b R_b = \sqrt{m_b^2 (R_{bx}^2 + R_{by}^2)} \tag{2.8}$$

$$m_b R_b = \sqrt{(m_b R_{bx})^2 + (m_b R_{by})^2}$$

El ángulo al cual debe ser colocada la masa de equilibrio (con respecto a nuestro sistema coordinado orientado arbitrariamente y “en cuadro congelado”) es θ_b , resultado de la ecuación 2.7. Nótese que los signos del numerador y del denominador de la ecuación 2.7 deben ser conservados individualmente, y se debe calcular una función arco tangente de dos argumentos para obtener θ_b en el cuadrante correcto. La mayoría de las calculadoras y computadoras proporcionaran el resultado del arco tangente sólo entre $\pm 90^\circ$.

El producto $m_b R_b$ es un resultado de la ecuación 2.8. Ahora tenemos una infinidad de soluciones posibles. Vamos a seleccionar un valor para m_b y evaluar el radio R_b al cual debe ser situada, o bien elegir un radio deseado y determinar la masa que debe ser colocada ahí. En algunos casos, las restricciones por compacticidad dictarán el posible radio máximo. La masa de equilibrio, por supuesto, está confinada a un “plano único” de las masas no equilibradas.

Una vez elegida la combinación m_b y R_b , falta diseñar el contrapeso físico. El radio R_b seleccionado es la distancia del pivote al CG de cualquier forma que se cree como masa contrapesante. Nuestro simple modelo dinámico, utilizado para calcular el producto mR , supone un punto material y una varilla sin masa. Por supuesto estos dispositivos ideales no es posible conseguirlos. En la figura 2.1c se muestra una posible forma para tal contrapeso. Su masa debe ser m_b , distribuida de modo que su CG esté ubicada al radio R_b y al ángulo θ_b .

DISEÑO Y FABRICACIÓN DE LA PLATAFORMA Y EL BALERO DE AIRE ESFÉRICO.

En este capítulo se presentan el diseño, la construcción y las primeras pruebas de funcionamiento realizadas a un simulador de un medio sin fricción. La utilización de materiales compuestos en la plataforma, es un factor que permite disminuir los pares residuales, al no existir problemas de cambios de temperatura.

3.1.- Diseño de la plataforma.

En la figura 3.1 se muestra el esquema general del diseño de la plataforma de simulación completa; sus principales componentes son: mesa o plataforma, balero de aire esférico, brida para suministro de aire, y soporte. En el apéndice B se muestra el diseño de detalle de estos componentes.

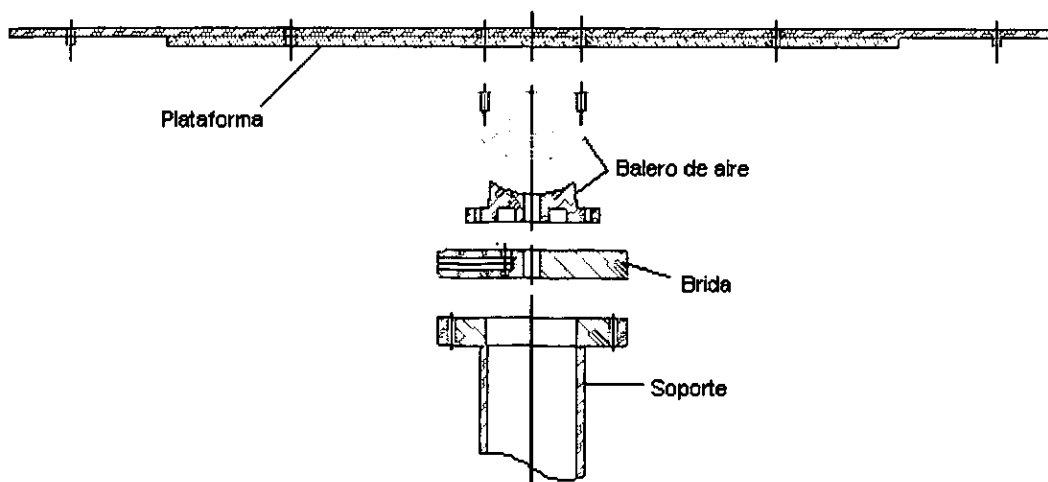


Figura 3.1.- Diagrama general de la plataforma de simulación donde se muestran los componentes principales.

3.2.- Diseño de la plataforma con materiales compuestos. (Matriz carbono-epoxy)

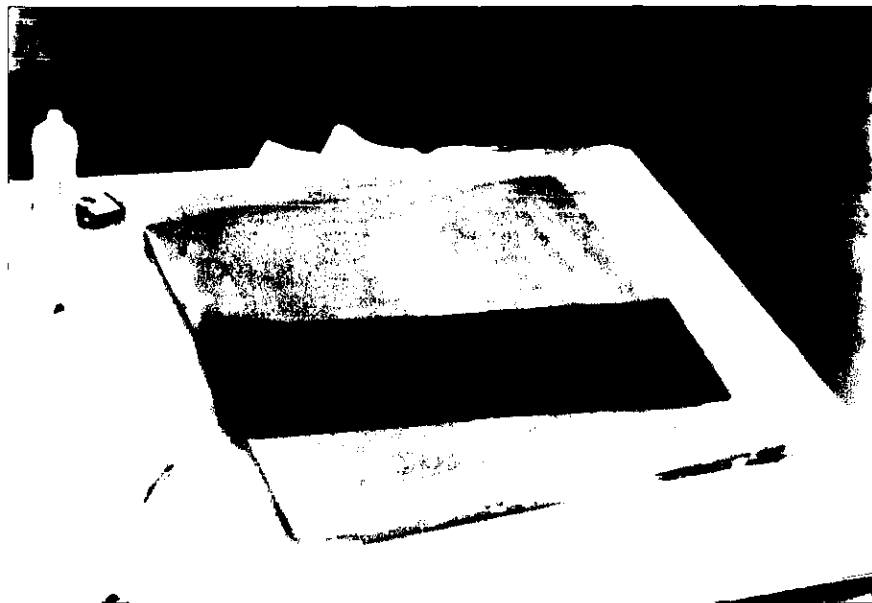


Figura 3.2.- Espuma de PVC, fibra de carbono y epoxy, principales componentes de la plataforma.

Los principales factores que se tomaron en cuenta para seleccionar el material con el que se fabricó la plataforma fueron: el coeficiente de expansión térmico y las características mecánicas. Las dos opciones de materiales que se estudiaron fueron el aluminio en sus diferentes aleaciones (por sus características antimagnéticas y bajo peso) y los materiales compuestos. Los aluminios son metales fácilmente maquinables y por el tipo de plataforma, se perfilaba como una muy buena opción, sin embargo dado que se pretende obtener un desbalanceo máximo permitido del orden de 10 g-cm, no es muy recomendable por su coeficiente de expansión térmico 25×10^{-6} cm/cm $^{\circ}$ C. Los materiales compuestos, específicamente los de fibras de carbono-epoxy, proporcionan gran rigidez y estabilidad mecánica, al mismo tiempo que poseen un coeficiente de expansión térmico de aproximadamente 0.028×10^{-6} cm/cm $^{\circ}$ C, que es sensiblemente menor que el del aluminio. Este hecho nos permite evitar el tener un cuarto con temperatura controlada para la realización de las pruebas, dando mayor flexibilidad al desarrollo de las mismas. Por estas características es que ha sido seleccionado este tipo de material; a continuación se muestra el diseño de la plataforma.

Como se ha mencionado, la plataforma circular se ha diseñado para que tenga deformaciones mecánicas y térmicas mínimas, así como un peso reducido para tener carga útil de simulación máxima. Para lograr estos fines, se ha confeccionado un panel compuesto con los siguientes materiales y características:

Partes del panel	Material	Características
centro o alma del panel	Placa de espuma de PVC, con poros superficiales cubiertos con micro esferas de fibra de vidrio y epóxico.	La espuma, con un espesor de 15.8 mm y densidad de 0.05 g/cm ³ , tiene microsferas que cubren sus poros superficiales evitando que la resina se propague en su interior.
Cubiertas superior e inferior	Laminados cuasi-isotrópicos formados con tres hojas de tela bidireccional de fibra de carbono, con código de apilamiento [0, ± 60°] y resina epóxica.	Tela biaxial de fibra de carbono con tejido de intercalación sencilla de 12.5 x 12.5 de urdimbre y trama, respectivamente, con un espesor de 0.178 mm.
Resina epóxica	Es la matriz en la que están embebidos los laminados.	La relación volumétrica entre la matriz y la fibra es del 50%. Presenta una reacción exotérmica con una absorción de humedad baja y cura a temperatura ambiente en 8 horas.

Tabla 3.1.- Composición de la plataforma hecha de materiales compuestos.

3.2.1.- Método de fabricación.

El panel consiste de un emparedado de fibra de carbono con centro de espuma de PVC. Se utilizó una placa de espuma, sellada con microsferas/epóxico con dimensiones de 80x80 cm. (figura 3.3). Fué a partir de esta pieza que se obtuvo la plataforma de 76 cm de diámetro.



Figura 3.3.- Una de las etapas de fabricación del panel de fibra de carbono-epoxy.

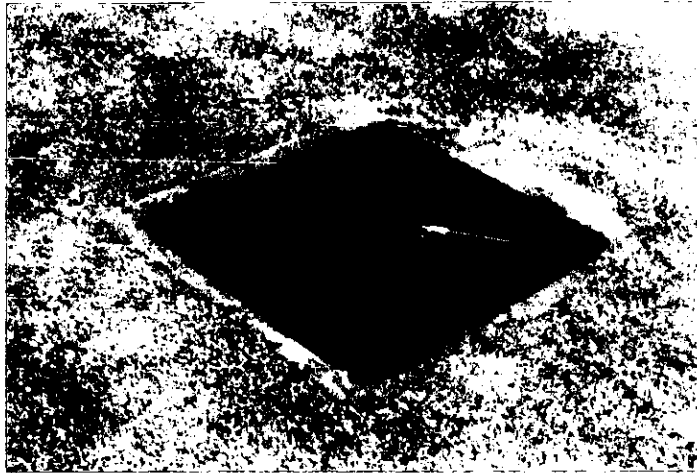


Figura 3.4.- Panel de fibra de carbono-epoxy listo para la etapa de maquinado.

Una vez que se contó con la placa de espuma sellada, se procedió a acomodar el primer laminado, y se dejó que terminara el primer periodo de cura del compuesto manteniéndolo entre dos placas de vidrio plano (24 hrs), luego se procedió a realizar las perforaciones en la espuma de PVC, las múltiples perforaciones fueron cubiertas con resina epóxica, al mismo tiempo se reemplazó la parte central de la placa de espuma (15 cm de diámetro) con resina epóxica reforzada con fibras cortas de carbono; que es donde se sujeta la plataforma al balero de aire. Posteriormente, el compuesto se dejó curar entre placas de vidrio durante varios días. La reacción exotérmica que presenta la resina epóxica hace que exista cierta distorsión, la cual se corrige mediante un lijado sobre la placa.

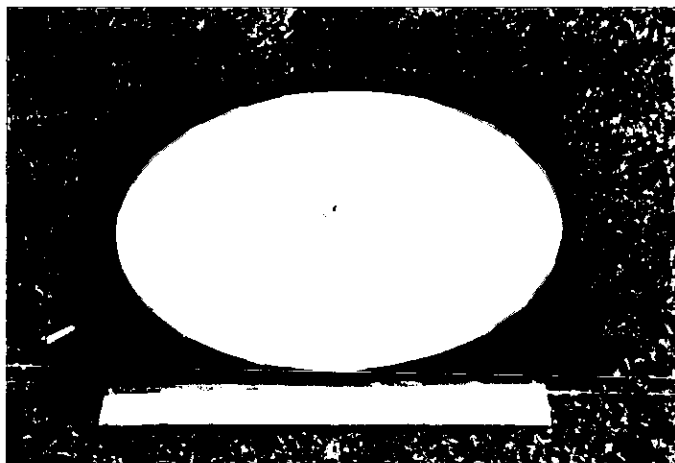


Figura 3.5.- Transferencia de marcas para llevar a cabo la perforación del panel compuesto.

Una vez elaborado el panel compuesto se procedió a su maquinado para la confección de la plataforma circular. El procedimiento consistió en: corte circular de aproximación y maquinado, realización de las perforaciones múltiples, sellado de la periferia, nuevo

maquinado para eliminar sobrante del sellado, introducción de insertos metálicos con rosca, y sujeción con el balero de aire esférico.

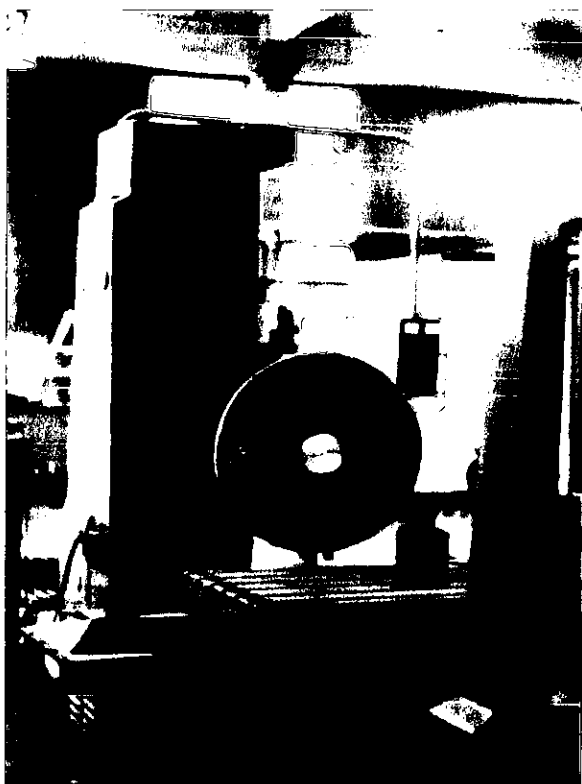


Figura 3.6.- Maquinado de la plataforma para dar dimensiones y acabado.

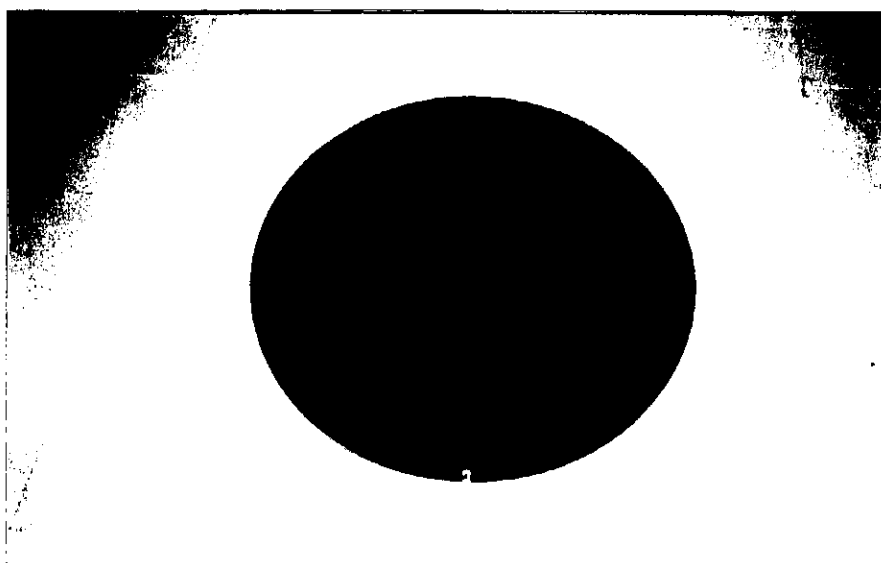


Figura 3.7.- Plataforma de fibras de carbono-epoxy terminada.

3.3.- Baleros de aire.

Los baleros de aire pueden efectivamente simular un medio ambiente sin fricción para probar instrumentos y sistemas de control de orientación de vehículos espaciales.

Los instrumentos de precisión y sistemas de control diseñados para mantener estabilizadas las naves espaciales que se encuentran en órbita terrestre, deben ser probados exhaustivamente en un medio ambiente simulado. En este sentido, es necesario encontrar una manera para simular un medio ambiente sin fricción. La aplicación de un balero de aire, es un medio muy satisfactorio para crear esta condición, ya que los efectos por fricción pueden ser considerados como nulos [8]. El cálculo de la fricción en los baleros esféricos se muestra en la sección 3.4.3.

Este tipo de baleros de aire comenzaron a utilizarse cuando fué necesario llevar a cabo una evaluación precisa de los procedimientos de control para reducir el giro de los satélites después de ser soltados por el cohete portador, en un medio con fricción esencialmente nula. Este tipo de medio ambiente puede ser logrado con el balero de aire, pero idealmente el sistema completo debería ser operado al vacío, ya que el efecto de arrastre con el aire en el dispositivo bajo prueba tiende a disminuir la condición de falta de fricción [8].

A continuación se describen los dos tipos principales de baleros de aire que han sido desarrollados para diversas aplicaciones en el campo espacial, los esféricos y los planos. Por supuesto la discusión más importante se centra en los baleros esféricos multifujo, ya que este es el tipo de balero utilizado en nuestro simulador.

3.3.1.- Baleros de aire planos.

Este tipo de balero tiene movimiento solo sobre un plano, de ahí su nombre, no obstante esta situación, puede ser utilizado con muy buenos resultados en pruebas de satélites estabilizados por giro. Es muy importante que el centro de masa del objeto bajo estudio, sea localizado en el centro de rotación del balero y que la base que lo soporta esté perfectamente nivelada. En la figura 3.8 se muestra un balero de aire plano.

La tendencia en los últimos años es de utilizar satélites estabilizados en tres ejes y en nuestro caso particular no vislumbramos por el momento el empleo de baleros planos, ni por supuesto su utilización en simuladores.

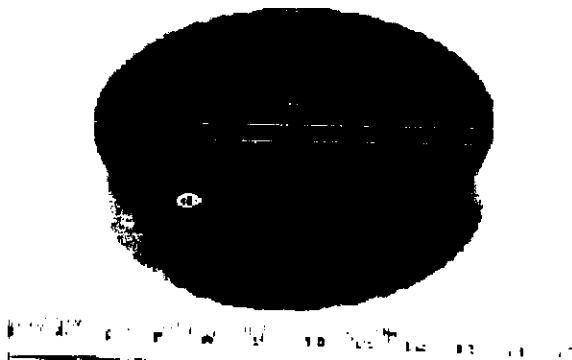


Figura 3.8.- Balero de aire plano.

3.3.2.- Baleros de aire esféricos.

Los baleros de aire esféricos, consisten básicamente de una semiesfera que sustenta a la plataforma de simulación, y una copa; que es donde se produce el colchón de aire que provee del medio sin fricción. figura 3.9.

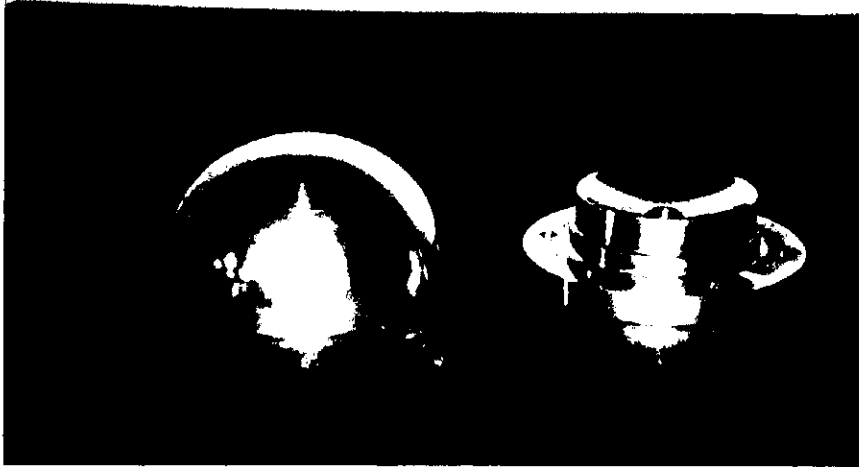


Figura 3.9.- Semiesfera y copa, partes fundamentales de un balero de aire esférico.

3.3.2.1.- Baleros de aire esféricos monoflujo.

La configuración básica de un balero de aire esférico mono-flujo, está sustentada en una sola perforación capilar que produce una bolsa de aire donde se logra una capacidad de carga máxima, utilizando la periferia de la esfera para controlar el flujo de salida. En la figura 3.10 se muestra un corte transversal de un balero monoflujo, así como su distribución de presión.

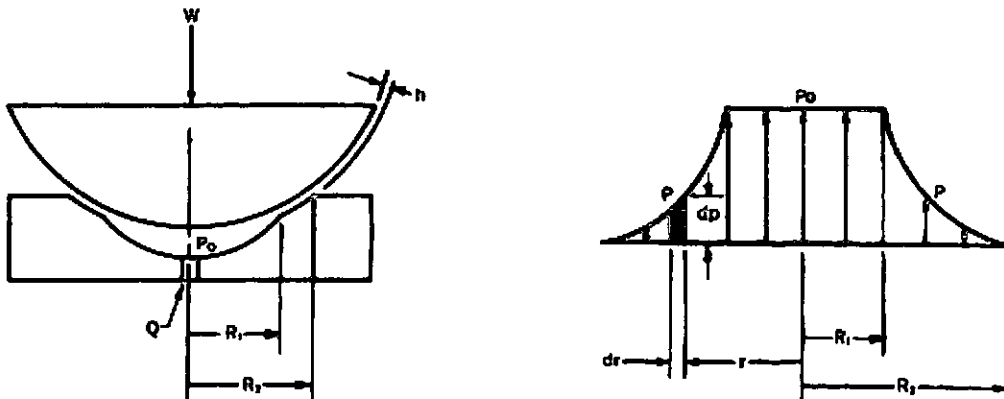


Figura 3.10.- Corte transversal y perfil de distribución de presión de un balero de aire esférico mono-flujo.

3.3.2.2.- Baleros de aire multiflujo.

Los baleros de aire esféricos de flujo dual o multiflujo, son llamados de esa manera debido a que el aire fluye hacia el interior a través de orificios o tubos capilares y sale por la periferia de la esfera y por la perforación ubicada en el centro de la copa. Ver figura 3.11

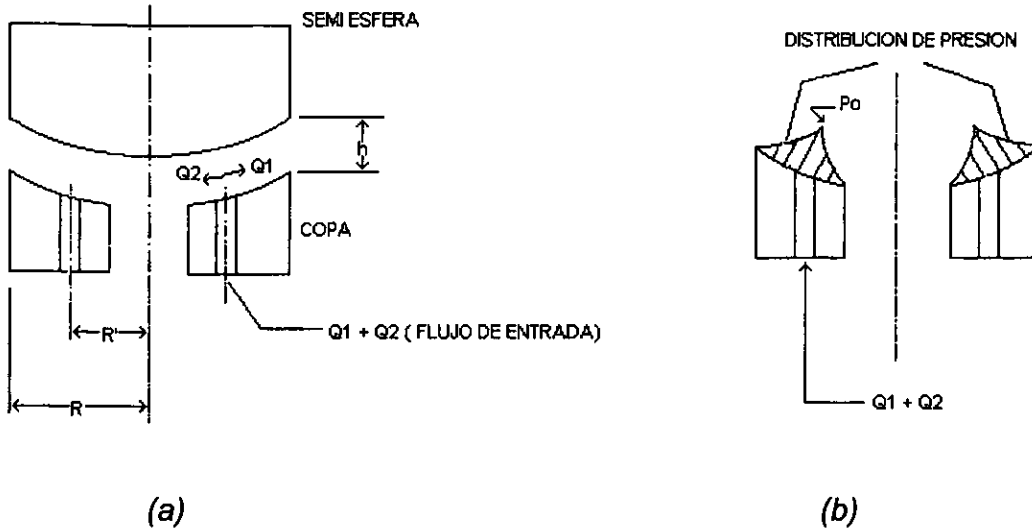


Figura 3.11.- Esquema de un balero de aire multiflujo y perfil de distribución de presión.

Una de las principales ventajas de utilizar baleros esféricos de flujo dual, es el hecho de que el centro de gravedad del sistema, se encuentra a una distancia considerable por debajo del centro de curvatura del balero, lo que provee de mayor estabilidad al conjunto.

Un detalle muy interesante de los baleros de aire, es el hecho de necesitar pequeñas presiones y gastos de aire también pequeños para soportar una carga dada. Los cálculos presentados a continuación están encaminados a ubicar a los tubos capilares de tal manera, que el flujo a través del centro de la copa, sea igual al flujo en la periferia de la esfera, para lograr un sistema más estable. La figura 3.11 (b) muestra esta condición.

3.4.- Diseño de un balero de aire esférico multiflujo.

El primer paso para el diseño es establecer el radio o la distancia desde el centro de la copa, hasta el lugar en donde se ubicarán los orificios capilares. El flujo de aire a través de una ranura; en este caso entre la esfera y la copa, está dado por la ecuación (3.1), tomada de Fuller [10].

$$Q = \frac{\Delta P b h^3}{12 \mu l} \quad (3.1)$$

donde tenemos:

ΔP = El gradiente de presión, causante del flujo. [Kg/cm²]

$b=2\pi r$ = Es el ancho de la ranura circular (perímetro).[cm]

$h=h_0$ = Es la altura de la ranura.[cm]

$\ell =dr$ = La diferencial de longitud.[cm]

μ = La viscosidad del aire. [Kg-s/cm²]

Nótese que ΔP tiene el mismo valor en ambos sentidos, es decir, hacia la periferia de la esfera y hacia el centro de la copa y h es una constante geométrica. Los orificios capilares están igualmente espaciados entre ellos y colocados a una distancia R' del centro del balero; entonces los flujos son considerados radialmente simétricos. Y como lo que deseamos es que los flujos hacia la periferia y hacia el centro sean iguales, para que el dispositivo sea estable, entonces:

$$Q_1 = \frac{\Delta P b_1 h^3}{12 \mu \ell_1} = \frac{\Delta P b_2 h^3}{12 \mu \ell_2} = Q_2$$

De donde haciendo las simplificaciones mencionadas y eliminando las constantes, tenemos:

$$b_1 / \ell_1 = b_2 / \ell_2$$

pero como: $b_1=2\pi r_1$ y $\ell_1=dr_1$ entonces;

$$\frac{2\pi r_1}{dr_1} \equiv \frac{2\pi r_2}{dr_2} \quad ; \quad \frac{dr_1}{r_1} \equiv \frac{dr_2}{r_2} \quad (3.2)$$

Integrando la ecuación (3.2) en los intervalos desde los orificios capilares, hacia las dos salidas y tomando en cuenta que el radio del centro de la copa es de $\frac{1}{4}$ de pulgada.

$$\int_{R'}^R \frac{dr_1}{r_1} = \int_{\frac{1}{4}}^{R'} \frac{dr_2}{r_2}$$

$$\ln r_1 \Big|_{R'}^R = \ln r_2 \Big|_{\frac{1}{4}}^{R'}$$

$$\frac{R}{R'} = 4R'$$

$$R' = \frac{\sqrt{R}}{2} \quad (3.3)$$

A esta distancia desde el centro de la copa deben perforarse los capilares.

3.4.1.- Determinación de las distribuciones de presión.

Para el flujo que circula desde los capilares hacia el exterior del balero, la presión disminuye cuando se incrementa el radio; entonces, tomando de nuevo la ecuación (3.1), tenemos:

$$dp = \frac{-12Q\mu dr}{2\pi h^3} \quad (3.4)$$

integrando obtenemos:

$$p_1 = -k \ln r + c_1 \quad (3.5)$$

donde: $k = \frac{6Q\mu}{\pi h^3}$

Determinamos C_1 a partir de los valores de los límites: Cuando $r = R$, entonces

$$p_1 = 0 \text{ y}$$

$$C_1 = \frac{6Q\mu}{\pi h^3} \ln R = k \ln R ;$$

entonces la ecuación (3.5) puede escribirse como:

$$\boxed{p_1 = k \ln \frac{R}{r}} \quad (3.6)$$

Cuando el flujo va desde los capilares, hacia el orificio central de salida, podemos hacer un análisis similar y demostrar que:

$$p_2 = k \ln r + c_2 \quad (3.7)$$

Para determinar C_2 nuevamente aplicamos los límites de integración, en este caso:

$$r = \frac{1}{4} \text{ y } p_2 = 0. \text{ Por lo que } c_2 = -k \ln \frac{1}{4} \text{ y entonces:}$$

$$\boxed{p_2 = k \ln 4r} \quad (3.8)$$

3.4.2.- Cálculo de la carga máxima que puede sustentar el balero.

Para llevar a cabo el cálculo de la carga máxima que es posible sustentar con este dispositivo, hagamos en primera instancia una proyección plana de la superficie esférica de la copa, es decir:

$$A = 2\pi r dr$$

y para calcular la carga utilizamos la expresión $dW = p dA$ entonces:

$$W = \int_{R'}^R p_1 2\pi r dr + \int_{\frac{1}{4}}^{R'} p_2 2\pi r dr$$
 ; donde las presiones p_1 y p_2 están dadas por las ecuaciones (3.6) y (3.8) respectivamente.

Sustituyendo tenemos
$$W = 2\pi \int_{R'}^R \frac{6Q\mu}{\pi h^3} \ln \frac{R}{r} r dr + 2\pi \int_{\frac{1}{4}}^{R'} \frac{6Q\mu}{\pi h^3} (\ln 4r) r dr$$
 (3.9)

Ahora vamos a encontrar una expresión para Q en función de P_0 , siendo P_0 la presión de entrada al balero. De la ecuación (3.6) y considerando que $p_1 = P_0$ cuando $r = R'$ tenemos:

$$Q = \frac{P_0 \pi h^3}{6\mu \ln \frac{R}{R'}}$$
 utilizando esta expresión en la ecuación (3.9), tenemos:

$$W = \frac{2\pi P_0}{\ln \frac{R}{R'}} \left\{ \int_{R'}^R r \ln \frac{R}{r} dr + \int_{\frac{1}{4}}^{R'} r \ln 4r dr \right\}$$

$$W = \frac{2\pi P_0}{\ln \frac{R}{R'}} \left\{ \int_{R'}^R r \ln R dr - \int_{R'}^R r \ln r dr + \int_{\frac{1}{4}}^{R'} r \ln 4 dr + \int_{\frac{1}{4}}^{R'} r \ln r dr \right\}$$

integrando, evaluando en los límites y sustituyendo valores, obtenemos la expresión:

$$W = 2.7 P_0$$
 (3.10)

En la sección 3.9 se muestra la curva de respuesta teórica y se hace una comparación con mediciones realizadas en el laboratorio; figura 3.21.

3.4.3.- Cálculo del coeficiente de fricción.

El coeficiente de fricción teórico para el balero se calculó dividiendo la fuerza requerida "F" para hacer girar el balero hasta obtener una velocidad dada para una carga normal del balero. La fuerza puede ser calculada mediante la siguiente ecuación:

$$F = \mu A \frac{\bar{v}}{h}$$
 (3.11)

en donde:

A = área de contacto de la proyección de la esfera en la copa , $A = 4.186 in^2$.

\bar{v} = velocidad lineal promedio de varios puntos al hacer girar la esfera, $\bar{v} = 8.902 \frac{in}{seg}$ a 60 rpm.

μ =coeficiente de viscosidad , $\mu = 2.6 \times 10^{-9}$ reyn a 70°F.

H = Espesor de la película de aire , $h = 0.001$ in.

De donde se sabe que :

$$F = 9.69 \times 10^{-5} \text{ lb.}$$

Entonces , con el valor de fuerza normal $n = w = 15$ libras, tenemos:

$$f = \frac{F}{n} = 0.00000647.$$

Esto demuestra que, si el arrastre externo es omitido, el balero se acerca a un medio sin fricción.

3.5.- Maquinado de la esfera y la copa.

Los resultados de los cálculos del balero de aire esférico se utilizaron como base para llevar a cabo el diseño definitivo y la impresión de los planos de fabricación en el programa de Diseño Asistido por Computadora (Autocad). Esto nos permitió llevar a cabo algunas modificaciones sin mayores problemas para la reimpresión, además de que éstos mismos dibujos sirvieron de antecedente para el desarrollo de los programas para el maquinado de las piezas.

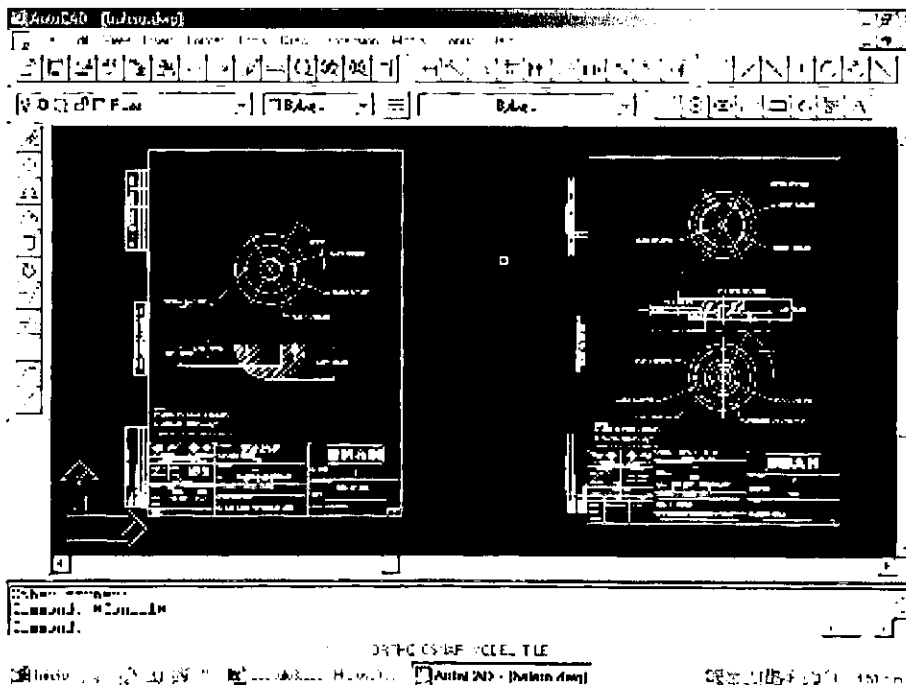


Figura 3.12.- Diseño del balero de aire en Autocad.

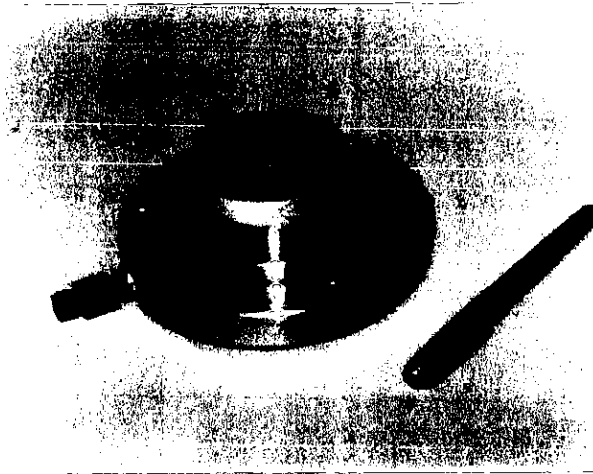


Figura 3.13.- Copa con la brida para suministro de aire a presión

3.5.1.- Diseño CAD-CAM .

Aunque es posible llevar a cabo la transformación de los archivos de Autocad, a un programa capaz de llevar a cabo el maquinado de una pieza, en este caso no fué necesario llevar a cabo estas transformaciones, debido a que es más fácil escribir directamente las instrucciones en la computadora integrada a la máquina y efectuar el proceso de fabricación, y así fue como se procedió. El listado de las instrucciones para la fabricación de las piezas se encuentra en el apéndice A.

3.5.2.- Máquina de control numérico.

El equipo utilizado para la fabricación de los componentes del balero, fue un torno de control numérico marca Emco modelo turn 242, del Taller de Diseño y Manufactura Avanzada de la Facultad de Ingeniería. En la figura 3.14 se muestra la máquina de control numérico, utilizada en la fabricación del balero de aire.

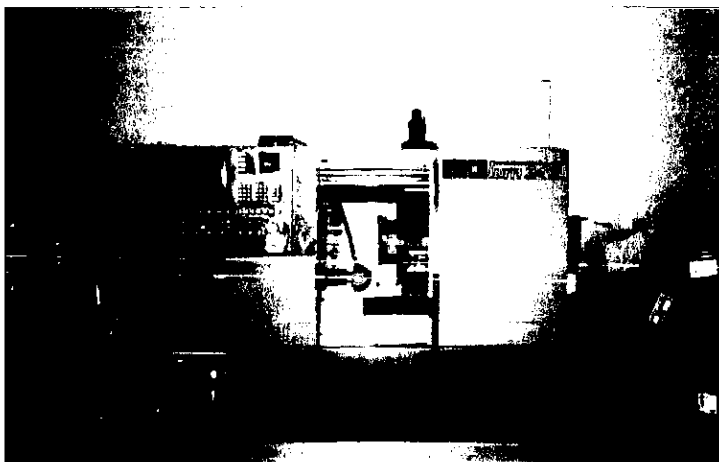


Figura 3.14.- Máquina de control numérico EMCO TURN 242, utilizada para la manufactura de las piezas del balero de aire.

El tiempo de maquinado de ambas piezas fué aproximadamente de 45 minutos, esto se pudo lograr ya que se diseñaron y fabricaron las herramientas necesarias para el maquinado de las piezas.

Dado que se pretendía que el acabado fuera lo más fino posible para que el proceso de pulido no fuera tan tardado y que además durante esta etapa no se corriera el riesgo de deformar o alterar las superficies esféricas, se utilizó un inserto o pastilla especial para trabajos de precisión. Estos objetivos se cumplieron ya que con este procedimiento, el pulido no implicó el desgaste de las superficies y solo tomó unas cuantas horas.

Cabe señalar que la primera vez que se maquinó un balero de aire de este tipo este se realizó en la maquina de control numérico Emco VMC-300 que es un centro de maquinado; el tiempo de trabajo de ambas piezas fue de 45 horas; por lo que se optó por diseñar las herramientas necesarias para fabricar la esfera y la copa en un torno de control numérico, dado que la esfera y la copa son sólidos de revolución. Con lo cual se pudo reducir el tiempo de maquinado considerablemente de 45 horas a 45 minutos.



Figura 3.15.- Un detalle del maquinado de la primer semiesfera, en la máquina de control numérico Emco VMC-300 .

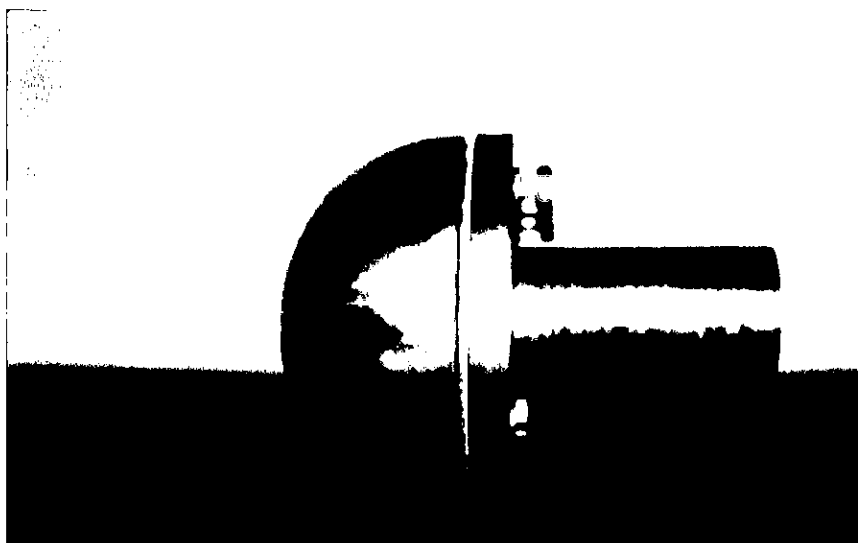


Figura 3.16.- Herramientas que se diseñó para maquinar las piezas en la máquina de control numérico EMCO TURN 242.

3.5.3.- Resultados del maquinado. Mediciones hechas con una máquina de medición por coordenadas.

Después de maquinadas las piezas se llevó a cabo una verificación tanto de sus medidas como de su esfericidad, esto se hizo con una máquina de medición por coordenadas o palpador neumático y los resultados, expresados en milímetros, fueron los siguientes:

	SEMIESFERA	COPA
Diámetro [mm]	99.9348 ± 0.0414	100.4727 ± 0.0235
Tolerancia geométrica	Esfericidad $\sigma=0.0687$	esfericidad $\sigma=0.0589$
Altura [mm]	51.5389 ± 0.0012	

Tabla 3.2.- Dimensiones finales del balero de aire obtenidas de la maquina de medición por coordenadas.

En esta tabla se muestran los promedios de los resultados de tres mediciones con 60 puntos cada una, tanto para la semiesfera, como para la copa.

3.6.- Perforaciones capilares.

La realización de los orificios capilares para permitir el flujo del aire hacia el interior del balero, ha sido considerada como la parte más delicada de todo el proceso de fabricación. En primera instancia se pensó utilizar inyectores de carburador como insertos en la copa, es decir aprovechar el hecho de que las perforaciones ya estaban hechas y de esta manera sólo se tenía que barrenar e insertar, otra opción que se tomó

en consideración fué la de hacer un barreno de diámetro mayor y en el último tramo usar la broca pequeña. La primera opción se descartó por el hecho de que una vez colocados los insertos en la copa, sería necesario volver a colocarla en la máquina de control numérico para rebajar los salientes, esto implicaba el tener que alinear con estrictas tolerancias cosa que se quiso evitar. En la segunda opción se tenía un problema similar ya que en este caso se tenía que barrenar de un lado e invertir la copa, teniendo también problemas con el alineamiento, situación que también se evitó. A sugerencia de un experimentado maestro del taller se llevó a cabo la perforación de los capilares con una broca de acero de alta velocidad, el diámetro utilizado fue de 0.55 mm, aquí se tenía la incertidumbre de que si la broca sería capaz de perforar los casi 13 mm de pared que tiene la copa entre la cámara de aire y su superficie, sin romperse; los resultados fueron totalmente satisfactorios.

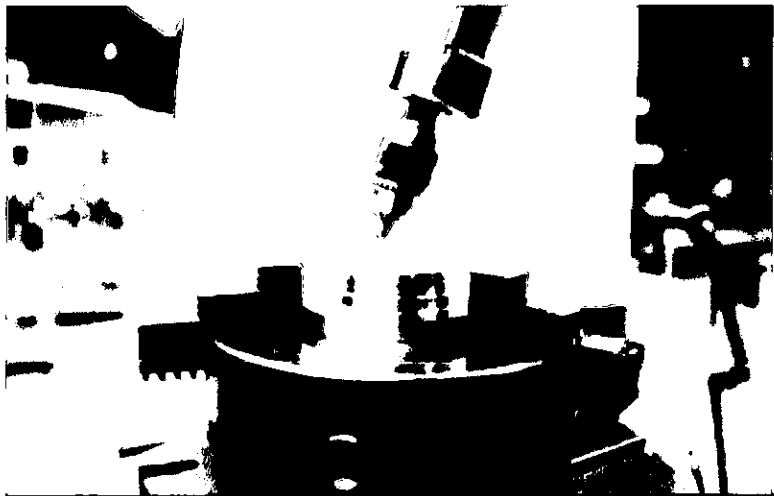


Figura 3.17.- Perforaciones capilares hechas en la fresa Induma del taller mecánico de la FI.

Para repartir de manera equidistante las perforaciones, se utilizó un cabezal divisor giratorio con una separación de 60 grados, y se hizo una adaptación especial a un broquero para poder sujetar herramientas de corte de diámetros tan pequeños (<1 mm) y así posteriormente poderlo sujetar en la maquina fresadora en la cual se hicieron las perforaciones.

3.7.- Tallado y pulido entre superficies.

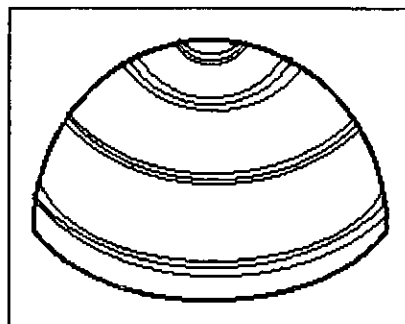


FIGURA 3.18.- Irregularidades encontradas en el maquinado de la esfera, después de salir de las máquinas de control numérico.

Una vez terminado el proceso de fabricación del balero, se procedió a tallar una pieza contra la otra, utilizando un pulidor. Esto se hizo con la finalidad de que ambas piezas quedaran perfectamente embonadas y no existiera el peligro de una ralladura durante el funcionamiento del sistema con la masa de simulación encima de la plataforma. El proceso duró pocos minutos debido a que el acabado y tolerancias que se obtuvieron con el torno de control numérico fueron de gran calidad y precisión.

3.8.- Diseño de la brida y soporte del balero y plataforma.

Como ya se mencionó, para el buen funcionamiento del balero de aire es necesario que la misma cantidad de flujo de aire que escapa por la periferia de la copa, salga por la perforación central de la misma. Es por ello que se ha propuesto un diseño especial para la fabricación de la brida, esto con la finalidad de poder controlar de mejor manera posible el escape de aire del balero, es decir, igualándolo.

El diseño básicamente consiste en colocar una válvula que controle el flujo de aire que sale por la perforación central de la copa, lo cual garantizara el buen funcionamiento del balero en cuanto a la capacidad de carga se refiere, cabe señalar que esta salida de aire debe estar correctamente ubicada para que no ocasione interferencias en la plataforma, ya que el aire de escape puede moverla.

Para el diseño del soporte de la plataforma se propuso un diseño económico y ligero que fuera capaz de soportar las cargas a las que estaría sometiendo. El material del que se fabricó el soporte de la plataforma es aluminio comercial de sección circular de 3/4" y una longitud de 0.15m; por la parte de resistencia de materiales la de mayor importancia es la de resistencia a la compresión y la deformación.

Por la parte de deformación y dado que el sistema soportará únicamente cargas de compresión de 80 kg distribuidos sobre seis barras de aluminio, para tener mayor resistencia de carga, la mínima deformación y la mayor estabilidad posible tenemos:

Modulo de elasticidad de aluminio = 70 GPa.

Se sabe que el alargamiento esta dado por:

$$\partial = \sum_{i=0}^n \frac{P_i \times L_i}{A_i \times E_i} \quad (3.12)$$

$$p = \frac{80}{6} = 13.33kg$$

donde 13.33kg=130.77N

3/4"=0.1905m

$$\partial = \frac{(-130.77)(0.15)}{\frac{\pi}{4}(0.1905)^2(70 \times 10^9)} = -9.83 \times 10^{-7} m$$

Al observar este valor tan pequeño de deformación se concluyó que el diseño del soporte está bastante sobrado, en cuanto a las necesidades de resistencia a la compresión y deformación.

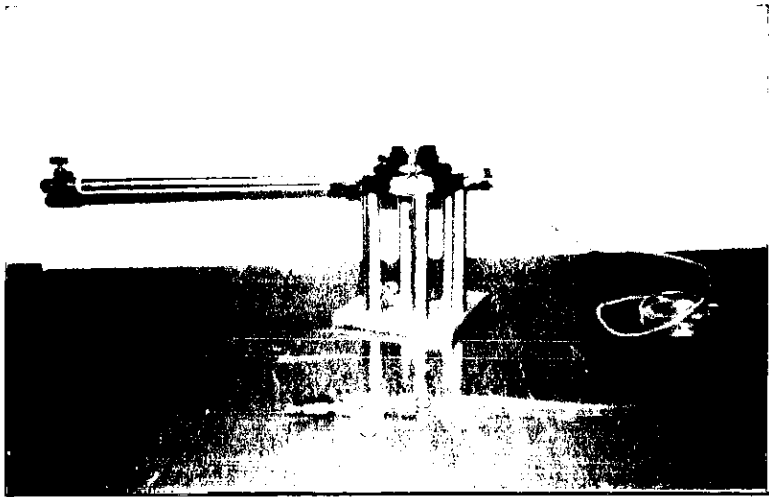


Figura 3.19.- Brida, copa y soporte para la plataforma.

3.9.- Pruebas de funcionamiento.

Finalmente se han diseñado hasta el momento dos plataformas de simulación, una con mesa de fibra de carbono-epóxy y la otra con mesa de aluminio. La plataforma donde se realizaron más pruebas es la de aluminio, debido a que los insertos roscados para sujeción en la mesa de fibra de carbono-epóxy son más delicados. Con este sistema (mesa de aluminio) se realizaron las pruebas de capacidad de carga, cuya curva de respuesta se muestra en la figura 3.21.

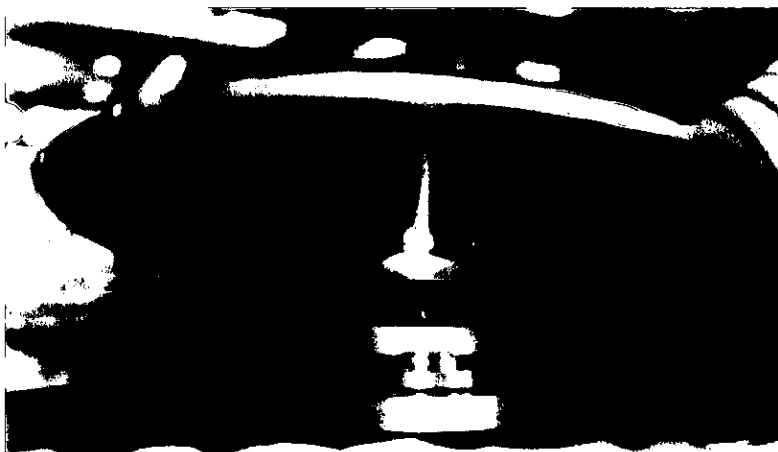


Figura 3.20.- Prototipo de la plataforma de simulación donde se obtuvo por primera vez un medio sin fricción, con una carga máxima de 70 Kg.

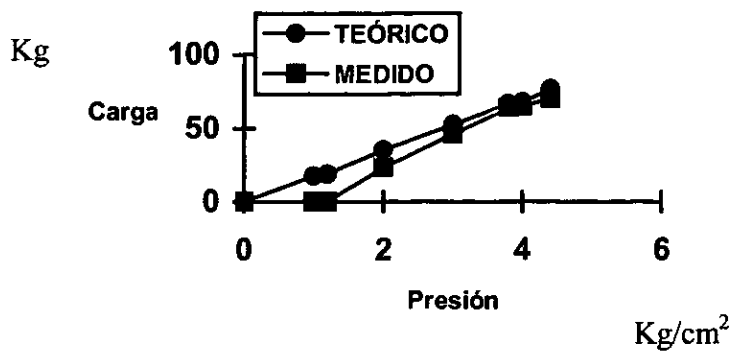


Figura 3.21.- Comparación entre la curva de carga teórica y la medida experimentalmente, para la plataforma de simulación.

Se llevaron a cabo los cálculos para determinar teóricamente la curva de carga máxima del dispositivo, para seis perforaciones capilares, un radio de la copa de 3 cm, la perforación de salida de la copa de radio 0.63 cm y un diámetro de la semiesfera de 10 cm. La carga en kg se determinó en función de la presión de entrada dada en kg/cm^2 , ésta es obtenida de la ecuación (3.10). En la figura 3.21 se muestra la comparación entre la curva de carga teórica y la medida experimentalmente.

Podemos señalar que se ha diseñado, construido y probado un dispositivo con fricción despreciable.

DISEÑO Y FABRICACIÓN DE LOS ACTUADORES Y SU INCORPORACIÓN A LA PLATAFORMA DE SIMULACIÓN.

En este capítulo se hace una descripción del diseño y la construcción de las masas deslizantes que serán utilizadas para el balanceo automático del simulador. Su funcionamiento está basado en el movimiento de una masa sobre un tornillo de rosca fina, movido por un motor de pasos. Con dos inclinómetros en los ejes de rotación y cabeceo, un microcontrolador toma la decisión de mover hacia delante o hacia atrás cada una de las masas hasta lograr la horizontal de la plataforma y de esta manera conseguir un equilibrio.

4.1.- Diseño y fabricación de los sistemas de masas deslizantes.

Los sistemas de masas deslizantes son los componentes más importantes en el balanceo de la plataforma, ya que de ellos dependerá que se logre un bajo par residual. Esto último está a su vez estrechamente ligado a la resolución que se logre en el movimiento de las masas por el conjunto motor-tornillo. Dicho movimiento debe ser lo más preciso y lo más fino posible.

Para evitar confusiones en el diseño mecánico, es muy recomendable aplicar un proceso de diseño, con la finalidad de que se elijan las mejores ideas y las mejores soluciones posibles a nuestro problema. La metodología seguida para el diseño que aquí se presenta es la siguiente:

- Planteamiento de la necesidad.
- Definición del problema.
- Planeación.
- Investigación.
- Diseño conceptual.
- Diseño preliminar.
- Diseño de detalle.
- Fabricación.
- Pruebas.

1.- Planteamiento de las necesidades.

- Desplazar una masa siguiendo un movimiento rectilíneo.
- Emplear materiales no magnéticos.

- El diseño debe ser posible realizarlo en máquinas herramientas convencionales y de bajo costo.

2.-Definición del problema.

- El movimiento lineal debe ser del orden de milésimas de pulgada.
- El desplazamiento de la masa no debe ser menor a tres pulgadas.
- El sistema debe tener la capacidad de mover de 700 a 1000g.
- Por diseño, el centro de masa del sistema se debe localizar prácticamente en el centro geométrico de éste.

3.-Planeación.

Como actividades fundamentales se han planteado las siguientes:

- Investigación del estado del arte.
- Selección del sistema que mejor se adapte a nuestras necesidades.
- Dibujo de planos de fabricación.
- Construcción de los actuadores.

4.-Investigación.

Al hacer la investigación correspondiente en lo más avanzado, se encontró con una gran variedad de sistemas de control y sistemas mecánicos que cumplen con las necesidades planteadas. El dispositivo que mejor se adapta a nuestras necesidades es un sistema de rodamientos lineales acoplados a una platina y un sistema de control por medio de un pequeño servo-motor y un PLC o en su defecto un microcontrolador. Dichos sistemas tienen un movimiento lineal con una resolución de 0.003mm. El inconveniente para utilizar este tipo de sistemas es el alto costo que tienen y que varía desde los \$1500 a \$2000 dólares, aproximadamente. Por esta razón se decidió hacer un diseño propio.

5.-Diseño conceptual.

Dentro de este punto se aplicó el método de tormenta de ideas el cual consiste en generar el mayor número de soluciones creativas y el cual obedece las siguientes reglas:

- a) Sin inhibición de ideas.
- b) Contar con el mayor número de ideas posibles.
- c) Expresar éstas en una sola palabra.

Función	Conceptos					
	Rodamiento lineal	Balero	Aire	Tornillo	Guía	Banda
Movimiento lineal.	Rodamiento lineal	Balero	Aire	Tornillo	Guía	Banda
Inducción del movimiento lineal.	Motor de CD	Motor de pasos	Motor servo	Aire	Imán	Bobina
Automatización del movimiento.	PLC	Microcontrolador	Sensores	PC	Robot	Brújula

Tabla 4.1.- Resultado de la tormenta de ideas.

6.-Diseño preliminar.

En este punto se sugieren varias combinaciones de soluciones posibles utilizando los conceptos anteriores.

- a) Movimiento lineal con guía, inducción del movimiento con servo motores y automatización con PLC.
- b) Movimiento lineal con tornillo, inducción del movimiento lineal con motor de pasos y automatización con microcontrolador.
- c) Movimiento lineal con banda, inducción del movimiento lineal con motor de CD y automatización con PLC.
- d) Movimiento lineal con rodamiento lineal, inducción del movimiento lineal con motor de pasos y automatización con microcontrolador.

7.-Diseño de detalle.

Después de analizar las diferentes opciones del punto anterior y recordando las necesidades y restricciones se optó por la opción del inciso b), ya que esta satisface plenamente todas las necesidades y restricciones.

Para poder cumplir con la resolución que debe tener el movimiento lineal se decidió fabricar una platina acoplada a un tornillo de cuerda milimétrica, el cual a su vez es acoplado a un motor de pasos que cuando recibe una serie de pulsos eléctricos hace que la masa se deslice en un movimiento fino (mesa de masa deslizante).

Enseguida se presenta la combinación sugerida de tornillo y motor para conseguir un movimiento lineal con una resolución de 0.0025mm. Sus características principales son:

- El tornillo debe tener una cuerda milimétrica M7X1, con baleros en los extremos.

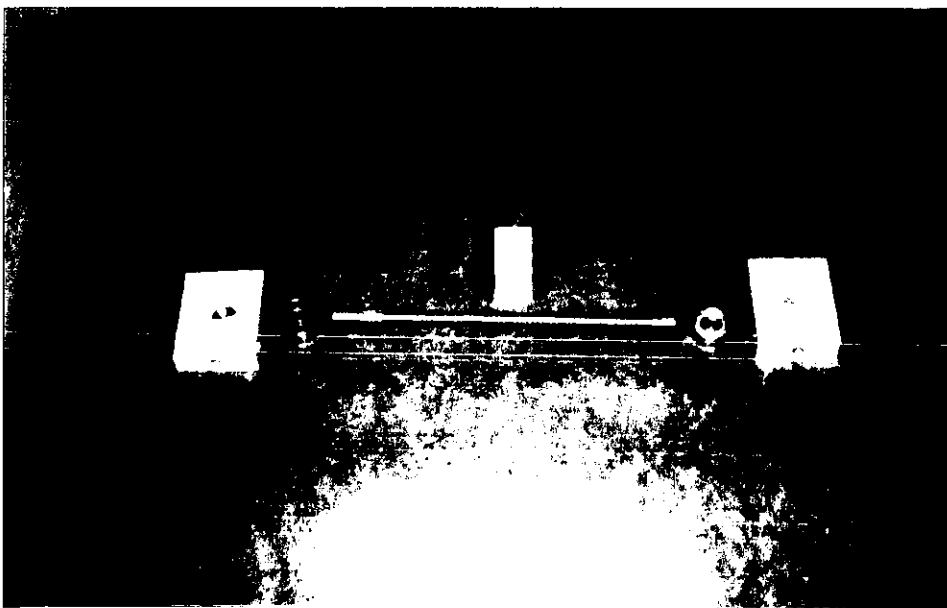


Figura 4.1.- Tornillo milimétrico y partes de montaje.

- El motor tiene la capacidad de moverse 400 pasos /revolución (0.9 grados /paso), cuenta con bobinas de 70 Ohms. El modelo seleccionado es el P/N 16PY-Q203-01 de Menebea (Japan).

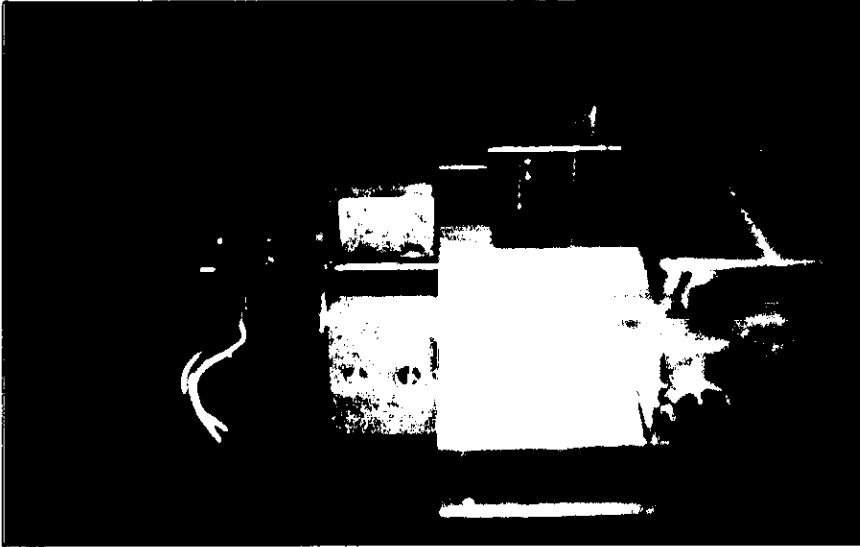


Figura 4.2.- Motor de pasos y su montaje en la mesa deslizante.

Los planos de fabricación así como los de ensamble se hicieron en Autocad lo cual facilitó las modificaciones y correcciones en gran medida; los planos de fabricación así como los de ensamble se encuentran en el apéndice B.

8.-Fabricación.-

Con los planos ya revisados y autorizados se solicitó la manufactura de tres conjuntos de

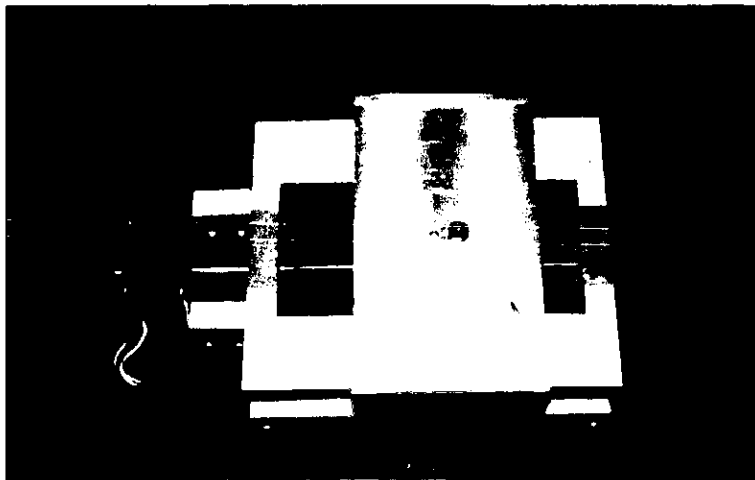


Figura 4.3.- Mesas deslizantes ya terminadas.

masas deslizantes a los talleres del Centro de Instrumentos de la U.N.A.M., lo que fue muy práctico ya que se pudo tener contacto directo con los operarios de las distintas máquinas y así lograr que las piezas cumplieran con las especificaciones requeridas. El proceso de manufactura de las tres mesas tuvo una duración de tres meses.

4.2.-Determinación del centro de masa.

Al contar con todos los elementos de la plataforma de simulación se procede a la identificación de cada uno de ellos como se observa en la tabla 4.2, con la finalidad de determinar el centro de masa del sistema completo, siguiendo el método analítico:

Elemento	Peso (g)	Forma	Ubicación del Centroide	Notas
Mesa deslizante completa	1955	prismática	Esta localizado sobre el eje F-F'.	Ver figura 4.4
Platina deslizante	615	Placa delgada	Esta Localizado sobre el eje E-E'.	Ver figura 4.5
Masa 1	470	cilindro	Centro geométrico	
Masa 2	470	cilindro	Centro geométrico	
Masa 3	965	cilindro	Centro geométrico	
Masa 4	965	cilindro	Centro geométrico	
Masa 5	970	cilindro	Centro geométrico	
Masa 6	1270	cilindro	Centro geométrico	
Masa 7	1370	cilindro	Centro geométrico	

Tabla 4.2.- Componentes principales del sistema y sus características.

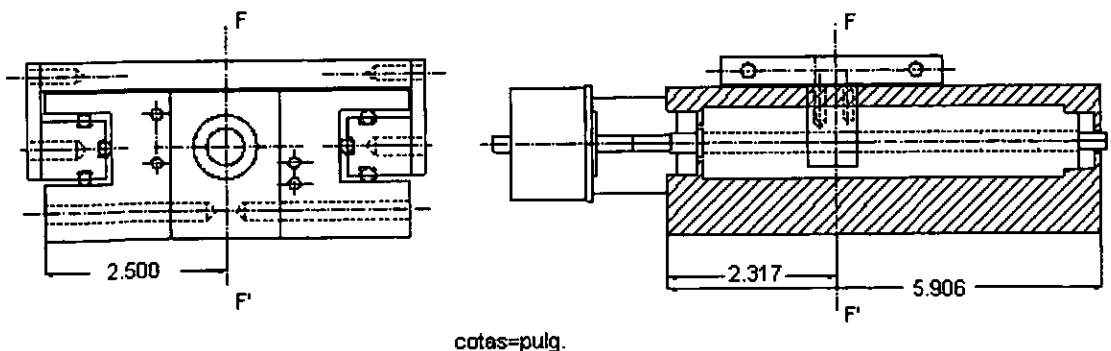
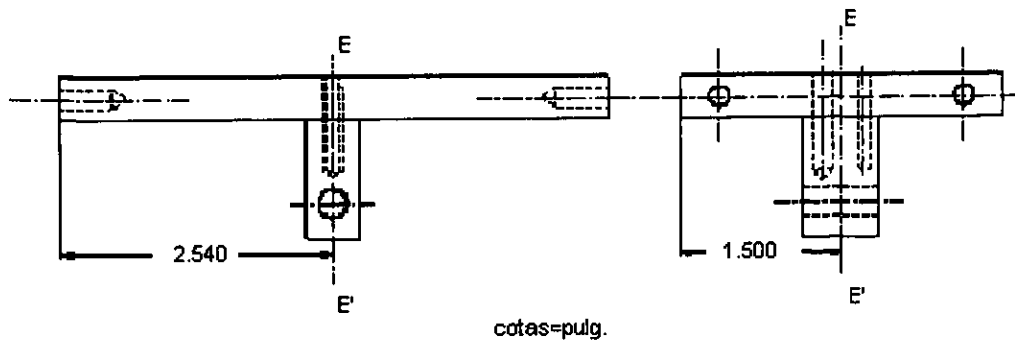


Figura 4.4.- Localización del eje F-F' sobre el cual se encuentra el CM del sistema de masas deslizantes.



1Figura 4.5.- Localización del eje E-E' sobre el cual se encuentra el CM de la platina deslizante.

Una vez que se identificó cada uno de los elementos del simulador, se fijaron las masas cilíndricas a la plataforma, de tal forma que se simulara la distribución que podrían tener los instrumentos, mecanismos de prueba y los distintos sistemas de control para los cuales fue diseñada la plataforma, tal y como se observa en la siguiente figura.

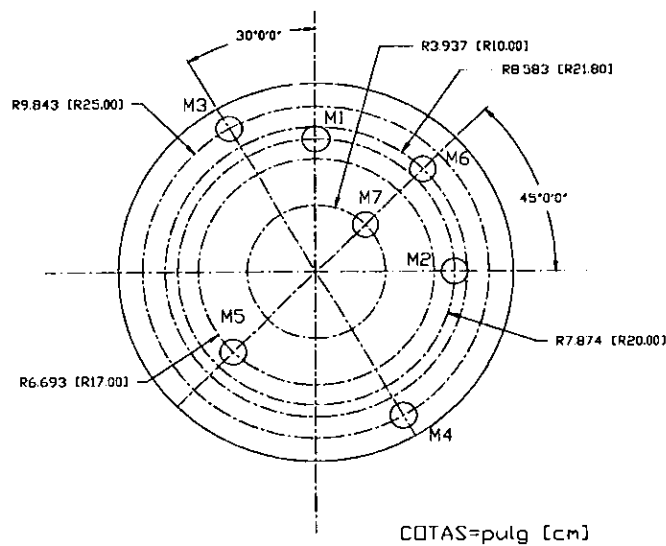


Figura 4.6.- Distribución de las masas cilíndricas en la plataforma.

Al tener ya identificados todos los elementos, se calcula el centro de masa del sistema y se proponen como masas equilibrantes las propias masas, como se desarrolla a continuación:

El sistema mostrado en la figura anterior tiene los siguientes datos:

Elemento	Masa [g]	Radio de localización [m]	Ángulo de localización [grados]	Localización en el eje X [m]	Localización en el eje Y [m]
M1	470	0.200	90	0.000	0.200
M2	470	0.200	0	0.200	0.000
M3	965	0.250	120	-0.125	0.217
M4	965	0.250	300	0.125	-0.217
M5	970	0.170	225	-0.120	-0.120
M6	1270	0.378	45	0.267	0.267
M7	1370	0.100	45	0.071	0.071
Masa equilibrante del eje X	1955	-----	-----	-----	-----
Masa equilibrante del eje Y	1955	-----	-----	-----	-----

Tabla 4.3.- Sistema completo de masas del simulador.

Entonces tenemos:

$$m_b R_{bx} = -m_1 R_{1x} - m_2 R_{2x} - m_3 R_{3x} - m_4 R_{4x} - m_5 R_{5x} - m_6 R_{6x} - m_7 R_{7x}$$

$$m_b R_{bx} = -470(0) - 470(0.2) - 965(-0.125) - 965(0.125) - 970(-0.120) - 1270(0.154) - 1370(0.071)$$

$$m_b R_{bx} = -270.450$$

$$m_b R_{by} = -m_1 R_{1y} - m_2 R_{2y} - m_3 R_{3y} - m_4 R_{4y} - m_5 R_{5y} - m_6 R_{6y} - m_7 R_{7y}$$

$$m_b R_{by} = -470(0.2) - 470(0) - 965(0.217) - 965(-0.217) - 970(-0.120) - 1270(0.154) - 1370(0.071)$$

$$m_b R_{by} = -270.450$$

$$\theta = \arctan \frac{-270.450}{-270.450} = 45^\circ$$

$$\theta_b = 45^\circ + 180^\circ = 225^\circ$$

$$m_b R_b = \sqrt{(-270.450)^2 + (-270.450)^2} = 382.474 \text{kgm}$$

$$m_b = \sqrt{(1955)^2 + (1955)^2} = 2764.788kg$$

$$R_b = \frac{382.474}{2764.788} = 0.138m$$

4.3.- Determinación del vector que une el CM con el CR.

De los cálculos anteriores podemos identificar fácilmente un vector, el cual tiene las siguientes características:

Tiene un radio R_b y un ángulo θ_b .

$$R_b = 0.138m$$

$$\theta_b = 45^\circ$$

4.4.- Reubicación del centro de masa.

Dado que se trata de compensar el desequilibrio de la plataforma de simulación con los sistemas de masas deslizantes, éstas se tienen que fijar en un punto; por lo que se procede de la siguiente manera.

Convirtiendo el vector que une al CM con el CR en coordenadas rectangulares, se tiene:

$$0.138\text{COS}(45^\circ + 180^\circ) = -0.098m$$

$$0.138\text{SEN}(45^\circ + 180^\circ) = -0.098m$$

A partir de estos datos podemos concluir que el centro de masa de los sistemas de masas deslizantes se debe localizar a: una distancia de -9.80cm sobre el eje X y la otra a -9.80cm sobre el eje Y.

Ya que se conoce la ubicación de las masas deslizantes, se tienen que hacer las perforaciones necesarias para fijarlas a la plataforma de simulación. Es en este tipo de operaciones donde resalta la importancia de las mediciones ya que de ello depende en gran medida que el sistema se pueda balancear, manualmente, con relativa facilidad.

Hasta este punto hemos hecho un balanceo basándonos en los cálculos realizados, a continuación se hará un balanceo de mejor aproximación moviendo manualmente la platina de las mesas de masas deslizantes.

El balanceo que se ha obtenido siguiendo este procedimiento, ya es bueno, pero aún no logramos ubicarnos dentro del intervalo permisible de balanceo en los ejes de cabeceo y rotación que ha sido establecido en $\pm 1^\circ$ con respecto a la horizontal; a partir de la sección 4.5 se describe todo el desarrollo del procedimiento relacionado con el balanceo automático.

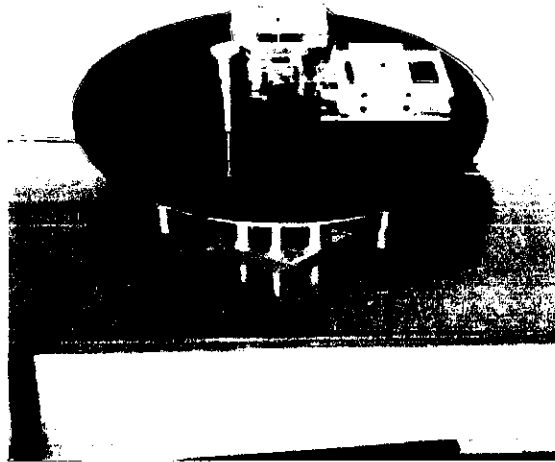


Figura 4.7.- Plataforma de simulación con masas cilíndricas (lastres) y masas deslizantes montadas en posiciones fijas.

4.5.-Sistema de control realimentado.

El sistema de control realimentado se hace por medio de un microcontrolador de la serie HC-11, el cual se encarga de recibir información de una brújula electrónica y compararla contra el umbral de $\pm 1^\circ$ establecido por nosotros; del resultados obtenido de dicha comparación el microcontrolador manda una secuencia de pulsos, los cuales hacen que los motores de pasos giren en sentido horario o anti-horario lo cual induce el movimiento a las masas deslizantes en una dirección u otra. Cada eje se maneja de manera independiente, es decir primero se ajusta el eje X y posteriormente el Y, hasta lograr la horizontal.

Cabe señalar que cada serie de pulsos que manda el microcontrolador corresponde a un paso en el motor, lo que significa un movimiento de 0.0025mm en las masas deslizantes.

4.6.- Brújula electrónica.

Se emplea una brújula electrónica para determinar el movimiento de guiñada de la plataforma y la inclinación en los ejes de alabeo y cabeceo.

Se utilizó un módulo electrónico denominado EZ-COMPASS-3, cuyo diseño está basado en un microcontrolador programado por el fabricante. La comunicación con éste dispositivo se realiza en forma serie, bajo el estándar RS-232. Al microcontrolador se accesa mediante comandos suministrados por el operador, desde el teclado de la computadora o de forma automática programando previamente estos comandos en una rutina de comunicación serie, como en este caso.

El módulo consta de un magnetómetro de estado sólido de tres ejes, con 12 bits (0.08 grados) de resolución, para generar el azimut de 0 a 360 grados. Contiene dos inclinómetros con 12 bits de resolución que determinan la inclinación de los ejes de alabeo y cabeceo en un intervalo de ± 70 grados. Estos inclinómetros, se usaron para la corrección del desbalanceo estático, por medio del control realimentado entre la brújula, el microcontrolador y los motores de pasos de los sistemas de masas deslizantes; con lo que se logró el ajuste fino del balanceo estático de la plataforma con respecto a la horizontal.

La siguiente tabla contiene las características técnicas del EZ-COMPASS-3:

Azimut	0 – 360 grados
Cabeceo	± 70 grados
Alabeo	± 70 grados
Resolución de azimut	12 bits
Resolución de inclinación	12 bits, escala completa, ambos ejes
Precisión de azimut	< 0.5 grados
Repetibilidad de inclinación	< 0.02 grados
Campo magnético	± 2 Gauss, máximo
Resolución magnética	< 1 mGauss
Polarización	5 VCD
Temperatura	-30 a +85 °C
Peso	< 45 gr
Calibración	EEPROM no volátil
Comunicación	300 – 38400 bauds
Formato de salida	Serial RS232
Actualización máxima	5 veces/seg

Tabla 4.4.- Características principales de la brújula electrónica.

El EZ-COMPASS-3 incluye compensación contra la influencia de anomalías magnéticas localizadas en la proximidad del módulo. No es posible compensar contra interferencias magnéticas variables, sin embargo el módulo las descubre y las suspende o intenta corregirlas automáticamente durante su ocurrencia. Aunque este hecho no influye en absoluto en la operación de balanceo, debido a que solamente utilizamos los ejes X,Y.

4.6.1.- Curvas de respuesta de los inclinómetros.

Los inclinómetros entregan sus lecturas en grados, directamente; por medio del programa de comunicación con la computadora.

Debido a que existe una divergencia entre las lecturas de los inclinómetros y la inclinación real, se obtuvo la relación entrada contra salida, en grados, para obtener una ecuación matemática que ajuste el error implícito, al valor real. Las figuras 4.8 y 4.9 muestran los puntos de prueba junto con la curva de ajuste y su ecuación correspondiente.

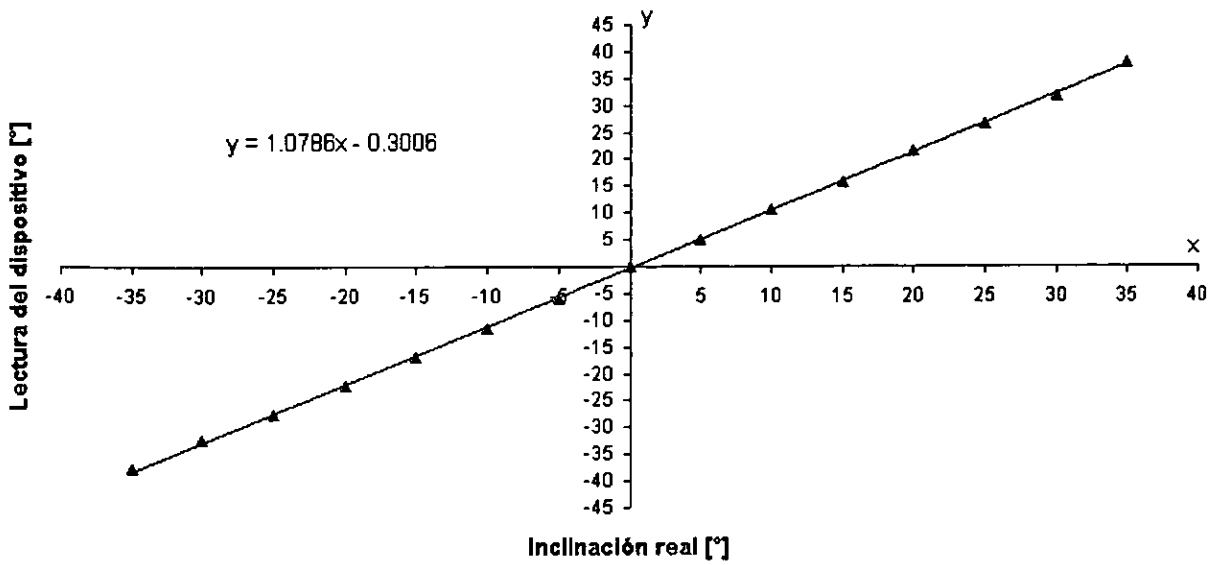


Figura 4.8.- Curva de respuesta del inclinómetro en el eje Y (cabeceo).

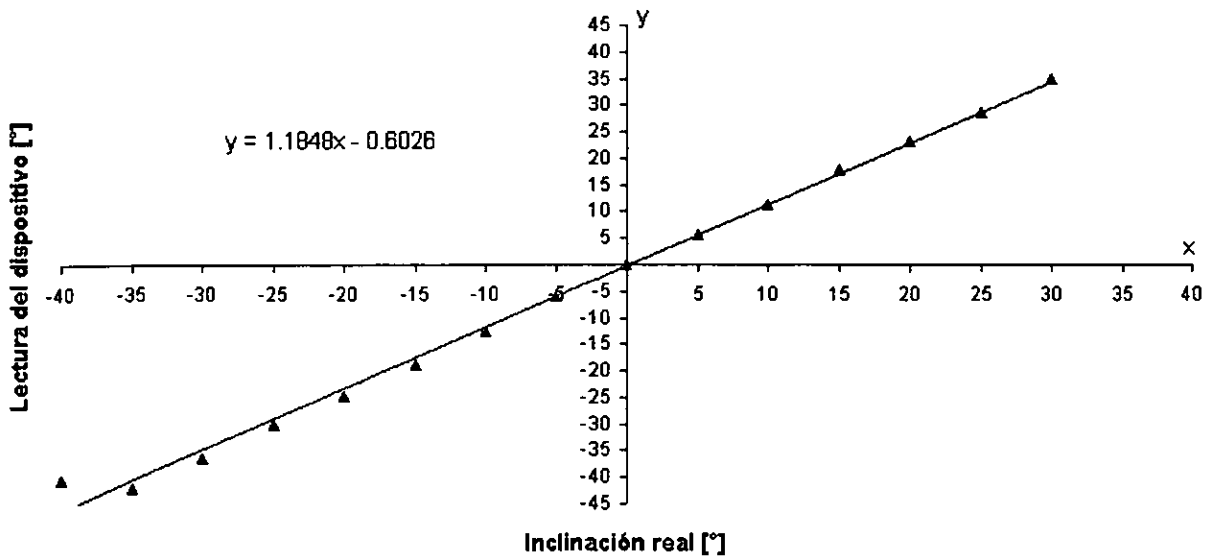


Figura 4.9.- Curva de respuesta del inclinómetro en el eje X (alabeo).

Las lecturas obtenidas de este módulo estando en reposo presentan una fluctuación menor al 1% para el alabeo y cabeceo, como se observa en las curvas de respuesta 4.10 y 4.11, debido a esto se vuelve necesario realizar un promedio de datos.

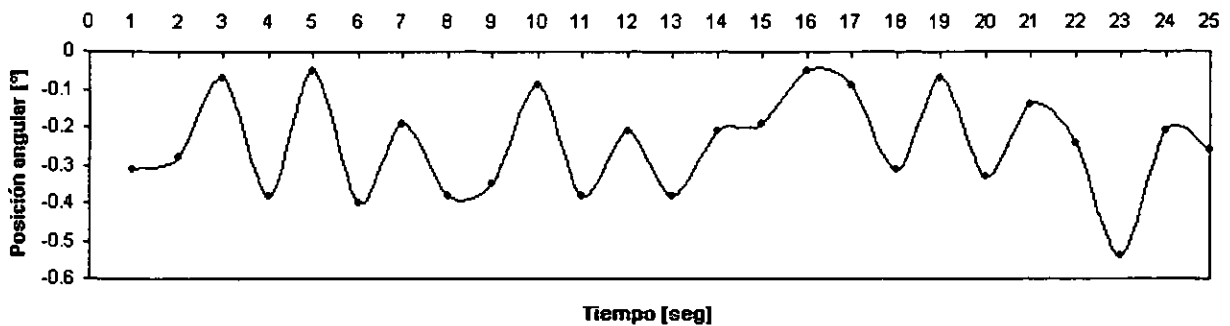


Figura 4.10.- Curva de respuesta del inclinómetro en el eje de alabeo en condiciones estáticas.

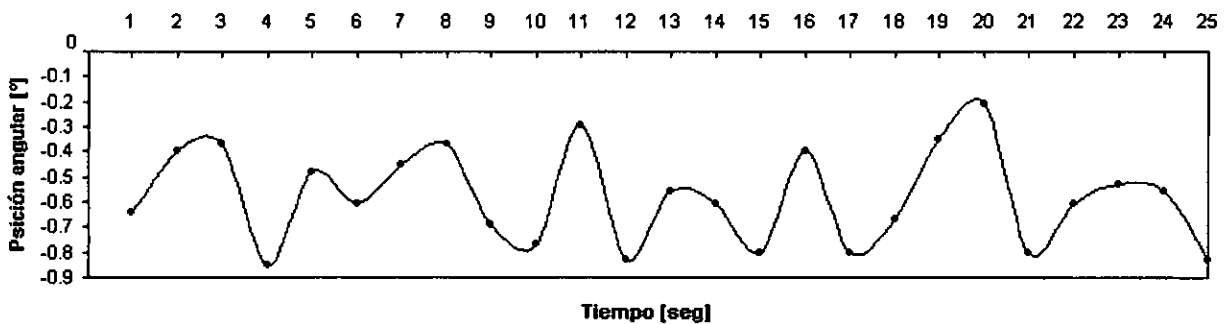


Figura 4.11.- Curva de respuesta del inclinómetro en el eje de cabeceo en condiciones estáticas.

4.7.-Interfases de potencia con los motores de pasos.

Las salidas del microcontrolador son señales de corriente y voltaje muy pequeñas, lo que es insuficiente para los requerimientos de energía que demandan los motores. Es por ello indispensable incluir una etapa de potencia en el sistema de balanceo automático. Básicamente la etapa de potencia consiste en amplificar cada una de las señales que van del microcontrolador a los motores, para esto se han colocado amplificadores de potencia basados en el transistor TIP120 de Motorola, en cada uno de los pines. Con este tipo de amplificadores tenemos la posibilidad de manejar más de 5 volts y más de un Amper, lo que es mas que suficiente para mover los motores de pasos.

En la figura 4.12 se puede observar la configuración del sistema de potencia y el microcontrolador.

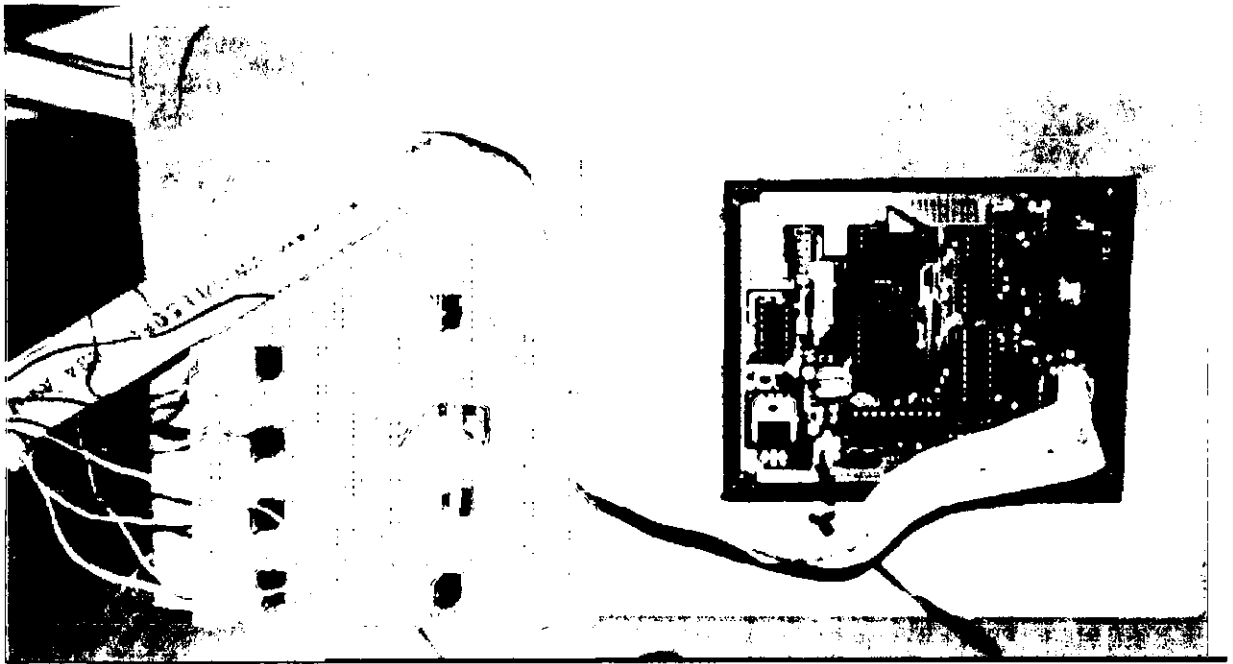


Figura 4.12.- Etapa de potencia con los motores.

RESULTADOS

Una vez que se comprobó el correcto funcionamiento, por separado, de todos los sistemas que conforman la plataforma de simulación, éstos se integraron entre sí para verificar su funcionamiento en conjunto y así poder hacer los ajustes necesarios cuando fueran requeridos y con esto poder realizar el balanceo estático automático. Para poder realizar dichos ajustes, fue necesario establecer algunos parámetros como son: el máximo ángulo de corrección del desbalanceo de la plataforma y la velocidad de respuesta del sistema, es decir, el tiempo que tarda el microcontrolador en procesar la información proveniente de la brújula hasta entregar los pulsos de control a los actuadores.

5.1.- Prueba del sistema de balanceo automático.

El sistema de control automático que se lleva a cabo por medio de un microcontrolador 68HC-11 de Motorola, se encarga de recibir información de dos inclinómetros, cuyos datos son corregidos por medio de las ecuaciones mostradas en las figuras 4.8 y 4.9. Una vez ajustados son comparados contra el umbral de referencia que tiene una cierta tolerancia aceptable para el balanceo, es decir que el desfaseamiento de los ejes de cabeceo y alabeo se encuentre en el intervalo de $\pm 1^\circ$.

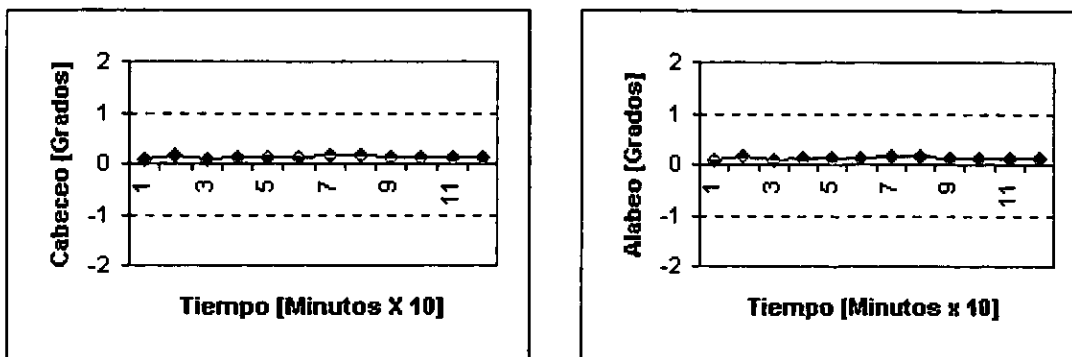


Figura 5.1.- Lecturas de orientación en los ejes de cabeceo y alabeo en un periodo de dos horas.

Cada serie de pulsos que manda el microcontrolador corresponde a un paso en el motor, lo que significa un movimiento de 0.0025mm en las masas deslizantes; la velocidad de dichas masas depende directamente de la rapidez con la cual se manden las series de pulsos, y esta a su vez están limitadas por el tiempo de envío de datos de la brújula electrónica; el máximo número de iteraciones de control que se pudo lograr fue de 12 por minuto.

A pesar de que el número de iteraciones por minuto pareciera ser un poco bajo, esto no tiene ningún significado, para el correcto funcionamiento de la plataforma, ya que de lo que se trata es de establecer un adecuado balanceo y que éste no se pierda a lo largo del tiempo que duren las pruebas de control. No se trata de estar balanceando de manera continua o en tiempo real.

Las curvas mostradas en la figura 5.1 prueban que el control que se logra del balanceo es muy bueno ya que éste se logra mantener fácilmente dentro del intervalo de $\pm 1^\circ$, sin detectar algún cambio significativo en 120 minutos; que es aproximadamente el tiempo que durarán las pruebas de orientación, con esta plataforma. Las gráficas demuestran que no existen desviaciones causadas en el tiempo en las lecturas de orientación obtenidas.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

A partir del desarrollo del presente trabajo se pueden desprender las siguientes conclusiones:

- Se ha logrado implementar un sistema sin fricción, de bajo costo y dimensiones reducidas mediante la fabricación de un balero esférico de aire capaz de soportar una carga de 73 kg.
- Se diseñaron y construyeron los actuadores de precisión, conformando un sistema de masas deslizantes.
- Se implementó un sistema automático realimentado para controlar la posición de las masas deslizantes dentro de la plataforma de simulación.
- Se ha contribuido a la investigación en México en la aplicación de la Ingeniería en el desarrollo de sistemas espaciales.
- Se han establecido las bases para futuras aplicaciones de sistemas de orientación de satélites, los cuales deben ser sometidos a pruebas de funcionamiento antes de ser lanzados al espacio; cabe destacar que las pruebas físicas de orientación no pueden realizarse si no se cuenta con una plataforma sin fricción y correctamente balanceada.
- Se llevaron a cabo pruebas de funcionamiento del sistema de balanceo automático, cumpliendo cabalmente con los objetivos de lograr una capacidad de estabilización de la plataforma menor a ± 1 grado.
- Se ha diseñado y construido una plataforma de simulación con estrictas tolerancias de balanceo, logrando un desbalanceo máximo de 2.0 g-cm.

Para dar continuidad a este trabajo es pertinente hacer las siguientes recomendaciones:

- Diseñar el circuito impreso de la electrónica del sistema.
- Realizar pruebas dinámicas con el fin de verificar la precisión del sistema cuando existen componentes de aceleración, adicionales a las de la gravedad.
- Colocar una plantilla milimétrica sobre la plataforma para evitar en lo posible un desbalanceo debido a la incorrecta colocación y fijación de los componentes.
- Es muy recomendable el utilizar aire doblemente filtrado durante la operación de los baleros de aire esféricos, ya que las partículas de aceite y agua que comúnmente se encuentran en las líneas de aire a presión, llegan a causar problemas en el desempeño del balero, como pueden ser, la disminución de la carga máxima de simulación y el aumento en la fricción del dispositivo.
- Con el fin de evitar el contacto entre las superficies de la semiesfera y la copa cuando se interrumpe el suministro de aire, se ha colocado un anillo de nylon. El anillo evita que las piezas entren en contacto directo y puedan sufrir ralladuras, lo que podría ocasionar una disminución en la eficiencia del dispositivo para mantener un medio con fricción despreciable.

A

PROGRAMA DE CONTROL NUMÉRICO UTILIZADO PARA LA FABRICACIÓN DEL BALERO DE AIRE ESFÉRICO.

A.1 PROGRAMA PARA LA FABRICACIÓN DE LA COPA DEL BALERO DE AIRE.

La maquina que se utilizó para la fabricación de la copa fue el torno de control numérico marca EMCO TURN-242 de los laboratorios de Sistemas de Manufactura Avanzada de la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

%0042	N0200 G00 X11.6
N0000 G56 G58 G71 G94 S1200 F150	N0210 Z-2.951
N0010 G00 X200.0 Z400.0	N0220 G01 X48.7716
N0020 T0707	N0230 G00 X11.6
N0030 M03 M08	N0240 Z-3.451
N0060 G00 X11.6 Z0.0	N0250 G01 X46.9854
N0070 G01 X60.0	N0260 G00 X11.6
N0080 G00 X11.6	N0270 Z-3.951
N0090 Z-0.451	N0280 G01 X45.1062
N0092 G01 X56.5686	N0290 G00 X11.6
N0094 G00 X11.6	N0300 Z-4.451
N0096 Z-0.951	N0310 G01 X43.1222
N0100 G01 X55.1622	N0320 G00 X11.6
N0110 G00 X11.6	N0330 Z-4.951
N0120 Z-1.451	N0340 G01 X41.018
N0130 G01 X53.664	N0350 G00 X11.6
N0140 G00 X11.6	N0360 Z-5.451
N0150 Z-1.951	N0370 G01 X38.774
N0160 G01 X52.1034	N0380 G00 X11.6
N0170 G00 X11.6	N0390 Z-5.951
N0180 Z-2.451	N0400 G01 X36.3644
N0190 G01 X50.4750	N0410 G00 X11.6

N0420 Z-6.451	N0640 G02 X60.0 Z0.188 I0.0 K49.5 F40 S2000
N0430 G01 X33.7538	N0650 G00 X0.0
N0440 G00 X11.6	N0660 Z-10.039
N0450 Z-6.951	N0662 G02 X60.0 Z0.063 I0.0 K49.6
N0460 G01 X30.8912	N0664 G00 X0.0
N0470 G00 X11.6	N0666 Z-10.089
N0480 Z-7.451	N0670 G02 X60.0 Z0.0 I0.0 K49.65
N0490 G01 X27.6988	N0672 G00 Z20.0 M05
N0500 G00 X11.6	N0674 X120.0
N0510 Z-7.951	N0676 T0101
N0520 G01 X24.0452	N0678 M04 S1200
N0530 G00 X11.6	N0680 G00 X101.0 Z1.0
N0540 Z-8.451	N0682 G84 X95.0 Z-30.0 D3=1000 F150
N0550 G01 X19.6754	N0684 G00 X95.0
N0560 G00 X0.000	N0690 G84 X64.0 Z -20.0 D3=1000
N0570 Z-9.439	N0700 G00 X64.0
N0580 G02 X60.0 Z0.818 I0.0 K49.0 F80 S1800	N0710 G84 X60.40 Z-13.0 D3=200 F80
N0590 G00 X0.0	N0720 G00 X60.0
N0600 Z-9.739	N0730 G01 Z-13.0 F40 S2000
N0610 G02 X60.0 Z0.44 I0.0 K49.3	N0740 M05 M09
N0620 G00 X0.0	N0750 G00 X150.0 Z100.0
N0630 Z-9.939	N0760 M30

INFORMATION SYSTEMS
DATA SERVICES

A2. PROGRAMA PARA LA FABRICACIÓN DE LA ESFERA DEL BALERO DE AIRE.

La máquina que se utilizó para la fabricación de la esfera fue el torno de control numérico marca EMCO TURN-242 de los laboratorios de Sistemas de Manufactura Avanzada de la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

%0041	N0360 X70.000 Z1.000
N0000 G53 G55 G71 G94 S1200 F150	N0370 Z-13.905
N0010 G00 X150.000 Z50.000	N0380 X68.000 Z1.000
N0020 T0101	N0390 Z-12.985
N0030 M04 M08	N0400 X66.000 Z1.000
N0040 G00 X102.000 Z1.000	N0410 Z-12.115
N0050 G01 Z-51.000	N0420 X64.000 Z1.000
N0060 X100.000 Z1.000	N0430 Z-11.287
N0070 Z-40.950	N0440 X62.000 Z1.000
N0080 X98.000 Z1.000	N0450 Z-10.502
N0090 Z-36.857	N0460 X60.000 Z1.000
N0100 X96.000 Z1.000	N0470 Z-9.757
N0110 Z-33.765	N0480 X58.000 Z1.000
N0120 X94.000 Z1.000	N0490 Z-9.047
N0130 Z-31.200	N0500 X56.000 Z1.000
N0140 X92.000 Z1.000	N0510 Z-8.375
N0150 Z-28.977	N0520 X54.000 Z1.000
N0160 X90.000 Z1.000	N0530 Z-7.732
N0170 Z-27.000	N0540 X52.000 Z1.000
N0180 X88.000 Z1.000	N0550 Z-7.125
N0190 Z-25.212	N0560 X50.000 Z1.000
N0200 X86.000 Z1.000	N0570 Z-6.547
N0210 Z-23.577	N0580 X48.000 Z1.000
N0220 X84.000 Z1.000	N0590 Z-6.000
N0230 Z-22.070	N0600 X46.000 Z1.000
N0240 X82.000 Z1.000	N0610 Z-5.480
N0250 Z-20.667	N0620 X44.000 Z1.000
N0260 X80.000 Z1.000	N0630 Z-4.990
N0270 Z-19.360	N0640 X42.000 Z1.000
N0280 X78.000 Z1.000	N0650 Z-4.525
N0290 Z-18.137	N0660 X40.000 Z1.000
N0300 X76.000 Z1.000	N0670 Z-4.085
N0310 Z-16.985	N0680 X38.000 Z1.000
N0320 X74.000 Z1.000	N0690 Z-3.670
N0330 Z-15.90	N0700 X36.000 Z1.000
N0340 X72.000 Z1.000	N0710 Z-3.282
N0350 Z-14.875	N0720 X34.000 Z1.000

N0730 Z-2.915	N0990 G00 Z1.000
N0740 X32.000 Z1.000	N1000 X0.000
N0750 Z-2.575 N0760 X30.000 Z1.000	N1010 G01 Z-1.200
N0770 Z-2.255	N1020 G03 X99.800 Z-51.000 I0.000 K-49.900
N0780 X28.000 Z1.000	N1030 G00 Z1.000
N0790 Z-1.960	N1040 X0.000
N0800 X26.000 Z1.000	N1050 G01 Z-1.320
N0810 Z-1.685	N1060 G03 X99.440 Z-51.000 I0.000 K-49.720 F40 S2000
N0820 X24.000 Z1.000	N1070 G00 Z1.000
N0830 Z-1.432	N1080 X0.000
N0840 X22.000 Z1.000	N1090 G01 Z-1.310
N0850 Z-1.200	N1100 G03 X99.420 Z-51.000 I0.000 K-49.710
N0860 X20.000 Z1.000	N1110 G00 Z1.000
N0870 Z-0.990	N1120 X0.000
N0880 Z1.000	N1130 G01 Z-1.300
N0890 X0.000 Z0.000	N1132 X-2.000
N0900 G03 X102.000 Z-51.000 I0.000 K-51.000 F80 S1800	N1134 X0.000
N0910 G00 Z1.000	N1140 G03 X99.400 Z-51.000 I0.000 K-49.700
N0920 X0.000	N1150 G01 Z-52.000 M09
N0930 G01 Z-0.500	N1160 G00 X110.000 M05
N0940 G03 X101.000 Z-51.000 I0.000 K-50.500	N1170 Z100.000
N0950 G00 Z1.000	N1180 M30
N0960 X0.000	
N0970 G01 Z-1.000	
N0980 G03 X100.000 Z-51.000 I0.000 K-50.000	

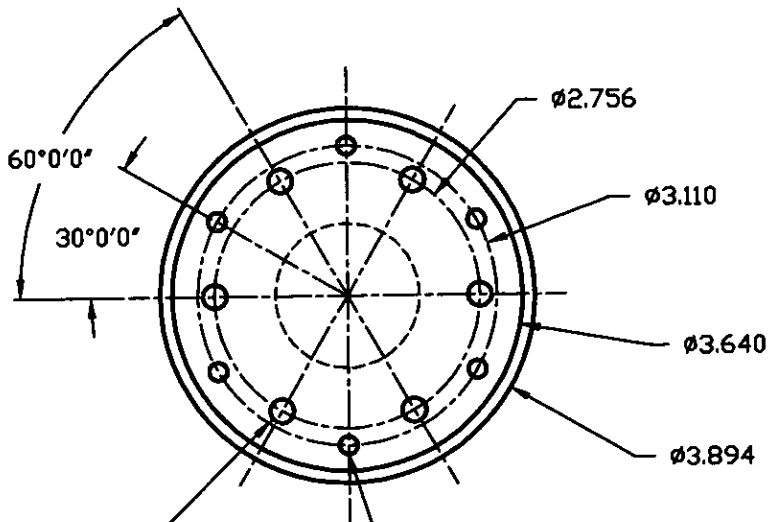
PLANOS DE CONSTRUCCIÓN DE LA PLATAFORMA DE SIMULACIÓN Y ACTUADORES.

Este apéndice está formado completamente por planos de fabricación y ensamble de la plataforma de simulación y las masas deslizantes.

PLANO.	NÚMERO DE PLANOS.
Balero de aire.	2
Plataforma de aluminio.	1
Bridas	2
Soporte de la plataforma.	1
Actuadores (masas deslizantes)	14
Herramienta para fabricación del balero de aire.	3
Ensamble general del sistema.	2

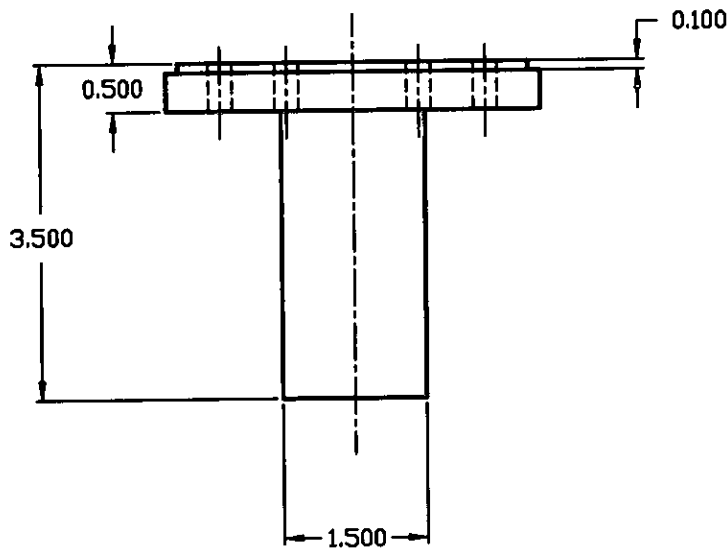
TOTAL DE PLANOS = 25

Y QUEDA PROHIBIDA SU REPRODUCCION TOTAL O PARCIAL PARA OTROS FINES



BARREND PASADO DE 1/4" (6X).

BARREND PASADO 3/16" (6X).



P. EUROPEA	P. AMERICANA
TOLERANCIAS NO INDICADAS	
MILIMETROS	PULGADAS
DE 0 A 6 ±0.1	0.000 ± 0.008
MAS DE 6 ±0.2	FRACC. ± 1/64
ANG. ± 0' 30"	
ESCALA 1:2	COTAS EN PULG.
FECHA	FIRMA
DIBUJO 4-SEP-2000	J.A.J.D.
REVISO	
APROBO	

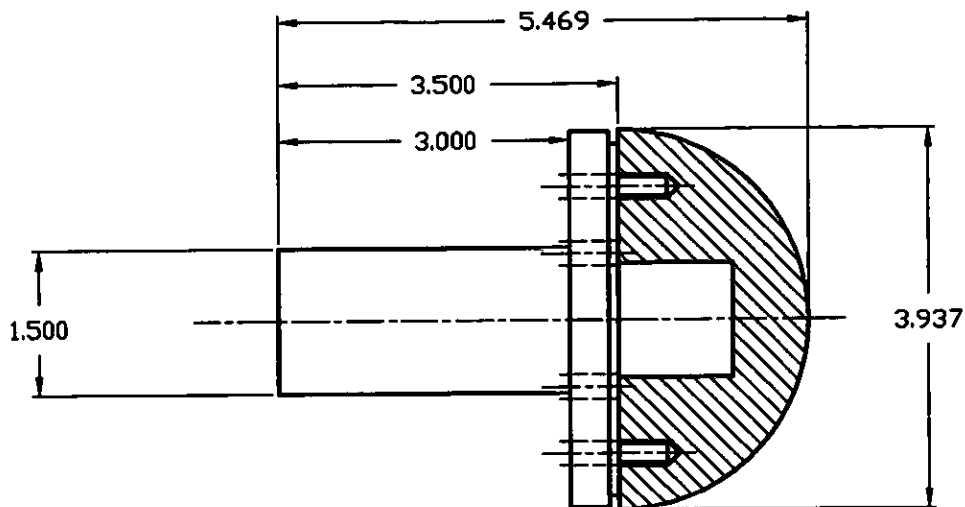
MATERIAL	COLD ROLLED.		
	Ø3.50"		
TRATAMIENTO TERMICO	SIN		
ACABADO	SIN		
MAQ. <input checked="" type="checkbox"/>	DIM. CRITICA <input checked="" type="checkbox"/>	C.E.P. <input checked="" type="checkbox"/>	PESO/1000
PERTENECE AL CONJ.(No. PARTE)			
SE USA EN (NOMBRE)			
TORNO.			
No. PLANO CLIENTE / REFERENCIA DE VENTAS			

UNAM	
No. PARTE	_____
DESCRIPCION	HERRAMIENTA DE SUJECION DE ESFERA Y COPA.
CLIENTE	_____
NOMBRE DEL ARCHIVO	_____
	0

DEPARTAMENTO :

NOMBRE :

Y QUEDA PROHIBIDA SU REPRODUCCION TOTAL O PARCIAL PARA OTROS FINES



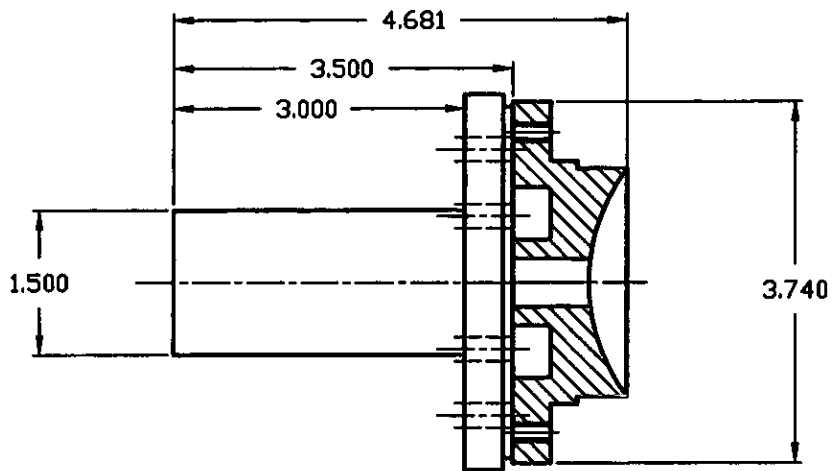
TOLERANCIAS NO INDICADAS			
MILIMETROS		PULGADAS	
DE 0 A 8	±0.1	0.000 ± 0.005	
MÁS DE 8	±0.2	FRACC. ± 1/64	
ANG. ± 0° 30'			
ESCALA	1:2	COTAS EN PULG.	
	FECHA	FIRMA	
DIBUJO	4-SEP-2000	J.A.J.D.	
REVISO			
APROBO			

MATERIAL			
TRATAMIENTO TERMICO			
SIN			
ACABADO			
SIN			
MAQ. <input checked="" type="checkbox"/>	DM. CRITICA <input checked="" type="checkbox"/>	C.E.P. <input checked="" type="checkbox"/>	PESO/1000
PERTENECE AL CONJ.(No. PARTE)			
SE USA EN (NOMBRE)			
No. PLANO CLIENTE / REFERENCIA DE VENTAS			

UNAM	
No. PARTE	
DESCRIPCION	
ENSAMBLE.	
CLIENTE	
NOMBRE DEL ARCHIVO	
0	

DEPARTAMENTO :
NOMBRE :

ESTA INFORMACION ES PROPIEDAD DE T.S.
 Y DEBE PROTEGERSE SU REPRODUCCION TOTAL
 O PARCIAL PARA OTROS FINES



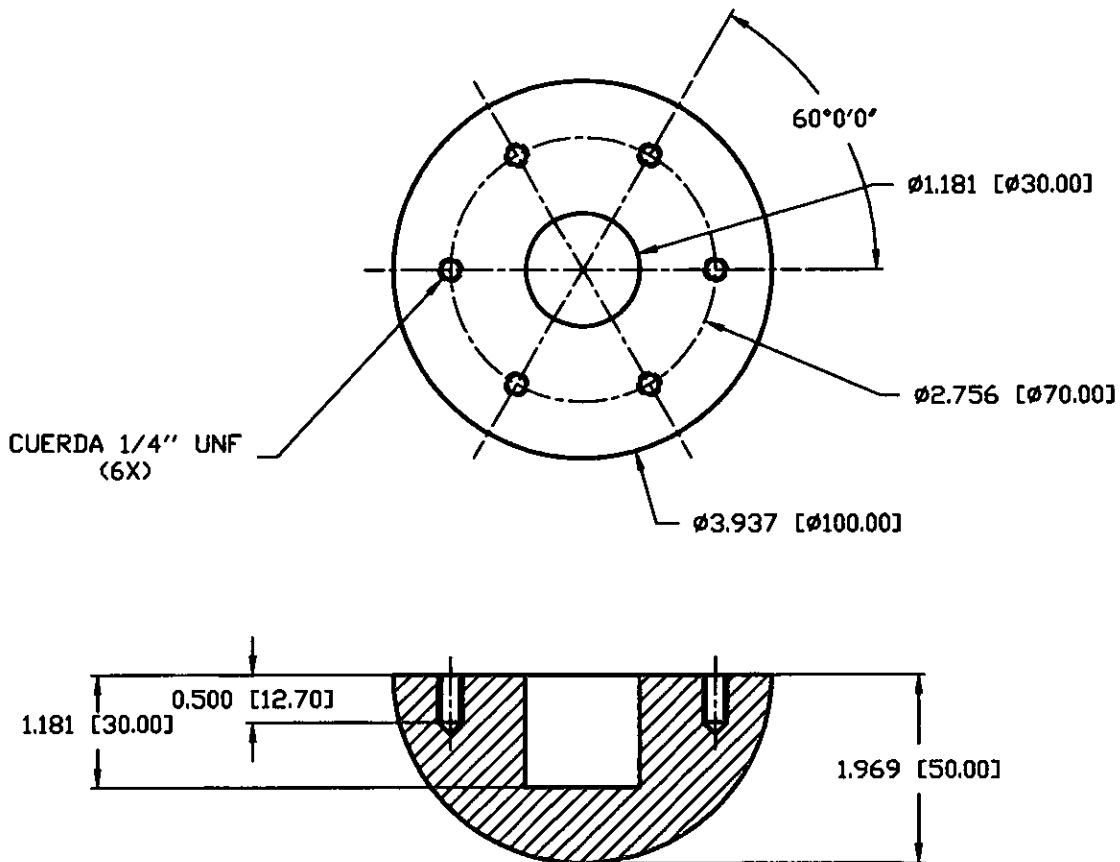
P. EUROPEA		P. AMERICANA	
TOLERANCIAS NO INDICADAS			
MILIMETROS		PULGADAS	
DE 0 A 6	±0.1	0.000 ± 0.005	
MÁS DE 6	±0.2	FRACC. ± 1/64	
ANG. ± 0' 30"			
ESCALA	COTAS EN		
FECHA	FIRMA		
DIBUJO	4-SEP-2000	J.A.J.D.	
REVISO			
APROBO			

MATERIAL			
TRATAMIENTO TERMICO			
SIN			
ACABADO			
SIN			
MAQ. <input checked="" type="checkbox"/>	DIM. CRITICA <input type="checkbox"/>	C.E.P. <input type="checkbox"/>	PESO/1000
PERTENECE AL CONJ.(No. PARTE)			
SE USA EN (NOMBRE)			
No. PLANO CLIENTE / REFERENCIA DE VENTAS			

UNAM	
No. PARTE	
DESCRIPCION	
ENSAMBLE.	
CLIENTE	
NOMBRE DEL ARCHIVO	
0	

NOMBRE :
 DEPARTAMENTO :

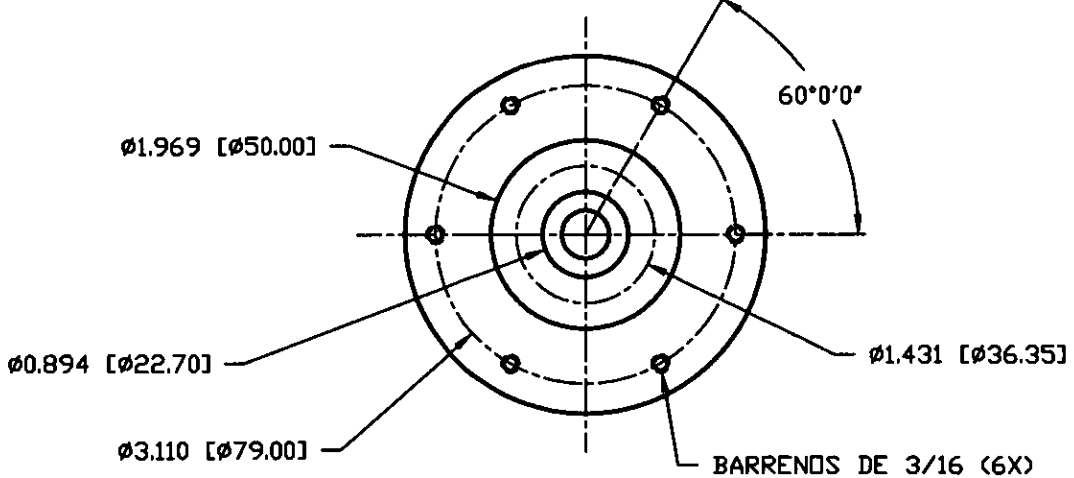
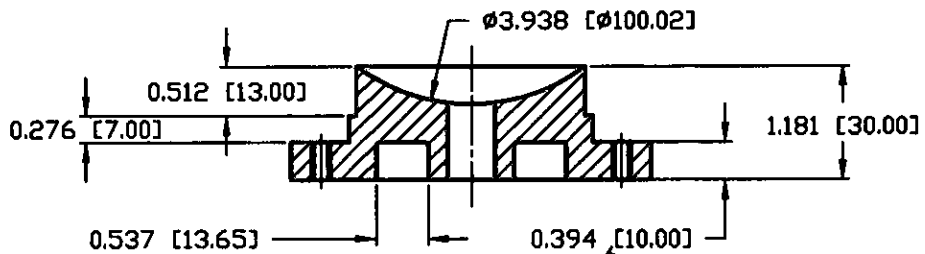
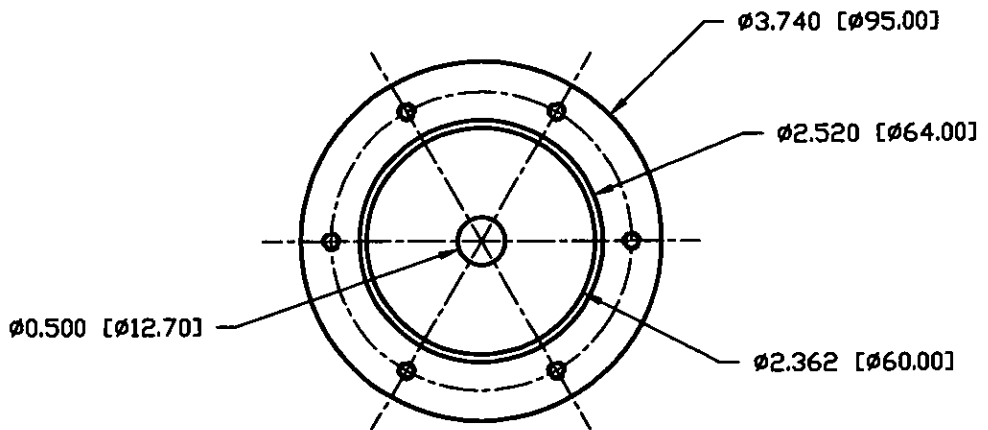
Y QUEDA PROHIBIDA SU REPRODUCCION TOTAL O PARCIAL PARA OTROS FINES



- NOTAS:
- 1.-LIBRE DE FILDS Y REBABA.
 - 2.-ACABADO GENERAL $\sqrt{\quad}$
 - 3.-PULIR LA ESFERA A ESPEJO.

 P. EUROPEA	 P. AMERICANA	MATERIAL BRONCE SAE 62 BARRA DE $\phi 4''$	
TOLERANCIAS NO INDICADAS MILIMETROS PULGADAS		TRATAMIENTO TERMICO SIN	
DE 0 A 6 ± 0.1	0.000 \pm 0.005 FRACC. \pm 1/64	ACABADO SIN	No. PARTE 1
MAS DE 6 ± 0.2		MAQ. <input checked="" type="checkbox"/> DIM. CRITICA <input type="checkbox"/> C.E.P. <input type="checkbox"/> PESO/1000	DESCRIPCION SEMI ESFERA.
ANG. \pm 0' 30"		PERTENECE AL CONJ.(No. PARTE)	CLIENTE
ESCALA 1:2 COTAS EN PULG(MM)	FECHA 4-SEP-2000 FIRMA J.A.J.D.	SE USA EN (NOMBRE)	NOMBRE DEL ARCHIVO
DEBILLO	REVISO	No. PLANO CLIENTE / REFERENCIA DE VENTAS	0
APROBO			

DEPARTAMENTO :



- NOTAS:
 1.-LIBRE DE FILDS Y REBABA.
 2.-ACABADO GENERAL $\sqrt{\quad}$
 3.-PULIR LA COPA A ESPEJO.

P. EUROPEA		P. AMERICANA	
TOLERANCIAS NO INDICADAS			
MILIMETROS		PULGADAS	
DE 0 A 6	±0.1	0.000 ± 0.005	
MÁS DE 6	±0.2	FRACC. ± 1/64	
ANG. ± 0' 30"			
ESCALA	1:2	COTAS EN PULG.(MM)	
FECHA	4-SEP-2000	FIRMA	
DIBUJO	J.A.J.D.		
REVISO			
APROBO			

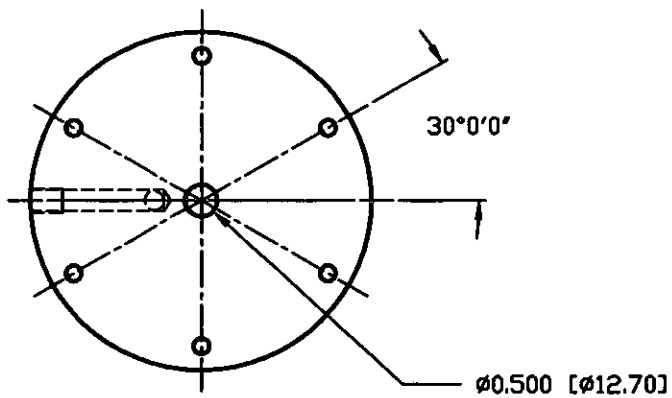
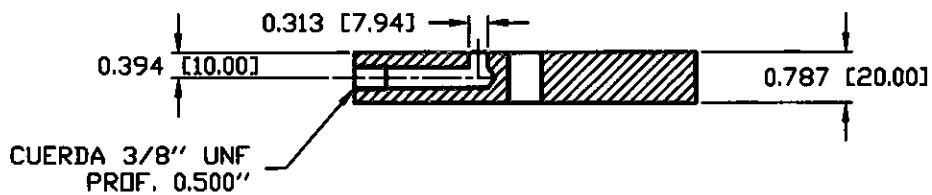
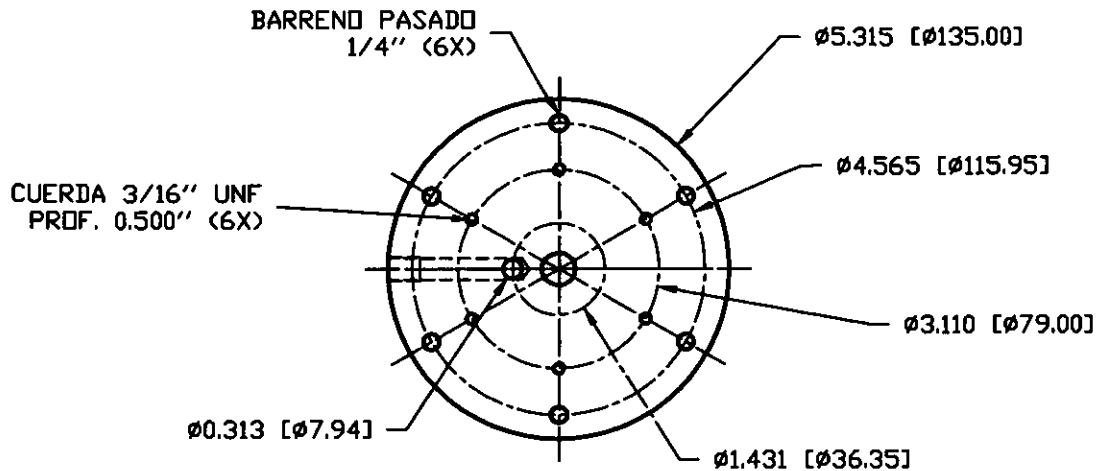
MATERIAL	BRONCE SAE 62 BARRA DE Ø4"		
TRATAMIENTO TERMICO	SIN		
ACABADO	SIN		
MAQ. <input checked="" type="checkbox"/>	DIM. CRITICA <input checked="" type="checkbox"/>	C.E.P. <input checked="" type="checkbox"/>	PESO/1000
PERTENECE AL CONJ.(No. PARTE)			
SE USA EN (NOMBRE)			
No. PLANO CLIENTE / REFERENCIA DE VENTAS			

UNAM	
No. PARTE	2
DESCRIPCION	COPA.
CLIENTE	
NOMBRE DEL ARCHIVO	
	0

CADA INFORMACION ES PROPIEDAD DE UNAM
 Y QUEDA PROHIBIDA SU REPRODUCCION TOTAL
 O PARCIAL PARA OTROS FINES

DEPARTAMENTO :
 NOMBRE :

Y QUEDA PROHIBIDA SU REPRODUCCION TOTAL O PARCIAL PARA OTROS FINES

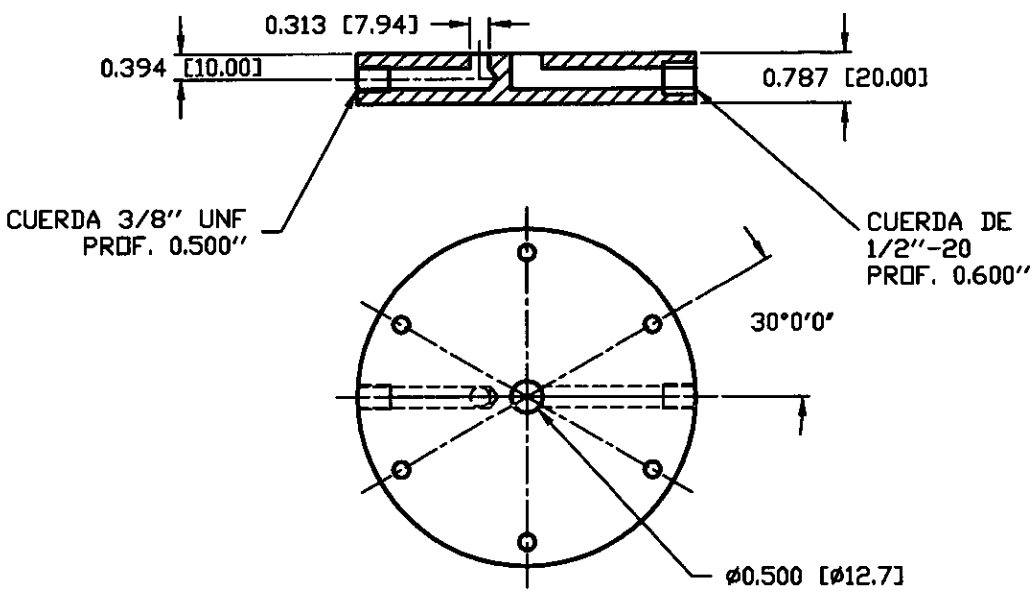
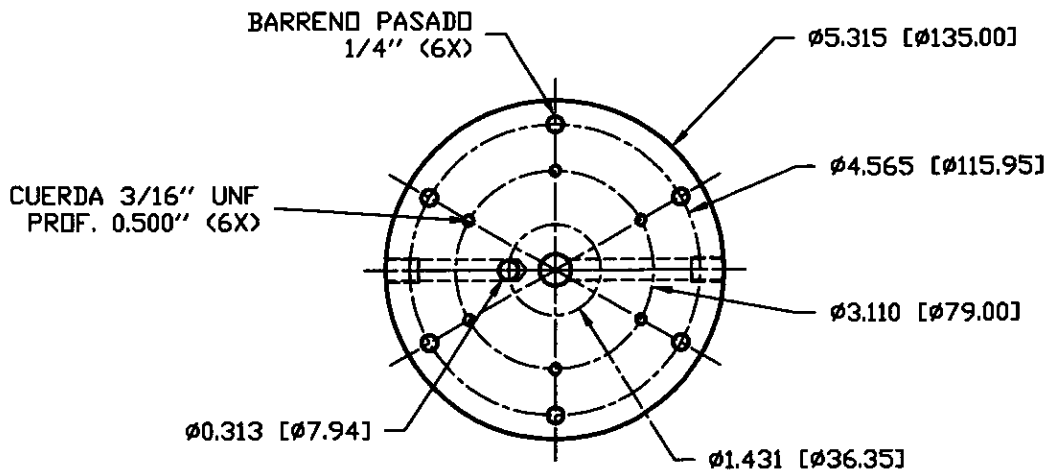


P. EUROPEA	P. AMERICANA
TOLERANCIAS NO INDICADAS	
MILIMETROS	PULGADAS
DE 0 A 6	±0.1
MÁS DE 6	±0.2
	0.000 ± 0.005
	FRACC. ± 1/64
ANG. ± 0' 30"	
ESCALA	1:3
COTAS EN PULG.(MM)	
FECHA	FIRMA
DIBUJO	16-MAR-2000
	J.A.J.D.
REVISO	
APROBO	

MATERIAL	ALUMINIO			
TRATAMIENTO TERMICO	SIN			
ACABADO	SIN			
MAQ.	DIM. CRITICA	C.E.P.	PESO/1000	
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
PERTENECE AL CONJ.(No. PARTE)				
SE USA EN (NOMBRE)				
No. PLANO CLIENTE / REFERENCIA DE VENTAS				

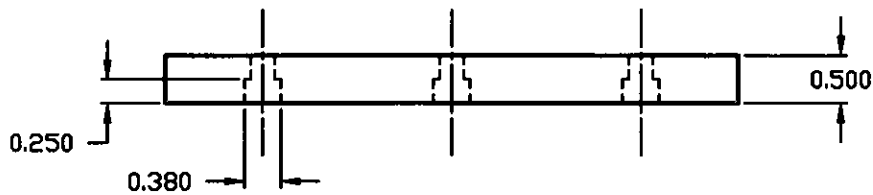
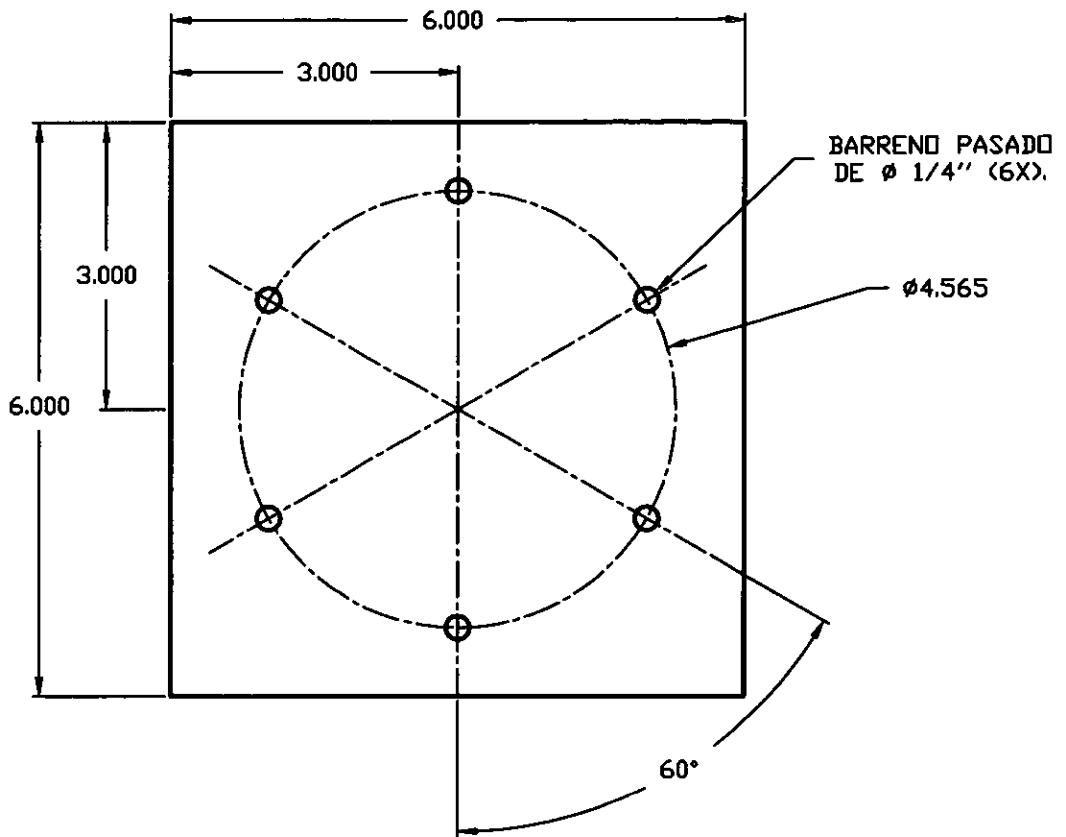
UNAM	
No. PARTE	1
DESCRIPCION	BASE PARA BALERO DE AIRE.
CLIENTE	
NOMBRE DEL ARCHIVO	

ESTA INFORMACION ES PROPIEDAD DE F.I.
 Y QUEDA PROHIBIDA SU REPRODUCCION TOTAL
 O PARCIAL PARA OTROS FINES



		MATERIAL ALUMINIO			
TOLERANCIAS NO INDICADAS MILIMETROS PULGADAS		TRATAMIENTO TERMICO SIN			
DE 0 A 6	±0.1	0.000 ± 0.005	FRACC. ± 1/64	ACABADO SIN	
MAS DE 6	±0.2				
ANG. ± 0° 30'		MAQ. <input checked="" type="checkbox"/>	DIM. CRITICA <input checked="" type="checkbox"/>	C.E.P. <input checked="" type="checkbox"/>	PESO/1000
ESCALA 1:3 COTAS EN PULG.(MM)		PERTENECE AL CONJ.(No. PARTE)			No. PARTE 2
DIBUÑO	16-MAR-2000	FIRMA	BASE PARA BALERO DE AIRE.		
REVISO		J.A.J.D.	CLIENTE		
SE USA EN (NOMBRE)		NOMBRE DEL ARCHIVO			
No. PLANO CLIENTE / REFERENCIA DE VENTAS		_____			
APROBO			_____		

Y QUEDA PROHIBIDA SU REPRODUCCION TOTAL O PARCIAL PARA OTROS FINES



NOTAS:
 1.-HACER SEIS CAJAS DE 0.250"*
 0.380" A LOS BARRENDS.
 2.-ELIMINAR FILDS Y REBABA.

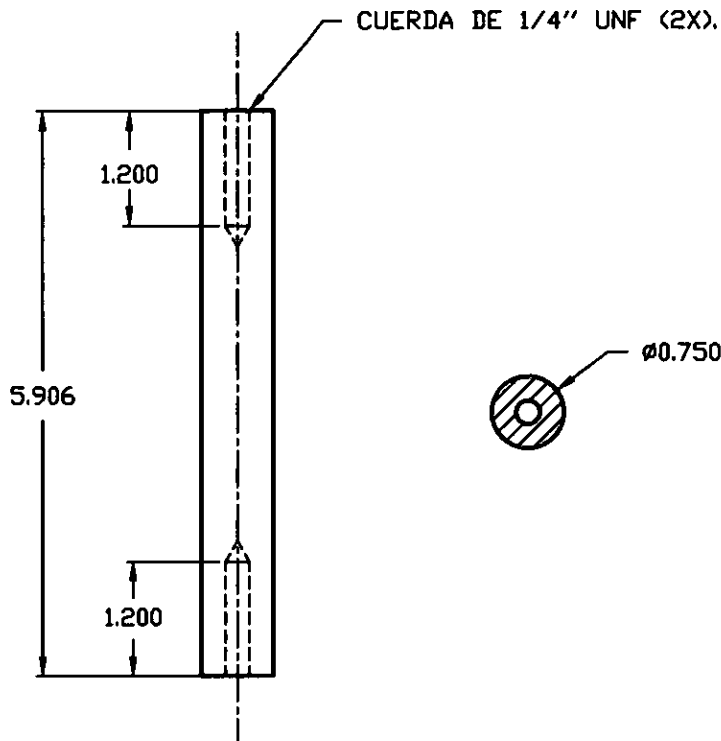
P. EUROPEA	P. AMERICANA
TOLERANCIAS NO INDICADAS	
MILIMETROS	PULGADAS
DE 0 A 5	±0.1
MAS DE 5	±0.2
	0.000 ± 0.005
	FRACC. ± 1/64
ANG. ± 0' 30"	
ESCALA	1:2
COTAS EN PULG.	
FECHA	FIRMA
DIBUJO	15-FEB-01
REVISO	J.A.J.D.
APROBO	

MATERIAL PLACA DE ALUMINIO DE 1/2".			
TRATAMIENTO TERMICO SIN			
ACABADO SIN			
MAQ. <input checked="" type="checkbox"/>	DIM. CRITICA <input checked="" type="checkbox"/>	C.E.P. <input checked="" type="checkbox"/>	PESO/1000
PERTENECE AL CONJ.(No. PARTE)			
SE USA EN (NOMBRE) SOPORTE DE LA PLATAFORMA.			
No. PLANO CLIENTE / REFERENCIA DE VENTAS			

UNAM	
No. PARTE	_____
DESCRIPCION	BASE DEL SOPORTE.
CLIENTE	_____
NOMBRE DEL ARCHIVO	_____
	0

NOMBRE :
DEPARTAMENTO :

Y QUEDA PROHIBIDA SU REPRODUCCION TOTAL O PARCIAL, PARA OTROS FINES



NOTAS:
 1.-FABRICAR SEIS BARRAS IDENTICAS.
 2.-ELIMINAR FILDS Y REBABA.

P. EUROPEA	P. AMERICANA
TOLERANCIAS NO INDICADAS	
MILIMETROS	PULGADAS
DE 0 A 8 ±0.1	0.000 ± 0.005
MAS DE 8 ±0.2	FRACC. ± 1/64
ANG. ± 0' 30"	
ESCALA 1:2	COTAS EN PULG.
FECHA	FIRMA
DIBUJO 15-FEB-01	J.A.J.D.
REVISO	
APROBO	

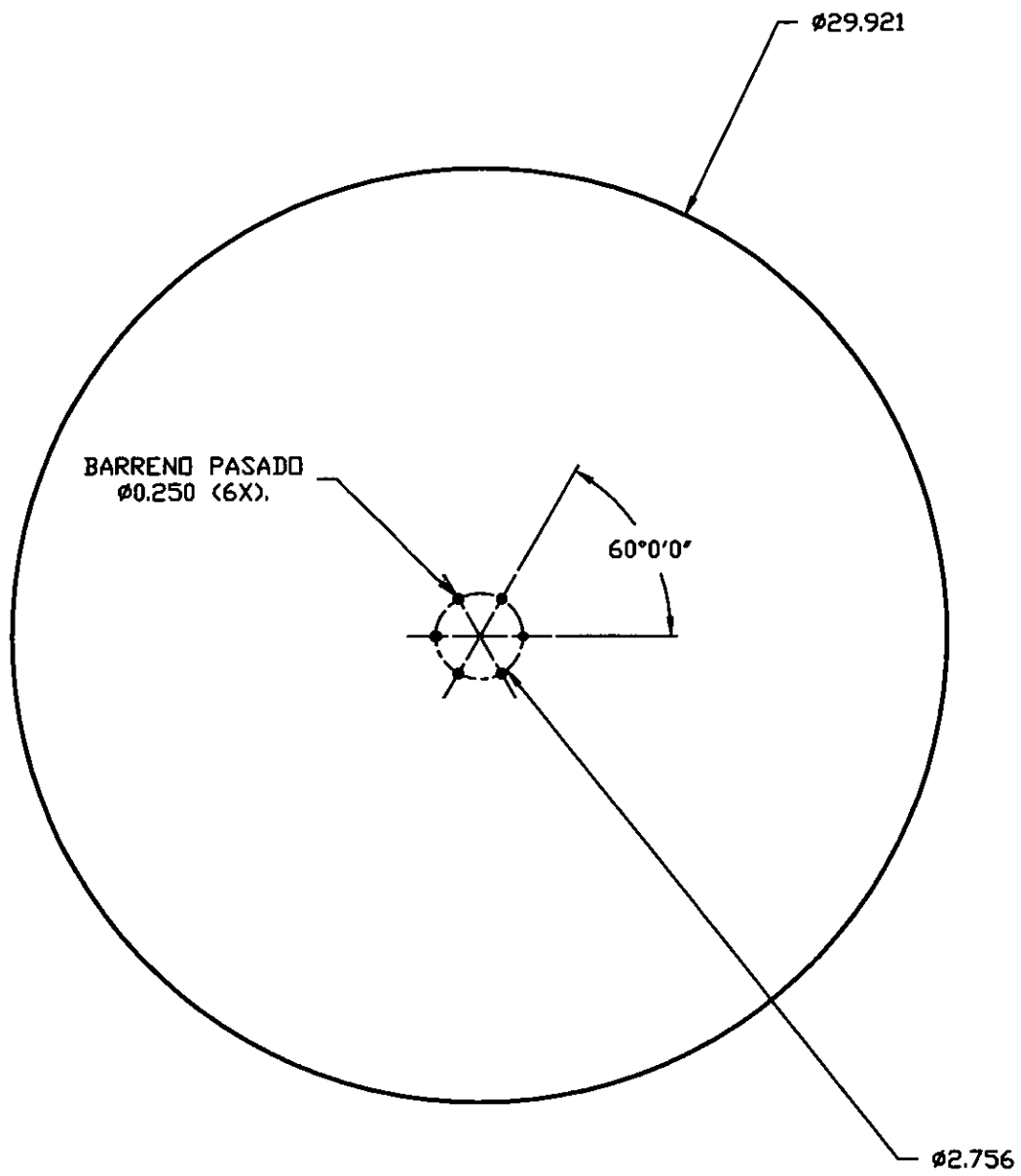
MATERIAL BARRA DE ALUMINIO DE SECCION CIRCULAR DE 3/4".			
TRATAMIENTO TERMICO SIN			
ACABADO SIN			
MAQ. <input checked="" type="checkbox"/>	DIM. CRITICA <input checked="" type="checkbox"/>	C.E.P. <input checked="" type="checkbox"/>	PESO/1000
PERTENECE AL CONJ.(No. PARTE)			
SE USA EN (NOMBRE) SOPORTE DE LA PLATAFORMA.			
No. PLANO CLIENTE / REFERENCIA DE VENTAS			



No. PARTE	
DESCRIPCION	BARRAS DEL SOPORTE.
CLIENTE	
NOMBRE DEL ARCHIVO	0

NOMBRE :
DEPARTAMENTO :

Y QUEDA PROHIBIDA SU REPRODUCCION TOTAL O PARCIAL PARA OTROS FINES



P. EUROPEA	P. AMERICANA
TOLERANCIAS NO INDICADAS	
MILIMETROS	FULGADAS
DE 0 A 6	± 0.1
MAS DE 6	± 0.2
	0.000 \pm 0.005
	FRACC. \pm 1/64
ANG. \pm 0' 30"	
ESCALA 1:6	COTAS EN PULG.
FECHA	FIRMA
DIBUJO 17-MAR-2001	J.A.J.D.
REVISO	
APROBO	

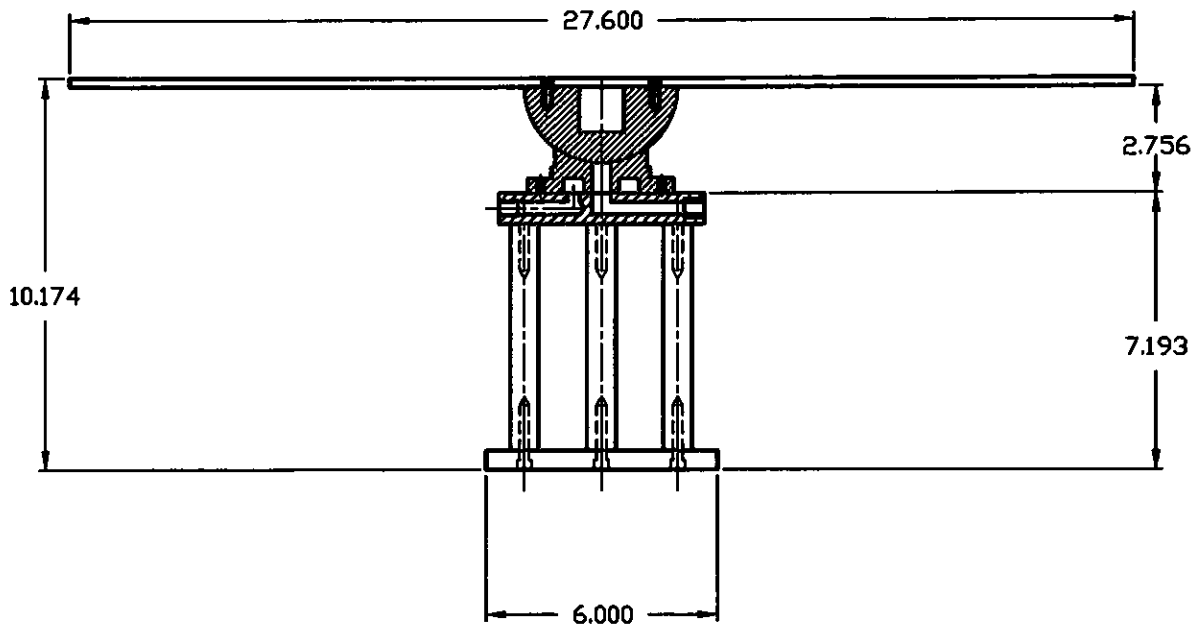
MATERIAL PLACA DE ALUMINIO DE 1/4".			
TRATAMIENTO TERMICO SIN			
ACABADO SIN			
MAQ. <input checked="" type="checkbox"/>	DIM. CRITICA <input checked="" type="checkbox"/>	C.E.P. <input checked="" type="checkbox"/>	PESO/1000
PERTENECE AL CONJ.(No. PARTE)			
SE USA EN (NOMBRE)			
No. PLANO CLIENTE / REFERENCIA DE VENTAS			

No. PARTE	_____
DESCRIPCION	PLATAFORMA DE SIMULACION.
CLIENTE	_____
NOMBRE DEL ARCHIVO	_____
	0

DEPARTAMENTO :

NOMBRE :

Y QUEDA PROHIBIDA SU REPRODUCCION TOTAL O PARCIAL PARA OTROS FINES



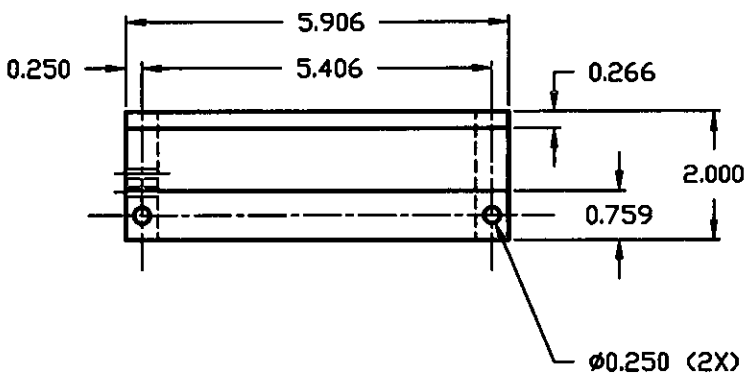
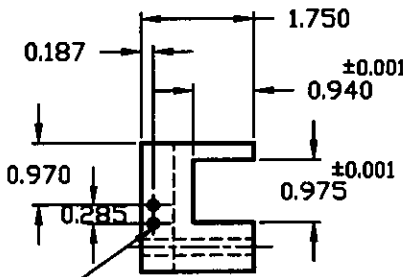
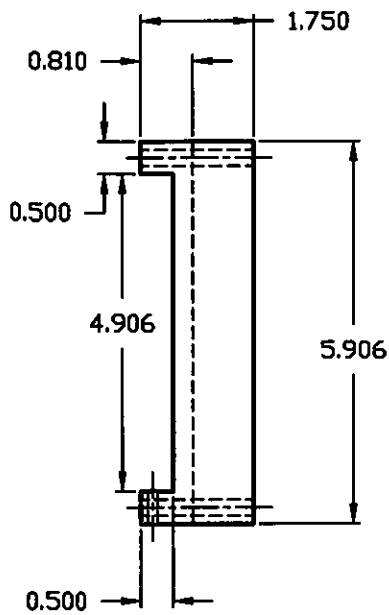
P. EUROPEA	P. AMERICANA
TOLERANCIAS NO INDICADAS	
MILIMETROS	PULGADAS
DE 0 A 6	±0.1
MÁS DE 6	±0.2
	0.000 ± 0.005
	FRACC. ± 1/64
ANG. ± 0° 30'	
ESCALA	1:5
COTAS EN PULG.	
FECHA	FIRMA
DIBUJO	20-MAR-01
REVISO	J.A.J.D.
APROBO	

MATERIAL			
TRATAMIENTO TERMICO			
SIN			
ACABADO			
SIN			
MAQ. <input checked="" type="checkbox"/>	DIM. CRITICA <input type="checkbox"/>	C.E.P. <input type="checkbox"/>	PESO/1000
PERTENECE AL CONJ.(No. PARTE)			
SE USA EN (NOMBRE)			
No. PLANO CLIENTE / REFERENCIA DE VENTAS			

UNAM	
No. PARTE	
DESCRIPCION	
ENSAMBLE DE LA PLATAFORMA.	
CLIENTE	
NOMBRE DEL ARCHIVO	
0	

DEPARTAMENTO :

NOMBRE :



CUERDA (2X)
5/32-32NS
PROF. PASADO.

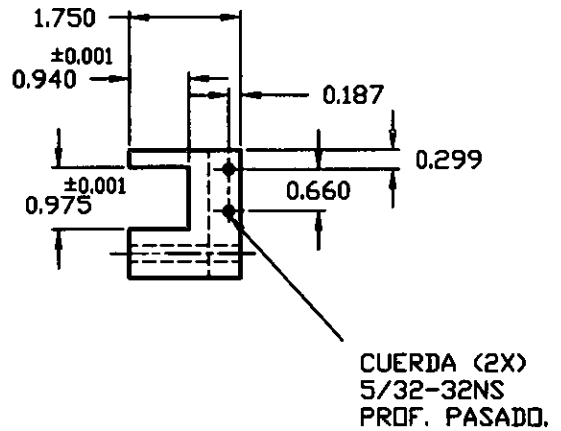
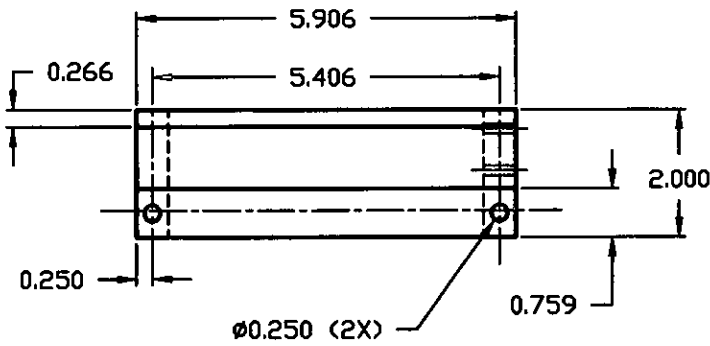
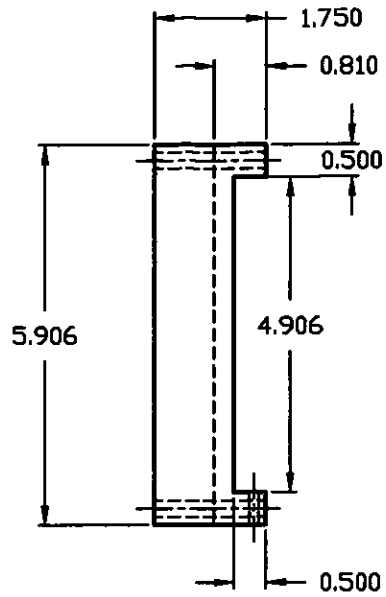
- NOTAS:
1.-ELIMINAR REBABA.
2.-ACABADO GENERAL $\sqrt{125}$

P. EUROPEA		P. AMERICANA	
TOLERANCIAS NO INDICADAS			
MILIMETROS		PULGADAS	
DE 0 A 6	±0.1	0.000 ± 0.005	
MÁS DE 6	±0.2	FRACC. ± 1/64	
ANG. ± 0' 30"			
ESCALA	1 : 3	COTAS EN PULG.	
DEBIDO	FECHA	FIRMA	
REVISO	18-AGO-2000	J.A.J.D.	
APROBO			

MATERIAL BARRA CUADRADA DE 2"			
ALUMINIO 6061			
TRATAMIENTO TERMICO SIN			
ACABADO SIN			
MAQ. <input checked="" type="checkbox"/>	DIM. CRITICA <input checked="" type="checkbox"/>	C.E.P. <input checked="" type="checkbox"/>	PESO/1000
PERTENECE AL CONJ.(No. PARTE)			
SE USA EN (NOMBRE)			
No. PLANO CLIENTE / REFERENCIA DE VENTAS			

UNAM	
No. PARTE	1
DESCRIPCION	RIEL DE MESA DE PRECISION IZQ.
CLIENTE	
NOMBRE DEL ARCHIVO	

Y QUEDA PROHIBIDA SU REPRODUCCION TOTAL O PARCIAL PARA OTROS FINES



NOTAS:

1.-ELIMINAR REBABA.

2.-ACABADO GENERAL $\sqrt{125}$

P. EUROPEA	P. AMERICANA
TOLERANCIAS NO INDICADAS	
MILIMETROS	PULGADAS
DE 0 A 6	± 0.1
MÁS DE 6	± 0.2
	0.000 ± 0.005
	FRACC. $\pm 1/64$
ANG. $\pm 0' 30''$	
ESCALA	1 : 3
COTAS EN PULG.	
FECHA	FIRMA
DEBUNO	18-AGD-2000
REVS0	J.A.J.D.
APROBO	

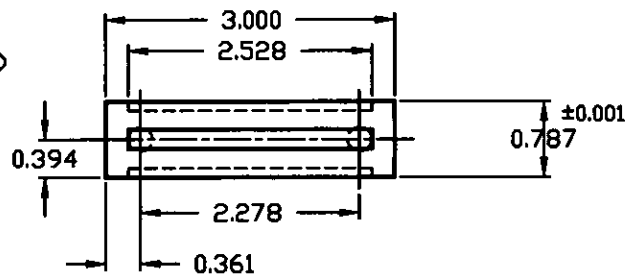
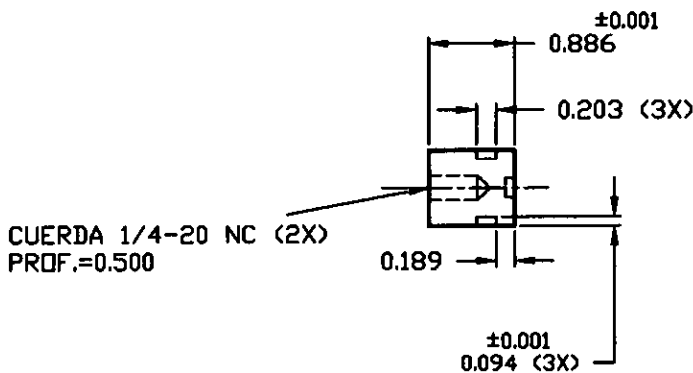
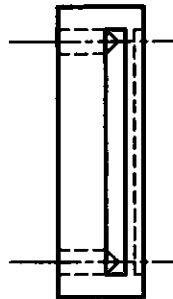
MATERIAL BARRA CUADRADA DE 2" ALUMINIO 6061			
TRATAMIENTO TERMICO SIN			
ACABADO SIN			
MAQ. <input checked="" type="checkbox"/>	DIM. CRITICA <input checked="" type="checkbox"/>	C.E.P. <input checked="" type="checkbox"/>	PESO/1000
PERTENECE AL CONJ.(No. PARTE)			
SE USA EN (NOMBRE)			
No. PLANO CLIENTE / REFERENCIA DE VENTAS			

UNAM	
No. PARTE	1.A
DESCRIPCION	RIEL DE MESA DE PRECISION DERECHO.
CLIENTE	
NOMBRE DEL ARCHIVO	0

DEPARTAMENTO :

NOMBRE :

Y QUEDA PROHIBIDA SU REPRODUCCION TOTAL O PARCIAL PARA OTROS FINES



CUERDA 1/4-20 NC (2X)
 PROF.=0.500

- NOTAS:
 1.-FABRICAR DOS PIEZAS IDENTICAS.
 2.-ELIMINAR REBABA PRINCIPALMENTE EN LAS RANURAS.
 3.-ACABADO GENERAL $\sqrt{125}$

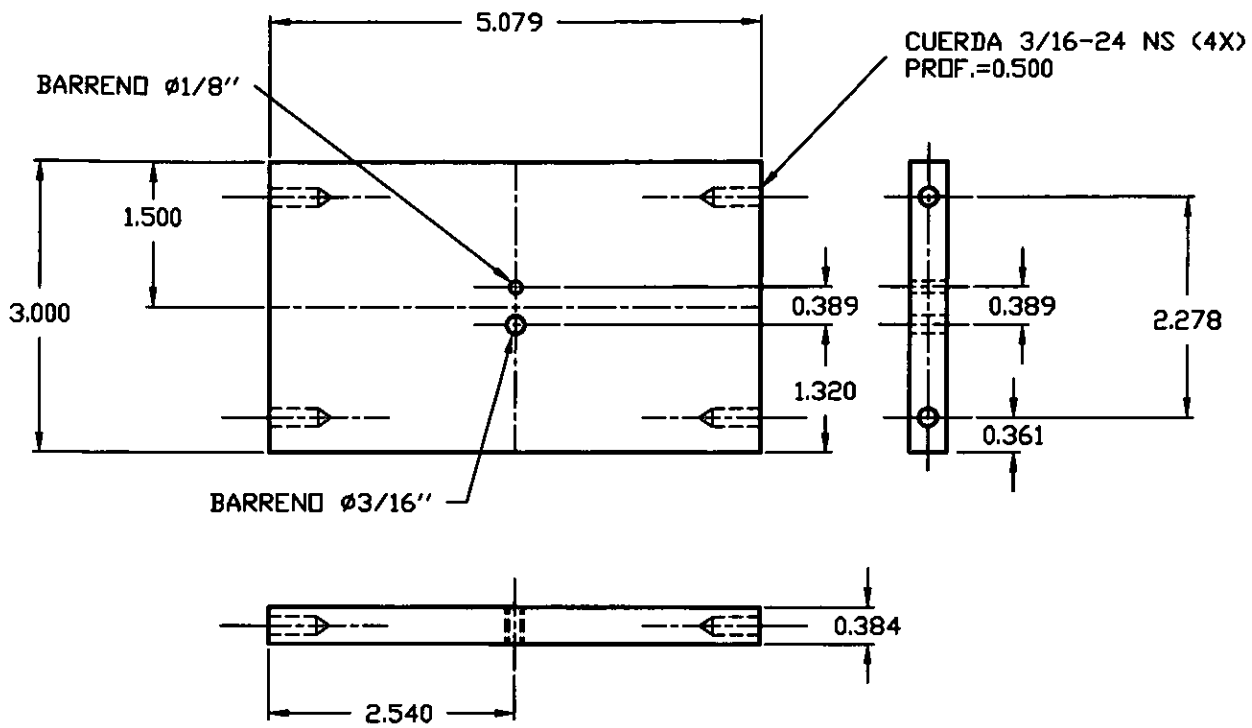
P. EUROPEA	P. AMERICANA
TOLERANCIAS NO INDICADAS	
MILIMETROS	PULGADAS
DE 0 A 6 ±0.1	0.000 ± 0.005
MAS DE 6 ±0.2	FRACC. ± 1/64
ANG. ± 0' 30"	
ESCALA 1:2	COTAS EN PULG.
FECHA	FIRMA
18-AGO-2000	J.A.J.D.
REVISO	
APROBO	

MATERIAL BARRA CUADRADA DE 1" ALUMINIO 6061			
TRATAMIENTO TERMICO SIN			
ACABADO SIN			
MAQ. <input checked="" type="checkbox"/>	DIM. CRITICA <input checked="" type="checkbox"/>	G.E.P. <input checked="" type="checkbox"/>	PESO/1000
PERTENECE AL CONJ.(No. PARTE)			
SE USA EN (NOMBRE)			
No. PLANO CLIENTE / REFERENCIA DE VENTAS			

UNAM	
No. PARTE	2
DESCRIPCION	CARRO MOVIL.
CLIENTE	
NOMBRE DEL ARCHIVO	0

DEPARTAMENTO :

Y QUEDA PROMERIDA, SI REPRODUCCION TOTAL O PARCIAL PARA OTROS FINES

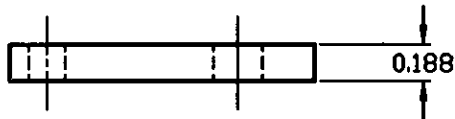
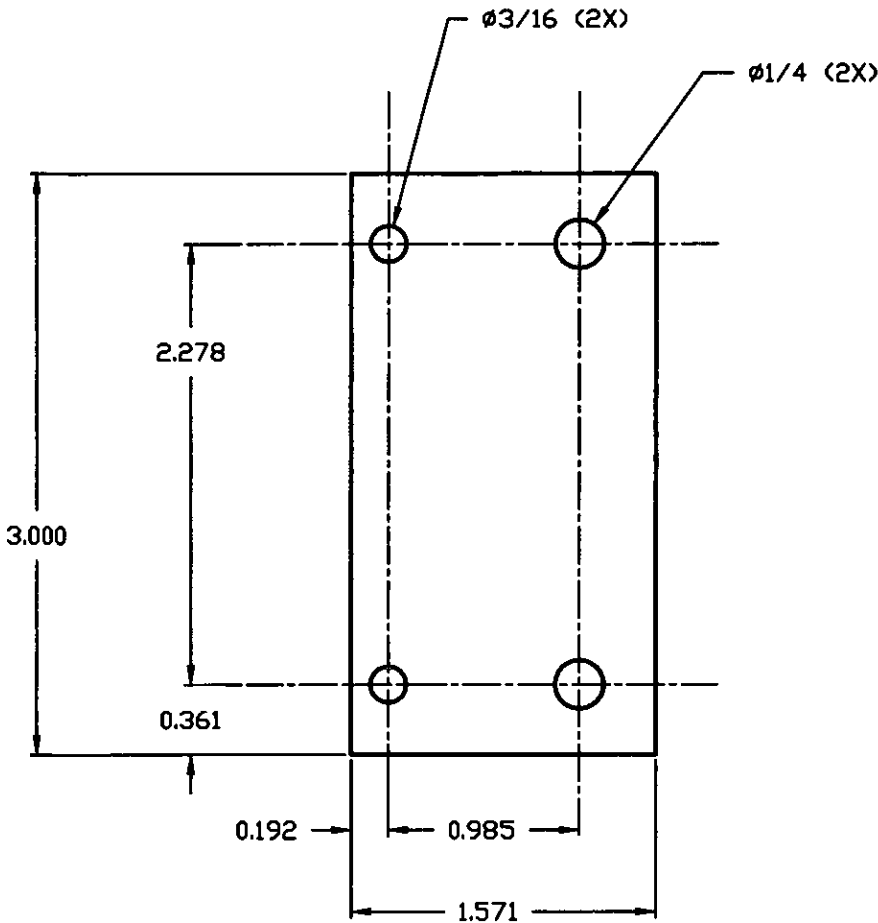


- NOTAS:
 1.-ELIMINAR REBABA.
 2.-ACABADO GENERAL $\sqrt{125}$

P. EUROPEA	P. AMERICANA
TOLERANCIAS NO INDECADAS	
MILIMETROS	PULGADAS
DE 0 A 6	± 0.1
MAS DE 6	± 0.2
ANG. $\pm 0' 30''$	
ESCALA	COTAS EN PULG.
1:2	
FECHA	FIRMA
18-AGO-2000	J.A.J.D.
REVISO	
APROBO	

MATERIAL	PLACA DE 1/2". ALUMINIO 6061		
TRATAMIENTO TERMICO	SIN		
ACABADO	SIN		
MAQ.	DIM. CRITICA	C.E.P.	PESO/1000
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
PERTENECE AL CONJ.(No. PARTE)			
SE USA EN (NOMBRE)			
No. PLANO CLIENTE / REFERENCIA DE VENTAS			

UNAM	
No. PARTE	3
DESCRIPCION	MESA MOVIL.
CLIENTE	
NOMBRE DEL ARCHIVO	



- NOTAS:
 1.-FABRICAR DOS PIEZAS IDENTICAS.
 2.-ELIMINAR REBABA.
 3.-ACABADO GENERAL $\sqrt{125}$

P. EUROPEA P. AMERICANA	
TOLERANCIAS NO INDICADAS	
MILIMETROS	PULGADAS
DE 0 A 6	± 0.1
MAS DE 6	± 0.2
ANG. $\pm 0' 30''$	
ESCALA 1:1	NOTAS EN PULG.
FECHA	FIRMA
18-AGO-2000	J.A.J.D.
REVISO	
APROBO	

MATERIAL SOLERA DE 2"x 3/16" ALUMINIO 6061			
TRATAMIENTO TERMICO SIN			
ACABADO SIN			
MAQ. <input checked="" type="checkbox"/>	DIM. CRITICA <input checked="" type="checkbox"/>	C.E.P. <input checked="" type="checkbox"/>	PESO/1000
PERTENECE AL CONJ.(No. PARTE)			
SE USA EN (NOMBRE)			
No. PLANO CLIENTE / REFERENCIA DE VENTAS			



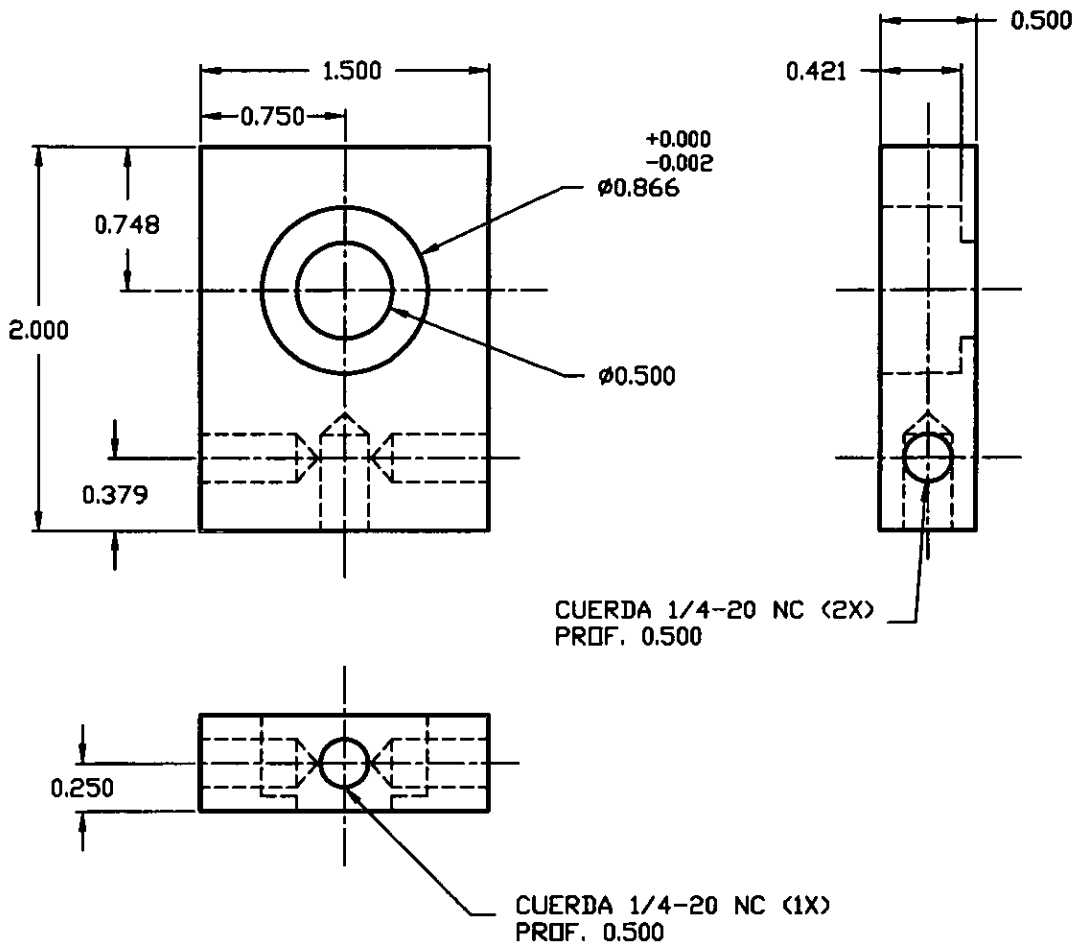
No. PARTE	4
DESCRIPCION	BRAZO DE UNION DE CARRO Y MESA MOVIL.
CLIENTE	
NOMBRE DEL ARCHIVO	

Y QUEDA PROHIBIDA SU REPRODUCCION TOTAL O PARCIAL PARA OTROS FINES

DEPARTAMENTO :

NOMBRE :

Y QUEDA PROHIBIDA SU REPRODUCCION TOTAL O PARCIAL PARA OTROS FINES



NOTAS:

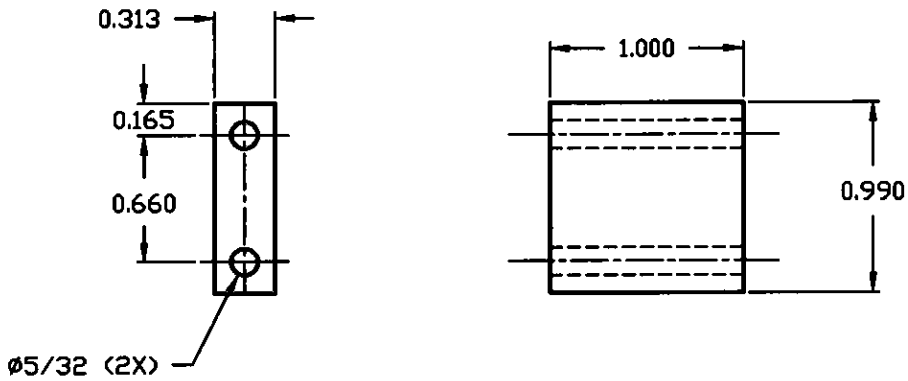
- 1.-ELIMINAR REBABA.
- 2.-ACABADO GENERAL $\sqrt{125}$
- 3.-UTILIZAR BALERO SKF-627.

P. EUROPEA	P. AMERICANA
TOLERANCIAS NO INDICADAS	
MILIMETROS	PULGADAS
DE 0 A 6	± 0.1
MAS DE 6	± 0.008
	FRACC. $\pm 1/64$
ANG. $\pm 0' 30''$	
ESCALA 1:1	COTAS EN PULG.
FECHA	FIRMA
DIBUJO 18-AGO-2000	J.A.J.D.
REVISO	
APROBO	

MATERIAL	PLACA DE 1/2" ALUMINIO 6061		
TRATAMIENTO TERMICO	SIN		
ACABADO	SIN		
MAQ. <input checked="" type="checkbox"/>	DIM. CRITICA <input type="checkbox"/>	C.E.P. <input type="checkbox"/>	PESO/1000
PERTENECE AL CONJ.(No. PARTE)			
SE USA EN (NOMBRE)			
No. PLANO CLIENTE / REFERENCIA DE VENTAS			

UNAM	
No. PARTE	5
DESCRIPCION	PLACA DE UNION DE MESA FIJA.
CLIENTE	
NOMBRE DEL ARCHIVO	

Y QUEDA PROHIBIDA SU REPRODUCCION TOTAL O PARCIAL PARA OTROS FINES



- NOTAS:
 1.-ELIMINAR REBABA.
 2.-ACABADO GENERAL $\sqrt{125}$

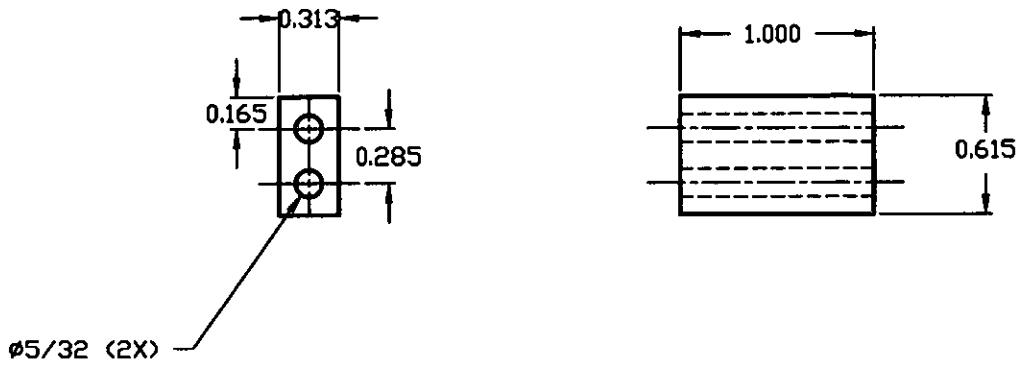
P. EUROPEA	P. AMERICANA
TOLERANCIAS NO INDICADAS	
MILIMETROS	PULGADAS
DE 0 A 6 ±0.1	0.000 ± 0.005
MAS DE 6 ±0.2	FRACC. ± 1/64
ANG. ± 0° 30'	
ESCALA 1:1	COTAS EN PULG.
FECHA	FIRMA
31-AGO-2000	J.A.J.D.
DIBUJO	
REVISO	
APROBO	

MATERIAL SOLERA DE 1" x 5/16"			
ALUMINIO 6061-T6			
TRATAMIENTO TERMICO SIN			
ACABADO SIN			
MAQ. <input checked="" type="checkbox"/>	DIM. CRITICA <input checked="" type="checkbox"/>	C.E.P. <input checked="" type="checkbox"/>	PESO/1000
PERTENECE AL CONJ.(No. PARTE)			
SE USA EN (NOMBRE)			
No. PLANO CLIENTE / REFERENCIA DE VENTAS			

UNAM	
No. PARTE	6
DESCRIPCION	PLACA PARA FIJAR MOTOR.
CLIENTE	_____
NOMBRE DEL ARCHIVO	_____
	0

NOMBRE :
DEPARTAMENTO :

Y QUEDA PROHIBIDA SU REPRODUCCION TOTAL O PARCIAL PARA OTROS FINES



NOTAS:

1.-ELIMINAR REBABA.

2.-ACABADO GENERAL $\sqrt{125}$

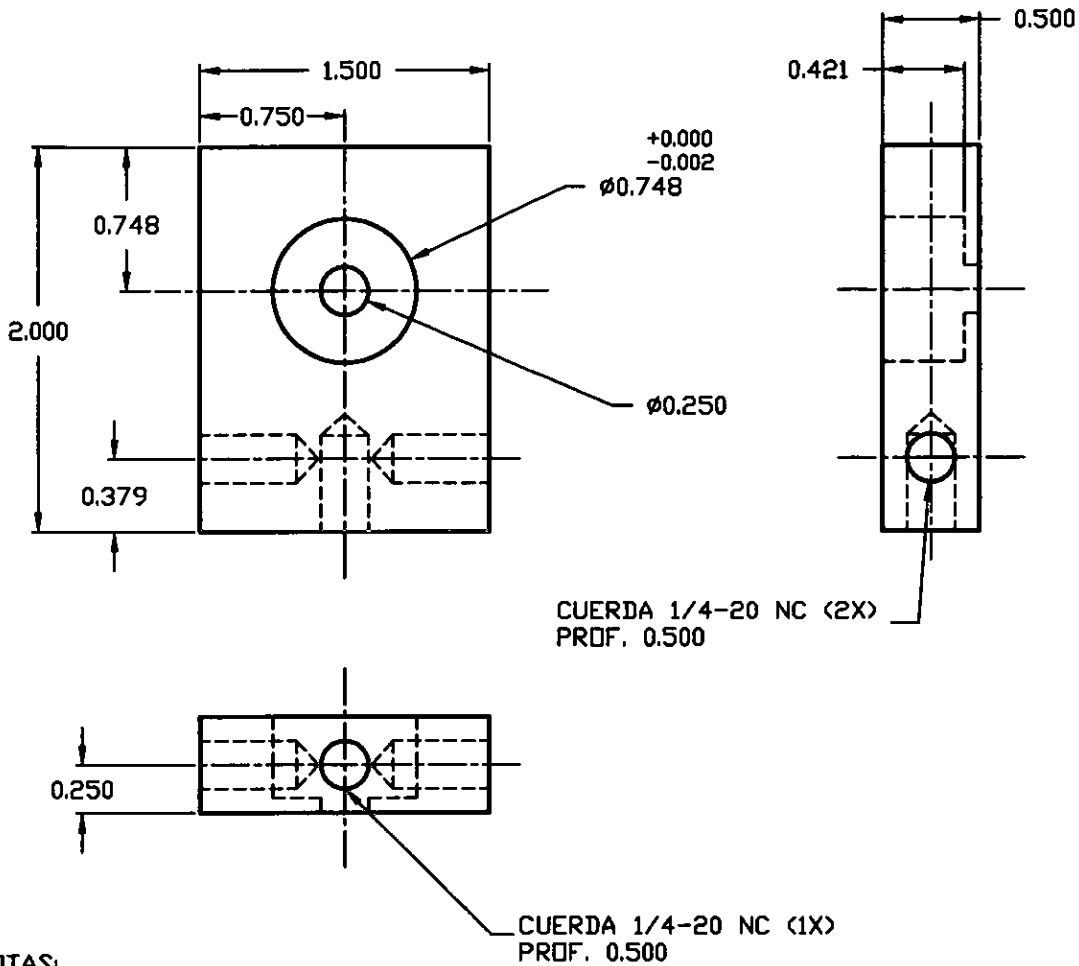
P. EUROPEA	P. AMERICANA
TOLERANCIAS NO INDICADAS	
MILIMETROS	PULGADAS
DE 0 A 8	± 0.1
MAS DE 8	± 0.2
	0.000 \pm 0.005 FRACC. \pm 1/64
ANG. \pm 0' 30"	
ESCALA	1:1 COTAS EN PULG.
FECHA	FIRMA
DIBUJO	31-AGO-2000 J.A.J.D.
REVISO	
APROBO	

MATERIAL SOLERA DE 1" x 5/16"			
ALUMINIO 6061-T6			
TRATAMIENTO TERMICO			
SIN			
ACABADO			
SIN			
MAQ. <input checked="" type="checkbox"/>	DIM. CRITICA <input type="checkbox"/>	C.E.P. <input type="checkbox"/>	PESO/1000
PERTENECE AL CONJ.(No. PARTE)			
SE USA EN (NOMBRE)			
No. PLANO CLIENTE / REFERENCIA DE VENTAS			

UNAM	
No. PARTE	7
DESCRIPCION	PLACA PARA FIJAR MOTOR.
CLIENTE	_____
NOMBRE DEL ARCHIVO	_____
	0

DEPARTAMENTO : _____

ESTE INFORMACION ES PROPIEDAD DE UNAM
 Y QUEDA PROHIBIDA SU REPRODUCCION TOTAL
 O PARCIAL PARA OTROS FINES



- NOTAS:
- 1.-ELIMINAR REBABA.
 - 2.-ACABADO GENERAL $\sqrt{125}$
 - 3.-UTILIZAR BALERO SKF-635.

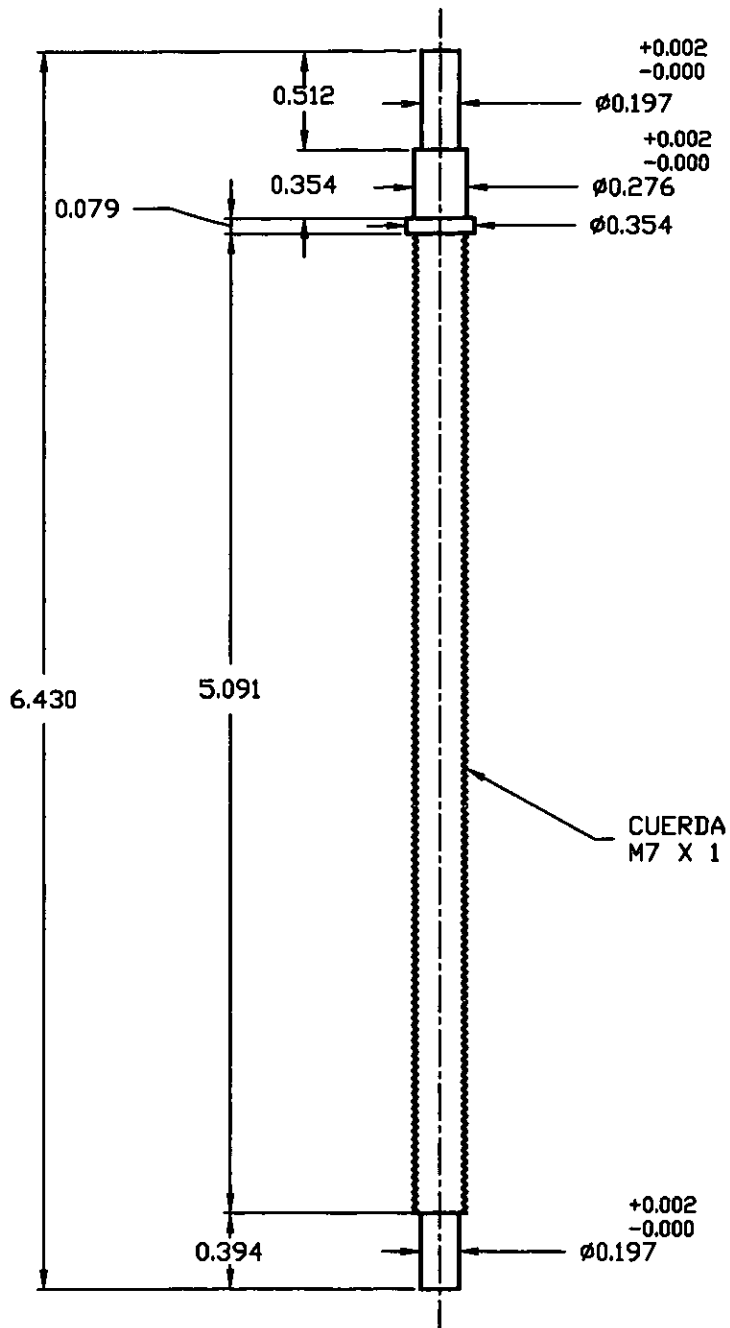
P. EUROPEA	P. AMERICANA
TOLERANCIAS NO INDICADAS	
MILIMETROS	PULGADAS
DE 0 A 6	± 0.1
MÁS DE 6	0.000 ± 0.005 FRACC. $\pm 1/64$
ANG. $\pm 0' 30''$	
ESCALA 1:1	COTAS EN PULG.
FECHA	FIRMA
18-AGO-2000	J.A.J.D.
REVISO	
APROBO	

MATERIAL	PLACA DE 1/2" ALUMINIO 6061
TRATAMIENTO TERMICO	SIN
ACABADO	SIN
MAQ. <input checked="" type="checkbox"/>	DIM. CRITICA <input checked="" type="checkbox"/>
C.E.P. <input checked="" type="checkbox"/>	PESO/1000
PERTENECE AL CONJ.(No. PARTE)	
SE USA EN (NOMBRE)	
No. PLANO CLIENTE / REFERENCIA DE VENTAS	

UNAM	
No. PARTE	8
DESCRIPCION	PLACA DE UNION DE MESA FIJA.
CLIENTE	
NOMBRE DEL ARCHIVO	
	0

DEPARTAMENTO :
 NOMBRE :

Y QUEDA PROHIBIDA SU REPRODUCCION TOTAL O PARCIAL PARA OTROS FINES



NOTAS:
1.-ELIMINAR REBABA.

2.-ACABADO GENERAL $\sqrt{125}$

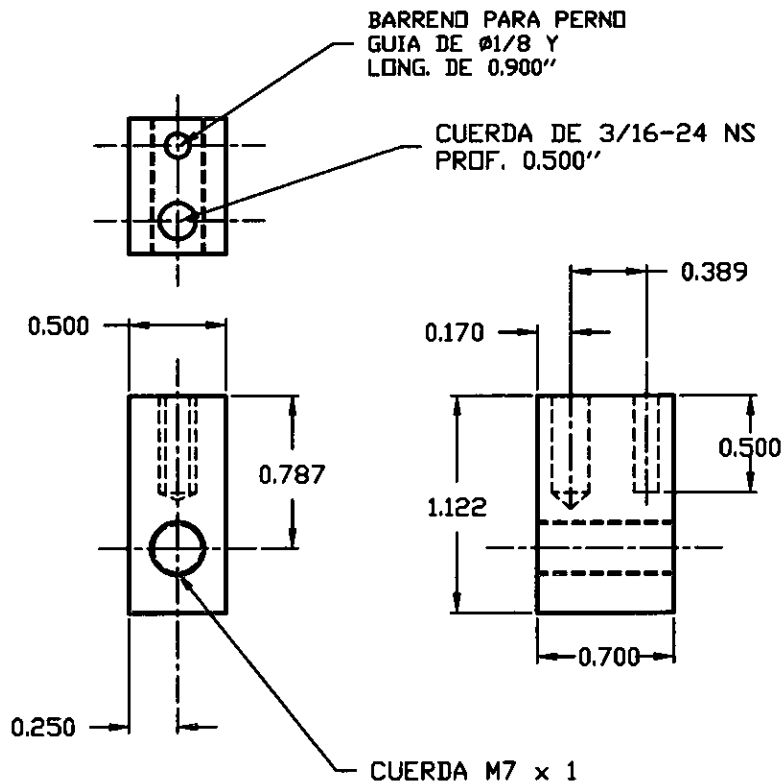
P. EUROPEA		P. AMERICANA	
TOLERANCIAS NO INDICADAS			
MILIMETROS		PULGADAS	
DE 0 A 6	± 0.1	0.000 \pm 0.005	
MAS DE 6	± 0.2	FRACC. \pm 1/64	
ANG. \pm 0' 30"			
ESCALA	1:1	COTAS EN PUL.G.	
FECHA	1-SEP-2000	FIRMA	J.A.J.D.
DIBUJO			
REVISO			
APROBO			

MATERIAL BARRA DE COLD ROLLED DE ϕ 3/8"			
TRATAMIENTO TERMICO SIN			
ACABADO SIN			
MAQ. <input checked="" type="checkbox"/>	DIM. CRITICA <input checked="" type="checkbox"/>	C.E.P. <input checked="" type="checkbox"/>	PESO/1000
PERTENECE AL CONJ.(No. PARTE)			
SE USA EN (NOMBRE)			
No. PLANO CLIENTE / REFERENCIA DE VENTAS			

UNAM	
No. PARTE	9
DESCRIPCION	TORNILLO DE TRANSMISION.
CLIENTE	_____
NOMBRE DEL ARCHIVO	_____
	0

DEPARTAMENTO :
NOMBRE :

O PARCIAL PARA OTROS FINES



NOTAS:

- 1.- FABRICAR DOS PIEZAS IDENTICAS.
- 2.- ELIMINAR FILDS Y REBABA.

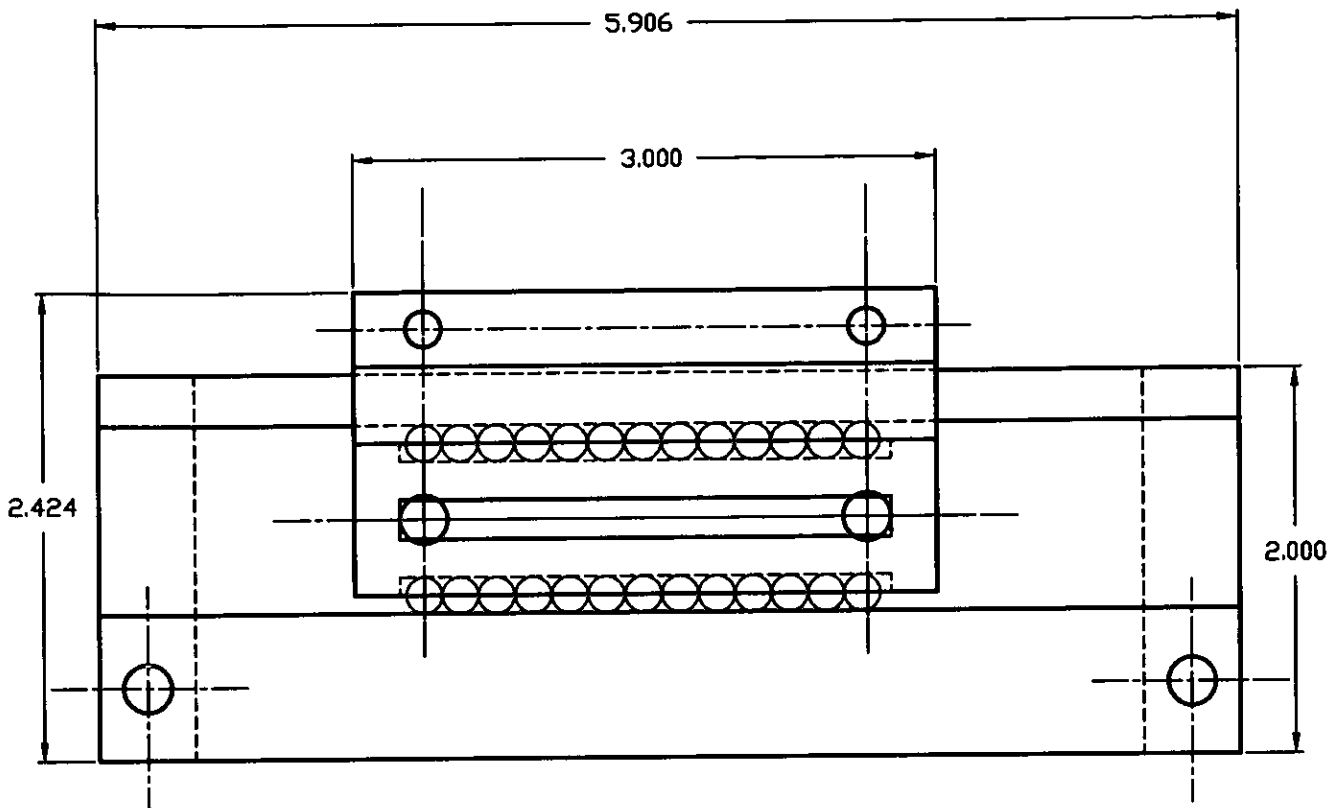
P. EUROPEA	P. AMERICANA
TOLERANCIAS NO INDICADAS	
MILIMETROS	PULGADAS
DE 0 A 6	±0.1
MAS DE 6	±0.2
	0.000 ± 0.005
	FRACC. ± 1/64
ANG. ± 0° 30'	
ESCALA	1 : 1
COTAS EN PULG.	
FECHA	FIRMA
DIBUJO	10-OCT-2000
REVISO	J.A.J.D.
APROBO	

MATERIAL			
BRONCE			
TRATAMIENTO TERMICO			
SIN			
ACABADO			
SIN			
MAQ.	DIM. CRITICA	C.E.P.	PESO/1000
✓	▽	▽	
PERTENECE AL CONJ.(No. PARTE)			
SE USA EN (NOMBRE)			
No. PLANO CLIENTE / REFERENCIA DE VENTAS			

UNAM	
No. PARTE	10
DESCRIPCION	TUERCA DE MESA MOVIL.
CLIENTE	
NOMBRE DEL ARCHIVO	0

DEPARTAMENTO :

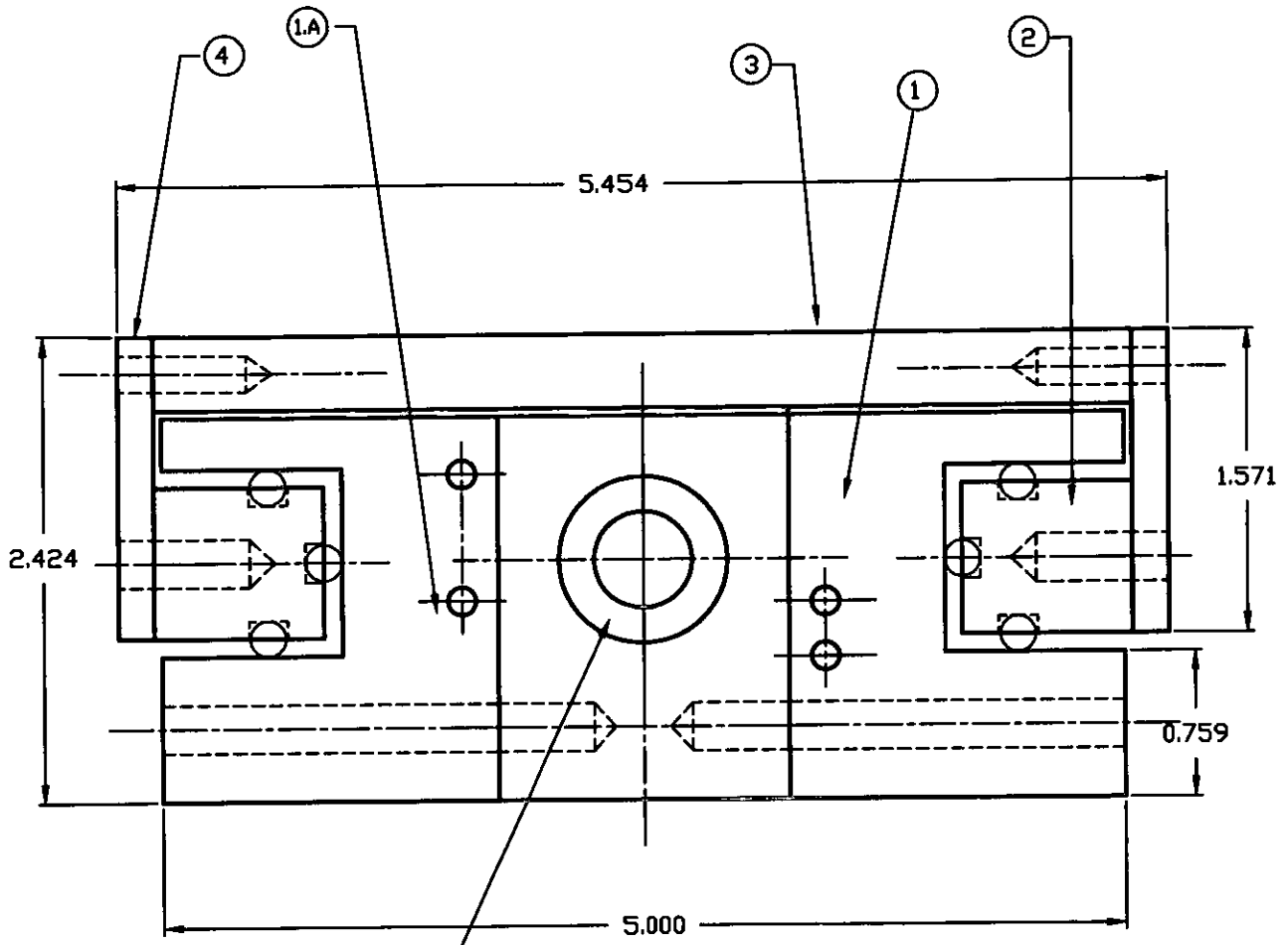
ESTA INFORMACION ES PROPIEDAD DE P.A.
 Y QUEDA PROHIBIDA SU REPRODUCCION TOTAL
 O PARCIAL PARA OTROS FINES



		MATERIAL _____			
P. EUROPEA P. AMERICANA TOLERANCIAS NO INDICADAS		TRATAMIENTO TERMICO SIN		No. PARTE _____	
MILIMETROS PULGADAS		ACABADO SIN		DESCRIPCION _____	
DE 0 A 6	±0.1	0.000 ± 0.005	MAQ. <input checked="" type="checkbox"/>	DIM. CRITICA <input type="checkbox"/>	C.E.P. <input type="checkbox"/>
MAS DE 6	±0.2	FRACC. ± 1/84			PESO/1000
ANG. ± 0° 30'		PERTENECE AL CONJ.(No. PARTE) _____		CLIENTE _____	
ESCALA	1:1	COTAS EN PULG. _____		NOMBRE DEL ARCHIVO _____	
	FECHA	FIRMA			
DIBUJO	18-AGO-2000	J.A.J.D.		SE USA EN (NOMBRE) _____	
REVISO				No. PLANO CLIENTE / REFERENCIA DE VENTAS _____	
APROBO				0	

NOMBRE :
 DEPARTAMENTO :

Y QUEDA PROHIBIDA SU REPRODUCCION TOTAL O PARCIAL PARA OTROS FINES



- NOTAS:**
- 1.-UTILIZAR 4 TORNILLOS ALLEN DE 1/4 x 20 NC Y LONG.=1/2.
 - 2.-UTILIZAR 4 TORNILLOS ALLEN DE 3/16 X 24 NS Y LONG.=3/4.
 - 3.-UTILIZAR 4 TORNILLOS ALLEN DE 1/4 x 20 NC Y LONG.=2-1/4.
 - 4.-UTILIZAR 78 BALAS DE ACERO DE $\phi 3/16$.
 - 5.-UTILIZAR DOS BALEROS (627 y 635 SKF).
 - 6.-LUBRICAR CON ACEITE DELGADO LAS BALAS Y EL RIEL.

TOLERANCIAS NO INDICADAS			
MILIMETROS		PULGADAS	
DE 0 A 8	± 0.1	0.000 \pm 0.005	
MAS DE 8	± 0.2	FRACC. \pm 1/64	
ANG. \pm 0' 30"			
ESCALA	1:1	COTAS EN PULG.	
FECHA	18-AGO-2000	FIRMA	
REVISO		J.A.J.D.	
APROBO			

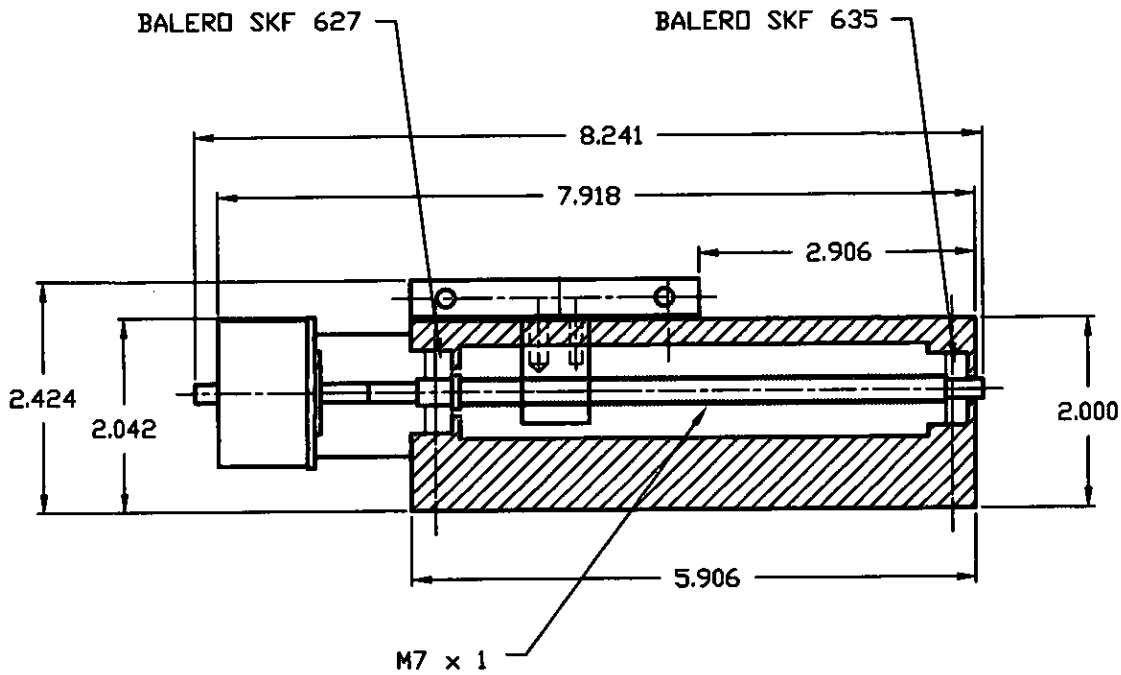
MATERIAL			
TRATAMIENTO TERMICO			
SIN			
ACABADO			
SIN			
MAQ. <input checked="" type="checkbox"/>	DIM. CRITICA <input type="checkbox"/>	C.E.P. <input type="checkbox"/>	PESO/1000
PERTENECE AL CONJ.(No. PARTE)			
SE USA EN (NOMBRE)			
No. PLANO CLIENTE / REFERENCIA DE VENTAS			

UNAM

No. PARTE	_____
DESCRIPCION	ENSAMBLE
CLIENTE	_____
NOMBRE DEL ARCHIVO	_____

DEPARTAMENTO :

Y QUEDA PROHIBIDA SU REPRODUCCION TOTAL O PARCIAL PARA OTROS FINES



P. EUROPEA		P. AMERICANA	
TOLERANCIAS NO INDICADAS			
MILIMETROS		PULGADAS	
DE 0 A 6	±0.1	0.000 ± 0.005	
MAS DE 6	±0.2	FRACC. ± 1/84	
ANG. ± 0' 30"			
ESCALA	1:2	COTAS EN pulg.	
	FECHA	FIRMA	
DIBUJO	18-AGO-2000	J.A.J.D.	
REVISO			
APROBO			

MATERIAL			
TRATAMIENTO TERMICO			
SIN			
ACABADO			
SIN			
MAQ. <input checked="" type="checkbox"/>	DIM. CRITICA <input checked="" type="checkbox"/>	C.E.P. <input checked="" type="checkbox"/>	PESO/1000
PERTENECE AL CONJ.(No. PARTE)			
SE USA EN (NOMBRE)			
No. PLANO CLIENTE / REFERENCIA DE VENTAS			

UNAM

No. PARTE	
DESCRIPCION	
CLIENTE	
NOMBRE DEL ARCHIVO	

DEPARTAMENTO :

Referencias

- 1.- Haussermann W. and Kennel H. "A Satellite Motion Simulator". *Astronautics* Vol 5 No. 12 December 1960.
- 2.- Rizos I, Arbes J and Raoult J.C. "A Spherical Air-Bearing-Supported Test Facility for Performance Testing of Satellite Attitude Control Systems". ESRO-CR66, also 4th. IFAC Symposium. Dubrovnic, Jugoslavia. Sept. 6-10 1971.
- 3.- Fontana A. et al. "Flight Investigation of a Solar Orientation Control System for Spacecraft". NASA Technical Memorandum. NASA TM X-944. January 1964.
- 4.- Tabata et al. "Satellite Attitude Control Simulator System: Overall System". Proceedings 10th. Int. Symp. on Space Technology and Science. Tokyo, Japan. Sept 3-9 1973. AGNE Pub.
- 5.- Lorell K. and Lang B. "Precision Attitude Control of Symmetric Spinning Bodies". SUDAAR 443, Stanford University Center for System Research. April 1971.
- 6.- Fullmer et al. "The Development of a Small Satellite Attitude Control Simulator" 6th. Annual AIAA-USU Conference on Small satellites. Logan, Utah. September 1992.
- 7.- Fullmer R. "Dynamic Ground Testing of the Skipper Attitude Control System". AIAA 34th. Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno Nevada, USA. January 15-18, 1996
- 8.- Stark K. "The Design of Various Types of Air Bearings for Simulating Frictionless Environments" NASA Technical Note. NASA TN D-1100. May 1962.
- 9.- Ryffel H. editor "Machinery's Handbook" 22nd. edition. Industrial Press Inc. New York, 1984.
- 10.- Fuller D. D "Theory and Practice of Lubrication for Engineers". Wiley, New York, 1956.
- 11.- Advanced Orientation Systems, Inc., EZ-COMPASS-3 Application Manual. Linden, NJ 1999.
- 12.-J. Prado, A. Peralta-Higuera, G. Bisiacchi. "Simulador físico para prueba de sistemas de detección de orientación de satélites, en un medio sin fricción". SOMI XII Congreso Nacional de Instrumentación. San Luis Potosí, SLP. México. 1997. Memorias del Congreso pp738-742.
- 13.-Tania A. Olsen "Design of an Adaptive Balancing Scheme for the Small Satellite Attitude Control Simulator (SACCS)". Thesis, Utah State University, 1995.
- 14.-Robert L. Norton. "Diseño de Maquinaria". Ed. Mc. Graw-Hill, México 1995.

15.- Hamilton H. Mabie. "Mecanismos y Dinámica de Maquinaria". Ed. Limusa, México 1998.

16.- Juan Manuel Becerril y Mario Rodríguez. "Sistema de Navegación Inercial Empleando Giróscopos y Acelerómetros". Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM 2000.