



**TECNOLÓGICO  
DE MONTERREY.**



**TECNOLÓGICO  
DE MONTERREY.**

**BIBLIOTECA**  
Campus Ciudad de México

# **Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey**

**Campus Ciudad de México**

**División de Ingeniería y Arquitectura**

*Ingeniería en Mecatrónica*

**Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica**

## **Simulador de Vuelo: Pedales de Boeing 737NG**

**Autores:** Pablo Augusto Vega Sevilla  
Diana Martínez Tronco



**Asesor:** Dr. Ernesto Olguín Díaz

**Coasesores:** M. C. Mario Covarrubias Rodríguez  
M. C. Gregory Oundjian

**México D. F. a 26 de abril de 2005.**

## CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	2
1.1 Objetivo.....	4
1.2 Alcance del proyecto .....	4
1.3 Antecedentes.....	5
2. MARCO TEÓRICO.....	9
2.1 Materiales: Aluminio.....	9
2.2 Ergonomía.....	11
3. DISEÑO.....	14
3.1 Modelo Boeing 737 NG.....	14
3.2 Diseño Adaptado.....	16
3.3 Rediseño de piezas.....	19
3.4 Tolerancias.....	24
3.5 Elementos de Máquina.....	24
4. ANÁLISIS DE ELEMENTO FINITO.....	27
5. MANUFACTURA.....	30
5.1 Pedal.....	30
5.2 Balancines.....	33
6. ANÁLISIS DE COSTOS.....	37
7. CONCLUSIONES.....	41
8. TRABAJO A FUTURO.....	44
9. REFERENCIAS.....	45
10. ANEXOS.....	47

# 1. INTRODUCCIÓN

Los simuladores de vuelo siempre han representado una herramienta valiosa para los pilotos comerciales y militares. Para construirlos se necesita la interacción de múltiples sistemas, dependiendo del nivel del simulador con que se trate. Una tarea fundamental dentro de los distintos sistemas que integran los simuladores de vuelo es lograr la mayor interacción posible entre el ambiente virtual y el usuario. Un problema actual de dichos simuladores de vuelo es la poca disponibilidad de los mismos en territorio mexicano junto con un precio sumamente elevado. Este proyecto se enfoca en el diseño mecatrónico de una parte de los controles, los pedales del piloto y copiloto en un simulador del B737 NG. El diseño consiste en la implementación de un sistema háptico de retorno de fuerza que favorezca la interfaz hombre-máquina incrementando el realismo y la sensación de vuelo, así como el diseño del mecanismo que sincroniza los movimientos de los pedales de piloto y copiloto.

En este proyecto desarrollaremos diversas áreas de nuestra carrera como:

- Mecánica
- Eléctrica
- Electrónica
- Electrónica de Potencia
- Control
- Manufactura

El proyecto consiste en desarrollar un simulador de tamaño real de un avión Boeing 737 NG. En el proyecto participarán equipos de las carreras de IMA, IME e IMT. Como primera etapa tres equipos participarán en la realización de este proyecto. El propósito de la participación de distintos equipos de las tres carreras arriba mencionadas es integrar las distintas áreas de conocimiento en la creación de un proyecto común que cumpla con los requerimientos de nuestro cliente, la empresa de aviación Frecuencia 122.1.



*Figura 1. Imagen corporativa de "Frecuencia 122.1"*

El simulador tiene el requerimiento de ser de tamaño real así como ser idéntico en dimensiones. Asimismo los tableros, consolas y controles deberán ser lo más parecidos posibles a los encontrados en una cabina del Boeing 737 NG. Para contribuir a dicho objetivo nuestro equipo, integrado por estudiantes de Ingeniería en Mecatrónica, se enfocará a la tarea de realizar una parte fundamental de los controles de cualquier avión, y por ende del simulador en cuestión.

La parte de los controles que se realizan son el sistema de pedales. Para modelarlos y construirlos, se basan en los que se usan actualmente, tratándose de hacer un modelo lo más parecido posible apegándonos al requerimiento de Frecuencia 122.1 [2].

Debido a que se construyen parte de los controles de un simulador de vuelo, es necesario que los controles tengan una sensación lo más apegada posible a la realidad. Para tal efecto, es necesario que cuenten con un sistema que permita realizar dos tareas. La primera tarea consiste en diseñar un sistema de sincronización para los pedales de piloto y copiloto de manera que si uno de los pedales de cualquiera de los mandos (piloto o copiloto) se mueve el pedal equivalente del mando contrario también lo haga, siendo esto válido para el sistema del timón y el sistema de accionamiento de frenos. La segunda tarea consiste en un retorno de fuerza de las condiciones existentes en el software del simulador, es decir, que los parámetros de resistencia del software como oposición al giro de la aeronave se reflejen en los controles como una resistencia o una oposición al movimiento de los pedales [4]. Debido a que los pedales del piloto y el copiloto están sincronizados, el retorno de fuerza generado por el software se deberá sentir tanto en los pedales del piloto como en los del copiloto.

Hoy en día existen dos compañías, Flight Safety y CAE, que fabrican los mejores simuladores de vuelo que se pueden conseguir. Estas compañías producen simuladores de vuelo que se conocen como “Full Flight Simulators”, este tipo de simuladores son extremadamente costosos desde su adquisición hasta su mantenimiento.

Los “Full Flight Simulators” consisten en una cabina de tamaño real construida a partir de piezas reales de aviones. Este tipo de simuladores además de tener alta definición en cuanto a gráficos y alta fidelidad de los sistemas del avión, cuenta con el movimiento que realiza el avión durante el vuelo así como en tierra. Las compañías que fabrican estos simuladores, constantemente estén actualizando sus sistemas para dar a sus clientes mayor realismo.

La compañía norteamericana Flight Safety ha desarrollado una tecnología denominada *VITAL 9* que se encarga de darle mayor realismo a los gráficos aumentando al doble el detalle en la representación de texturas, en términos técnicos esto representa 30,000 polígonos y 4,000 píxeles por canal [6].

Otra compañía que fabrica simuladores de este tipo es CAE, esta compañía además de hacer los "Full Flight Simulators", tiene una herramienta llamada Simfinity que ofrece soluciones integrales para mejorar la eficiencia y la efectividad en el entrenamiento reduciendo costos y riesgos. Esta herramienta permite a los pilotos y a los equipos de mantenimiento ganar experiencia práctica con la aeronave antes de empezar a usar el "Full Flight Simulators", para lograr esto el software que utiliza está construido a partir el mismo que se usa en los simuladores más avanzados, esto reduce el costo en el entrenamiento del piloto dramáticamente.

También CAE ha desarrollado otra tecnología llamada *Sim XXI* que es la siguiente generación de "Full Flight Simulators". Esta tecnología está basada en *PC's* así como ambiente *Windows*, y esta diseñada para simplificar el ensamble, las pruebas y la integración, reduciendo los costos y tiempos de ensamble.

Otra herramienta innovadora es *Tropos Visual System*, desarrollada por CAE, es el único generador de gráficos de alta calidad que usa procesadores comerciales comunes.

## **1.1 Objetivo**

Diseñar y manufacturar el módulo sencillo del mecanismo de pedales adaptados para su utilización como controles en un simulador de vuelo de dimensiones reales de un avión Boeing 737 NG.

## **1.2 Alcance del proyecto**

A partir de los requerimientos definidos por Frecuencia 122.1, manufacturar el módulo sencillo del mecanismo de pedales, lo cual incluye diseño asistido por computadora (CAD), ingeniería asistida por computadora (CAE) con el apoyo de los programas Visual Nastran 4D y manufactura asistida por computadora (CAM) utilizando Mastercam.

## **1.3 Antecedentes**

### **a. Háptica**

La háptica es la ciencia que estudia la aplicación de una sensación táctil y el control de la interacción con aplicaciones en computadora. También se le conoce como el estudio de cómo combinar el sentido humano del tacto con un mundo generado por computadora. La háptica busca encontrar soluciones a la falta de estímulos para el sentido del tacto utilizando la retroalimentación táctil y la retroalimentación de fuerza.

#### **Retroalimentación de fuerza (kinestética)**

La retroalimentación de fuerza es el área de la háptica que trata con dispositivos que interactúan con músculos y tendones, y dan al humano una sensación de que se aplica una fuerza. Estos dispositivos principalmente consisten de manipuladores que proporcionan una reacción de fuerza al usuario con fuerzas correspondientes al ambiente virtual en el que está el órgano terminal.

#### **Retroalimentación táctil**

La retroalimentación táctil trata con dispositivos que interactúan con los nervios terminales en la piel los cuales indican la presencia de calor, presión y textura. Estos dispositivos típicamente han sido usados para indicar si el usuario está en contacto con un objeto virtual. Otros dispositivos de retroalimentación táctil han sido utilizados para estimular la textura de un objeto virtual.



*Figura 1.3.1 Háptica*

Ivan Sutherland, uno de los padres fundadores de la realidad virtual, sugirió que "el sentido humano kinestético es como otro canal independiente al cerebro, un canal cuya información es asimilada de una manera bastante subconsciente" [11]. Esta sugerencia entre muchas otras condujo a que se comenzará a investigar y desarrollar interfases hápticas. De tal manera que se añadió un canal de entrada independiente que permitió que la cantidad de información que es procesada por el cerebro aumente. El aumento en la información reduce el error y el tiempo tomado para completar una tarea. También reduce el consumo de energía y la magnitud de las fuerzas de contacto usadas [12].

Los despliegues hápticos son casi inútiles, pero cuando son usados en combinación con un despliegue visual, estos pueden ser más útiles que un despliegue estereoscópico o un despliegue con múltiples puntos de vista.

Para diseñar correctamente una interfaz háptica para un ser humano es necesario considerar la anatomía y la fisiología del cuerpo. Algunas propiedades fundamentales a considerar son las proporciones y fuerzas del promedio de las articulaciones. En el proyecto se deben considerar los parámetros de los pies. Como un ejemplo, se muestra información obtenida acerca de los parámetros de las manos, que son las más usadas en las interfaces hápticas. Los dedos de las manos son una de las partes más sensitivas, teniendo hasta un

máximo de 135 sensores por centímetro cuadrado en la yema de un dedo. Las fuerzas sobre los dedos deben de ser menores al rango de 30 – 50 N en total. Para el "usuario promedio", el dedo índice puede ejercer 7 N, el dedo medio 6 N y el dedo anular 4.5 N sin experimentar molestia o fatiga [10].

Otro factor importante en sistemas de realidad virtual es la situación cuando una pista visual y una pista háptica están en contradicción. La pista visual típicamente se impone a la pista háptica.

A diferencia del sistema visual, no es importante lo que el sistema sensorial detecta sino qué movimientos fueron usados para obtener esa información. Los humanos usan dos diferentes formas de exploración háptica: la activa y la pasiva. La exploración háptica activa es cuando el usuario controla sus propias acciones. La exploración háptica pasiva es cuando la mano, el dedo o el pie del usuario son guiados por otra persona. Cuando el usuario está en control frecuentemente hace errores. Sin embargo, cuando la persona es guiada, dedica su atención a identificar el objeto representado [10].

#### **b. Retorno de Fuerza**

A través del tiempo los dispositivos que usan retorno de fuerza han tenido mayor popularidad, desde el empleo para videojuegos caseros hasta para el de simuladores más sofisticados. El retorno de fuerza es una técnica donde las manos o el cuerpo del usuario reciben fuerzas de escala micro o macro dependiendo en las acciones que el usuario realice dentro de la relación usuario- resultado. Para lograr el retorno de fuerza se añaden actuadores (generalmente eléctricos) a los controles convencionales, ejemplo de ello son volantes, "yokes" o cualquier otro tipo de dispositivo con el que entre en contacto parte del cuerpo del usuario.

Se ha demostrado [1] que el empleo de retorno de fuerza tiene dos aportaciones principales al campo de los simuladores y los videojuegos: la primera es que facilita las tareas motrices del usuario, ya que en el caso de telemanipulación la presencia del retorno de fuerza ayuda a la mejora del desempeño de una tarea incluso en la ausencia de guías visuales adecuadas. La segunda, y de nuestro mayor interés, es que el retorno de fuerza háptico permite al usuario mejorar su desempeño de un ambiente virtual además de producir que se sumerja más



profundamente dentro de dicho ambiente. En resumen, le permite al usuario tener una sensación más realista del ambiente virtual.

En el diseño de controles o cualquier dispositivo periférico que dé algún tipo de retorno de fuerza es importante considerar la cantidad de fuerza que puede generar el dispositivo y que por ende sentirá el usuario. El hecho de conocer el rango de retorno de fuerza puede ayudarnos a mejorar el desempeño humano en múltiples tareas virtuales.

En 1997 Sudarsan [1] expuso en una conferencia los resultados sobre la cantidad de fuerza que ayudan a incrementar la sensación del juego (ambiente virtual) de un usuario que emplea un dispositivo periférico con retorno de fuerza. Debido a la naturaleza del estudio no se mencionó la cantidad de fuerza de manera exacta, sino que se ofreció un porcentaje de dicha cantidad. En la siguiente gráfica se muestran los resultados de dicha investigación.

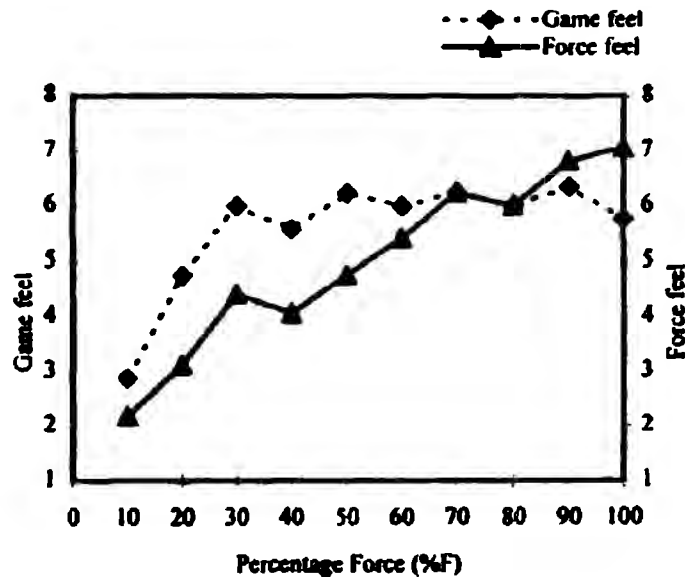


Fig. 1.3.2. Sensación de juego (Porcentaje de percepción) [1]

De la gráfica anterior observamos que la sensación del juego se incrementa junto con el porcentaje de fuerza hasta un 25% donde la sensación del juego permanece casi constante sin importar el incremento de fuerza. Podemos concluir que del 55% al 80% de la fuerza es óptimo en el diseño, ya que después el incremento de fuerza no incrementa la sensación del juego.

## **2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1 Materiales: Aluminio**

La combinación de las propiedades que tienen el aluminio (Al) y sus aleaciones, lo hacen uno de los materiales metálicos más versátiles, económicos y atractivos para un gran número de usos. Desde el suave papel aluminio hasta las aplicaciones ingenieriles más demandantes, las aleaciones de aluminio son las segundas más usadas, después del acero, como metales estructurales.

El aluminio tiene una densidad de solamente  $2.7 \text{ g/cm}^3$ , la cual es aproximadamente una tercera parte de la del acero ( $7.83 \text{ g/cm}^3$ ). Un pie cúbico de acero pesa alrededor de 490 libras; un pie cúbico de aluminio solamente pesa 170 libras. Un peso tan liviano, aunado a la alta resistencia (mayor a la del acero estructural) de algunas aleaciones de aluminio, permite el diseño y la construcción de estructuras ligeras, que son particularmente ventajosas para cualquier cosa que se mueva, es decir, vehículos espaciales y aeronaves, al igual que todos los tipos de vehículos de agua y tierra.

El aluminio resiste el tipo de oxidación progresiva que afecta al acero. La superficie expuesta del aluminio se combina con el oxígeno para formar una película inerte de óxido de aluminio de unas diez millonésimas de pulgada de espesor, la cual bloquea la oxidación posterior. Contrario a la herrumbre, la película de óxido de aluminio no se parte ni se desprende de manera que una superficie fresca pueda comenzar a oxidarse. Si la capa protectora del aluminio se raya, se reestablecerá instantáneamente. La delgada capa de óxido, fuertemente adherida al metal no tiene color, y es invisible a simple vista. La decoloración y el desprendimiento del óxido del hierro y el acero no ocurren en el caso del aluminio. Cuando es aleado y tratado, el aluminio puede resistir la corrosión causada por el agua, la sal y otros factores ambientales, así como un amplio rango de agentes físicos y químicos. La reflectividad del aluminio pulido, sobre un amplio rango de longitudes de onda, lleva a seleccionarlo para una variedad de usos decorativos y funcionales. Tiene una atractiva apariencia en su acabado natural, el cual puede ser suave y lustrado o brillante y resplandeciente. Puede ser virtualmente de cualquier color o textura.

Uno de los aspectos más importantes del aluminio es la facilidad con la que puede ser transformado. Comúnmente, puede competir de manera satisfactoria con materiales más baratos que tienen menores grados de trabajabilidad. Este metal puede ser inyectado en moldes por

cualquier método conocido, incluso puede ser rolado hasta un espesor menor al de una hoja de papel. Las hojas de aluminio también pueden ser estampadas. Puede ser martillado y forjado; casi no existe límite para los diferentes perfiles y formas en las que dicho metal puede ser extruido [13]. Los factores importantes al momento de seleccionar aluminio y sus aleaciones son: su alta razón entre sus esfuerzos y su peso, la resistencia a la corrosión de muchos químicos, su alta conductividad térmica y eléctrica, no ser tóxico, su reflectividad, apariencia, facilidad de formarlo y maquinarlo y finalmente ser no magnético.

Los principales usos del aluminio y sus aleaciones son en contenedores y empaques (latas de aluminio y papel aluminio), en edificios y otros tipos de construcciones, en transporte (aplicaciones aéreas y aeroespaciales, camiones, automóviles, ferrocarriles y barcos), en aplicaciones eléctricas (conductores económicos y no magnéticos), en consumo personal (línea blanca, utensilios de cocina y muebles) así como en herramientas portátiles. Casi toda la transmisión de alta tensión está hecha de aluminio. Por ejemplo, en sus componentes estructurales (de carga y rodamientos) 82% de un B-747 (y 79% de un B-757) es aluminio [14].

En la siguiente tabla se muestran algunas propiedades mecánicas del aluminio y sus aleaciones.

*Tabla 2.1.1. Rangos de los esfuerzos críticos de varias aleaciones de aluminio*

Serie del Aluminio	Composición	Método de endurecimiento	Esfuerzo de Tensión (MPa)	Esfuerzo de Fluencia (MPa)
1xxx	Al	Trabajo en frío	70-175	35-120
2xxx	Al-Cu-Mg (1-2.5% Cu)	Tratamiento térmico	170-310	75
2xxx	Al-Cu-Mg-Si (3-6% Cu)	Tratamiento térmico	380-520	325-455
3xxx	Al-Mn-Mg	Trabajo en frío	140-280	40-145
5xxx	Al-Mg (1-2.5% Mg)	Trabajo en frío	140-280	90-215

La Asociación del Aluminio de Estados Unidos divide en familias a las aleaciones para fines de simplificación. Para las aleaciones se emplea un sistema de cuatro dígitos para producir una lista de familias de composición [13]:

**1xxx:** composición pura usada de manera primaria en la industria eléctrica y en la industria química.

**2xxx:** aleaciones en las que el principal elemento aleante es el cobre, aunque otros elementos como el magnesio son empleados. Esta serie de aleaciones son ampliamente usadas en aeronaves donde sus altos esfuerzos de tensión y fluencia son valiosos.

**3xxx:** aleaciones en las que el manganeso es el principal elemento aleante, usadas como aleaciones de propósito general para aplicaciones arquitectónicas y productos varios.

**5xxx:** aleaciones en las que el magnesio es el principal elemento aleante, usadas en los cascos de barcos y en productos expuestos a ambientes marinos.

## **2.2 Ergonomía**

La ergonomía es el conjunto de conocimientos científicos relativos al hombre y necesarios para concebir máquinas y dispositivos que puedan ser utilizados con la máxima eficacia, seguridad y confort. El objetivo principal de la ergonomía es conocer las capacidades y limitaciones en el desempeño humano. Por otra parte, la ergonomía se enfoca a la aplicación de interfases hombre-máquina para el análisis, diseño y evaluación de sistemas que permitan garantizar seguridad, confort, salud, efectividad y calidad de vida.

El estudio de las interfases hombre- máquina permite conocer las características físicas y perceptivas de los seres humanos. Es necesario considerar estos factores humanos al realizar el diseño de cualquier espacio de trabajo. Si no se consideran estos factores, se incorporan características que generan errores en las interfases hombre- máquina. Es por esto que para el diseño de los pedales del simulador de vuelo, se deben considerar algunos factores humanos que serán discutidos más adelante. Todo esto con el fin de adecuar los pedales a un diseño ergonómico [16].

Para poder lograr esto es necesario considerar la antropometría, que es la ciencia que estudia las dimensiones del cuerpo humano. Su objetivo es el diseño de sistemas de los que las personas forman parte como son: objetos, herramientas, muebles, espacios y puestos de trabajo. También es considerada como una disciplina que describe las diferencias cuantitativas de las medidas del cuerpo humano. La antropometría estudia estas dimensiones tomando como referencia distintas estructuras anatómicas. Su elemento más importante es el ser humano, pero a la vez es el más frágil y caro en un sistema hombre- máquina. La antropometría es una herramienta útil para adaptar el entorno a las personas.

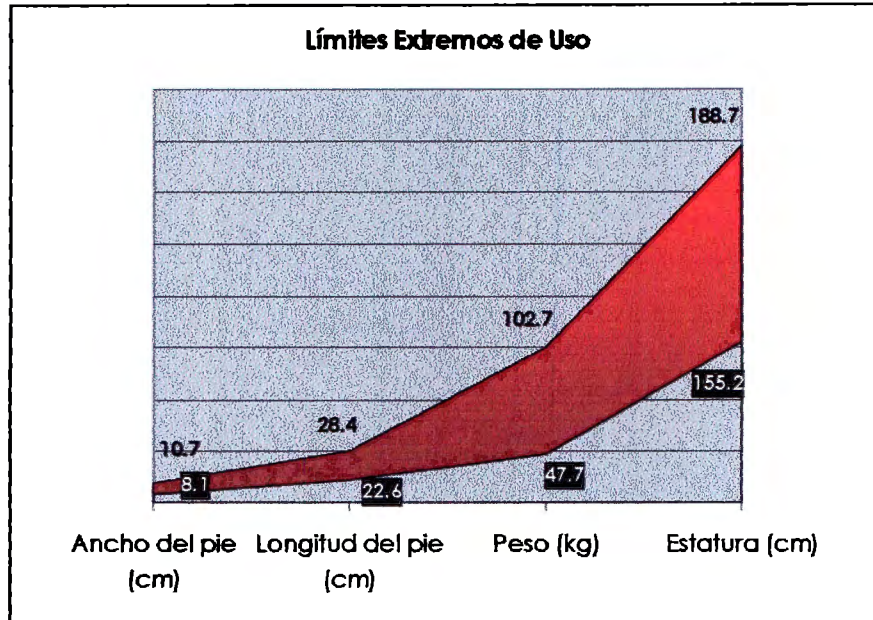
Para poder hacer un diseño ergonómico de los pedales es necesario conocer algunos datos antropométricos que permitan determinar algunas características de los pedales. Es necesario conocer quienes serán los usuarios potenciales, de esta manera se puede determinar que segmento de la población utilizará el producto. También se deben de determinar las dimensiones del cuerpo humano concernientes al funcionamiento de los pedales. Por otro lado se necesitan conocer los límites extremos de uso basándose en la población seleccionada. Así como el valor percentil de los datos antropométricos seleccionados. Y por último revisar que los resultados obtenidos en el proceso de diseño ergonómico cumplan con los parámetros del diseño original [15].

Se seleccionaron para la investigación, los datos antropométricos de hombres y mujeres que forman parte de la Fuerza Aérea de los Estados Unidos. Estos datos son presentados en la tabla 2.2.1:

**Tabla 2.2.1 Dimensiones antropométricas [15]**

Dimensión Antropométrica	Limite Inferior	Limite Superior
	Percentil	
	5%	95%
Longitud del pie (cm)	22.6	28.4
Ancho del pie (cm)	8.1	10.7
Distancia de la rodilla al pie (cm)	38.4	46.7
Estatura (cm)	155.2	188.7
Peso (kg)	47.7	102.7
Peso del pie (kg)	0.7	1.5
Peso de la pierna (kg)	2.4	5.1

A continuación se muestran los límites extremos de uso:



*Gráfica 2. 2.1. Límites extremos de uso*

En esta gráfica se observan los valores posibles (delimitados por el área en rojo) para las dimensiones antropométricas mencionadas que son: ancho del pie, longitud del pie, peso y estatura. Por último se investigó y se comprobó la fuerza ejercida por la pierna y el pie, como se puede ver en la siguiente tabla [17].

*Tabla 2.2.2. Fuerzas ejercidas por pie y pierna*

Pie	350	111
Pierna	890	222

Fue así como se determinó que el diseño propuesto satisface los resultados obtenidos del diseño ergonómico.

### **3. DISEÑO**

Para el diseño de los pedales se tomó como referencia el modelo original, es decir el encontrado dentro de un B-737 NG, cuyo esquema se muestra en las figuras 3.1.1 y 3.1.2. El proyecto se encuentra en una etapa en la cual ya se decidió el diseño final y se ha comenzado la manufactura. Se identificaron las ventajas y desventajas de utilizar el sistema original y se propusieron cambios a dicho sistema incluyendo el rediseño de algunas piezas.

#### **3.1 Modelo Boeing 737 NG**

Producto de la visita al hangar de mantenimiento de Aeroméxico, se proporcionaron algunos diagramas del sistema de pedales del Boeing 737 NG [2]. Es importante resaltar que existen 2 subsistemas que son el sistema de sincronización de pedales entre piloto y copiloto (Figura 3.1.1) y el sistema de frenos diferenciales (Figura 3.1.2).

A partir de haber contado con estos diagramas, el diseño cambió y aún se tenían que definir con los asesores las opciones de modificar el mecanismo. Estas modificaciones incluyeron dimensiones, posición y diseño de piezas y materiales.

Como primer paso se identificaron las piezas que conforman cada sistema y se comenzaron a modelar algunas de las piezas en CAD. Después se acudió con el co- asesor M. en C. Mario Covarrubias, él indicó que era necesario familiarizarse con las piezas y su funcionamiento además de que se tenían que empezar a modelar utilizando CATIA y Pro/Engineer. Se definió que sería útil hacer un análisis ergonómico en CATIA. También se discutió acerca de la complejidad de algunas piezas y así como orientación sobre qué herramientas utilizar.

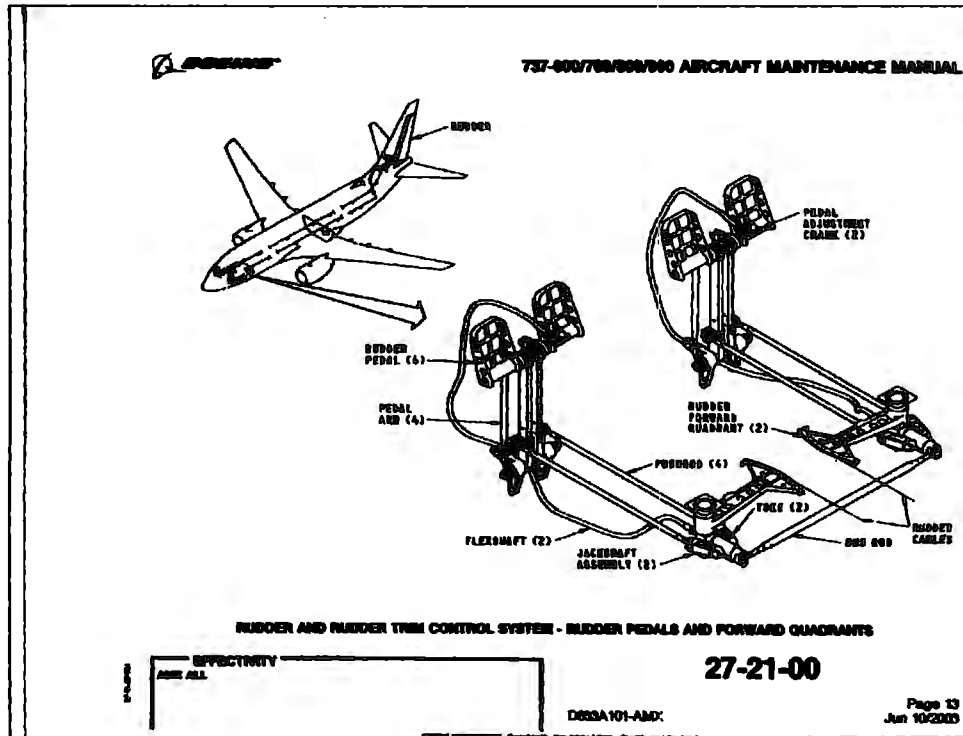


Figura 3.1.1. Sistema de sincronización de pedales [2]

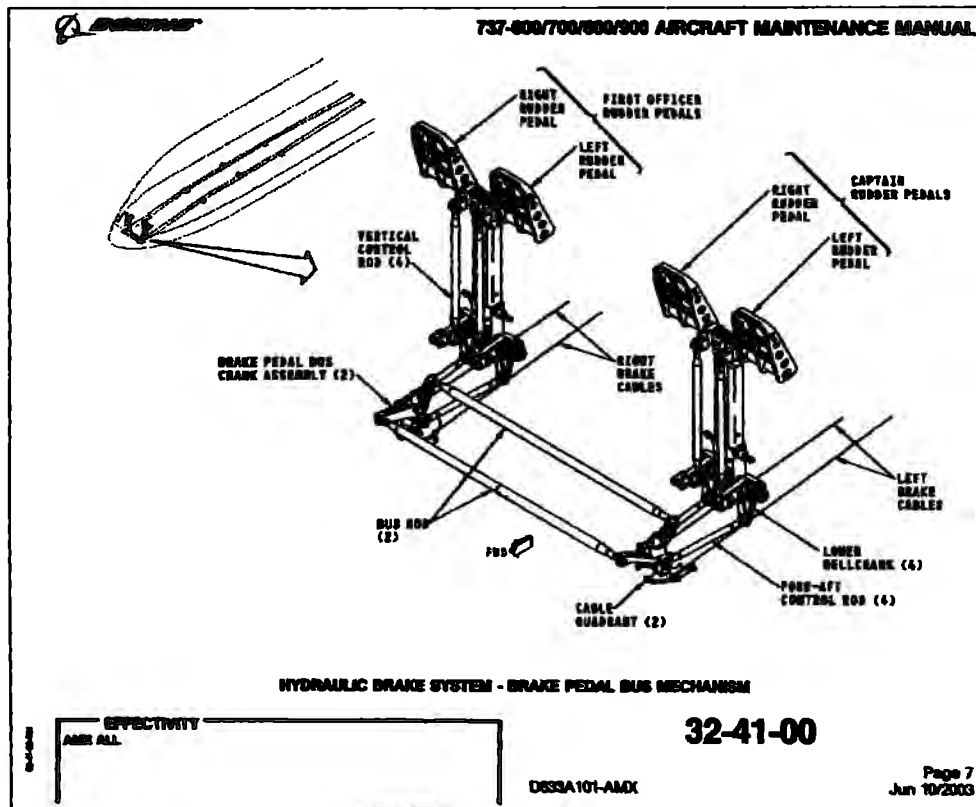


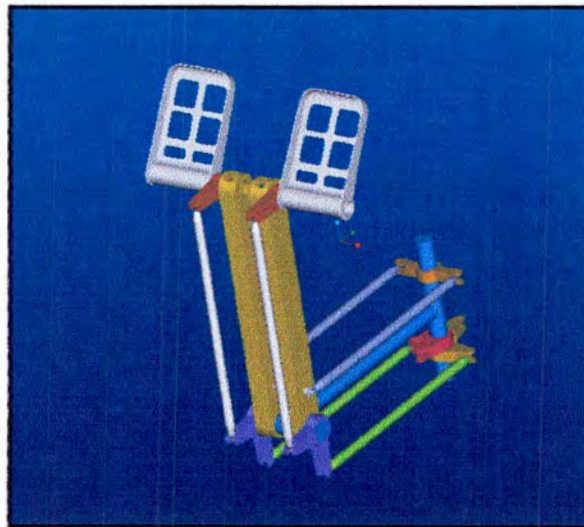
Figura 3.1.2. Sistema de accionamiento de frenos [2]



### 3.2 Diseño Adaptado

A manera de resolver una necesidad expresada por la empresa de aviación Frecuencia 122.1, se decidió dividir el sistema en dos módulos: el módulo sencillo y el módulo de sincronización. En caso de que se necesitara el sistema de piloto y copiloto, se tendría que contar con dos módulos sencillos y el módulo de sincronización. Por otra parte, si se necesita el sistema de piloto (individual), se tendría que contar únicamente con un módulo sencillo. A continuación se presentan los módulos propuestos así como las piezas que forman parte de cada uno.

#### Módulo Sencillo

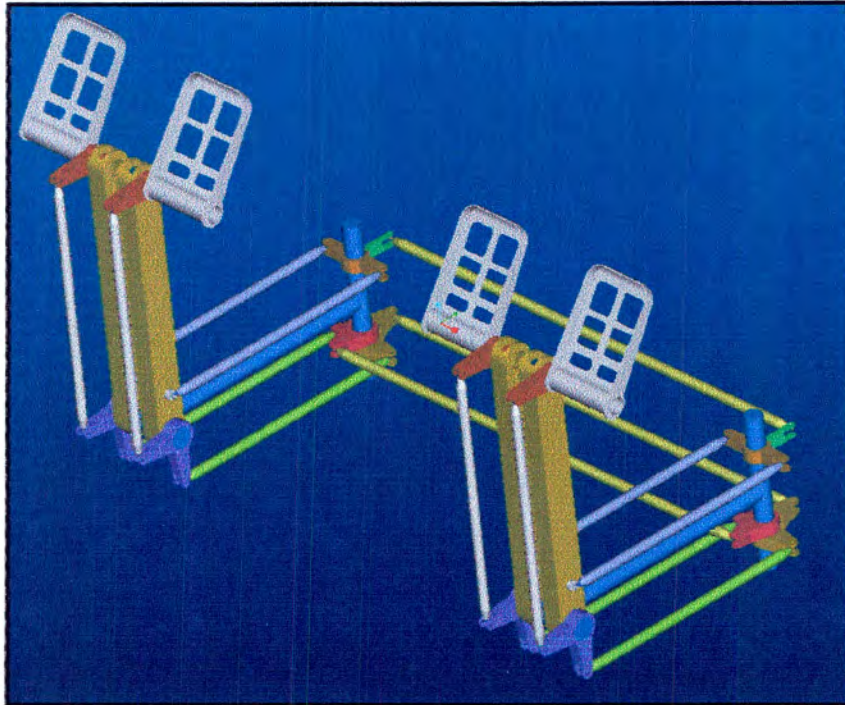


*Figura 3.2.1. Módulo sencillo (sin base)*

*Tabla 3.2.1. Relación de piezas del módulo sencillo*

Número de piezas	Pieza	Figura
2	Pedales	Pieza 001
6	Barra de 50 mm	Pieza 002
1	Soporte	Pieza 003
2	Soporte giratorio de dos niveles	Pieza 004
2	Escuadra 90°	Pieza 005
2	Union (Pedal - Barra de freno)	Pieza 006
1	Balancin	Pieza 007
2	Columna	Pieza 008
2	Perno (Pedal - Columna)	-
12	Perno chico	-
1	Base	-
<b>Total de piezas</b>	<b>32</b>	<b>-</b>

## Módulo de sincronización

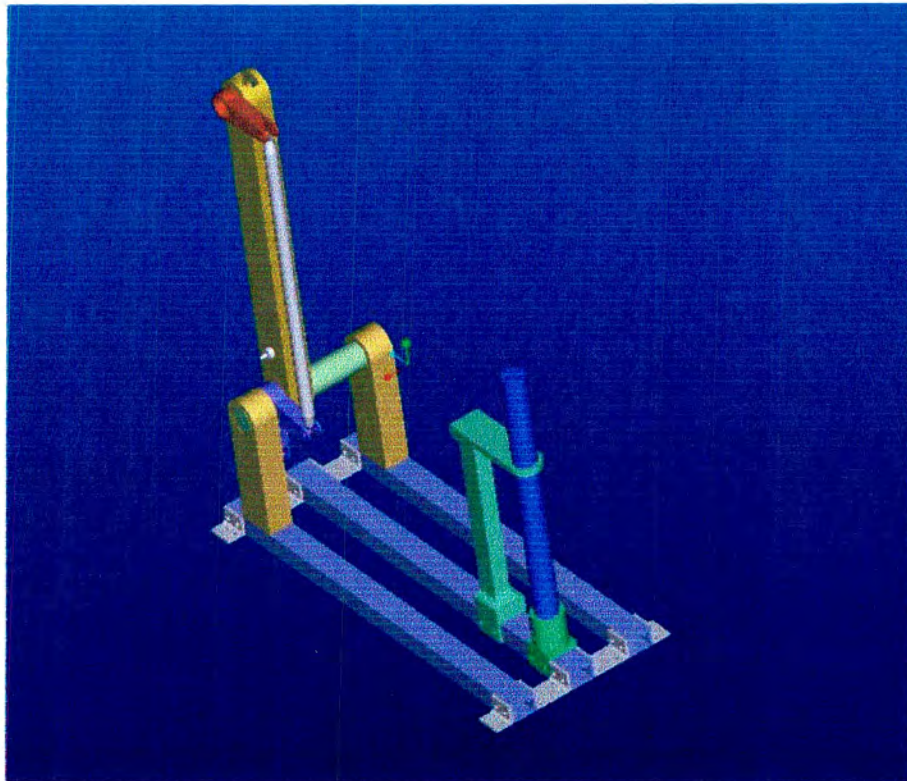


*Figura 3.2.2. Dos módulos sencillos (sin base) y módulo de sincronización*

*Tabla 3.2.2. Relación de piezas del módulo de sincronización*

Número de piezas	Pieza	Figura
3	Barra de 1005mm	Pieza 010
2	Acoplador (Timón)	Pieza 011
6	Perno chico	-
Total de piezas	11	-

## Base para los módulos



*Figura 3.2.3. Base para módulo sencillo y módulo de sincronización*

*Tabla 3.2. 3. Relación de piezas de la base de los módulos*

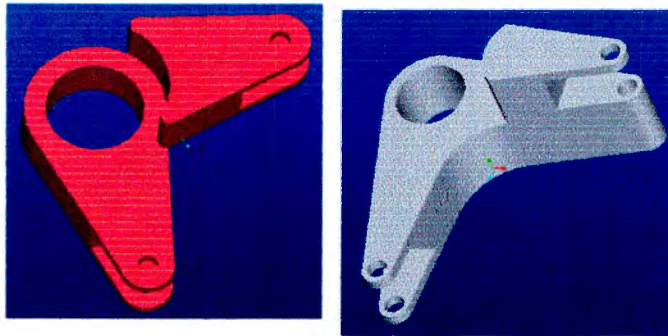
Numero de piezas	Pieza
3	Perfiles
12	Bisagras
1	Soporte de tubo
2	Soporte de columnas
1	Soporte tubo balancín
1	Base tubo balancín
1	Eje de balancines
1	Eje de columnas
<b>Total de piezas</b>	<b>22</b>

### 3.3 Rediseño de piezas

Tomando en cuenta todos los posibles procesos de manufactura de las piezas, se simplificó el diseño de algunas de ellas, mejorando así el tiempo de maquinado, el desperdicio de material<sup>1</sup>, sujeción de las piezas así como una mayor sencillez en el ensamble. A continuación se muestran las piezas cuyo diseño fue modificado:

- **Soporte giratorio de dos niveles**

(Esq2.prt – Pieza 004). La función de esta pieza es sincronizar los movimientos entre módulos sencillos. El rediseño se hizo debido a que como se muestra en la siguiente figura (Fig. 1), la unión de los dos niveles de la pieza están sujetadas sobre un área muy pequeña, haciéndola durante el proceso de manufactura y uso muy vulnerable a rupturas en este punto.



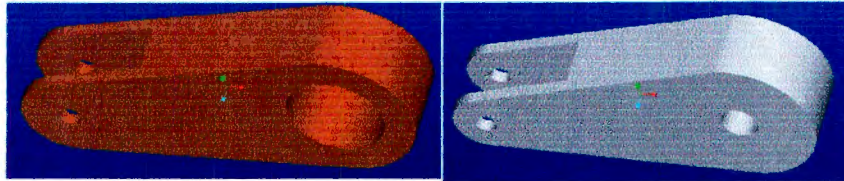
*Fig.3.3.1 Diseño anterior (izquierda) y posterior (derecha) del soporte giratorio de dos niveles*

---

<sup>1</sup> En el caso de un simulador de vuelo, la facilidad de maquinado al disminuir el gasto de material es preferible. En contraste, en aplicaciones reales la industria aeronáutica prioriza, por razones de aerodinámica, el peso más bajo posible.

- **Activador de frenos**

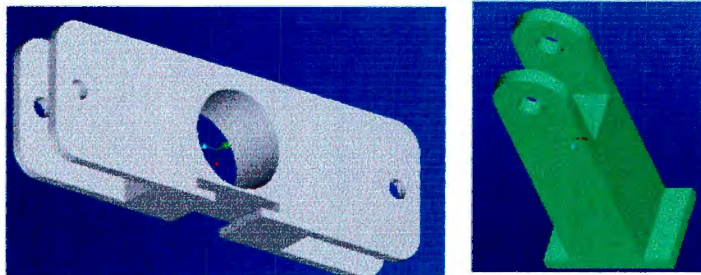
(Esqarriba.prt – Pieza 006). Transmite el movimiento giratorio del pedal al mecanismo de frenado. El rediseño se realizó para evitar los ángulos casi rectos en la unión del anillo con los extremos.



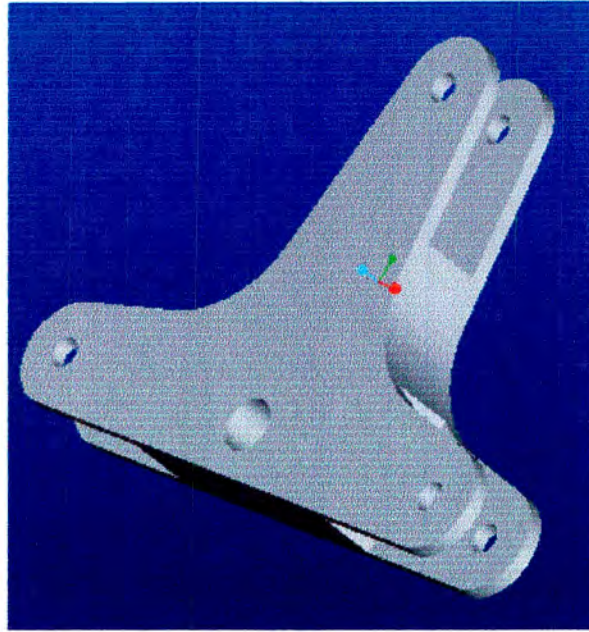
*Fig.3.3.2 Diseño anterior (izquierda) y posterior (derecha) del activador de frenos*

- **Compensador y Acoplador de Guiñeo**

(Blancin.prt – Pieza 007) Compensa el movimiento de dirección en el pedal con el ángulo opuesto en el pedal complementario. En lugar de ensamblar dos piezas se manufactura una sola que cumpla con las mismas funciones de las anteriores. De esta forma la pieza está lista para recibir cuando sea necesario el módulo de sincronización, transmitiendo los movimientos de giro del avión entre los módulos de piloto y copiloto.



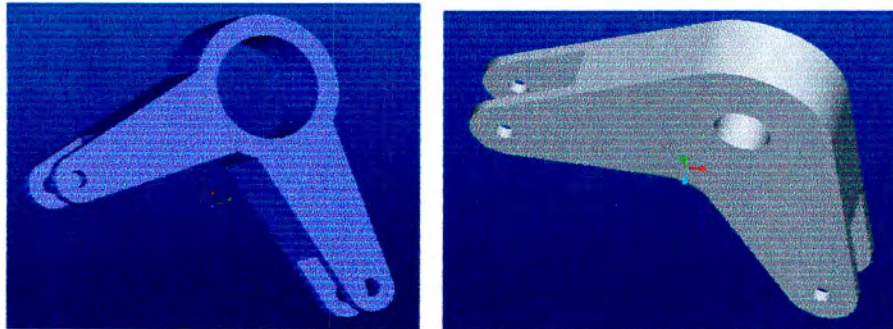
*Fig.3.3.3 Diseño anterior de dos piezas*



*Fig.3.3.4 Nuevo diseño de una sola pieza*

- **Transmisor de frenado a dos ejes**

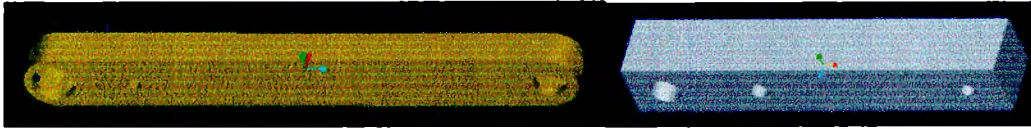
(Esq1.prt – Pieza 005) Transmite el movimiento procedente de la Barral de un movimiento vertical a un horizontal. Forma parte del mecanismo de frenado. El rediseño evitó la delimitación de la circunferencia así como de los ángulos rectos y las líneas oblicuas de los extremos por paralelas.



*Fig.3.3.5. Diseño anterior (izquierda) y posterior (derecha) del transmisor de frenado a dos ejes*

- **Columna de pedal**

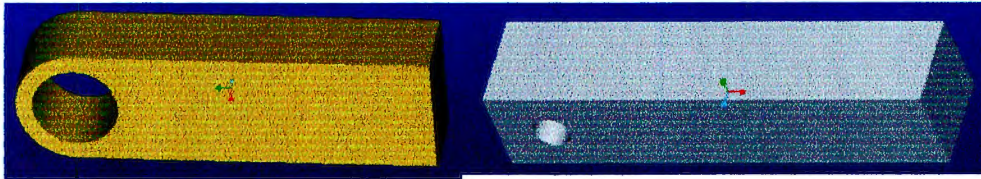
Sostiene al pedal y al sistema de accionamiento de frenos.



*Fig.3.3.6. Diseño anterior (izquierda) y posterior (derecha) de columna de pedal*

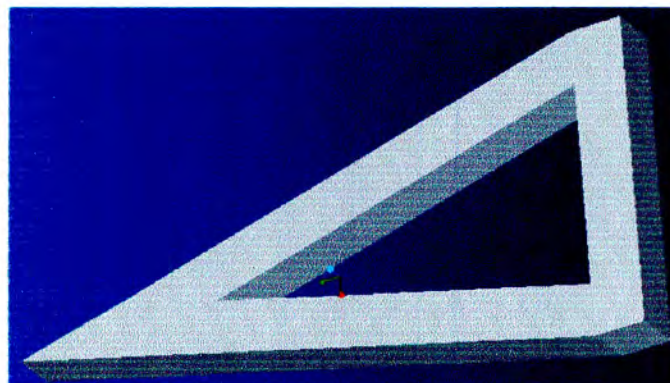
- **Soporte vertical**

Es la unión entre la base y el árbol respecto del cual giran los elementos de dirección y frenos.



*Fig.3.3.7. Diseño anterior (izquierda) y posterior (derecha) de soporte vertical*

Sin embargo, el cambio principal en el diseño de las piezas fue el realizado en la estructura de la base, como consecuencia fundamental del ahorro en material con el fin de disminuir costos. Como se aprecia en la figura 3.3.8, la estructura de la base original estaba formada por un arreglo de tres vigas paralelas entre sí y ensambladas al piso del sistema por cuatro agarraderas para cada viga, empleando un total de doce. El arreglo posterior está formado por una estructura triangular, brindando una buena estabilidad tanto estática como dinámica.

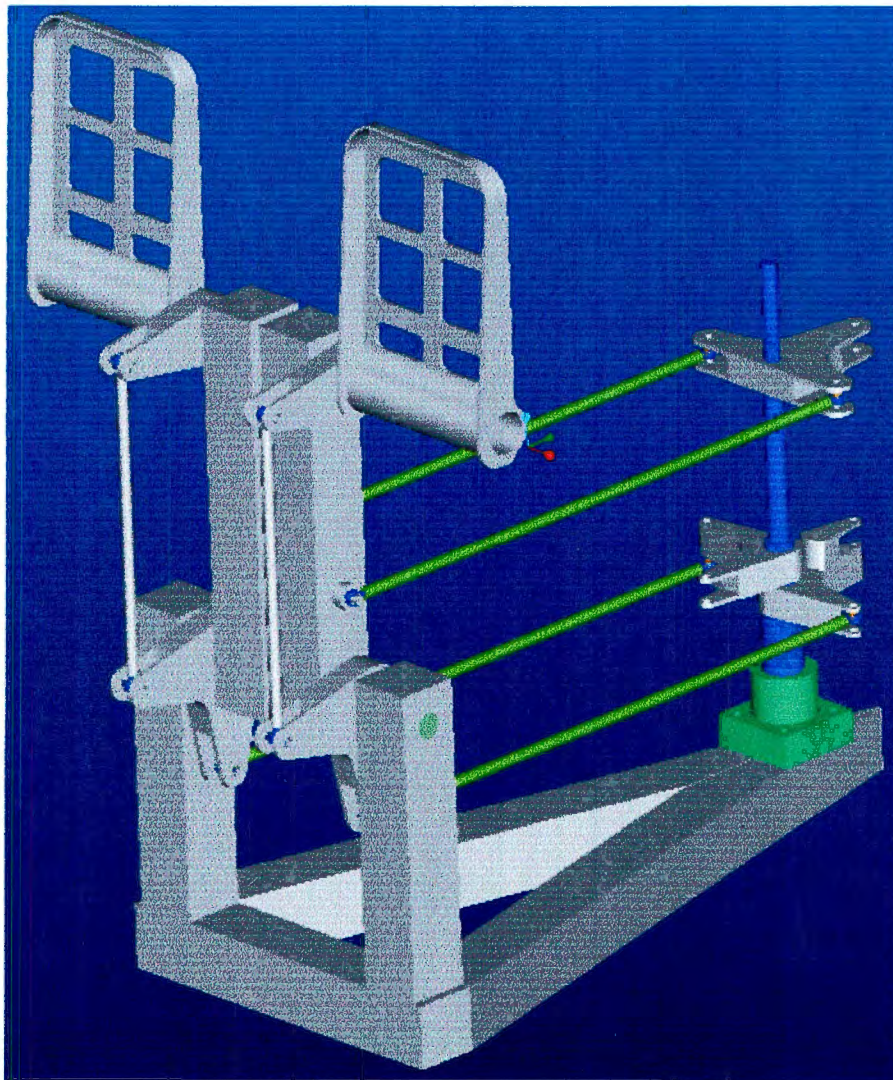


*Fig.3.3.8. Nuevo Diseño de Base Triangular empleando barra cuadrada de Al de 2x2 in*

Además, el nuevo diseño brinda la posibilidad de que esta base sea sujeta al piso de la cabina del simulador por medio de seis agarraderas, ubicadas en el punto medio de cada viga por los dos lados,

o bien, si así se desea, atornillados a la base. Siendo esta posibilidad, más estética y con menos probabilidad de falla con uso de pernos de acero de ½ pulgada.

El montaje de los postes y del eje de sincronización con las vigas se llevará a cabo por empotramiento. Las dimensiones y ángulos del arreglo triangular están determinadas por estos tres elementos del mecanismo. Los tres tubos rectangulares (vigas) serán soldadas para producir una sola pieza triangular.



*Fig.3.3.9 .Nuevo Diseño del Modulo Sencillo incluyendo todas las piezas rediseñadas*



### **3.4 Tolerancias**

En los procesos de manufactura nunca se obtienen dimensiones con el 100% de precisión. En consecuencia, es necesario definir tres tipos de dimensiones para caracterizar las imprecisiones inherentes a cualquier proceso de fabricación. Dichas dimensiones son: **dimensión mínima**, **dimensión nominal** y **dimensión máxima**. El espacio entre la dimensión mínima y la máxima se conoce como **tolerancia**.

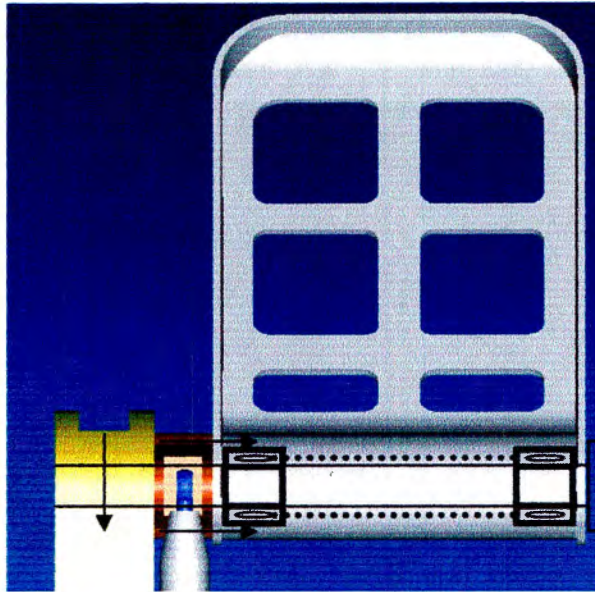
Con base en el seminario expuesto por nuestro Co-Asesor, Grégory Oundjian, así como en la última junta consideramos que en un inicio consideraremos las siguientes clases de precisiones de tolerancias:

- **Tolerancias Generales ISO 2768 – mK**
- **Tolerancias Dimensionales con una Clase de Precisión Media (m)**
- **Tolerancias Geométricas con una Clase de Precisión Media (K)**

### **3.5 Elementos de Máquina**

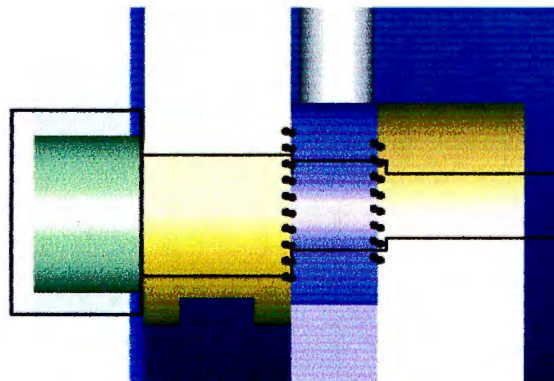
Para ensamblar el mecanismo correspondiente al módulo sencillo de pedales es necesario considerar distintos elementos de máquina que correspondan con la función deseada de cada pieza.

En primera instancia consideramos los elementos necesarios para el ensamble y funcionamiento del pedal así como de sus respectivos sistemas de dirección y frenos. En la Fig. 3.5.1 se observa que el pedal está sostenido por una barra que lo atraviesa completamente y se ensambla con rodamientos en los extremos del mismo permitiendo la rotación sobre su propio eje. A la izquierda del pedal está ensamblado con tornillos (flechas en la figura) el activador de frenos y finalmente la columna (extremo izquierdo en color amarillo) tiene una chaveta asegurando la flecha y ensamblada con un tornillo (flecha vertical apuntando hacia abajo).



**Fig. 3.5.1** *Ensamble del pedal con sus correspondientes elementos de máquina*

La siguiente etapa donde se consideraron los elementos de máquina necesarios para el ensamble es en la parte inferior de la columna del pedal, donde se unirá con el soporte vertical de la base con el eje de la columna así como con el transmisor de frenado a dos ejes. En la figura 3.5.2 se muestra un árbol de diferentes diámetros para evitar el desplazamiento horizontal de los diferentes elementos y por consecuente la posible colisión entre piezas, además los anillos elásticos (líneas punteadas) evitarán el desplazamiento en caso que el cambio de diámetro del árbol no lo evite.



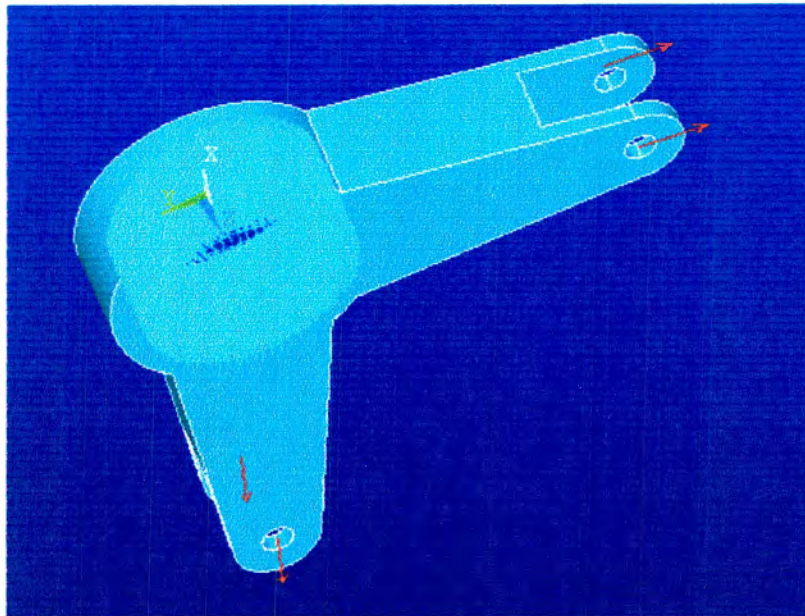
**Fig.3.5.2** *Ensamble de la columna (izquierda), transmisor a dos ejes (centro) y soporte de la base (derecha)*

Si el árbol se hubiese manufacturado con tres diámetros diferentes, se disminuiría la colisión entre piezas, sin embargo esto involucraría un mayor costo de alrededor del 60%. Se decidió dejar el árbol con un juego de dos diámetros diferentes y utilizar anillos para evitar en la misma magnitud colisiones que teniendo tres diámetros distintos y disminuyendo apreciablemente el costo de la barra.

El material del árbol será de latón, debido a su bajo costo y bajo coeficiente de fricción con el aluminio así como la posibilidad en caso de requerirlo de ser lubricado de una forma muy sencilla, evitando consecuentemente el uso de cojinetes en estas zonas de contacto para disminuir la fricción.

## 4. ANÁLISIS DE ELEMENTO FINITO

Para el análisis de elemento finito fue necesario tomar en cuenta ciertos aspectos del funcionamiento y objetivo del mecanismo. Por ejemplo, las fuerzas dinámicas provocadas por las aceleraciones del mecanismo a través de la acción del pie o de la extremidad inferior humana y los propios pesos de las piezas son relativamente pequeñas, por lo que su efecto en algunas piezas puede ser despreciado, como en el caso de los tubos y los balancines, ya que su estado de libre giro y baja fricción de giro no involucran esfuerzos considerables. La siguiente figura muestra los casi nulos esfuerzos producidos en el balancín transmisor a dos ejes debido a su libre rotación. Todos los elementos de este estilo presentan cargas dinámicas a tensión muy pequeñas.

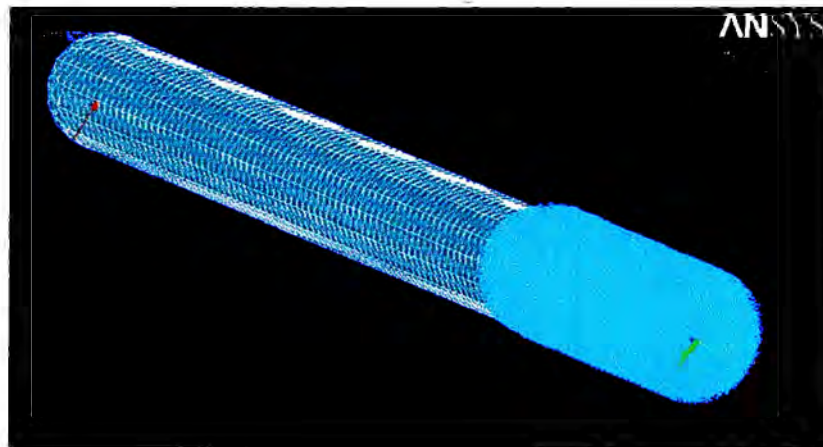


*Fig. 5.1 Balancín de libre giro sujeto a cargas dinámicas de tensión*

Otros materiales sometidos a cargas más críticas como el caso del eje del pedal, los postes y las bases fueron analizados. En el caso del eje del pedal, éste se encuentra sometido a las cargas más críticas del mecanismo, la fuerza del pie de aproximadamente 350 N (Ver Sección - Ergonomía) y el peso del pedal, tomando en cuenta un diámetro pequeño para el soporte de estas cargas de 12.7 mm. Para este caso, el diámetro es restringido por el eje de giro del pedal (aprox. 24mm) además de la necesidad de dejar un espacio extra en este lugar del pedal para el atornillado del balancín de frenado superior.

El programa utilizado para este análisis fue ANSYS, en la siguiente figura se muestra el caso de esta barra ante el caso más drástico de cargas, con un factor de seguridad de 3, es decir una carga distribuida de 1050 N, representando la dinámica de guiñeo, en donde dicha fuerza causa un momento flexionante en la barra, al encontrarse ésta sujeta en el otro extremo al poste. Por ello se seleccionó acero para la resistencia ante estas cargas.

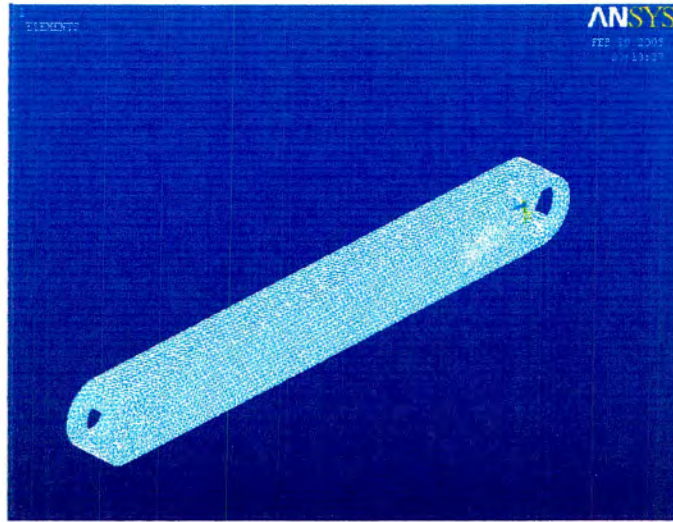
En la siguiente figura se muestra el mayado, las restricciones de desplazamiento así como las cargas aplicadas al tubo.



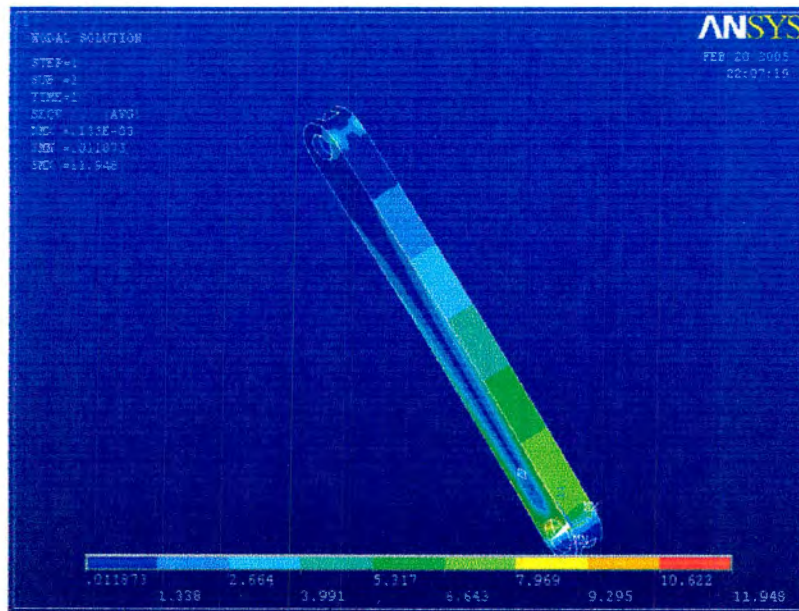
*Fig. 5.2 Malla, carga y condiciones de frontera para el eje del pedal*

Para estos casos el elemento usado fue un Tetraedro de 10 nodos, llamado por ANSYS como Solid92, de tamaño 0.15 pulgadas, el material fue aluminio de  $E=73e9$  y módulo de Poisson de 0.33.

El poste está sometido a torsión por acción del guiñeo y el brazo de palanca que existe entre el pedal y el poste, aproximadamente 154 Nm con el mismo factor de seguridad empleado anteriormente.



**Fig. 5.4** Malla del poste – Elemento Solid92, aluminio, tamaño de malla=5



**Fig. 5.5** Distribución de esfuerzos de von Mises para poste

## 5. MANUFACTURA

### 5.1 Pedal<sup>2</sup>

Después de haber terminado la modelación en CAD, se tomó la decisión de manufacturar los dos pedales en la fresa de control numérico. Antes de manufacturarlos, se utilizó Mastercam (software de CAM) que permitió realizar una simulación de la manufactura. Gracias a la ayuda de esta herramienta se pudieron detectar algunos problemas pero lo más importante fue que se obtuvo el código G que fue utilizado en la máquina de control numérico.

El primer paso consistió en manufacturar un pedal (Pedal #1). Se tuvo que dividir cada pedal en dos partes: primera cara y segunda cara. Para maquinar la primera cara se utilizó un cortador Sandvik de dos insertos de  $\frac{3}{8}$  de pulgada, este cortador se llevó los ángulos de desmoldeo, causando así el primer problema. A continuación se llevó a cabo el ciclo de acabado con un cortador HSS de bola de  $\frac{1}{2}$  pulgada. Se continuó con unos redondeos y su respectivo acabado con el mismo cortador. Por último se le dio un acabado final a la primera cara utilizando el cortador de bola, el espaciamiento (max step over) fue de 1 milímetro. El M. en C. Mario Covarrubias comentó que era necesario reducir este parámetro en un 50%. Se maquinaron los hoyos (pockets) con un cortador Sandvik de dos insertos de  $\frac{3}{8}$  de pulgada. Para esta primera cara se utilizaron cinco programas CNC(001, 002, 003, 004 y 005) [18].



*Figura 5.1.1. Primera cara del pedal*

---

<sup>2</sup> Maquinado realizado en el semestre Ago-Dic 2004, como parte de Proyectos de Ingeniería I

A continuación se volteó la pieza para poder maquinar la otra cara. Se realizó un desbaste y una rectificación con una corona Sandvik de 6 insertos de 3 pulgadas. Se desbastaron cerca de 12 milímetros de la cara superior y 30 milímetros de uno de los bordes. Esto se hizo para poder sujetar la pieza y evitar un daño a las mordazas. Se llevó a cabo un desbaste y su respectivo ciclo de acabado con un cortador HSS de bola de ½ pulgada, en esta ocasión se utilizó un espaciamiento de 0.5 milímetros. Por último se cortó el borde donde fue sujeta la pieza, se removieron 50 milímetros del material con la corona de 3 pulgadas. Para esta segunda etapa se utilizaron tres programas CNC (006,007y 008) [18].



*Figura 5.1.2. Pedal #1 terminado*

Para este primer pedal se tuvieron que invertir 42 horas de trabajo, donde se realizaron diferentes actividades como: calibración, sujeción, ajuste de cero pieza, maquinado, cambios de herramienta y colocación y medición de la pieza. Esta pieza se tomó cerca de 34 horas de maquinado.

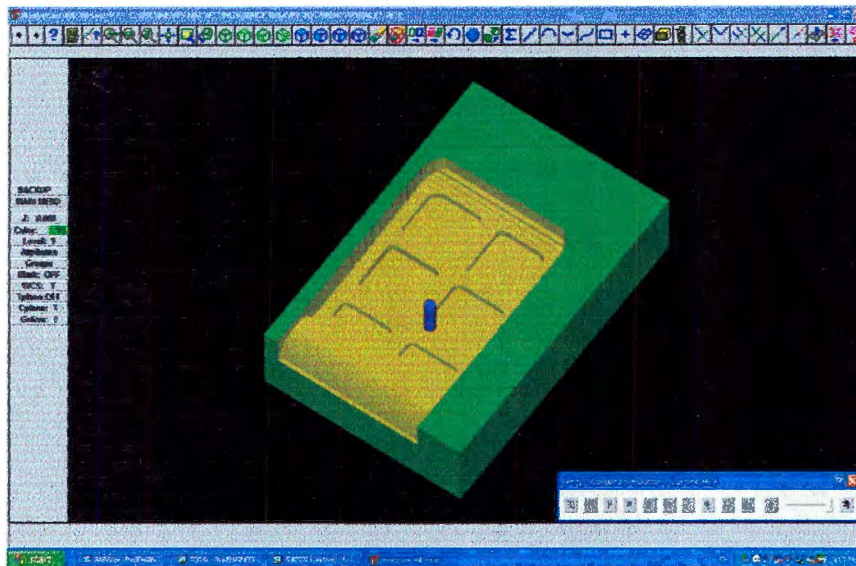
Los parámetros de maquinado fueron los siguientes:

*Tabla 5.1.1. Parámetros de maquinado*

	Parámetros	
		Avance
	Velocidad del husillo	3500 rpm
Desbaste	Max Step Over	4 mm
	Max Step Down	1 mm
Acabado	Max Step Over	0.5 mm



Después de haber platicado con el co- asesor M. en C. Mario Covarrubias, se concluyó que era necesario modificar algunos parámetros para lograr un mejor resultado en el segundo pedal. Se llevó a cabo otra simulación en Mastercam y se prepararon cuatro programas CNC (101, 102, 103 y 104) [18]. Esto optimizó el proceso debido a que se utilizaron cerca de la mitad de los programas que en el primer pedal y se descartó el uso del cortador Sandvik de dos insertos de  $\frac{3}{4}$  de pulgada debido a que había dañado el pedal #1.



*Figura 5.1.3. Simulación en Mastercam*

Para este pedal (Pedal#2) se utilizó el cortador HSS de bola de  $\frac{1}{2}$  pulgada, la mayor parte del tiempo. Se realizó un desbaste y su respectivo ciclo de acabado, después los hoyos en la primera cara. A continuación se volteó la pieza y se desbastó y rectificó la segunda cara utilizando la corona de 3 pulgadas, otra vez se removieron 12 milímetros de la cara superior y 30 milímetros de uno de los bordes. Por último se hizo un desbaste y el ciclo de acabado final para la segunda cara así como la remoción de 50 milímetros de material sobrante en los bordes.

Para este segundo pedal, se tuvo un tiempo total de trabajo de 33 horas. El maquinado tomó cerca de 29 horas. Con respecto al pedal #1 se redujeron cinco horas de maquinado.

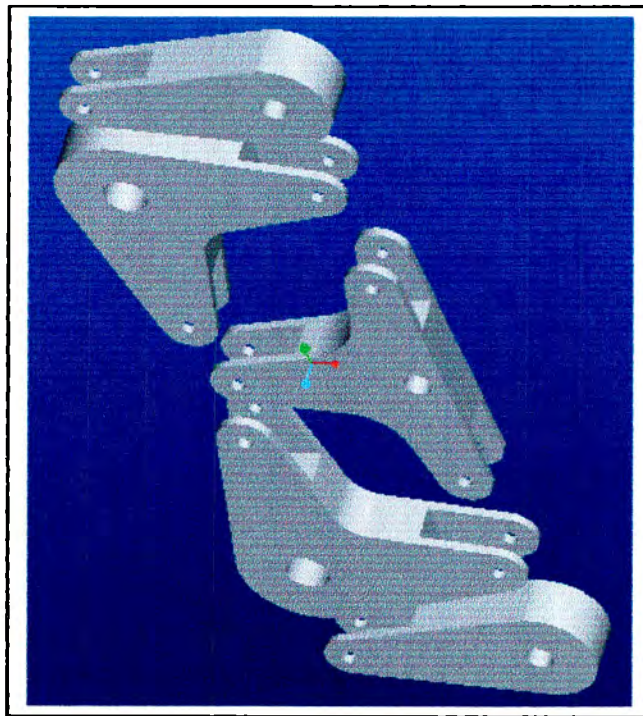
Dentro de los problemas detectados en el proceso, se encontró la necesidad de comprar una herramienta apropiado que permita hacer el barreno en el pedal para poder sujetarlo a la columna. También hubo tiempos muertos debido a que el cambiador automático de herramientas no se

encuentra funcionando. Existieron problemas con los parámetros de maquinado pero fueron resueltos a partir de la segunda cara del primer pedal. Algo importante a considerar es que no se cuenta con la disponibilidad de herramientas de alta velocidad y esto no permite reducir los tiempos de maquinado. Por último se tuvieron que cambiar los programas CNC para el segundo pedal, debido a que tomaba mucho tiempo y era necesario optimizar el proceso.

## 5.2 Balancines

Uno de los pasos principales en la manufactura del mecanismo fue el maquinado de los balancines, tanto de un nivel (1 pulgada de espesor en la pieza en bruto) como de doble nivel (2 pulgadas de espesor en la pieza en bruto). Un reto fue el acomodo de las piezas del mismo nivel de la forma más compacta posible, siempre dejando espacio suficiente para la sujeción de la pieza a la mesa base de la fresa y cuidando que la herramienta de corte no colisionara con las agarraderas.

La siguiente figura muestra el acomodo de los cinco balancines de un nivel necesarios en un módulo sencillo, para ello se necesitó realizar un ensamble virtual de las cinco piezas en ProE determinando las distancias críticas entre cada pieza con sus vecinas. Asimismo se consideró un margen perimetral de la pieza de aluminio en bruto para fines de sujeción.



*Figura 5.2.1. Acomodo espacial de las piezas en ProE*

Una vez verificadas las dimensiones de las piezas en la solera de aluminio se procedió a hacer una simulación de manufactura usando nuevamente el programa MasterCAM. En la siguiente tabla se detallan las operaciones llevadas a cabo así como el tipo de herramientas necesarias al igual que otros parámetros de maquinado.

**Tabla 5.2.2. Operaciones y parámetros de maquinado de las piezas en ProE de la figura 5.2.1**

Tipo de operación	Tipo de herramienta y diámetro	RPMs	Velocidad de alimentación (Feed rate)	Peck (por incrementos)
Corte por contorno	Cortador de 3/8 in	3500	200	No peck
Barreno de centro (14 ptos.)	Broca de centro de 1/8 in	3000	100	No peck
Barreno de cuarto (14 ptos)	Broca de 1/4 in	3000	100	Peck - 2 mm
Barreno de 3/8' (5 ptos)	Broca de 3/8 in	3000	100	Peck - 2 mm
Barreno de 1/2' (5 ptos).	Broca de 1/2 in	3000	100	Peck - 2 mm
Contorno de barreno	Cortador de 3/8'	3000	200	No peck

El número de revoluciones por minuto fue tomando en cuenta la clase de material, así como los parámetros propios de la máquina de CNC. La siguiente tabla muestra los parámetros generales de maquinado del aluminio.

**Tabla 5.2.3. Parámetros generales de maquinado de Al**

Tipo de operación del Al	Velocidad de corte (m/min)	Feed (mm/rev)
Fresado	Careado: 250-265	0.18-0.20
	Corte por contorno: 225-235	0.07-0.19
Barrenado	60-75	0.07-0.51

Así, con estos datos, los parámetros necesarios para maquinar como el número de revoluciones por minuto es obtenido a partir de:

$$RPM = \frac{1000 * V_c}{\pi * \phi}$$

donde:  $V_c$  = velocidad de corte en m/min

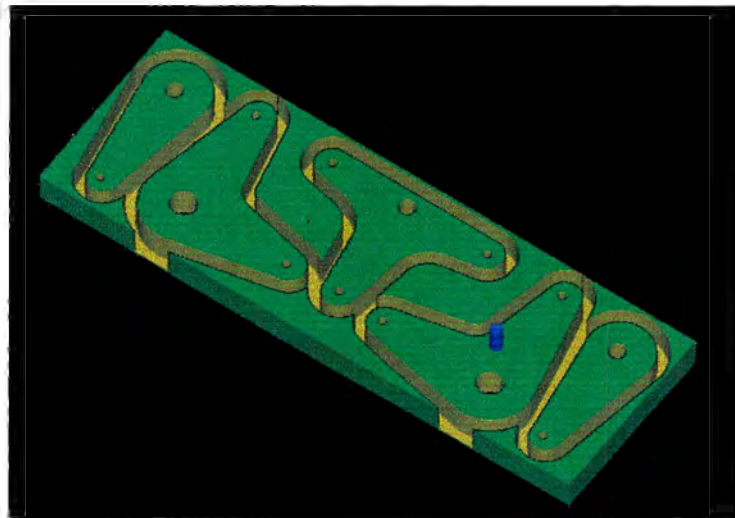
$\phi$  = diámetro de la herramienta en mm

Mientras que la velocidad de alimentación se obtiene por:

$$f_r = RPM * F$$

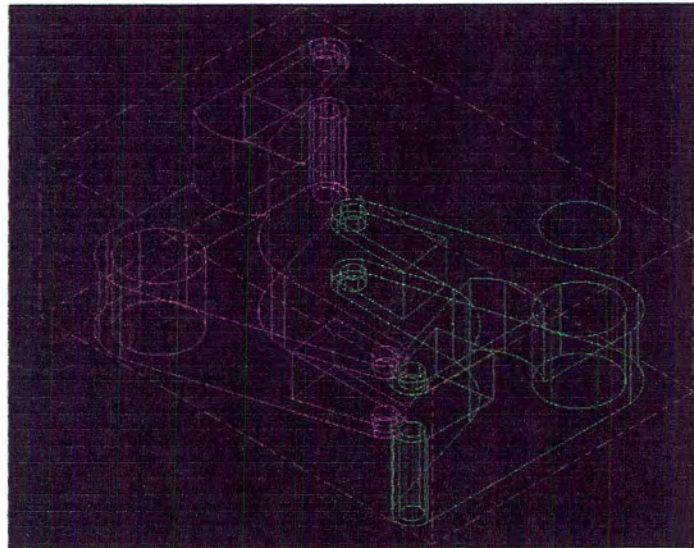
donde:  $f$  = avance en mm/rev

El número de revoluciones obtenidas para el realizar el contorno de las piezas fue de 13,283 RPMs mientras que su velocidad de alimentación fue de 2391. En el caso del barrenado se obtuvieron 3007 RPMs con una velocidad de alimentación de 842 mm/min. Sin embargo, debido a que la capacidad máxima de la fresa de control numérico es de 4000 RPMS, se decidió un número de RPMs entre 3000 y 3500, mientras que para la velocidad de avance los valores oscilaron entre 100 y 200 mm/min como ya fue mostrado en las tablas anteriores. La siguiente figura muestra la simulación final en MasterCAM del maquinado de los balancines de un nivel.



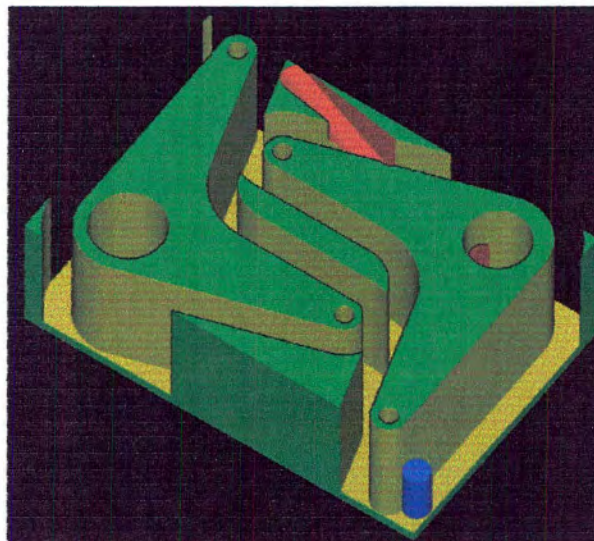
*Figura 5.2.4. Simulación en MasterCAM para piezas de un nivel*

Del mismo modo, para as piezas de dos niveles, el procedimiento fue muy similar, en la siguiente figura se muestra cómo las dos piezas fueron acomodadas.



*Figura 5.2.5. Acomodo espacial en MasterCAM para piezas de dos niveles*

Para manufacturarlas seguimos el mismo procedimiento que en las piezas de un nivel, considerando en todos los parámetros así como en la sujeción que la profundidad de los contornos sería en algunas operaciones de alrededor de 2 in. Abajo se muestra la simulación del maquinado para dos niveles:



*Figura 5.2.6. Acomodo espacial en MasterCAM para piezas de dos niveles*

## 6. ANÁLISIS DE COSTOS

Los costos de un proyecto representan uno de los aspectos más importantes en la industria, no siendo este proyecto la excepción. Ello implicó el rediseño ya mencionado de muchas piezas, así como la selección de material y el uso de un mismo perfil en el número máximo de piezas con el fin de comprar el menor número de perfiles diferentes, y por ende, también, disminuir costos en la compra del material. La siguiente tabla describe el número de piezas y elementos de máquina necesarios por módulo, así como el costo de cada pieza para calcular el costo total del módulo sencillo.

*Tabla 6.1 Descripción y número de piezas necesarias por módulo*

<b>Módulo Sencillo</b>				
<b>Clave</b>	<b>Descripción</b>	<b>No. De piezas/módulo</b>	<b>Costo por pieza</b>	<b>Costo total</b>
esqarriba	Activador de frenos	2	\$25,50	\$51,00
Barra1	Barra de frenado vertical	2	\$22,33	\$44,66
Poste	Poste	2	\$206,00	\$412,00
Esq1	Transmisor de frenado a dos ejes	2	\$103,34	\$206,68
Barra2	Barra de frenado horizontal	2	\$22,33	\$44,66
Barra3	Barra de guiñeo	2	\$22,33	\$44,66
Esq2	Soporte giratorio a dos niveles	1	\$132,30	\$132,30
Esq2b	Transmisor modular de frenado	1	\$132,30	\$132,30
Balacin	Timón Compensador-acoplador de guiñeo	1	\$111,37	\$111,37
			<b>Subtotal1</b>	<b>\$1.179,63</b>
	<b>Módulo de sincronización</b>			
ejesincr	Eje de sincronización trasero	1	\$44,67	\$44,67
Barra4	Barra de sincronización de frenado	3	\$44,66	\$133,98
			<b>Subtotal2</b>	<b>\$178,65</b>
	<b>Juntas</b>			
	Rótulas	4	\$90,00	\$360,00
	Eje 3 niveles-cobre	1	\$44,67	\$44,67
	Eje pedal	1	\$49,00	\$49,00
			<b>Subtotal3</b>	<b>\$453,67</b>
	<b>Base</b>			
	Poste lateral	2	\$66,15	\$132,30
	Piso	3	\$243,00	\$729,00
			<b>Subtotal4</b>	<b>\$861,30</b>
			<b>TOTAL</b>	<b>\$2.673,25</b>

Cabe mencionar que en los perfiles y dimensiones de las piezas fueron también diseñados conforme a medidas estándar de brocas comerciales para barrenar y ensamblar las diferentes piezas. La siguiente tabla relaciona cada pieza por módulo, así como los perfiles y las medidas comerciales disponibles que más se ajustan al diseño. La segunda columna “acople de manufactura” indica por medio de letras la compatibilidad de las piezas para manufacturarse a partir de un mismo perfil, con la finalidad de disminuir costos, debido a que los tramos mínimos a vender por perfil son entre 3.66 y 6.1 m dependiendo del tipo de barra. Así aprovechando la corta longitud de las piezas relativas a la longitud mínima comercial, es posible maquinar varias piezas en un mismo perfil.

*Tabla 6.2 Detalle de compra de material para la manufactura de piezas (NA, no aplica)*

### DETALLE DE COMPRA-MANUFACTURA-DISEÑO DE MATERIAL

	No. Piezas	Acople manufactura	Nombre/Descripción Pieza	Material 1	Perfil	MEDIDAS (mm)			
						Largo	Alto	Ancho / Diámetro	Pared/Espesor
MÓDULO SENCILLO	2	A	Activador de frenos	Aluminio	Solera	90.00	52.00	23.50	NA
	2	C	Barra de frenado vertical	Aluminio	Tubo circular	480.00	NA	19.05	1.524
	2	D	Poste	Aluminio	Barra cuadrada	562.00	50.8	50.8	NA
	2	A	Transmisor de frenado a dos ejes	Aluminio	Solera	150.00	150.00	23.50	NA
	2	C	Barra de frenado horizontal	Aluminio	Tubo circular	480.00	NA	19.05	1.52
	2	C	Barra de guiñeo	Aluminio	Tubo circular	480.00	NA	19.05	1.52
	1	B	Soporte giratorio a dos niveles	Aluminio	Solera	120.25	120.25	47	NA
	1	A	Compensador-acoplador de guiñeo	Aluminio	Solera	186.50	130	23.5	NA
MÓDULO SINCRONIZACIÓN	2	B	Transmisor modular de frenado (2 niveles)	Aluminio	Solera	150	150	47	NA
	3	C	Barra de sincronización de frenado	Aluminio	Tubo circular	985.00	NA	19.05	1.52
JUNTAS	2	E	Eje pedal	Acero	Barra cilíndrica	220	NA	12.70	NA
	1	F	Árbol	Latón	Barra cilíndrica	250	NA	15.875	NA
BASE	2	D	Postes base	Aluminio	Barra cuadrada	210	50.8	50.8	NA
	1	F	Eje balancines	Latón	Barra cilíndrica	450	NA	15.875	NA
	3	D	Vigas base	Aluminio	Barra cuadrada	645	50.8	50.8	NA

Cabe mencionar que para el maquinado de las piezas, también se cumplieron funciones de ahorro de material, y por ende, disminución de costos en el acomodo de piezas en un mismo bloque para evitar desperdicio del material durante el maquinado de cada pieza. En la sección de “Manufactura” se especificará más este aspecto.

Cerca de un 75% en costos fue disminuido al cambiar el material de la base y de los postes, planeado de tubos rectangulares de acero inoxidable por tubo rectangular de aluminio. Un inconveniente fue el espesor de la pared de este último ( 1/16 in ), ya que fue el más grueso que se encontró en los distribuidores de aluminio de la ciudad de México. Esta pared delgada ocasionaría una alta concentración de esfuerzos debido a la carga del peso del eje horizontal y de parte del mecanismo, tema que será tratado en la siguiente sección de análisis de elemento finito. Se pensaba usar acero para dar más rigidez a la estructura así como disminuir el coeficiente de fricción estática entre el eje de balancines hecho cobre con los postes de acero. Sin embargo, la fricción entre el cobre y el tubo de aluminio también es muy baja.

La siguiente tabla resume la compra del material para cada pieza. Los costos fueron comparados y seleccionados respecto al precio de los mismos perfiles en cuatro de las principales distribuidoras de aluminio de la ciudad de México como Metales Návalos, Metales Gutsa, “Casablanca” y “La Paloma”.

*Tabla 6.3 Resumen general de compra de materiales*

Conjunto	Perfil	Material	Dimensiones-tramo
A	barra cuadrada	aluminio	50.8x50.8x 2730
B	barra circular	aluminio	d=12.7 x 250
C	barra circular	aluminio	2500 x d=3/8 in
D	barra circular	cobre/laton	d=12.7 = 1/2 in x 400
E	barra circular	cobre/laton	d= 31.75 = 1 1/4 in x 400
F	solera	aluminio	25.4 x 300
G	solera doble	aluminio	50.8 x 200 x 200



A estos costos debe sumarse, para obtener una idea de los costos económicos del prototipo \$200 a \$250 pesos/ hora de maquinado en CNC. Aproximadamente, la manufactura de todas las piezas de un módulo sencillo se llevaron a cabo en aprox. 38 horas. Dando un total en gastos de maquinado de \$7,600 con un presupuesto de \$200/hora.

Las horas hombre, también es un factor importante a considerar, ya que del ingeniero depende una buena planeación y éxito del proyecto reflejado finalmente en una disminución de costos considerables.

## 7. CONCLUSIONES

Después de haber estudiado diferentes soluciones para el diseño mecánico de los pedales se llegó a un consenso sobre cuál de los mecanismos emplear para sincronizar los sistemas de dirección y frenos de los pedales del piloto y el copiloto. Existieron varios factores determinantes para optar por un diseño en particular. Uno de éstos fue el costo, por lo que se descartó desde un inicio incluir un sistema de engranes debido a su elevado costo. Sin embargo se destaca haber podido apreciar de manera directa, personal y asesorada el mecanismo de los pedales directamente en un B737 NG.

Debido a que los pedales serán parte de un simulador, siempre estuvo presente la necesidad de optimizar el espacio que ocuparán dentro de la cabina así como la apariencia de las partes expuestas directamente al usuario. Estos antecedentes determinaron en gran parte el rumbo que siguió durante la fase final del diseño mecatrónico, así como la selección de los materiales y por ende el proceso de manufactura. Es indispensable cumplir con los requerimientos de espacio dentro de la cabina del simulador.

Antes de comenzar con cualquier proceso de manufactura se deben decidir los materiales así como los elementos de máquina que emplea un mecanismo, puesto que de ello dependen las tolerancias de cada pieza.

Para tener un mejor criterio de selección de los materiales es conveniente realizar un Análisis de Elemento Finito [22], sin embargo la geometría de varias piezas puede afectar el mallado que se realiza y por ende afectar el resultado del análisis. En nuestro caso la pieza más crítica es la barra que sostiene y acopla al pedal con la columna vertical. Con base en el FEM, pudimos observar fenómenos como torsión, flexión y condiciones de carga para mejorar el diseño de la misma.

Como parte de la planeación de la manufactura existe siempre la necesidad del rediseño de algunas piezas. Ello siempre dirigido a simplificar la manufactura, disminuir los costos del prototipo y cumplir con la clase de precisión requerida para las tolerancias, incluyendo el mantenimiento y la facilidad de ensamble. En esta etapa fue conveniente modificar la estructura de la base, rediseñándola de manera que la materia prima de la misma fuera compartida por otras piezas del

mecanismo, disminuyendo los costos y facilitando la manufactura, el ensamble y su posterior mantenimiento. Otro aspecto importante al momento de planear la manufactura es considerar la disponibilidad de los materiales debido a que ello puede implicar retrasos en los tiempos planeados o bien implicar rediseños como en nuestro caso.

Las tolerancias generales pueden aumentar o disminuir de nivel de precisión según las necesidades del ensamble y el avance del mismo. Todo lo anterior se resume en los planos o dibujos de cada pieza así como del ensamble. Por ende, el diseño mecánico así como su publicación en planos de piezas y planos de ensamble siempre estará directamente ligado a la manufactura.[19] Y por si ello no fuera una relación muy fuerte, siempre se deben tomar en cuenta los materiales disponibles en el lugar de la manufactura. En el caso de la base y otras cuatro piezas, el rediseño lo definió la dificultad del ensamble de dos de las cuatro piezas con la base puesto que el tubo rectangular de aluminio del que estaban formadas poseía una pared demasiado delgada que concentraba muchos esfuerzos en puntos críticos lo que al final ocasionaría múltiples problemas como un juego excesivo entre piezas. Para evitar dichas concentraciones y sus respectivas consecuencias, pero manteniendo la repartición de la materia prima de la base con las otras cuatro piezas del módulos consideramos el cambio a una barra cuadrada de 2x2 in que no interfería con los barrenos previstos y nos daba la posibilidad de aumentar nuestras opciones para ensamblar la propia base así como con el resto del módulo de los pedales.

Para seleccionar el material de los pedales, la única parte del sistema expuesta al usuario y la primera que manufacturamos, se escogió al aluminio por ser un metal ligero y fácil de maquinarse. El proceso de manufactura que se empleó para los pedales, el fresado y torneado CNC, son procesos que se reservan para el prototipo y que de ninguna forma sería conveniente para producir los pedales en serie, ya que los tiempos del proceso son sumamente largos lo que resultaría en un costo muy alto y bajos volúmenes de producción. El enfoque para la producción en serie que se tiene, después de haber observado las ventajas y desventajas del CNC, es emplear los pedales maquinados como base para realizar moldes, ya sean de inyección o de arena.

En cuanto al diseño final, es importante resaltar que se modificó de manera que los sistemas de frenos y dirección de los pedales se ubicaran ambos detrás de los pedales (abajo y al frente del usuario), ya que en el diseño original se encuentran dispuestos en lados opuestos. Dicha modificación también se hizo pensando que los sistemas del piloto y copiloto deben ser modulares,

es decir deben ser fácilmente acoplables ya que se tiene la intención de ofrecer cada par de pedales por separado y con o sin retorno de fuerza. A todo lo anterior se suma que el sistema debía ser de fácil mantenimiento e instalación. Nunca se pueden pasar por alto al momento del diseño los factores de instalación, mantenimiento y escalabilidad.

## **8. TRABAJO A FUTURO**

Como perspectivas para este proyecto se plantean el diseño y la implementación del sistema háptico del retorno de fuerza. Asimismo se deberán acoplar los sensores y la transmisión de la fuerza de retorno hacia el mecanismo y por ende a los pedales. Todo el sistema de los pedales, junto con el retorno de fuerza, deberá ser montado e integrado a la consola del simulador. Para que dicha integración sea completa, se tendrá que manufacturar y ensamblar otro módulo sencillo de pedales.

En cuanto al mecanismo como tal, recomendaríamos disminuir el peso por cuestiones de movilidad y portabilidad. Para ello sería conveniente suplir todas las piezas que emplearon la barra cuadrada de Al por un tubo del mismo material, rectangular y con una pared gruesa de alrededor de 5 mm. de espesor.

## 9. REFERENCIAS

- [1]. S.P. Sudarsan, T. Yocum, D.P. Haanpaa. "Evaluation of Preferred Motor Torque Levels for Force Feedback", *Computational Cybernetics and Simulation*, 1997 IEEE International Conference, 12-15 Oct.1997, pp. 1073-1077.
- [2]. *Manual de Mantenimiento: Boeing 737-600/700/800/900*, Boeing, págs. 5-14.
- [3]. *Manual de Diseño de Elementos de Máquinas*, Dr. Gonzalo González Rey, Cuba, 2002.
- [4]. Entrevista el miércoles 18 de agosto de 2004 con el Sr. Rodrigo Pozas, director general de la empresa Frecuencia 122.1.
- [5]. *Boeing 737 Family*, The Boeing Company, Consultado el 18 de agosto de 2004. <http://www.boeing.com/commercial/737family/flash.html>
- [6]. *Simulation Systems*, Flight Safety International, Consultado el 18 de agosto de 2004. <http://www.flightsafety.com/ssd.htm>
- [7]. *Servicios*, Frecuencia 122.1, Consultado el 18 de agosto de 2004. <http://www.122puntol.com/index1.htm>
- [8]. Visita al hangar de la Procuraduría General de la República.
- [9]. visita al hangar de mantenimiento de Aeroméxico. 30 de septiembre de 2004. Ing. Pablo Ramón López Escalante. Subdirector de Ingeniería y Aseguramiento de la Calidad.
- [10]. Háptica, Consultado el 2 de octubre de 2004. <http://www.nimarts.com/haptic/>
- [11]. Ivan Sutherland, *Sketchpad: A man-machine graphical communication system*, Garland Pub, 1980, 176 pages.
- [12]. D.S. Kwon. "Haptic Experimentation on a Hybrid Active/ Passive Force Feedback Device", IEEE International Conference on Robotics & Automation, Washington, May 2002.
- [13]. ASM International. "Metals Handbook", Second Edition. The Materials Information Society. United States of America, 1998.
- [14]. S. Kalpakjian, S. R. Schmid. "Manufacturing Engineering and Technology", Fourth Edition. Prentice Hall. United States of America, 2001.
- [15]. *An Introduction to Human Factors Engineering*, Christopher Wickens, Longman, 1998.
- [16]. *The Occupational Ergonomics Handbook*, Waldemar Karwowski, CRC Press, 1999.

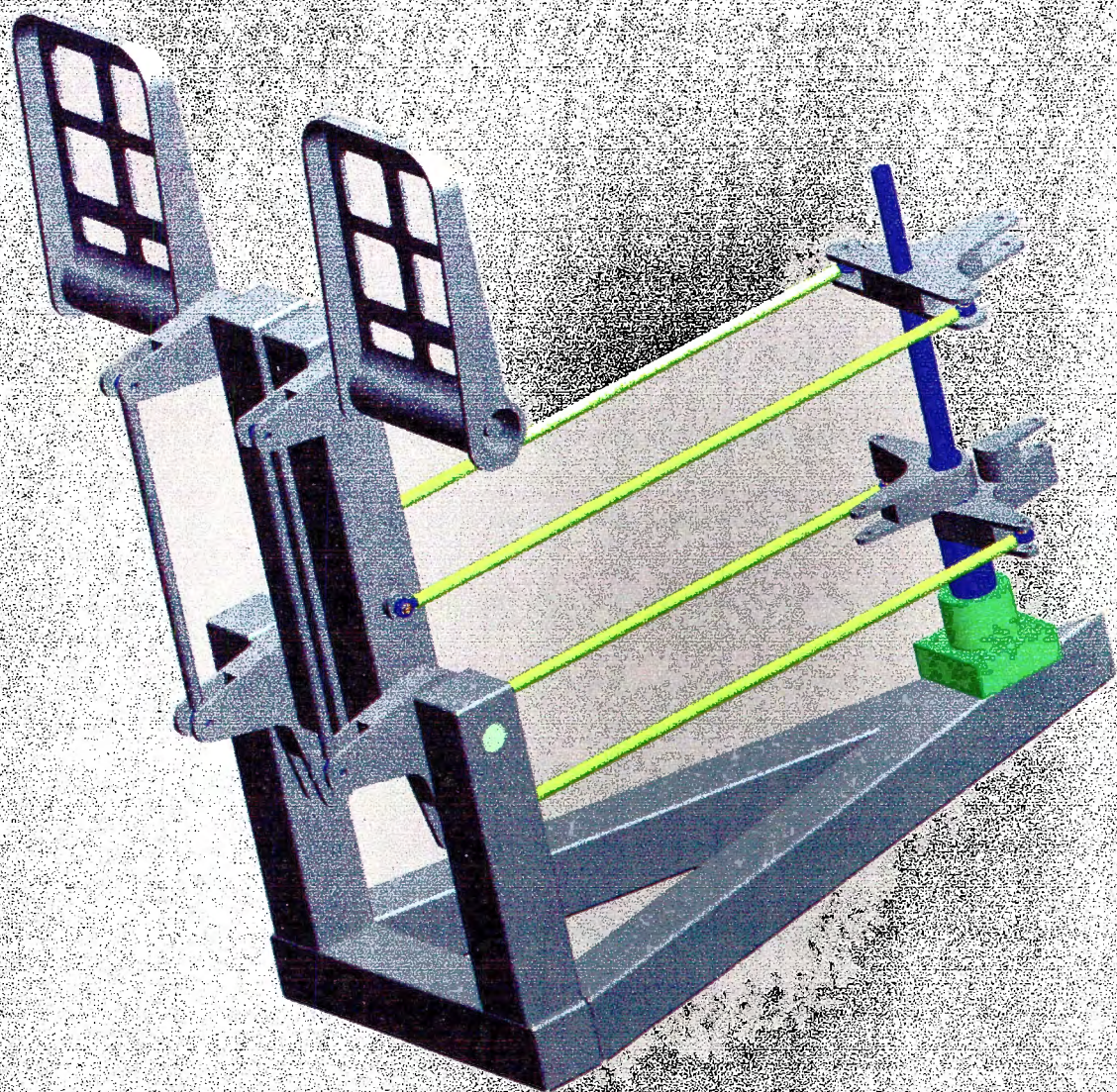
- [17]. *Ergonomía 3*, Pedro R. Mondelo, Alfaomega, México, 2001.
- [18]. *Simulador de vuelo: Pedales de Boeing 737NG*, CD, México, 2004.
- [19]. Chevalier A., *Dibujo Industrial*, Francia, 1992.
- [20]. Baker, A.J. *Finite Elements 1-2-3*, McGraw-Hill, E.U., 1991.
- [21]. R. Norton, *Design of Machinery*. Ed. McGraw-Hill, 2a d. Singapur, 1999
- [22]. Saeed Moeaveni. *Finite Element Analysis. Theory and Application with ANSYS*. Ed. Prentice-Hall. USA, 1999
- [23]. Gere, Timoshenko. *Mecánica de Materiales*. Ed. Thompson Editores, 4ª Edición. México, 1999.

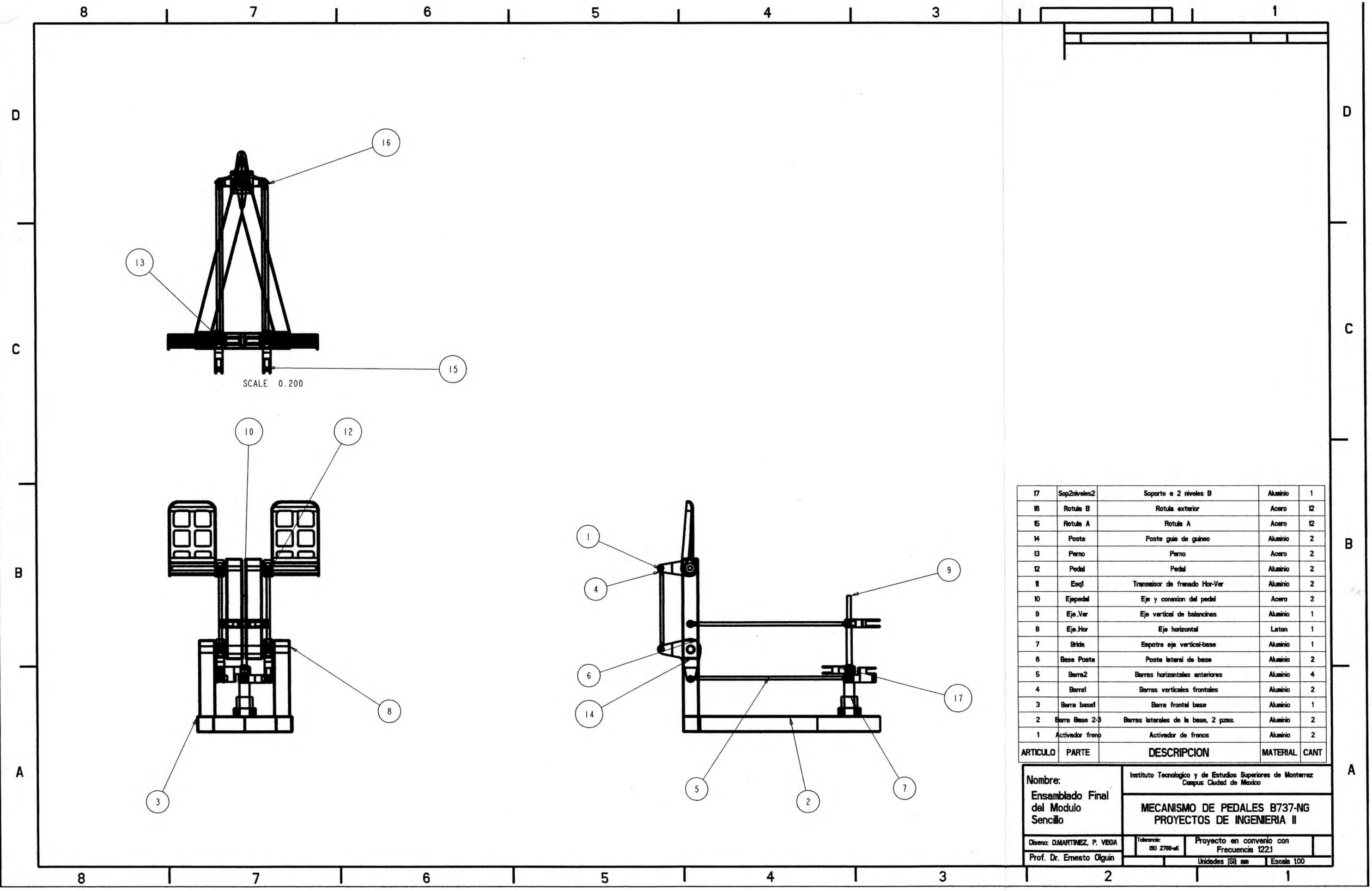
## 10. ANEXOS

En las siguientes páginas se muestran los planos de las piezas con especificaciones dimensionales, de diseño y de tolerancias para su futura producción en serie o las mejoras que se deseen realizar.

Tecnológico de Monterrey, Campus Ciudad de México  
**Biblioteca**

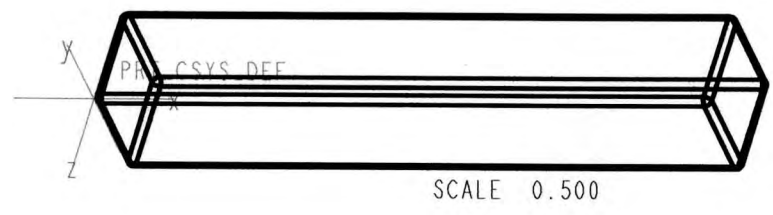




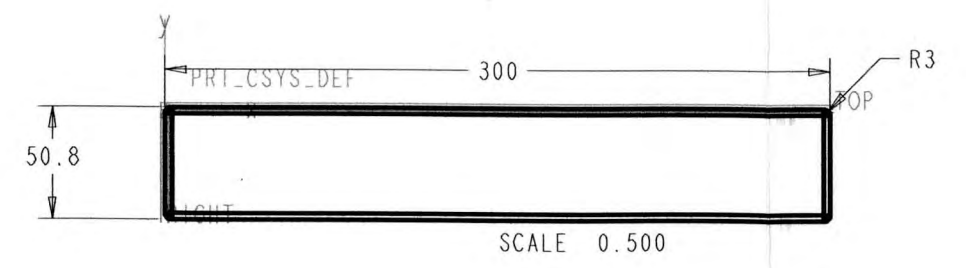
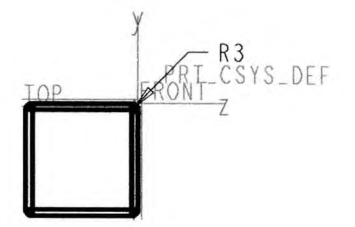


ARTICULO	PARTE	DESCRIPCION	MATERIAL	CANT
17	Sop2niveles2	Soporte a 2 niveles B	Aluminio	1
16	Rotula B	Rotula exterior	Acero	12
15	Rotula A	Rotula A	Acero	12
14	Poste	Poste guia de guineo	Aluminio	2
13	Perno	Perno	Acero	2
12	Pedal	Pedal	Aluminio	2
11	Esq1	Transisor de frenado Hor-Ver	Aluminio	2
10	Ejepedal	Eje y conexion del pedal	Acero	2
9	Eje.Ver	Eje vertical de balancines	Aluminio	1
8	Eje.Hor	Eje horizontal	Latan	1
7	Brida	Empotre eje vertical-base	Aluminio	1
6	Base Poste	Poste lateral de base	Aluminio	2
5	Barra2	Barras horizontales anteriores	Aluminio	4
4	Barra1	Barras verticales frontales	Aluminio	2
3	Barra base1	Barra frontal base	Aluminio	1
2	Barra Base 2-3	Barras laterales de la base, 2 pzas.	Aluminio	2
1	Activador freno	Activador de frenos	Aluminio	2

Nombre:		Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey Campus Ciudad de México	
Ensamblado Final del Modulo Sencillo		MECANISMO DE PEDALES B737-NG PROYECTOS DE INGENIERIA II	
Diseño: DMARTINEZ, P. VEGA		Tolerancia:	Proyecto en convenio con
Prof. Dr. Ernesto Olguin		ISO 2768-mK	Frecuencia 1221
		Unidades [S] mm	Escala 100

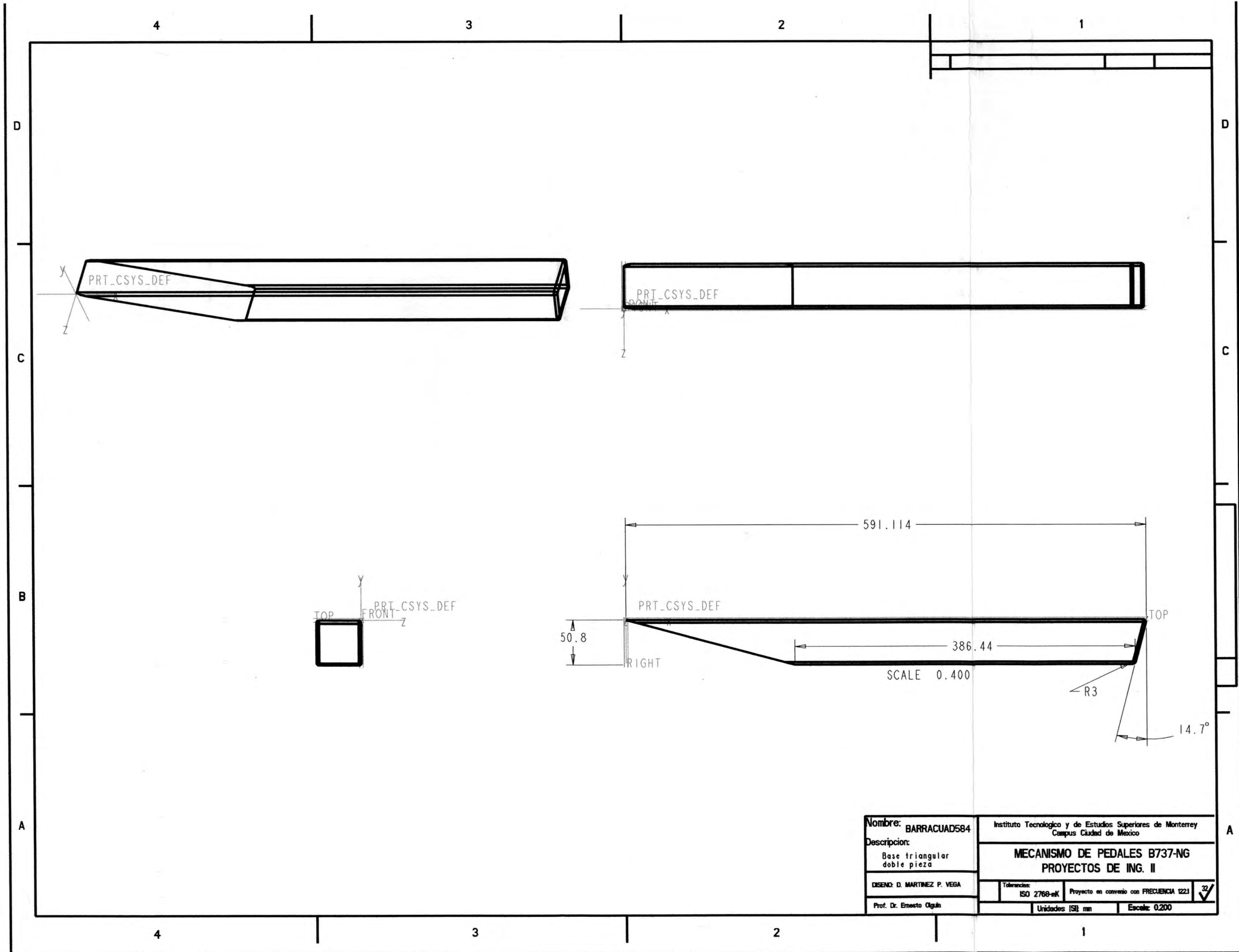


SCALE 0.500

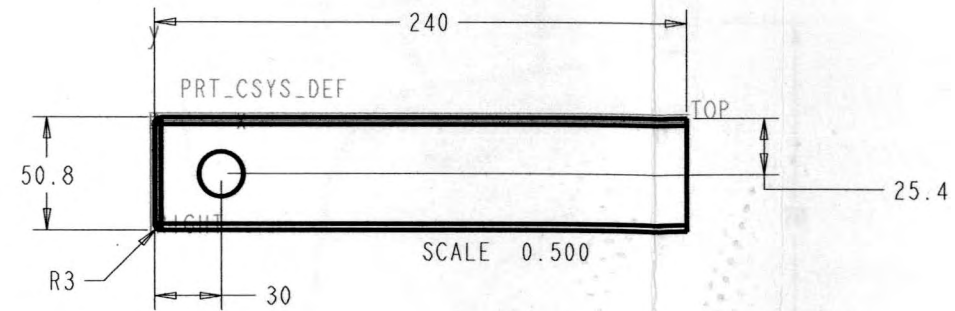
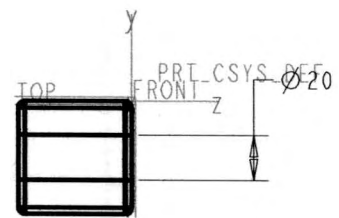
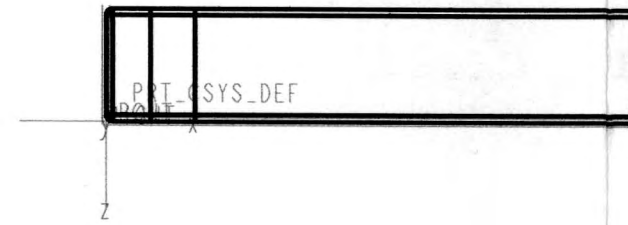
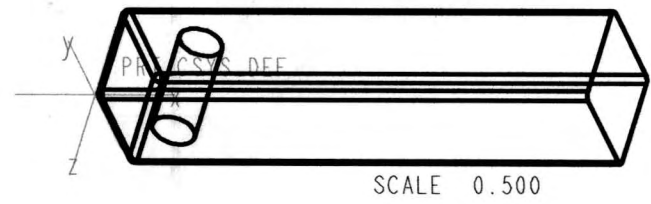


SCALE 0.500

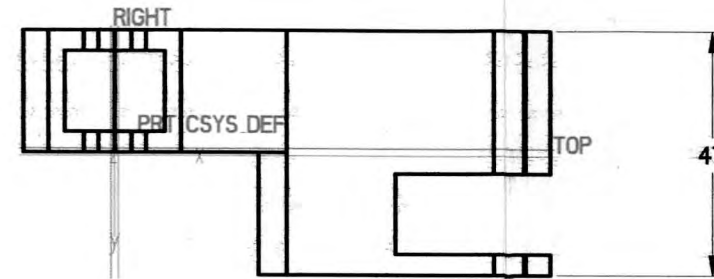
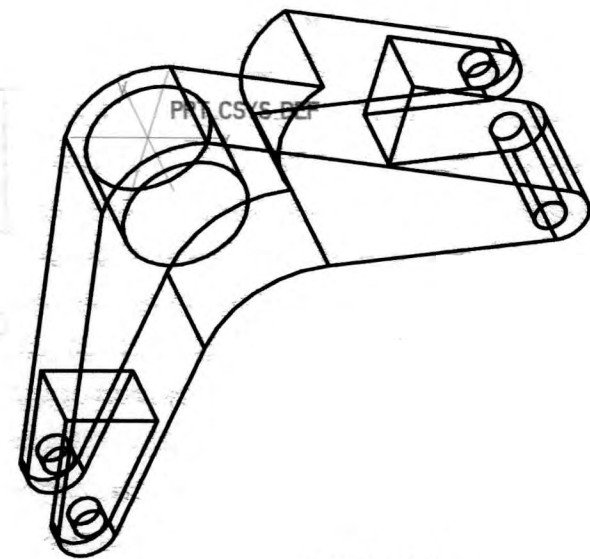
Nombre: BARRACUAD300	Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey Campus Ciudad de México		
Descripción: Base Triangular 1 pieza	MECANISMO DE PEDALES B737-NG PROYECTOS DE ING. II		
DISEÑO: D. MARTINEZ P. VEGA	Tolerancias: ISO 2768-mK	Proyecto en convenio con FRECUENCIA 1221	32/
Prof. Dr. Ernesto Olguín	Unidades: [SI] mm	Escala: 0.500	



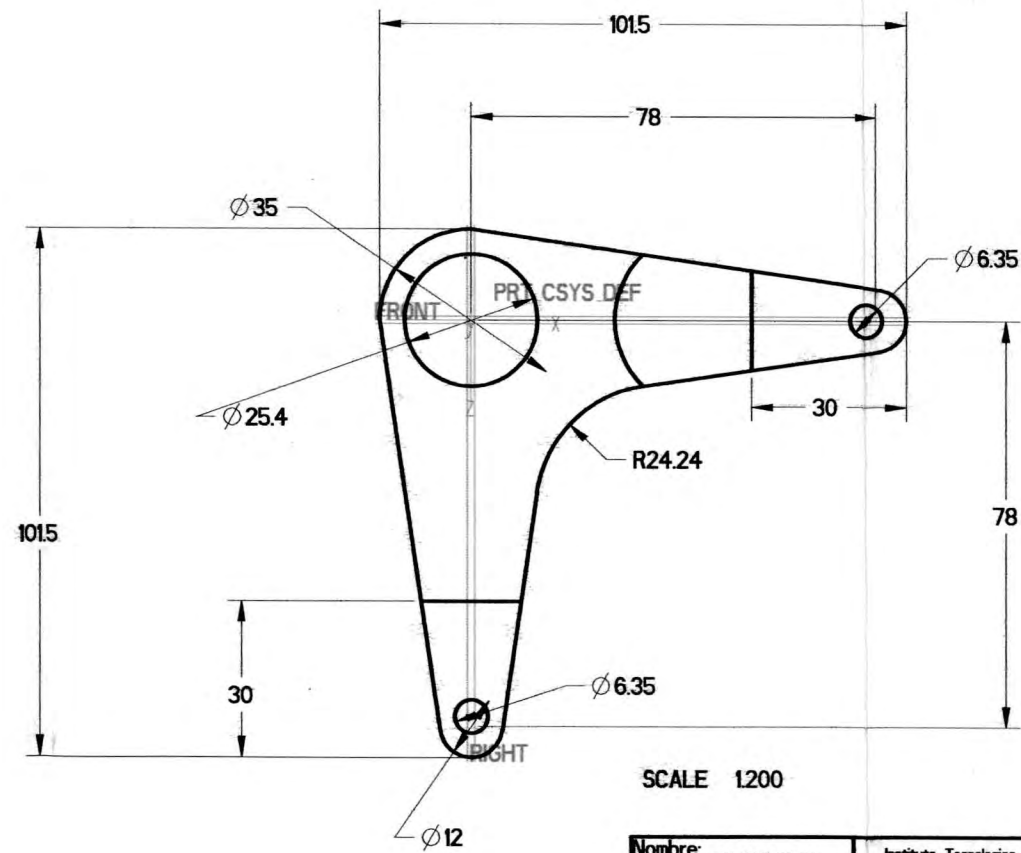
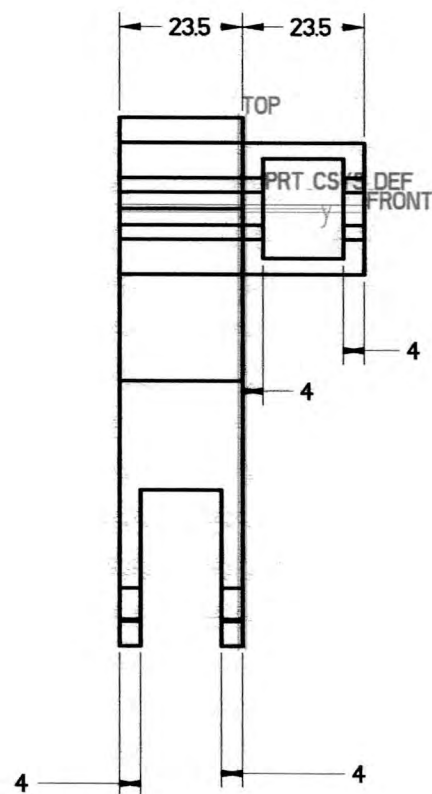
<b>Nombre:</b> BARRACUAD584	Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey Campus Ciudad de México	
<b>Descripción:</b> Base triangular doble pieza	<b>MECANISMO DE PEDALES B737-NG</b> <b>PROYECTOS DE ING. II</b>	
<b>DISEÑO:</b> D. MARTINEZ P. VEGA	Tolerancias: ISO 2768-mK	Proyecto en convenio con FRECUENCIA 1221 <input checked="" type="checkbox"/> 32
Prof. Dr. Ernesto Olgún	Unidades [SI] mm	Escala: 0.200



Nombre: POSTENUEVO2	Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey Campus Ciudad de México		
Descripción: Postes laterales de base	MECANISMO DE PEDALES B737-NG PROYECTOS DE ING. II		
DISEÑO: D. MARTINEZ P. VEGA	Tolerancias: ISO 2768-mK	Proyecto en convenio con FRECUENCIA 1221	32/
Prof. Dr. Ernesto Olgún	Unidades [SI] mm	Escala: 0.500	

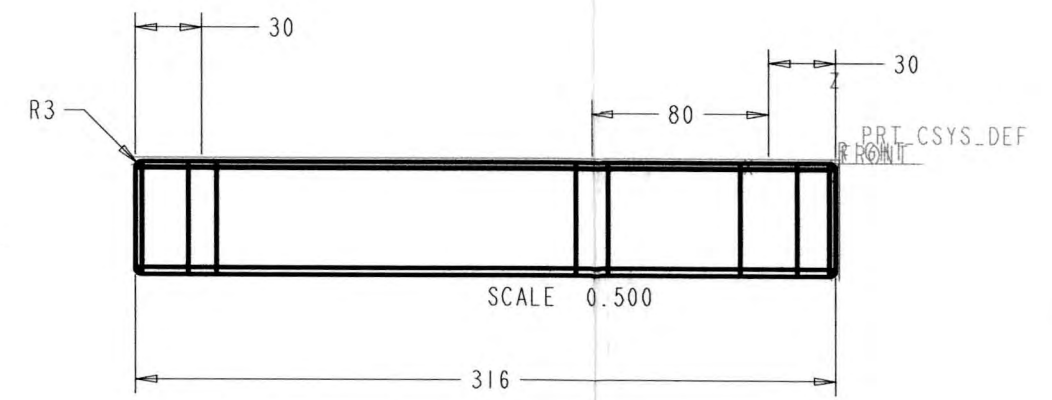
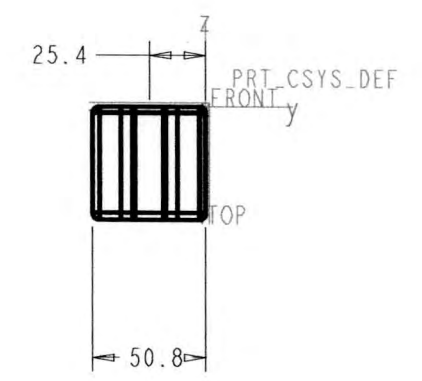
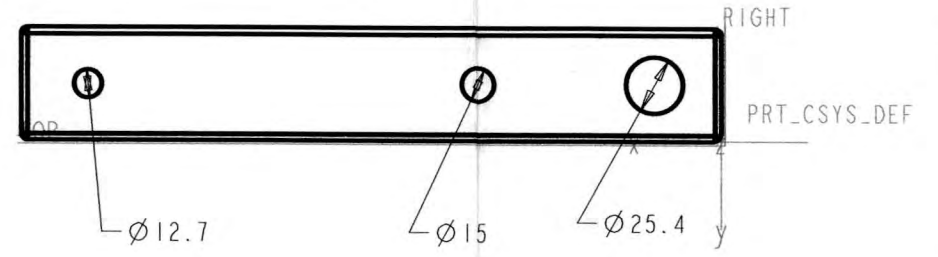
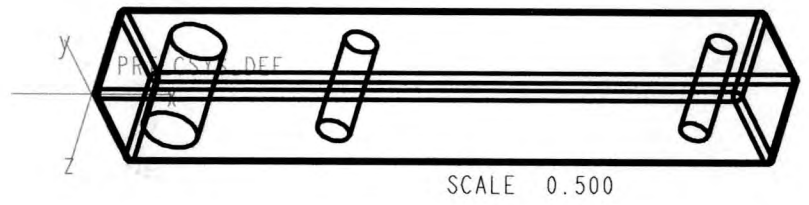


SCALE 1200

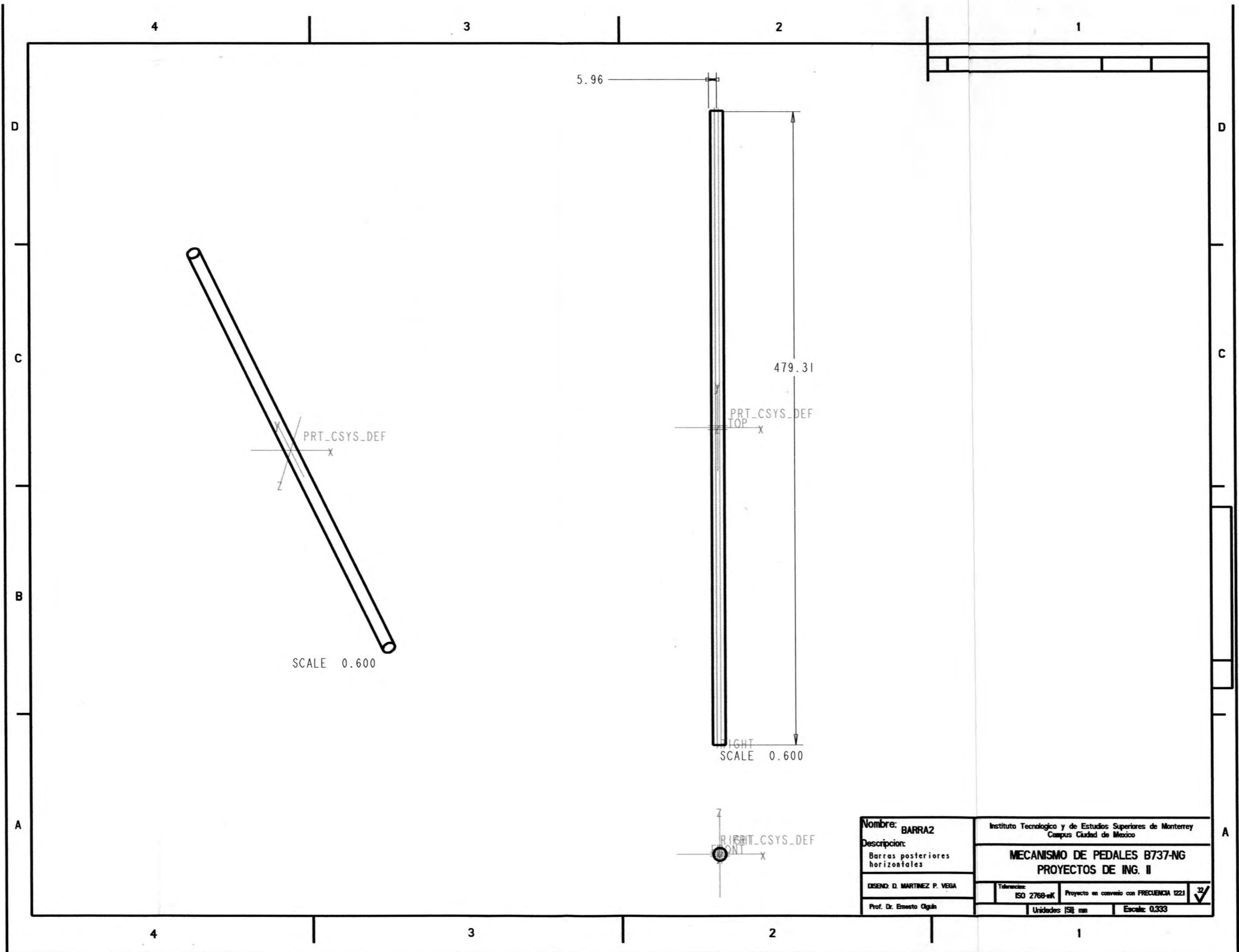


SCALE 1200

Nombre: SOP2NIVELES	Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey Campus Ciudad de México	
Descripción: Soporte giratorio a dos niveles	MECANISMO DE PEDALES B737-NG PROYECTOS DE ING. II	
DISEÑO: D. MARTINEZ P. VEGA	Tolerancias: ISO 2768-mK	Proyecto en convenio con FRECUENCIA 1221 <input checked="" type="checkbox"/>
Prof. Dr. Ernesto Olguín	Unidades [SI] mm	Escala: 1000



Nombre: POSTE	Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey Campus Ciudad de México		
Descripción: Poste guía de guiñeo	MECANISMO DE PEDALES B737-NG PROYECTOS DE ING. II		
DISENO: D. MARTINEZ P. VEGA	Tolerancias: ISO 2768-mK	Proyecto en convenio con FRECUENCIA 1221	32
Prof. Dr. Ernesto Olgún	Unidades [SI] mm	Escala: 0.500	



SCALE 0.600

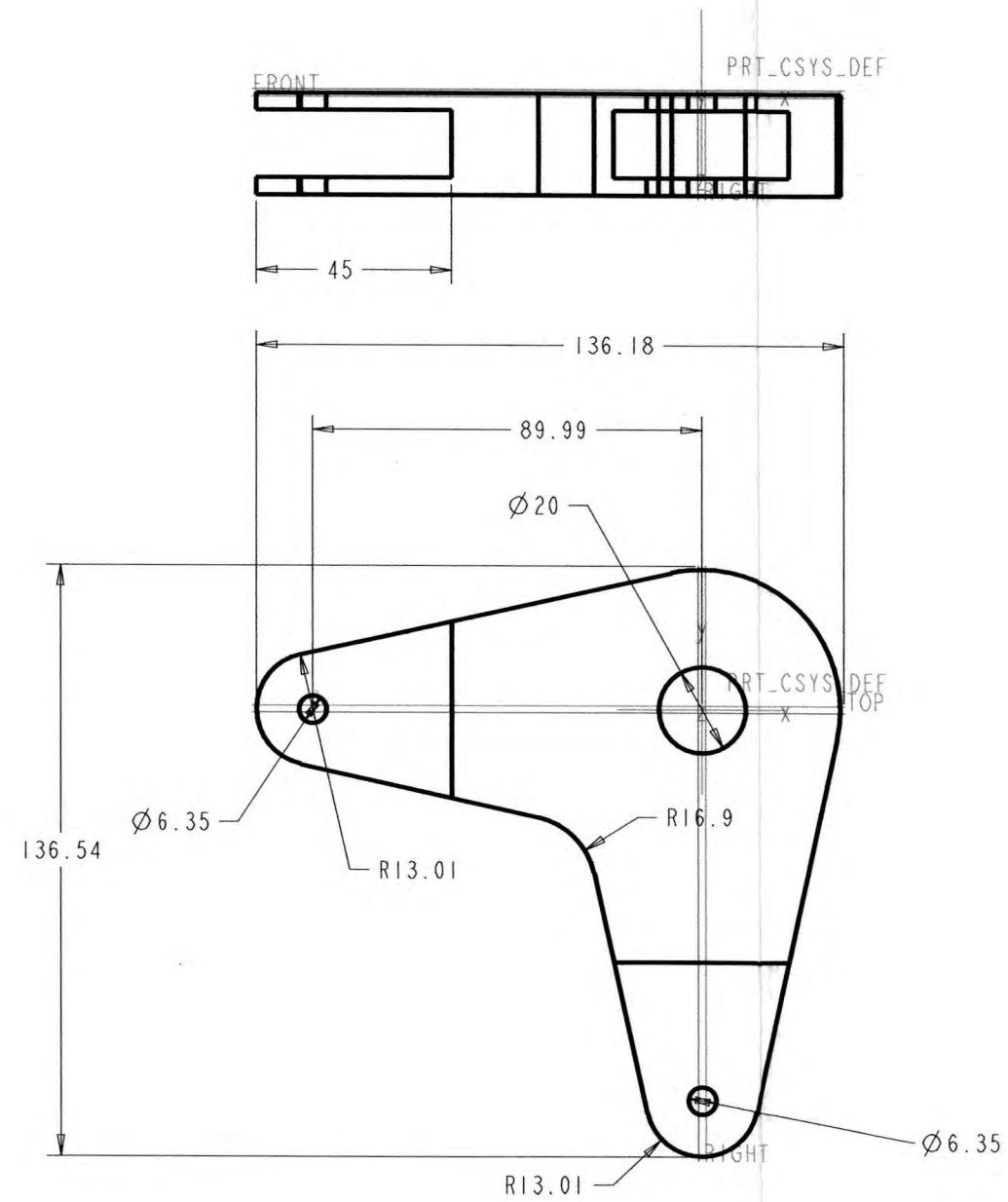
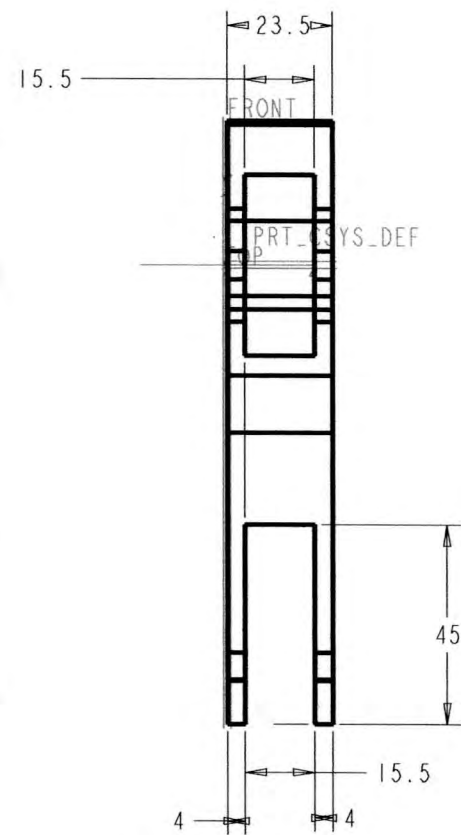
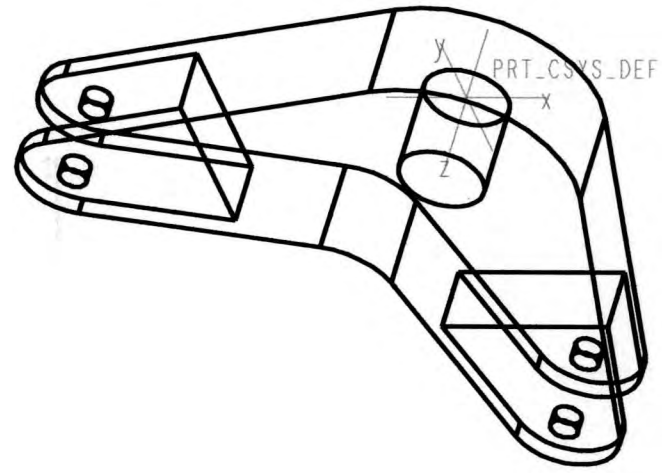
RIGHT SCALE 0.600

Nombre: **BARRAZ**  
 Descripción:  
 Barras posteriores horizontales  
 DISEÑO: D. MARTINEZ P. VEGA  
 Prof. Dr. Ernesto Ogún

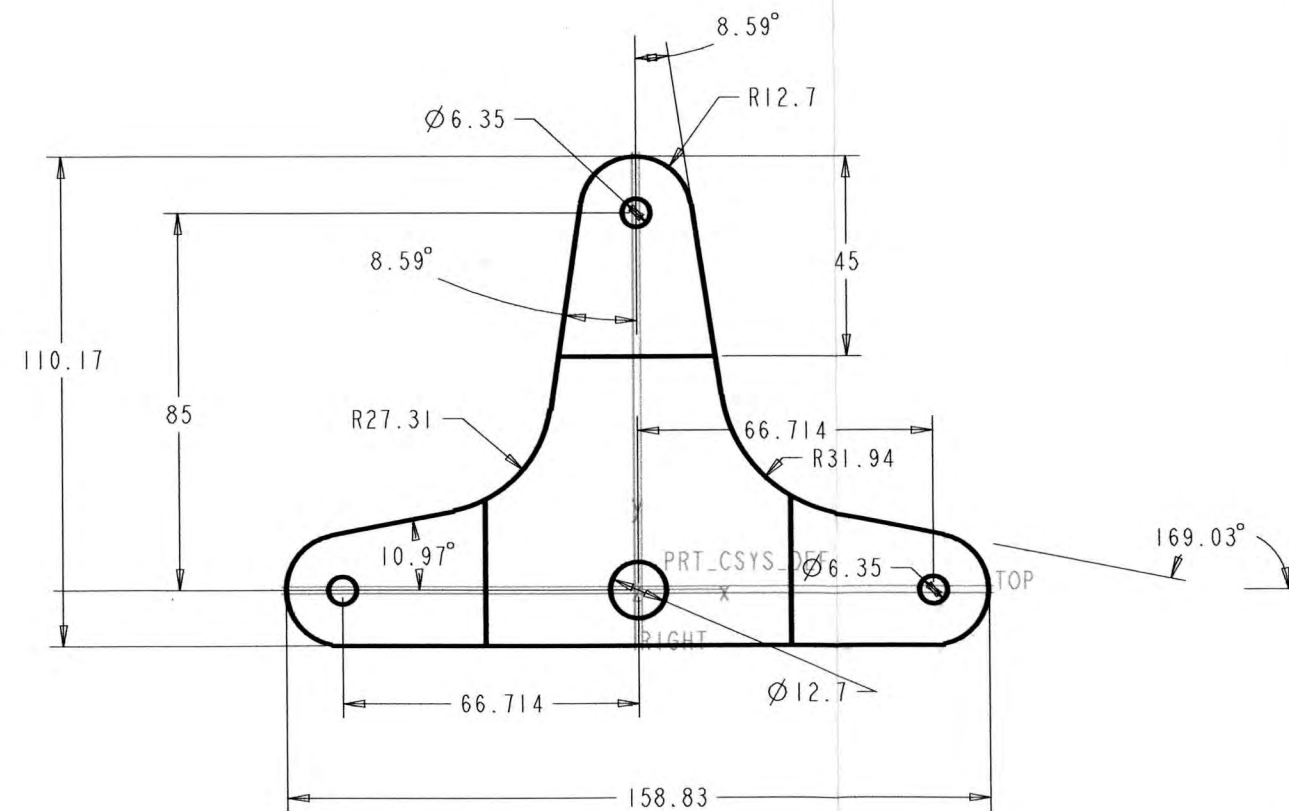
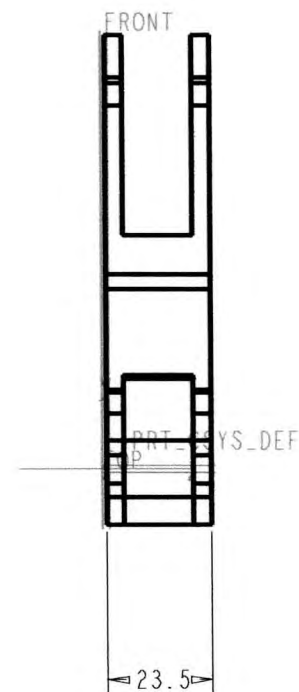
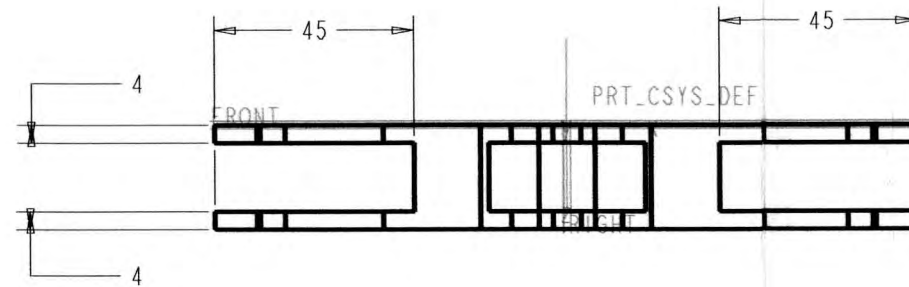
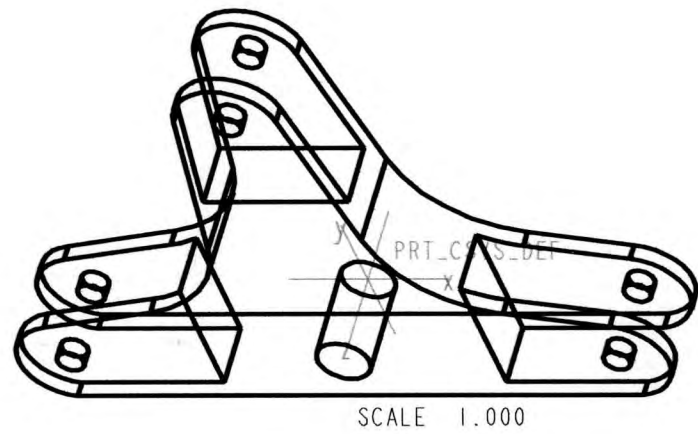
Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey  
 Campus Ciudad de México  
**MECANISMO DE PEDALES B737-NG**  
**PROYECTOS DE ING. II**  
 Tablas: ISO 2768-mK Proyecto en convenio con FRECUENCIA 1221  
 Unidades: mm Escala: 0.333

32





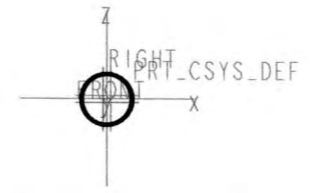
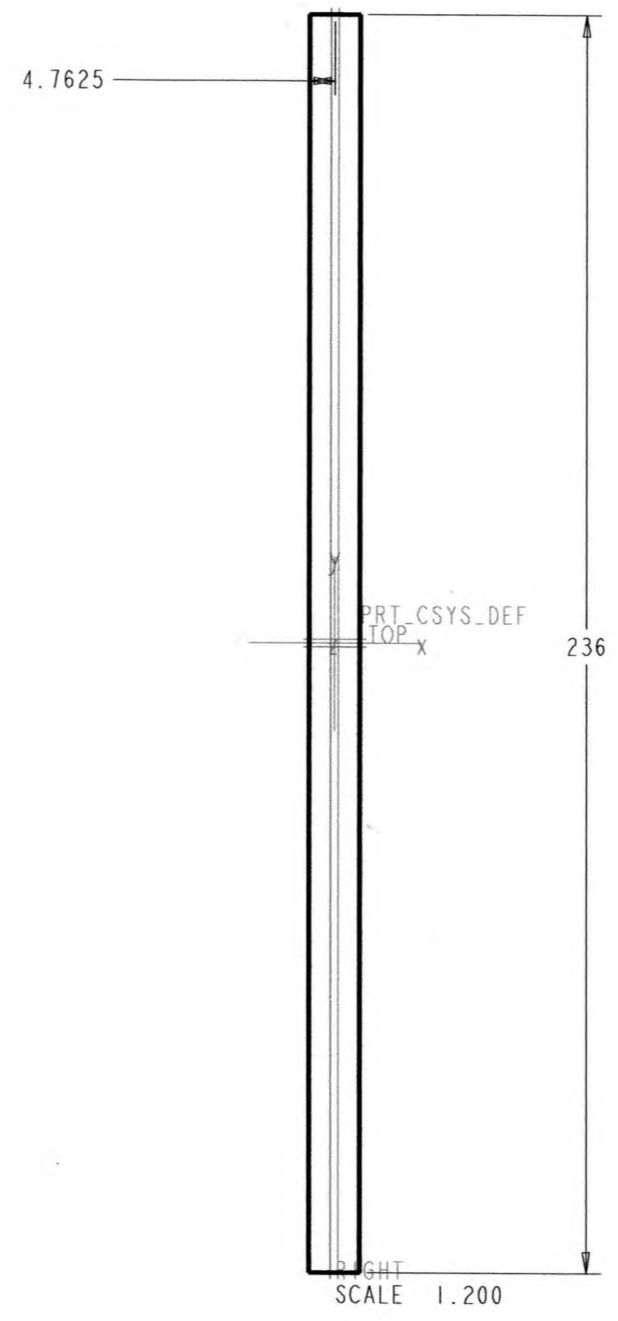
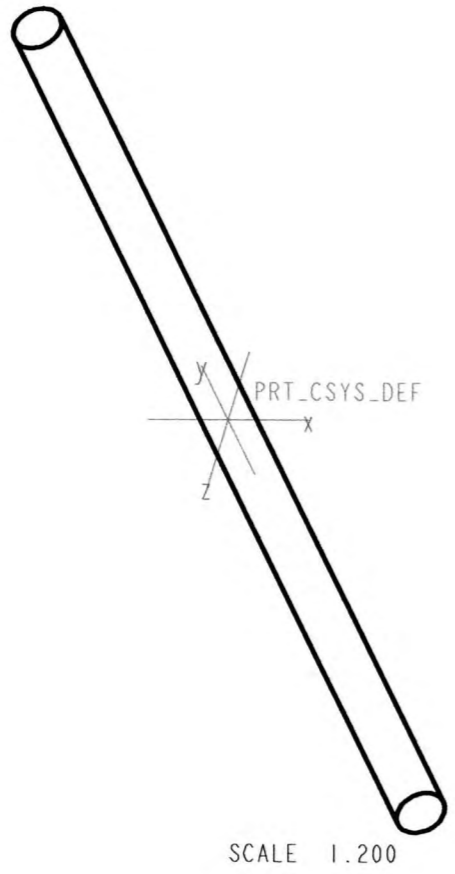
Nombre: TRANS FREN VH	Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey Campus Ciudad de México	
Descripción: Transmisor de frenado vertical-horizontal	MECANISMO DE PEDALES B737-NG PROYECTOS DE ING. II	
DESEN: D. MARTINEZ P. VEGA	Tolerancias: ISO 2768-mK	Proyecto en convenio con FRECUENCIA 1221 <input checked="" type="checkbox"/> 32
Prof. Dr. Ernesto Olgún	Unidades [SI] mm	Escala: 1000



Nombre: <b>TIMON</b>	Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey Campus Ciudad de México		
Descripción: Timón compensador de guiado	<b>MECANISMO DE PEDALES B737-NG</b> PROYECTOS DE ING. II		
DISENO: D. MARTINEZ P. VEGA	Tolerancias: ISO 2768-mK	Proyecto en convenio con FRECUENCIA 1221	32 ✓
Prof. Dr. Ernesto Olgún	Unidades [SI] mm	Escala: 1000	

4 3 2 1

D  
C  
B  
A



Nombre: BARRAINUEVA	Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey Campus Ciudad de México	
Descripción: Barras frontales verticales	MECANISMO DE PEDALES B737-NG PROYECTOS DE ING. II	
DISENO: D. MARTINEZ P. VEGA	Tolerancias: ISO 2768-mK	Proyecto en convenio con FRECUENCIA 1221 <input checked="" type="checkbox"/>
Prof. Dr. Ernesto Ojeda	Unidades [S] mm	Escala: 1000

4 3 2 1

4

3

2

1

D

D

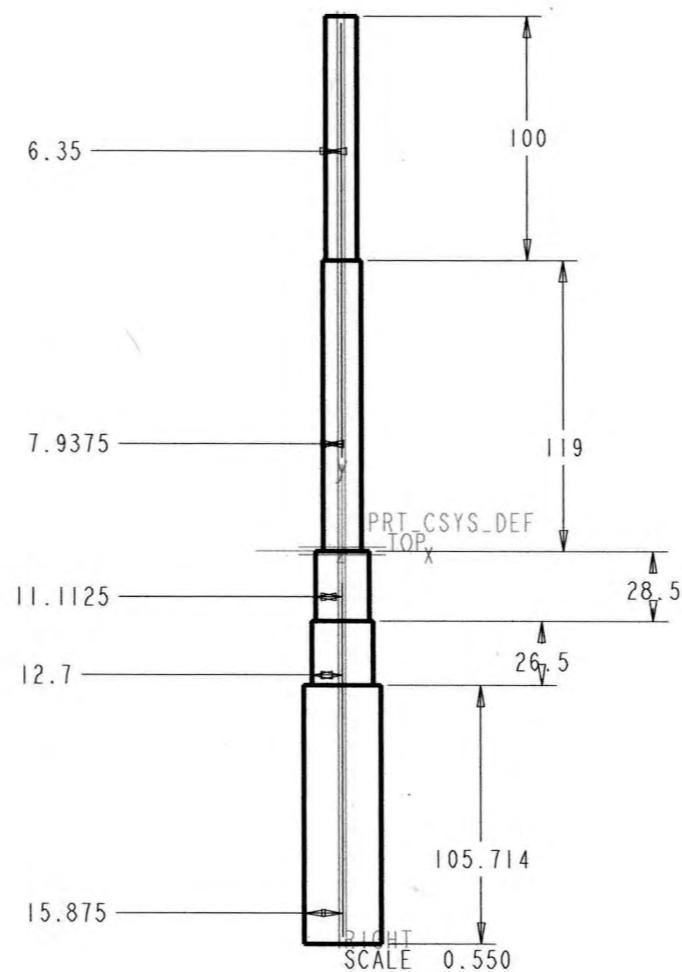
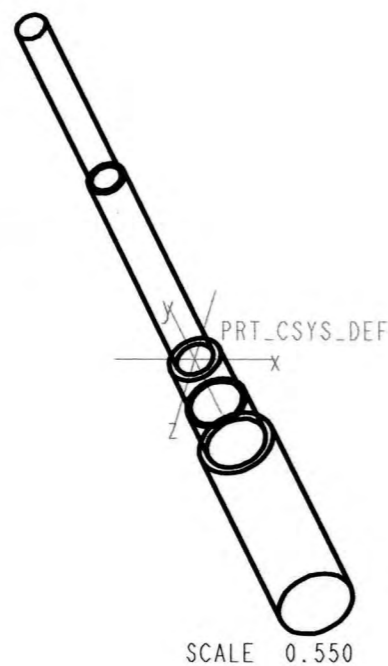
C

C

B

A

A



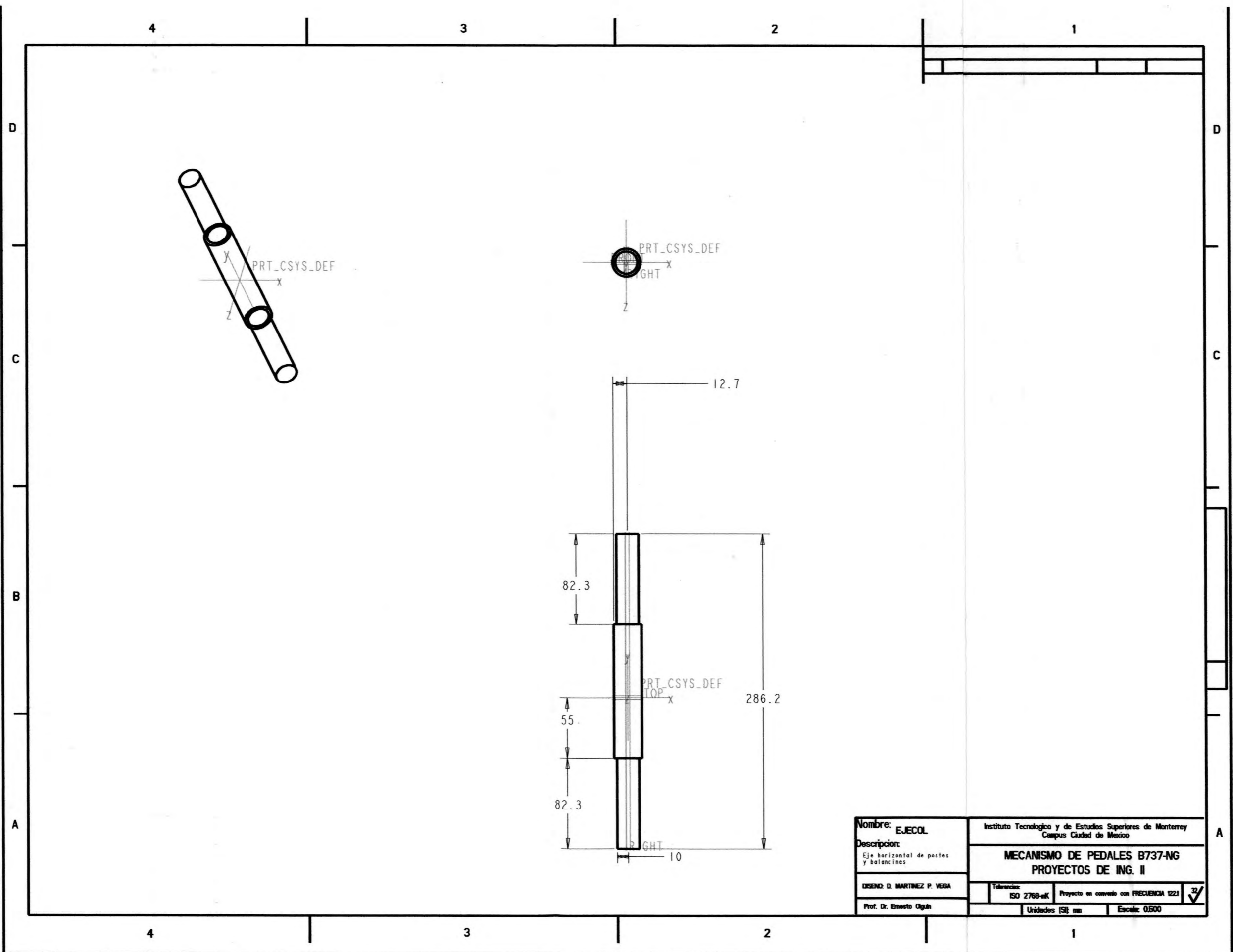
Nombre: EJE BALANCIN		Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey Campus Ciudad de México	
Descripción: Eje vertical de balancines		MECANISMO DE PEDALES B737-NG PROYECTOS DE ING. II	
DISEÑO: D. MARTINEZ P. VEGA		Tolerancias: ISO 2768-mK	Proyecto en convenio con FRECUENCIA 1221 <input checked="" type="checkbox"/>
Prof. Dr. Ernesto Olgún		Unidades [SI] mm	Escala: 0.500

4

3

2

1



Nombre: EJECOL	Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey Campus Ciudad de México		
Descripción: Eje horizontal de postes y balancines	MECANISMO DE PEDALES B737-NG PROYECTOS DE ING. II		
DISEÑO: D. MARTINEZ P. VEGA	Tolerancias: ISO 2768-mK	Proyecto en convenio con FRECUENCIA 1221	32/37
Prof. Dr. Ernesto Ogata	Unidades (SI) mm	Escala: 0.500	