



**TECNOLOGICO
DE MONTERREY®**



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: César Iván Hernández Gómez
Jorge Resa Trejo
Pablo Augusto Vega Sevilla*



Asesor: Dr. Ernesto Olguín Díaz

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

* Proyectos de Ingeniería I

México D. F. a 15 de noviembre de 2004.

Índice

I.	Introducción	1
	Simuladores de vuelo	2
	1. Objetivo	3
	2. Estado del Arte	4
	a. Háptica	4
	b. Retorno de Fuerza	6
	3. Alcance del Proyecto	7
II.	Marco Teórico	8
	a. Materiales: Aluminio	8
	b. Ergonomía	10
III.	Diseño	12
	a. Modelo Boeing 737 NG	13
	b. Diseño Final	15
	i. Módulo Sencillo	16
	ii. Módulo de Sincronización	17
IV.	Resultados	19
	a. Manufactura	19
	b. Análisis de Costos	22
V.	Conclusiones	22
VI.	Trabajo a Futuro	24
VII.	Referencias	24
VIII.	Anexos	26
IX.	Planos e imágenes	29

I. 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.

El equipo de trabajo está formado por César Iván Hernández Gómez, Jorge Resa Trejo y Pablo Augusto Vega Sevilla. César Iván Hernández Gómez y Jorge Resa Trejo estarán acreditando la materia de Proyectos de Ingeniería II con este proyecto. Mientras que Pablo Augusto Vega Sevilla acreditará la materia de Proyectos de Ingeniería I, siendo él quien continúe con el proyecto durante el periodo de enero a mayo de 2005 con un nuevo equipo de trabajo.

Simuladores de vuelo

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. Objetivo

- Diseñar y construir un par de pedales de Boeing 737 NG para su utilización como controles en un simulador de vuelo de dimensiones reales de un avión Boeing 737 NG.

2. Estado del arte

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.

1. 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.

2. 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.

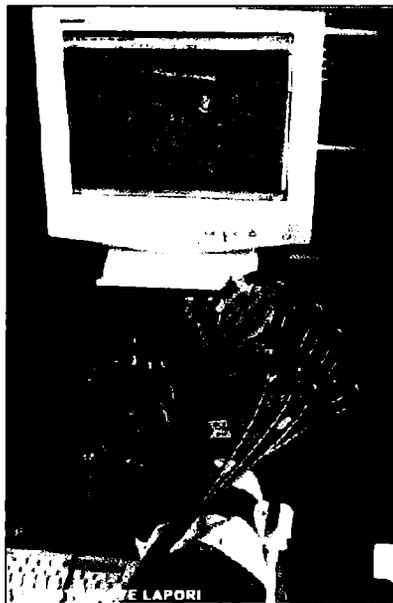


Figura 2. Háptica

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].

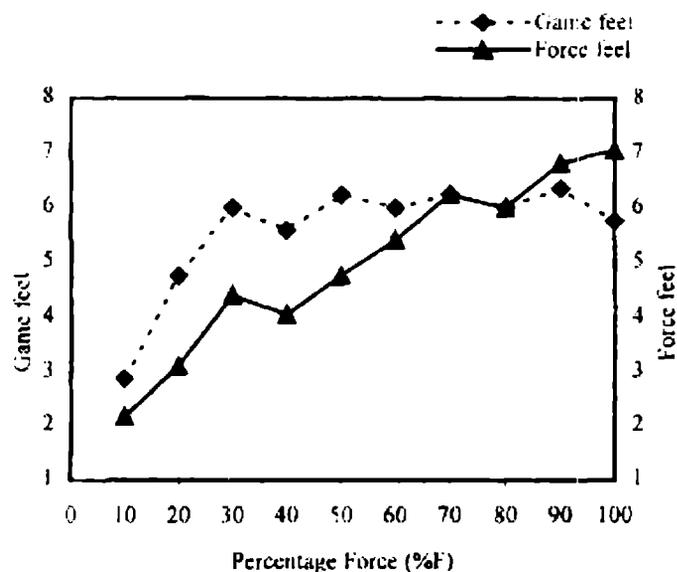
b. Retorno de Fuerza

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.



Gráfica 1. 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.

3. Alcance del proyecto

- A partir de los requerimientos definidos por Frecuencia 122.1, hacer el diseño mecánico de los pedales. Esto incluye diseño asistido por computadora (CAD) utilizando los programas CATIA y Pro/Engineer, ingeniería asistida por computadora (CAE) con el apoyo de los programas Visual Nastran 4D y manufactura asistida por computadora (CAM) utilizando Mastercam.
- Diseñar un mecanismo que sincronice los pedales del piloto y del copiloto.
- Diseñar un mecanismo que sincronice el accionamiento de los frenos entre piloto y copiloto.
- Diseñar e implementar un sistema de retorno de fuerza para los pedales de piloto y copiloto.
- Anexo al final del documento se encuentra un calendario de actividades.

II. Marco teórico

a. 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 g/cm^3 , la cual es aproximadamente una tercera parte de la del acero (7.83 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.

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

Tabla 1. Rangos de los esfuerzos críticos de varias aleaciones de aluminio [13 y 14]

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.

b. 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.

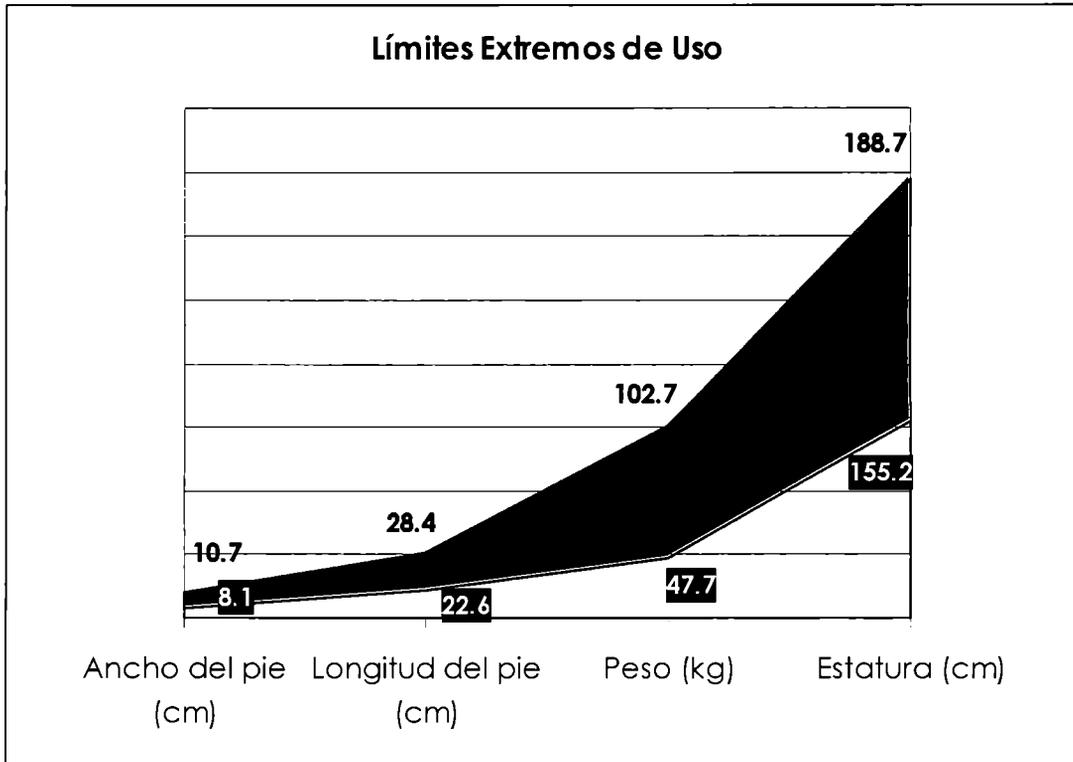
Para poder hacer un diseño ergonómico de los pedales es necesario conocer algunos datos antropométricos que permitan determinar algunas características de los pedales. Es necesario conocer quienes serán los usuarios potenciales, de esta manera se puede determinar que segmento de la población utilizará 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.

Dimensión Antropométrica	Percentil	
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

Tabla 2. Dimensiones antropométricas [15]

A continuación se muestran los límites extremos de uso:



Gráfica 2. 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].

Parte del cuerpo	Fuerza ejercida (N)	Número de personas
Pie	350	111
Pierna	890	222

Tabla 3. Fuerzas ejercidas por pie y pierna

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

III. 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 y 4. El proyecto se encuentra en una etapa en la cual ya se decidió el diseño final. Se identificaron las ventajas y desventajas de utilizar

el sistema original y se propusieron cambios a dicho sistema de tal manera que se aprovechó lo mejor del sistema original en el sistema propuesto (diseño final). Dentro de los anexos se incluyen distintas etapas del diseño.

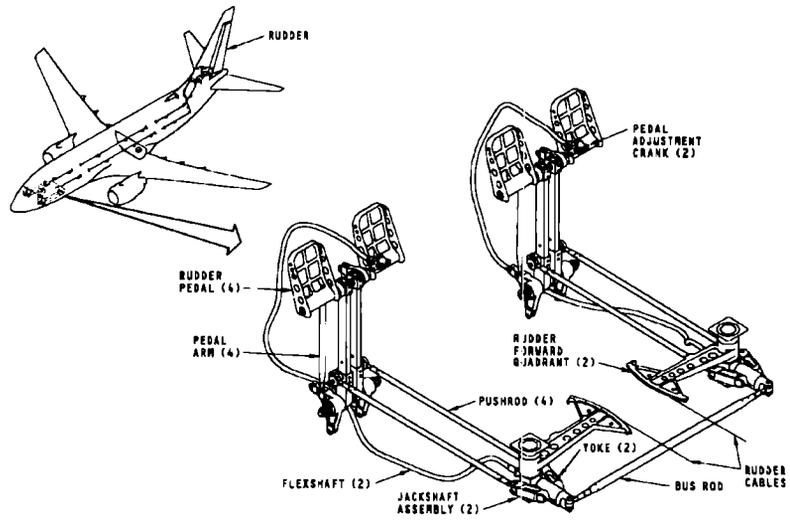
a. Modelo Boeing 737 NG

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) y el sistema de frenos diferenciales (Figura 4).

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.

Por último, el co-asesor M. en C. Gregory Oundjian recomendó utilizar aluminio para los pedales, acero 1020 ó acero 1045 para las barras de soporte de los pedales, aluminio para las barras de unión y acero 1020 para las piezas del sistema de accionamiento de frenos así como para aquellas que se vean sometidas a torsión. Se sugirió comprar las rótulas para las barras de unión así como proponer la utilización de moldes de fundición para algunas piezas del sistema de pedales. Se definió de manera conjunta la complejidad de las piezas, dándole mayor importancia a los pedales, después a las escuadras utilizadas en el sistema de accionamiento de frenos y por último a las Y's utilizadas en el sistema de sincronización de pedales.



RUDDER AND RUDDER TRIM CONTROL SYSTEM - RUDDER PEDALS AND FORWARD QUADRANTS

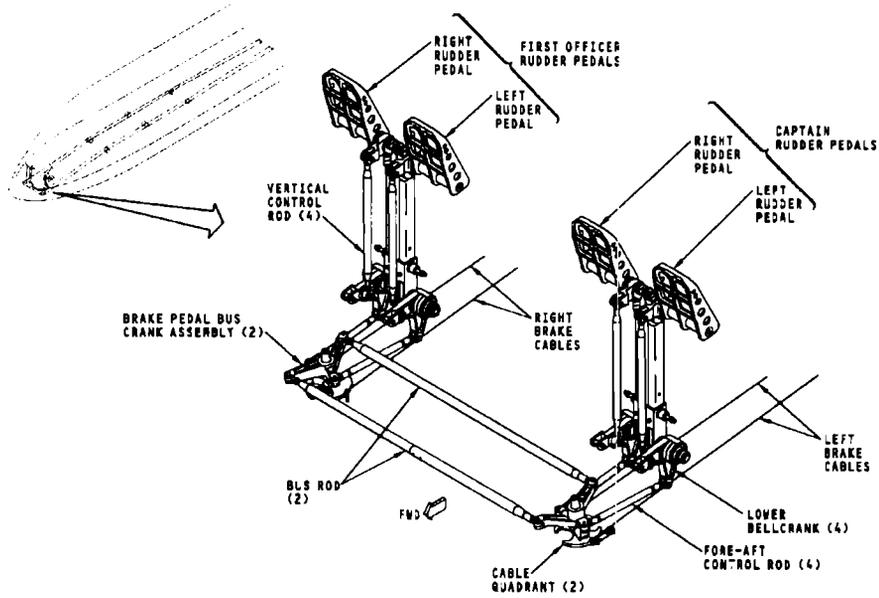
27-11-0000
 EFFECTIVITY
 AMX ALL

27-21-00

D633A101-AMX

Page 13
Jun 10/2003

Figura 3. Sistema de sincronización de pedales [2]



HYDRAULIC BRAKE SYSTEM - BRAKE PEDAL BUS MECHANISM

32-11-0000
 EFFECTIVITY
 AMX ALL

32-41-00

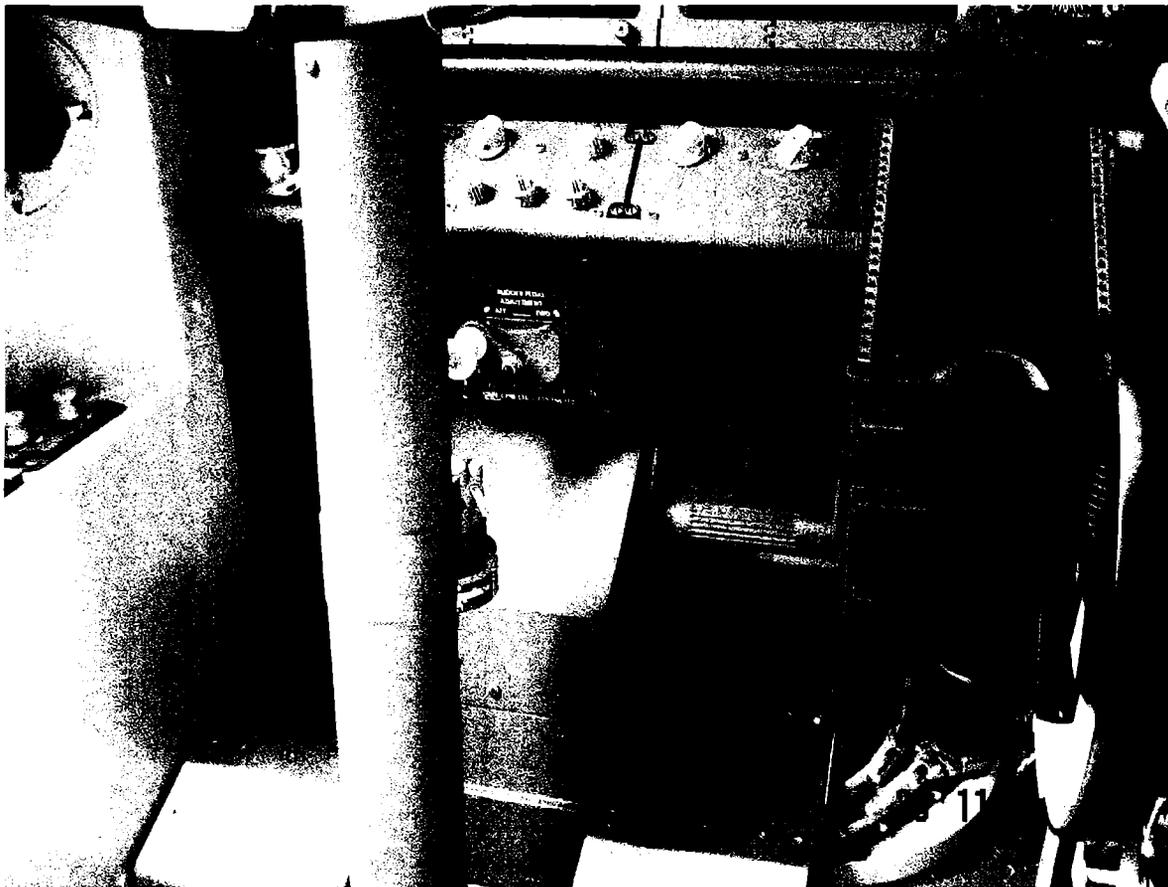
D633A101-AMX

Page 7
Jun 10/2003

Figura 4. Sistema de accionamiento de frenos [2]

b. Diseño Final

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.



Fotografía 1. Interior de la cabina del Boeing 737 NG

A continuación se presentan los módulos propuestos así como las piezas que forman parte de cada uno.

Módulo sencillo

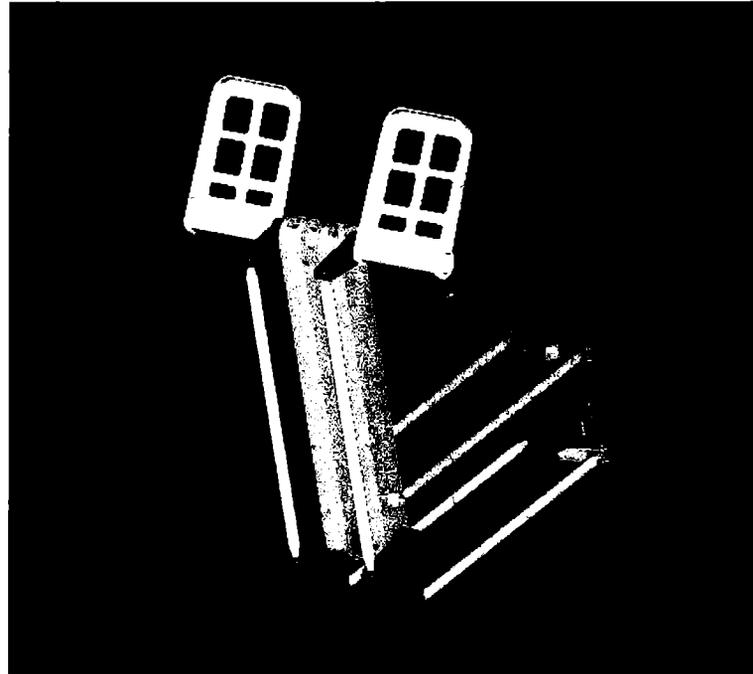


Figura 5. Módulo sencillo (sin base)

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
1	Base	-
Total de piezas	32	-

Tabla 4. Relación de piezas del módulo sencillo

Módulo de sincronización

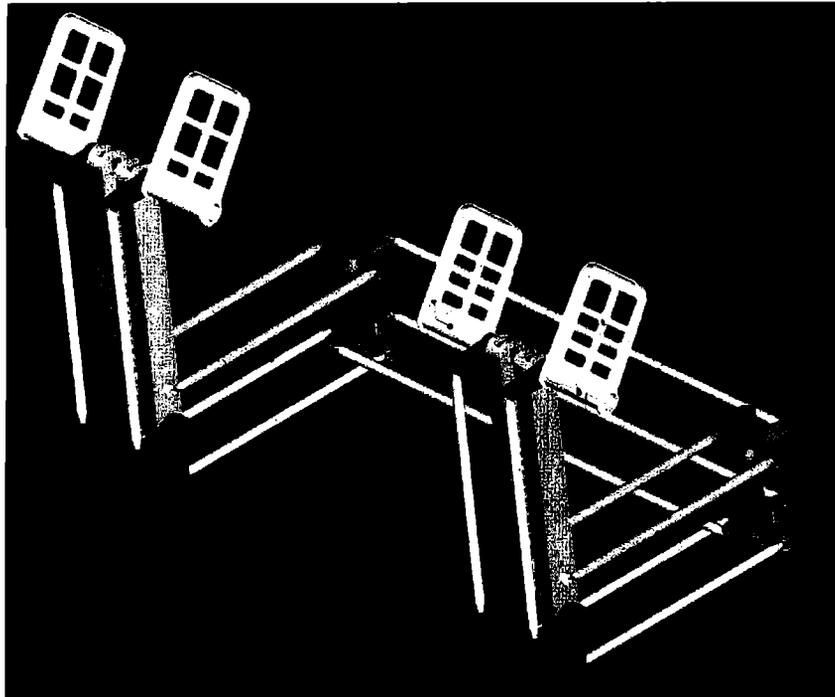
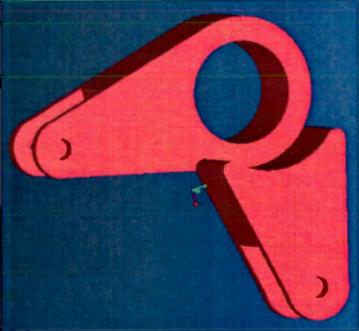
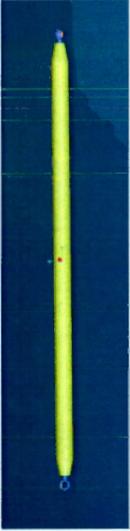
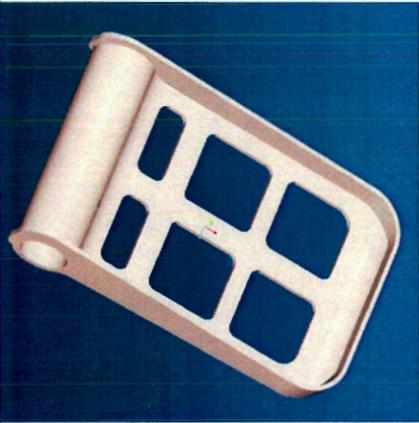
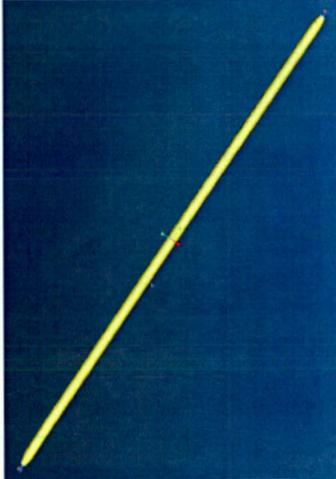
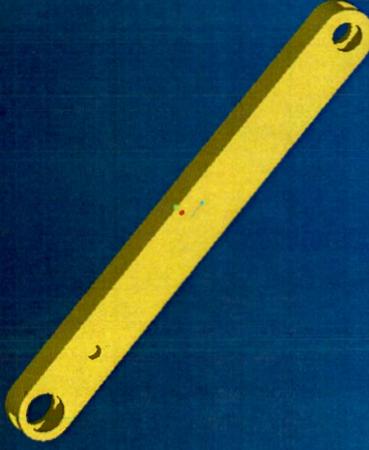
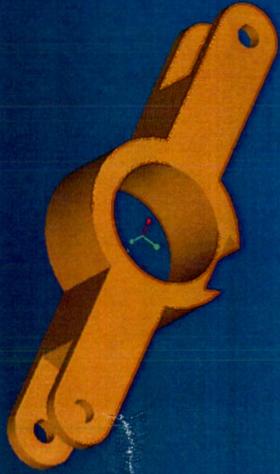


Figura 6. Dos módulos sencillos (sin base) y módulo de sincronización

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

Tabla 5. Relación de piezas del módulo de sincronización

Pieza 004	Pieza 003	Pieza 002	Pieza 001	Figura
				Imagen
Pieza 010	Pieza 008	Pieza 007	Pieza 006	Figura
				Imagen

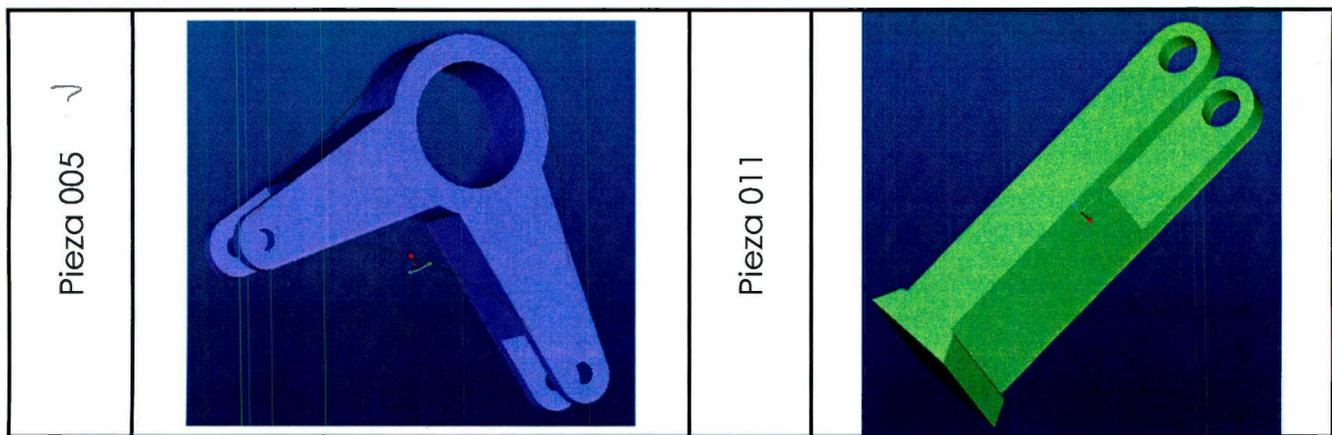


Tabla 6. Catálogo de piezas usadas para los ensambles de los módulos

IV. Resultados

a. Manufactura

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 (ver Figura 14) se utilizó un cortador Sandvik de dos insertos de $\frac{3}{4}$ 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 espaciamento (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 $\frac{3}{4}$ de pulgada. Para esta primera cara se utilizaron cinco programas CNC(001, 002, 003, 004 y 005) [18].

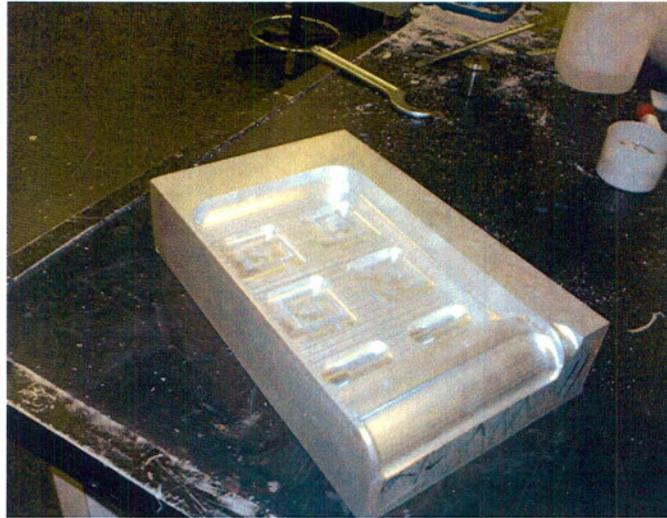


Figura 7. Primera cara del pedal

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 $\frac{1}{2}$ 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 8. 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:

Parámetros		
	Avance	400 mm/min
	Velocidad del husillo	3500 rpm
Desbaste	Max Step Over	4 mm
	Max Step Down	1 mm
Acabado	Max Step Over	0.5 mm

Tabla 7. Parámetros de maquinado

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.

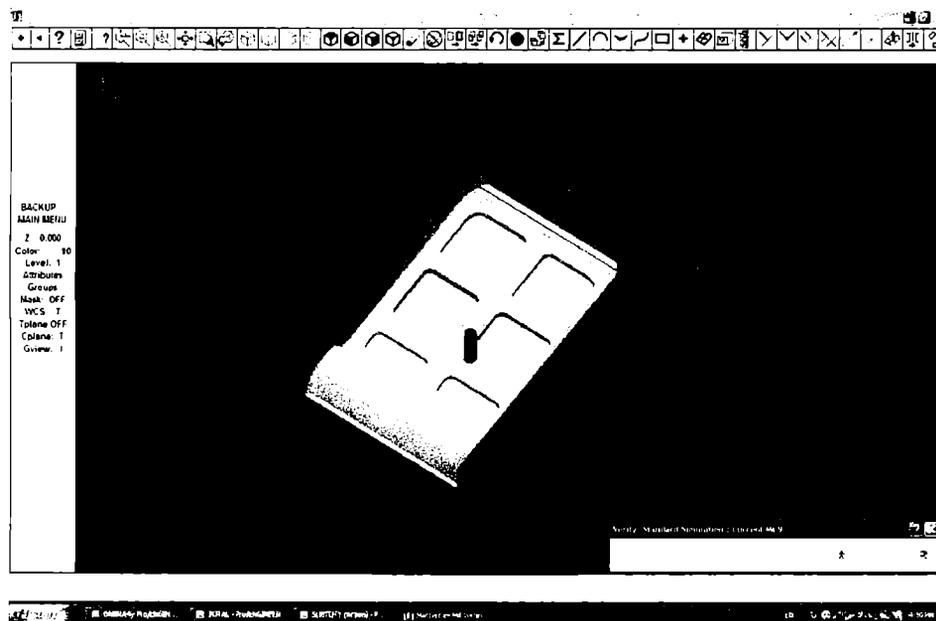


Figura 9. Simulación en Mastercam

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 barrenado en el pedal para poder sujetarlo a la columna (Ver catálogo de piezas). 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.

b. Análisis de costos

Para esta etapa del proyecto aún no se tienen considerados los costos de todas las piezas. Por el momento solo se han manufacturado los pedales incurriendo en los siguientes costos:

Costos			
#	Descripción	Costo unitario	Subtotal
63 horas	Maquinado en Fresa de Control Numérico	\$250	\$15,750
2	Bloque de aluminio (30cm x 30cm)	\$697	\$1,394
Total			\$17,144

Tabla 8. Costos del prototipo según avance

V. 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 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. La importancia de la visita no solamente se limita en cuánto a la toma de decisiones sobre el mecanismo, sino que también permitió

acercarse más al cumplimiento del objetivo del proyecto. Al emplear un mecanismo similar al del modelo real de la aeronave se contribuye a que la sensación de los pedales (parte de los controles del simulador de vuelo) sea mucho más apegada a su contraparte real y por ende incrementa el realismo, el cual junto al sistema háptico de retorno de fuerza, participará en la percepción del usuario de parte de los controles del simulador.

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.

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 (figuras 9 y 10) 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.

Para seleccionar el material de los pedales, la única parte del sistema de los pedales expuesta al usuario y la primera que manufacturamos, se escogió al aluminio por ser un metal ligero y fácil de maquinar. El proceso de manufactura que se empleó para los pedales, el fresado CNC, es un proceso que se reserva 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 lo que refiere al sistema háptico de retorno de fuerza para el mecanismo de los pedales es clara la necesidad de implementarlo. Se ha aprendido lo mucho que se puede beneficiar un simulador cuando cualquiera de las partes del cuerpo del usuario se encuentran en contacto con dispositivos provistos de sistemas hápticos de retorno de fuerza. Sin embargo, también se descubrió a través de la investigación que la

cantidad de fuerza empleada en el dispositivo no puede ser determinada arbitrariamente, ya que de lo contrario el sistema pierde su utilidad como fuente de información sensorial para el usuario y perjudica incluso su desempeño en el ambiente virtual.

Teniendo claro el diseño mecánico y completamente justificada la necesidad del sistema háptico del retorno de fuerza cabe mencionar que se adquirió experiencia en este sentido y desde muchos puntos de vista. Para simular en 3D el mecanismo de sincronización de los pedales del piloto y copiloto y el accionamiento de frenos, se utilizaron ProE y CATIA, siendo este último el mismo software que emplea Boeing [5] en el diseño de sus productos. Desde dicha perspectiva el proyecto adquiere un manejo más profesional, que se adhiere a los estándares de quién desarrolló la aeronave original.

VI. Trabajo a futuro

En la siguiente etapa del proyecto se decidirán las especificaciones del motor eléctrico que dará el retorno de fuerza al usuario. Esto implica modificar y adaptar algunas partes del diseño a los componentes (sensores, acoplamientos y sujeción del motor) que forman parte del sistema háptico de retorno de fuerza. Asimismo se diseñará un mecanismo de sujeción entre el sistema de los pedales y la cabina del simulador. También se continuará con la construcción del prototipo y la definición de tolerancias geométricas para las piezas restantes.

Finalmente, existe una buena perspectiva para el progreso y seguimiento de este proyecto y su contribución a la parte de la construcción del simulador de vuelo B737 NG, así como una forma de generar tecnología propia.

VII. 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.122punto1.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.

VIII. Anexos

Diseños preliminares

Engranes

En un principio, al no contar con los planos de los pedales, se decidió proponer un mecanismo que llevara a cabo la misma función. Para este mecanismo se utilizaron engranes cilíndricos como se aprecian en la figura 3. La función de los engranes era poder transmitir el movimiento de un pedal a otro. En una segunda etapa, como se aprecia en la figura 4 utilizamos tres engranes cónicos debido a que la fuerza se transmitiría a un tercer eje, esto con la finalidad de sincronizar los pedales de piloto y copiloto.

Los engranes estaban acoplados al eje de giro del arco que describen los pedales al moverse. Un tercer engrane se acopló de tal manera que los tres quedarán conectados mecánicamente, como se puede ver en la figura 3.

Se escogieron engranes de dientes rectos, porque son más baratos y fáciles de fabricar y maquinarse. Aunque se tiene claro que no son los mejores, para el tipo de aplicación que requiere de una baja velocidad, estos engranes eran ideales.

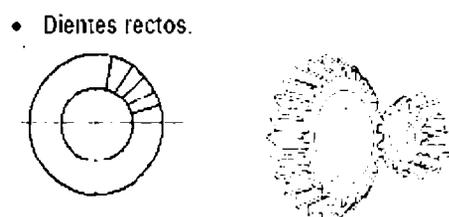


Figura 1. Engranes cónicos de dientes rectos [3]

Para dar una idea de las dimensiones de los engranes se realizaron algunos cálculos que permitieron definir número de dientes, ángulo entre los dientes, ángulo entre los engranes y tamaño [3].

Ya que se habían calculado estos parámetros, se hizo una cotización y se observó que entre más chicos eran los engranes más caros eran debido a que el barreno necesitaba ser más preciso. Los engranes más baratos que nos podían fabricar eran de 10 centímetros de radio mayor, 4 centímetros de radio menor, y con un barreno de $\frac{3}{4}$ de pulgada. El precio para el

engrane descrito fue de 650 pesos (cada engrane). Si se deseaba un barreno de menor tamaño el precio aumentaba.

Esta opción fue muy buena pero el costo era demasiado elevado ya que se necesitan 6 engranes para un juego completo de pedales (piloto y copiloto). Por otra parte los engranes deben de estar lubricados y esto se traduce en un alto costo de mantenimiento al tener que prestar servicios adicionales al equipo.

a. Modelo Lego "Jaune"

En este primer modelo se buscó diseñar un mecanismo donde al presionar el pedal izquierdo regresara el pedal derecho. Nos enfocamos en comprender el funcionamiento básico de los pedales. Para este primer modelo se propuso el uso de engranes cilíndricos. No se revisó nada acerca del sistema de accionamiento de frenos. Gracias a la construcción de este primer modelo se pudieron resolver algunas dudas que se tenían, de tal manera que se cayó en la cuenta de que un pedal sí regresa cuando se presiona el otro y viceversa.

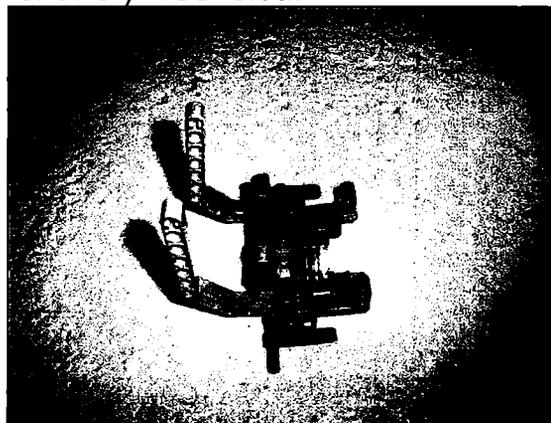


Figura 2. Modelo Lego "Jaune"

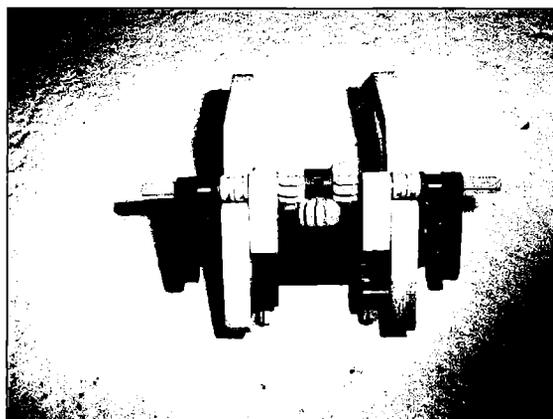


Figura 3. Arreglo de engranes

Tecnológico de Monterrey, Campus Ciudad de México
CITIAHO 2202

b. Modelo Lego "Rouge"

Para este modelo se propuso el empleo de engranes cónicos. En este segundo modelo también existió la tarea de sincronizar los pedales de piloto y copiloto, utilizando una cadena. Con este modelo se comenzó a tomar decisiones sobre el uso de engranes así como el costo de los mismos. En un principio ésta era la idea más sólida pero cambió radicalmente después de la visita a Aeroméxico [9].

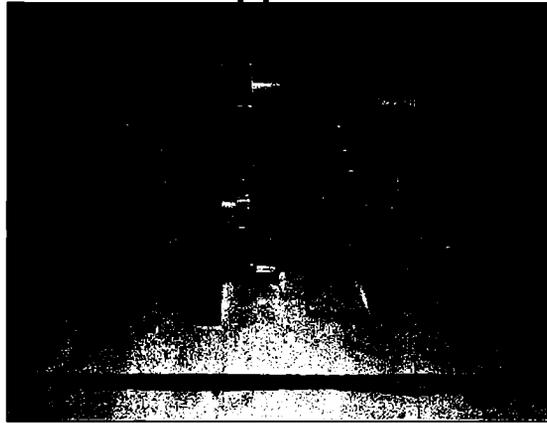


Figura 4. Modelo Lego "Rouge"

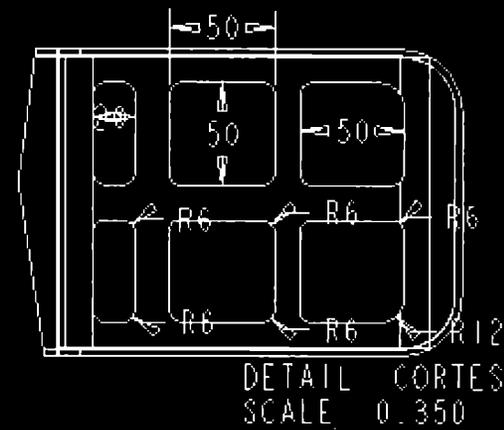
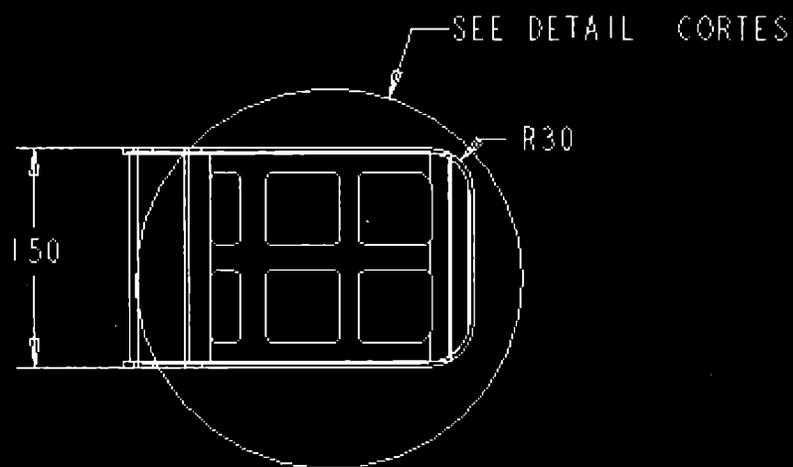
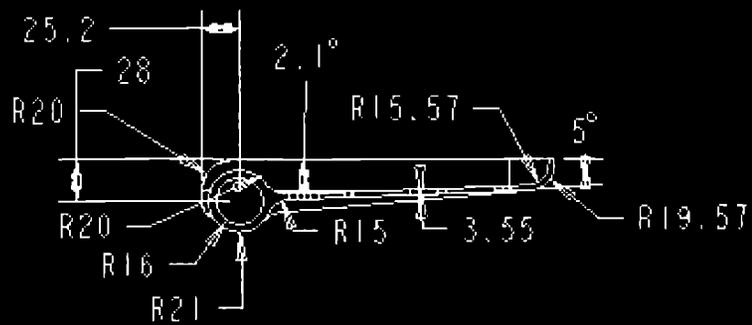


Figura 5. Arreglo de engranes



Figura 6. Sincronización de pedales

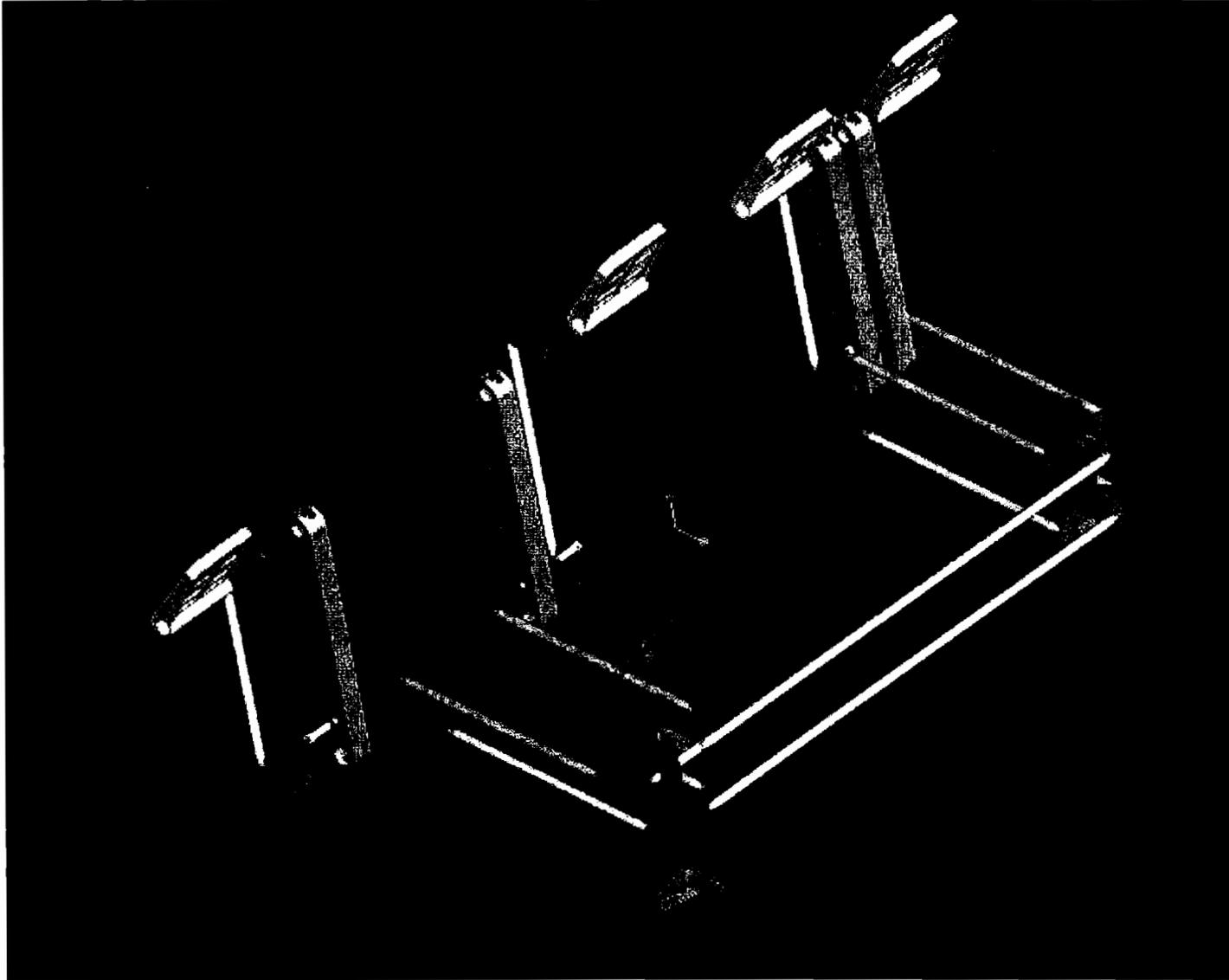
**IX. PLANOS
E
IMÁGENES**



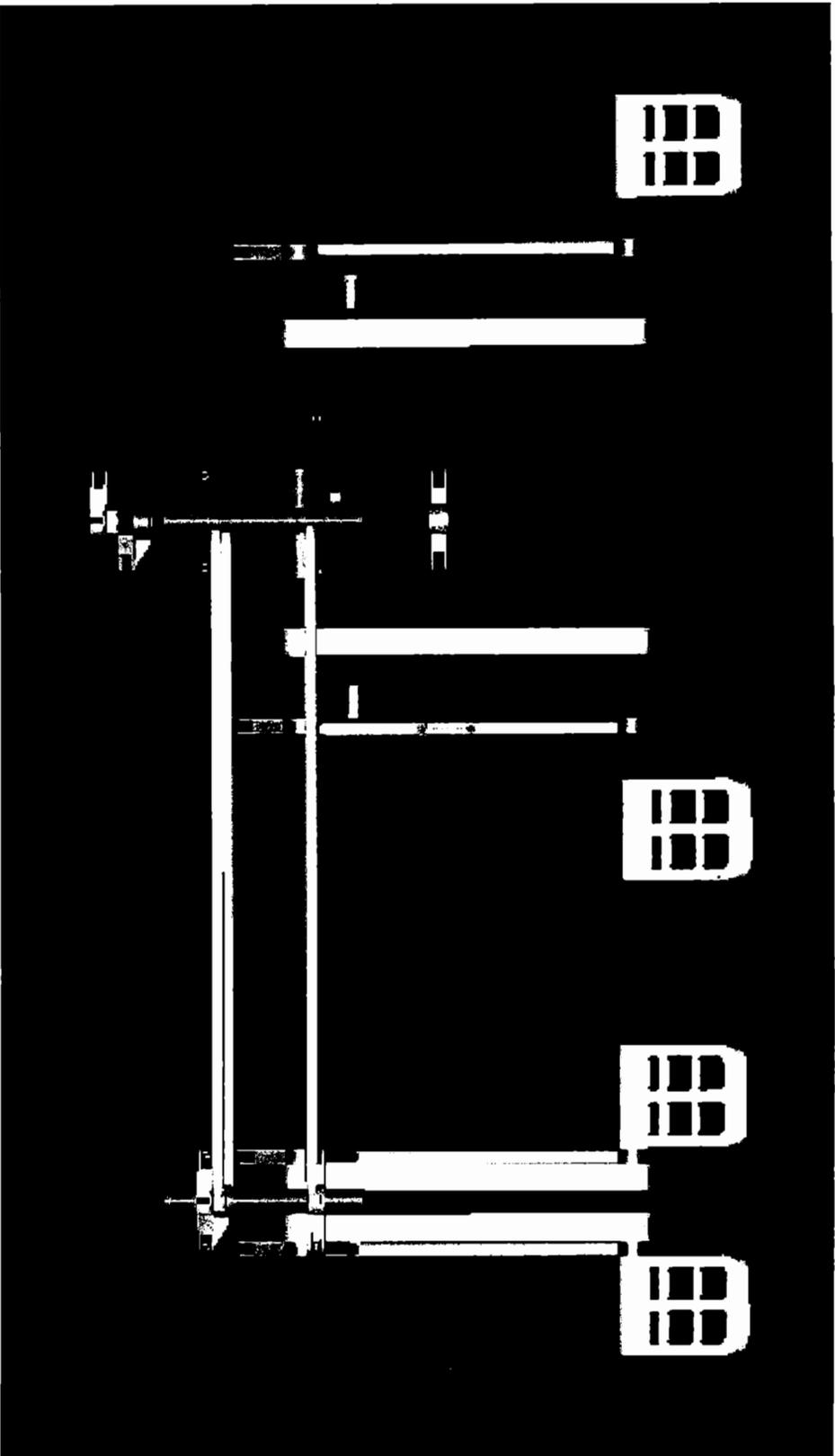
Simulador de B737NG

Creadores: Jorge Resa
Pablo Vega
10/10/04 Cesar Hernandez

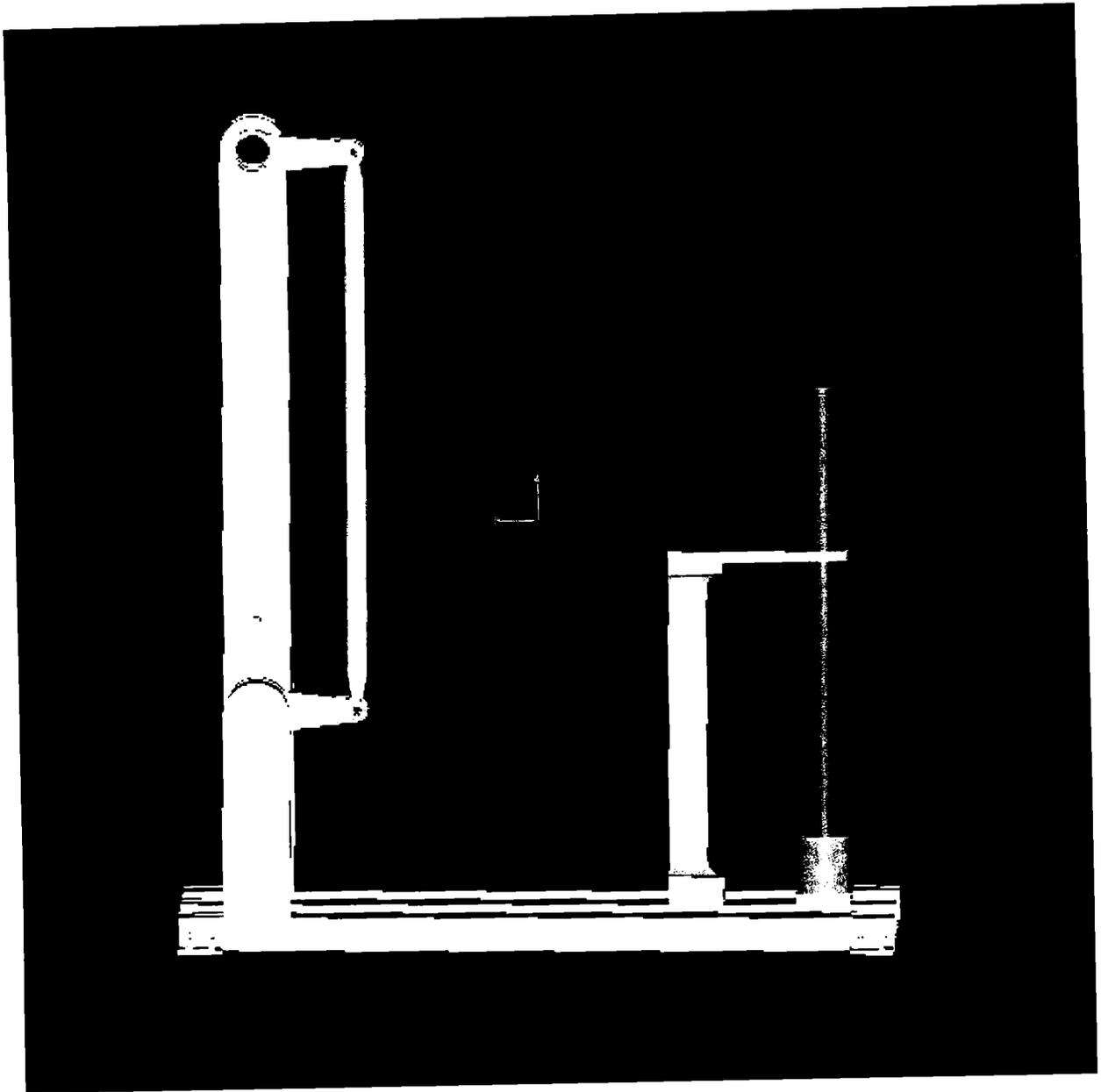
Pieza: Pedal B737NG



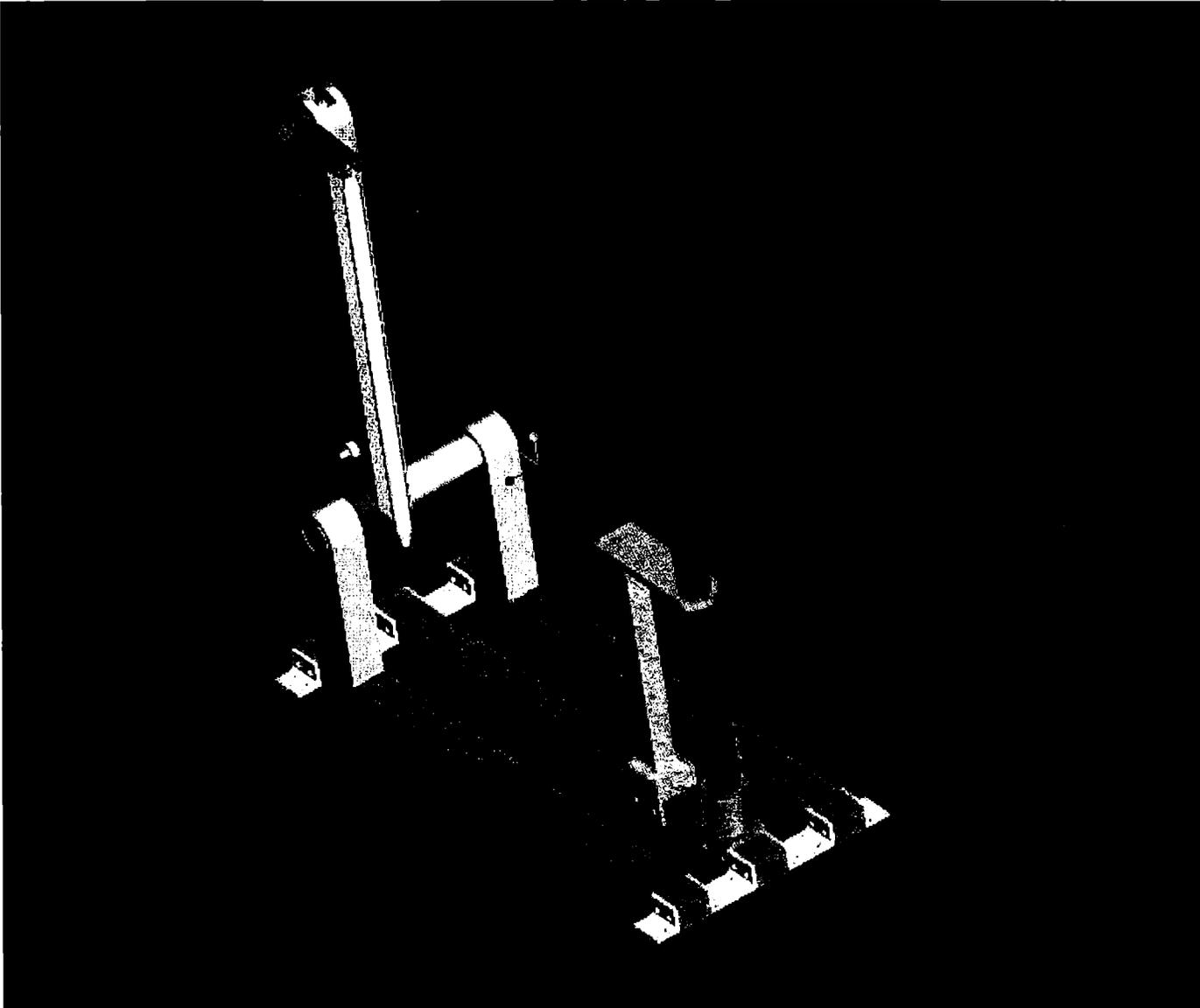
Vista explotada isométrica (Dos módulos sencillos y un módulo de sincronización)



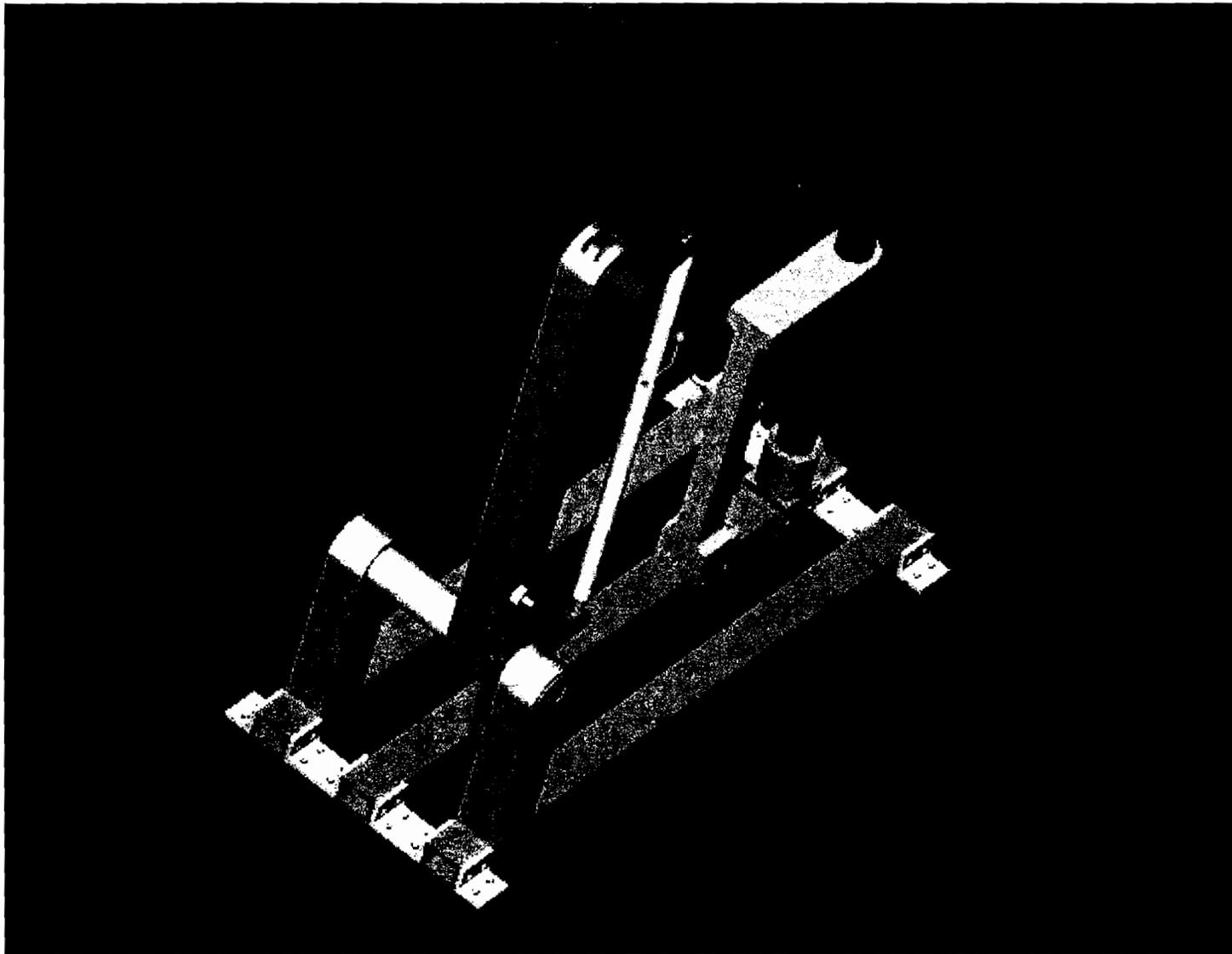
Vista explotada frontal (Dos módulos sencillos y un módulo de sincronización)



Vista lateral (Base de sujeción)



Vista isométrica frontal (Base de sujeción)



Vista isométrica trasera (Base de sujeción)