



Máster UNED

**Simuladores para el adiestramiento y el
entrenamiento: una perspectiva industrial**

Dr. Heliodoro Ruipérez

13 de abril de 2018



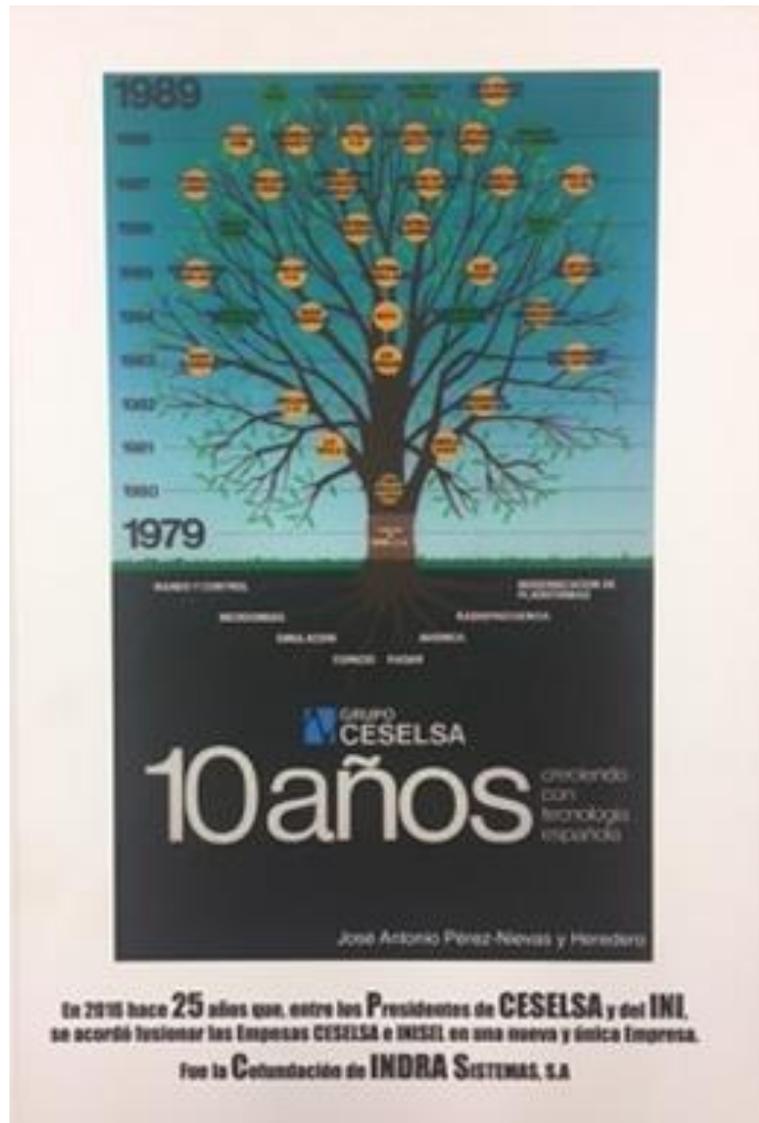


C-101
1980

F-18
Hornet
1984



Simuladores de vuelo en España - CESELSA



“CESELSA. 1979-1989 Diez años creciendo con tecnología propia y española” por J.A. Pérez Nievas

- *“las naciones más ricas y fuertes son y serán las que tengan más empresas nacionales con **tecnología propia**”*
- *“los pueblos se identifican con los **productos** de sus empresas no con los **intereses** de sus bancos”*
- *“La **innovación** y tecnología nacional hace que la empresa necesite a la **Universidad** estableciéndose unos lazos de unión muy creativos para los dos sectores, la **Empresa** y la **Universidad**”*

2010

Simuladores de adiestramiento en España - INDRA



Cougar



Blackhawk



Seahawk



Chinook



Tiger



Harrier



Eurofighter



F-5



F-16



MH-53



Boeing 737



CN235



ATR



F-18



Mirage F-1



Hercules



A-7



F-14



Fokker 50



Fokker 100



A-320



A-400



CN-235



C-101



King Air



Leopard



25 años después del primer F18 Full Mission Simulator

Indra desarrollará un entrenador para el Airbus A330 MRTT

18 octubre, 2017 1:30 pm · [f](#) [t](#) [g+](#) [in](#) [e](#) [+](#) 0



Indra se refuerza el ámbito de la simulación aérea con la adquisición del 35,07% de GTA

[defensa.com](#), 15 de enero de 2018



Indra full-flight simulator for Airbus Helicopters EC175 certified, ready to train rotorcraft pilots



[DEFENSA](#) · [EJÉRCITO DEL AIRE](#) · [MILITAR](#) · [MINISTERIO DEFENSA](#) · [SIMULACIÓN](#)

Indra comienza a trabajar en un nuevo simulador de Eurofighter

4 meses · [Añadir comentario](#) · [Luis Calvo](#)



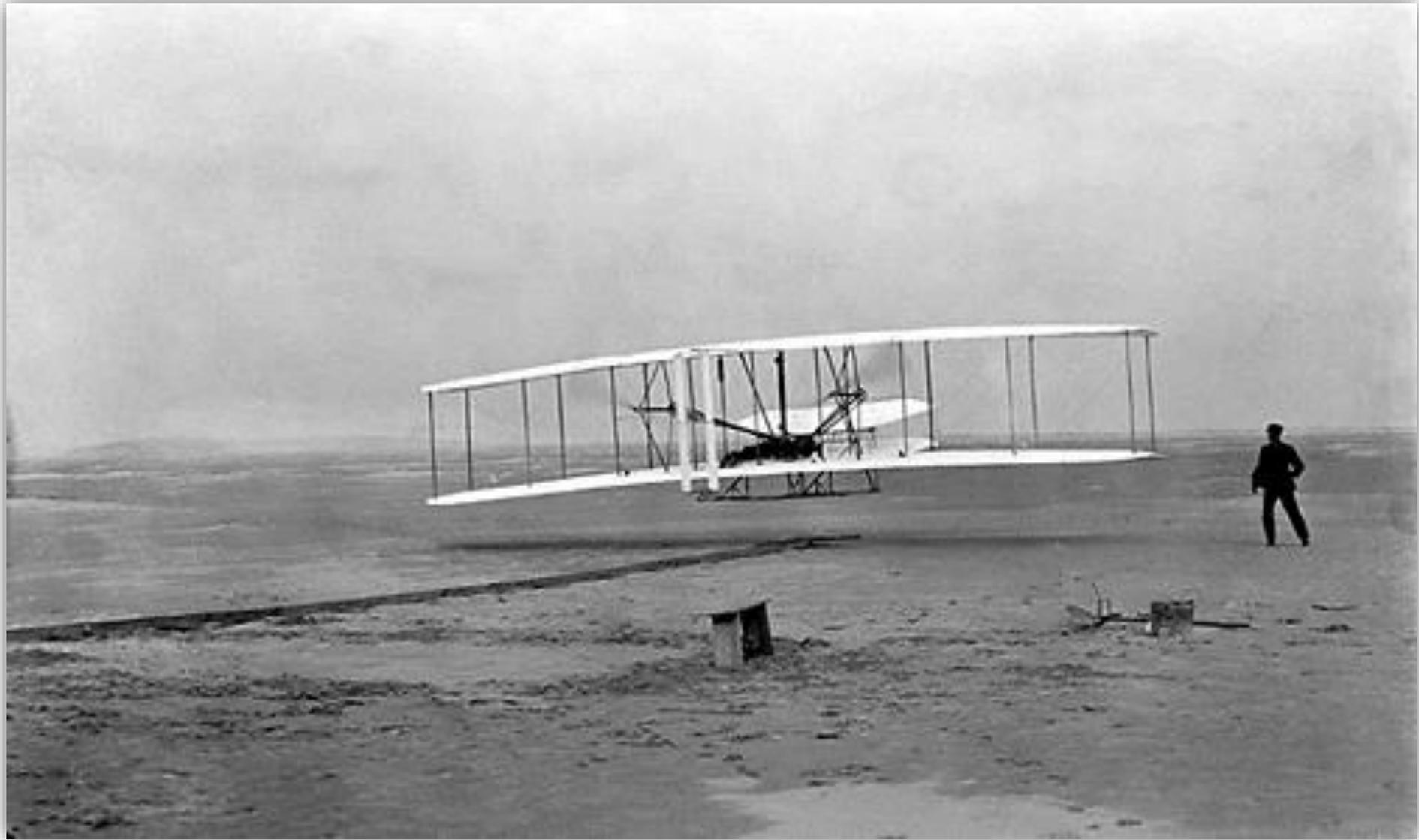
Cockpit y sistema visual de uno de los simuladores actuales de Eurofighter.

Noticias actuales 2017 - 2018

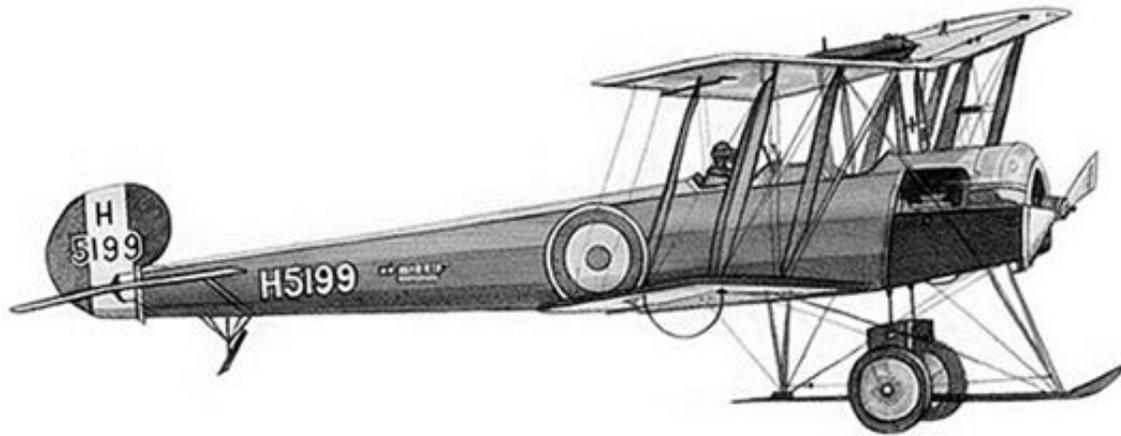
- **Adiestrar:** Hacer diestro, enseñar, instruir. Enseñar a alguien a ser diestro en algo, especialmente en una habilidad manual, un ejercicio físico, etc. (es por tanto sinónimo de instruir). Adiestrar desarrolla nuestro conocimiento sobre la operación del sistema
- **Entrenar:** Es la repetición mecánica de un acto. Se efectúa para adquirir una determinada destreza. Entrenar es, seguir un plan rutinario durante un determinado tiempo para desarrollar habilidades. Entrenar desarrolla nuestros reflejos
- **“Training Simulators”** deberíamos traducirlo englobando a estos dos términos como Simuladores para el Adiestramiento y Entrenamiento
- **Adiestramiento negativo (*Negative Training*):** la transferencia de lo aprendido en el simulador no produce los mismos resultados en el avión real. Invalida completamente el sistema de adiestramiento

“Tener el equipo adiestrado y entrenado para la misión”

1903 - primer vuelo con motor – hermanos Wright

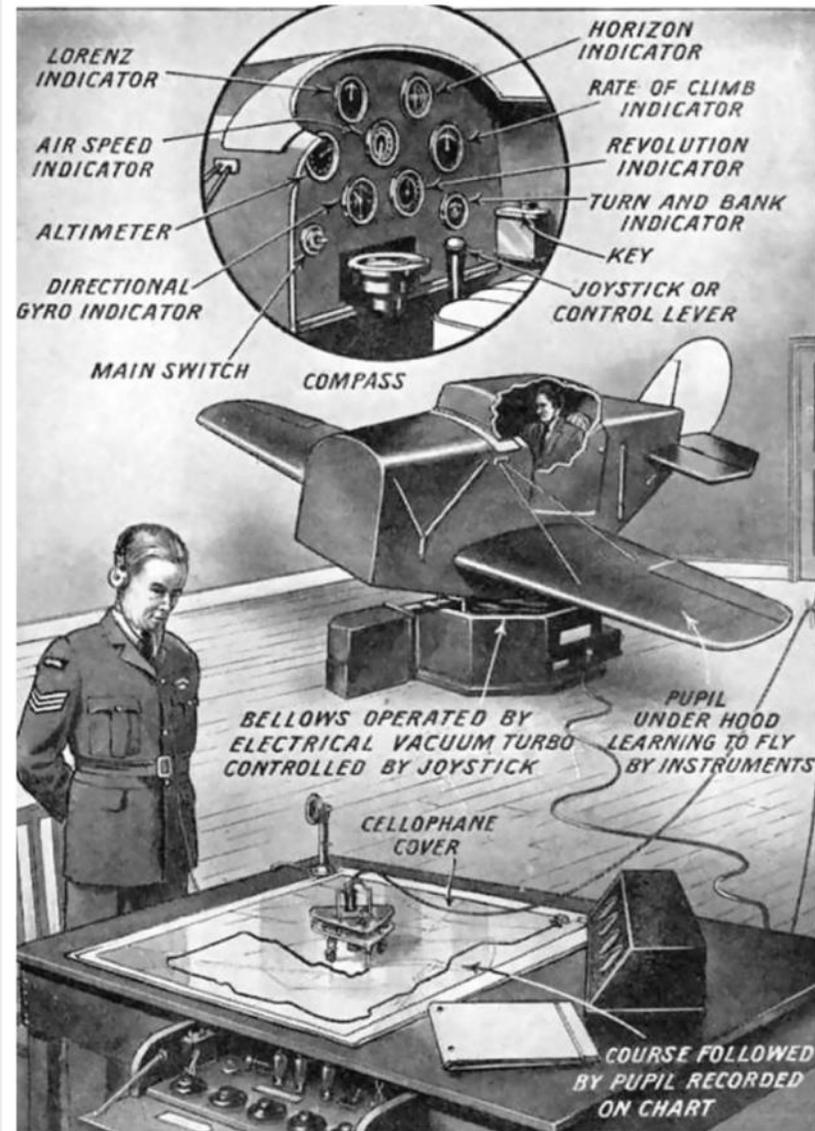


1910 - Los Primeros Entrenadores

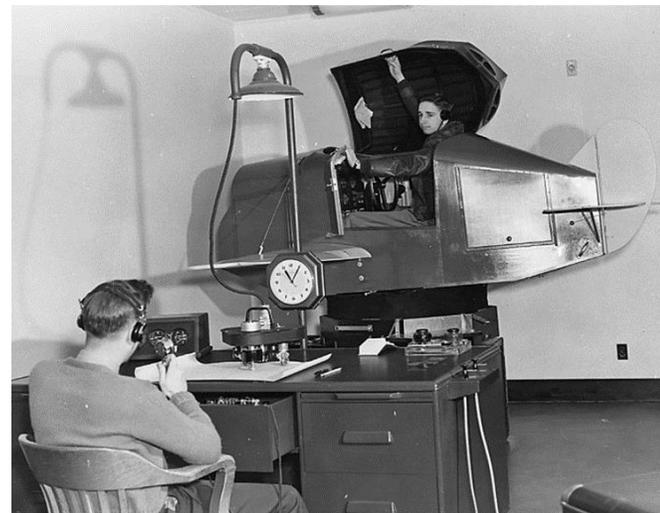


- Los primeros dispositivos de entrenamiento fueron simples maquetas o “entrenadores de barril”, como ésta fabricada en 1910 denominada “Entrenador Antoinette”
- De estas maquetas se pasaba al entrenamiento en vuelo con aviones de doble asiento, como este AVRO 504
- Las crónicas de la época afirman que se perdieron más vidas en el entrenamiento que en el combate durante la Primera Guerra Mundial

1930 - El Entrenador de Edwin A. Link (1904 – 1981)



- marcó el inicio de los sistemas en suelo de adiestramiento de vuelo
- utilizado como equipo estándar de las escuelas de entrenamiento de vuelo en los Estados Unidos y naciones aliadas
- se fabricaron unas 10.000 unidades y adiestró a más de 500,000 pilotos durante la WWII



"Combination Training Device for Student Aviators and Entertainment Apparatus"

UNITED STATES PATENT OFFICE

EDWIN A. LINK, JR., OF BINGHAMTON, NEW YORK

COMBINATION TRAINING DEVICE FOR STUDENT AVIATORS AND ENTERTAINMENT APPARATUS

Application filed March 12, 1930. Serial No. 435,151.

1930 Link Trainer – 1^a patente

My invention relates to a combination training device for student aviators and entertainment apparatus, and has for its purpose many objects which will be first briefly indicated and then more fully explained and described.

One of the primary objects of my invention is to provide an apparatus for the training of student aviators and by means of which the student is subjected to all the natural sensations of flying and at the same time the apparatus is placed under his control to an extent which permits him to operate the device exactly as an airplane is operated, whereby he is able to learn easily and with perfect safety to himself the various operations which must be performed in order to correct the tilts, dips, swings, roll and other movements of the device, and thus acquire the proper and necessary operating knowledge which will enable him to keep an airplane on an even keel or respond to the necessary manipulation of rudder, elevators and ailerons.

Another object of my invention is to provide an apparatus of this character with a dummy rudder, elevators and ailerons, all under the control of the operation stick, whereby the student may see the actual operation of these parts as the position of the "plane" is corrected or manipulated.

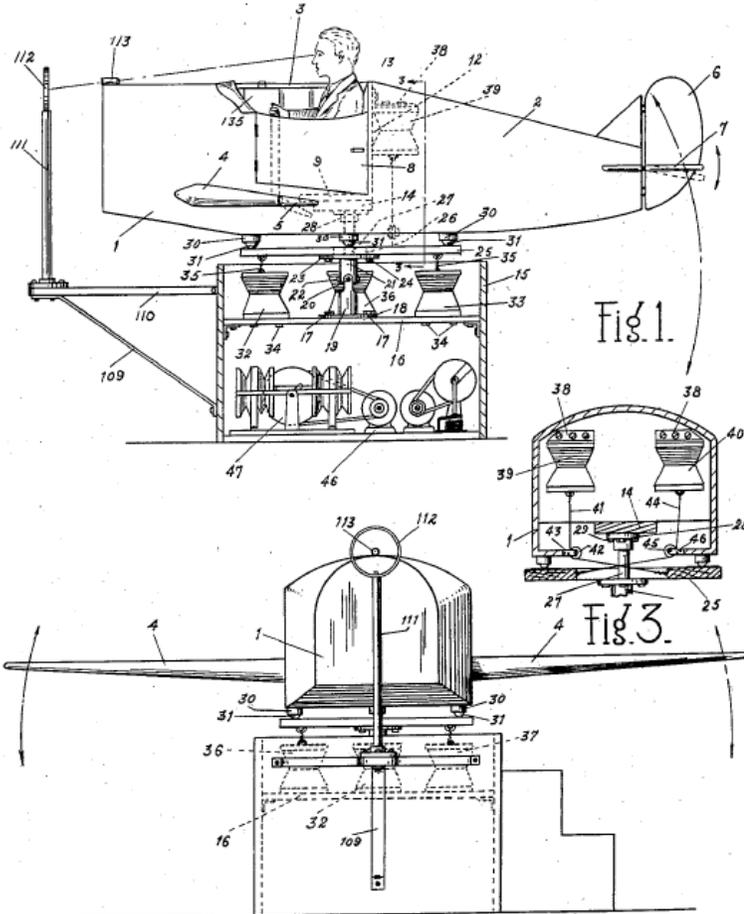


Fig. 2.

INVENTOR
EDWIN A. LINK, JR.
BY *Philip S. Hopkins*
ATTORNEY

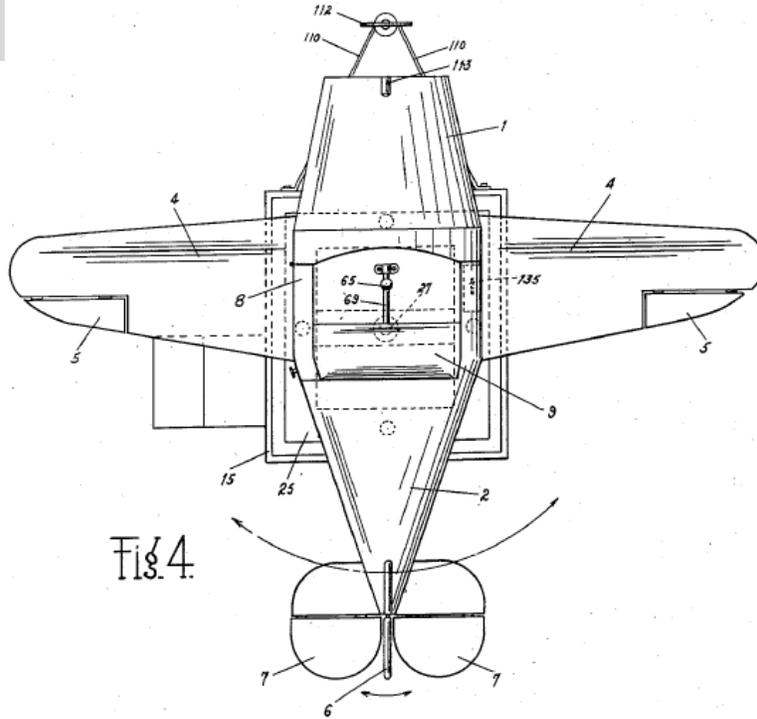


Fig. 4.

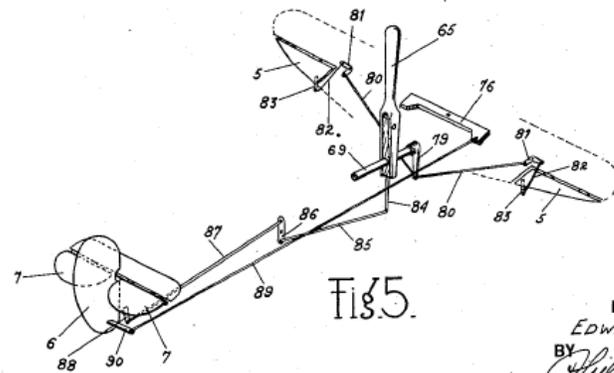


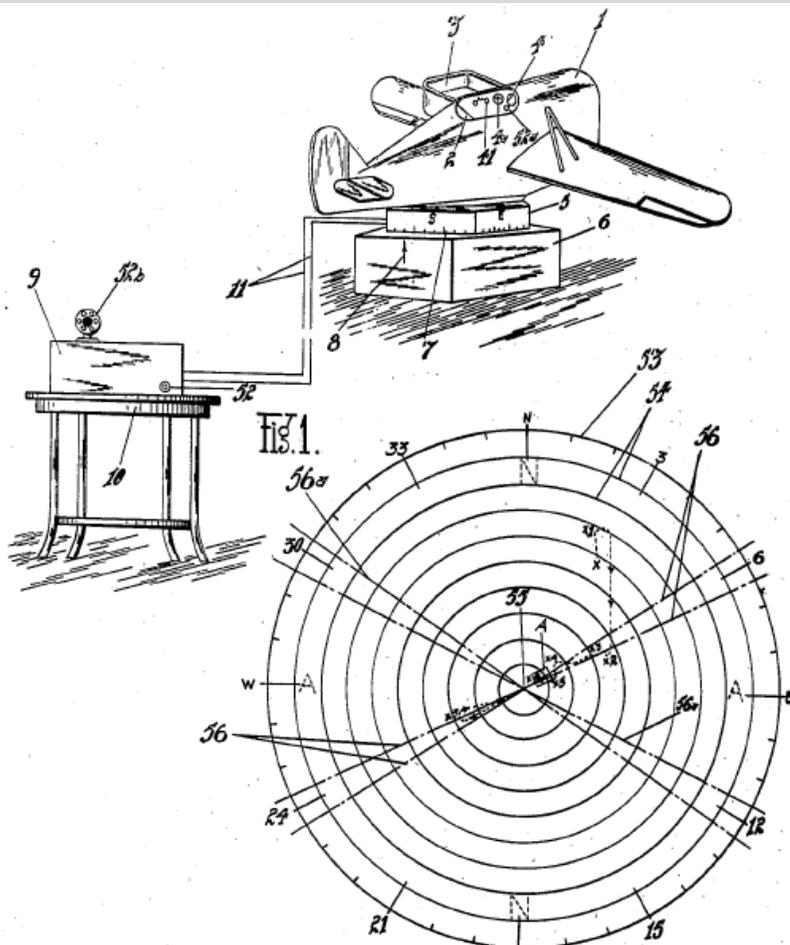
Fig. 5.

INVENTOR
EDWIN A. LINK, JR.
BY *Philip S. Hopkins*
ATTORNEY

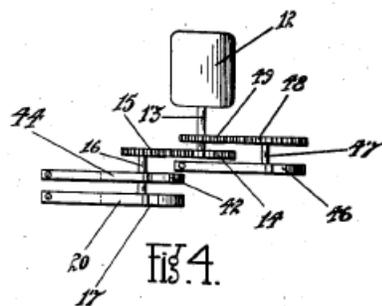
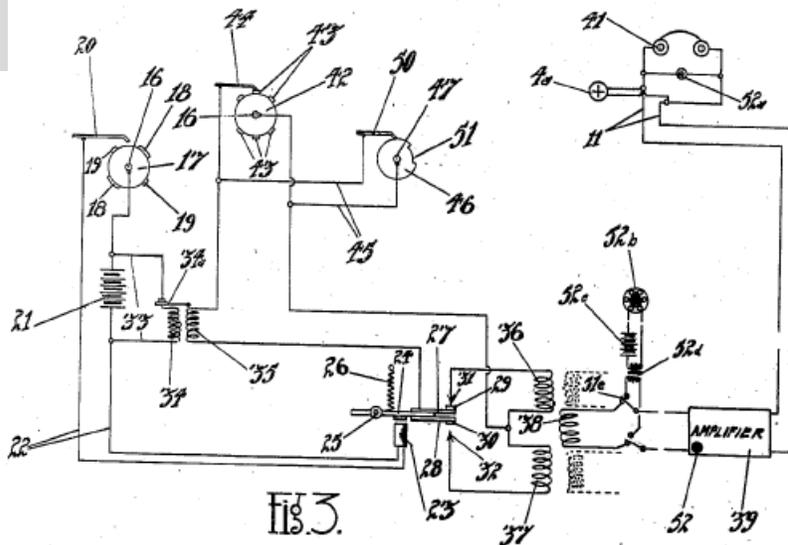
"Aviation Trainer" Entrenador de radio navegaci3n

2,119,083
AVIATION TRAINER
Edwin A. Link, Jr., Cortland, N. Y.
Application July 26, 1934, Serial No. 737,081
4 Claims (Cl. 25-12)

1934 Link Trainer – 2ª Patente



INVENTOR
EDWIN A. LINK, JR.
BY *Philip S. Hopkins*
ATTORNEY.



INVENTOR
EDWIN A. LINK, JR.
BY *Philip S. Hopkins*
ATTORNEY.

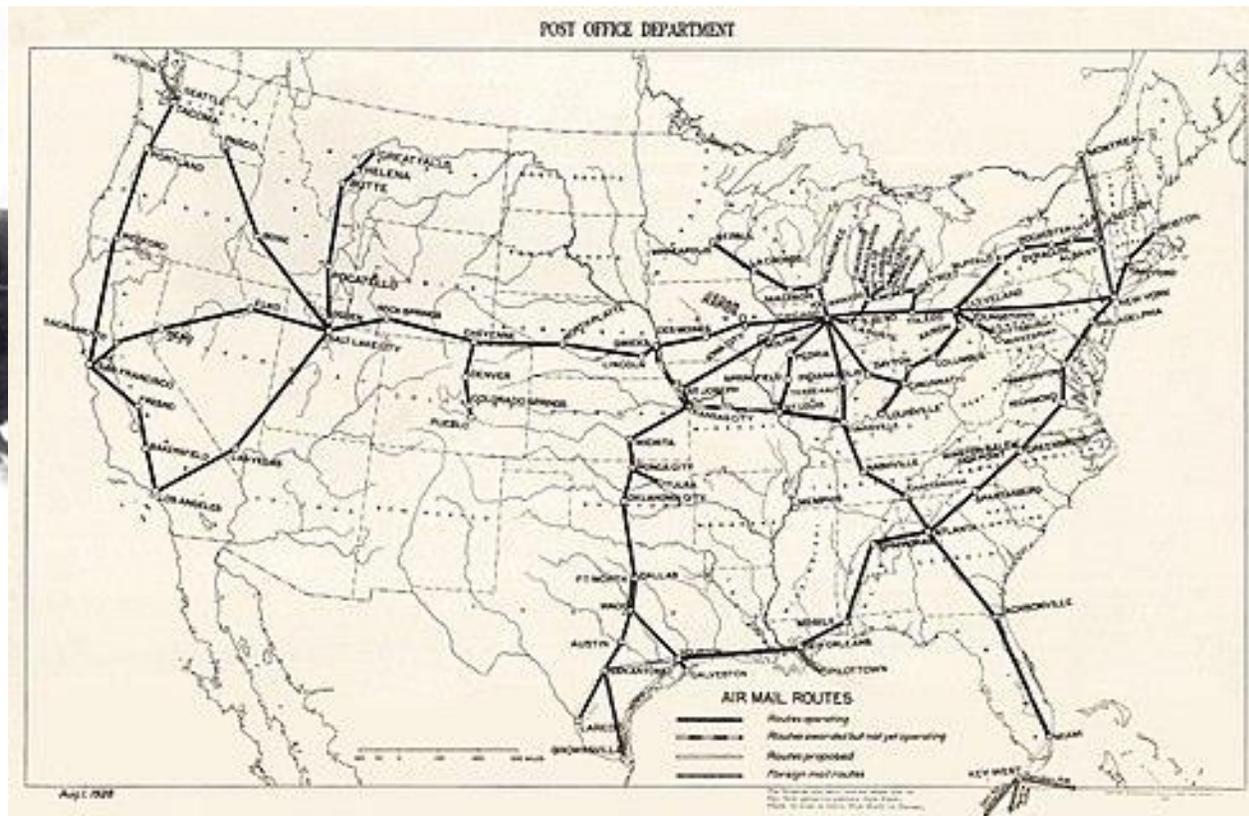
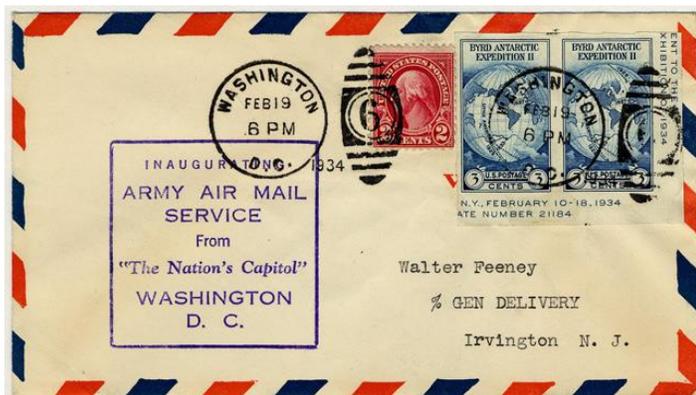
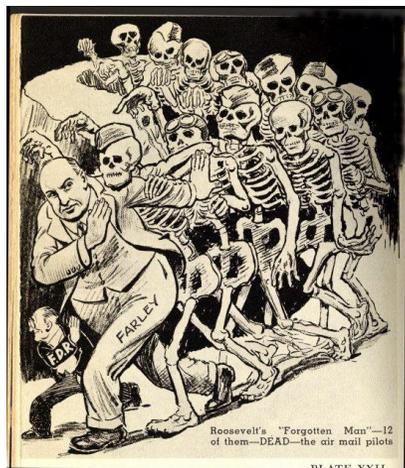
My invention relates to an aviation trainer and particularly to a means of training pilots in the art of "blind" or radio flying and air navigation.

With the development of aviation and the establishment of scheduled operations on definite courses between fixed points, there has been included the directional radio beam comprising radio broadcasting stations located at the airports which comprise the terminals of various "runs". These radio broadcasting stations send out, directionally, signals receivable by the radio receiving sets in the aeroplanes and rendered audible and/or visible to the pilot through suitable translation means such as earphones, pointer indicators, and the like. In some instances such signals are translated into both audible and visual indications for the pilot.

1934 febrero – US Air Mail Fiasco: la gran oportunidad para el Link Trainer



Keystone B-6 twin-engine air mail plane in snow storm



En los dos meses y medio de servicio de correo realizado por el US Army Air Corps hubo 66 accidentes y murieron 12 aviadores militares debido sobre todo a la **inexperiencia para vuelos nocturnos** y en condición **meteorológica adversas**

1934 – 1935 Los primeros Link Trainers para el US Army Air Corps

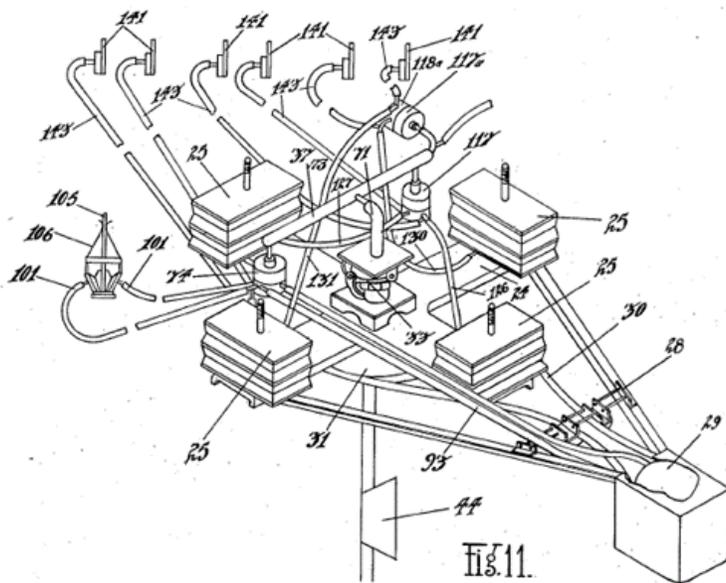
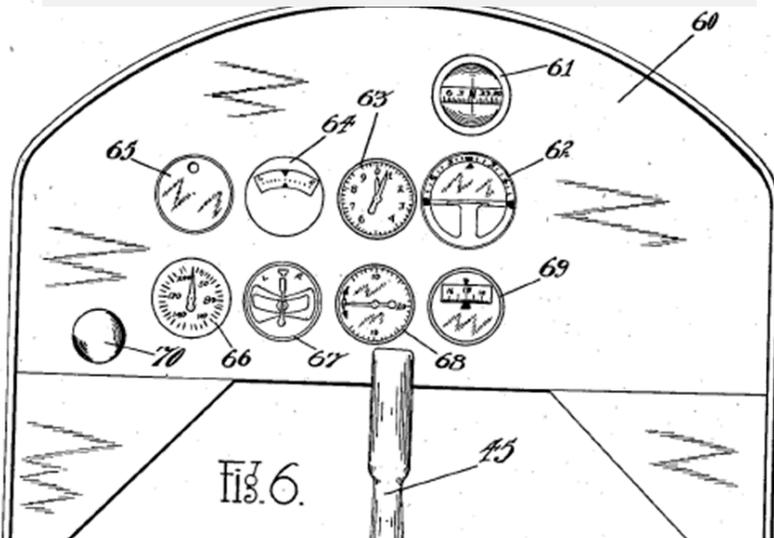


Los primeros 6 Link Trainers contratados en 1934 y entregados al US Army Air Corps. No tienen el registrador de datos en su puesto de instructor pues se ideó dos años más tarde

- US Army Air Corps le encargó los primeros 6 entrenadores a \$3,500 cada uno
- Un año más tarde en 1935 funda su propia empresa Link Aviation Device Inc.
- Hoy día, su legado industrial reside en la empresa L3 Technologies después de un largo recorrido de fusiones con los nombres de Singer Links, Link Miles, Thales, CAE Link y L-3 Link Simulations, todas ellas empresas líderes de simulación a nivel mundial

1936 Link Trainer – 3ª Patente

“Trainer for Aviators”



1936 Link Trainer – 4ª Patente

“Recorder”

Nov. 14, 1939.

E. A. LINK, JR

2,179,663

RECORDER

Filed Sept. 30, 1936

4 Sheets-Sheet 1

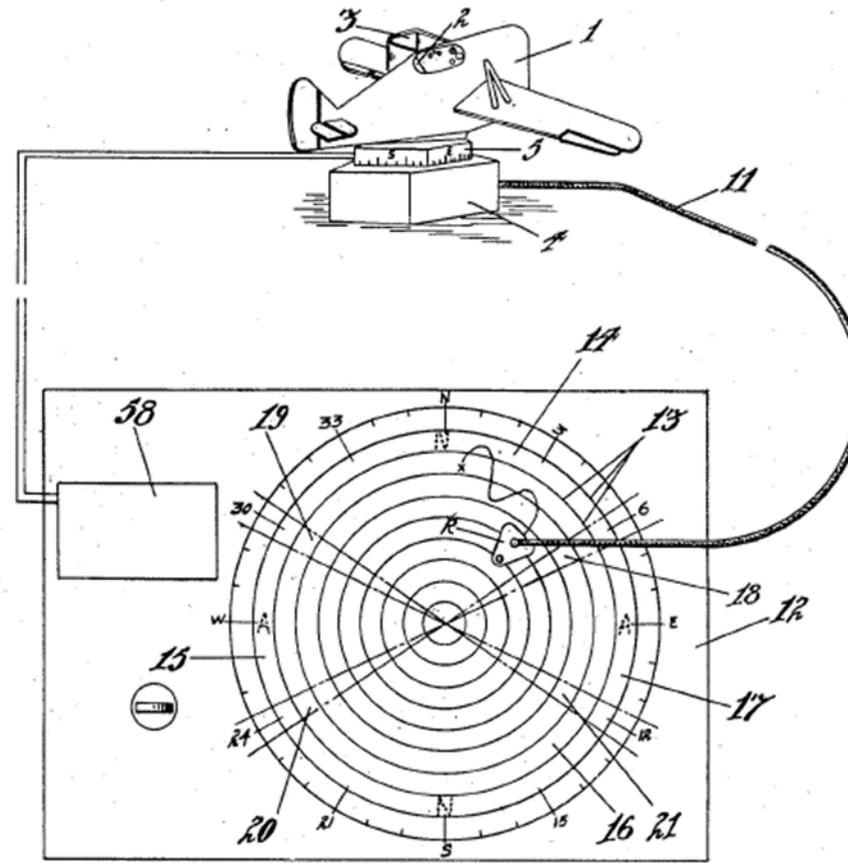
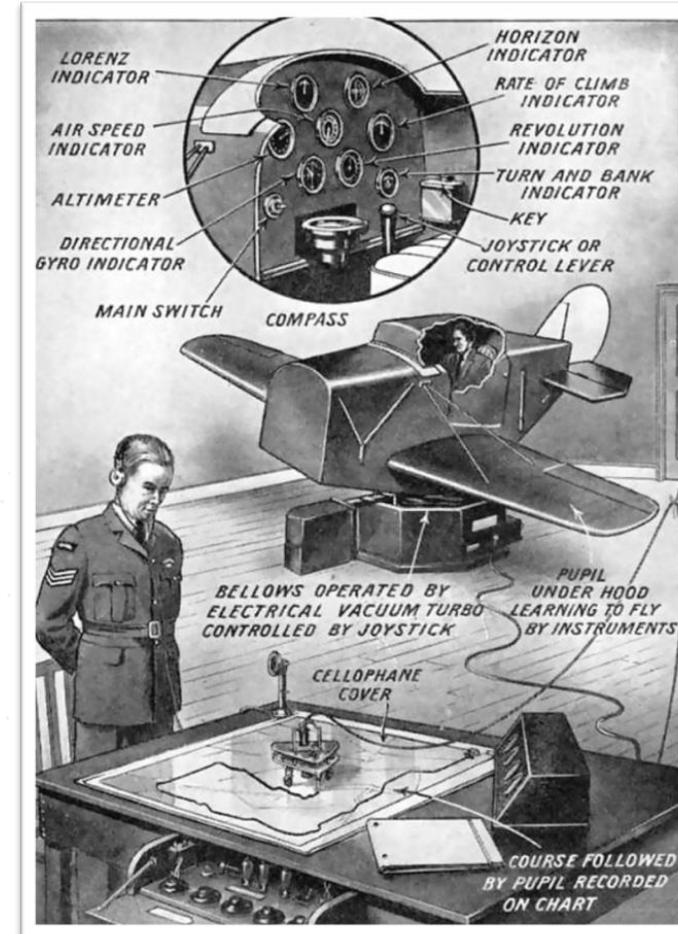


Fig. 1.



Plan de Instrucción sobre el Link Trainer

SKY TRAILS *in a* **LINK TRAINER**

Perfection in Instrument Flying and Radio Navigation Technique can be attained quicker, safer and more economically in the LINK INSTRUMENT FLYING TRAINER

Every Aviation Cadet receives instruction in the LINK TRAINER

are faithfully and accurately traced on a map or chart by the Automatic Recorder on the Instructor's Desk

DEVELOPED AND MANUFACTURED BY LINK AVIATION DEVICES, Inc.

The advertisement features a central illustration of the Link Trainer simulator, showing a cockpit on the left and an instructor's desk with a map and recording device on the right. A small airplane is shown flying above the desk, with a line connecting it to the recording device. Below the illustration is a logo consisting of a shield with wings and a caduceus-like symbol.

Capacitación en **vuelo instrumental**: 20 horas

- Link Trainer: 15 horas
- Vuelo real: 5 horas

En Link Trainer con cabina abierta

- Los primeros 60 minutos para la familiarización con los controles y los instrumentos

En Link Trainer con cabina cerrada

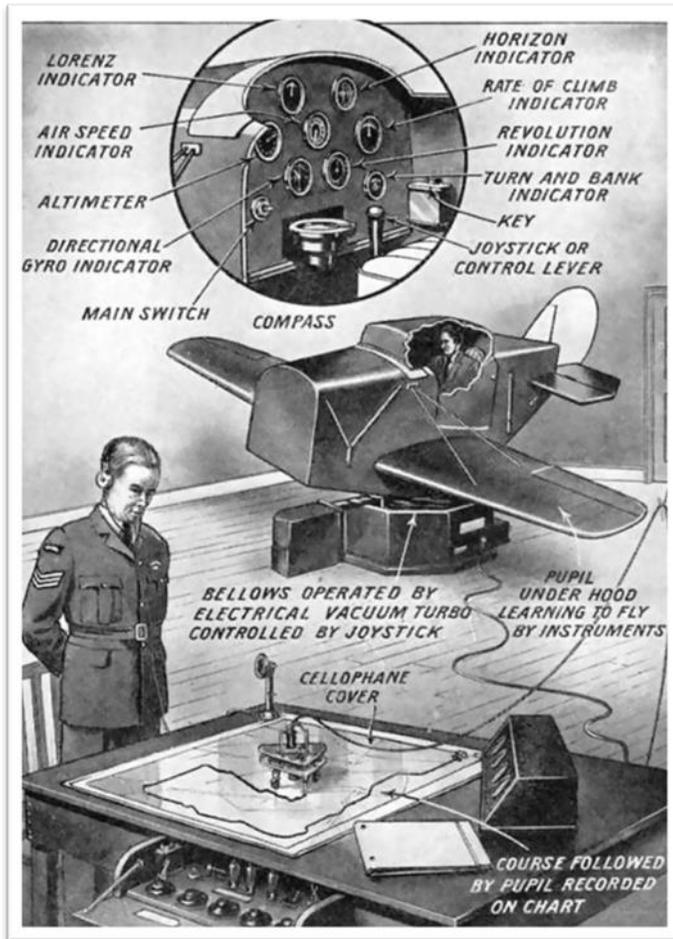
- Hasta 4 horas sobre el uso de controles e instrumentos aprendiendo a realizar giros lentos, giros rápidos y recuperación de giros viendo únicamente los instrumentos
- El resto de las horas, unas 10, se empleaban en el vuelo instrumental para radio navegación



Museo del Aire. Madrid

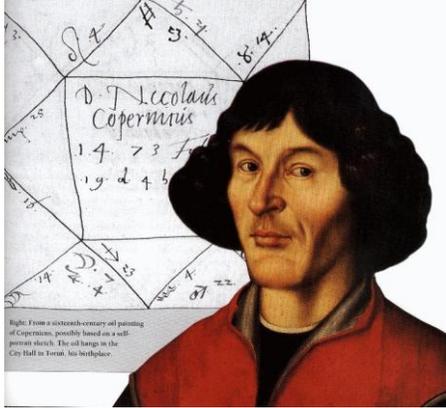


Análisis del Link Trainer “Blue Box”



- Primera conclusión: la propia viabilidad de estas máquinas para dar adiestramiento efectivo y con costes razonables. La tasa de accidentes disminuye drásticamente
 - Desde un punto de vista conceptual, este entrenador establece los siguientes **principios básicos** que tiene cualquier sistema de adiestramiento hoy en día
 - El diseño del sistema lo gobierna un **objetivo** bien definido de adiestramiento: en el caso del Link Trainer, vuelo solo por instrumentos
 - El entrenador posee **dos entornos** colaborativos: entorno **alumno** y entorno **instructor**
 - Cada entorno está dotado de las capacidades necesarias cumplir los objetivos de adiestramiento:
 - (1) entorno alumno: barra de control, pedales, instrumentos, auriculares y micro
 - (2) entorno Instructor: réplica de instrumentos, grabadora, mapas, definición de las condiciones iniciales del ejercicio
 - El instructor realiza varios **roles** durante un ejercicio de adiestramiento: (1) el propio de **instructor**, seleccionando el aeropuerto destino, la posición, rumbo y actitud inicial del avión, comunicándose con el alumno a través del intercomunicador, observando y evaluando la trayectoria realizada, (2) el **rol de radio baliza** para decidir qué tipo de señal radio envía al alumno comandando el aparato generador de señales
- Por otra parte, el entrenador marca su propia línea de **evolución**:
- La necesidad de dotar de escenas visuales al alumno
- Y también su importante **limitación**:
- La solución **empírica** de mostrar en los instrumentos los efectos que ocasionan las acciones sobre los mandos de vuelo supone una complejidad creciente del sistema electro-neumático y es además fuente de errores por la dificultad de los ajustes.

Del Entrenador de Link a los Simuladores Electrónicos



Copérnico (1473-1543)



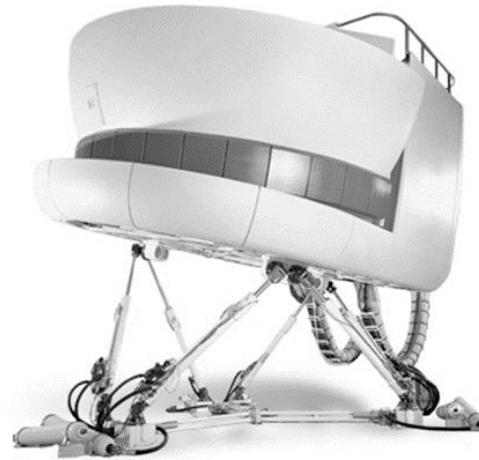
Newton (1643-1727)

Primeros Entrenadores vs. Simuladores Electrónicos - Copérnico vs. Newton

- Movimiento por ajustes empíricos de los efectos de los controles vs. resolución de las ecuaciones de movimiento
- La transición se efectúa en los años del programa espacial con las primeras calculadoras analógicas electrónicas utilizadas en los simuladores del programa Mercury



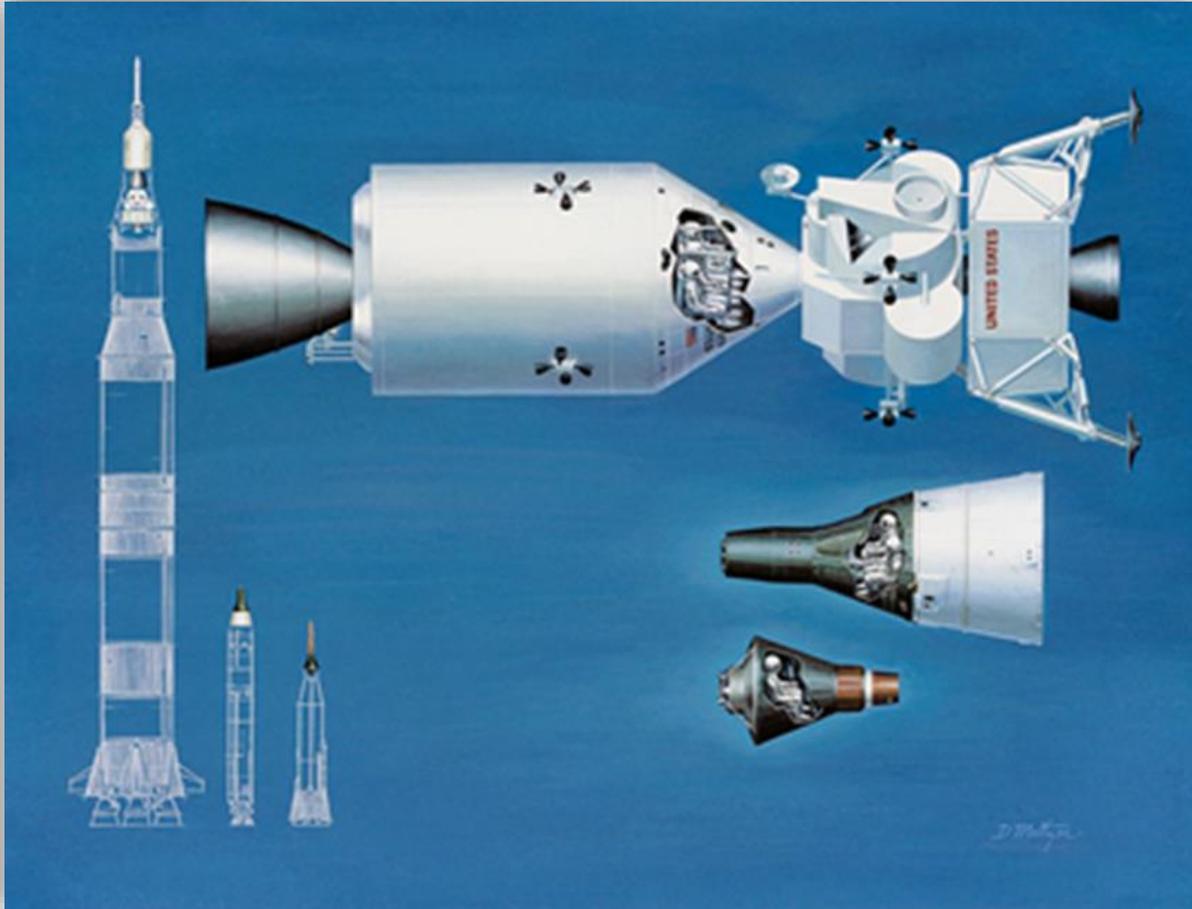
Ajustes empíricos



Ecuaciones de movimiento

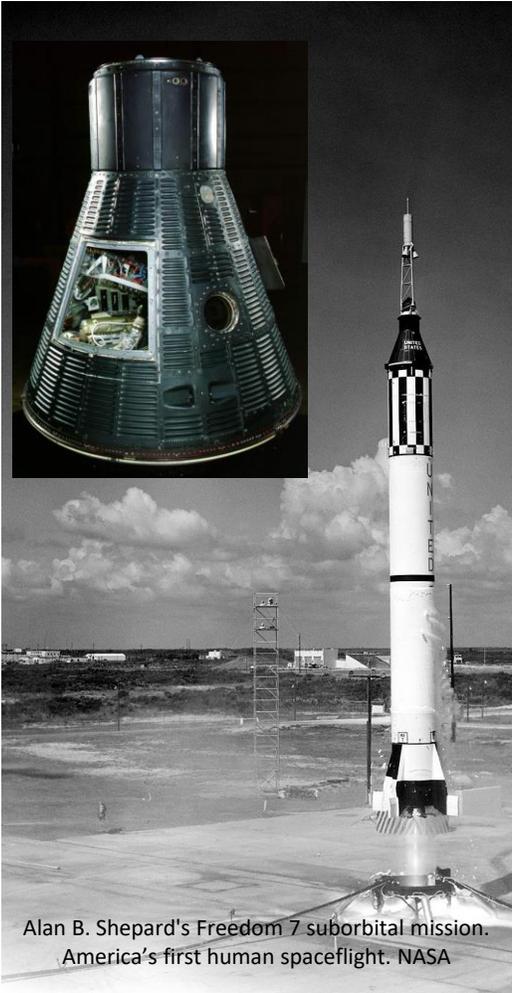
Entrenadores actuales vs. Simuladores

- Hoy día ha desaparecido esta distinción pues unos y otros son “newtonianos”
- Entrenadores: cabinas abiertas o cerradas sin plataforma de movimiento
- Simuladores: cabinas cerradas sobre plataforma de movimiento 6 ejes

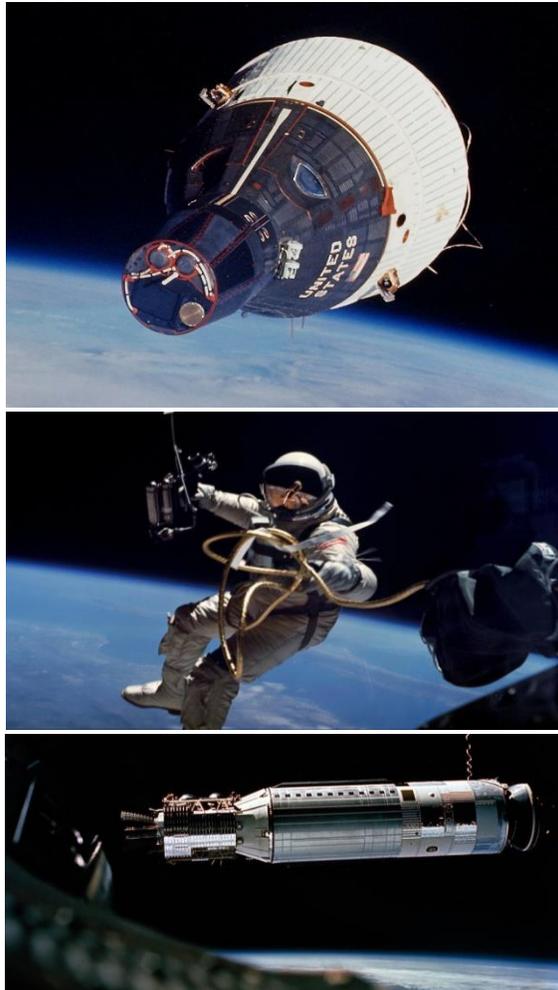


- La carrera espacial fue el campo de batalla tecnológico de la Guerra Fría que enfrentó a EEUU con la URSS.
- El primer hito de poder tecnológico al inicio de dicha guerra fue el lanzamiento del Sputnik I, primer satélite artificial de la historia, el 4 de octubre de 1957 por la Unión Soviética
- Al año siguiente EEUU crea las dos agencias tecnológicas más importantes del pasado siglo, ARPA (después DARPA) en febrero y la NASA, julio de 1958

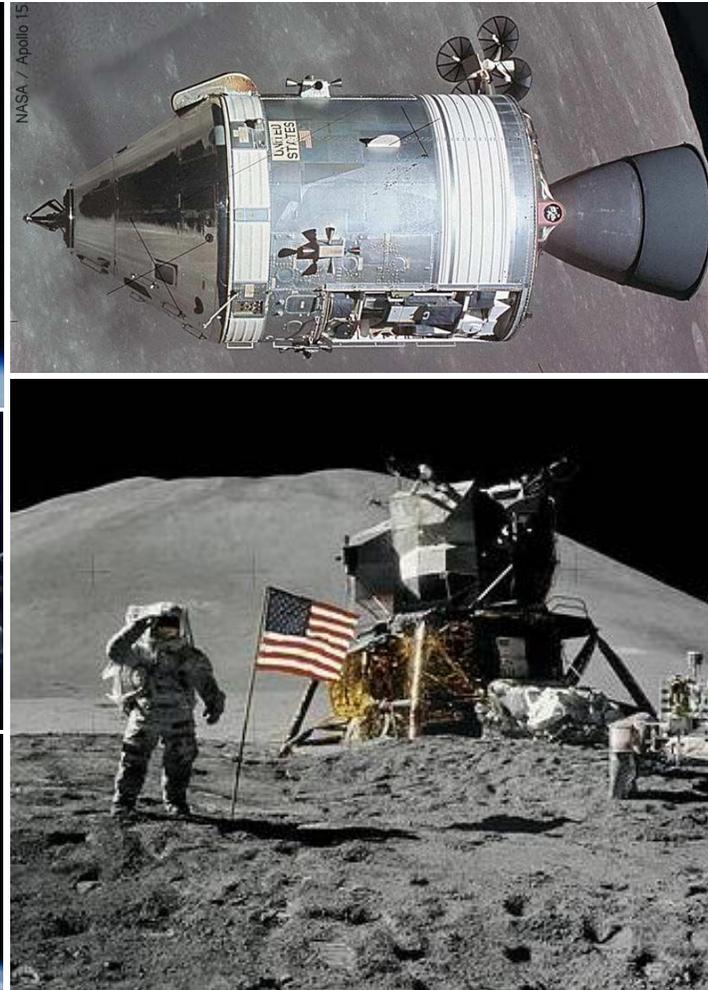
Simuladores de Adiestramiento Carrera Espacial



Mercury 1958-1963

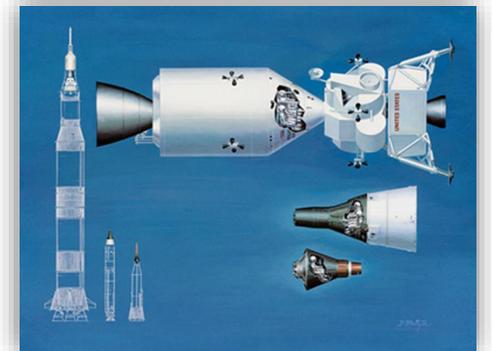


Gemini 1961-1966

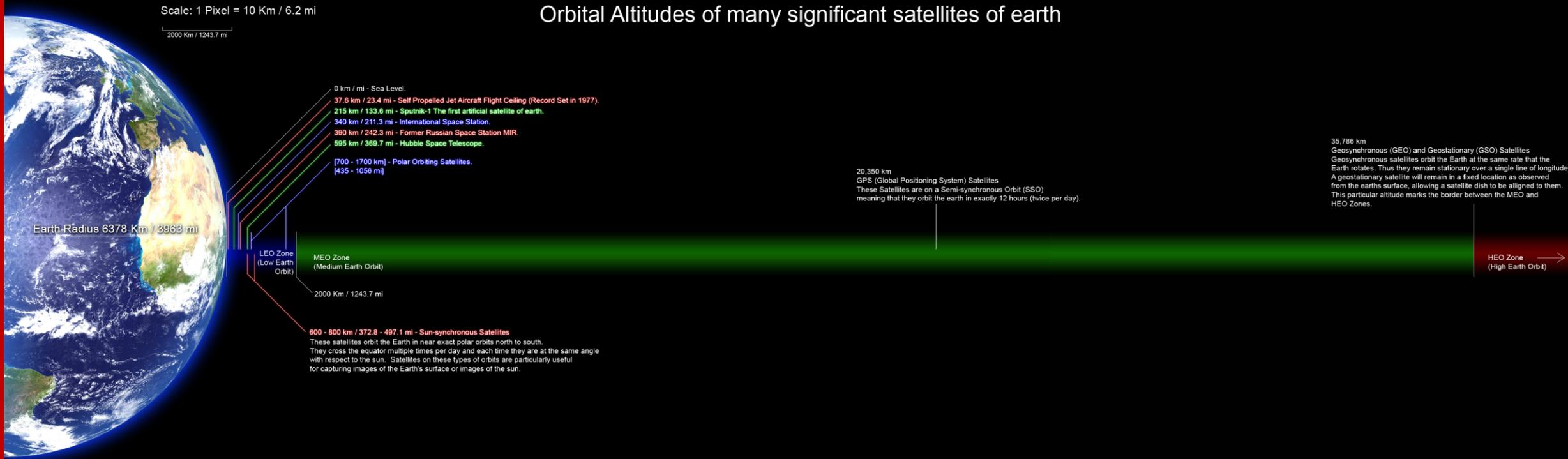


Apollo 1961-1972

- Mercury
 - 4 simuladores
- Gemini
 - 5 simuladores
- Apollo
 - 15 simuladores

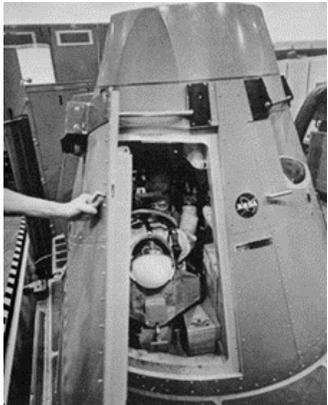
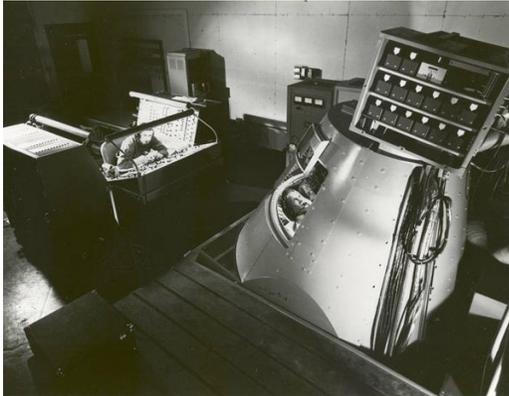


Orbital Altitudes of many significant satellites of earth



Cortesía Wikipedia. Artículo *Low Earth orbit*

El adiestramiento en los simuladores



- la NASA requirió cientos de horas de entrenamiento en simuladores de alta fidelidad
- Cada tripulante de los programas Mercury, Gemini y Apollo empleó un tercio o más de su tiempo total de entrenamiento en simuladores. En un vuelo espacial no hay segunda oportunidad
- Proyecto **Mercury**, 4 simuladores. **Calculadoras analógicas** para resolver las ecuaciones del movimiento y suministrar las señales a los instrumentos de cabina
- Proyecto **Gemini**, 5 simuladores: sistemas **híbridos** analógicos y digitales. Honeywell DDP-24 con transistores y memoria de ferrita. **Simulación funcional** del ordenador de a bordo. Escenas **visuales** cámaras de televisión y maquetas de "paisajes espaciales", y **cámaras robotizadas**. CRT unidos a las ventanas. **Simulaciones integradas** con el Centro de Control, uniendo Cabo Cañaveral y Huston y la red mundial de seguimiento en 1964. Experiencia pionera en lo que hoy se denomina Distributed Mission Training DMT
- Proyecto **Apollo**, 15 simuladores, siendo los principales el Simulador de Misión del Módulo de Mando y Simulador de Misión del Módulo lunar. **Emulación** de los ordenadores de a bordo en un mainframe. Los simuladores del Modulo de Mando de Apollo y del Modulo Lunar podrían realizar **simulaciones integradas** con el Centro de control de la misión
- Es en el programa **Shuttle** donde se da el paso de la **integración de la aviónica real** en los simuladores de misión

Dispositivos actuales de adiestramiento - Categorías



BITD



FNPT



FFS



FTD



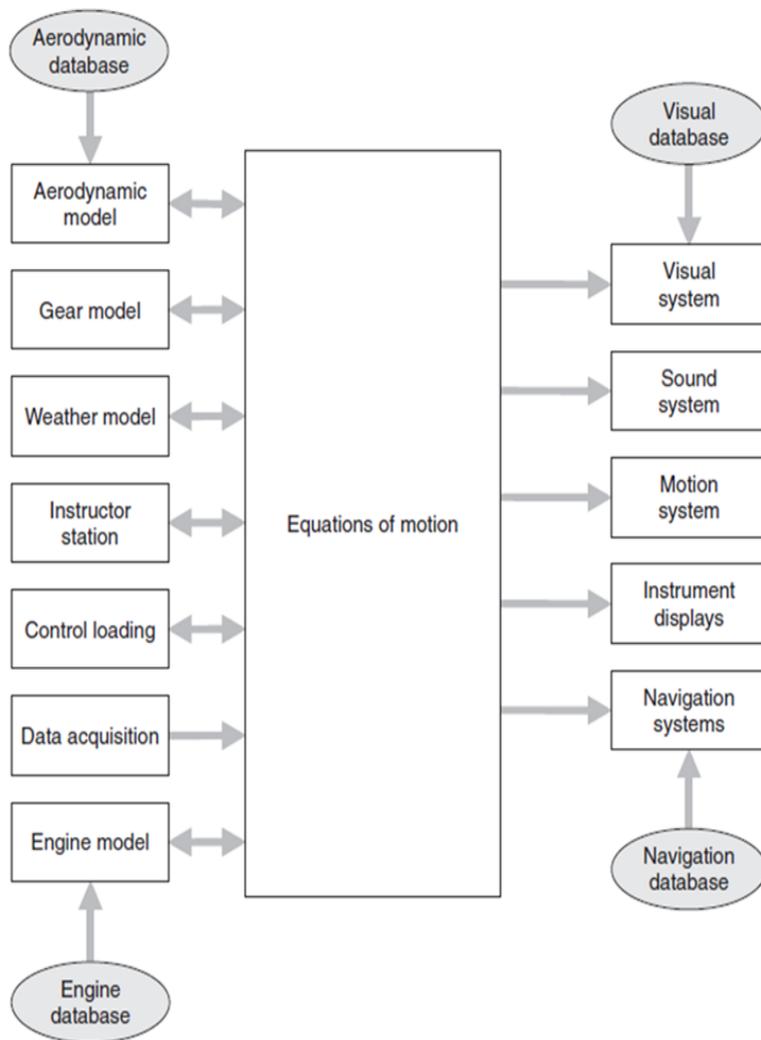
- Las categorías definidas por la **European Aviation Safety Agency** para los simuladores de adiestramiento son:

- Basic Instrument Training Device (**BITD**)
- Flight Navigation and Procedures Trainer (**FNPT**)
- Flight Training Devices (**FTD**)
- Full Flight Simulators (**FFS**)

- Todos los niveles de FFS se evalúan objetivamente contra datos de validación específicos del avión (típicamente datos de prueba de vuelo de la aeronave) para asegurar que la aerodinámica del FFS, las características de control de vuelo y las características de manejo en tierra representen una marca, modelo y serie de aeronave específica

- Análisis de las necesidades de Adiestramiento. Training Syllabus

Organización del Simulador



Organización de un simulador de vuelo

- **Ecuaciones de movimiento:** Las ecuaciones de movimiento son el punto focal de todos los simuladores de vuelo. Resuelven el movimiento lineal y rotatorio de la aeronave, tomando todas las entradas, incluyendo controles de piloto, vientos, términos aerodinámicos y términos del motor con objeto de calcular las variables que representan el estado de la aeronave simulada, particularmente fuerzas, momentos, actitud, altitud, rumbo y velocidades. En la mayoría de los simuladores de vuelo, las ecuaciones de movimiento se actualizan 50 o 60 veces por segundo
- **Modelo Aerodinámico:** calculo de las fuerzas y momentos haciendo uso de la base de datos aerodinámica obtenida por pruebas en vuelo y tunel de viento
- **Modelo de motor:** calcula el empuje, flujo de combustible, a diferentes regímenes de velocidad y niveles de vuelo. Incluye también la simulación de los distintos modos de fallo.
- **Sistema de Adquisición de Datos:** lee y envía las señales a los controles e instrumentos de cabina que pueden ser partes reales, o réplicas. Hay que tratar señales digitales y analógicas.
- **Modelo de Tren:** calcula las fuerzas derivadas del tren. Modelo importante para la práctica de situaciones de emergencia antes de despegar y en el aterrizaje
- **Modelo de entorno atmosférico:** Calcula los parámetros de presión, densidad y temperatura del aire. También modela los tipos distintos de vientos y turbulencias, aspectos importantes para un buen entrenamiento de emergencias
- **Sistema Visual:** Suministra escenas visuales en tiempo real generadas para el punto de vista del piloto.
- **Sistema de sonido ambiente:** Reproduce el ambiente de ruidos y sonidos de cabina, alarmas, ruido aerodinámico, ruido de motor, etc.
- **Sistema de Movimiento:** Para que el piloto sienta las sensaciones del vuelo real. Sin embargo no es posible reproducir las mismas aceleraciones. Con la ayuda del cerebro y una buena coordinación con el sistema visual puede conseguirse el mismo efecto sensorial de movimiento
- **Control de Cargas:** Para reproducir las sensación real en los mandos de vuelo mediante servos que les añaden resistencia en función de la velocidad aerodinámica
- **Instrumentos.** De los instrumentos convencionales se ha pasado a instrumentación electrónica EFIS (Electronic Flight Instruments) que muestran gráficos sintéticos. El simulador puede incorporar el mismo instrumento que el avión o bien emulación de dicho instrumento en hardware de coste menor.
- **Entorno táctico:** en simulación militar pueblan el entorno de vuelo simulación de otros aviones, vehículos terrestres para recrear el tipo de misión de adiestramiento. El instructor puede tomar control de cualquiera de esos elementos y hacer el role de acompañante o de contrario.
- **Y todo en TIEMPO REAL:** “computación en tiempo real” NO es sinónimo de “computación rápida”: aunque una simulación en tiempo real puede requerir una computadora rápida, lo que esta indicando es que todos los cálculos de los módulos anteriores deben completarse dentro de un marco temporal fijo y predeterminado; hoy día es de unos 20 ms equivalente a 50Hz

Núcleo de proceso – el entorno Alumno – el entorno Instructor



Núcleo de proceso



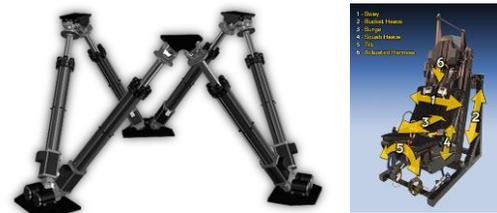
Entorno alumno



Entorno instructor

Clúster de procesadores
Tiempo real
Data Package

Fidelidad al tipo de avión



Adiestramiento
Inmersión

Supervisión
Control de la simulación
Máxima información

Data Package – la fidelidad al tipo de avión



Clúster de procesadores
Tiempo real
Data Package

Tiempo real
Fidelidad al tipo de avión

- El Data Package lo forman un conjunto de datos de todos los subsistemas del avión obtenidos en pruebas de vuelo o túnel aerodinámico
- Lo suministra el fabricante del avión
- Elemento imprescindible para satisfacer la fidelidad al modelo de avión
- Evita situaciones de “Negative Training”
- Condiciona el precio final del simulador

- Puede incluir también módulos software de la dinámica de vuelo
- Puede incluir elementos hardware de emulación de EFIS

- El fabricante puede ofrecer también la asistencia técnica necesaria para satisfacer las necesidades de **certificación** del simulador

Entorno alumno – Cabina, Mandos de vuelo e Instrumentos



Entorno alumno

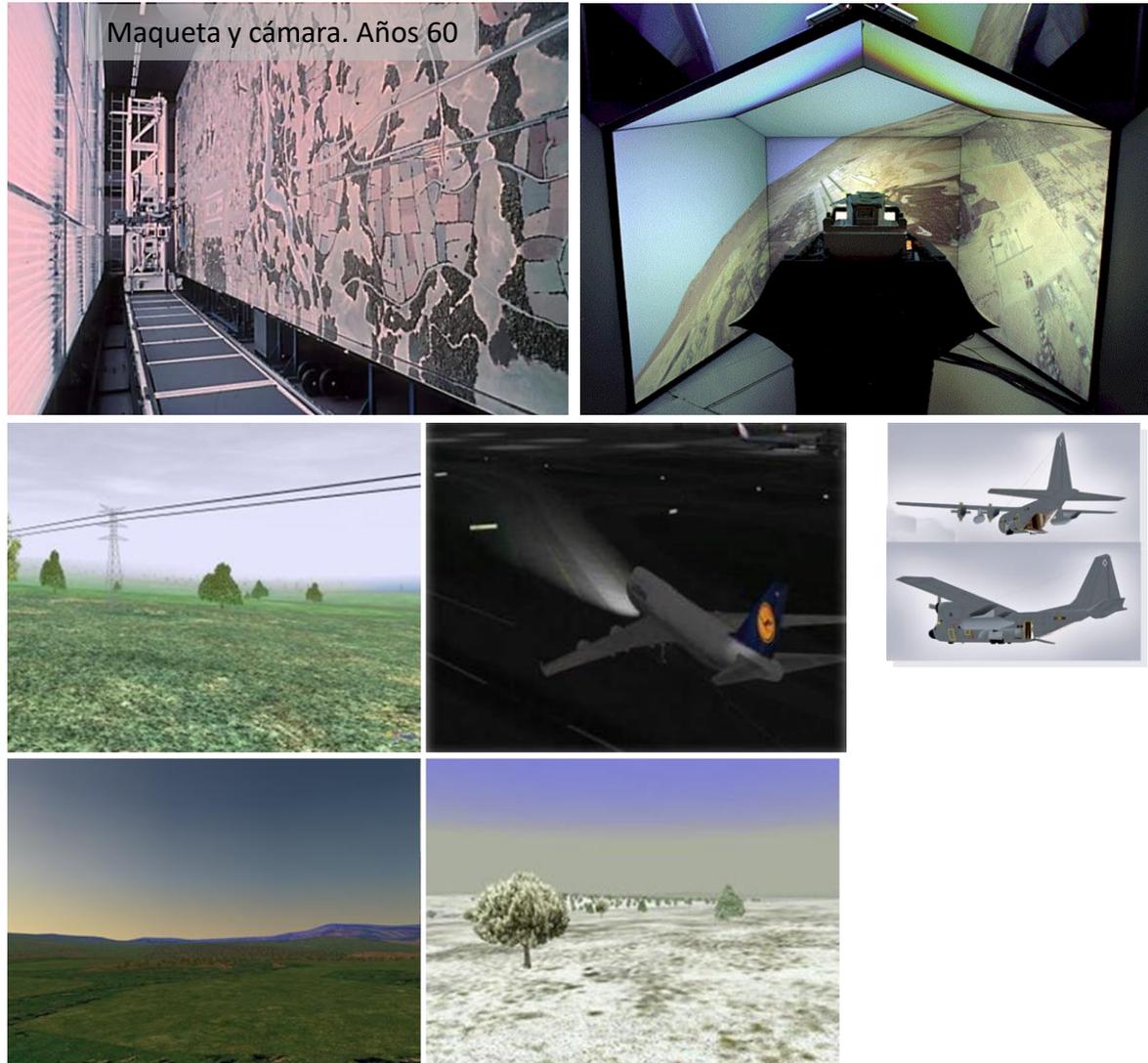


Adiestramiento
Inmersión



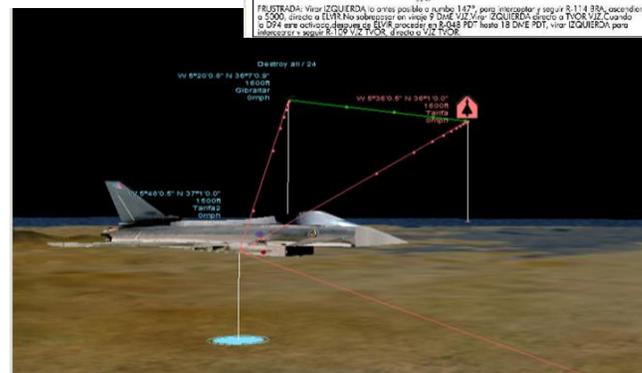
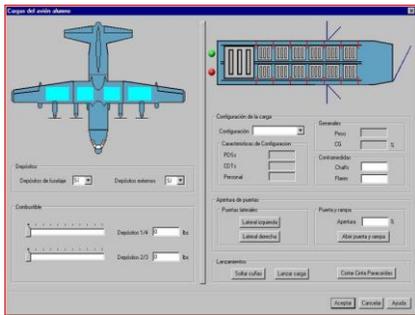
- **Cabina:** abiertas, cerradas, o sin cabina
- Mandos de vuelo: sistemas de **control de carga** para reproducir la sensibilidad al tacto
- **Instrumentos:** reales, simulados, EFIS
- **Movimiento:** la aceleración es un problema
- El cerebro y las imágenes del visual pueden ayudar al efecto sensorial de movimiento

Entorno alumno – Sistema Visual



- En el sistema visual distinguimos el Generador de Imágenes, el sistema de Proyección y el Gestor de las Bases de Datos de Escenarios y modelos
- Se busca el realismo de las escenas incluyendo:
 - texturas del suelo típico de la zona
 - imágenes digitales de la propia zona
 - modelación de las estrellas
 - fases de la luna
 - tormentas dinámicas
 - atmósfera con lluvia, niebla, día, noche, amanecer, atardecer
 - Efectos especiales; humo, polvo, estelas
- Los sistemas de proyección hoy día suelen ser de proyección directa en domo con esfericidad o bien en domo poliédrico como el de la figura
- La base datos gestiona el terreno digital, las texturas, los modelos de edificios, de aeropuertos, y todos los elementos móviles

Entorno Instructor – Control, Supervisión de la simulación y Malfunciones



- El instructor dirige el adiestramiento del alumno
- Arrancar, parar la simulación, activar y desactivar las malfunciones o fallos.
- Cuanto mayor sea el número de fallos simulados mayor será el número de situaciones de emergencia que pueden practicarse en el simulador.
- El instructor tiene a su disposición
- Mapas de aproximación para observar
- Mapas generales
- Un sistema de visualización con simbología específica para conocer el estado de los radares y evaluar desde su puesto la ejecución del ejercicio táctico
- Los actuales puestos de instructor tienen capacidad también para el Briefing, Planeamiento y Debriefing de Ejercicios o Misiones

- Antes de ser aceptado como sistema definitivo de adiestramiento el simulador pasa por un proceso de pruebas:
- **Verificación:** asegura que el simulador cumple los **requisitos** de diseño
- **Validación:** asegura que el simulador cumple las **expectativas de utilidad** para el usuario: útil para el adiestramiento
- **Acreditación** o Certificación: cumple los requisitos para que **una agencia reguladora** le otorgue un certificado para su uso como sistema de adiestramiento.
- **Agencias de certificación de simuladores**
 - EASA – European Aviation Safety Agency
 - FAA – Federal Aviation Administration
 - CAAC Civil Aviation Administration of China



- Los proyectos del programa espacial de NASA fueron pioneros en la conectividad de simuladores. Incluso fueron un paso más, conectaron los **Simuladores** de Misión con el Centro de Control **real**.
- La conectividad de simuladores en **misiones integradas** es una necesidad hoy día en el adiestramiento para poner a punto la coordinación de los equipos involucrados en la misión.
- En los años 1990s se definió el estándar **IEEE Standard 1516** para dicha conectividad denominado **HLA high level architecture**. Detalla qué intercambio de información debe haber entre simuladores y cómo deben sincronizar sus acciones independientemente del tipo de simulador y de su arquitectura

- **Tiempo real** con cualquier arquitectura y solución tecnológica en el simulador
- **No es admisible el Adiestramiento Negativo**

- **Sintonía de la dinámica de vuelo a la propia del avión.** Data Package es un elemento crítico.
- **Coordinación de los estímulos sensoriales:** visual, movimiento, táctiles en los controles de vuelo, auditivos
- **Integración de la aviónica** en el simulador. Cada proyecto tiene sus dificultades
- **Prototipado rápido de escenarios visuales** con datos geoespecíficos, aeropuertos y elementos culturales reales

- **Factor humano:** Son muchas las personas involucradas en el desarrollo, fabricación e integración de los múltiples elementos que configuran un simulador. Se requieren por tanto cualidades de **trabajo en equipo, iniciativa y creatividad.**

- [1] INDRA, 2018
 - <https://www.indracompany.com/es>
 - <https://www.indracompany.com/es/simulacion>,
- [2] Pérez-Nievas, José Antonio, 2017. “*CESELSA. 1979-1989 Diez años creciendo con tecnología propia y española*”, Iberfomento.
- [3] Edwin A. Link, 1930. Link Trainer, Google Patents
 - <https://patents.google.com/?inventor=Jr+Edwin+A+Link&sort=old>
 - <https://patentimages.storage.googleapis.com/af/90/f1/d285ed1242b560/US1825462.pdf>
- [4] Selfridge Military Air Museum. The Link Trainer Project
 - Vídeo <https://youtu.be/Fy8mEq6Ok7o>
- [5] NASA Simulators
 - <https://history.nasa.gov/computers/Ch9-2.html>
- [6] Allerton, David. 2009. *Principles of Flight Simulation*. John Wiley & Sons, Ltd