

## GRUPO SIMULACION DINAMICA DEL VUELO

### Actividades y aplicaciones:

El desarrollo de un sistema de simulación dinámica del vuelo involucra además de la construcción mecánica del equipamiento, el estudio de las leyes que inciden sobre todas las variables del vuelo, desarrollo de ecuaciones e implementación de las mismas en soft y hard. La futura disponibilidad de este equipo no sólo tiene un fin didáctico sino que permitirá brindar servicios al respecto. Asimismo el resultado de las etapas de investigación y desarrollo del proyecto posee un enorme potencial de transferencia de tecnología.





## PRESENTACION

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA AERONAUTICA  
SECRETARIA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADOS

2004

## **Introducción**

La simulación en el campo aeronáutico constituye una herramienta importante, a tal punto que el primer simulador, como se conocen actualmente, ha sido desarrollado en el dominio aeronáutico. La importancia como herramienta radica en que tanto en el ámbito Universitario como en la industria Aeronáutica es necesario contrastar los resultados teóricos con la práctica, pero lamentablemente, en los aspectos relacionados con la aerodinámica aplicada, y la estabilidad y control, la única posibilidad sería la de construir los prototipos de aeronaves en estudio. Es aquí donde la simulación se constituye una herramienta insustituible en la evaluación y determinación de los comportamientos reales sin la necesidad de arriesgar vidas y aeronaves. Para dar un ejemplo que aclare estos conceptos, podemos mencionar la situación de detención de motores en el despegue: Sería riesgosa efectuar esta maniobra en una aeronave real, además de estar expresamente prohibida por esta causa, pero no pasa de un momento de tensión si se simula correctamente en un dispositivo en tierra.

El grupo de investigación tiene por objeto generar algoritmos, software de simulación, y el hardware necesarios para modelar aeronaves en etapa de diseño o existentes cubriendo una amplia gama de necesidades entre las cuales se puede mencionar: reproducción y estudio de accidentes; estudio e investigación en el ámbito de la ingeniería aeronáutica; entrenamiento de tripulaciones; análisis de modificaciones a aeronaves; etc.

Estos objetivos no son menores si consideramos la falta de desarrollo de este campo a nivel regional y las tecnologías involucradas desde el punto de vista electrónico, de sistemas, y aeronáutico, lo que constituye un verdadero desafío con múltiples posibilidades como se verá en el desarrollo de esta presentación.

## **Presentación**

El Grupo de Investigación de simulación dinámica del vuelo, tiene como objetivo el estudio de los modelos matemáticos necesarios para la simulación de los fenómenos físicos asociados a la aerodinámica, estabilidad y control y performances operativas de aeronaves. El producto buscado es la generación de simuladores que puedan representar estos fenómenos físicos para:

- Estudio de diseño de aeronaves.
- Reproducción y análisis de accidentes o situaciones de riesgo.
- Entrenamiento de tripulaciones.
- Estudio de modificaciones de aeronaves.

Cabe aclarar que todo el estudio se encuentra orientado a maximizar el reuso de las tecnologías involucradas, sobretodo lograr que el software sea reutilizable aunque el hardware involucrado cambie.

El tipo de simulación objetivo de estudio tiene requerimientos muy particulares. La simulación de vuelo tradicional utiliza frecuencias de 60 Hz para la ejecución de sus procesos, esto nos determina que los ciclos de mayor velocidad se ejecutan en 0.016 seg. Considerando que el tipo de simuladores bajo estudio de este grupo no se basa en datos tabulares de aeronaves existentes, sino que calculan absolutamente todos los parámetros

físicos mediante algoritmos matemáticos de desarrollo original, el poder de cálculo exigido es superior al de simulador de vuelo tradicional. La consideración más importante respecto al poder de procesamiento requerido, se debe a que los fenómenos bajo estudio, suelen ser funciones oscilatorias con períodos menores a 0.5 segundos y revisten interés inclusive los que poseen duraciones en el orden de 0.1 segundos. El estudio de tales comportamientos exige la obtención de valores para los parámetros con ciclos de por lo menos 0.01 seg de forma de obtener 10 puntos para estas frecuencias. Esto no es menor desde el punto de vista del procesamiento ya que el poder de cálculo debería permitir generar ciclos completos de proceso en estas frecuencias.

### **Marco Contextual**

Conceptualmente como es conocida actualmente, la simulación de vuelo nace en 1929 cuando el Ing. Edwin A. Link, logró poner en funcionamiento el primer simulador de vuelo. Es decir, el primer simulador bajo la concepción actual, ha sido desarrollado en el dominio aeronáutico. Pero el impulso de la herramienta como la conocemos en nuestros días se sitúa en la Segunda Guerra Mundial, hasta generalizar el concepto actual que la liga a un computador y/o dispositivos electromecánicos.

Que ubiquemos el origen de la simulación en la industria aeronáutica no es arbitrario, sino que es un dominio que, por sus características, justifica ampliamente el uso de la simulación ya que, tanto en el ámbito Universitario como en la industria Aeronáutica es necesario contrastar los resultados teóricos con la práctica, pero lamentablemente, en los aspectos relacionados con la aerodinámica aplicada y la estabilidad y control, la única posibilidad sería la de construir y volar los prototipos de aeronaves en estudio.

En el campo del diseño, durante muchos años los Túneles Aerodinámicos, fueron la herramienta disponible más utilizada, sin embargo en la actualidad los desarrollos numéricos y la posibilidad de respuesta en tiempo real, ha permitido encarar desarrollos a partir del año 1991/1992, utilizando simuladores como verificación previa a la construcción de los prototipos lo cual, en muchos casos, constituye el único complemento posible a los tratamientos analíticos clásicos.

Entonces, la Simulación del comportamiento dinámico de un avión en la fase de desarrollo tiene por objeto prever el comportamiento dinámico de las aeronaves, mediante el uso de potentes ordenadores que mediante programas adecuados pueden predecir el comportamiento en vuelo de la futura aeronave. Este tipo de simulación es de reciente utilización y tiene por sus características una inmejorable relación con aspectos académicos y de formación profesional, además de la simulación de accidentes de aviación. La aplicación académica permitiría simular integralmente las características de vuelo de los proyectos desarrollados por alumnos, como método de comparación de resultados de desarrollos analíticos, en general para aspectos particulares del diseño, y como respuesta integral del comportamiento de la aeronave, a la vez que generar posibilidades de investigación aplicada a diversos grupos, y en diversos temas.

Cabe citar como antecedente para la aplicación académica e industrial de este tipo de simuladores al igual que en desarrollos de ingeniería, los trabajos presentados en el II Congreso Nacional de la Ingeniería Aeronáutica, celebrado en España (Madrid 15/19 Nov-93) presentados por los Ing. J. Lapastora Turpin, y Joaquín. Vigil de la Villa Mencia (C.A.S.A.). También vale citar como antecedente el dispositivo similar al propuesto desarrollado con fines didácticos por el Departamento de Aeronáutica y Astronáutica del Instituto Tecnológico de Massachussets (Massachussets Institute of Technology-MIT), el cual responde más a aspectos relacionados con la aproximación por instrumentos y la generación de imágenes ambientales exteriores, con bastante menos precisión en los

aspectos aerodinámicos; y el proyecto LaRS++ (Langley Standard Real-Time Simulation in C++ framework – 1995 - NASA), el cual constituyó el paso del framework denominado LaRC, desde FORTRAN procedural, a Orientación a Objetos en C++ denominado LaRS++, y es utilizado principalmente para probar sistemas experimentales que han demostrado trasladarse a la aeronave sin necesidad de modificaciones gracias a la orientación a objetos.

Analizando los simuladores para diseños aeronáuticos se podrá notar que sólo organizaciones de gran envergadura poseen desarrollos serios de este tipo, los cuales evidentemente no se encuentran disponibles fuera de los mencionados propietarios.

Existen también los conocidos simuladores de vuelo como programas comerciales masivos. La gran mayoría de desarrollos en este campo son simuladores ineficientes que son esencialmente un entretenimiento. También existen, a nivel comercial, simuladores basados en aeronaves existentes para entrenamiento de pilotos que representan a única aeronave; etc. Además de esto, la mayor parte de los programas existentes están realizados en lenguaje procedural requiriendo un alto esfuerzo el modificar y mantener dicho código, además de incorporar problemas de eficiencia. Estos últimos puntos se encontrarán como problemas centrales en toda la bibliografía sobre simulación ya que, una de las características inherente a este tipo de sistemas es el cambio constante de estructuras complejas propias del dominio de aplicación, lo cual hace mandatorio el reuso, fácil mantenimiento y extensión.

A continuación abarcaremos una introducción teórica sobre los conceptos que forman el dominio de estudio, la cual ayudará a clarificar ciertos conocimientos sobre el dominio que estamos analizando.

### **Importancia y Papel de la Simulación**

Evidentemente de lo expuesto hasta ahora surge la importancia en costos y posibilidades que presenta el uso de la simulación en el ámbito aeronáutico.

Por supuesto existen restricciones y puntos a tener en cuenta. La simulación requiere de una acertada modelización de los fenómenos físicos involucrados, y una amplia experimentación, los factores de riesgo son:

- La creación de los modelos y algoritmos matemáticos (es muy demandante).
- Conocimiento limitado del sistema a simular.
- Velocidad de procesamiento de los datos (Tiempo real).

Existe una regla que postula: “Si el experimento es posible, realícelo. Es siempre el mejor método porque todos los aspectos son considerados. Aunque otros métodos se utilicen durante la etapa de diseño, el experimento puede servir como evaluación final del sistema. Si el experimento no es posible, trate de encontrar un método analítico. Si no hay disponible, use simulación”.

La simulación no es solo el último recurso como se postula en la regla anterior. La simulación puede contribuir a entender mejor el sistema no solo brindando respuestas a las preguntas originalmente planteadas, sino que generalmente la creación del modelo de simulación es la primera ocasión donde ciertas cosas son tomadas en cuenta.

Algunos beneficios son el de reducir gastos por el uso de munición real; disminuir el desgaste y deterioro de armas y sistemas electromecánicos; mejorar las destrezas de las tripulaciones en el uso de los sistemas de la aeronave, en tareas individuales y colectivas, sin poner en riesgo vidas y bienes. Aquí es donde encontramos uno de los puntos más fuertes: las aeronaves miden su vida en horas de vuelo, ciclos de aterrizaje y despegue entre otros parámetros. Avanzar en estos parámetros implica costos importantes de mantenimiento, seguridad, amortización que puede ser reducido por el uso de simuladores. No valorar la influencia que tiene esta herramienta en la formación de tripulaciones es camino seguro al deterioro progresivo del material como también a sub explotar todas las capacidades que posee.

Ante la necesidad de modelar lo más cercanamente posible la realidad, la simulación ha penetrado en todo tipo de campos a un ritmo de avance similar a la tecnología más vanguardista. Así tenemos:

- **Militar General:** Se utilizan mayormente en el área de capacitación/investigación y se pueden dividir en 3 categorías a fin seguir un patrón de aprendizaje progresivo:
  - De Función específica o didácticos: introducir a un alumno en el funcionamiento de un subsistema.
  - De Entrenamiento táctico-técnico: Persiguen la comprobación de acciones en el marco de ejercicio de tropas permitiendo seleccionar, evaluar y capacitar al personal en posibles escenarios de contienda futuros. Estos implican la instalación de dispositivos de tiro y sensores en medios reales (BT46 sueco; SimFire inglés; Miles EEUU).
  - De puestos de mando; control: Para formar comandantes y especialistas mediante el empleo de computadoras para recrear el ambiente de combate, como por ejemplo de guerra electrónica. (Army Training Battle Simulation System (ARTBASS); Battalion Automated Battle Simulation (BABAS); Corps Battle Simulation (CBS); Computarized Battle Simulation (COMBAT-SIM)).
- **Aeronáutico:** Es conocida la gran variedad de aplicaciones, pero para el tema que nos compete podemos mencionar:
  - Simuladores de vuelo para el entrenamiento de pilotos: Formar al piloto de una aeronave con situaciones que no podrían producirse durante el vuelo normal de la aeronave o que serían potencialmente peligrosas.
  - Simuladores de mantenimiento para el personal técnico: Para instruir al personal de tierra sobre las operaciones necesarias en aspectos como reparación de sistemas, detección de fallas, procedimientos de rutina, etc. Muchas veces estas situaciones no pueden ser producidas en la realidad debido a que son excepcionales y solamente el personal "que ha vivido la experiencia" sería el único capacitado para afrontarla.
  - Simuladores de tráfico aéreo (ATC) para los controladores de vuelo: permite el entrenamiento e investigación de situaciones en las torres de control. Estas situaciones son también difíciles de producir en la realidad y peligrosas en términos de vidas humanas y material.

### **Tipos de Simuladores en Aeronáutica**

Básicamente existen cuatro tipos de Simuladores, en orden de complejidad creciente, cumpliendo con las prestaciones de:

1. Reproducir en tamaño real la cabina de una aeronave en desarrollo, para poder ubicar los equipos, llaves, asientos, etc.: Este tipo de simuladores es conocido como **Mockup** y carecen de importancia para los objetivos de este grupo, ya que son esencialmente destinados al desarrollo de un avión en particular. También se los usa para aeronaves específicas ya construidas, para instruir a las tripulaciones en la ubicación de los elementos de la cabina (estática).
2. Simulación del Vuelo de un Avión General: Destinado fundamentalmente al entrenamiento de pilotos en maniobras de vuelo y navegación aérea. Los aspectos dinámicos, de performances y operación no responden específicamente a ningún avión en especial, las respuestas (reacciones del simulador) son genéricas y su aplicación es exclusiva para entrenamiento básico de pilotos en el Vuelo Instrumental, por ello se los llama **Entrenadores**.
3. Simulación del vuelo de un avión particular: Similar al del punto anterior, pero con mucha mayor complejidad, ya que representa a un avión en particular, los aspectos dinámicos y de performances están almacenados en tablas que reproducen aspectos del vuelo real de la aeronave que simula. Se los usa para el entrenamiento de pilotos en ese avión en particular. Se los conoce como **simuladores de vuelo**, y en general simulan sensaciones de fuerzas y aceleraciones (**Simuladores dinámicos**).
4. Simulación del comportamiento dinámico de un avión en la fase de desarrollo: Tienen por objeto prever el comportamiento dinámico de aeronaves en desarrollo en la etapa avanzada, están controlados por potentes ordenadores que mediante programas adecuados pueden predecir el comportamiento en vuelo de la futura aeronave. **Son de reciente utilización y tienen por sus características una inmejorable relación con aspectos académicos y de formación profesional.**

De estos tipos de simuladores, el cuarto es el que reviste interés a los fines de este grupo.

## **Tipos de Simulación**

### **Simulación Continua**

Los lenguajes de simulación continua fueron desarrollados al final de los 50 como **simuladores analógicos**. Se basa en crear un sistema electrónico análogo al objeto en estudio cuyo comportamiento se describe por el mismo modelo matemático (ecuaciones diferenciales) que el sistema que está siendo investigado. El sistema electrónico se crea interconectando bloques estándar basados en amplificadores operacionales modificados para actuar como integradores, sumadores, y otras unidades funcionales. Entonces el usuario realiza experimentos con esos sistemas electrónicos aplicando entradas y midiendo el voltaje en ciertos puntos de salida (osciloscopio, plotter). El voltaje cambiante representa una función del tiempo, que es la misma que describe los cambios en el sistema original cuya naturaleza física puede ser totalmente diferente (desplazamiento mecánico, temperatura, etc.). Las computadoras analógicas realizan la función de integración mejor que las digitales que la realizan de forma mas lenta y menos precisa. Algunas aplicaciones especiales se basan en el uso de computadores híbridos, que contienen partes analógicas y digitales conectadas por conversores A/D y D/A. La parte digital hace todo menos integrar.

### **Simulación Discreta**

Se utiliza en sistemas cuya dinámica puede ser considerada como una secuencia discreta de eventos que ocurren en puntos discretos de tiempo. La clave de los lenguajes de simulación discreta es la forma en que controlan la secuencia apropiada de actividades en el modelo.

### **Simulación Orientada a Objetos**

Se puede considerar una clase especial de OOP. Algunos principios de OOP como la existencia de un número variable de instancias de objetos han sido un estándar utilizado en simulación hace más de 30 años (Simula 67). Algunos conceptos como clases, herencia, métodos virtuales, etc., han sido definidos en Simula mucho tiempo antes que sean redescubiertos en OOP.

Algunas características comúnmente aceptadas en simulación orientada a objetos son:

- el algoritmo o dinámica del sistema se expresa en términos de objetos (actores) que existen en paralelo y que interactúan uno con otros. Cada objeto se representa por: parámetros, atributos, métodos, vida, que representa la actividad iniciada desde la creación del objeto.
- Los objetos pueden interactuar de esta forma:
  - acceso directo a parámetros y atributos.
  - Llamada mutua a métodos
  - Comunicación y sincronización de las vidas de los objetos.
- Los objetos similares son agrupados en clases también llamadas prototipos.
- Los objetos pueden ser clasificados jerárquicamente por la llamada herencia o subclases.
- La existencia paralela de objetos necesita estructuras que soporten la cooperación y sincronización de sus vidas. La vida de un objeto no necesariamente tiene una dimensión de temporal, pero en el caso de OOS la tiene.

### **Simulación en línea**

Internet junto a Java y JavaScript ofrecen posibilidades increíbles en resolución de problemas. En vez de descargar e instalar paquetes de software, es posible abrir directamente calculadores, especialmente en problemas poco frecuentes o que no requieran cómputos complejos.

### **Características de las Aeronaves**

El objeto sobre el cual se aplicará todo el desarrollo del proyecto (desde la óptica informática), son las aeronaves. En el sentido más amplio de "aeronaves", se pueden incluir todo vehículo espacial, incluyendo aquellos que operan en la exosfera, o interactúan con la atmósfera terrestre, como los transbordadores espaciales, misiles o vehículos no tripulados de cualquier tipo y con cualquier característica, siendo las leyes extrapolables a cualquier atmósfera hipotética, tal como la marciana.

Reuniendo a todos estos vehículos bajo el concepto genérico de aeronaves, es conveniente analizar sus características, ya que son las que fijan las condiciones de contorno que enmarcan el trabajo del grupo y el enorme grado de complejidad asociado.



Las Aeronaves son vehículos que a diferencia de muchos otros, solo son comparables en su concepción filosófica a los submarinos, esto es se mueven en tres dimensiones, lo que genera desde la óptica de la Mecánica Física, un tratamiento de la dinámica mucho más complejo. Un móvil que se mueva en el espacio de tres dimensiones, puede tratarse desde la óptica teórica de la mecánica como sistemas de ecuaciones diferenciales. Si el cuerpo es rígido, y admitimos tres grados de libertad adicionales, correspondientes a otros tantos controles cartesianos cabeceo, rolido, y guiñada (pitch, roll y yaw), que conforman un sistema de 9 ecuaciones diferenciales simultáneas, que requieren de un tratamiento matricial.

Estas matrices, por razones prácticas y de posibilidad de ser utilizadas para resolver problemas numéricos con solución cerrada, deben ser cuadradas, por lo que los modelos matemáticos de los fenómenos dinámicos, se ven reducidos a solo nueve variables independientes, (nueve ecuaciones), aunque se pueda utilizar adicionalmente las derivadas temporales primera (velocidad) y segunda (aceleración) de éstas.

Sin embargo, sigue existiendo una insalvable limitación: Las ecuaciones diferenciales deben ser lineales, esto es, los coeficientes que caracterizan a cada ecuación diferencial, no deben ser función de las variables de estudio. Esta limitación, para las herramientas analíticas disponibles, es algo prácticamente insalvable, exceptuados casos muy particulares cuya solución es conocida como método de Lyapunov, muy complejo de aplicar en sistemas de ecuaciones.

La dinámica real de una Aeronave es muchísimo mas compleja que estas posibilidades: de hecho podríamos identificar mas de cien variables independientes que afectan al movimiento de una aeronave en el espacio, en especial si incluimos, variación de los parámetros termodinámicos de la atmósfera ( $p, T, R$ , y densidad ( $\rho$ )), de los parámetros físicos de la misma (Vientos, ráfagas, corrientes de chorro, térmicas, corrientes convectivas, etc.), de los cambios de estado de la atmósfera, lluvia hielo, viscosidad, características mecánicas del planeta, aceleración de Coriolis, etc. Aunque estos fenómenos pudiesen ser modelizados y resueltos, no se podrían introducir en un sistema de nueve ecuaciones, por cuanto, como se ha dicho, las variables deben ser solo nueve. Además su resolución impide las modificaciones aleatorias de cualquiera de ellos, es decir **NO EXISTE LA POSIBILIDAD DE INTERACCIÓN** entre el hombre y el sistema, indispensables en un simulador interactivo.

Sin embargo a fin de generar una conciencia adecuada acerca de la complejidad del sistema avión, podemos recurrir a una síntesis de los fenómenos a los que nos enfrentamos:

- a) Las aeronaves están sometidas a la interacción derivada de su movimiento, con la atmósfera que lo rodea. Esta interacción genera fuerzas, y estas generan momentos, los que a su vez generan cambios en las actitudes, y velocidades de estos cambios, que finalmente generan cambios en las fuerzas y momentos y así sucesivamente.
- b) En su movimiento dentro de la atmósfera, la aeronave recorre distintos puntos de ella en los que sus características termodinámicas varían respondiendo a la ecuación de Estado en todo punto, pero, la variación de estos parámetros individualmente entre puntos contiguos, no obedece a leyes simples, y aunque se presentan como aleatorias, podrían analizarse desde la estadística o desde la Teoría del Caos, en forma mas avanzada. Esto nuevamente atenta contra la posibilidad de interacción.

- c) El movimiento de la aeronave está sujeto a las leyes de la Mecánica, esto es, por tener una masa, tiene Inercia y por ello suceden fenómenos de interacción energética entre Potencial y Cinética.
- d) Por ser dichos cambios previsibles respecto de la terna que rodea a la aeronave, que no es Inercial, hay que referirlos a una terna que podamos considerar inercial, p.e., la Tierra, lo que nos obliga a manejar todas las ecuaciones de arrastre, Coriolis, etc.
- e) Todo lo anterior surge de Considerar a la aeronave como rígida, lo que en general es irreal. Para afinar la trama necesitamos incluir fenómenos elásticos estructurales (aeroelasticidad), y fenómenos derivados de la Aerodinámica No Estacionaria.
- f) Los coeficientes aerodinámicos se mantienen lineales con determinados parámetros de estudio, por muy poco tiempo. La alinealidad se hace muy notoria, y genera complejos fenómenos de control que han producido muchísimos accidentes catastróficos.
- g) En su movimiento relativo con la atmósfera, la Aeronave varía su velocidad. En los rangos subsónicos bajos (máximo 400 Km/h), podemos considerar que las características termodinámicas de la atmósfera que rodea a la aeronave, no cambian con la velocidad, y en los distintos puntos de la aeronave posee plena vigencia el Nro. de Reynolds, las leyes de Similitud, etc., sin embargo si las velocidades superan este valor, los parámetros termodinámicos que rodean al avión ya no son constantes, y varían según otras leyes, surgiendo correcciones de Prandtl, Glauert, Meyer, Von Karman, Tsien, etc., entrando en vigencia otros parámetros relevantes como el Nro de Mach, derivados todos ellos de los fenómenos locales de compresibilidad del aire, donde su densidad deja de ser constante en todos los puntos de la atmosfera.
- h) Si las velocidades relativas siguen aumentando surgen discontinuidades. Las más notorias son las Ondas de Choque. Las leyes cambian abruptamente, y los coeficientes aerodinámicos, CL, CD, Y Cm, con ellas, entrando en vigencia las relaciones de Mach, que intentan describir matemáticamente estos cambios, que generan nuevas alinealidades que complican su tratamiento ( Pérdidas de Alta y Baja Velocidad, buffeting, flutter etc.).
- i) Si prosigue el incremento de la velocidad, a velocidades cercanas a Mach 5, el flujo sufre otro cambio físico y conceptual, el aire deja de comportarse como un continuo y comienzan fenómenos de ionización, altísimas temperaturas locales y cambios e la densidad y la presión.
- j) La interacción del piloto, a través de los controles, produce cambios aleatorios que son objeto de Estudio en los Centros de Ensayos en Vuelo.

Todas estas variables son imposibles de introducir en un sistema rígido de 9 ecuaciones diferenciales simultáneas. Además las soluciones matemáticas analíticas, entregan una respuesta para todo "t", y no es posible introducir en el "lazo" del cálculo, la voluntad aleatoria de cambiar alguna constante del sistema.

### **Solución Tradicional**

Definitivamente, la solución tradicional es la de integrar ecuaciones diferenciales acopladas, mediante el análisis matricial y obtención de la "Ecuación característica" de sistema. Las raíces de esta ecuación característica en general producen Pares Complejos Conjugados que representan funciones senoidales simples, con ángulos de fase inicial variable, y valores reales que representan los amortiguamientos de éstas.

Estas funciones senoidales amortiguadas, constituyen las armónicas del movimiento, que sumadas dan como resultado las respuestas temporales de las variables de estudio, están acotadas por una serie de "redondeos" adicionales, que son los que se utilizan permanentemente en la Ingeniería, o sea, considerar ángulos pequeños, que esencialmente significan que:

$$\text{sen } \alpha = \alpha$$

$$\text{cos } \alpha = 1$$

Estas limitaciones, impuestas por la imposibilidad de resolverlas de otra forma, sumadas a otras, como que las armónicas son las mismas para todas las variables de estudio, dan como resultado que este tratamiento solo permite predecir el comportamiento de aeronaves en un rango de performances muy acotado a condiciones de vuelo también acotadas, impidiendo el tratamiento donde los coeficientes de fuerzas y momentos dejan de ser lineales con los ángulos que los generan.

Sin embargo los fenómenos más interesantes de estudiar en una aeronave en desarrollo, y más peligrosos para la integridad física de la aeronave y personas, están en esta gama alineal, por lo que en los desarrollos se recurre a la experiencia en aviones similares y posteriores ensayos en vuelo.

Sin embargo este análisis cuyos primeros trabajos corresponden a Perkins, Hage, Etkin, Glauert y otros, signaron los desarrollos aeronáuticos hasta 1990, aún en aviones como Boeing 737, 727, 707, 747, Douglas DC-10, MD-11, DC-9, aeronaves como los Antonov 124 y 225 (Los mas grandes del mundo, con cerca de 650 toneladas al despegue), o aeronaves de muy alta velocidad, como el Concorde recientemente retirado, o de combate de todo tipo.

Sin embargo todos los procesos de diseño implicaban construir prototipos y probar todas aquellas características imposibles de predecir por métodos analíticos, debidos a las limitaciones de los modelos matemáticos, ya explicados.

La variables de estudio tradicionales se suscribieron (y aún se utilizan en muchos casos) a las siguientes:

- $\alpha$       Angulos Aerodinámico de ataque.
- $\beta$       Ángulo Aerodinámico de deslizamiento
- $\psi$       Ángulo Aerodinámico de guiñada.
- $\phi$       Ángulo de inclinación lateral del avión.
- $\theta$       Angulo de cabeceo del avión.
- $V$       Velocidad de Avance del Avion.
- $\delta_a$     Deflexión de alerones

- $\delta_e$  Deflexión de elevador  
 $\delta_r$  Deflexión de timón de dirección

Las ecuaciones de la mecánica forman una matriz, donde el resto de las variables se establecen como constantes para, estimando sus valores para "t" aproximándose a infinito [A26].

La solución del determinante de esta matriz, da como resultado la denominada **ecuación característica**, que define la cantidad y características de las "armónicas" que definen la dinámica del sistema llamado aeronave.

Cada armónica, si corresponde a un fenómeno oscilatorio, está definida por un par complejo conjugado, lo que define la frecuencia y el amortiguamiento de éstas. El paso siguiente es la construcción del prototipo y volarlo.

Si bien este procedimiento ha sido mas o menos constante desde la primera guerra mundial hasta los '90, aún así, estudiar determinadas característica del vuelo, cercanas a los condiciones límites de seguridad, entrañaban un elevado costo y no pocas vidas humanas.

### **Introducción a la Física del Problema**

En puntos anteriores se ha mencionado la importancia de los túneles aerodinámicos, ya que permiten el **estudio de fenómenos estáticos** de modelos completos a escala para obtener respuestas temporales de un grupo de variables de estudio, para condiciones de vuelo simétricas, **y ciertas mediciones estáticas, como la Resistencia al Avance y Sustentación** y Momentos para toda condición de vuelo (modelos completos).

El objeto de estas mediciones en túnel está asociado al hecho que como la gran mayoría de los efectos aerodinámicos son muy difíciles de determinar con precisión, tales como la interferencia ala fuselaje, down wash (deformación de la corriente detrás del ala), etc.

Estas dificultades para determinar fenómenos aerodinámicos se extienden a la determinación con precisión los coeficientes que caracterizan al sistema dinámico (en general, Derivadas Parciales) en su estudio clásico de ecuaciones diferenciales.

Uno de los principales inconvenientes técnicos a resolver, asociados a este intento, corresponde al hecho que los fenómenos a medir están relacionados con ciertos números adimensionales tales como el número de Reynolds (Re), o el número de Mach (M), dependiendo su influencia de las velocidades relativas entre la vena fluida, y el modelo en estudio.

$$M = V / C$$
$$Y$$
$$Re = V L \rho / \mu$$

Donde:

M = Número de Mach

V = Velocidad de avance del avión

C = Velocidad del sonido local

$Re$  = Número de Reynolds

$L$  = Longitud característica

$\rho$  = Densidad del aire local

$\mu$  = Viscosidad absoluta del aire (local)

Estas dos fórmulas, sintetizan el problema planteado; es decir, que cuando se estudia un modelo a escala, para que los resultados obtenidos (en el campo de las fuerzas y momentos aerodinámicos) sean coherentes con el avión que el modelo pretende representar, debe verificarse la **constancia del número de Reynolds**, lo que implica que, a menor escala del modelo, es necesaria una mayor velocidad relativa de la vena fluida dentro del túnel (ya que sería impráctico mantener dicha constancia utilizando un fluido distinto al aire (distinto  $\rho / \mu$ ) dentro del túnel, por infinitas razones).

Esto para bajas velocidades no representa un problema de envergadura, pero sin embargo hay que tener en cuenta que para que un avión que en la realidad vuela a 200 km./h, y el modelo sea a una escala lineal de 1/10, la velocidad de la vena dentro del túnel deberá ser 10 veces superior (2000 km./h), para poder mantener constante el número de **Re**. lo que hace entrar en escena a los problemas asociados **al número de Mach**, obviamente aún muchísimo antes de esta velocidad, es decir problemas de **compresibilidad**.

Si a esto le asociamos el hecho de la necesidad de una cámara suficientemente alta para permitir el movimiento vertical del modelo, sin alcanzar la zona del efecto suelo (o techo) de la cámara, nos da como resultado la necesidad de una gran sección de la cámara, perpendicular a la vena de aire. Este problema representa en síntesis la necesidad de una gran potencia instalada, para mover la vena de aire requerida dentro del túnel, y la enorme dificultad técnica y económica.

El planteo de los métodos numéricos en general, convergen a sistemas matriciales, cuyo orden en general esta relacionado con la complejidad del problema, tal como ocurre en los estudios dinámicos de los aviones, en los que conviven fenómenos de distinta índole en forma acoplada y teniendo en cuenta que **deben ser en tiempo real**, se genera el problema que los planteos matriciales en general requieren de un tiempo de procesamiento proporcional al orden de las matrices en cuestión. Estas soluciones requieren hardware muy potente no disponible generalmente.

El Grupo de Simulación Dinámica del Vuelo ha optado por un ***un modelo similar al sistema cinematográfico, en el que los cambios de los parámetros de estudio, en el tiempo, se analizan cuadro a cuadro.***

De todas formas para lograr la modelización completa de los fenómenos dinámicos asociados a un avión, se hace necesaria la realización de modelizaciones numéricas previas de datos contenidos en Reports. Entre estos desarrollos el grupo ha desarrollado: **modelización numérica de la contribución del fuselaje a la estabilidad longitudinal, por efectos del up, y down wash del ala**, sobre la hipótesis del NACA TM 1036. **Determinación Numérica Tridimensional del valor del Down Wash**, a partir del planteo de Biot-Savart, **Generalización del modelo matricial de Glauert para Distribución de Sustentación Asimétrica, originada en asimetrías aerodinámicas, geométricas, y/o funcionales**. Problemas de Inversión de comandos debido a causas no aeroelásticas, derivados del trabajo anterior, publicado en el 41st Congreso de Aeronáutica y Astronáutica

llevado a cabo en Reno, Estado de Nevada (USA) /Enero 2003, bajo el título *Inversion of Commands due to Non Aeroelastic Causes*.

### **Problemas y Limitaciones**

Las respuestas dinámicas de cualquier sistema con masa no nula, puede ser representadas por funciones armónicas superpuestas. Estas son en general funciones senoidales, como se ha dicho, cuya amplitud y amortiguamiento varían con las características de las aeronaves.

Las respuestas temporales reales de las variables de estudio antes mencionadas (y de aquellas que no se pueden determinar por la problemática antes mencionada de los modelos matriciales), en general poseen frecuencias y amortiguamiento acotados, es decir podemos afirmar que los periodos de las armónicas van desde el **medio segundo**, hasta **infinito**. Obviamente la complejidad reside en determinar la forma de las armónicas que corresponden a los periodos mas cortos.

La solución de las ecuaciones diferenciales, permite trabajar sobre estas formas con un grado de certeza que reside en las constantes que caracterizan a las mismas: las soluciones serán más aproximadas y alejadas de la realidad, si no pueden aceptar valores de coeficientes variables.

Existen muchos métodos numéricos que permiten introducir cambios en las constantes del sistema, resolviendo los mismos en forma iterativa, afinado la trama que modela el fenómeno, pero, estos métodos requieren mucho tiempo para el cálculo, por lo que en general, calcular un segundo de simulación del fenómeno podría tomar media hora, lo que elimina la posibilidad de interacción en tiempo real con el modelo.

### **Conclusiones Preliminares**

El desarrollo de simuladores de aeronaves en la etapa de diseño nos presenta cierta cantidad de desafíos:

- a) **Trabajar en tiempo Real.** Esto es, los fenómenos calculados para un segundo, deben tomar menos de ese tiempo para que pueda haber interacción con la simulación (caso de querer volar e interactuar con la aeronave en estudio).
- b) **Calcular suficientes cantidades de puntos para una función determinada.** Se considera que un ciclo senoidal está suficientemente definido si conocemos diez puntos por cada semiciclo, o sea que si como hemos dicho éste tiene un período de 0.5 segundos, necesitaremos 20 puntos equiespaciados cada 2.5 centésimas de segundos. Con el fin de ser conservativos, hemos considerado como máximo un recálculo de todas las **variables cada 0,01 segundos (100 HTZ)**.
- c) El Grupo de Simulación dinámica del vuelo ha optado por un sistema de secuencia abierta (no matricial), con integración secuencial (efecto cinematográfico). Esta integración secuencial, posee como principio filosófico el de establecer un camino de renovación de datos y al cabo del mismo, se ha pasado por todas las variables una sola vez, y se repite la secuencia. La definición anterior implica que todas las variables se calculan utilizando parte de datos "viejos" y parte de datos "nuevos", emulando el principio televisivo del "**entrelazado**".
- d) Se considera válido el método cuando: Las respuestas obtenidas no dependan de la secuencia de integración; El simulador responda a las características de una aeronave conocida; Las respuestas temporales obtenidas no cambien al reducir el frame de tiempo ( $\Delta t$ ).

## Áreas Tecnológicas de Interés

### Software

Ya Kazman, Bass y Clements en su libro "Software Architecture in Practice" (Addison Wesley, 2003; ISBN: 0-321-15495-9) plantean que los simuladores son uno de los sistemas de software más complejos que existen actualmente. Esto se ve claramente en la cantidad de conceptos y tecnologías involucradas más allá del problema aeronáutico en si mismo.

Las tecnologías objeto de estudio para el desarrollo de este simulador involucran conceptos como:

1. Sistemas en tiempo real
2. Programación y Análisis Orientado a Objetos
3. Patrones de Diseño
4. Redes (Cluster Beowulf)
5. Procesamiento en Paralelo
6. Realidad Virtual

A continuación vamos a desarrollar algunos de los conceptos involucrados en la investigación de este grupo y los objetivos detrás de los mismos.

### **Patrones de Diseño**

Los Patrones de Diseño representan una solución abstracta a un problema recurrente en un dominio específico. Los patrones de diseño están ganando mayor aceptación en la comunidad de software y se están convirtiendo en un importante elemento en la construcción de software moderno. Cabe remarcar que capturan prácticas existentes documentando asunciones, estructura, dinámica y consecuencias de una decisión de diseño. El principal objetivo de un patrón de diseño es comunicar los detalles de un diseño.

Recordemos que la razón para utilizar patrones de diseño es la misma por la cual reutilizar buen código: beneficiarse del conocimiento y la experiencia de otra gente que se ha esforzado en comprender contextos, fuerzas y soluciones. Además, los patrones pueden ser más reutilizables que el código, ya que pueden ser adaptados para circunstancias particulares que no permiten reusar un componente existente.

- **Mejorar la comunicación entre desarrolladores** típicamente cuando se discuten soluciones alternativas a un problema.
- **Han sido extraídos de diseños que se encuentran funcionando** ya que capturan la esencia de un diseño para ser reutilizado en el futuro.
- **Refuerza el reuso** lo que ayuda a los desarrolladores inexpertos para lograr buenos diseños más rápidamente y constituyen un manual muy útil para la enseñanza de ingeniería de software. De todas formas no son reglas a seguir ciegamente, sino que son una guía para alternativas probadas de diseño.
- **Dan una perspectiva de alto nivel al problema** ya que eliminan el problema de enfrentarse a los detalles tempranamente.

Existe un interés particular sobre la búsqueda de estos patrones para este dominio de forma de generar una base de la experiencia que se obtiene durante la investigación y desarrollo. Este es una innovación por parte del grupo en el estudio de la simulación.

### **Modelo Estructural (AVSM)**

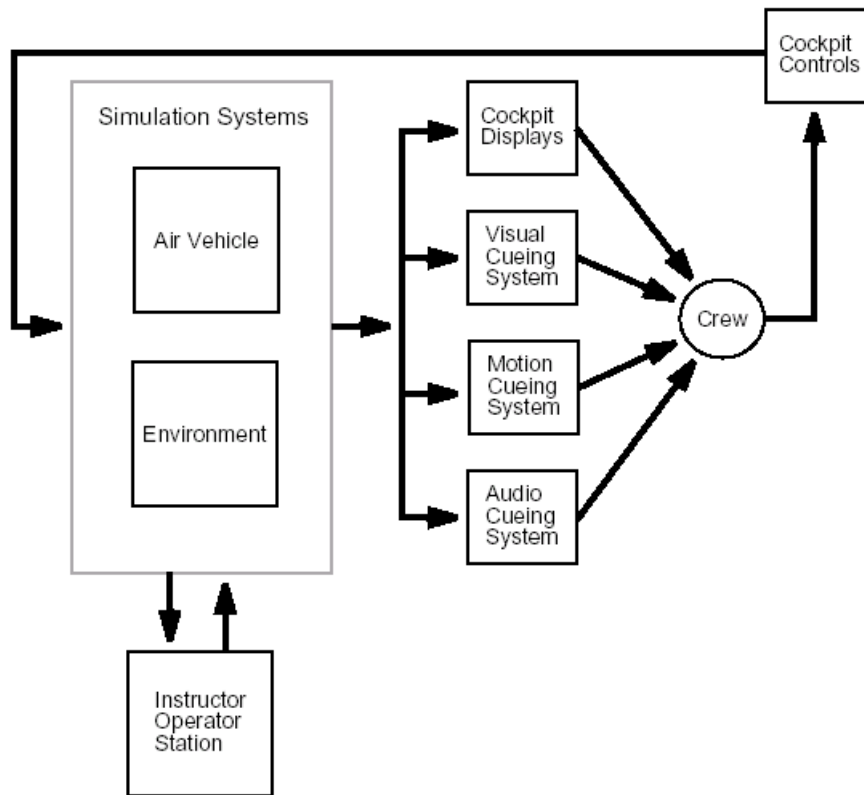
El modelo estructural es un mapa arquitectónico para un sistema complejo de software o dominio. Este modelo emergió del Ada Simulator Validation Program (ASVP – Dayton, OH, 1988), que estableció la eficacia de Ada para simulación de tiempo real de entrenamiento. Desde esa fecha se han realizado esfuerzos importantes como Structural Modelling del SEI y Mod Sim, entre otros.

El modelo estructural especifica las clases de entidades presentes en el diseño; como se representa el mundo en entidades de software y mecanismos de comunicación entre entidades. Es un estilo arquitectónico que soporta el cambio mediante la restricción de la estructura, comportamiento, y organización de los componentes de la arquitectura de software. El proceso involucra la partición del sistema y la restricción de la coordinación y comunicación entre las partes. Es una colección de tipos estructurales, unidos con las reglas de organización de las instancias de esos tipos en una arquitectura. Para resumir, trata de que los diseñadores y programadores mantengan sus diseños dentro de un grupo limitado de primitivas estructurales y de coordinación. Por lo tanto los principios se pueden definir como:

- Partición predefinida de funcionalidad entre elementos de software.
- Restricción de datos y flujo de control
- Restricción a un número de elementos base
- Los componentes encapsulan su propio estado.
- Remoción de efectos laterales.
- Elimina la necesidad de diferentes niveles de empaquetado

Basados en Structural Modelling, han surgido dos modelos estructurales para simuladores: AVSM (Air Vehicle Structural Model), desarrollado por SEI en 1993 y DARTS (Domain Architecture for Reuse in Training Systems), desarrollado por Boeing.

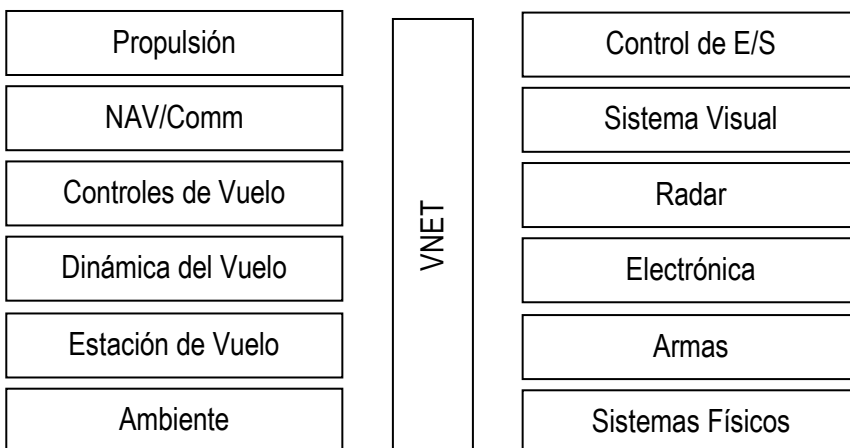




1. Modelo de Simulador Genérico

El grupo adoptará este modelo pero se realizará innovaciones tendientes a adaptarlo a un modelo orientado a objetos para incorporar las ventajas ya conocidas de esta tecnología.

Para finalizar la descripción del software del simulador, podemos mencionar cómo se divide el poder de procesamiento necesario:



2. Segmentos que conforman el Simulador

## **Hardware**

Son conocidos los altos requerimientos de hardware que exigen los sistemas de este tipo. Por ejemplo Scientific American en su número de Julio del 2001 en su artículo titulado "How to Build a Hyper Computer", bajo el título "Crucial Tasks for Hypercomputers" menciona:

"Advanced Engineering

...Future aircraft design and that of other complex engineering systems will benefit from the same type of detailed modeling capabilities."

La intención actual del grupo es la obtención de este poder de procesamiento a través de la formación de un cluster Beowulf utilizando hardware tradicional conectado a una red ethernet, del estilo utilizado en el Oak Ridge National Laboratory (Tennessee - USA - Scientific American, August 2001 - "The Do-It-Yourself Supercomputer").

Para la interface con los controles de cabina, etc, se utilizan placas adquisidoras de datos con conversores analógicos-digitales, los cuales constituyen las interfaces externas al sistema. Con estos se controlan motores paso a paso y los mecanismos que forman los controles de mando de la aeronave.

El laboratorio posee una plataforma móvil sobre la cual se realizará el montaje inicial del simulador, para facilitar su desarrollo e implementación, ya que el espacio dentro del fuselaje es limitado considerando estos fines. La imagen de la plataforma en su estado inicial puede verse a continuación



**3. Plataforma para desarrollo e Implementación**

Una vez en funcionamiento se procederá al montaje del simulador dentro de su ubicación final que consiste en el fuselaje de una aeronave Jet Commander propiedad del laboratorio.



**4. Fuselaje para montaje final**

Esta aeronave tiene la capacidad necesaria para generar el ambiente de entrenamiento y estudio, ya que en su interior puede montarse el simulador incluyendo el equipamiento del instructor. Esto tiene la ventaja de ser un recinto cerrado que permita a la simulación acercarse a la situación y disposición real.



**5. Fuselaje y vista general del laboratorio**

Acorde a los bloques que presentamos en el sistema, otra parte fundamental del mismo es el sistema de visualización. El sistema visual puede ser dividido en dos partes. Primero, los controles de cabina, que representan instrumentos en monitores dentro de la cabina, al estilo de las aeronaves actuales. Segundo la

visualización exterior que representa el mundo que rodea a la aeronave. En particular este estará formado por cañones que proyecten las imágenes sobre una pantalla circular de forma de generar las condiciones (determinada en gran parte por la física ocular) que generen un ambiente realista.

Para resumir los requerimientos de hardware tenemos:

- Red ethernet o mejor para el montaje del cluster de computadoras que realizará los cálculos críticos.
- Por lo menos 3 cañones con entrada para PC que generen el ambiente exterior de la aeronave. Estos cañones controlados por PC's o splitter para la generación y sincronización de las imágenes.
- Sistema de sonido para generar el ruido ambiente en las diferentes situaciones de vuelo.
- Cabina: 4 monitores (paneles de piloto, copiloto, central x 2). Estos controlados por un splitter o CPU's correspondientes.
- Estación del Instructor: una computadora conectada a la red que sirve para el control de la simulación, permitiendo introducir situaciones de falla o problemas a resolver por la tripulación siendo entrenada.
- Cómputos: Varias computadoras formando el cluster encargado del cálculo de los parámetros de simulación. Estas constituyen el corazón del simulador y se encargan del cálculo y manejo de la simulación.

### **Alcances del Proyecto**

El proyecto objeto de estudio es esencialmente un proyecto multidisciplinario con potencial para obtener múltiples beneficios.

Desde el punto de vista de **herramienta de entrenamiento**, el contar con un simulador de estas características permitirá brindar servicios de entrenamiento de tripulaciones para las aerolíneas o instituciones que lo requieran, como así también a pilotos civiles.

Desde el punto de vista de **herramienta científica** permitirá el estudio de situaciones peligrosas o de accidentes en el ámbito aeronáutico. También para el estudio de constructores de aeronaves privadas, o reformas a las mismas.

Desde el **punto de vista académico** brindar una herramienta para que los alumnos, ingenieros o investigadores puedan apoyarse en su actividad con tecnologías hasta el momento desconocidas o no disponibles para ellos.

Siguiendo con este punto de vista, no olvidemos el estudio de los campos mencionados en cuanto a ingeniería de software ya que estos sistemas involucran temas de vanguardia y por lo tanto muy complejos como los mencionados en esta presentación.

*El proyecto es complicado pero ahí justamente radica el desafío del investigador científico.*