

Desarrollo de un Dispositivo de Entrenamiento de Vuelo FTD de la aeronave Pampa III

Diego Gabriel Tinaro¹, Alejandro Gabriel Garay², Juan Carlos Sagrera³
Marina Arsiniega⁴, Francisco Rodriguez Bravo⁵

¹ Ing. de Desarrollo en Electricidad y Aviónica – Ingeniero de Sistemas Proyecto FTD
Pampa III-FAdeA S.A. – Ciudad de Córdoba – Córdoba. –tinaro@fadeasa.com.ar

² Ing. Jefe Sección Electricidad y Aviónica –FAdeA S.A. – Ciudad de Córdoba – Córdoba. –
garaya@fadeasa.com.ar

^{3,4,5} Ing. de Desarrollo en Electricidad y Aviónica –FAdeA S.A. – Ciudad de Córdoba –
Córdoba. –sagrera@fadeasa.com.ar, arsiniega@fadeasa.com.ar, rodriguezbr@fadeasa.com.ar

Abstract. Este documento presenta una descripción de los trabajos realizados durante el proceso de desarrollo del Dispositivo de Entrenamiento de Vuelo (FTD por sus siglas en inglés) de la aeronave Pampa III de la empresa FAdeA S.A. para el cliente Fuerza Aérea Argentina. Se describe característica y funcionalidad de los diferentes sistemas y subsistemas que constituyen el producto, lineamientos utilizados para ensayar el producto contra los requisitos, impacto en el entrenamiento e identificación de posibles mejoras.

Keywords: FTD, Entrenador, Pampa.

1 Introducción

Un Dispositivo de Entrenamiento de Vuelo (FTD, por su sigla en inglés, *Flight Training Device*) es una herramienta crucial en la formación de pilotos, diseñada para simular las condiciones y procedimientos de vuelo en un entorno controlado. Estos dispositivos permiten a los aspirantes a piloto y a los pilotos experimentados practicar y perfeccionar sus habilidades de navegación, sistemas de ataque, manejo de emergencias y procedimientos operativos sin los riesgos y costos asociados a los vuelos reales. Los FTDs varían en complejidad, desde simuladores básicos que replican aspectos específicos del vuelo hasta sistemas avanzados que ofrecen una representación realista y completa de la cabina de un avión. Gracias a los FTDs, la formación de pilotos se ha vuelto más accesible, segura y eficiente, permitiendo un aprendizaje progresivo y adaptativo que se ajusta a las necesidades y niveles de experiencia de cada piloto. En consecuencia y por requerimiento de Fuerza Aérea Argentina, FAdeA desarrolló un FTD categoría 5 utilizando como referencia la regulación 14 CFR Part 60, para la aeronave Pampa III, como parte de un Sistema de Entrenamiento Integrado o ITS por sus siglas en inglés (*Integrated Training System*).

2 Requerimientos Generales

Como descripción general Un FTD categoría 5 puede tener una cabina sin cúpula o con cúpula, que sea específica para el avión. Puede tener una programación aerodinámica genérica, al menos 1 sistema operativo, y cargas sobre los controles de vuelo que sean representativos del avión simulado solo a una velocidad y configuración de aproximación. Todas las pantallas pueden ser representadas por paneles LCD planos o ser representaciones reales de pantallas de la aeronave. Los controles de vuelo primarios y secundarios (p. ej., timón, alerón, elevador, *flaps*, *spoilers*/frenos aerodinámicos, controles del motor, tren de aterrizaje, dirección de la rueda de nariz, compensación, frenos) deben ser controles físicos. Todos los demás controles, interruptores y perillas pueden activarse por panel táctil.

El primer paso en el desarrollo de un FTD es la definición de los requerimientos, los cuales fueron redactados y enviados a FAdA por parte de Fuerza Aérea Argentina, estos requerimientos específicos son de carácter confidencial, por lo tanto, en este paper solo abordaremos algunos requerimientos generales que aplicaron al desarrollo.

2.1 Objetivos de Entrenamiento en el FTD

El FTD permite a los aspirantes a piloto y a los pilotos experimentados practicar y perfeccionar sus habilidades de navegación, sistemas de ataque, manejo de emergencias y procedimientos operativos sin los riesgos y costos asociados a los vuelos reales.

2.2 Partes Constitutivas

Réplica de Cabina Puesto Delantero. Contiene todos los instrumentos, paneles, pantallas y controles de vuelo tal como son en la aeronave real. Además, contiene el sistema de adquisición de datos y PC con módulos de software necesarios para la simulación. Contribuyen a la sensación de realismo la posición de vuelo exacta del piloto en el asiento, el esfuerzo simulado que el piloto realiza sobre los comandos de vuelo, la posición exacta de los controles (paneles, llaves, botones, pulsadores, etc.) y la representación de los datos en las pantallas multifunción de la cabina.



Fig. 1. Réplica de cabina puesto delantero del FTD Pampa III.

Puesto de Instructor y Control de la Simulación. En este puesto, el instructor planifica las condiciones del vuelo, clima, visibilidad, hora, lugar y la interacción con

otras entidades virtuales. También puede planificar e introducir fallas a la aeronave, ej: fallas de motor, de sistemas hidráulicos, eléctricos, de aviónica, y otras. El piloto deberá resolver las emergencias según los procedimientos preestablecidos propios de la aeronave. Otra función importante de este puesto es poder registrar diferentes tipos de parámetros, y la reproducción de estos para su análisis posterior al vuelo, como por ejemplo los parámetros de eyección, que permiten calcular la probabilidad de supervivencia del piloto.



Fig. 2. Puesto de Instructor y Control de la Simulación del FTD Pampa III.

Sistema de Visualización. Este sistema consta de tres proyectores para visualizar el terreno y un proyector dedicado para la proyección del HUD (*head-up display*) siendo este último una proyección de información de vuelo sobre el terreno real en el caso del avión y virtual en el caso del FTD y constituye una referencia principal de vuelo del piloto. Completa el sistema de visualización una pantalla semi-cilíndrica de 180° horizontal y 60° vertical.



Fig. 3. Ejemplo de imagen proyectada por el Sistema de Visualización del FTD Pampa III.

2.3 Regulación para el desarrollo

Si bien el requerimiento operativo no exige una certificación del FTD ante las autoridades aeronáuticas, el contrato establecía seguir los lineamientos de la Regulación Federal de Aviación título 14 del Código de Regulaciones Federales, Parte 60 para simuladores de categoría 5, de la Administración Federal de Aviación de los Estados Unidos, que establece los estándares para la evaluación y calificación de Entrenador de Vuelo en los niveles 4, 5 ó 6.

Como uno de los resultados de seguir los lineamientos de la regulación, se preparó una Guía de Calificación de Pruebas (*Qualification Test Guide* o QTG por sus siglas en inglés), esta guía se utiliza para demostrar que la performance y funcionalidades del simulador, incluida la representación física, está dentro de los límites trazados y que todos los requerimientos operativos han sido satisfechos.

3 Sistemas y Subsistemas

El FTD Pampa III está dividido en cuatro grandes bloques de sistemas, cada uno con subsistemas como puede observarse en la Fig. 5.

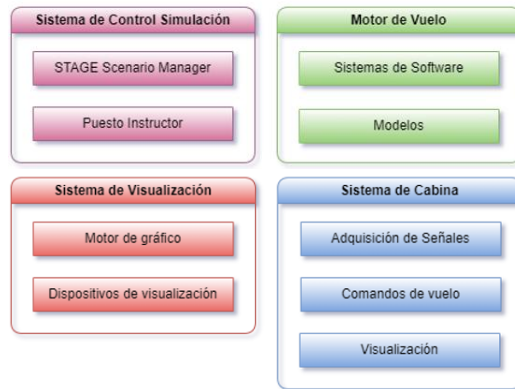


Fig. 4. Sistemas y Subsistemas del FTD Pampa III

3.1 Sistema de Control de Simulación

STAGE Scenario Manager o Gestor de Escenarios. Este subsistema permite: seleccionar distintos escenarios de simulación, visualizar en tiempo real la posición y estado de entidades en el escenario, reubicar geográficamente la aeronave simulada, iniciar y pausar la simulación y visualizar entidades en el escenario.

En los distintos escenarios se puede disponer de: selección de sector de vuelo con terreno asociado, ejercicios con otras entidades, modelo atmosférico para distintas condiciones ISA y estaciones de radio ayuda (VOR/DME/ILS/ADF).



Fig. 5. Visualización en tiempo real de la entidad simulada en el escenario.

Puesto Instructor. El Puesto Instructor permite: El control de simulación, configurar condiciones iniciales, carga de armamento, carga de misión, control de condiciones climáticas, visualización de parámetros del avión, configuración de actitud, funciones del puesto trasero, *Datalogger*, grabación y reproducción de vuelo, programación de fallas multisistema, control de audio entre el puesto instructor y cabina.

3.2 Motor de Vuelo y Controlador de Tiempo de Ejecución

La simulación se ejecuta en tiempo real, el Controlador de Tiempo de Ejecución (RTC por sus siglas en inglés) es responsable de garantizar que todos los modelos de simulación se ejecuten en una secuencia predefinida.

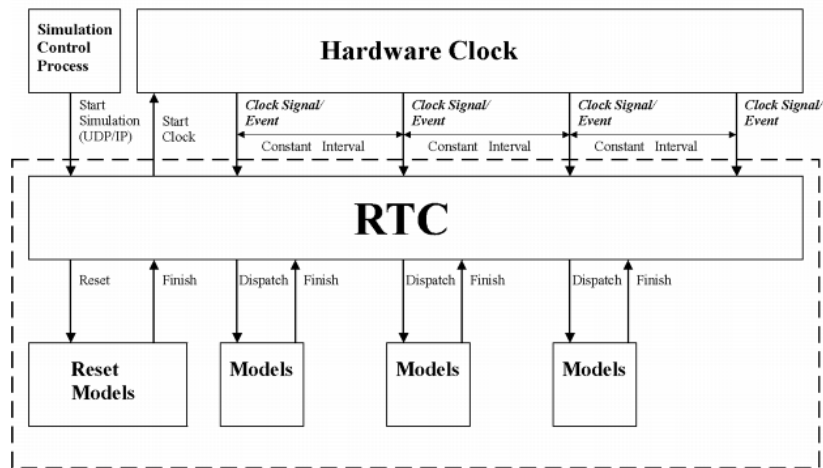


Fig. 7. Diagrama de bloques de las funciones del Controlador de Tiempo de Ejecución del FTD Pampa III.

El modo de operación es síncrono, el RTC garantiza la ejecución secuencial dentro de intervalos de tiempo fijos (simulación en tiempo real). La secuencia constante de los modelos se mantiene mediante el reloj del hardware de la estación de trabajo.

Sistemas de Software. Para los sistemas del avión se implementan librerías de software que replican las funcionalidades de la aeronave.

Todos los sistemas y subsistemas del Pampa III fueron implementados: Aviónica, combustible, hidráulico, eléctrico, frenos, control de superficie, Datos de Aire y Sistema de Referencia de Actitud y Rumbo (*Air Data and Attitude/Heading Reference System*, ADAHRS por sus siglas en inglés) y Computadora de Datos de Aire (*Air Data Computer*, ADC por sus siglas en inglés), radio navegación, etc.

Modelo Aerodinámico. Se divide en dos submodelos: dinámica lateral y longitudinal, considerando 6 componentes aerodinámicos. Se utilizaron los coeficientes aerodinámicos para el cálculo de los vectores de fuerza y momento aerodinámico.

El comportamiento aerodinámico se modeló con base en ensayos de túnel de viento, informes de desarrollo del avión prototipo y parámetros de vuelo adquiridos con instrumentación de ensayos en vuelo, para diferentes configuraciones.

Algunos de estos modelos son: Modelo másico, parámetros de peso y balanceo, diseño de superficies aerodinámicas, frenos de aire y tren de aterrizaje, ángulo de ataque y deslizamiento, y efecto de coeficientes de resistencia de cargas adicionales.

Modelo Motor. En este modelo se implementó las performances del motor TFE731-40-2N (IA-63 Pampa III. Considerando la influencia de las condiciones atmosféricas sobre las performances motor, se realizaron diferentes modelos propulsivos considerando las variaciones de condiciones ISA. Se implementó el comportamiento dinámico durante: arranque, aceleraciones lentas, aceleraciones rápidas y rotación libre, generando curvas de: empuje, flujo de combustible, velocidad de rotación, temperatura entre turbinas, temperatura y presión de aceite, etc.

3.3 Sistema de Visualización

El sistema de visualización está constituido por los subsistemas de motor gráfico y dispositivos de visualización.

Motor Gráfico. Se utilizó un kit de herramientas de software para visualización que permite graficar e implementar imágenes de alta resolución y vistas de 360° para simulaciones, logrando escenas de alta densidad en amplias áreas geográficas en tiempo real. Este motor proporciona un entorno de visualización 3D, que permite alcanzar altos niveles de realismo, utilizando: sombras dinámicas, detalles de alta resolución, modelos atmosféricos sofisticados, nubes 3D, vegetación natural y escenas realistas.



Fig. 8. Ejemplo de entorno de visualización 3D generada por el motor gráfico del FTD Pampa III.

El motor gráfico permite visualizar también modelos de entidades, integradas en diferentes escenarios de simulación. El motor gráfico utiliza bases de datos de terreno

virtual compuestas por modelos 3D sobre el terreno y mosaicos de imágenes satelitales con propiedades de elevación y diferentes resoluciones, según el vuelo sea a bajo nivel o alto nivel de altitud.



Fig. 10. Ejemplo de terreno producido por el motor gráfico desde la base de datos.

Dispositivos de Visualización. La pantalla fue construida con una estructura del tipo *Truss* semicilíndrica con un radio de 2,5 m. La pantalla se construyó con tela especial para proyección de 3 capas laminadas, de una sola pieza y sin uniones, con borde reforzado para ojales que permiten la fijación en la estructura y el tensado. El espacio disponible para proyección es de 3 m de alto y 7,5 m de ancho.



Fig. 11. Pantalla de proyección del FTD Pampa III.

Para la proyección se utilizan 3 proyectores combinados para la representación del terreno, y uno individual para la representación del *Head Up Display* simulado. La corrección de la imagen proyectada por los 3 proyectores combinados se realiza a través de un software de *warping* y *blending*.

3.4 Sistema de Cabina

Para el armado de la cabina del FTD se reutilizó un *Mock Up* que sirvió durante el proceso de desarrollo del avión Pampa. Utilizar éste *Mock Up* tuvo como ventaja que es una réplica exacta de la cabina del avión, y junto con un asiento eyectable replica del real, se logra una excelente sensación de realismo, y como desventaja, la accesibilidad para el equipamiento y el elevado peso y tamaño. En cuanto a los equipos que contiene la cabina, se utilizaron equipos reales y equipos emulados. Entre los equipos reales se utilizaron, por ejemplo: Stick/throttle, CMFD's, UFCP, llaves, indicadores, paneles, remotos VHF/ADF/VOR. Entre los componentes emulados se diseñó y fabricó, por ejemplo: la brújula, el horizonte de emergencia.



Fig. 12. Cabina del FTD Pampa III equipada.

Adquisición de Señales. La interfaz entre los controles de la cabina y los modelos de software desarrollados se logró mediante la adquisición de señales analógicas y digitales. La comunicación serial bidireccional con dispositivos (CMFD, UFCP, remotos VHF/NAV/ADF) se implementó a través del uso de los protocolos ARINC-429 y RS-422. Para toda la interfaz se utilizaron placas dedicadas de alta velocidad y resolución, montadas sobre un chasis PXI de *National Instruments*.

Cableado y Cajas eléctricas. Para el cableado principal se reutilizó un cableado de cabina de la aeronave real y se adaptó a las necesidades del FTD, debiéndose desarrollar cajas eléctricas tanto de distribución de energía como de control.

Comandos de Vuelo. El avión Pampa posee comandos de vuelo hidráulicos no reversibles, esto significa que el piloto no siente la presión aerodinámica que sufren las superficies de control. Por lo tanto, el avión está equipado con cajas de esfuerzo artificial, constituidas por una serie de resortes calibrados que generan esfuerzo en los controles de vuelo. Estas mismas cajas también se implementan en el FTD, junto con amortiguadores hidráulicos que simulan el esfuerzo que siente el piloto en el avión real. Además, se instalaron actuadores de *trim* electromecánicos originales del avión para realizar las compensaciones necesarias durante el vuelo.

Visualización. En cuanto a la visualización de la información por parte del piloto en la cabina, esta se logra tanto con el uso de equipamiento real del avión, como con equipamiento emulado. Para las 3 pantallas del tablero principal (*Color Multifunction Display*, o CMFD por sus siglas en inglés) se utilizaron equipos reales no certificados. De la misma manera se implementó el *Panel de Control Frontal Superior* o UFCP por sus siglas en inglés. Los dispositivos Brújula y Horizonte de emergencia se emularon a través de pantallas LCD de formato circular, mostrando la misma información que los instrumentos reales. La señal de video que alimenta todas estas pantallas es generada por un software desarrollado en un entorno de desarrollo integrado dedicado, apto para diseño de pantallas gráficas interactivas en tiempo real para aviónica y otras aplicaciones integradas. El UFCP es comandado a través de comunicación serial RS-422 y controlado por una librería dinámica de aviónica.



Fig. 15. Vista de las MFCU en parte superior de la imagen, vista del UFCU simulado en parte media, y vista de los dispositivos emulados horizonte de emergencia (izquierda) y brújula (derecha) en la parte inferior.

4 Ensayo y Validación

Para el ensayo y validación del FTD se utilizó una guía de ensayo de calificación. El principal desafío que se planteó durante el desarrollo fue que: el comportamiento aerodinámico, la performance de vuelo y el comportamiento del motor, sean representativos del avión real. Para cumplir con este objetivo se siguieron los lineamientos establecidos en los documentos Qualification Test Guide (QTG), esta guía se utiliza para demostrar que la performance y funcionalidades del simulador, incluida la representación física, está dentro de los límites trazados y que todos los requerimientos operativos han sido satisfechos. A continuación, se describen los ensayos realizados durante el proceso de validación basados en la QTG.

4.1 Ensayos Objetivos

A través de maniobras preestablecidas se compara la performance del simulador con datos de vuelo (ensayos en vuelo, ensayos en tierra, manual de vuelo, etc.).

4.2 Ensayos Subjetivos

Un piloto entrenado verifica que el comportamiento y las funcionalidades del simulador se ajustan a la aeronave real. Se realiza mediante un *checklist* y un vuelo completo.

4.3 Ensayos Funcionales

Ensayos manuales donde se verifica que todos los sistemas, no solo de vuelo sino también visualización, sonido, etc. cumplen con los requerimientos operativos.

5 Impacto en el Entrenamiento

5.1 Entrenamiento Seguro y Controlado

Permite a los pilotos entrenar en un entorno simulado que replica condiciones de vuelo reales sin los riesgos asociados con la aviación real. Esto facilita la práctica de maniobras complejas y procedimientos de emergencia de manera segura.

5.2 Costo - Eficiencia

A diferencia de los vuelos reales, el uso de un FTD es considerablemente más económico. Reduce los costos asociados con el combustible y el mantenimiento de aeronaves, lo que permite una formación más accesible.

5.3 Desarrollo de Procedimientos

Permite la práctica de procedimientos estándar y no estándar, incluyendo operaciones de emergencia. Con esto se logra desarrollar y perfeccionar la capacidad de respuesta ante situaciones imprevistas, como fallos de motores o sistemas, sin el riesgo asociado con los vuelos reales.

5.4 Feedback Inmediato

Proporciona retroalimentación instantánea sobre el rendimiento del piloto, permitiendo ajustes y correcciones en tiempo real. Esto ayuda a identificar y corregir errores rápidamente, mejorando la eficacia del entrenamiento.

5.5 Condiciones de Vuelo Variables

Se pueden simular una amplia gama de condiciones meteorológicas y situaciones de vuelo, desde tormentas severas hasta visibilidad reducida. Esto proporciona a los pilotos la oportunidad de experimentar y adaptarse a diversas condiciones sin la necesidad de volar en condiciones adversas reales.

5.6 Repetición y Práctica

Los pilotos pueden repetir procedimientos y prácticas tantas veces como sea necesario en un FTD, facilitando la perfección de habilidades específicas y la familiarización con el sistema de la aeronave.

6 Conclusión

El desarrollo del FTD para el avión Pampa III fue un proceso complejo que requirió de una colaboración estrecha entre ingenierías de diferentes especialidades, y una ardua participación de pilotos de ensayo. Este entrenador de vuelo no solo mejora la seguridad y eficiencia del entrenamiento, sino que también contribuye al desarrollo tecnológico y la capacidad industrial del país.