



Uso de la realidad virtual para la transformación en el entrenamiento interoperable de las tripulaciones de combate en la Fuerza Aeroespacial Colombiana

Mayor (FAC) Oscar Giovany Bello Vergara

Artículo para optar al título profesional:

Magister en Seguridad y Defensa Nacionales

Escuela Superior de Guerra "General Rafael Reyes Prieto"
Bogotá D.C., Colombia
2025

DATOS GENERALES	
Nombre del estudiante	: Mayor (FAC) Oscar Giovany Bello Vergara
Identificación	: 1020716095
Programa académico	: Maestría en Seguridad y Defensa Nacionales
Tutor metodológico	: Henry Mauricio Acosta Guzmán
Tutor temático	: Teniente Coronel Diego Alejandro Sanabria Castro
Fecha de entrega	: 14 de agosto de 2025
Extensión	: 9049 palabras

DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD Y CESIÓN DE DERECHOS

El autor declara que este artículo fue escrito de acuerdo con la normatividad de la Escuela Superior de Guerra “General Rafael Reyes Prieto” (ESDEG) y no existe ningún potencial conflicto de interés relacionado con este. Las posturas y aseveraciones presentadas son resultado de un ejercicio académico e investigativo que no representan la posición oficial ni institucional de la ESDEG, las Fuerzas Militares de Colombia o el Ministerio de Defensa Nacional.

Este artículo es enteramente mi propio trabajo y no ha sido presentado para la obtención de un título en esta u otra Institución de Educación Superior. Se han referenciado todos los trabajos y puntos de vista de otros autores, así como los datos de otras fuentes utilizadas. No se emplearon herramientas de generación de contenido por Inteligencia Artificial para su elaboración.

El autor acepta ceder los derechos de publicación en favor de la ESDEG y su Sello Editorial de acuerdo con los términos de la licencia Creative Commons: Reconocimiento-No Comercial-Sin Obras Derivadas.

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

El autor autoriza que este artículo sea publicado por el Sello Editorial ESDEG en su repositorio institucional y esté disponible bajo una modalidad de acceso abierto.

Uso de la realidad virtual para la transformación en el entrenamiento interoperable de las tripulaciones de combate en la Fuerza Aeroespacial Colombiana

Using virtual reality to transform interoperable combat crew training in the Colombian Aerospace Force.

Oscar Giovany Bello Vergara¹

Escuela Superior de Guerra “General Rafael Reyes Prieto”

Resumen: La realidad virtual hoy en día se convierte en una herramienta tecnológica disruptiva con un potencial excepcional para transformar la metodología y diseño de los programas de instrucción y entrenamiento en las Fuerzas Militares. Su ventaja radica en las capacidades inmersivas, interactivas y de simulación que ofrece, las cuales son herramientas únicas para fortalecer las competencias, habilidades para el combate y la toma de decisiones militares bajo entornos de alta amenaza. Sin embargo, para lograr una implementación exitosa de esta tecnología se requiere de un análisis adecuado que permita identificar los desafíos organizacionales en su adaptación para el empleo de la fuerza a gran escala, bajo estándares de interoperabilidad. Para la Fuerza Aeroespacial Colombiana, la implementación de RV representa una gran oportunidad para modernizar sus programas de entrenamiento, permitiendo mejorar los niveles de seguridad operacional y el fortalecimiento de la interoperabilidad con otras fuerzas y organizaciones a nivel internacional.

Palabras clave: Realidad virtual, entrenamiento; interoperabilidad; competencias.

Abstract: Virtual reality today is a disruptive technological tool with exceptional potential to transform the methodology and strategies for developing education and training programs in the Armed Forces. Its exceptional advantage lies in its immersive, interactive, and simulation capabilities, which are unique tools for strengthening competencies, combat skills, and military decision-making in controlled, low-cost environments. However, successful implementation of this technology requires an adequate analysis to identify organizational challenges that enable its adaptation, including aspects of health, technological dependence, information security, and interoperability standards. For the Colombian Aerospace Force, the integration of VR represents an opportunity to modernize its training methods, enabling improved educational standards that strengthen interoperability with other forces and organizations internationally.

Keywords: Training; adaptation; interoperability; modernization; competencies.

¹ Mayor de la Fuerza Aeroespacial Colombiana. Estudiante de la Maestría en Seguridad y Defensa Nacionales, Escuela Superior de Guerra “General Rafael Reyes Prieto”, Colombia. Profesional en Ingeniería Mecánica, Escuela Militar de Aviación “Marco Fidel Suarez”, Colombia. <https://orcid.org/0009-0004-6504-5266>
Contacto: oscar.bellov@fac.mil.co.

Introducción

El desarrollo de los conflictos recientes en el siglo XXI, ha permitido demostrar una vez más la importancia que representa la innovación tecnológica, como un factor multiplicador de fuerza para el desarrollo de capacidades militares, logrando así, modificar las estrategias y los métodos convencionales que se emplean para la conducción de las operaciones militares, en los diferentes niveles de la guerra, inclinando la balanza a favor de quien mejor integre y adapte las nuevas tecnologías en el campo de combate (Fernández, 2015).

Los programas y métodos actuales empleados para el entrenamiento militar son un área de gran relevancia, en donde las tecnologías de realidad virtual, se convierten en una herramienta fundamental para el desarrollo de nuevas técnicas y métodos de aprendizaje en los diferentes dominios (aéreo, naval, terrestre, espacial y ciberespacial); permitiendo de esta manera mejorar los programas educativos, con la capacidad de transformar sustancialmente la forma en que las Fuerzas Armadas entrenan a su personal, en las tareas de mayor complejidad, que requieren un alto nivel de experticia, bajo escenarios realistas, en condiciones cambiantes y de alta amenaza, simulando escenarios operacionales con las características más aproximadas de los conflictos modernos (García Rodríguez et al., 2021), siendo importante de esta manera analizar la mejor estrategia para su implementación en las Fuerzas Militares, de forma que se puedan integrar las capacidades distintivas y roles de manera eficiente.

La Fuerza Aeroespacial Colombiana (FAC), siendo consciente de las actuales tendencias globales y la necesidad de poder adaptar sus procesos formativos bajo el contexto

de la guerra multidominio, ha iniciado el proceso para explorar e implementar el uso de la realidad virtual como un complemento para los programas actuales de instrucción y entrenamiento, especialmente en el ámbito de la formación del personal de tripulantes de vuelo.

Bajo este contexto y teniendo en cuenta la importancia que representa la integración de esta tecnología es pertinente responder al interrogante ¿Por qué es importante el uso de las tecnologías enfocadas a la realidad virtual en la Fuerza Aeroespacial Colombiana para el entrenamiento de procedimientos interoperables que se enfoquen al mejoramiento de la seguridad y el desarrollo de operaciones aéreas de las tripulaciones de combate?.

Para dar respuesta a esta pregunta, es necesario entender las características que ofrece la realidad virtual, siendo una tecnología que tiene la capacidad de crear entornos tridimensionales altamente inmersivos, capaces de poder estimular a los sentidos visuales y auditivos, la cual puede ser integrada con tecnología háptica, permitiendo diseñar un escenario altamente realista, llevando al usuario una experimentar un ambiente virtual muy cercano a la realidad (Benavides, 2025), lo que puede ser empleado para el desarrollo de habilidades cognitivas, aplicables en la toma de decisiones bajo escenarios diseñados para las operaciones militares.

Desde el punto de vista del entrenamiento para las tripulaciones de vuelo, la realidad virtual tiene la posibilidad de recrear las condiciones necesarias para simular las operaciones aéreas de manera simultánea con la interacción de diferentes escuadrones de vuelo, estas características permiten integrar diferentes tipos de misión, roles y capacidades, bajo parámetros de alta exigencia y entornos de alta amenaza, los cuales, no son fáciles de realizar

bajo condiciones reales, debido a los altos costos de operación versus el costo de empleo de herramientas de realidad virtual más favorables (Fortune Busines, 2025).

El empleo de la realidad virtual para el entrenamiento de pilotos de combate ha evolucionado durante los últimos años siendo implementado por diferentes Fuerzas Militares, y Fuerzas de Coalición, quienes han adoptado esta tecnología de manera progresiva, modificando su doctrina y programas de entrenamiento, desarrollando así, sistemas de plataformas avanzadas como el Aviator Training Next del Centro de Excelencia del Ejército de los Estados Unidos (Dalladaku et al., 2020) o los programas de realidad mixta de la USAF entre otros, permitiendo identificar las oportunidades en su proceso complementario de formación militar, que no busca reemplaza el entrenamiento real en su totalidad, sin embargo la capacidad de acelerar los procesos de formación es clave, ya que permite desarrollar en los oficiales y suboficiales una mejor retención y correlación de la información, siendo un modelo híbrido que permite prepara de forma más integral y eficiente.

Así mismo desde una perspectiva pedagógica, el empleo de la realidad virtual permite alinear el enfoque del aprendizaje experiencial mediante la gamificación, en donde el aviador adquiere un modelo más protagonista dentro de su programa de entrenamiento, teniendo una retroalimentación más precisa de los objetivos de aprendizaje, sumado con una mayor motivación y una mejor adaptación a las distintas fases del entrenamiento (Campos Soto et al., 2020), sin perder de vista los factores desventajosos que se pueden originar como una dependencia excesiva de entornos virtuales, pudiendo cambiar la percepción del riesgo y toma de decisiones bajo situaciones reales.

La FAC tiene una gran oportunidad para emular la experiencia desarrollada en este campo, teniendo en cuenta la similitud de equipos de vuelo disponibles y la doctrina que

Escuela Superior de Guerra “General Rafael Reyes Prieto”

Bogotá D.C., Colombia

actualmente se ha alineado a estándares internacionales, sin embargo, también implica analizar los retos y proyectar las necesidades que surgen para adaptar los centros de instrucción con los que cuentan actualmente los Escuadrones de Vuelo, poder adaptar no solo las características técnicas necesarias en infraestructura, mantenimiento de equipos, desarrollo de software, capacitación del personal de instructores para operar y diseñar experiencias de entrenamiento virtual alineadas con los objetivos institucionales, sino poder alinear los programas académicos de entrenamiento de forma conjunta, pensando desde una óptica interoperable, capaz de poder articular desde la instrucción en las Escuelas de Formación, bajo una misma visión, que fomente la sinergia mediante el fortalecimiento de las operaciones conjuntas, de allí la necesidad de establecer una política institucional que centralice y lidere la consolidación de los requerimientos de manera estructurada.

La tesis del presente artículo pretende demostrar que la incorporación de la realidad virtual en el entrenamiento de pilotos de la FAC representa una gran apuesta de impacto estratégico, en búsqueda de la modernización y eficiencia operativa, considerando tanto sus beneficios como sus limitaciones, con el fin de garantizar la mejor implementación, basada en las capacidades actuales, que permita el desarrollo de operaciones aéreas con mejores niveles de seguridad y profesionalismo por parte de las tripulaciones.

Metodología

El presente artículo de investigación documental se desarrolla bajo un enfoque cualitativo, de carácter descriptivo, abierta a la interpretación, con el propósito de analizar el uso de la tecnología de Realidad Virtual aplicado al desarrollo de las operaciones aéreas por parte de las tripulaciones de la FAC bajo estándares de Interoperabilidad, que permita identificar las ventajas y oportunidades de mejora, promoviendo la actualización y mejoramiento de los programas de entrenamiento de vuelo vigentes, principalmente de las tripulaciones que operan aeronaves de combate.

Esta investigación se sustenta efectuando una exploración y recolección de documentos académicos como artículos de investigación en tecnología, manuales de doctrina y experiencias de centros de entrenamiento militar a nivel internacional, desde una óptica enfocada a la aplicación de las herramientas virtuales para el aprendizaje, visualizando su potencial para la integración en los modelos tradicionales de entrenamiento de la FAC en donde se analice la interacción con diferentes escuadrones de combate, logrando de esta manera proyectar una nueva herramienta para el desarrollo de los entrenamientos de empleo de la fuerza a gran escala, el cual solo se efectúa actualmente de manera real, pudiendo generar una mejor difusión y práctica de estándares de operación conjunta de forma más eficiente y con posibilidades de impactar en un número mayor de tripulantes de vuelo.

Se analizará documentos de fuente doctrinales, estándares internacionales, reportes oficiales de ejercicios internacionales en los que ha participado la FAC, que incluye memorias institucionales, las cuales proveen evidencia de la evolución del entrenamiento táctico, mediante la triangulación de estas fuentes permite establecer la relación entre la

experiencia adquirida y la necesidad de integrar las capacidades institucionales con sistemas de realidad virtual, que permita el fortalecimiento de las habilidades y las competencias bajo estándares de interoperabilidad.

Este enfoque propone identificar de manera objetiva la aplicabilidad de esta herramienta tecnológica en pro de la Seguridad y Defensa Nacional, bajo la doctrina y las capacidades actuales, para lograr una operación conjunta en operaciones aéreas estratégicas.

Realidad Virtual para el desarrollo de competencias y habilidades en la toma de decisiones

La realidad virtual es una herramienta estratégica, con la cual es posible lograr la transformación de los modelos de entrenamiento para la formación de personal altamente calificado, muy aplicable al ámbito de las operaciones militares, que afianza el desarrollo de competencias, la correlación de procedimientos y el entrenamiento para la toma de decisiones en ambientes de alta complejidad, siendo importante aclarar varios conceptos que permiten dimensionar como se integran para el desarrollo de operaciones aéreas.

Aproximaciones conceptuales de la Realidad Virtual, competencias y habilidades de vuelo

¿Qué es la realidad virtual?, existen diferentes definiciones y autores que coinciden en su dimensión, características de funcionamiento y formas de empleo, teniendo en cuenta la evolución en la capacidad de los procesadores gráficos y el desarrollo de dispositivos ópticos portátiles que han permitido la comercialización a costos accesibles, según (Liu, 2023) la realidad virtual es una tecnología que puede generar un entorno virtual en tercera dimensión, con el propósito de transmitir sensaciones mediante estímulos visuales, auditivos y táctiles, generando al usuario una alta percepción de inmersión a través de dispositivos electrónicos que permiten crear una realidad alterna del mundo físico real, mediante la estimulación de los sentidos.

Considera a la realidad virtual como la nueva revolución humana para potencializar su capacidad de interacción, generando toda una diversidad de campos de aplicación al poder recrear experiencias y estímulos cerebrales, que pueden modificar la manera como

percibimos el mundo, de ahí su potencial enorme en la medida que la tecnología permite desarrollar dispositivos con mayor capacidad de fidelidad e interconexión, con dispositivos portátiles y ligeros, que poco a poco ganaran mayor dominio en la aplicación de las tareas cotidianas, siendo importante analizar sus implicaciones y proyección de capacidades, en las nuevas formas de interactuar con el mundo.

En complemento con lo anterior Chen (2023) el cual explora el auge y aplicabilidad en uso de la realidad virtual para los procesos educativos, identificando algunas de sus ventajas y desventajas para su adecuada implementación, destacando la posibilidad de crear entornos de aprendizaje únicos que permite una alta especificidad, motivación, que mejora la calidad de la enseñanza para los estudiantes, aplicada a la resolución de problemas fortaleciendo la capacidad de análisis e intuición de los usuarios.

Sugiere que esta nueva tecnología tiene la capacidad de modificar los métodos tradicionales de aprendizaje, con la posibilidad de recrear condiciones simuladas en un entorno controlado, sin ninguna exposición al riesgo, de una forma segura y con un costo de operación bajo frente a sistemas de simulación más robustos con presupuestos de mantenimiento superiores, que pueden significar una logística más difícil de sostener, que para el caso de operaciones aéreas significan un factor clave para la economía de funcionamiento y de gran aplicabilidad.

De igual forma Marougkas et al.,(2023) plantea la revisión de varios estudios sobre las teorías del aprendizaje en el campo de la realidad virtual, las cuales incluyen experiencias inmersivas contrastando su enfoque y aplicabilidad en el aprendizaje bajo el modelo Constructivista, Aprendizaje Experiencial o Gamificación, identificando la adaptabilidad en el empleo de esta herramienta desde diferentes métodos pedagógicos, que pueden maximizar

su efectividad al igual que la posibilidad de realizar una mejor retroalimentación del progreso de los estudiantes, siendo importante comprender el potencial de cada una de las teorías destacándose entre ellas el Aprendizaje Experiencial y la Gamificación como las más promisorias, para poder fortalecer las competencias y habilidades para las tripulaciones de vuelo.

Siendo pertinente aclarar ¿qué es una competencia y habilidad?, tomando como referencia el documento 9868 OACI, una competencia se define como

“Una dimensión del desempeño humano que se utiliza para predecir con fiabilidad el éxito laboral. Una competencia se manifiesta y se observa mediante comportamientos que movilizan los conocimientos, las habilidades y las actitudes pertinentes para realizar actividades o tareas en condiciones específicas.” (OACI, 2020, p. 26),

desarrollando procesos de desempeño integral, que implican saber ser, conocer y hacer, conformadas por las habilidades, las cuales son las capacidades individuales para realizar una tarea, estado directamente relacionadas.

En el campo aeronáutico el marco de competencias y habilidades han evolucionado continuamente desde la formalización del adiestramiento y los primeros programas de seguridad operacional, que buscaban reducir los índices de accidentalidad aérea, principalmente por errores atribuibles a factor humano, desarrollándose el programa CRM, (*Crew Resource Management*) en 1970, en donde se fortalecían las habilidades no técnicas como conciencia situacional, liderazgo y comunicación, configurándose la importancia de desarrollar competencias con una mayor relevancia Velazquez & Bier, (2015), pasando posterior a formalizarse un enfoque más estandarizado, bajo el programa conocido como CBTA (*Competency-Based Training and Assessment*), el cual establecía un modelo

sistemático de formación bajo criterios observables y medibles, en situaciones operativas reales o simuladas para observar los comportamientos y decisiones para desempeñar una función conforme a los estándares aceptables bajo 8 competencias identificadas por la OACI Ziakkas et al., (2022).

Tabla 1

Marco de competencias de la OACI y FAC

Nº	Competencias OACI	Competencias FAC
1	Application of procedures and compliance with regulations - (Aplicación de procedimientos y cumplimiento de regulaciones)	APK-aplicación de procedimientos
2	Communication - (Comunicación)	COM-comunicación
3	Aeroplane Flight Path Management, automation - (Gestión de la trayectoria de vuelo del avión, automatización)	FPA-gestión de la trayectoria de vuelo de la aeronave(automatización)
4	Aeroplane Flight Path Management, manual control - (Gestión de la trayectoria de vuelo del avión, control manual)	FPM-gestión de la trayectoria de vuelo de la aeronave (control manual)
5	Leadership and Teamwork - (Liderazgo y trabajo en equipo)	LTW-liderazgo y trabajo en equipo
6	Problem-solving and decision-making - (Resolución de problemas y toma de decisiones)	PSD-resolución de problemas y toma de decisiones
7	Situational awareness and management of information - (Conciencia situacional y gestión de la información)	SAW-conciencia situacional
8	Workload management - (Gestión de la carga de trabajo)	WLM-gestión del volumen de trabajo
9	<i>No se aplica en aviación comercial</i>	CPC- capacidad para el combate

Fuente. Adaptado de Organización de Aviación Civil Internacional. (2020). *PROCEDURES FOR*

AIR NAVIGATION SERVICES Training Third Edition (Doc 9868).

Estos estándares han sido adoptados por parte de la Fuerza Aeroespacial Colombiana en su Sistema Educativo (SEFAC), que actualmente se incluyen en la formación, capacitación, instrucción y entrenamiento, para desarrollar las competencias necesarias que permita responder a las necesidades institucionales, teniendo en cuenta las condiciones en que se desarrollan las operaciones militares, siendo un modelo distintivo que busca desarrollar y afianzar la capacidad de resiliencia, adaptándose a las particularidades de los escuadrones de combate, siendo una de ellas la *Capacidad para el Combate* (IGEFA, 2021), lo anterior ejercer las funciones propias del piloto militar bajo la envolvente operacional cambiante y compleja que puede requerir una operación militar a diferencia de los estándares internacionales de aviación civil y que solo puede desarrollarse dependiendo de las diferentes misiones y operaciones tipo que desarrolla la FAC en cumplimiento de su mandato constitucional.

La toma de decisiones en el entorno de operaciones militares aéreas tiene condiciones especiales, las cuales requieren una alta carga cognitiva, un análisis adecuado de la situación, teniendo en cuenta el margen de incertidumbre operacional y la interdependencia con múltiples actores, integrando su estado de conciencia y alerta situacional para el cumplimiento de la misión, esta competencia está presente en el modelo de “Airmanship”.

Programa que fue implementado por la FAC en el año 2023, con el propósito de fortalecer la cultura de la seguridad operacional y reducir los eventos operacionales que son atribuidos a errores de factor humano, siendo una filosofía organizacional que busca combinar el conocimiento y experiencia, junto con la disciplina, fomentando la cultura de trabajo en equipo y la comunicación efectiva de todos los miembros de la tripulación,

convirtiéndose en el pilar fundamental para mejorar la toma de decisiones de las tripulaciones.

Este programa implementa un modelo de entrenamiento, evaluación y desarrollo de competencias basado en escenarios simulados para los pilotos. Este enfoque se alinea con el entrenamiento basado en competencias (CBTA) y la gestión de amenazas y errores (TEM), representando una estrategia integral que promueve los comportamientos aceptables bajo el modelo de toma de decisiones FACDEE, desarrollado para disminuir la deficiencia en el buen juicio de las tripulaciones, brindando herramientas para afrontar el “Startle Effect” (efecto sorpresa), en donde la ocurrencia de eventos inesperados pone a prueba la capacidad de resiliencia y conciencia situacional que les permita desarrollar soluciones frente a condiciones no contempladas (IGEFA, 2023)

Operaciones aéreas y el empleo de realidad virtual

La Fuerza Aeroespacial Colombiana aplica sus capacidades para el desarrollo de operaciones militares aéreas bajo un concepto de sistemas de armas conjunto y coordinado con las demás Fuerzas Militares y la Policía Nacional (FAC, 2019), para lograr la sinergia y unidad de esfuerzo en pro del cumplimiento de la misión dentro del sector defensa y seguridad, agrupando estas actividades que constituyen el conjunto de operaciones aéreas del Poder Aéreo, Espacial y Ciberespacial bajo 20 Capacidades Distintivas (DBAEC, 2020), habilidades que se encuentran alineadas a las Funciones de Conducción de la Guerra, permitiendo su perfeccionamiento y su mejor alistamiento para el combate, de allí la importancia en enfocar sus esfuerzos para profesionalizar a todo el personal involucrado en

las operaciones aéreas y desarrollar con altos estándares la competencia de *Capacidad para el Combate*.

Esta necesidad institucional se encuentra alineada a una de las capacidades distintivas de la FAC, que es la *Formación de tripulaciones de la Fuerza Pública*, para la cual recientemente en el año 2024, se inauguró el centro de simulación del equipo T-6C en la Escuela Internacional de pilotos de Ala Fija ubicada en el Comando Aéreo de Combate No. 1, la cual cuenta con sistemas de realidad virtual aumentada, siendo el primer Escuadrón con obtener esta herramienta, que permite entrenar los procedimientos y simular condiciones de emergencias a los alumnos del programa de entrenamiento de ala fija (CACOM1, 2024).

Imagen 1: *Simulador de Realidad virtual equipo T-6C*



Fuente: (Oficina de Comunicación Pública CACOM 1, 2024)

Así mismo el Comando Aéreo de Combate No.4 ha comenzado a innovar en su oferta educativa en la Escuela Internacional de Helicópteros para la Fuerza Pública, ha adoptado recientemente la realidad virtual para el proceso de reentrenamiento, en donde se manifiesta que "la sensación es muy cercana a lo que vivimos en vuelo real" (CACOM4, 2025).

Imagen 2: *Cabinas de entrenamiento Realidad Virtual EIHF*



Fuente: (CACOM4, 2025)

Comparando otros centros de entrenamiento a nivel internacional, en donde ya se han implementado programas de realidad virtual Négyesi (2024) aborda la experiencia para el desarrollo de competencias y habilidades en centros de formación militar, con relación a los programas académicos de la Mariana de los Estados Unidos denominado *Flooding Control Trainer* (FTC) en donde se prepara al personal de cadetes para la gestión efectiva de procedimientos de emergencias, al igual que el programa *Aviator Training Next* del Ejército de los Estados Unidos que permite recrear situaciones de alta gestión de estrés y toma de decisiones bajo presión, programas enfocados al entrenamiento de habilidades para la

operación de equipo y mantenimiento, logrando acelerar el proceso de capacitación y la retención de conocimientos específicos necesarios, demostrando la aplicabilidad en habilidades técnicas, cognitivas y de procedimiento de operación de equipos.

Aplicación de la Realidad Virtual en el entrenamiento de operaciones aéreas conjuntas

Teniendo en cuenta los avances que se han desarrollado por parte de las escuelas de formación de vuelo y el potencial que permite esta nueva herramienta para el entrenamiento de tripulaciones, la Fuerza Aeroespacial Colombiana ha iniciado una nueva fase para el entrenamiento de sus tripulaciones, en los cuales los programas de formación se encuentran alineados a las necesidades y programas de seguridad operacional.

Sin embargo los centros de entrenamiento de la FAC que cuentan con sistemas de simulación de vuelo, no tienen la capacidad para poder integrarse entre sí, ya que han sido adquiridos a empresas de desarrollo de simulación diferentes, presentándose desafíos técnicos y operativos para generar una arquitectura modular interoperable, con sistemas técnicos y código fuentes incompatibles, limitando así la posibilidad de tener un sistema integrado, para el desarrollo de entrenamiento conjuntos en línea entre los escuadrones.

Este tipo de entrenamientos ya han sido implementados a nivel internacional como es el caso del Ejército de los Estados Unidos el cual ha modificado sus programas de entrenamiento para adaptarse en los que denominan *Operaciones de Combate a Gran Escala* (LSCO) Francis (2019). En la cual la dirección de Simulación (DOS) del Centro de Excelencia de Aviación del Ejército de los EE. UU. (USAACE) ha desarrollado una transición mediante dos iniciativas clave: el programa *Aviator Training Next* (ATN) y los programas del *Entorno de Entrenamiento Sintético* (STE).

El programa ATN se centra en el entrenamiento individual de los pilotos alumnos, buscando mejorar las competencias y aumentando la frecuencia de la práctica de situaciones que posteriormente se emplearan en un ambiente colectivo multidominio (cyber, espacial, aéreo, terrestre), proporcionando un entorno escalable, constructivo y de juego, afianzando y estimulando así las habilidades para el combate.

Para la Aviación del Ejército de los Estados Unidos, el STE incorporará el uso de tecnologías emergentes como pantallas visuales de realidad mixta e inteligencia artificial (IA) adaptables al entorno real operacional de la aeronave, buscando además poner en práctica las capacidades de planificación de la misión de manera conjunta, aspectos que permiten desarrollar el pensamiento crítico y la toma de decisiones en escenarios dinámicos que pueden incluir degradación de las capacidades de ayudas electrónicos de navegación y comunicaciones, ambientes meteorológicos extremos, ataques coordinados por útiles vectores (aire- aire, aire superficie).

La exposición a este tipo de ambientes son clave para el desarrollo de toma de decisiones bajo presión, en donde existe un alto grado de incertidumbre y cada tripulante desarrolla un nivel diferente de conciencia situacional (percepción de su entorno), en el cual se debe analizar un gran volumen de información, según J. F. Fullingim, (2007), los ambientes de simulación permiten al piloto desarrollar una mejor comunicación efectiva en entornos de operación conjunta, en donde logran realizar una mejor anticipación de las amenazas latentes de su ambiente operacional, empleando de una mejor manera la utilización efectiva de todos los recursos disponibles en cabina, logrando así incrementar los niveles de seguridad aérea.

La posibilidad de recrear escenarios complejos con diferentes posibilidades de desenlaces puede estimular la memoria experiencial y familiarizar al piloto para reducir el estrés y carga mental que se producen en situaciones de alta presión mejorando el autocontrol emocional y la agilidad mental que se requiere en la toma de decisiones rápidas bajo condición de amenaza.

Así mismo, una de las grandes ventajas que se generan mediante el uso de entrenamientos simulados son el registro y parametrización de las decisiones efectuadas por parte de los pilotos durante los ejercicios, posibilitando el desarrollo de Debriefings más detallados, con métricas precisas, logrando un mejor entendimiento de los posibles errores tácticos para su retroalimentación mejorando la curva de aprendizaje de acuerdo a los patrones de comportamiento individual.

Ventajas de la unificación de programas de entrenamiento

Evolución del Entrenamiento Continuado

El rediseño estructural y doctrinal de los programas de entrenamiento han evolucionado permitiendo una mayor adaptación para los entornos multidominio que son altamente dinámicos y tecnológicamente complejos, en donde es necesario lograr una mayor agilidad para la toma de decisiones bajo presión, incertidumbre y coordinación conjunta, permitiendo enfrentar amenazas híbridas de forma más eficiente, con una mejor gestión del riesgo, en donde la integración de tecnologías de realidad virtual puede responder a estos desafíos en la preparación y sostenibilidad en las Fuerzas Aéreas más modernas.

Muestra de ello podemos evidenciarlo en el rediseño que ha desarrollado la Fuerza Aérea de los Estados Unidos, en donde se aborda la necesidad de transformar el modelo de entrenamiento frente a estos nuevos desafíos y amenazas emergentes, infiriendo que los modelos de aprendizaje deben evolucionar a la par con las nuevas herramientas digitales, en donde las capacidades de la Fuerza Aérea requieren de una alta agilidad intelectual y operativa Roberson & Stafford, (2017).

Roberson & Stafford proponen cinco principales innovaciones en los modelos de aprendizaje que pueden ser adaptables al empleo de la realidad virtual, entre ellos se describen los modelos de aprendizaje modularizados y el aprendizaje basado en competencias, estos modelos pueden integrarse bajo un registro integral de aprendizaje, para evaluar el desempeño del aviador durante el avance de su carrera, siendo los escuadrones fuentes de experiencia y de aprendizaje colaborativo, buscando crear un ambiente en donde los aviadores se sientan conectados y comprometidos en el mejoramiento de sus capacidades

profesionales mediante programas de entrenamiento continuado unificados y a la vanguardia de los avances y capacidades actuales.

Si bien para lograr un rediseño en los programas de educación y entrenamiento se debe ser consciente de que no todo puede ser reemplazado por los sistemas de simulación, de acuerdo con Kallberg et al., (2022), a futuro puede llegar a generarse una alta dependencia tecnología en los programas, lo que podría afectar las habilidades básicas de desempeño, concentración y pérdida de conciencia situacional, siendo fundamental mantener un equilibrio en el entrenamiento mixto, permitiendo la práctica regular de capacidades de forma real que fortalezca la confianza y habilidades natas que solo se obtienen de la práctica de campo.

Las bases de los primeros programas de entrenamiento con un modelo de estandarización de doctrina conjunto, puede evidenciarse con el programa *Combat Readiness Training* (CRT) de la Marina de los Estados Unidos (Kusewitt, 1970), el cual se desarrolló posterior a la finalización segunda guerra mundial, en momentos en donde se intensificaba una competencia por la superioridad tecnológica militar entre las superpotencias y las capacidades del poder aéreo eran un factor diferencial para lograr la supremacía militar, requiriendo así, un alto entrenamiento en todo el espectro de operaciones aéreas como misiones de espionaje e inteligencia, combate aire - aire, interdicción área y ataque profundo con capacidad nuclear, misiones tipo de alta complejidad táctica, bajo reglas de enfrentamiento que requerían la aplicación de las Tácticas – Técnicas y Procedimientos de maniobras evasivas bajo ambientes de alta amenaza, en donde un piloto no solo debía demostrar las habilidades para volar la aeronave, sino estar realmente listo para el combate, muchos de ellos sin contar con experiencia en combate real previa.

El desarrollo de la industria militar Estadounidense, continuo evolucionando junto con sus programas de entrenamiento, requiriendo abordar la necesidad de coordinar las capacidades entre los pilotos de los caza bombarderos de la Fuerza Aérea y los cazas de la Armada embarcados en sus flotas de portaviones Floyd (1996), en donde pese a tener diferencias organizacionales propias de cada Fuerzas, existía una base común en los fundamentos avanzados para el entrenamiento de combate aéreo, en maniobras como escolta aérea, combate aire- aire, navegación táctica y misiones de interdicción aérea.

Las similitudes y necesidades operativas demostraron un alto potencial para poder emplear fases comunes durante su periodo de formación avanzando y entrenamiento continuado, buscando poder cerrar las brechas en la cohesión doctrinal y lograr así el potencial que permite la interoperabilidad, no obstante, la consolidación completa de la interoperabilidad en los programas de entrenamiento continuado enfrente obstáculos relevantes, debido a las diferencias en la filosofía de la instrucción, como es el empleo de terminología táctica, la cual es distinta en cada una de las Fuerzas, al igual que los estándares de calificación o supervisiones de vuelo, aspectos que pueden superarse si se adoptan módulos de entrenamiento conjunto en donde se respeten los roles, capacidades, tipo de misión en cada uno de los entornos, compartiendo recursos, buscando la similitud de requisitos técnicos.

Estas bases cimientan los programas de entrenamiento modernos como el (JPATS) *Joint Primary Aircraft Training System* para el entrenamiento primario de pilotos o el (DOTC) *Defence Operational Training Capability* británico, siendo pertinente analizar su modelo por parte de la Fuerza Aeroespacial Colombiana, con lo cual potenciaría las capacidades de integración e interoperabilidad entre los componentes aéreos, navales y terrestres, teniendo en cuenta la posible adquisición de los aviones de superioridad aérea tipo Saab JAS-39 Gripen, esta plataforma cuenta con sistemas de armas de última generación, integrando un ecosistema de entrenamiento que permite

Escuela Superior de Guerra “General Rafael Reyes Prieto”

Bogotá D.C., Colombia

adquirir sistemas de simulación de alta fidelidad, con capacidad de planeamiento de misión y debriefing, empleando escenarios virtuales de simulación de combate sintéticos aire – aire más allá de del alcance visual BVR, familiarizado a los pilotos en diferentes ambientes mediante el empleo de sistema de realidad mixta lo cual permite simplificar y reducir costos en el proceso de capacitación de los pilotos (Saab, 2021), siendo un modelo de éxito su programa de transferencia tecnológica Sistem Rig (S-Rig) entre la Fuerza Aérea Brasileña (FAB) su industria aeronáutica Embraer, Atech, AEL Sistemas y Saab.

Imagen 3: Cabinas de Saab Gripen programa S-Rig FAB en Gavião Peixoto, São Paulo



Fuente (Saab, 2019)

Teniendo en cuenta el avance realizado por parte del programa de entrenamiento de la Escuela Internacional de Ala Fija en el Comando Aéreo de Combate No.1, que dispone actualmente de los sistemas de entrenamiento de realidad virtual para la aeronave de instrucción tipo T-6C Texan,

Escuela Superior de Guerra “General Rafael Reyes Prieto”

Bogotá D.C., Colombia

similares al programa *Joint Primary Aircraft Training System*, que también emplea este tipo aeronave en su fase de entrenamiento inicial de pilotos, si bien este programa utiliza una fase avanzada posterior en aeronaves Jets tipo *Lead-In Fighter Trainer (LIFT)* para su transición final a plataformas de superioridad aérea como el F-16 y F15, el actual programa desarrollado para los pilotos de combate de la FAC tiene un gran potencial para alcanzar los objetivos del entrenamiento táctico de combate, si se tiene en cuenta la experiencia adquirida por países de la región como Brasil en su adaptación de la flota de combate Gripen E/F y su programa (TdT) de Transferencia de Tecnología mediante la Red de Diseño y Desarrollo del Gripen (GDDN) aplicado en su centro de simulación de pilotos.

Estándares de entrenamiento militar compatibles con RV

A nivel mundial existen estándares internacionales que buscan mejorar la calidad técnica y la eficiencia del modelado en áreas clave como son el desarrollo de escenarios, ciberseguridad o simulaciones de guerra, como los desarrollados por parte de la organización *Simulation Interoperability Standards Organization*, la cual fomenta la interoperabilidad y la capacidad de reutilizar sistemas de simulación (SISO, 2025), estándares que incluyen el concepto *High Level Architecture (HLA)* y *Distributed Interactive Simulation (DIS)*, usados en sistemas de simulación militar y civil.

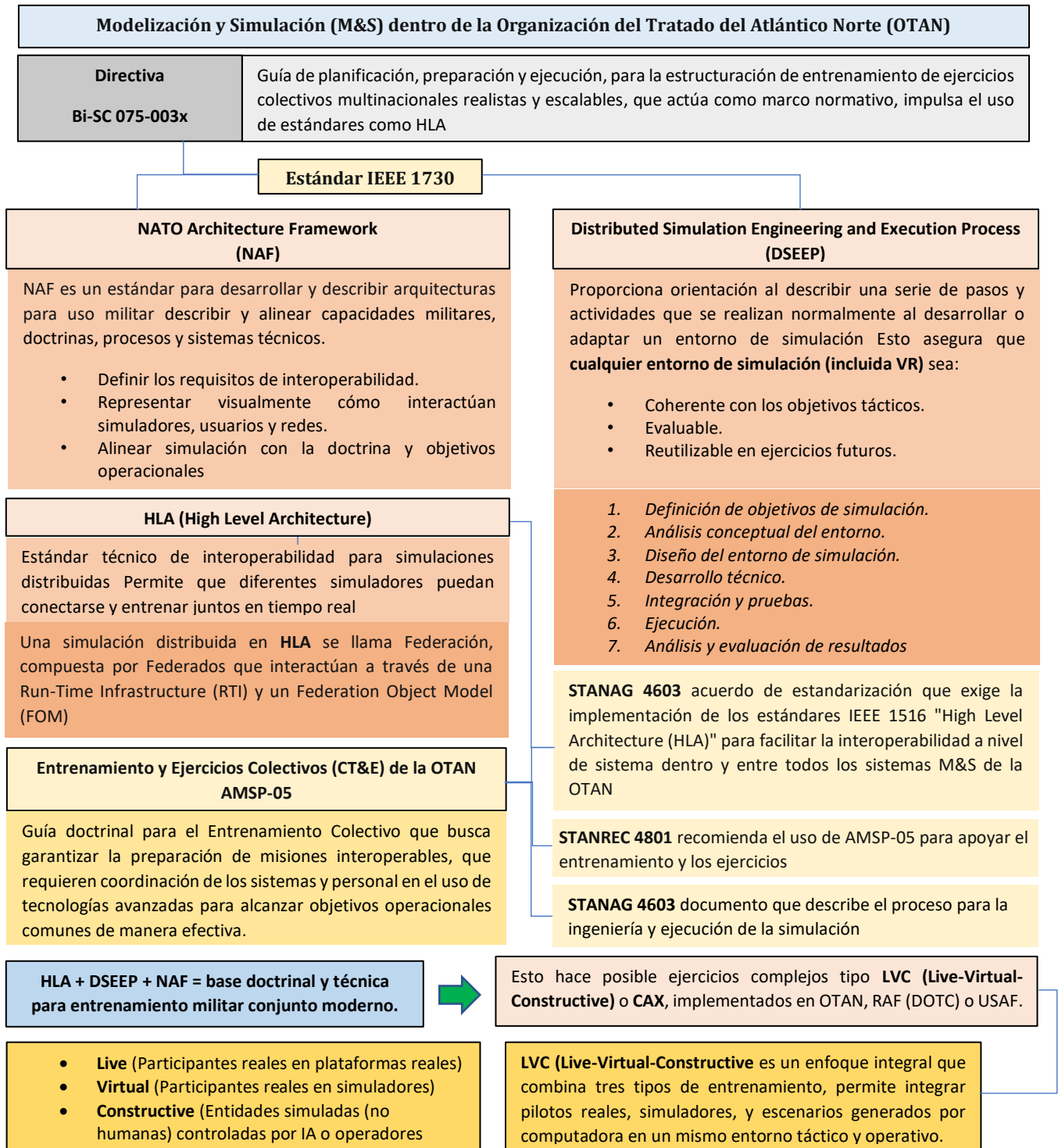
La *High Level Architecture* es un estándar desarrollado por parte del Departamento de Defensa de los Estados Unidos, el cual fue adoptado internacionalmente por parte del *Institute of Electrical and Electronics Engineers IEEE*, organización profesional a nivel internacional que desarrolla estándares globales, implementando el estándar IEEE 1516-2010, que proporciona una infraestructura distribuida, en la que cada unidad diferente de simulación opera desde en un ordenador independiente y se comunica con otras en un escenario común de simulación Falcone et al. (2017).

Este modelo permite generar una interacción con atributos y parámetros compatibles, en donde comparten datos esenciales como la velocidad, estado del sistema, blancos, estado de los

sistemas, condiciones meteorológicas entre el simulador o cabina del piloto y los sistemas conectados, siendo una opción viable para poder integrar sistemas de simulación que tienen desarrollos no compatibles como sucede actualmente en los centros de entrenamiento de la Fuerza Aeroespacial Colombiana, teniendo en cuenta que bajo esta arquitectura también ha sido adaptada por parte de organizaciones militares como la OTAN bajo el STANAG 7121 (*Operational Standards for Networked Simulation for Training*) para su entrenamiento continuado con sistemas de Realidad Virtual y sistemas de simulación distribuida, garantizando la interoperabilidad multinacional, desde una escalabilidad técnica que permite decenas de simuladores conectados, que se traduce en la capacidad de sincronización de eventos en tiempo real, atributo RTI (Run-Time Infrastructure), que permite registrar eventos y reacciones de forma estandarizada y exportable con el fin de tener un modelo de evaluación con métricas conjuntas.

Bajo estos estándares se configura el modelo AMSP-05 - OTAN “*Modelling and Simulation Handbook for Training and Exercises*” que tiene como objetivo principal orientar la aplicación de entornos sintéticos distribuidos mediante la integración de los sistemas de simulación de realidad virtual y sistemas (CAC) *Computer Assisted Exercises*, para entrenamiento colectivo y ejercicios militares multinacionales compatibles con la directiva Bi-SC 075-003, mediante la red de arquitectura (NAF) NATO Architecture Framework (NSO, 2024). Esta emplea los criterios para el entrenamiento militar moderno siguiendo el modelo DSEEP (*Distributed Simulation Engineering and Execution Process*) que agrupa los 7 pasos metodológicos para el diseño de ejercicios a gran escala.

Figura 1 Esquema de conceptos estándares de modelización y simulación



Fuente: Elaboración Propia

Empleo la realidad virtual en escenarios de entrenamiento militar

La capacidad de crear entornos con la RV es cada vez más accesible para su uso cotidiano, fomentando de esta manera la posibilidad de transformar campos de estudios planos a experiencias tridimensionales con la capacidad de interacción y correlación directa de la información compleja con los objetivos en el entrenamiento, como lo enuncia Caballero-Garriazo et al. (2023) sobre el aprendizaje activo, permitiendo un enfoque pedagógico en donde existe una participación más activa durante su propio proceso de aprendizaje, convirtiendo al usuario en un protagonista, en lugar de un receptor pasivo, permitiéndoles aprender a su propio ritmo y con un mayor facilidad.

Muestra de su aplicabilidad en el campo militar podemos verlo aplicado en el ejercicio Spartan Warrior, organizado por la OTAN, siendo una iniciativa de entrenamiento aéreo multinacional que emplea simulación distribuida para mejorar la interoperabilidad táctica y probar la integración de fuerzas aliadas, a través de una red de simuladores interconectados basados en estándares como HLA y guiados por el proceso DSEEP, que cuenta con participantes, incluyendo plataformas de cuarta y quinta generación, ISR, UAVs, sistemas de defensa aérea y controladores aéreos de ataque terminal (JTAC), que pueden conectarse desde sus bases para ejecutar operaciones aéreas complejas y misiones de combate de alta intensidad en entornos virtuales realistas y en tiempo real, practicando tácticas, técnicas y procedimientos (TTPs) y estándares de operación de la Fuerza Aliada.

Este ejercicio abarca todas las fases de las operaciones de combate, incluyendo el Mando y Control (C2) y los procesos de Inteligencia, Vigilancia y Reconocimiento (ISR). Esta metodología permite a la OTAN integrar sus capacidades y ensayar cómo se desarrollarían los planes de campaña, siendo invaluable para probar la integración y la

interoperabilidad de sus fuerzas, especialmente en situaciones como la pandemia de COVID-19, aunque las simulaciones virtuales no pueden reemplazar completamente los ejercicios del mundo real, (NATO, 2021).

Este modelo se adapta a la tecnología de simulación *Live-Virtual-Constructive* (LVC) se ha convertido en un componente crítico para el entrenamiento militar y las pruebas de sistemas, especialmente en el contexto de la guerra futura que implica la confrontación de "Sistemas de Sistemas (SoS)".

El sistema LVC integra simulacros militares reales ("Live"), simulaciones operadas por personal con equipos simulados ("Virtual"), y simulaciones impulsadas por reglas de cálculo de simuladores ("Constructive"). Este modelo busca proporcionar escenarios de entrenamiento complejos y realistas de manera efectiva, de bajo costo y rápida, abordando desafíos como presupuestos de entrenamiento ajustados, instalaciones de tutoría inadecuadas y la creciente complejidad de los equipos de guerra, el desarrollo de LVC ha visto la evolución de varias arquitecturas clave como el ADS o HLA; el futuro de LVC en el ámbito militar se centra en la continua actualización, la estandarización y la integración de arquitecturas existentes, con un fuerte énfasis en la gobernanza y la inversión estratégica Liang et al. (2023).

Practica de Estándares de Interoperabilidad mediante RV para el uso de la Fuerza a Gran Escala

Desarrollo de la Realidad Virtual para el Empleo de la Fuerza a Gran Escala

Organizaciones como la OTAN a través de los últimos años han implementado estándares a través de una arquitectura de alto nivel compartida entre los países miembros, como lo describe Löfstrand et al. (2020), lo cual ha permitido mejorar la interoperabilidad entre los sistemas de simulación mediante estrategias como el desarrollo de los denominados *Capability Badges* que permite parametrizar la compatibilidad de los sistemas, empleando herramientas como el IVCT *Integration, Verification and Certification Tool*, que permite certificar mediante un marco de prueba el cumplimiento de los requisitos de interoperabilidad, evolucionado a un sistema robusto como el servicio (MSaaS) *Modelling and Simulation as a Service* como describe (Iagăru, 2022), siendo una respuesta a los desafíos frente al costo, accesibilidad y adaptación; para mantener una estructura común que permita la coordinación en el desarrollo de modelos de simulación integrando las nuevas tecnologías disponibles empleando un producto sin grandes inversiones en software, hardware e infraestructura mediante una red de manera centralizada.

Para lograr un alto nivel de interoperabilidad como lo menciona Barry (2012) no solo es necesario adquirir sistemas compatibles, sino de estructurar equipos articulados, compartiendo estándares, doctrinas, tácticas, técnicas y procedimientos comunes, siendo la realidad virtual un puente para fomentar la familiaridad para el desarrollo de operaciones multinacionales, mejorando la eficiencia y cohesión de las Fuerzas.

Este proceso no es fácil y toma tiempo poder implementarse adecuadamente, para la OTAN el camino para desarrollar estos avances, ha tomado desde el año 2004 como informa Reitz & Seavey (2018), presentando dificultades en sus políticas de ciberseguridad para el intercambio de información, requiriendo un direccionamiento adecuado, en donde se pueden crear soluciones e iniciativas en las diferentes Fuerzas sin considerar la compatibilidad, siendo importante replicar y adaptar modelos de guía de alto nivel como el desarrollado por el DoD o el Joint Staff para garantizar la interoperabilidad.

Es así como en el año 2023 la directiva *Collective Training and Exercise* Bi-SCD 075-003 OTAN estableció el marco doctrinal para estructurar el programa de entrenamiento para los dominios terrestre, marítimo, cibernético y espacial de forma conjunta Cottereau (2023), este modelo se configura mediante elementos clave que permite articular el uso coordinado de las tecnologías emergentes de realidad virtual con procesos interoperables federados.

Así mismo si tenemos en cuenta que la Royal Air Force planea que un 80% del entrenamiento aéreo para el año 2040 sea sintético, de acuerdo a estudios de su programa de adaptación de capacidades de aviación militar (Ministry of Defence, 2022), que aborda el plan de reducción y modernización de su flota, este, manifiesta la importancia de desarrollar del Sistema Aéreo del Futuro (FCAS), en donde la Realidad Virtual se convierte en un pilar clave a través del programa DOTC (Defence Operational Training Capability) para facilitar el entrenamiento combinado e interoperable a nivel OTAN de forma sostenible y eficiente.

Para la Fuerza Aeroespacial Colombiana representa una gran oportunidad entrenar a su personal en doctrinas emergentes de guerra multidominio, mediante el uso de la realidad virtual, teniendo en cuenta los modelos de simulación implementados por parte de los países aliados,

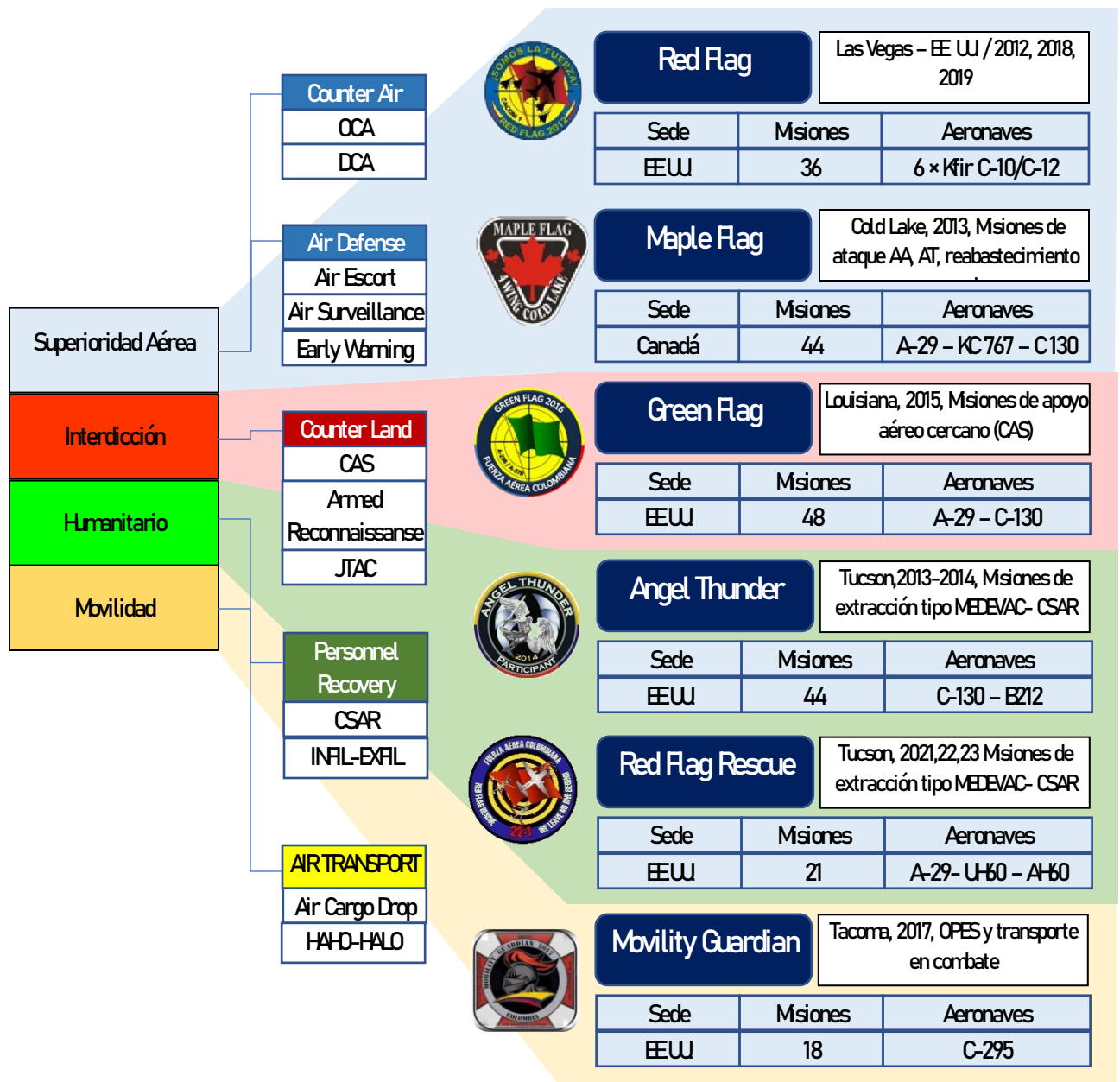
optimizado así el presupuesto y la sostenibilidad operativa, que permita entrenar a las tripulaciones en misiones realistas y combinadas a través de un ecosistema digital interoperable, que incluye simuladores avanzados, redes tácticas, inteligencia artificial y entornos virtuales colaborativos, compartiendo el modelo (DOTC) que subraya la importancia de "*entrenar como se combate, en red, de manera conjunta, con realismo, tecnología y doctrina común*", sentando un precedente para otras fuerzas aéreas a nivel regional y global.

Proyección de la Realidad Virtual para el empleo de la Fuerza a Gran Escala en la Fuerza Aeroespacial Colombiana.

Desde la primera participación de la Fuerza Aeroespacial Colombiana en el ejercicio Red Flag 12-4 en el año 2012 (FAC, 2012), la institución ha recorrido un camino progresivo hacia la consolidación de su doctrina de operaciones conjuntas y fortalecido igualmente su capacidad de interoperabilidad a nivel interno como con fuerzas de coalición bajo estándares internacionales.

Esta transformación ha sido impulsada por su participación continua y proactiva a nivel regional en ejercicios multinacionales de alta exigencia táctica y planeamiento estratégico, algunos de ellos organizados por parte de la FAC como los Ejercicios Ángel de los Andes para misiones de atención de desastres y emergencias humanitarias junto con las Fuerzas de países aliados de la región Whitaker. (2023), los cuales han servido como laboratorios reales para validar diferentes procedimientos, entrenar escuadrones en ambientes combinados y adoptar nuevas tecnologías de entrenamiento, consolidándose como ejemplo internacional de cooperación con los mejores estándares.

Figura 2: Principales ejercicios internacionales FAC, espectro de misiones en LFE



Fuente: elaboración propia, tomado de las memorias de ejercicios internacionales FAC

Entre el año 2012 y el 2024, la FAC ha participado en alrededor de 15 ejercicios multinacionales, como Maple Flag (Canadá), Green Flag, Red Flag, Red Flag Rescue, Angel Thunder, Mobility Guardian (EE.UU.), Cruzex (Brasil) y Relámpago (Colombia).

Estas experiencias han representado más de 600 horas de vuelo, cerca de 400 misiones y el despliegue de más de 1000 miembros de su personal, que componen los diferentes escuadrones, tanto de ala fija como ala rotatoria, afianzando su conocimiento en misiones como combate Aire-Aire BVR/WVR, reabastecimiento en vuelo, CAS, JTAC, CSAR, MEDEVAC, guerra electrónica, e inserciones HAHO/HALO.

Imagen 4: Ejercicio Internacional Ángel de los Andes



Fuente: (Garcia, 2021)

La experiencia de la FAC en los ejercicios internacionales Ángel de los Andes y Relámpago demuestra un alto nivel de interoperabilidad y procedimientos alcanzado por las

tripulaciones, quienes han consolidado doctrina bajo estándares aplicables a las capacidades institucionales.

Estos entrenamientos multinacionales, que integraron capacidades aéreas, terrestres y marítimas de más de quince países, permitieron ejecutar operaciones de búsqueda y rescate, evacuaciones aeromédicas, inserciones especiales y misiones de combate aéreo con un alto grado de coordinación táctica y doctrinal.

Los resultados afianzan la capacidad de la FAC para liderar y planear ejercicios de gran complejidad a nivel regional, al igual que integrar fuerzas diversas en escenarios reales aplicables para la atención de desastres. Este legado doctrinal y operativo constituye un potencial educativo para las FFMM e instituciones de carácter humanitario, ya que permite proyectar esas experiencias hacia entornos de simulación y realidad virtual para su entrenamiento y participación conjunta.

La relevancia de estas participaciones permite validar la capacidad táctica de los escuadrones, logrando asimilar estándares internacionales, que hoy logran adaptar la doctrina conjunta de manera propia, adaptándose a escenarios reales multidominio, como se demuestra en los ejercicios Relámpago VIII año 2023 y Amazonas - Poseidón año 2024, en donde la FAC lideró misiones conjuntas aire-superficie, aire-aire y de rescate en condiciones de selva, con planeamiento y C2 integrados con los países de la región (FAC, 2024).

Siendo una muestra de la interoperabilidad lograda, que trasciende la relación y operatividad con otras fuerzas aliadas, transformado la sinergia entre sus propios Escuadrones de Combate, integrando su evolución doctrinal, la cual es clave para estructurar un modelo de entrenamiento continuado más integral, resultado del conocimiento práctico adquirido.

La Fuerza Aeroespacial Colombiana puede consolidar su modelo de entrenamiento dando el siguiente paso para adaptar sus centros de simulación en entornos LVC (Live-Virtual-Constructive) mediante soluciones de realidad virtual (VR), si tenemos en cuenta los costos operativos que pueden significar realizar un ejercicio real desplegando un escuadrón de combate como en el ejercicio Green Flag East 2016, según las memorias operaciones FAC del ejercicio, que implicó un recorrido aéreo total de 8.578 km por aeronave, un consumo aproximado de 103.923 libras de combustible, para la ejecución de 40 misiones de apoyo aéreo cercano (CAS), la comisión logística incluyó la participación de 45 militares de diferentes especialidades, con un costo en viáticos de 130.747 USD, al igual que una logística general de 65.000 USD, para costo total estimado de 3.000 millones de pesos colombianos, representando un costo aproximado de COP 75.000.000 por cada salida en el ejercicio.

Teniendo en cuenta que algunos programas de adaptación de simuladores existentes al estándar HLA pueden costar desde US\$50.000, sistemas federados militares pueden tener una estimación de 1 a 2 USD millones (Erwin, 2000), el retorno de inversión resulta altamente favorable, si se considera un valor promedio de costo de operación de simulador clase D de 700 USD generaría un ahorro estimado del 96%, ahorrado por cada peso invertido 25 en operaciones reales de tenerse un sistema HLA operativo, demostrando sostenibilidad económica del entrenamiento virtual frente a escenarios reales.

Estos nuevos entornos pueden optimizar los recursos disponibles y aumentar el número de tripulaciones que tienen la posibilidad de entrenarse de forma presencial en un despliegue de Fuerza a Gran Escala de forma real, fortaleciendo así la seguridad operacional.

Hoy, la experiencia multinacional acumulada ha permitido que el entrenamiento de la FAC transite desde lo experimental hacia lo doctrinal, con un modelo basado en la interoperabilidad y sostenido por tecnologías inmersivas.

Este enfoque consolida a la realidad virtual no solo como un recurso de entrenamiento, sino como un pilar estratégico para el sostenimiento de proyección regional, con el fin de incrementar la seguridad de las operaciones futuras de la Fuerza Aeroespacial Colombiana, pudiendo ser una gran iniciativa la organización de un ejercicio multinacional virtual con los países aliados de la región en donde se implemente un modelo de red conjunto disponible para los Escuadrones de Vuelo para las misiones de asistencia humanitaria.

Importancia de la adopción de la RV para la Seguridad y Defensa Nacional

El fortalecimiento doctrinal de la Fuerza Aeroespacial Colombiana a través de las Políticas Generales de Vuelo sumado a un enfoque en el Airmanship, ha sentado las bases para una compatibilidad progresiva con los estándares de entrenamiento de los escuadrones, en especial en lo relativo a el entrenamiento conjunto y la interoperabilidad multinacional.

Esta alineación no es accidental, y responde a una necesidad estratégica de preparar a las tripulaciones de combate para operar en escenarios combinados, asimétricos y multidominio, en donde la estandarización de procedimientos, doctrinas y tecnologías es fundamental, permitiendo así el fortalecimiento del poder disuasivo y la capacidad de respuesta de forma integral.

La OTAN ha estructurado su entrenamiento conjunto sobre marcos como el DSEEP (Distributed Simulation Engineering and Execution Process), el estándar IEEE 1730, y

directivas como la Bi-SC 75-003, que establecen principios para ejercicios distribuidos, simulación interoperable, manejo doctrinal conjunto y entrenamiento federado.

Estos elementos pueden adaptarse a los propósitos del programa Airmanship (FAC), basado en la conciencia situacional, la toma de decisiones táctica, el liderazgo en cabina y la seguridad operacional como eje central, mediante simulaciones de realidad virtual.

En este contexto, la realidad virtual emerge como una herramienta habilitadora que permite integrar a la FAC en ejercicios y doctrinas internacionales, fortaleciendo su capacidad de operación conjunta bajo la aplicación de competencias y comportamientos aceptables, para lograr un buen juicio en la toma de decisiones aéreas, sin necesidad de desplegar medios físicos, gracias a la posibilidad de recrear entornos de combate interoperables, permitiendo simular misiones aéreas combinadas, con amenazas aire-aire, coordinación de aplicación de la fuerza con JTACs, o maniobras evasivas bajo presión, reforzando la cultura de seguridad y eficiencia operativa, sin poner en riesgo las tripulación y los equipos, disminuyendo el desgaste y consumo de recursos críticos, traducido en una mayor eficiencia presupuestal, para las plataformas estratégicas (como el Kfir, A-29, helicópteros de combate y a futuro posiblemente Saab-39 Gripen), teniendo la posibilidad de entrenar a más tripulaciones, fortaleciendo así el sostenimiento del poder aeroespacial en el largo plazo.

La adopción de la realidad virtual ofrece una oportunidad para transformar el modelo de entrenamiento continuado escalable, compatible con estándares internacionales, que pueda impulsar la práctica de operaciones entre cada una de las Fuerzas desde las escuelas de formación, difundiendo de manera más integral una doctrina conjunta nacional a futuro, mejorando así la cohesión interinstitucional y la capacidad de respuesta ante amenazas

Escuela Superior de Guerra “General Rafael Reyes Prieto”
Bogotá D.C., Colombia

híbridas que exigen una acción coordinada con todas las capacidades del Estado Colombiano, promoviendo una mejor preparación de las Fuerzas Militares, capaces de proteger los intereses nacionales, frente a los nuevos retos y actores ilegales que puedan poner en riesgo la seguridad y defensa nacional.

Conclusiones

La Fuerza Aeroespacial Colombiana ha realizado avances para integrar la tecnología de realidad virtual para el entrenamiento de sus tripulaciones, si bien no todos los escuadrones de combate cuentan aun con esta capacidad, es importante analizar los desafíos y limitaciones que pueden evidenciarse durante su proceso de implementación, como son los costos iniciales de inversión, mantenimiento, desarrollo de software o adopción de estándares, siendo importante evaluar las ventajas y requisitos que permitan unificar un sistema compatible, bajo un conocimiento basado en experiencias funcionales, analizando las capacidades al interior de la Fuerza Aeroespacial en los diferentes centros de simulación y plataformas de entrenamiento virtual, para determinar su grado de compatibilidad y posibilidades de actualización, que permita desarrollar una plataforma unificada desde las escuelas de formación de tripulaciones.

Para lograr la incorporación de la realidad virtual en el entrenamiento de pilotos de la Fuerza Aeroespacial Colombiana, es necesario la adopción de estándares técnicos y doctrinales que garanticen la interoperabilidad, continuidad pedagógica y eficiencia operativa, bajo marcos desarrollados como la Arquitectura de Alto Nivel (HLA) o la guía AMSP-05 de la OTAN, la cual permiten conectar los centros de simulación dentro de federaciones distribuidas, facilitando un entrenamiento coordinado, escalable y alineado con escenarios conjuntos y multinacionales, permitiendo optimizar los recursos en la instrucción y entrenamiento, al igual que logra fortalecer las capacidades colectivas de la Fuerza Aeroespacial al promover un modelo de entrenamiento continuo, interoperable y adaptable a las exigencias del entorno operacional contemporáneo.

Así mismo la realidad virtual no solo ofrece un espacio seguro para el entrenamiento táctico de maniobras, sino que se convierte en un entorno de formación cognitivo, con capacidad para estimular el marco de competencias necesarias para desarrollar la Capacidad para el Combate, su importancia radica en que permite desarrollar de forma medible y repetible las competencias más críticas para el éxito en las operaciones aéreas como son el juicio operativo, la adaptabilidad misional, la toma de decisiones acertada bajo presión y la conciencia situacional multidominio, calve en las operaciones de empleo de la fuerza a gran escala en donde se exige al máximo la proeficiencia y conciencia situacional.

La participación sostenida de la Fuerza Aeroespacial Colombiana en ejercicios multinacionales ha permitido validar sus procedimientos institucionales, fortaleciendo su interoperabilidad entre los escuadrones, logrando adaptar una doctrina operativa conjunta. Esta experiencia constituye hoy el fundamento doctrinal para estructurar un modelo de entrenamiento simulado basado en herramientas de realidad virtual, que permita escalar el entrenamiento táctico y doctrinal a todos los tripulantes de la Institución, de lograr consolidar estas capacidades en entornos LVC y simuladores integrados, la FAC podrá optimizar recursos y fortalecer la seguridad operacional, proyectando una fuerza entrenada, cohesionada y preparada para operar en escenarios de alta complejidad.

La FAC se encuentra en una posición favorable para convertir la realidad virtual en un pilar estructural dentro su modelo de entrenamiento continuado, alineado con estándares internacionales y centrado en la formación de una fuerza aérea ágil, segura y preparada para el empleo del poder aeroespacial a gran escala, esta evolución refleja no solo un avance técnico, sino un salto doctrinal, posicionando a la FAC en un lugar privilegiado para organizar y liderar a futuro un ejercicio multinacional virtual, aprovechando su experiencia

y liderazgo regional, un ejercicio de esta clase, no solo permitiría proyectar sus capacidades, sino también fomentar la cohesión operativa entre fuerzas aéreas latinoamericanas, promoviendo la seguridad cooperativa, la preparación conjunta frente a amenazas comunes y la integración táctica tanto en misiones de defensa, como en asistencia humanitaria y de respuesta ante crisis.

Referencias

Barry, C. (2012). *Building Future Transatlantic Interoperability Around a Robust NATO Response Force*.

Benavides, J. L. G. (2025, mayo 5). Simuladores de duelo. *Ejércitos*.

<https://www.revistaejercitos.com/articulos/simuladores-de-duelo/>

Caballero-Garriazo, J. A., Rojas-Huacanca, J. R., Sánchez-Castro, A., Lázaro-Aguirre, A. F.,

Caballero-Garriazo, J. A., Rojas-Huacanca, J. R., Sánchez-Castro, A., & Lázaro-Aguirre,

A. F. (2023). Revisión sistemática sobre la aplicación de la realidad virtual en la educación universitaria. *Revista Electrónica Educare*, 27(3), 463-480. <https://doi.org/10.15359/ree.27-3.17271>

CACOM1. (2024, febrero 28). *Simuladores de realidad virtual aumentada llegan para entrenar a los pilotos militares de su Fuerza Aeroespacial Colombiana*. Fuerza Aeroespacial Colombiana. <http://www.fac.mil.co/es/noticias/simuladores-de-realidad-virtual-aumentada-llegan-para-entrenar-los-pilotos-militares-de-su>

CACOM4. (2025, abril 4). *Realidad virtual: El nuevo aliado en el reentrenamiento de pilotos de helicóptero*. Fuerza Aeroespacial Colombiana. <http://www.fac.mil.co/es/noticias/realidad-virtual-el-nuevo-aliado-en-el-reentrenamiento-de-pilotos-de-helicoptero>

Campos Soto, N., Ramos Navas-Parejo, M., & Moreno Guerrero, A. J. (2020). Realidad virtual y motivación en el contexto educativo: Estudio bibliométrico de los últimos veinte años de Scopus. *Alteridad: revista de educación*, 15(1 (enero-junio)), 47-60.

Chen, Y. (2023). Research and Analysis of VR in the Field of Education. *Highlights in Science, Engineering and Technology*, 39. <https://doi.org/10.54097/hset.v39i.6555>

- Cottureau, H. (2023). FOR THE SUPREME ALLIED COMMANDERS, EUROPE AND TRANSFORMATION: *BI-STRATEGIC COMMAND DIRECTIVE 075-003 COLLECTIVE TRAINING AND EXERCISE - EXERCISE PROCESS*, 476.
- Dalladaku, Y., Kelley, J., Lacey, B., Mitchiner, J., Welsh, B., & Beigh, M. (2020). Assessing the Effectiveness of Virtual Reality in the Training of Army Aviators. *United States Military Academy*.
- DBAEC. (2020).
https://www.fac.mil.co/sites/default/files/linktransparencia/Planeacion/Manuales/manual_de_doctrina_basica_aerea_espacial_y_ciberespacial_fac-0-b_dbaec_2020.pdf
- Erwin, S. (2000, enero 11). *Video Games Gaining Clout As Military Training Tools*.
<https://www.nationaldefensemagazine.org/articles/2000/11/1/2000november-video-games-gaining-clout-as-military-training-tools>
- FAC. (2012, junio 30). *Fuerza Aérea Colombiana, presente en el ejercicio de aviación internacional “Red Flag 2012”*. Fuerza Aeroespacial Colombiana.
<http://www.fac.mil.co/es/noticias/fuerza-aerea-colombiana-presente-en-el-ejercicio-de-aviacion-internacional-red-flag-2012>
- FAC. (2019). *Estrategia para el desarrollo aéreo y espacial de la Fuerza Aérea Colombiana*.
<https://www.fac.mil.co/sites/default/files/2021-04/edaes.pdf>
- FAC. (2024, julio 12). *Tripulaciones y Comandos Especiales Aéreos finalizan con un balance positivo “Poseidón Amazonas 2024”*. Fuerza Aeroespacial Colombiana.
<http://www.fac.mil.co/es/noticias/tripulaciones-y-comandos-especiales-aereos-finalizan-con-un-balance-positivo-poseidon>
- Falcone et al. (2017). (PDF) An Introduction to Developing Federations with High Level Architecture (HLA). *ResearchGate*. <https://doi.org/10.1109/WSC.2017.8247820>

- Fernández, H. A. H. (2015). La revolución tecnológica militar: Una mirada crítica. *Estudios en Seguridad y Defensa*, 10(20), Article 20. <https://doi.org/10.25062/1900-8325.40>
- Floyd, C. C. (1996). *U.S. Air Force and U.S. Navy Joint Pilot Training: An Analysis of the Fighter Training Tracks*.
- Fortune Busines. (2025, mayo 12). *Realidad virtual (VR) en el tamaño del mercado aeroespacial y de defensa, 2032*. <https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/virtual-reality-vr-in-aerospace-and-defense-market-101703>
- Francis, D. (2019, junio 4). *Simulations to Enhance Aviation Training Capabilities | Army Aviation Magazine*. <https://armyaviationmagazine.com/simulations-to-enhance-aviation-training-capabilities/>
- Fullingim, J. F. (2007). *Regional airline qualifications: A study in the marketability of higher education graduates*. University of North Texas.
- García, R. (2021, septiembre 3). Colombia pone en marcha el ejercicio militar multinacional Ángel de los Andes. *Helos Magazine – Centro informativo de helicópteros*. <https://helosmag.com/esta-pasando/colombia-pone-en-marcha-el-ejercicio-militar-multinacional-angel-de-los-andes/>
- García Rodríguez, C. C., Mosquera Dussán, O. L., Guzmán Pérez, D., Zamudio Palacios, J. E., García Torres, J. A., García Rodríguez, C. C., Mosquera Dussán, O. L., Guzmán Pérez, D., Zamudio Palacios, J. E., & García Torres, J. A. (2021). Análisis de necesidades e implementación de tecnología de realidad virtual para entrenamiento y educación militar en Colombia. *Revista Logos Ciencia & Tecnología*, 13(1), 8-18. <https://doi.org/10.22335/rlct.v13i1.1271>
- Iagăru, E.-L. (2022). MODELLING AND SIMULATION AS A SERVICE (MSaaS)—
EVOLUTION OF THE ALLIED FRAMEWORK WITHIN NATO. *INTERNATIONAL*

- SCIENTIFIC CONFERENCE «STRATEGIESXXI», 18(1), 517-523.*
<https://doi.org/10.53477/2971-8813-22-59>
- IGEFA. (2021). *PROGRAMA DE PREVENCIÓN DE ACCIDENTES POR FACTORES HUMANOS CRM Y COMPETENCIAS- ANEXO 3.* 19.
- IGEFA. (2023). *PROGRAMA AIRMANSHIP PARA LA FAC PREVENCIÓN DE ACCIDENTES POR FACTORES HUMANOS - ANEXO 3.*
- Kallberg, D. J., Beitelman, M. V., Army, U. S., Mitsuoka, M. V., Army, U. S., & Boyce, D. M. W. (2022). *The Tactical Considerations of Augmented and Mixed Reality Implementation.* 105-113.
- Kusewitt. (1970, marzo 1). *Combat Readiness Training.* U.S. Naval Institute.
<https://www.usni.org/magazines/proceedings/1970/march/combat-readiness-training>
- Liang, Y., Wang, X., Yue, T., Xu, S., Yao, C., Liu, D., & Liu, Q. (2023). *Review of Live-Virtual-Constructive Simulation Technology.* 2478(12), 122080.
- Liu, Y. (2023). Analysis of Interaction Methods in VR Virtual Reality. *Highlights in Science, Engineering and Technology*, 39, 395-407. <https://doi.org/10.54097/hset.v39i.6559>
- Löfstrand, B., Herzog, R., Kuhn, T., & Behner, H. (2020). *Evolution of NATO standards for federated simulation.* <https://www.researchgate.net/publication/342658044>
- Maroungkas, A., Troussas, C., Krouska, A., & Sgouropoulou, C. (2023). Virtual Reality in Education: A Review of Learning Theories, Approaches and Methodologies for the Last Decade. *Electronics*, 12(13), 2832. <https://doi.org/10.3390/electronics12132832>
- Ministry of Defence. (2022, mayo 12). *Committees.parliament.uk/writtenevidence/108712/html/.*
<https://committees.parliament.uk/writtenevidence/108712/html/>
- NATO. (2021). *NATO members take part in virtual air operations exercise Spartan Warrior.* Ac.Nato.Int. <https://ac.nato.int/archive/2021/nato-members-take-part-in-virtual-air-operations-exercise-spartan-warrior.aspx>

Négyesi, I. (2024). Possibilities of using virtual reality technology in skills development.

BULLETIN OF «CAROL I» NATIONAL DEFENCE UNIVERSITY, 13(1), 31-43.

<https://doi.org/10.53477/2284-9378-24-02>

NSO. (2024, noviembre). *Standards & Guidance | NATO Simulation Standards*.

<https://nmsg.sto.nato.int/amsp>

Oficina de Comunicación Pública CACOM 1. (2024, febrero 28). *Simuladores de realidad virtual*

aumentada llegan para entrenar a los pilotos militares de su Fuerza Aeroespacial

Colombiana. [https://www.fac.mil.co/es/noticias/simuladores-de-realidad-virtual-](https://www.fac.mil.co/es/noticias/simuladores-de-realidad-virtual-aumentada-llegan-para-entrenar-los-pilotos-militares-de-su#:~:text=Adem%C3%A1s%20es%20de%20resaltar%20que,de%20entrenamiento%20de%20nuestros%20pilotos)

[aumentada-llegan-para-entrenar-los-pilotos-militares-de-](https://www.fac.mil.co/es/noticias/simuladores-de-realidad-virtual-aumentada-llegan-para-entrenar-los-pilotos-militares-de-su#:~:text=Adem%C3%A1s%20es%20de%20resaltar%20que,de%20entrenamiento%20de%20nuestros%20pilotos)

[su#:~:text=Adem%C3%A1s%20es%20de%20resaltar%20que,de%20entrenamiento%20de](https://www.fac.mil.co/es/noticias/simuladores-de-realidad-virtual-aumentada-llegan-para-entrenar-los-pilotos-militares-de-su#:~:text=Adem%C3%A1s%20es%20de%20resaltar%20que,de%20entrenamiento%20de%20nuestros%20pilotos)

[%20nuestros%20pilotos](https://www.fac.mil.co/es/noticias/simuladores-de-realidad-virtual-aumentada-llegan-para-entrenar-los-pilotos-militares-de-su#:~:text=Adem%C3%A1s%20es%20de%20resaltar%20que,de%20entrenamiento%20de%20nuestros%20pilotos)

Reitz, E. A., & Seavey, K. (2018). *Making joint and multinational simulation interoperability a*

reality. Interservice/Industry Training, Simulation, and Education Conference.

Roberson, D. L., & Stafford, M. C. (with Air University (U.S.) & Air University (U.S.)). (2017).

The Redesigned Air Force Continuum of Learning: Rethinking Force Development for the

Future (First edition). Air University Press, Curtis E. LeMay Center for Doctrine

Development and Education.

Saab. (2019, noviembre 25). *Saab Inaugurates Gripen Development Simulator in Brazil*.

[https://www.saab.com/newsroom/press-releases/2019/saab-inaugurates-gripen-](https://www.saab.com/newsroom/press-releases/2019/saab-inaugurates-gripen-development-simulator-in-brazil)

[development-simulator-in-brazil](https://www.saab.com/newsroom/press-releases/2019/saab-inaugurates-gripen-development-simulator-in-brazil)

Saab. (2021). *Entrenamiento pilotos*. Start. [https://www.saab.com/es/markets/colombia/gripen-](https://www.saab.com/es/markets/colombia/gripen-blog/2021/entrenamiento-pilotos)

[blog/2021/entrenamiento-pilotos](https://www.saab.com/es/markets/colombia/gripen-blog/2021/entrenamiento-pilotos)

SISO. (2025). *Simulation Interoperability Standards Organization*. <https://www.sisostandards.org/>

Velazquez, J., & Bier, N. (2015). SMS and CRM: Parallels and opposites in their evolution. *Journal*

of Aviation/Aerospace Education & Research, 24(2), 55-78.

Escuela Superior de Guerra “General Rafael Reyes Prieto”
Bogotá D.C., Colombia

Whitaker, J. (2023, octubre 7). *US, Colombia soar together: Ángel de los Andes, Relámpago VII*

bolster interoperability. Air Force. [https://www.af.mil/News/Article-](https://www.af.mil/News/Article-Display/Article/3548038/us-colombia-soar-together-ngel-de-los-andes-relmpago-vii-bolster-interoperabili/)

[Display/Article/3548038/us-colombia-soar-together-ngel-de-los-andes-relmpago-vii-](https://www.af.mil/News/Article-Display/Article/3548038/us-colombia-soar-together-ngel-de-los-andes-relmpago-vii-bolster-interoperabili/)

[bolster-interoperabili/](https://www.af.mil/News/Article-Display/Article/3548038/us-colombia-soar-together-ngel-de-los-andes-relmpago-vii-bolster-interoperabili/)

Ziakkas, D., Michael, W. S., & Pechlivanis, K. (2022). The implementation of competency-based training and assessment (CBTA) framework in aviation manpower planning.

Transportation Research Procedia, 66, 226-239.