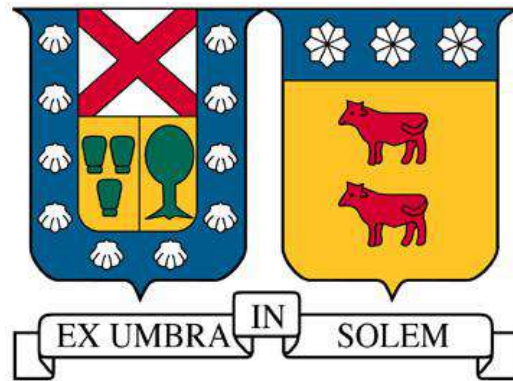


UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

DEPARTAMENTO DE AERONÁUTICA

VITACURA – CHILE



DISEÑO E IMPLEMENTACION DE UN ECOSISTEMA DE ETRENAMIENTO EN
REALIDAD VIRTUAL PARA UN CENTRO DE MANTENIMIENTO AERONAUTICO
(CMA) AIRBUS A320/321: EVALUACION TECNICA, FINANCIERA Y NORMATIVA

WLADIMIR AUGUSTO PEREZ SOTO

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA EN
AVIACIÓN COMERCIAL

PROFESOR(A) GUÍA	: SR(A).	MARTINUS POTTERS.
PROFESOR(A) CORREFERENTE	: SR(A).	LEONARDO LOBOS.

JULIO, 2026

CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título; ☐ Tesis de Postgrado;

Título del trabajo: DISEÑO E IMPLEMENTACION DE UN ECOSISTEMA DE ETRENAMIENTO EN REALIDAD VIRTUAL PARA UN CENTRO DE MANTENIMIENTO AERONAUTICO (CMA) AIRBUS A320/321: EVALUACION TECNICA, FINANCIERA Y NORMATIVA

Nombre del candidato(a): WLADIMIR AUGUSTO PEREZ SOTO

Carrera / Grado: INGENIERÍA EN AVIACIÓN COMERCIAL

Campus: Santiago Vitacura ; **Departamento:** AERONÁUTICA

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Martinus Potters, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL

☒ El trabajo **NO contiene información que amerite confidencialidad** y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

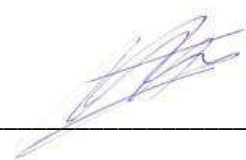
☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (embargo) por:

☐ 6 meses; ☐ 12 meses; ☐ 2 años; ☐ 3 años; ☐ 5 años; ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 09/10/2026; **Firma:** 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 09/10/2026; **Firma:** 

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

Dedicatoria

Dedico este trabajo principalmente a mis padres, Augusto Pérez y Claudia Soto, quienes fueron mi pilar fundamental durante estos cinco años, brindándome un respaldo incondicional tanto en lo económico como en lo emocional. A mi hermano, por ser mi compañía constante e indispensable a lo largo de toda mi etapa universitaria en Santiago.

A mi amigo Rodrigo Moya, por su lealtad inquebrantable, por acompañarme en cada momento y no dejarme solo jamás, especialmente en los momentos más difíciles. Agradezco también a Erwin Vicencio y al equipo de vicencioracing114, por estar siempre dispuestos a tenderme una mano cuando lo necesité.

Finalmente, a mis compañeros de universidad, con quienes compartí este camino y cuyo apoyo mutuo fue esencial para llegar a esta meta.

Resumen ejecutivo (en inglés y español y palabras clave)

La presente memoria de titulación propone el diseño e implementación de un Laboratorio de Entrenamiento en Realidad Extendida (XR) dentro de un Centro de Mantenimiento Aeronáutico (CMA) orientado a la familia Airbus A320/A321, emplazado en el Aeropuerto Internacional Arturo Merino Benítez de Santiago de Chile. El trabajo surge en respuesta a dos brechas estructurales del sector MRO (*Maintenance, Repair and Overhaul*) chileno: la dependencia de aeronaves en estado AOG para la instrucción práctica, modelo que resulta operativamente ineficiente y económicamente insostenible; y el vacío normativo explícito de la DGAC Chile, cuya regulación vigente —DAN 65, DAN 145 y DAN 147— no reconoce las tecnologías inmersivas como medio válido de instrucción certificable.

La investigación adopta un enfoque aplicado de carácter cuantitativo y descriptivo-correlacional, sustentado en la revisión sistemática de literatura especializada, estudios empíricos de la industria aeronáutica (EASA, FAA, PwC, CAE) y la evaluación de marcos regulatorios comparados. Se propone una arquitectura de tres capas para el ecosistema tecnológico: plataformas de simulación XR (Realidad Virtual y Mixta), Sistemas de Gestión del Aprendizaje (LMS) y software MRO integrado mediante API.

Los resultados del análisis empírico demuestran que el personal instruido en entornos inmersivos reduce los tiempos de ejecución de tareas técnicas en un rango del 30% al 50% y los errores críticos de mantenimiento (*rework*) en hasta un 45%, en comparación con métodos tradicionales. La medición fisiológica mediante el índice NASA-TLX confirma niveles significativamente menores de Demanda Mental y Frustración durante el entrenamiento en VR, maximizando la absorción neuronal de los procedimientos del *Aircraft Maintenance Manual* (AMM). La precisión diagnóstica en boroscopia virtual alcanza un 87,4% frente al 75,9% de los métodos convencionales.

La evaluación financiera concluye que el proyecto requiere una inversión inicial (CAPEX) de USD 75.000 con un (FLC) después de impuestos de USD 38.944 anuales. El Período de Recuperación de la Inversión (Payback) es de 23 meses, el Valor Actual Neto (VAN) al 12% WACC alcanza los USD \$65.394 y la Tasa Interna de Retorno (TIR) es de aproximadamente 44%, demostrando la viabilidad financiera del proyecto dentro del horizonte de vida útil del hardware (5 años).

Como contribución normativa, la memoria formula cinco propuestas de adecuación regulatoria para la DGAC Chile, que incluyen la creación de una Circular de Asesoramiento (CA-147.XR.001) que habilitaría el reconocimiento de hasta un 30% de las horas prácticas ejecutadas en simuladores XR aprobados, alineando el marco chileno con el estándar de la Agencia Europea de Seguridad Aérea (EASA).

abstract

This thesis proposes the design and implementation of an Extended Reality (XR) Training Laboratory within an Aeronautical Maintenance Center (AMC) focused on the Airbus A320/A321 family, located at the Arturo Merino Benítez International Airport in Santiago, Chile. The research addresses two structural gaps in the Chilean MRO (Maintenance, Repair and Overhaul) sector: the dependency on Aircraft on Ground (AOG) for hands-on training — an operationally inefficient and economically unsustainable model — and the explicit regulatory gap within Chile's current civil aviation framework (DGAC), whose regulations DAN 65, DAN 145, and DAN 147 do not formally recognize immersive technologies as certifiable instructional means.

The study adopts a quantitative, applied research approach with descriptive and correlational scope, grounded in a systematic review of specialized literature, empirical industry studies (EASA, FAA, PwC, CAE), and a comparative regulatory analysis. A three-layer technological architecture is proposed: XR simulation platforms (Virtual and Mixed Reality), Learning Management Systems (LMS), and MRO software integrated through APIs.

Empirical results demonstrate that personnel trained in immersive environments reduce technical task execution times by 30% to 50% and critical maintenance errors (*rework*) by up to 45%, compared to traditional methods. Physiological assessment through the NASA-TLX workload index confirms significantly lower Mental Demand and Frustration during VR training, maximizing neuronal absorption of *Aircraft Maintenance Manual* (AMM) procedures. Diagnostic accuracy in virtual borescopy reaches 87.4%, compared to 75.9% for conventional methods.

The financial evaluation concludes that the project requires an initial capital investment (CAPEX) of USD 75.000 (FCF) of USD 39.944 per year. The Payback Period is 23 months, the Net Present Value (NPV) at 12% WACC reaches USD \$65,394, and the Internal Rate of Return (IRR) is approximately 44%, confirming the project's financial viability within the hardware's useful life cycle (5 years).

As a normative contribution, the thesis formulates five regulatory reform proposals for DGAC Chile, including the creation of an Advisory Circular (CA-147.XR.001) that would enable the recognition of up to 30% of practical training hours completed in approved XR

simulators, aligning Chile's regulatory framework with the standards of the European Union Aviation Safety Agency (EASA).

índice	
INDICE TABLAS	11
INDICE FIGURAS.....	12
ÍNDICE GRAFICOS	13
Introducción.....	14
1. Capítulo (I).....	16
1.1 Justificación del tema (cuantificable, objetivo, NO juicios de valor).....	17
1.2 Desafíos en la formación técnica y estandarización	17
1.3 Objetivo General.....	19
1.4 Objetivos Específicos	19
1.5 Metodología y teoría a utilizar (esquematizar y relacionar con objetivos)	20
1.6 Alcance	21
2. Capítulo (II).....	22
2.1 Antecedentes.....	23
2.1.1 Realidad virtual (RV)	23
2.1.2 Realidad virtual (no inmersiva)	23
2.1.3 Realidad virtual (inmersiva).....	24
2.1.4 Definición de Realidad Aumentada (RA).....	26
2.1.5 Realidad Mixta (MR)	27
2.2 Mantenimiento Aeronáutico (MRO)	29
2.2.1 Infraestructura de Mantenimiento: El Hangar Aeronáutico (CMA)	29
2.2.2 Clasificación de Mantenimientos Aeronáuticos (Letter Checks)	30
2.2.3 Configuraciones de Posicionamiento de Aeronaves (Layout de Bahías)	31
2.2.4 Software de Gestión, Infraestructura Tecnológica y GSE	34
2.3 Caso de Lufthansa Aviation Training (LAT)	36
2.3.1 El lanzamiento de la Capacitación de Realidad Virtual.....	36
2.3.2 Del entorno virtual a la realidad	37
2.3.3 Ventajas sobre el entorno de capacitación tradicional.....	38
2.4 Metodologías que se han utilizado.	39
2.4.1 Resultados por datos para el entrenamiento con realidad virtual.....	39
2.4.2 Estudiantes que usan VR presentan una menor distracción en el aprendizaje (Resultados aplicación vr en el aprendizaje de estudiantes).....	41
2.5 David Kolb y la teoría del aprendizaje experiencial.....	42

2.5.1	Experiencia concreta	43
2.5.2	Observación reflexiva.....	43
2.5.3	Conceptualización abstracta.....	44
2.5.4	Experimentación activa	44
2.6	Continuum de Realidad-Virtualidad.....	45
2.7	Evolución de la realidad virtual (RV).....	46
2.7.1	El primer casco VR/RA (Espada de Damocles)	46
2.7.2	La Era de la Visualización Institucional: El Sistema CAVE (1990s)	47
2.7.3	La Revolución del Consumidor y la RV Standalone (2010s - Actualidad)	49
2.7.4	La Transición hacia la Realidad Mixta (MR) en MRO (Presente)	50
2.8	Marco Normativo del Personal Técnico Aeronáutico: Licencias de Mantenimiento (LMA)	51
2.8.1	La Pirámide Regulatoria Internacional.....	51
2.8.2	Categorías de Licencia EASA Parte 66 Aplicadas al Airbus A321	52
2.8.3	Habilitaciones de Tipo (Type Ratings) para familia 320-321	53
2.8.4	Modulo 9: Factores Humanos (Human Factors).....	54
2.8.5	Cursos Recurrentes Obligatorios para el Personal del CMA	55
2.9	Inspeccion No Destructiva (NDT/END) en el Mantenimiento Aeronautico.....	56
2.9.1	Definicion y Relevancia en el Contexto MRO	56
2.9.2	Principales Tecnicas NDT Aplicadas al Mantenimiento del Airbus A320/A321.....	57
2.9.3	La NDT Virtual: Como la Realidad Virtual y Mixta Replica estas Tecnicas	61
2.10	Factores Humanos y Error Humano en el Mantenimiento Aeronautico	62
2.10.1	Definicion y Dimension Estadistica del Error Humano en MRO.....	62
2.10.2	El Modelo de los Doce Factores Criticos: The Dirty Dozen.....	63
2.10.3	El Modelo del Queso Suizo de Reason (1990).....	64
2.10.4	Como la Realidad Virtual Mitiga los Factores Humanos en MRO.....	65
2.11	Marco Legal y Normativo: Estado Regulatorio de las Tecnologias XR en Chile	66
2.11.1	Diagnostico de la Situacion Regulatoria Actual en Chile.....	66
2.11.2	Marco OACI: Principio de Neutralidad Tecnologica y CBTA	72
2.11.3	Referencia EASA: El Marco Regulatorio Mas Avanzado	73
2.11.4	Sintesis Comparativa del Diagnostico Regulatorio: Chile en el Espectro Global ...	73
2.11.5	Referencia FAA: Aprobación Caso a Caso y Comparativa	75
3.	Capítulo (III)	76
3.1	Fases de la Propuesta Metodológica.....	77

3.1.1	Fase 1: Diagnóstico Operacional y Levantamiento de Datos (Situación As-Is).....	77
3.1.2	Fase 2: Estudio de Factibilidad para Integración VR en MRO Existente (Situación To-Be) 78	
3.1.3	Fase 3: Diseño del Modelo de Entrenamiento Inmersivo	79
3.1.4	Fase 4: Evaluación de Impacto Integral y Viabilidad del Proyecto	79
3.2	Diagnóstico Operacional y Dimensionamiento del Espacio Virtual	80
3.2.1	Requerimientos Operacionales para el Laboratorio VR (Operadores aéreos de la región AMB).....	80
3.2.2	Identificación de Métricas Críticas y Tiempos Operacionales	80
3.3	Evaluación Financiera y Ahorro VR.....	83
3.3.1	Retorno de Inversión (ROI) y <i>Payback Period</i> del Ecosistema VR	83
3.3.2	Tabla de sensibilidad	88
3.4	Requerimientos de Datos de Mercado para Evaluación de Impacto	88
3.4.1	Requerimientos de Datos de Mercado para Evaluación de Impacto (Fase 4)	88
3.5	Ecosistema de Software para Capacitación Virtual y Gestión de Mantenimiento	90
3.5.1	Plataformas de Capacitación Inmersiva (VR/AR/MR)	91
3.5.2	Software MRO de Apoyo: AIMS, TRAX y el Ecosistema Aeronáutico.....	94
3.5.3	Arquitectura de Integración: Del Visor VR al Registro Oficial de Mantenimiento.....	96
3.6	Listado Maestro de Equipamiento Tecnológico y Soporte Terrestre.....	97
3.7	Programa de Capacitación en Realidad Virtual (RV/RM).....	98
3.7.1	Módulos de Entrenamiento MRO en Realidad Virtual	98
3.7.2	Integración Tecnológica: La RV como Ventaja Competitiva	100
3.8	Medición de Tiempos y Carga Cognitiva.....	101
3.8.1	Reducción de Errores Humanos y Precisión Diagnostica.....	102
3.9	Propuesta de Marco Normativo: Modificaciones a DAN 65, DAN 145 y DAN 147	103
3.10	Matriz de Riesgos de Implementacion XR.....	106
4.	Capítulo 4: Conclusiones y recomendaciones.....	112
4.1	Conclusiones.....	113
4.2	recomendaciones	115
5.	Bibliografía y Referencias.....	117
6.	A N E X O S	122
7.	Glosario de Términos y Siglas	127

INDICE TABLAS

Tabla 1.1 Resultados comparativos de adquisición y retención de conocimientos entre entrenamiento tradicional y realidad virtual.	18
Tabla 2.1 Frecuencia y duración de las distracciones según el método de aprendizaje.	41
Tabla 2.2 Categorías de licencia EASA Parte 66 aplicadas al CMA.	52
Tabla 2.3 Cursos recurrentes obligatorios para el personal del CMA.	55
Tabla 3.1 Resultados de la evaluación de competencias cognitivas post-entrenamiento en Realidad Virtual.	81
Tabla 3.2 Cuadro comparativo de desempeño: Método Tradicional vs. Entrenamiento Inmersivo.	81
Tabla 3.3 Comparación operativa y financiera entre el entrenamiento tradicional y el inmersivo.	87
Tabla 3.4 Análisis comparativo de plataformas de capacitación inmersiva para el mercado aeronáutico.	91
Tabla 3.5 Sistemas MRO comerciales y sus capacidades de integración (API) con ecosistemas de entrenamiento VR.	94
Tabla 3.6 Listado Maestro de Equipamiento (MEL) para la implementación del Laboratorio VR.	97
Tabla 3.7 Resultados de la evaluación de carga cognitiva mediante NASA-TLX.	101
Tabla 3.8 Indicadores cardiovasculares durante el entrenamiento en escenarios reales frente a entornos virtuales.	102
Tabla 3.9 Matriz de riesgos de implementación XR: Riesgos Tecnológicos y Operacionales.	106
Tabla 3.10 Matriz de riesgos de implementación XR: Riesgos Regulatorios y Normativos.	108
Tabla 3.11 Matriz de riesgos de implementación XR: Riesgos Humanos y Organizacionales.	109
Tabla 3.12 Matriz de riesgos de implementación XR: Riesgos Financieros.	110
Tabla 3.13 Matriz de riesgos de implementación XR: Riesgos de Ciberseguridad y Privacidad.	111

INDICE FIGURAS

Ilustración 1.1 Esquema de las fases metodológicas del proyecto.....	20
Ilustración 2.1 Componentes estructurales de un sistema de Realidad Virtual.	24
Ilustración 2.2 Simulador de entrenamiento virtual inmersivo para aplicación de pintura en aeronaves.....	25
Ilustración 2.3 Uso de tecnología de Realidad Aumentada/Mixta en el mantenimiento aeronáutico.....	26
Ilustración 2.4 El continuo de la virtualidad (Virtuality Continuum).....	27
Ilustración 2.5 Esquema conceptual de la Realidad Extendida (XR) y sus ramas tecnológicas.....	28
Ilustración 2.6 Visor de Realidad Mixta Magic Leap 2 Enterprise Edition.....	35
Ilustración 2.7 Entrenamiento en Realidad Virtual para tripulantes de Lufthansa Aviation Training.....	37
Ilustración 2.8 Beneficios cuantitativos del entrenamiento mediante Realidad Virtual.	39
Ilustración 2.9 Ciclo del aprendizaje experiencial de Kolb.....	42
Ilustración 2.10 Sistema "Espada de Damocles", el primer dispositivo HMD de la historia.	46
Ilustración 2.11 Arquitectura de un sistema de visualización inmersiva tipo CAVE.	48
Ilustración 2.12 Visor de Realidad Virtual inmersiva de arquitectura Standalone.....	49
Ilustración 2.13 Inspección estructural mediante ultrasonido de arreglo de fases (PAUT)..	57
Ilustración 2.14 Ensayo de Corrientes de Eddy en componentes aeronáuticos.....	58
Ilustración 2.15 Inspección boroscópica en las etapas de turbina de un motor aeronáutico.	59
Ilustración 2.16 Inspección de componentes mediante Líquidos Penetrantes (PT).	60
Ilustración 3.1 Flujo de trabajo estandarizado para el desarrollo de ecosistemas VR.....	90
Ilustración 3.2 Módulo inmersivo de inspección visual exterior (Walk-Around).....	98
Ilustración 3.3 Simulación inmersiva del sistema de combustible (ATA 28).	99

ÍNDICE GRAFICOS

Gráfico 1.1 Gráfico que muestra la demanda de técnicos en mantenimiento aeronáutico por región extraído de Fuente: https://www.cae.com/2025-aviation-talent-forecast	14
Gráfico 2.1 Nivel de adopción corporativa de la realidad virtual en Estados Unidos.....	39
Gráfico 2.2 Mejora en los niveles de confianza post-capacitación según el método de enseñanza.....	40

Introducción

El Pronóstico de Talento de Aviación proporciona una perspectiva a 10 años sobre la demanda de profesionales clave de aviación, incluyendo pilotos, técnicos de mantenimiento de aeronaves, tripulación de cabina y controladores de tráfico aéreo. (CAE 2025), por lo que la industria enfrenta nuevos desafíos como tales como jubilaciones, altas tasas de rotación y la necesidad de adaptar la capacitación a la próxima generación de técnicos. Para satisfacer esta demanda, la industria está tomando medidas para atraer nuevo talento, brindar capacitación y oportunidades laborales, y aprovechar la tecnología para hacer que la capacitación sea más eficiente y atractiva.

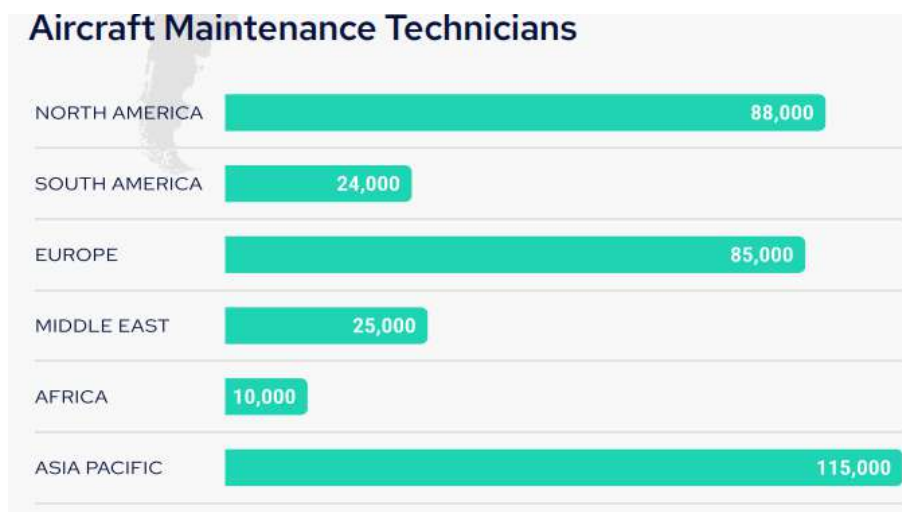


Gráfico 1.1 Gráfico que muestra la demanda de técnicos en mantenimiento aeronáutico por región
extraído de Fuente: <https://www.cae.com/2025-aviation-talent-forecast>

La necesidad de más técnicos de mantenimiento de aeronaves va en aumento debido a diversos factores

Aumento en el número de pasajeros de transporte aéreo: Se espera que el número de pasajeros aumente un 6.7% de 2024 a 2025 (CAE 2025), lo que conlleva una mayor demanda de servicios de mantenimiento de aeronaves para atender a este crecimiento.

Crecimiento de la flota de aeronaves comerciales: Se prevé que la flota de aeronaves comerciales crezca un 35% para 2034 (CAE 2025), lo que requerirá más técnicos de mantenimiento para dar soporte a esta expansión.

Altas tasas de jubilación y rotación entre los profesionales actuales: Solo en EE. UU., un asombroso 30% de los estudiantes de control de tráfico aéreo remunerados no completan su entrenamiento. (CAE 2025) a lo que sumando las altas tasas de rotación, genera una necesidad de reclutar y capacitar a nuevos técnicos de mantenimiento.

La aplicación de la RA en los procesos de supervisión y mantenimiento mejora la eficiencia, productividad, calidad y seguridad en la industria, permitiendo tener acceso inmediato a la información necesaria, relevante y en tiempo real para el proceso de monitorización, mantenimiento y reparación de los equipos. Estas tecnologías, que combinan la realidad virtual (RV) y los métodos de realidad aumentada (RA), ofrecen un apoyo significativo en la formación de técnicos aeronáuticos, abordando las limitaciones de los modelos de educación existente.

1. Capítulo (I)

En este capítulo se expone la problemática actual en la formación de técnicos de mantenimiento aeronáutico, donde los métodos tradicionales de instrucción dependen del acceso limitado a aeronaves en estado AOG y de costosos cursos externos. Se cuantifica el impacto de estas limitaciones en la eficiencia operativa y se establecen los objetivos de investigación orientados a evaluar la integración de tecnologías inmersivas como solución.

1.1 Justificación del tema (cuantificable, objetivo, NO juicios de valor).

Los gastos de mantenimiento suelen constituir entre el 10% y el 20% de los gastos operacionales de las aeronaves. (Wild, G. (2023). A Quantitative Study of Aircraft Maintenance Accidents in Commercial Air Transport, volumen(3), 1. La implementación de tecnologías de mantenimiento virtual (VR/AR) en procesos preventivos y estructurales puede reducir el tiempo fuera de servicio de aeronaves, donde en entornos de alta complejidad como los centros de mantenimiento aeronáutico, optimizar la eficiencia operativa mediante simulación inmersiva puede impactar positivamente la planificación, reducir errores humanos y fortalecer el entrenamiento técnico.

1.2 Desafíos en la formación técnica y estandarización

El entrenamiento y la actualización del personal técnico son fundamentales para garantizar la calidad y la seguridad del mantenimiento. Sin embargo, los métodos tradicionales de formación no son suficientes para abordar la complejidad de las aeronaves modernas, esto puede llevar a inconsistencias en los procedimientos y no preparar adecuadamente al personal técnico para la gestión de tareas críticas. Donde la falta de una capacitación óptima puede contribuir a la tasa de incidentes durante la ejecución y al cumplimiento de mantenimientos programados

Con esta propuesta se busca poder medir el impacto de una manera que se pueda cuantificar, midiendo con indicadores de eficiencia tales como, tiempo promedio de un mantenimiento preventivo, tiempo promedio de mantenimientos, tasa de cumplimiento de mantenimientos programados y reducción de incidentes durante y post intervención, donde se pueden lograr los siguientes beneficios basados en diversos estudios

Entrenamiento Inmersivo y Práctico: El sistema permite a los usuarios sumergirse eficazmente en un entorno virtual e interactuar con objetos virtuales. Esto es vital para las clases prácticas que requieren tanto conocimiento teórico como en el mantenimiento de aeronaves

Simulaciones Seguras de Escenarios de Alto Riesgo: La RV facilita la simulación segura de escenarios que serían peligrosos o costosos en un entorno físico.

Mayor Adquisición y Retención de Conocimientos: En un experimento que comparó este sistema con la capacitación por video para el mantenimiento de aeronaves, el grupo que utilizó el sistema propuesto obtuvo resultados notablemente superiores.

Tabla 1.1 Resultados comparativos de adquisición y retención de conocimientos entre entrenamiento tradicional y realidad virtual.

Test	Group	Mean	SD	N
Post-test	Proposed system	75.00	20.455	20
	Video	65.50	22.705	20
Retention-test	Proposed system	68.75	19.390	20
	Video	53.25	18.516	20

Table 3. Post-test and retention-test average score difference for each group.

Post-Retention	Mean	SD	N
Proposed system	6.25	10.371	20
Video	12.25	16.341	20

Nota. El grupo "Proposed system" corresponde al uso de Realidad Virtual, demostrando promedios superiores tanto en la prueba posterior inmediata (*Post-test*) como en la prueba de retención de memoria (*Retention-test*).

Fuente: Lee, Woo & Yu (2022). *Virtual Reality Metaverse System Supplementing Remote Education Methods*.

1.3 Objetivo General

Diseñar y evaluar la implementación de Realidad virtual de aplicada al mantenimiento preventivo y estructural de aeronaves, con el fin de cuantificar su impacto en la eficiencia operativa en el contexto de la gestión de operaciones aeronáuticas.

1.4 Objetivos Específicos

1. Identificar tareas críticas de mantenimiento preventivo y estructural que puedan ser virtualizadas para su entrenamiento.
2. Medir el desempeño técnico de los usuarios (tiempo, errores, cumplimiento de procedimientos) en entornos virtuales vs. entorno tradicional.
3. Estimar la reducción de errores humanos e incidentes post-mantenimiento atribuibles a la simulación virtual.
4. Establecer lineamientos para la integración de estos escenarios durante la ejecución e intervención de las aeronaves durante la formación técnica.

1.5 Metodología y teoría a utilizar (esquematizar y relacionar con objetivos)

El estudio se realizará en base a una investigación aplicada, ya que busca resolver un problema práctico en el ámbito del mantenimiento aeronáutico mediante la implementación y evaluación de una tecnología. La meta es cuantificar el impacto de integrar herramientas de mantenimiento virtual en los escenarios de mantenimiento, donde se buscará un enfoque en resultados cuantitativos. Esto se debe a que su propósito es medir el impacto y cuantificar la reducción de tiempos, errores e incidentes, utilizando indicadores de eficiencia como el tiempo promedio de un mantenimiento preventivo, el tiempo promedio de mantenimientos estructurales, la tasa de cumplimiento de mantenimientos programados y la reducción de incidentes durante y post-intervención



Ilustración 1.1 Esquema de las fases metodológicas del proyecto.

Fuente: Elaboración propia.

1.6 Alcance

Descriptivo: Se describirá el desempeño técnico de los usuarios (tiempo, errores, cumplimiento de procedimientos) tanto en entornos virtuales como en el entorno tradicional. También se identificarán y describirán las tareas críticas de mantenimiento virtualizables

Correlacional: Se buscará establecer una relación o correlación entre el entrenamiento con Realidad Virtual y la reducción de errores humanos e incidentes post-mantenimiento, así como el efecto del entrenamiento VR en indicadores operacionales asociados al mantenimiento aeronáutico. Es decir, se intentará determinar cómo el uso de la VR influye en la eficiencia operativa y la seguridad

Límites de la investigación: En términos de tiempo y espacio, se enfocará en el contexto de la gestión de operaciones aeronáuticas (mantenimientos preventivos).

Población y Muestra

Población: Personal técnico de mantenimiento aeronáutico de diversos estudios realizados.

Muestra: Una selección representativa de técnicos de mantenimiento que participarán en el entrenamiento con RV y en las evaluaciones de desempeño.

2. Capítulo (II)

El presente capítulo desarrolla el marco teórico y conceptual que sustenta la investigación. El lector encontrará un recorrido por las tecnologías de Realidad Extendida (VR, AR y MR), el análisis del marco regulatorio aeronáutico vigente en Chile, Europa y Estados Unidos (DGAC, EASA, FAA), los factores humanos que inciden en el error de mantenimiento y los antecedentes industriales que validan el uso de simuladores inmersivos en la aviación.

2.1 Antecedentes

2.1.1 Realidad virtual (RV)

es una tecnología de simulación computacional que permite al usuario experimentar e interactuar con entornos tridimensionales generados digitalmente, en tiempo real, a través del uso de dispositivos de visualización y control, como visores (Head-Mounted Displays) y controladores hápticos. A diferencia de otras tecnologías inmersivas, la RV reemplaza completamente el entorno físico del usuario por un entorno sintético, diseñado para simular experiencias sensoriales y espaciales que imitan situaciones reales o completamente ficticias.

2.1.2 Realidad virtual (no inmersiva)

La RV no inmersiva implica que el usuario se inserta parcialmente en un entorno virtual a través de un monitor. En este caso, el usuario no está completamente inmerso en el entorno virtual, sino que solo puede ver una parte de él en la pantalla.

2.1.3 Realidad virtual (inmersiva)

Para comprender la envergadura de esta tecnología, es fundamental desglosar la arquitectura base de un ecosistema VR. Según estudios aplicados a la aeronáutica (Wu & Vu, 2022), un sistema inmersivo se compone estructuralmente de cinco pilares: el hardware (gafas y sensores HMD), el software de motor gráfico, la red, las aplicaciones y el usuario final. La correcta convergencia de estos elementos permite recrear escenarios de hangares y aeronaves donde se respetan las leyes de la física, generando una presencia real en el entorno digital.

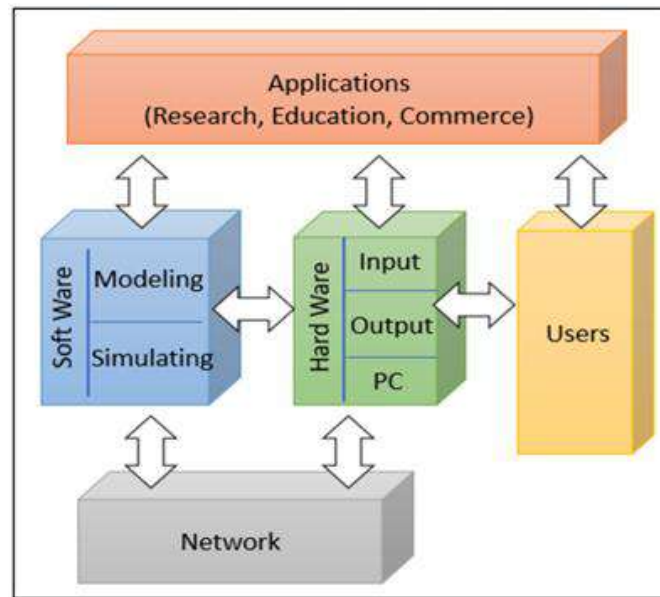


Ilustración 2.1 Componentes estructurales de un sistema de Realidad Virtual.

Fuente: Wu & Vu (2022).

La RV inmersiva permite que el usuario se inserte por completo en el entorno virtual utilizando un casco de realidad virtual (HMD). El HMD bloquea la vista del usuario de su entorno alrededor, lo que proporciona la sensación de estar completamente inmerso en el entorno virtual. El sensor de movimiento del HMD rastrea la rotación de la cabeza del usuario, permitiéndole observar el entorno a 360°.

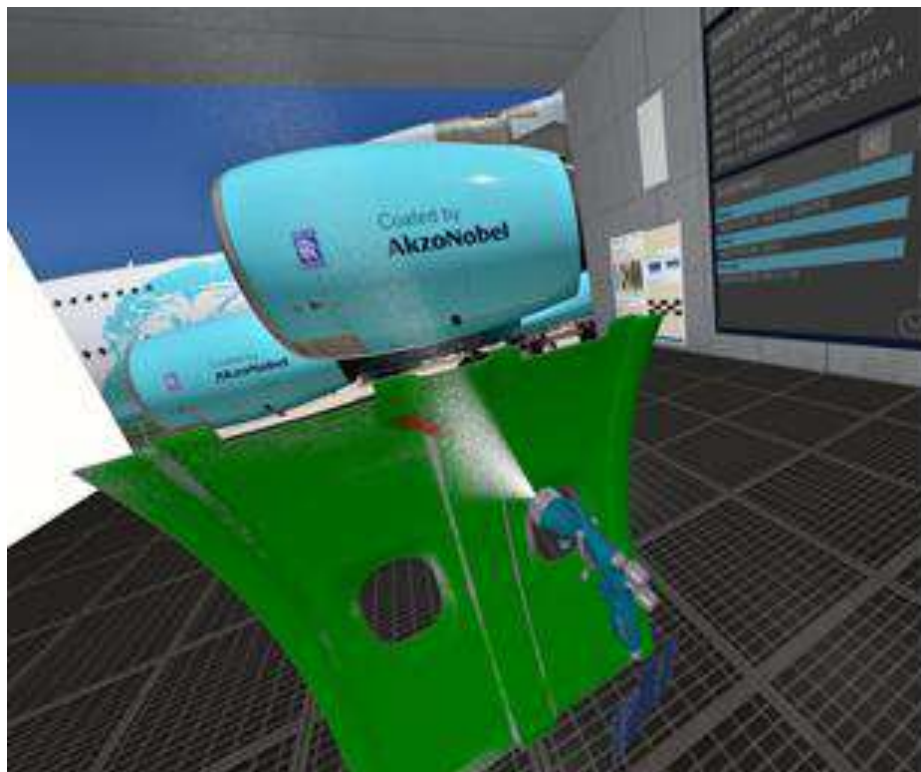


Ilustración 2.2 Simulador de entrenamiento virtual inmersivo para aplicación de pintura en aeronaves.

Nota. Visualización en primera persona de una experiencia inmersiva mediante realidad virtual. *Fuente:* AkzoNobel. Recuperado de <https://www.pfmex.com/noticias/post/akzonobel-presentara-sistema-de-entrenamiento-virtual-para-aplicar-pintura-en-aeronaves>

2.1.4 Definición de Realidad Aumentada (RA)

Es una tecnología interactiva que permite superponer elementos digitales como imágenes, modelos tridimensionales, datos o animaciones sobre el entorno físico del usuario, en tiempo real, mediante dispositivos como cámaras, smartphones, tablets o visores. A diferencia de la realidad virtual, la RA no reemplaza el entorno real, sino que lo complementa con información visual, auditiva o táctil generada por computador, integrando ambos mundos de una manera que le pueda facilitar tareas al usuario.



Ilustración 2.3 Uso de tecnología de Realidad Aumentada/Mixta en el mantenimiento aeronáutico.

Nota. Visualización de un operador superponiendo elementos digitales (planos y manuales) sobre el entorno físico real. **Fuente:** Microsoft News Center (2019).

Recuperado de <https://news.microsoft.com/es-es/2019/06/18/airbus-vuela-mas-alto-con-ayuda-de-la-tecnologia-de-realidad-mixta-de-microsoft/>

2.1.5 Realidad Mixta (MR)

La Realidad Mixta (MR) es una tecnología inmersiva que fusiona de forma interactiva el entorno físico con objetos digitales tridimensionales generados por computador, permitiendo que ambos coexistan y reaccionen entre sí en tiempo real. A diferencia de la realidad aumentada (que solo superpone información) o la realidad virtual (que sustituye completamente el entorno físico), la realidad mixta integra y ancla objetos virtuales al espacio real, posibilitando que el usuario los capte los objetos, manipule y se desplace alrededor de ellos como si fueran elementos tangibles.

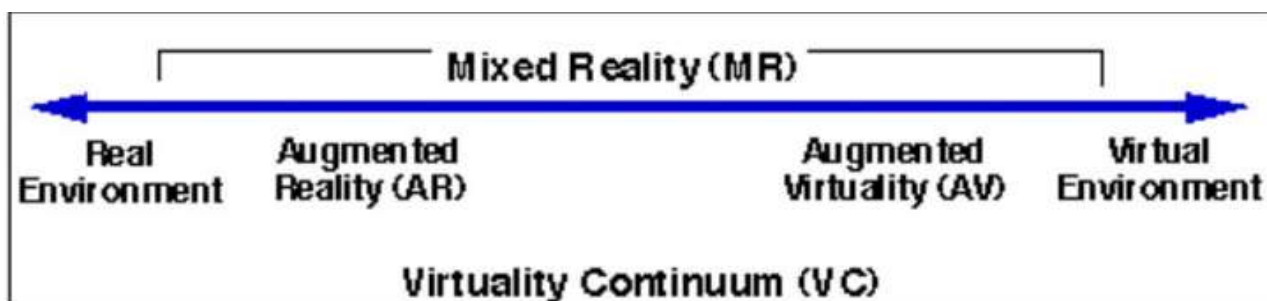


Ilustración 2.4 El continuo de la virtualidad (Virtuality Continuum).

Nota. Representación simplificada del espectro continuo que abarca desde el entorno físico real hasta el entorno completamente virtual, definiendo el alcance de la Realidad Mixta. *Fuente:* Milgram & Kishino (1994). Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/231514051_A_Taxonomy_of_Mixed_Reality_Visual_Displays

En el extremo izquierdo de la representación se encuentran los entornos compuestos exclusivamente por elementos del mundo físico. Esto incluye cualquier escena que el observador perciba directamente a simple vista, o a través de medios como pantallas que transmitan imágenes reales. Por el contrario, el extremo derecho representa entornos completamente virtuales, integrados únicamente por objetos digitales, como es el caso de simulaciones generadas por computador, ya sea mediante pantallas tradicionales o mediante sistemas inmersivos.

Para poder comprender las principales diferencias de cada uno de las tecnologías la imagen a continuación resume a grandes rasgos cada una de ellas.

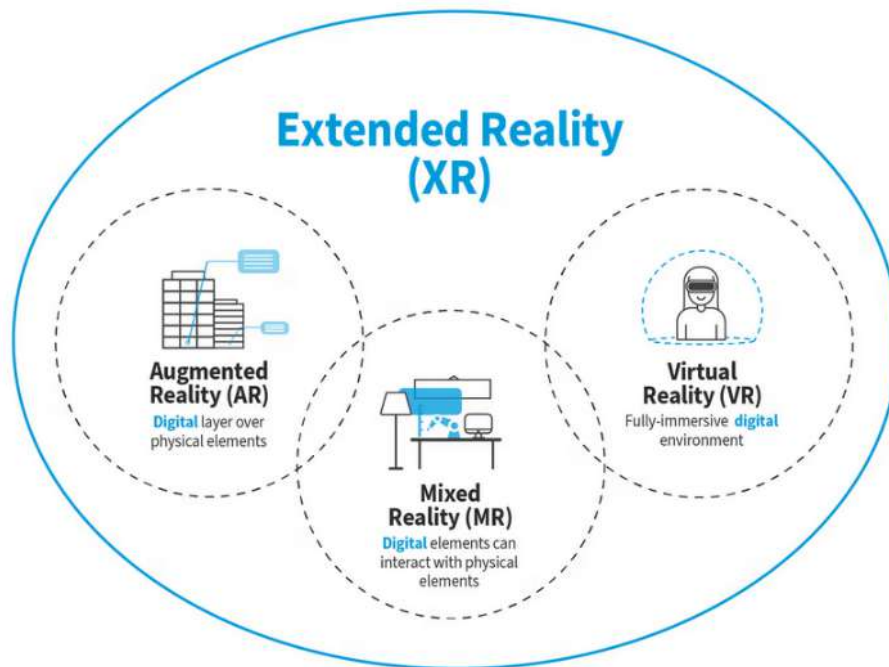


Ilustración 2.5 Esquema conceptual de la Realidad Extendida (XR) y sus ramas tecnológicas.

Nota. Relación entre la Realidad Aumentada (AR), Realidad Mixta (MR) y Realidad Virtual (VR) bajo el concepto paraguas de Realidad Extendida (XR). *Fuente:* Interaction Design Foundation. Recuperado de <https://www.interaction-design.org/literature/article/beyond-ar-vs-vr-what-is-the-difference-between-ar-vs-mr-vs-vr-vs-xr>

2.2 Mantenimiento Aeronáutico (MRO)

El sector del mantenimiento aeronáutico, también conocido como MRO (Maintenance, Repair and Overhaul), constituye una de las áreas más críticas dentro de la industria de la aviación civil y comercial. Su propósito principal es garantizar que todas las aeronaves cumplan con los estándares de seguridad operacional, confiabilidad técnica y disponibilidad comercial definidos por los fabricantes, las autoridades aeronáuticas y las aerolíneas.

2.2.1 Infraestructura de Mantenimiento: El Hangar Aeronáutico (CMA)

Desde una perspectiva de ingeniería e infraestructura, un hangar no es concebido como una edificación industrial convencional. Se define como una mega estructura de gran luz libre (long-span structure) diseñada específicamente para albergar aeronaves, facilitando entornos controlados para intervenciones de MRO (Maintenance, Repair, and Overhaul) (Simbolon et al., 2025).

La complejidad arquitectónica y estructural de un Centro de Mantenimiento Aeronáutico (CMA) radica en la ausencia de columnas interiores, lo que permite la maniobrabilidad segura de los activos. Además, estas instalaciones deben estar equipadas con sistemas especializados como control de clima, supresión de incendios por espuma de alta expansión y sistemas de anclaje (docks) que permitan el acceso perimetral a la aeronave. Dado su alto valor estratégico y constructivo, el hangar representa una de las inversiones de capital (CAPEX) más significativas para una aerolínea que decide internalizar su mantenimiento.

2.2.2 Clasificación de Mantenimientos Aeronáuticos (Letter Checks)

A nivel internacional, la industria clasifica el mantenimiento aeronáutico a través de un sistema alfabético (Letter Checks) que categoriza las intervenciones según su complejidad, intervalo de tiempo y profundidad de la inspección. De acuerdo a la literatura técnica de optimización de operaciones aeronáuticas (Deng & Santos, 2022), estos se dividen principalmente en:

Mantenimiento de Línea (A-Check): Es un mantenimiento preventivo de rutina y de baja complejidad que se realiza aproximadamente cada 400 a 600 horas de vuelo o cada 2 a 3 meses. Requiere una inmovilización menor de la aeronave (generalmente una noche o un día) y abarca revisiones de fluidos, filtros y sistemas de emergencia. Históricamente existía el B-Check, pero la industria moderna lo ha absorbido dentro de las tareas sucesivas del A-Check.

Mantenimiento Mayor o Base (C-Check): Constituye una intervención profunda y exhaustiva que requiere retirar la aeronave de la línea de vuelo durante 1 a 2 semanas. Se ejecuta aproximadamente cada 18 a 24 meses y comprende una revisión minuciosa de componentes estructurales, sistemas hidráulicos, cableado y superficies de control. Este nivel de mantenimiento requiere forzosamente el ingreso de la aeronave a un hangar (CMA) bien equipado.

Overhaul Estructural (D-Check): Es el nivel de mantenimiento más intrusivo y complejo, también conocido como "Heavy Maintenance Visit" (HMV). Ocurre cada 6 a 10 años. Durante un D-Check, la aeronave es prácticamente desensamblada por completo hasta su estructura primaria (fuselaje desnudo) para buscar corrosión, fatiga de metales y microfisuras estructurales. Puede demorar entre 4 y 6 semanas de inactividad (AOG).

2.2.3 Configuraciones de Posicionamiento de Aeronaves (Layout de Bahías)

En el diseño y operación de un Centro de Mantenimiento Aeronáutico (MRO), la configuración geométrica y el posicionamiento de las aeronaves dentro del hangar es un factor crítico que impacta directamente en la eficiencia del flujo de trabajo, la utilización del espacio (footprint) y la productividad de los técnicos. La selección del layout no es arbitraria; está impulsada por la necesidad de optimizar el espacio físico manteniendo los márgenes de seguridad requeridos por normativas como la NFPA 409 (National Fire Protection Association) para el movimiento de equipos de soporte en tierra (GSE) y andamios estructurales (Kinnison & Siddiqui, 2012).

Existen dos configuraciones principales que la industria evalúa para acomodar aeronaves de fuselaje angosto (Narrow body) como la familia Airbus A320/A321:

A) Configuración Nose-In Paralela

En este esquema, las aeronaves se estacionan lado a lado de forma paralela, con el radomo (nariz) apuntando hacia la puerta del hangar. Es una configuración altamente intuitiva y preferida para mantenimientos preventivos donde el acceso a la cabina, sección delantera y motores (ala) es prioritario.

- Ventajas: Simplifica enormemente las maniobras de remolque (towing) para el ingreso y egreso de las aeronaves, reduciendo el riesgo de colisiones (hangar rash). Permite una excelente segregación de los equipos de soporte en la parte frontal y central del fuselaje.

- Desventajas: El empenaje (cola de la aeronave) queda posicionado al fondo del hangar. Si la profundidad del edificio es limitada, puede dificultar el posicionamiento de grúas o andamios de gran altura (docking systems) requeridos para intervenciones en el timón de dirección o estabilizadores horizontales.

(Ver Imagen N°1 en Anexo 9: Diagrama de Layout Nose-In Paralelo para A321).

B) Configuración Tail-to-Tail o Intercalada

En escenarios donde el espacio perimetral es una restricción severa, los MROs pueden optar por acomodar los aviones con las colas apuntando hacia el centro del hangar o en posiciones intercaladas. Al alternar la orientación, las envergaduras se solapan espacialmente, permitiendo empacar más fuselajes en la misma Area de Fuego (Fire Area) definida por la NFPA 409.

- Ventajas: Maximiza la densidad operativa en hangares de menor área útil. Permite concentrar infraestructuras fijas pesadas (como puentes grúa o suministros de aire/energía) en un pasillo central.
- Desventajas: Las maniobras de remolque son significativamente mas complejas, requiriendo tractores eléctricos especializados y extrema precisión espacial, lo cual puede incrementar los tiempos de posicionamiento.

(Ver Imagen N°2 en Anexo 10 Diagrama de Layout Nose-In Paralelo para A321).

A) Foco Estratégico: Mantenimiento Base (C-Check)

El servicio principal del taller será la ejecución de C-Checks (C1, C2, C3, etc.). Un C-Check para la familia A320 es una inspección profunda que requiere retirar la aeronave del servicio comercial por un periodo de 2 a 4 semanas (Turnaround Time o TAT). Es el balance ideal para un taller independiente de terceros (Third-Party MRO), ya que genera ingresos sustanciales por visita sin exigir las colosales inversiones en herramental estructural asociadas a mantenimientos mayores.

Las tareas principales que se desarrollaran en nuestras bahías bajo la certificación DAN 145 incluyen:

- Inspecciones no destructivas (NDT) avanzadas para la detección temprana de corrosión y fatiga en puntos críticos del fuselaje, raíz alar y trenes de aterrizaje.
- Inspecciones coproscópicas de los motores CFM56 o IAE V2500, permitiendo la evaluación interna de las palas de la turbina y la cámara de combustión sin desmontar el motor del ala.

- Calibración y pruebas funcionales de la suite de aviónica y del sistema de control de vuelo electrónico Fly-By-Wire.
- Reacondicionamiento de cabina interior (Cabin Refurbishment), renovación de alfombras y asientos, lo cual es altamente demandado por las aerolíneas locales (Low-Cost Carriers).

2.2.4 Software de Gestión, Infraestructura Tecnológica y GSE

En la aviación moderna, la rentabilidad de un MRO no depende únicamente de la destreza mecánica, sino de la eficiencia con la que se gestionan los datos, la logística de repuestos y la trazabilidad técnica (Deng & Santos, 2022). Para ello, el CMA implementará un ecosistema tecnológico 'Paperless' (sin papel) apoyado en herramientas de vanguardia.

A) Software de Gestión de Mantenimiento (MRO ERP)

El control de las horas de vuelo, ciclos (FH/FC), directivas de aeronavegabilidad (ADs) y el inventario requiere un software empresarial de clase mundial (Tier 1). Tras una investigación de las plataformas que dominan la industria aeronáutica global, se evaluaron cinco alternativas principales:

- AMOS (Swiss-AS): Líder indiscutido en Europa y ampliamente adoptado en Latinoamérica (ej. LATAM Airlines). Ofrece un entorno altamente integrado, pero sus costos de implementación rondan los \$250.000 USD iniciales más \$8.000 USD mensuales en licenciamiento SaaS (Cloud).
- TRAX eMRO: Sistema 100% web, dominante en el continente americano (utilizado por aerolíneas de bajo costo como JetSmart). Destaca por sus aplicaciones móviles eMobility para mecánicos. Inversión estimada de \$200.000 USD iniciales.
- IFS Maintenix: Software extremadamente robusto utilizado por grandes flotas globales (ej. Copa Airlines). Es altamente personalizable, pero requiere tiempos de implementación que pueden superar los 18 meses.
- Ramco Aviation: Opción emergente con fuerte integración de Inteligencia Artificial y machine learning. Suele ser más económica en su licenciamiento por usuario.
- OASES (Commsoft): Sistema orientado a MROs regionales de menor escala. Es más accesible económicamente, pero presenta limitaciones de escalabilidad para hangares automatizados masivos.

Selección del Proyecto: Se propone la adopción de TRAX eMRO debido a su probada eficacia operativa en modelos comerciales ágiles y su robusta interfaz móvil, que permitirá a los técnicos firmar digitalmente las Task Cards desde el pie del avión, acelerando el Turnaround Time. [Ver Imagen en Anexo 11: Interfaz Oficial de TRAX eMRO].

B) Infraestructura de Hardware Movil y Realidad Mixta

Para materializar el hangar 'Sin Papeles' y maximizar la precisión en los C-Checks, se incorporará el siguiente hardware de grado empresarial:

- Tablets Industriales: Se dotará a la línea de técnicos con dispositivos Panasonic Toughbook G2 o equivalentes. Estos equipos con especificación militar (aprox. .999 USD c/u) resisten caídas sobre concreto y exposición a fluidos hidráulicos corrosivos como el Skydrol. Estas tablets se conectarán en tiempo real al ERP TRAX y al portal oficial de datos técnicos AirbusWorld, cuya suscripción anual para un CMA oscila entre \$20.000 y \$40.000 USD.
- Visores de Realidad Mixta (MR): Para resolver la ceguera espacial descrita anteriormente y proyectar el AMM tridimensional sobre los motores CFM56/V2500, se adquirirán dispositivos Magic Leap 2 Enterprise Edition (.999 USD por visor). Se descarta el Apple Vision Pro al no poseer certificación industrial, y el Microsoft HoloLens 2 debido a su inminente discontinuación técnica.



Ilustración 2.6 Visor de Realidad Mixta Magic Leap 2 Enterprise Edition.

Nota. Dispositivo de grado industrial seleccionado para la proyección de manuales tridimensionales sobre los componentes aeronáuticos. *Fuente:* Magic Leap.

2.3 Caso de Lufthansa Aviation Training (LAT)

Es una compañía especializada en instrucción aeronáutica, consolidada en 2017 a partir de la fusión entre Lufthansa Flight Training y Swiss Aviation Training. Actualmente, se posiciona como una de las principales entidades en el ámbito de la formación de personal aeronáutico, ofreciendo programas avanzados de instrucción para técnicos y tripulantes de cabina, en un total de doce centros de entrenamiento.

Entre sus clientes se encuentran más de 200 aerolíneas de renombre, tanto nacionales como internacionales, además de prestar servicios de formación a las distintas compañías que conforman el Grupo Lufthansa.

2.3.1 El lanzamiento de la Capacitación de Realidad Virtual

En un periodo relativamente breve, la empresa ha desarrollado e implementado un innovador programa de formación virtual dirigido a asistentes de vuelo. Actualmente, este sistema permite que aproximadamente cada año 18.500 tripulantes de cabina de Lufthansa, puedan realizar una parte de su instrucción a través de entornos de simulación virtual.

2.3.2 Del entorno virtual a la realidad

El entrenamiento consiste en llevar a cada una de las personas en instrucción a una de las 18 estaciones de simulación VR disponibles en los centros de Lufthansa Aviation Training (LAT) ubicados en Fráncfort y Múnich. Cada cabina tiene un espacio aproximadamente 3 x 3 metros, para que contenga el espacio suficiente para recrear una experiencia inmersiva, segura y controlada.

Una vez colocado el visor, el usuario es transportado de inmediato a una recreación virtual de la cabina de un avión, donde recibe una introducción inicial guiada por “VIA” (Virtual Interactive Assistant), un asistente digital diseñado para acompañar y orientar al participante durante toda la sesión.



Ilustración 2.7 Entrenamiento en Realidad Virtual para tripulantes de Lufthansa Aviation Training.

Nota. Representación del entorno virtual de la cabina donde el usuario es capacitado mediante el asistente digital interactivo "VIA". *Fuente:* Carlos (2019). Recuperado de <https://aircomment.info/lufthansa-aviation-training-realidad-virtual-para-el-entrenamiento/>

Durante el desarrollo del entrenamiento, existe una comunicación constante entre el participante y el operador a cargo del sistema. Lo que permite que, en cualquier momento de la sesión el aprendiz pueda realizar consultas, solicitar aclaraciones o recibir orientación directa en tiempo real, lo que garantiza una experiencia de formación guiada y personalizada.

2.3.3 Ventajas sobre el entorno de capacitación tradicional

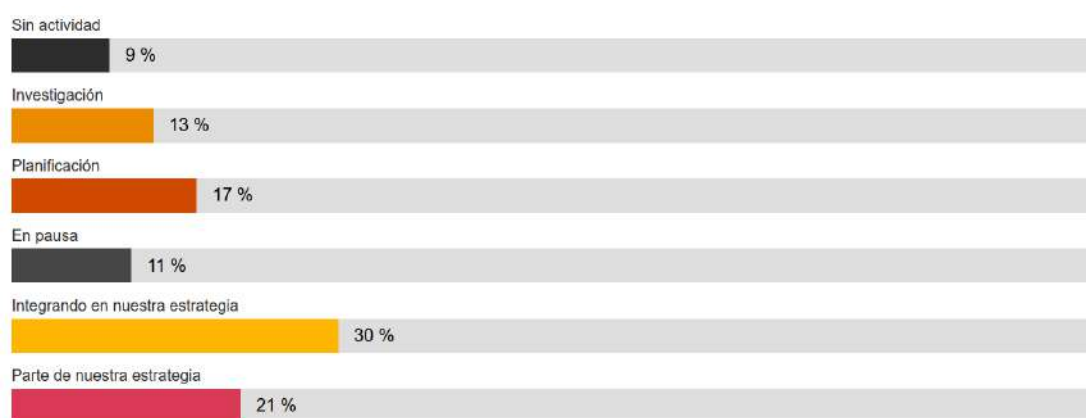
- **Capacidad de ejecutar sesiones:** Esto representa un salto importante en términos de eficiencia operativa. A diferencia del entrenamiento tradicional, que depende de la disponibilidad física de aeronaves o simuladores de cabina, la realidad virtual permite que varios usuarios trabajen de manera paralela e independiente, sin requerir desplazamientos ni la ocupación de aeronaves que podrían estar en operación u otra actividad.
- **Alternativa altamente rentable y escalable:** Mientras que la formación en cabinas reales implica altos costos asociados a mantenimiento, ocupación de espacio físico y consumo de recursos técnicos y humanos, el uso de entornos virtuales elimina gran parte de esas limitaciones. Además, permite repetir escenarios cuantas veces sea necesario sin desgaste de equipos, lo que se traduce en un mejor aprovechamiento del tiempo y una reducción significativa de los costos de instrucción.

2.4 Metodologías que se han utilizado.

2.4.1 Resultados por datos para el entrenamiento con realidad virtual

Con el crecimiento del concepto de metaverso, la RV considerada una de las principales puertas de entrada a estos entornos inmersivos ha comenzado a adquirir una mayor presencia en el ámbito empresarial. De acuerdo con los resultados de la Encuesta Metaversal de PwC (2022), un 51% de las organizaciones ya han incorporado la realidad virtual en su estrategia corporativa.

Gráfico 2.1 Nivel de adopción corporativa de la realidad virtual en Estados Unidos.



Nota. Resultados de la Encuesta Metaversal de PwC, ilustrando que el 51% de las empresas ya integra la RV en su estrategia. *Fuente:* PwC (2022). Recuperado de <https://www.pwc.com/us/en/tech-effect/emerging-tech/virtual-reality-study.html>

A partir de la encuesta se obtuvieron los siguientes resultados en comparación a los estudiantes de aulas tradicionales.

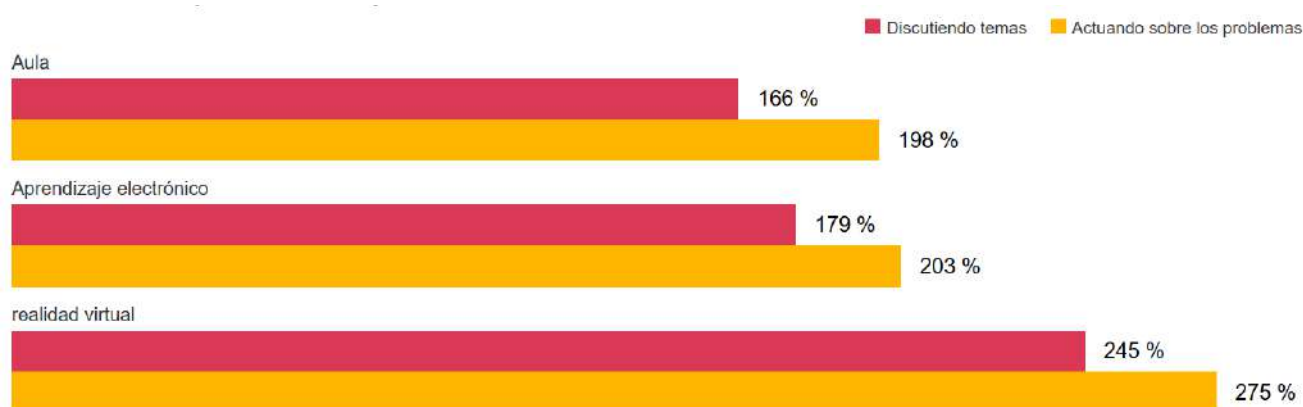


Ilustración 2.8 Beneficios cuantitativos del entrenamiento mediante Realidad Virtual.

Nota. Resultados comparativos del desempeño y confianza de estudiantes con RV frente a estudiantes de aulas tradicionales. *Fuente:* PwC (2022). Recuperado de <https://www.pwc.com/us/en/tech-effect/emerging-tech/virtual-reality-study.html>

Por lo que podemos concluir que queda evidenciado que la capacitación a través de entornos inmersivos de realidad virtual (RV) Al brindar la posibilidad de practicar en un entorno inmersivo y sin estrés, la capacitación basada en RV genera mayores niveles de confianza y una mejor capacidad para aplicar el aprendizaje en el trabajo. De hecho, los estudiantes capacitados con RV mostraron hasta un 275 % más de confianza para aplicar lo aprendido después de la capacitación, lo que representa una mejora del 40 % con respecto a la capacitación presencial y del 35 % con respecto a la capacitación en línea.

Gráfico 2.2 Mejora en los niveles de confianza post-capacitación según el método de enseñanza.



Nota. Comparación porcentual entre los resultados obtenidos en el aula tradicional, el aprendizaje electrónico (e-learning) y la Realidad Virtual. *Fuente:* PwC (2022). Recuperado de <https://www.pwc.com/us/en/tech-effect/emerging-tech/virtual-reality-study.html>

2.4.2 Estudiantes que usan VR presentan una menor distracción en el aprendizaje (Resultados aplicación vr en el aprendizaje de estudiantes)

Actualmente muchos estudiantes y/o personas en capacitaciones se suelen distraer con facilidad, muchas veces estos no terminan los videos que se les facilitan o simplemente no están al pendiente. Parte de este problema proviene debido a los dispositivos móviles que poseemos hoy en día.

En cambio, el aprendizaje con realidad virtual (RV) logra captar mucho mejor la atención. Al usar gafas de RV, los usuarios se sumergen por completo en la experiencia, lo que evita interrupciones y limita las distracciones. Se observó que quienes recibieron capacitación con RV estuvieron hasta cuatro veces más concentrados que aquellos que aprendieron mediante plataformas online, y 1,5 veces más que quienes participaron en clases presenciales. Esto demuestra que, al involucrarse totalmente en un entorno inmersivo, los alumnos tienden a aprovechar mucho mejor la formación y obtienen mejores resultados.

Tabla 2.1 Frecuencia y duración de las distracciones según el método de aprendizaje.

	Aula	Aprendizaje Online	RV
Cuántas veces has sido distraído durante esta tarea	0,78	1,93	0,48
Cuántos minutos demoras en volver a la tarea	1,00	2,63	0,48

Nota. Adaptación al español de los resultados de concentración obtenidos en la encuesta corporativa de PwC. *Fuente:* PwC (2022). Recuperado de <https://www.pwc.com/us/en/tech-effect/emerging-tech/virtual-reality-study.html>

2.5 David Kolb y la teoría del aprendizaje experiencial

La teoría del aprendizaje experiencial, propuesta por David Kolb, destaca la relevancia que tiene la experiencia directa como base fundamental del proceso de aprendizaje. Según este enfoque, aprender implica construir conocimiento a partir de la reflexión crítica sobre las vivencias, otorgándoles significado a través del análisis y la interpretación personal. Kolb orienta su trabajo a comprender los procesos cognitivos que intervienen cuando una persona enfrenta, internaliza y transforma una experiencia, identificando además los distintos estilos individuales de aprendizaje que determinan cómo cada persona aborda y procesa dichas situaciones. Según Kolb, para que haya un aprendizaje efectivo, idealmente deberíamos pasar por un proceso que incluye cuatro etapas:

- 1) Hacer algo, tener una experiencia concreta
- 2) Reflexionar sobre la experiencia
- 3) Obtener conclusiones o generalizaciones a través de las reflexiones
- 4) Probar en la práctica las conclusiones obtenidas.



Ilustración 2.9 Ciclo del aprendizaje experiencial de Kolb.

Nota. Representación de las cuatro etapas cíclicas necesarias para consolidar un aprendizaje efectivo. *Fuente:* Gómez Pawelek (s.f.). Recuperado de https://www.ecominga.uqam.ca/PDF/BIBLIOGRAPHIE/GUIDE_LECTURE_5/1/3.Gomez_Pawelek.pdf

A continuación, veremos con un ejemplo simple aplicado a los mantenimientos preventivos el cual es nuestro caso de estudio

2.5.1 Experiencia concreta

El aprendiz accede a un entorno de realidad virtual que simula un procedimiento de mantenimiento estructural en una aeronave Airbus A320, específicamente la inspección del revestimiento del fuselaje durante una revisión de tipo C. Utilizando visores de RV y controladores hápticos, debe identificar signos de corrosión, grietas u otras anomalías superficiales, siguiendo el procedimiento técnico establecido en el Aircraft Maintenance Manual (AMM).

El entorno incluye elementos inmersivos como herramientas virtuales (llaves, lámparas UV, medidores de espesor) y condiciones operativas realistas (ruido, iluminación reducida, posiciones incómodas). Esta experiencia concreta permite al aprendiz adquirir familiaridad con las tareas reales y desarrollar habilidades prácticas en un entorno seguro y controlado.

2.5.2 Observación reflexiva

Una vez completada la tarea, el sistema registra y reproduce el desempeño del usuario, decisiones tomadas, secuencia de acciones, uso correcto o incorrecto de herramientas, y cumplimiento del protocolo técnico. El aprendiz, junto con un instructor revisa su ejecución paso a paso, identificando aciertos y errores. Durante esta etapa, el estudiante reflexiona sobre las causas de sus fallos o dificultades (por ejemplo, una omisión en el escaneo de una zona crítica o la incorrecta identificación de una grieta), y analiza cómo esas decisiones podrían afectar la seguridad estructural de la aeronave en un contexto real.

2.5.3 Conceptualización abstracta

Tras la experiencia y la reflexión, el aprendiz recurre a los fundamentos teóricos para **comprender el porqué detrás de cada procedimiento**. Consulta el contenido técnico relacionado con fatiga estructural, procesos de corrosión, métodos de inspección no destructiva (END) y criterios de servicio del fabricante. y estudia casos reales de fallas estructurales relacionados a errores de mantenimiento.

Este proceso le permite internalizar los conceptos y principios que sustentan la tarea, diferenciando entre la simple ejecución operativa y la intervención.

2.5.4 Experimentación activa

Finalmente, el estudiante pone a prueba lo aprendido enfrentando una **nueva simulación de mantenimiento preventivo estructural**, en este caso, una inspección de larguerillos interiores de ala bajo condiciones de acceso restringido. Debe aplicar criterios de inspección adaptados, seleccionar herramientas apropiadas y tomar decisiones en tiempo real sobre si reparar, documentar o escalar la intervención.

El entorno virtual permite repetir la tarea con distintas variaciones (daños ocultos, fallas múltiples, plazos restringidos), lo que fomenta el desarrollo de habilidades adaptativas, mejora la precisión operativa y consolida la transferencia de conocimiento a contextos laborales reales.

2.6 Continuum de Realidad-Virtualidad

Para seleccionar la tecnología inmersiva más adecuada en el contexto del mantenimiento aeronáutico, es útil apoyarse en el modelo conceptual propuesto por Milgram y Kishino (1994), quienes desarrollaron el llamado "Continuum de Realidad-Virtualidad". Este continuo representa una escala que va desde los entornos completamente reales hasta aquellos enteramente virtuales, situando entre ambos extremos los sistemas de realidad aumentada (AR) y realidad mixta (MR).

Aplicado al mantenimiento aeronáutico, este marco permite analizar qué tipo de visualización resulta más adecuada según la complejidad del procedimiento.

- En mantenimientos preventivos rutinarios, como inspecciones de rutina o verificación de sistemas, puede bastar con el uso de realidad aumentada, que superpone instrucciones digitales directamente sobre la aeronave real.
- En tareas de mantenimiento estructural más complejas, como la inspección interna del fuselaje o la reparación de larguerillos, puede ser más efectivo un entorno de realidad mixta, en el cual el técnico puede interactuar con un modelo tridimensional del componente real, manipularlo virtualmente y visualizar datos ocultos (como estructuras internas) sin intervenir físicamente el avión.

En este sentido, el continuum de Milgram y Kishino no solo permite comprender el grado de inmersión tecnológica, sino también justificar pedagógica y operativamente la elección de una tecnología inmersiva en función del contexto y del tipo de intervención (Milgram & Kishino, 1994).

2.7 Evolución de la realidad virtual (RV)

2.7.1 El primer casco VR/RA (Espada de Damocles)

La historia de la realidad virtual (RV) moderna tiene sus raíces en la década de 1960, cuando Ivan Sutherland, pionero en computación gráfica, desarrolló el primer sistema de visualización tridimensional montado en la cabeza: el Head-Mounted Three-Dimensional Display, más conocido como la Espada de Damocles. Este nombre no oficial surgió por el aspecto del dispositivo, que debía ser suspendido desde el techo debido a su peso, asemejando una espada colgando sobre la cabeza del usuario. El sistema fue concebido con el objetivo de mostrar información tridimensional generada por computadora que respondiera dinámicamente al movimiento de la cabeza del usuario.

Sutherland (1968) estableció que el efecto de profundidad tridimensional se lograba principalmente gracias a lo que denominó el **“efecto cinético de profundidad” (kinetic depth effect)**: el cambio en la perspectiva de un objeto al mover la cabeza, más importante incluso que la visión estereoscópica para generar sensación de tridimensionalidad.

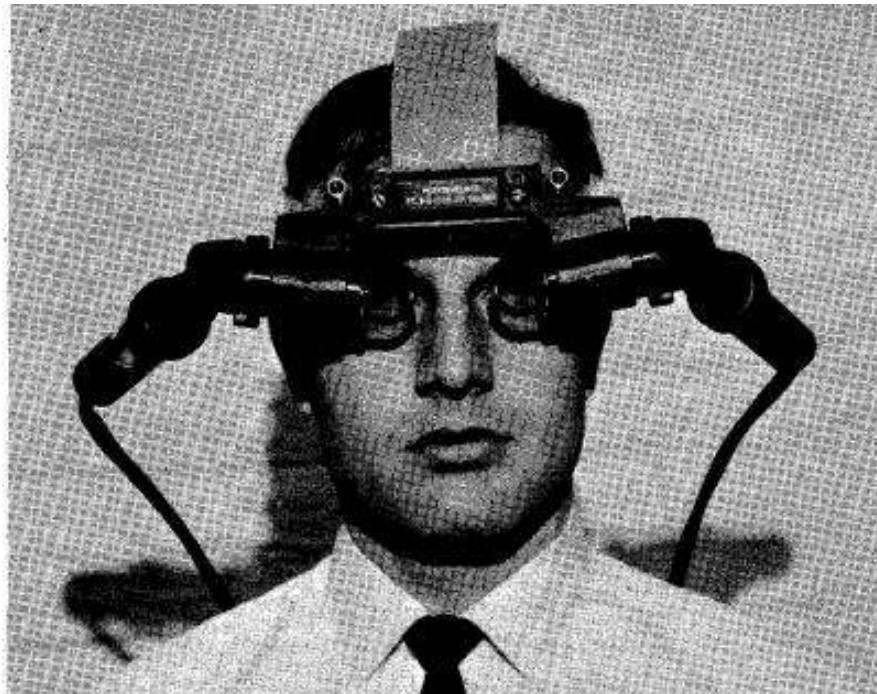


Ilustración 2.10 Sistema "Espada de Damocles", el primer dispositivo HMD de la historia.

Nota. Fotografía histórica del dispositivo de visualización tridimensional montado en la cabeza, desarrollado por Ivan Sutherland. *Fuente:* Sutherland (1968). Recuperado de <https://doi.org/10.1145/1476589.1476686>

2.7.2 La Era de la Visualización Institucional: El Sistema CAVE (1990s)

Tras décadas de desarrollo experimental, la década de 1990 marcó el inicio de la visualización inmersiva de grado institucional. En 1992, investigadores presentaron el entorno CAVE (Cave Automatic Virtual Environment). A diferencia de los incómodos visores HMD de la época, un sistema CAVE consistía en una habitación donde las paredes y el suelo actuaban como enormes pantallas de proyección estereoscópica (Cruz-Neira et al., 1992). Si bien ofrecían una inmersión superior sin aislar al usuario de su propio cuerpo, los sistemas CAVE requerían presupuestos millonarios (Alto CAPEX) y una infraestructura física dedicada inmensa, limitando su uso estrictamente a universidades de élite y simuladores militares aeronáuticos.

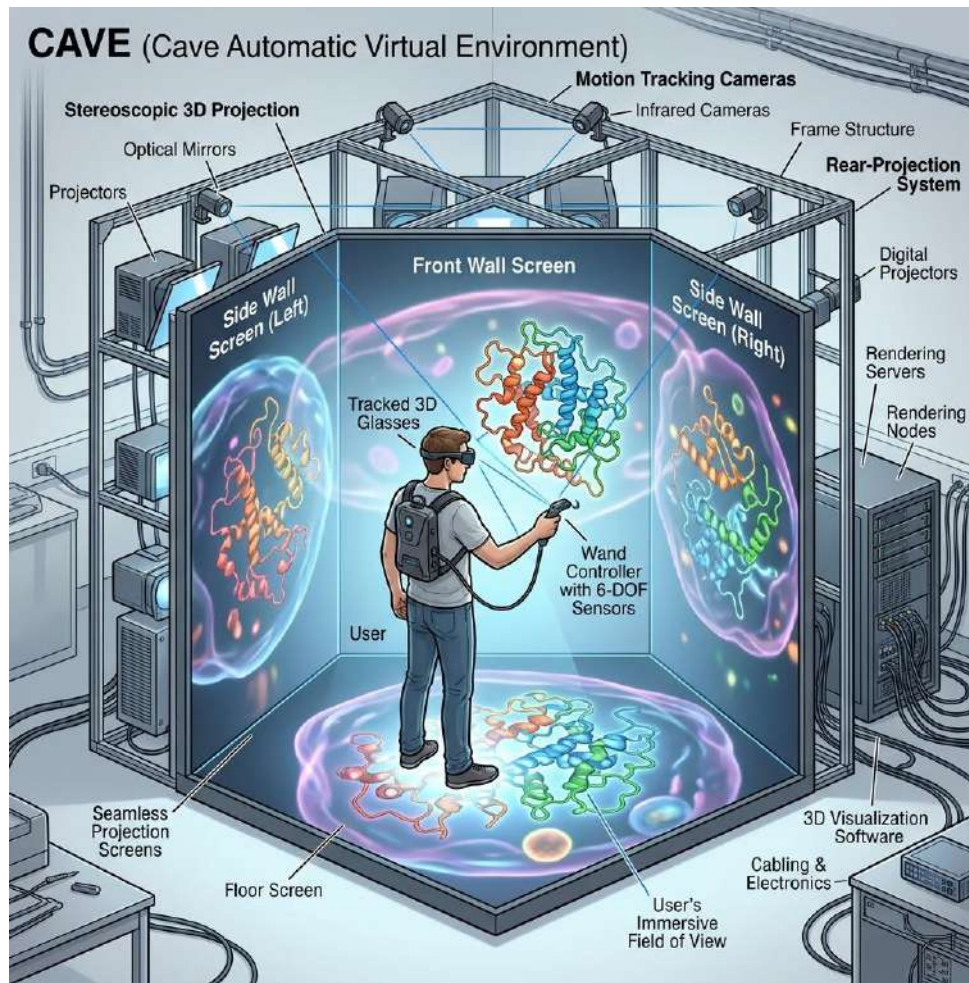


Ilustración 2.11 Arquitectura de un sistema de visualización inmersiva tipo CAVE.

Nota. Representación de un entorno CAVE (*Cave Automatic Virtual Environment*) con proyección estereoscópica sobre paredes y suelo. *Fuente:* Elaboración propia asistida por Inteligencia Artificial.

2.7.3 La Revolución del Consumidor y la RV Standalone (2010s - Actualidad)

El verdadero quiebre de paradigma que viabiliza proyectos de Mantenimiento Aeronáutico modernos ocurrió en la década de 2010. Liderado por la campaña de Oculus Rift en 2012 y su posterior adquisición por Facebook (Meta), la RV dejó de ser una tecnología de laboratorio para convertirse en un producto comercial masivo. En la transición hacia los años 2020, la industria abandonó la necesidad de depender de computadoras externas (PC-Tethered VR), dando paso a los visores 'Standalone' o todo-en-uno, como el Meta Quest (Radianti et al., 2020).

Esta democratización tecnológica redujo dramáticamente las barreras de entrada financieras. Lo que en los años 90 requería un CAVE de un millón de dólares, hoy puede lograrse con visores inalámbricos de menos de mil dólares, permitiendo que aerolíneas y organizaciones de entrenamiento como Lufthansa implementen programas de capacitación escalables para cientos de técnicos simultáneamente.



Ilustración 2.12 Visor de Realidad Virtual inmersiva de arquitectura Standalone.

Nota. Representación de un visor VR moderno e inalámbrico (*Standalone*) utilizado en programas escalables de capacitación. *Fuente:* Elaboración propia asistida por Inteligencia Artificial.

2.7.4 La Transición hacia la Realidad Mixta (MR) en MRO (Presente)

En la actualidad (2024 en adelante), la vanguardia de la industria aeroespacial no se conforma solo con la Realidad Virtual aislada, sino que transita velozmente hacia la Realidad Mixta (MR) 'Passthrough', abanderada por dispositivos como el Apple Vision Pro o el Meta Quest 3. Esta evolución permite resolver una falla fundamental del mantenimiento in situ: la ceguera espacial. Con la MR, el técnico aeronáutico puede ver el motor o el tren de aterrizaje real frente a él, mientras los manuales, tolerancias de torque (AMM) e instrucciones de inspección flotan anclados en el espacio tridimensional a su alrededor.

2.8 Marco Normativo del Personal Técnico Aeronáutico: Licencias de Mantenimiento (LMA)

2.8.1 La Pirámide Regulatoria Internacional

Las licencias de mantenimiento aeronáutico se articulan sobre una jerarquía normativa de tres niveles:

1. OACI - Anexo 1 (Nivel Global): El Anexo 1 al Convenio sobre Aviación Civil Internacional define los requisitos mínimos universales. Un técnico de mantenimiento debe tener al menos 18 años, acreditar un mínimo de 4 años de experiencia práctica, reducible a 2 años si el técnico graduó de una Organización de Entrenamiento Aprobada (ATO), y aprobar exámenes de conocimiento técnico y competencia (OACI, 2011).
2. EASA Parte 66 (Nivel Regional / Referencia Internacional): Transpone y eleva el estándar OACI a un sistema de categorías específicas (A, B1, B2, B3, C), adoptado como referencia de calidad internacional por los arrendadores (lessors) de aeronaves Airbus que operan en Chile.
3. DGAC Chile - DAR 65 / DAN 65 (Nivel Nacional): Transpone los principios OACI al marco legal chileno, estableciendo las categorías nacionales de Mecánico de Mantenimiento y Supervisor de Mantenimiento, regulando los exámenes ante el Subdepartamento de Licencias de la DGAC y la bitácora de horas prácticas (logbook).

2.8.2 Categorías de Licencia EASA Parte 66 Aplicadas al Airbus A321

Tabla 2.2 Categorías de licencia EASA Parte 66 aplicadas al CMA.

Categoría	Nombre	Alcance Principal	Relevancia A321
B1.1	Mecanico Aeronautico (Turbina)	Estructura, planta motriz CFM56/IAE V2500 y sistemas mecanico/electricos. Firma Maintenance Release de tareas individuales (EASA, 2022).	Alta
B2	Tecnico de Avionica	Sistemas Fly-by-Wire del A321: FCPC, ADIRU, comunicaciones VHF/HF/SATCOM. Troubleshooting de sistemas digitales (EASA, 2022).	Alta
C	Ingeniero Certificador de Base	Audita el paquete completo del C-Check y emite el Certificate of Release to Service (CRS) que devuelve la aeronave al servicio (EASA, 2022).	Critica

Nota. Resumen del alcance y relevancia de las licencias B1.1, B2 y C para el mantenimiento del Airbus A321. *Fuente:* Elaboración propia con base en EASA (2022).

2.8.3 Habilitaciones de Tipo (Type Ratings) para familia 320-321

Poseer una licencia B1 o B2 no autoriza por si sola a intervenir un tipo de aeronave específico. El Apéndice III de EASA Parte 66 establece que el técnico debe obtener una Habilitación de Tipo (Type Rating Endorsement) específica para cada modelo. Para el Airbus A321 con motor CFM56-5B o IAE V2500, el programa consta de:

1. Modulo Teórico (CBT / Aula): Estudio profundo de los sistemas de la aeronave según la especificación ATA. Los capítulos críticos incluyen ATA 21 (Aire Acondicionado), ATA 27 (Controles de Vuelo Fly-by-Wire), ATA 32 (Tren de Aterrizaje), ATA 36 (Sistema Neumatico), ATA 49 (APU) y ATA 71 a 80 (Planta Motriz).
2. Entrenamiento Practico Supervisado (OJT - On-the-Job Training): Ejecución supervisada de tareas reales sobre la aeronave en un taller aprobado DAN 145. Al menos el 50% de las tareas del OJT debe completarse después de la fase teórica, y el programa completo debe ejecutarse dentro de los 3 años previos a la solicitud de la habilitación (EASA, Apéndice III Parte 66).

El OJT es el cuello de botella más costoso del proceso formativo MRO. La implementación del Laboratorio de Realidad Virtual (VR) del CMA propuesto busca cubrir la fase de familiarización con los sistemas en un entorno seguro, acelerando la obtención de la habilitación y reduciendo el número de horas de OJT en aeronave real, con el consiguiente ahorro económico para el CMA.

2.8.4 Modulo 9: Factores Humanos (Human Factors)

Tanto la OACI en el Doc 10098 (2020) como la EASA Parte 66 exigen que todo técnico apruebe el Módulo 9: Human Factors antes de obtener cualquier licencia de categoría B o C. Los Factores Humanos (HF) son estadísticamente la causa raíz de mas del 70% de los accidentes relacionados con errores de mantenimiento aeronáutico (Wild, 2023).

El módulo cubre: (a) Limitaciones de percepción humana; (b) Gestión de fatiga y estrés en turnos nocturnos; (c) Comunicación técnica y trabajo en equipo; (d) Ambientes de trabajo: iluminación, ruido, temperatura en hangar; (e) Los doce errores críticos en mantenimiento, conocidos como 'The Dirty Dozen', formulados por Dupont (1993) para Transport Canada Civil Aviation.

El personal dentro de un CMA aprobado DAN 145 debe recibir entrenamiento recurrente en Factores Humanos de periodicidad mínima bienal.

2.8.5 Cursos Recurrentes Obligatorios para el Personal del CMA

Adicionalmente a la habilitación de tipo, el personal técnico debe mantener vigentes los siguientes cursos obligatorios:

Tabla 2.3 Cursos recurrentes obligatorios para el personal del CMA.

Curso	Abreviatura	Periodicidad	Autoridad Exigente
Factores Humanos	HF	Bienal	DAN 145 / EASA Parte 145
Seguridad en Tanques de Combustible	FTS	Bienal	FAA AD 1999-23-10 / EASA
Sistemas de Cableado Aeronáutico	EWIS	Bienal	FAA / EASA
Mercancías Peligrosas (DGR)	DGR	Bienal	IATA / DGAC Chile
Seguridad de Rampa y FOD	FOD/S MS	Anual	DGAC Chile

Nota. Resumen de los cursos de actualización requeridos, su periodicidad y la autoridad aeronáutica que los exige. *Fuente:* Elaboración propia.

2.9 Inspeccion No Destructiva (NDT/END) en el Mantenimiento Aeronautico

2.9.1 Definicion y Relevancia en el Contexto MRO

La Inspección No Destructiva (NDT, por sus siglas en inglés: Non-Destructive Testing), también denominada Evaluación No Destructiva (END) en español, es el conjunto de técnicas y procedimientos aplicados para examinar materiales, componentes y estructuras con el fin de detectar discontinuidades, defectos o degradaciones sin alterar ni comprometer la integridad física ni la funcionalidad del elemento inspeccionado (Hellier, 2012). En el contexto del mantenimiento aeronáutico, la NDT constituye una de las disciplinas más críticas para garantizar la aeronavegabilidad continua de una aeronave, ya que permite identificar fallas estructurales en estadios incipientes —antes de que se conviertan en eventos catastróficos— sin necesidad de desensamblar componentes ni retirar la aeronave de servicio durante períodos prolongados.

La familia Airbus A320/A321, fabricada principalmente en aleaciones de aluminio de alta resistencia (series 2XXX y 7XXX) y materiales compuestos de fibra de carbono (CFRP), presenta múltiples zonas de alta susceptibilidad a la fatiga estructural y a la corrosión. De acuerdo con el Aircraft Maintenance Manual (AMM) y el Non-Destructive Testing Manual (NTM) publicados por Airbus, las zonas de inspección prioritaria incluyen la raíz alar, el umbral de las puertas de fuselaje, los frames estructurales longitudinales, los largueros de ala y los trenes de aterrizaje (Airbus, 2024).

Estadísticamente, la FAA estima que aproximadamente el 20% de todos los eventos de mantenimiento no programados en la aviación comercial están relacionados con la detección tardía —o la no detección— de defectos estructurales que una NDT oportuna habría identificado (Wild, 2023). Este porcentaje justifica la posición central que ocupa la NDT dentro de los programas de Mantenimiento de Base (C-Check y D-Check) y subraya la necesidad de contar con personal técnico altamente capacitado en estas metodologías.

2.9.2 Principales Técnicas NDT Aplicadas al Mantenimiento del Airbus A320/A321

El programa de mantenimiento del A320/A321, en conformidad con el Maintenance Review Board Report (MRBR) y la normativa de la EASA y la DGAC, contempla el uso de múltiples métodos de inspección no destructiva según la naturaleza del componente, el tipo de defecto esperado y las condiciones de acceso físico.

El ensayo ultrasónico (Ultrasonic Testing, UT) consiste en la emisión de ondas de sonido de alta frecuencia a través del material bajo inspección; cuando estas ondas encuentran una discontinuidad interna —como una grieta o una zona de deslaminación en materiales compuestos— parte de la energía es reflejada de vuelta hacia el transductor. Su evolución más avanzada, el Ultrasonido de Arreglo de Fases (Phased Array Ultrasonic Testing, PAUT), proporciona mapas detallados de la integridad estructural en una fracción del tiempo requerido por el método convencional, mejorando significativamente la Probabilidad de Detección (PoD) de microfisuras en estructuras de aluminio aeronáutico (Ramírez-Castellanos et al., 2023).



Ilustración 2.13 Inspección estructural mediante ultrasonido de arreglo de fases (PAUT).

Nota. Técnico aeronáutico realizando un ensayo no destructivo sobre la superficie aerodinámica de una aeronave. *Fuente:* Ramírez-Castellanos et al. (2023). Recuperado de <https://sonatest.com/resources/application-notes/advanced-composite-inspection>

Las Corrientes de Eddy (Eddy Current Testing, ET) son corrientes eléctricas inducidas en materiales conductores para detectar grietas de fatiga en uniones atornilladas y zonas de alta concentración de tensiones en el fuselaje del A320. La tecnología de Arreglo de Corrientes de Eddy (ECA) permite cubrir áreas de inspección significativamente mayores en un solo barrido, reduciendo la dependencia del operador y el tiempo de inactividad de la aeronave (Eddyfi Technologies, 2023).



Ilustración 2.14 Ensayo de Corrientes de Eddy en componentes aeronáuticos.

Nota. Operador realizando una inspección de corrientes inducidas (ET) para la detección de grietas por fatiga en zonas de alta concentración de tensiones. *Fuente:* Eddyfi Technologies (2023). Recuperado de <https://www.indiamart.com/proddetail/ether-nde-eddy-current-conductivity-meter-20312949488.html>

La inspección boroscópica (Borescope Inspection) es una técnica de Inspección Visual Remota que emplea un instrumento óptico flexible para acceder al interior de cavidades de difícil acceso, como la cámara de combustión y las etapas de turbina de los motores CFM56-5B e IAE V2500, detectando daños por impacto de FOD, erosión de álabes y grietas en caliente (Olympus, 2023).



Ilustración 2.15 Inspección boroscópica en las etapas de turbina de un motor aeronáutico.

Nota. Técnico de mantenimiento ejecutando una Inspección Visual Remota (RVI) para la detección de daños internos por FOD o desgaste térmico. *Fuente:* Olympus (2023). Recuperado de <https://aviationweek.com/mro/aircraft-propulsion/aircraft-engine-overhaul-market-faces-slow-recovery>

Los Líquidos Penetrantes (Penetrant Testing, PT) aprovechan la propiedad de capilaridad para revelar discontinuidades abiertas a la superficie en componentes del tren de aterrizaje y zonas de reparación del fuselaje (Hellier, 2012). Por su parte, la Termografía Infrarroja (Infrared Thermography, IRT) detecta variaciones de temperatura superficial causadas por deslaminaciones en materiales compuestos y zonas de humedad atrapada en paneles, siendo especialmente adecuada para la evaluación de las grandes superficies de fibra de carbono (CFRP) del A320/A321 (Maldague, 2001).

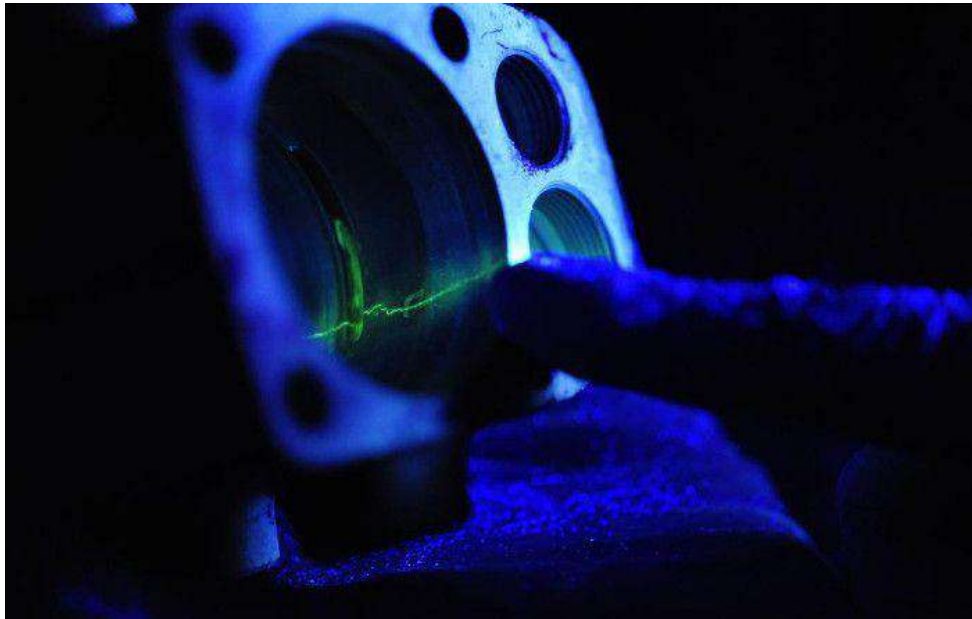


Ilustración 2.16 Inspección de componentes mediante Líquidos Penetrantes (PT).

Nota. Revelado de una discontinuidad superficial (grieta) en un componente metálico, expuesta bajo luz ultravioleta mediante la técnica de líquidos penetrantes fluorescentes. *Fuente:* Hellier (2012). Recuperado de <https://www.laboratuar.com/es/testler/ndt-testleri/sivi-penetrant-testi/>

2.9.3 La NDT Virtual: Como la Realidad Virtual y Mixta Replica estas Tecnicas

La formación práctica en NDT enfrenta una paradoja operacional fundamental: para desarrollar la competencia técnica requerida, el inspector debe acumular horas de práctica en componentes reales con defectos reales; sin embargo, el acceso a aeronaves fuera de servicio con defectos controlados y verificables es extremadamente limitado y costoso. Este problema es precisamente el que la Realidad Virtual (RV) y la Realidad Mixta (RM) pueden resolver.

En el Ultrasonido y PAUT Virtual, el técnico practica el posicionamiento del transductor sobre una réplica 3D del ala del A320, observando en tiempo real la representación simulada de la señal A-Scan o el mapa de colores del PAUT, mientras el sistema programa defectos de distintas características para entrenar al inspector en el reconocimiento de múltiples escenarios (Singh et al., 2021).

En la Boroscopia Virtual, el aprendiz manipula un controlador háptico que simula la inserción de la sonda boroscópica en el interior del motor CFM56, navegando por un modelo 3D de alta resolución de la turbina mientras el sistema programa impactos de FOD y erosión de álabes en distintas posiciones. La precisión diagnóstica de microfisuras en entorno VR alcanzó un 87,4% frente al 75,9% de los métodos convencionales en el estudio de Berthon et al. (2026), lo que evidencia la superioridad del entrenamiento inmersivo para esta técnica específica.

Mediante visores de Realidad Mixta passthrough como el Magic Leap 2, el inspector puede superponer el mapa de corrientes de Eddy sobre la superficie real del fuselaje durante el C-Check, visualizando en tiempo real las indicaciones de defectos y comparándolas con los criterios de aceptación del NTM, sin interrumpir el flujo de trabajo físico.

Esta virtualización de la NDT no solo resuelve el problema de acceso a aeronaves con defectos controlados, sino que elimina los riesgos de daño patrimonial y permite que el técnico practique escenarios de defectos raros o críticos que en condiciones reales aparecerían quizás una sola vez en toda su carrera laboral.

2.10 Factores Humanos y Error Humano en el Mantenimiento Aeronautico

2.10.1 Definición y Dimension Estadística del Error Humano en MRO

Los Factores Humanos (Human Factors, HF) en el mantenimiento aeronáutico constituyen el conjunto de variables relacionadas con las capacidades, limitaciones y características del ser humano que influyen directamente en el desempeño técnico durante las tareas de inspección, reparación y certificación de aeronaves. La OACI, en su Doc 9683 (Human Factors Training Manual), los define como el conjunto de principios que se aplican para optimizar el desempeño humano y reducir los errores, integrando el conocimiento de las ciencias del comportamiento con la ingeniería de sistemas y la gestión de la seguridad (OACI, 1998).

La magnitud del problema es estadísticamente incontestable: Wild (2023), en su estudio cuantitativo de accidentes de mantenimiento publicado en la revista *Aerospace*, establece que el error humano es el factor causal principal o contribuyente en más del 70% de todos los accidentes e incidentes relacionados con el mantenimiento de aeronaves. Esta cifra es consistente con los hallazgos del Boeing MEDA (Maintenance Error Decision Aid) y con los análisis del Aviation Safety Network para el período 2010-2023.

Lo que distingue al error en mantenimiento aeronáutico de otros entornos industriales es su latencia: a diferencia de un error de pilotaje que tiene consecuencias inmediatas, un error de mantenimiento puede permanecer latente en el sistema durante días, semanas o incluso meses antes de manifestarse como un evento de seguridad durante la operación de vuelo (Reason, 1990). Esta característica hace que la prevención del error humano en MRO sea significativamente más compleja que en otros entornos de alta fiabilidad.

2.10.2 El Modelo de los Doce Factores Críticos: The Dirty Dozen

El modelo más ampliamente adoptado por la industria aeronáutica para la identificación y gestión de los precursores del error humano en mantenimiento es el conocido como The Dirty Dozen (La Docena Sucia), desarrollado por Gordon Dupont en 1993 para Transport Canada Civil Aviation y posteriormente adoptado por la FAA, la EASA y la OACI como referencia en sus programas de Factores Humanos (Dupont, 1993).

El modelo identifica doce condiciones o estados que deterioran el desempeño humano y aumentan la probabilidad de cometer errores durante las tareas de mantenimiento. Aplicados al contexto de un C-Check sobre un Airbus A321, estos doce factores se manifiestan como: (1) Falta de comunicación: traspaso de turno incompleto, Task Cards sin firmar correctamente; (2) Complacencia: técnico experimentado que omite pasos procedimentales por exceso de confianza; (3) Falta de conocimiento: técnico sin habilitación de tipo que interviene sistemas del A321; (4) Distracción: interrupciones durante el torque de pernos críticos del tren de aterrizaje; (5) Falta de trabajo en equipo: coordinación deficiente en maniobras de jacking; (6) Fatiga: errores en turnos nocturnos durante inspecciones de larga duración; (7) Falta de recursos: herramientas calibradas no disponibles, uso de sustitutos no autorizados; (8) Presión: TAT comprometido con aerolínea exigiendo devolución adelantada de la aeronave; (9) Falta de asertividad: técnico junior que no reporta anomalía al supervisor por temor; (10) Estrés: condiciones de hangar con ruido, temperatura extrema y posturas incómodas; (11) Falta de conciencia situacional: inspector que no identifica el impacto de su tarea en la airworthiness global; y (12) Normas no seguidas: omisión de pasos del AMM por costumbre o presión de tiempo (Dupont, 1993).

La relevancia de la Realidad Virtual en este contexto es directa: el entrenamiento en entornos inmersivos libres de presión real, fatiga laboral y consecuencias patrimoniales permite al técnico practicar los procedimientos críticos del AMM en un estado cognitivo óptimo, consolidando la memoria procedimental antes de enfrentar el entorno real del hangar (Berthon et al., 2026).

2.10.3 El Modelo del Queso Suizo de Reason (1990)

James Reason, psicólogo organizacional de la Universidad de Manchester, propuso en 1990 el modelo de causalidad de accidentes más influyente en la ingeniería de seguridad contemporánea: el Modelo del Queso Suizo (Swiss Cheese Model). Este modelo representa los sistemas de defensa de una organización como rebanadas de queso suizo apiladas; cada rebanada es una barrera de seguridad —procedimientos, supervisión, certificación, inspección— y los agujeros representan las fallas o debilidades presentes en cada barrera. Un accidente ocurre cuando los agujeros de todas las capas se alinean, permitiendo que la trayectoria del fallo atraviese todas las barreras sin ser detenida (Reason, 1990).

Aplicado al mantenimiento aeronáutico, el modelo distingue entre fallas activas —errores cometidos por el personal técnico en el momento de la tarea, como el olvido de una herramienta dentro del motor o la conexión incorrecta de un pin en el sistema Fly-by-Wire— y fallas latentes, es decir, condiciones organizacionales previas que facilitan el error: mala iluminación del hangar, procedimientos AMM ambiguos, ausencia de doble verificación o entrenamiento insuficiente.

El modelo de Reason justifica el enfoque sistémico del entrenamiento inmersivo propuesto en esta memoria: la RV no solo entrena la habilidad técnica individual —reduciendo las fallas activas—, sino que también puede sensibilizar al técnico respecto a las condiciones organizacionales que crean fallas latentes, mediante la simulación de escenarios adversos del hangar en un entorno seguro y controlado (Reason, 1990).

2.10.4 Como la Realidad Virtual Mitiga los Factores Humanos en MRO

La evidencia empírica disponible permite establecer un vínculo directo entre el entrenamiento en Realidad Virtual y la mitigación de los factores humanos más prevalentes en el mantenimiento aeronáutico.

En cuanto a la reducción de la falta de conocimiento y la complacencia, Lee et al. (2022) demostraron que los técnicos entrenados mediante sistemas VR obtuvieron puntuaciones significativamente superiores tanto en pruebas de adquisición de conocimiento como en pruebas de retención, en comparación con grupos entrenados mediante video o métodos tradicionales. La naturaleza interactiva del entorno inmersivo fuerza al aprendiz a aplicar activamente el conocimiento, previniendo la comprensión superficial que caracteriza al aprendizaje pasivo.

Respecto a la reducción de la distracción, el estudio de PwC (2022) evidenció que los aprendices en entornos VR fueron hasta cuatro veces menos interrumpidos que sus pares en aprendizaje online, y 1,5 veces menos que en aulas presenciales. En el contexto del hangar, donde la distracción puede tener consecuencias catastróficas, esta capacidad de la RV para generar estados sostenidos de concentración es de alto valor preventivo.

El estudio de Berthon et al. (2026), que aplicó el cuestionario estandarizado NASA-TLX (Task Load Index) a técnicos de mantenimiento aeronáutico, demostró que los factores de Frustración y Demanda Mental son estadísticamente inferiores cuando el técnico entrena en RV respecto a las condiciones reales de hangar. Adicionalmente, la medición de la Variabilidad de la Frecuencia Cardíaca confirma que el entrenamiento en RV mantiene al técnico en un estado fisiológico de relajación, maximizando la capacidad de absorción neuronal sin el bloqueo cognitivo producido por el estrés (Hart y Staveland, 1988; Berthon et al., 2026).

Mediante la simulación de escenarios completos de C-Check, la RV desarrolla además la conciencia situacional global del proceso, permitiendo al aprendiz comprender cómo su tarea individual se integra en el sistema de airworthiness de la aeronave, atendiendo directamente al factor 11 del Dirty Dozen de Dupont (1993).

2.11 Marco Legal y Normativo: Estado Regulatorio de las Tecnologías XR en Chile

En este contexto, la implementación del Laboratorio VR actúa como una contramedida directa y sistémica contra la 'Docena Sucia' (Dirty Dozen) de los errores humanos en mantenimiento aeronáutico identificados por Gordon Dupont (1993). Específicamente, el entrenamiento inmersivo mitiga tres de sus factores más críticos:

1. La Falta de Conocimiento, al permitir una repetición ilimitada de tareas complejas hasta lograr la maestría.
2. El Estrés, ya que el alumno practica libre de presiones operativas (validado por biometría HRV).
3. La Falta de Conciencia Situacional, pues el entorno virtual obliga al técnico a interactuar espacialmente con la aeronave.

2.11.1 Diagnóstico de la Situación Regulatoria Actual en Chile

La introducción de tecnologías de Realidad Virtual (RV), Realidad Aumentada (RA) y Realidad Mixta (RM) en los programas de entrenamiento de mantenimiento aeronáutico en Chile se enfrenta a un vacío normativo explícito a nivel nacional. A diferencia de la Unión Europea —que ya cuenta con un marco regulatorio formal— y de los Estados Unidos —que opera con aprobaciones caso a caso—, la normativa chilena vigente a 2026 no contempla de manera directa el uso de tecnologías XR como medio de instrucción certificable para técnicos de mantenimiento aeronáutico.

Las normas DGAC directamente aplicables son: la DAN 65 / DAR 65, que regula las licencias del personal aeronáutico de mantenimiento y exige horas de experiencia práctica acreditables en bitácora (logbook) que actualmente solo pueden provenir de aeronave real dentro de una OMA aprobada, sin que exista mecanismo alguno para registrar horas de instrucción VR en dicha bitácora; la DAN 145, que regula los Centros de Mantenimiento Aeronáutico y obliga a los CMA a mantener programas de instrucción continua en el Manual de Procedimientos de Mantenimiento (MPM), cuya Circular de Asesoramiento CA 145.002 no hace referencia a entornos virtuales; y la DAN 147, que regula los Centros de Instrucción y Entrenamiento de Personal Aeronáutico de Mantenimiento, igualmente sin mencionar la RV.

Sin embargo, es fundamental precisar que este vacío no equivale a una prohibición. La normativa chilena opera bajo un principio de neutralidad tecnológica: lo que no está explícitamente prohibido puede ser implementado, siempre que el operador demuestre ante la DGAC que el método alternativo logra los mismos objetivos de aprendizaje y estándares de competencia exigidos por la norma (OACI, 2020).

2.11.1.1 Análisis de la DAN 65 y DAR 65: Licencias de Mantenimiento Aeronáutico

La Dirección General de Aeronáutica Civil de Chile regula las licencias del personal de mantenimiento aeronáutico mediante dos instrumentos complementarios: la DAR 65 (Decreto Supremo que establece el marco jurídico de fondo) y la DAN 65 (Norma Técnica Aeronáutica que detalla los requisitos administrativos, teóricos y prácticos). El análisis literal de sus artículos más relevantes revela incompatibilidades estructurales con el uso de tecnologías XR como medio de instrucción certificable.

En materia de definiciones, la DAR 65, Artículo 65.2, establece: "Para los efectos de este reglamento, se entenderá por Experiencia práctica: el período de tiempo en que el solicitante ha desempeñado, en forma continua o discontinua, tareas de mantenimiento aeronáutico en una Organización de Mantenimiento Aprobada (OMA), bajo la supervisión directa de un mecánico o supervisor de mantenimiento habilitado" (DGAC Chile, DAR 65, vigente 2024).

Respecto de los requisitos de horas, la DAN 65, Artículo 65.7.1, dispone: "El solicitante de licencia de Mecánico de Mantenimiento deberá acreditar experiencia práctica en una OMA aprobada conforme a la DAN 145 o DAR 145, no inferior a: (a) 12 meses, para quienes acrediten título de técnico de nivel superior en una especialidad aeronáutica reconocida por la DGAC; (b) 18 meses, para egresados de enseñanza media técnico-profesional en especialidad aeronáutica; (c) 24 meses, para quienes no cuenten con formación técnica aeronáutica formal previa" (DGAC Chile, DAN 65, vigente 2024).

Finalmente, en materia de registro, la DAN 65, Artículo 65.7.2, prescribe: "La experiencia práctica deberá estar debidamente registrada en bitácora personal del técnico, la cual deberá contener: matrícula de la aeronave intervenida, fecha de ejecución, descripción de la tarea ejecutada según referencia al AMM, tiempo invertido en horas y firma del supervisor habilitado que certifica la tarea" (DGAC Chile, DAN 65, vigente 2024).

Del análisis literal de estos artículos se identifican tres falencias directas frente al uso de tecnologías XR: Primera, la definición de "experiencia práctica" del DAR 65 exige que la actividad se desarrolle en una OMA —centro físico aprobado por la DGAC—. Ningún entorno virtual puede ser calificado legalmente como OMA bajo la normativa vigente; las horas acumuladas en módulos VR son, de iure, inexistentes para efectos de la licencia.

Segunda, el artículo 65.7.2 exige el registro obligatorio de la "matrícula de la aeronave intervenida", requisito incompatible por definición con una aeronave virtual que carece de matrícula. No existe mecanismo legal en la DAN 65 para registrar horas de instrucción en RV en el expediente del técnico. Tercera, a diferencia de la normativa EASA (Part 66, AMC1 66.A.30(e)), que permite la reducción de hasta el 50% del tiempo de OJT mediante dispositivos de entrenamiento de mantenimiento (MTD) aprobados, la DAN 65 no contempla ningún mecanismo equivalente (EASA, 2024).

2.11.1.2 Análisis de la DAN 145: Centros de Mantenimiento Aeronáutico

La DAN 145 regula los Centros de Mantenimiento Aeronáutico (CMA) y establece en su Artículo 145.109 los requisitos de capacitación del personal técnico. El texto literal de los artículos más relevantes es el siguiente.

El Artículo 145.109.1 dispone: "El Centro de Mantenimiento deberá establecer un programa de capacitación (instrucción y entrenamiento) aceptado por la DGAC, que garantice que el personal de mantenimiento adquiere y mantiene las competencias requeridas para las tareas técnicas que le han sido asignadas" (DGAC Chile, DAN 145, vigente 2024).

El Artículo 145.109.2 señala: "El programa de capacitación deberá consistir en instrucción inicial y recurrente en un ciclo que no supere los cuatro (4) años" (DGAC Chile, DAN 145, vigente 2024).

El Artículo 145.109.3, sobre los ejecutores autorizados del programa, establece: "El programa podrá ser ejecutado por el propio CMA (de conformidad con el Apéndice H de esta norma) o contratado con: (a) El fabricante del producto aeronáutico; (b) Un centro de capacitación autorizado por el fabricante; (c) Un Centro de Instrucción y Entrenamiento Aeronáutico (CIAC/CEAC) reconocido por la DGAC; (d) Otros organismos aceptables para la DGAC" (DGAC Chile, DAN 145, vigente 2024).

El Artículo 145.109.4, en materia de medios de instrucción, prescribe: "Las ayudas de instrucción y materiales de enseñanza utilizados deben ser descritos en el Manual de Procedimientos de Mantenimiento (MPM) del CMA y aprobados por la DGAC antes de su implementación" (DGAC Chile, DAN 145, vigente 2024).

Del análisis de estas disposiciones se identifican las siguientes brechas frente al uso de tecnologías XR: Primera, el artículo 145.109.3(d) menciona "otros organismos aceptables para la DGAC" como fuente válida de capacitación. Esta disposición podría, en teoría, ser la puerta de entrada para proveedores de plataformas XR (como CAE, Luminous XR o Mass Virtual). Sin embargo, al carecer de definición explícita y criterios objetivos, su uso queda sujeto a la discrecionalidad de la DGAC caso a caso, sin un proceso estándar establecido que otorgue certeza jurídica al CMA. Segunda, el concepto de "ayudas de instrucción" del artículo 145.109.4 no está definido en la norma. La DGAC puede interpretarlo de forma restrictiva —excluyendo dispositivos XR— o expansiva, pero en ausencia de definición oficial, cualquier CMA que desee incorporar RV a su Manual de Procedimientos de Mantenimiento (MPM) enfrenta incertidumbre jurídica total respecto a si la DGAC aprobará la enmienda. Tercera, el Apéndice H de la DAN 145 (que regula el programa de instrucción propio del CMA) no menciona entornos virtuales, simuladores de procedimientos ni Dispositivos de Entrenamiento Sintético (DES), en marcado contraste con el AMC1 145.A.30(e) de la EASA, que define y valida explícitamente los "Synthetic Training Devices" (STD) como equipamiento válido de instrucción (EASA, 2024).

2.11.1.3 Análisis de la DAN 147: Centros de Instrucción y Entrenamiento

La DAN 147 (Enmienda 2, Resolución N 04/3/0084/0992, 18 de mayo de 2023) regula los Centros de Instrucción y Entrenamiento de Personal Aeronáutico de Mantenimiento. Esta norma constituye la brecha más crítica identificada en este análisis, dado que fue enmendada en mayo de 2023 —el mismo mes en que la EASA publicó su ED Decision 2023/019/R incorporando explícitamente las tecnologías XR en su Part-147— sin incorporar ninguna referencia a Dispositivos de Entrenamiento Sintético, Aeronaves Virtuales ni tecnologías de Realidad Extendida.

El Artículo 147.A.115(a) sobre instalaciones de instrucción establece: "El Centro de Instrucción deberá disponer de instalaciones físicas adecuadas para los módulos de instrucción teórica y práctica, que incluyan: (1) Aulas equipadas con los medios de instrucción necesarios para impartir los módulos del programa aprobado; (2) Talleres de práctica con herramientas, equipos y componentes o aeronaves de instrucción representativos de los tipos sobre los cuales se otorgará instrucción; (3) Biblioteca técnica accesible al personal docente y a los alumnos, que contenga manuales, publicaciones técnicas y normativa aplicable vigente" (DGAC Chile, DAN 147, Enmienda 2, 2023).

El Artículo 147.A.130(a) sobre procedimientos de instrucción prescribe: "El centro deberá establecer procedimientos de instrucción para garantizar que el programa aprobado sea impartido de manera estandarizada y consistente, utilizando métodos y medios de instrucción adecuados" (DGAC Chile, DAN 147, Enmienda 2, 2023).

Del análisis de estas disposiciones se identifican las siguientes brechas: Primera, el artículo 147.A.115(a)(2) exige físicamente "talleres de práctica con herramientas, equipos y componentes o aeronaves de instrucción". Esta exigencia de infraestructura física excluye de pleno derecho los módulos XR como sustitutos o complementos válidos de los talleres físicos, a menos que la DGAC emita una Circular de Asesoramiento específica que los equipare. Segunda, el artículo 147.A.130(a) menciona "métodos y medios de instrucción adecuados" sin definir el concepto de "adecuado". A diferencia del AMC1 147.A.130(a) de la EASA (enmendado en 2023), que definió el término "Synthetic Training Device" y establece los requisitos para su uso, la DAN 147 carece de Métodos Aceptables de

Cumplimiento (MAC) equivalentes. Tercera, la EASA define en su Guidance Material tres categorías de entornos virtuales válidos para instrucción —Aula Virtual, Aeronave Virtual y STD—, establece sus limitaciones de uso (exclusión de habilidades manuales básicas como cableado, remachado y soldadura) y fija requisitos de trazabilidad del aprendizaje. Nada de esto existe en la DAN 147 chilena, pese a la oportunidad que representó la Enmienda 2 de 2023 para incorporarlo (EASA, 2023; DGAC Chile, DAN 147, 2023).

2.11.2 Marco OACI: Principio de Neutralidad Tecnológica y CBTA

El Convenio de Chicago (1944), en su Artículo 37, establece la obligación de los Estados contratantes de adoptar estándares internacionales para el personal aeronáutico. Chile, como Estado miembro de la OACI, debe alinear su normativa nacional con los Anexos y documentos de procedimientos de la Organización. El OACI Anexo 1 (Licencias al Personal, 12.ª edición, 2011) no prohíbe el uso de simuladores o entornos virtuales para la acumulación de horas de instrucción, dejando esta determinación a discreción de las autoridades aeronáuticas nacionales.

El OACI Doc 9868 (PANS-TRG) establece el marco de Entrenamiento Basado en Competencias (CBTA — Competency-Based Training and Assessment). El enfoque CBTA es metodológicamente compatible con el entrenamiento en RV, ya que evalúa el logro de competencias demostrables independientemente del medio empleado para alcanzarlas: lo relevante es que el técnico demuestre la competencia, no el método específico de instrucción (OACI, 2020). El OACI Doc 10098 (Manual de Instrucción del Personal de Mantenimiento, 2020) contempla la posibilidad de incorporar entrenadores sintéticos y materiales de instrucción asistidos por computadora (CBT), categoría dentro de la cual los entornos VR pueden inscribirse válidamente.

2.11.3 Referencia EASA: El Marco Regulatorio Mas Avanzado

La Agencia de Seguridad Aérea de la Unión Europea (EASA) representa el referente internacional más avanzado en la regulación del uso de tecnologías XR para el entrenamiento de mantenimiento aeronáutico. En su versión enmendada del Reglamento (UE) N.º 1321/2014 — Parte 147 (Organizaciones de Instrucción de Mantenimiento), la EASA incorporó explícitamente el uso de RV y RA como medios válidos de instrucción bajo el estándar AMC 1 147.A.130(a) (Acceptable Means of Compliance). Conforme a este instrumento: los módulos VR pueden otorgar crédito válido para la instrucción teórica y procedimental; la RV es reconocida como medio legítimo para la preparación previa al entrenamiento práctico en aeronave real (OJT), mejorando la eficiencia y reduciendo el tiempo de práctica necesario en aeronave física; las organizaciones deben demostrar que sus módulos VR cumplen los objetivos de aprendizaje definidos y entregar evidencia de cumplimiento a la autoridad competente; y la Tabla 3 del AMC 1 147.A.130(a) clasifica las tareas de mantenimiento según el nivel de inmersión XR adecuado: RV para familiarización y procedimientos, RM para intervenciones guiadas en aeronave real (EASA, 2024).

2.11.4 Síntesis Comparativa del Diagnostico Regulatorio: Chile en el Espectro Global

El análisis comparativo de los marcos regulatorios internacionales y nacional permite establecer con precisión la posición de Chile en el espectro regulatorio global respecto al uso de tecnologías XR en el entrenamiento de mantenimiento aeronáutico. La EASA representó el estándar más avanzado al emitir la ED Decision 2023/019/R, mediante la cual enmendó el AMC1 147.A.130(a) para definir explícitamente el "Synthetic Training Device" (STD), el "Aula Virtual" y la "Aeronave Virtual" como medios válidos de instrucción, establecer el crédito de hasta el 50% de las horas del módulo teórico del OJT mediante STD aprobados, fijar una lista taxativa de habilidades manuales que no pueden ser sustituidas por XR (cableado eléctrico EWIS, remachado estructural, soldadura, torque con llave dinamométrica calibrada y aplicación de sellantes en zona estructural), y exigir que las actividades en entornos virtuales sean trazables mediante un LMS integrado con el Maintenance Training Organisation Exposition (MTOE) del centro (EASA, 2023).

La FAA, por su parte, reformó el 14 CFR Part 147 en 2022 adoptando un modelo de regulación basada en resultados (outcome-based regulation): en lugar de prescribir el equipamiento específico de los centros de instrucción, la norma exige que el currículo se alinee con los Mechanic Airman Certification Standards (ACS) y que el centro demuestre que sus métodos —incluida la RV— producen los resultados de aprendizaje esperados. Esto permite la integración de VR sin necesidad de una aprobación formal previa, siempre que el centro pueda demostrar la alineación curricular ante su FSDO (FAA, 2022; FAA, 2023).

La DGAC Chile, como ha quedado demostrado en las secciones precedentes, no ha incorporado ninguna de estas actualizaciones a su normativa vigente. La Enmienda 2 de la DAN 147 (mayo 2023) y las versiones vigentes de la DAN 65 y DAN 145 mantienen un silencio normativo absoluto respecto a las tecnologías XR, lo que no solo genera incertidumbre jurídica para los operadores, sino que impide el reconocimiento formal de horas de instrucción virtual en la bitácora del técnico y bloquea la acreditación de centros de instrucción que deseen incorporar estas tecnologías a sus programas aprobados. En términos comparativos, Chile ocupa la posición más rezagada del espectro regulatorio: mientras EASA tiene regulación expresa y FAA tiene flexibilidad regulatoria, Chile tiene un vacío normativo que, paradójicamente, no prohíbe la tecnología pero tampoco provee el marco legal para su uso certificable (DGAC Chile, 2023; EASA, 2023; FAA, 2023).

2.11.5 Referencia FAA: Aprobación Caso a Caso y Comparativa

La FAA no cuenta con una Circular de Asesoramiento (AC) específicamente dedicada a la aprobación de RV para técnicos AMT. Sin embargo, bajo el 14 CFR Parte 147, permite la integración de tecnologías VR en currículos ya aprobados, evaluando su eficacia en función del cumplimiento de los Mechanic Airman Certification Standards (ACS). Operadores como Envoy Air han obtenido aprobación FAA para incorporar VR/AR en sus Programas de Entrenamiento de Calificación Avanzada (Advanced Qualification Program, AQP) (FAA, 2023). La Aviation Technician Education Council (ATEC) ha formalizado alianzas con proveedores de RV especializados para desarrollar suites de entrenamiento alineadas con los currículos FAA Parte 147, evidenciando una aceptación regulatoria de facto que aún no se ha plasmado en normativa escrita específica.

En síntesis, mientras la EASA ha desarrollado el marco regulatorio más completo y explícito para el uso de RV en entrenamiento MRO, la FAA opera con un modelo de aprobación caso a caso sin prohibición general, y la DGAC Chile presenta un vacío normativo que no prohíbe la tecnología pero tampoco la regula ni define mecanismos de acreditación. Este es precisamente el espacio donde las propuestas normativas de esta memoria cobran relevancia estratégica.

3. Capítulo (III)

Este capítulo detalla la metodología aplicada y el desarrollo íntegro de la propuesta. Se presenta el diagnóstico operacional del modelo de instrucción actual, el diseño de la arquitectura tecnológica del laboratorio inmersivo, el análisis de la brecha regulatoria con su correspondiente propuesta normativa para la DGAC, y la evaluación financiera que demuestra la viabilidad económica del proyecto mediante un Flujo de Caja Libre proyectado a 5 años con análisis de sensibilidad.

3.1 Fases de la Propuesta Metodológica

La presente propuesta metodológica tiene como finalidad estructurar el desarrollo de la investigación mediante un enfoque sistemático y aplicado. El objetivo es evaluar la factibilidad técnica y económica de implementar un Laboratorio de Entrenamiento Inmersivo (Realidad Virtual y Aumentada) al interior de un Centro de Mantenimiento Aeronáutico (CMA) ya existente en Chile. Este ecosistema tecnológico estará diseñado para estandarizar y optimizar la capacitación técnica del personal encargado de ejecutar mantenimientos preventivos y estructurales en la flota Airbus A320, operando como un habilitador estratégico para reducir la carga cognitiva, minimizar el error humano y maximizar la eficiencia operativa del MRO.

Para lograr esto, la investigación se dividirá en cuatro fases secuenciales:

3.1.1 Fase 1: Diagnóstico Operacional y Levantamiento de Datos (Situación As-Is)

Esta fase busca establecer la línea base de los procesos de entrenamiento y gestión del talento humano en el Centro de Mantenimiento Aeronáutico (MRO) actual, cuantificando los puntos críticos que justifican la adopción de nuevas tecnologías.

Mapeo de Procesos Actuales: Identificación detallada de las metodologías vigentes (cómo, dónde y quién imparte la instrucción) para capacitar a los técnicos en mantenimientos de línea, preventivos y estructurales.

Análisis de Costos de Entrenamiento Tradicional: Cuantificación de los gastos asociados a la formación clásica, incluyendo horas-instructor, uso de materiales reales, y el costo de oportunidad por la dependencia del acceso a aeronaves que ya se encuentran en estado AOG (Aircraft on Ground) por mantenimiento programado, cuya disponibilidad para instrucción práctica es limitada e impredecible.

Detección de Brechas de Capacitación: Evaluación de las limitaciones de los métodos tradicionales (manuales 2D o presentaciones teóricas) y su impacto directo en la carga cognitiva, retención del aprendizaje y posibles incidentes o demoras operativas por factor humano.

3.1.2 Fase 2: Estudio de Factibilidad para Integración VR en MRO Existente (Situación To-Be)

En esta etapa se definirán los parámetros tecnológicos, regulatorios y físicos necesarios para la implementación de un Laboratorio de Entrenamiento Inmersivo dentro de las instalaciones del centro de mantenimiento.

- **Definición del Alcance Técnico:** Delimitación de las tareas de mantenimiento específicas que serán virtualizadas inicialmente para el entrenamiento (ej. inspecciones estructurales, rutinas críticas de línea o procedimientos de alta complejidad en la flota A320), estableciendo el hardware (visores) y software necesarios.
- **Análisis Regulatorio y de Certificación:** Revisión de los estándares exigidos por la Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC) y la normativa DAN 145 aplicable a la instrucción técnica, garantizando que las horas de entrenamiento en el entorno virtual sean certificables y válidas para las competencias del personal aeronáutico.
- **Evaluación de Infraestructura Tecnológica:** Estimación de los requerimientos físicos a nivel de laboratorio (espacio libre de obstáculos, estaciones de carga, servidores locales o en la nube) y la proyección de costos (CAPEX) asociados exclusivamente a la adquisición del ecosistema inmersivo, descartando gastos de infraestructura civil pesada.

3.1.3 Fase 3: Diseño del Modelo de Entrenamiento Inmersivo

Esta fase constituye el núcleo tecnológico de la investigación, vinculando la teoría educativa con la operación aeronáutica.

- **Selección de Tareas Críticas:** Identificación de los procedimientos de mantenimiento preventivo y estructural más propensos a errores humanos para su virtualización.
- **Integración del Ciclo de Kolb:** Estructuración de los módulos de entrenamiento virtual basándose en las cuatro etapas del aprendizaje experiencial de David Kolb: experiencia concreta, observación reflexiva, conceptualización abstracta y experimentación activa.
- **Asignación Tecnológica:** Determinación del grado de inmersión requerido para cada tarea según el Continuum de Realidad-Virtualidad de Milgram y Kishino (ej. Realidad Virtual para familiarización inicial y Realidad Aumentada para asistencia in situ).

3.1.4 Fase 4: Evaluación de Impacto Integral y Viabilidad del Proyecto

La fase final medirá los resultados esperados de la implementación, validando el aporte real a la industria y a la sociedad.

- **Medición de Impacto Operacional:** Proyección de la mejora en indicadores de desempeño, tales como la reducción de tiempos de ejecución y la minimización de errores post-mantenimiento.
- **Análisis de Impacto Económico:** Elaboración de un análisis de costo-beneficio que compare los gastos del modelo actual de entrenamiento tradicional frente a los costos de implementación del Laboratorio VR, incorporando el ahorro sustancial derivado del uso de simuladores inmersivos en lugar de retirar aeronaves físicas de su operación comercial.
- **Impacto Sostenible y ODS:** Vinculación de los resultados del proyecto con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la ONU, destacando el aporte a la educación técnica de calidad y la innovación industrial.

3.2 Diagnóstico Operacional y Dimensionamiento del Espacio Virtual

3.2.1 Requerimientos Operacionales para el Laboratorio VR (Operadores aéreos de la región AMB)

La integración de un Laboratorio de Entrenamiento Inmersivo (VR/AR) al interior de un Centro de Mantenimiento Aeronáutico (CMA) ya establecido en el Aeropuerto Internacional Arturo Merino Benítez (SCEL), exige una evaluación rigurosa de los requerimientos operativos y tecnológicos. La habilitación de este espacio no requiere la construcción de nueva infraestructura civil pesada ni hangares, sino la adaptación estratégica de salas de instrucción existentes para albergar el ecosistema digital. Este laboratorio constituirá la base física y tecnológica donde convergerán los instructores, los técnicos en formación y las plataformas de simulación inmersiva propuestas en esta investigación.

3.2.2 Identificación de Métricas Críticas y Tiempos Operacionales

Para fundamentar el uso del laboratorio VR/AR, se establecerán las siguientes métricas de evaluación operacional:

- **Selección de Tareas Críticas:** Tareas con alta frecuencia de ejecución, alta tasa de error humano o alto impacto económico en caso de fallo.
- **Tiempos Operacionales Actuales:** Tiempos de formación (teórica vs. práctica), tiempo de ejecución por técnicos novatos vs. experimentados, y el tiempo efectivo de acceso a aeronaves en estado AOG por mantenimiento que pueden ser aprovechadas simultáneamente para instrucción técnica supervisada.
- **Métricas de Calidad y Confiabilidad:** Porcentaje de retrabajo (*rework*) y demoras operativas causadas por falta de familiarización previa con el componente.
- **Estructura de Costos Actual:** Costo de enviar técnicos a centros de instrucción externos (viáticos, estadías, certificaciones) y el costo de oportunidad operativo por destinar tiempo de técnicos experimentados a la supervisión de aprendices durante ventanas AOG de mantenimiento

La eficacia de este paradigma inmersivo ha sido demostrada empíricamente. En un estudio aplicado a la inspección de aeronaves (Wu & Vu, 2022), se evaluó a una muestra de 26 estudiantes sometidos a entrenamiento con visores HTC VIVE Pro. Utilizando la

metodología de evaluación pre-test y post-test, y analizando los datos mediante IBM SPSS y análisis de Varianza de Cronbach ($\alpha > 0.8$), los resultados demostraron una mejora estadísticamente significativa ($p < 0.05$) en todas las competencias cognitivas evaluadas: organización de problemas, análisis crítico, capacidad deductiva, resolución de fallas y trabajo en equipo.

Tabla 3.1 Resultados de la evaluación de competencias cognitivas post-entrenamiento en Realidad Virtual.

Questionnaire Groups	Pre-Test	Post-Test
Problem Organization	3.62	4.14
Problem Analysis Ability	3.44	4.14
Problem Comment Ability	3.75	4.11
Problem Solving Ability	3.70	4.13
Teamwork	3.95	4.20
Average	3.69	4.14

Nota. Comparación de puntajes promedio (Pre-Test vs Post-Test) obtenidos por los estudiantes en competencias analíticas y de resolución de problemas. *Fuente:* Wu & Vu (2022).

A partir de la revisión de literatura especializada y estudios comparativos recientes de la industria aeronáutica (tales como reportes de EASA y estadísticas de simulación de MassVirtual), se ha estructurado la siguiente tabla comparativa que consolida el impacto cuantitativo de la Realidad Virtual frente al adiestramiento tradicional:

Tabla 3.2 Cuadro comparativo de desempeño: Método Tradicional vs. Entrenamiento Inmersivo.

Métrica de Desempeño	Entrenamiento Tradicional (Hangar)	Entrenamiento Inmersivo (VR)	Impacto General
Tiempo de Ejecución	100% (Tiempo base)	62% - 75% del tiempo base	Reducción del 25% al 38%
Tasa de Errores Críticos	Media histórica del CMA	Reducción dramática en simulación	Reducción del 50% en incidentes
Retención de Conocimiento	30% - 50% (Lectura manuales)	75% - 80% (Memoria muscular)	Incremento de 50 puntos %

Riesgo a Activos Físicos	Alto (Riesgo real de daño)	Nulo (Entorno digital seguro)	Eliminación total del riesgo
--------------------------	----------------------------	-------------------------------	------------------------------

Nota. Comparación de métricas clave de desempeño y riesgo, evidenciando las mejoras operativas del uso de Realidad Virtual frente al entorno físico de hangar. Fuente: Elaboración propia.

3.3 Evaluación Financiera y Ahorro VR

3.3.1 Retorno de Inversión (ROI) y *Payback Period* del Ecosistema VR

Para justificar financieramente la implementación del Laboratorio de Entrenamiento Inmersivo dentro del CMA, se ha dimensionado un Gasto de Capital (CAPEX).

enfocado exclusivamente en hardware de grado empresarial, licenciamiento de software y acondicionamiento físico de la sala.

Se estima una Inversión Inicial (CAPEX) referencial de USD \$75.000

(equivalente a \$71.250.000 CLP al tipo de cambio de \$950 CLP/USD),

desglosada en:

- Hardware VR/MR (15 visores empresariales, servidor gráfico, tablets y accesorios): USD \$28.000
- Licenciamiento de plataforma XR y desarrollo de módulos A321 personalizados: USD \$35.000
- Acondicionamiento de sala de instrucción (WiFi 6E, cableado eléctrico, mobiliario técnico y sensores de tracking): USD \$12.000

(Los supuestos macroeconómicos y operacionales completos se detallan en el Anexo N°1: Supuestos Económicos).

(El detalle de los parámetros operacionales del proyecto se presenta en el Anexo N°2: Parámetros Operacionales).

El desglose unitario de la inversión inicial se presenta en el Anexo N°3 y 4: Detalle de Inversión Inicial (CAPEX) y Gastos Operativos (OPEX).

Ecuación 1: Ahorro Operativo Anual (AOA)

El beneficio neto anual no se calcula por venta de servicios, sino por el **ahorro directo** al MRO. Esto incluye la reducción de costos en viáticos por entrenamientos externos (aprox. 50 técnicos al año) y la eliminación de la dependencia operativa de aeronaves en estado AOG para la instrucción práctica, liberando esas ventanas de mantenimiento para tareas

productivas y reduciendo los retrasos en la reincorporación de la aeronave al servicio comercial.

Ahorro por eliminación de viáticos y cursos de capacitación externos (40 técnicos x USD \$800/técnico): USD \$32.000/Año

50 técnicos al año es la dotación total del CMA, pero no todos requieren capacitación externa anualmente. Un MRO mediano en el Aeropuerto Arturo Merino Benítez tiene una rotación de instrucción recurrente de aproximadamente el 80% de su dotación. Los USD \$800 son el costo promedio real de un curso de recurrencia en Chile (viáticos internos + materiales), excluyendo certificaciones internacionales que se realizan solo cada 2 años.

Ahorro por optimización de ventanas de mantenimiento: al reemplazar el entrenamiento en aeronave real por simulación VR, se eliminan las interferencias operativas durante los C-Checks programados. Se estima que la instrucción práctica en hangar genera interferencias equivalentes a **2 ventanas de mantenimiento al año**, cuyo costo de oportunidad para un MRO mediano se estima en **USD**

\$15.000 por interferencia (equivalente a un retraso en la reentrega de la aeronave de aproximadamente 4 horas de trabajo productivo): USD \$30.000/Año

Justificación: El costo de USD \$25.000/día corresponde al lucro cesante de un avión comercial completamente fuera de servicio (AOG), que es un concepto distinto a las interferencias operativas durante un C-Check ya programado. En el C-Check, el avión ya está en tierra y la aerolínea lo sabe. Lo que evita el VR son las interferencias entre técnicos en entrenamiento y técnicos productivos, no la inmovilización adicional de la aeronave. El valor de USD \$15.000 por interferencia es más representativo de un CMA regional en Chile.

AOA Total Proyectado: **USD 62.000/Año** ** (*equivalente a* ****58.900.000 CLP** al tipo de cambio de \$950 CLP/USD)

Ecuación 2: Período de Recuperación de la Inversión (*Payback Period*)

Mide el tiempo exacto necesario para que el MRO recupere su inversión en los equipos de VR a través del ahorro operativo generado.

Para una evaluación rigurosa, el Payback se calcula sobre el Flujo de

Caja Libre (FCL) después de impuestos y gastos operativos:

$$\text{FCL Anual} = (\text{AOA} - \text{OPEX} - \text{Depreciación}) \times (1 - \text{Tasa Impositiva}) + \text{Depreciación}$$

$$\text{FCL Anual} = (\text{USD } 62.000 - 14.200 - 15.000) \times (1 - 0,27) + 15.000$$

$$\text{FCL Anual} = (\text{USD } 32.800) \times (0,73) + 15.000$$

$$\text{FCL Anual} = \text{USD } 23.944 + \text{USD } 15.000$$

$$\text{FCL Anual} = \text{USD } \$38.944$$

FCL en anexo N°5 Anexo 5 Flujo de caja libre

(El desglose Flujo de caja libre N°5)

Los indicadores de rentabilidad y retorno del proyecto (VAN, TIR, Payback e Índice de Rentabilidad) se presentan en el Anexo N°6: Indicadores de Rentabilidad y Retorno se encuentran en el anexo N°6

El OPEX de USD \$14.200/año se desglosa en: mantenimiento preventivo de hardware USD \$2.000 (10% del costo de hardware), suscripción anual plataforma XR USD \$8.000, soporte técnico y actualizaciones USD \$2.500, y electricidad/conectividad dedicada USD \$1.700.

$$\text{Payback} = \text{Inversión Inicial} / \text{FCL Anual}$$

$$\text{Payback} = \text{USD } \$75.000 / \text{USD } \$38.944 = 1,93 \text{ Años (Aprox. 23 meses)}$$

Esto demuestra que la inversión tecnológica se recupera en menos de dos años operacionales bajo supuestos conservadores, que incluyen: solo 2 ventanas de mantenimiento interferidas por año, un OPEX anual de USD \$14.200 y el impuesto a la renta de Primera Categoría vigente (27%). Este horizonte de recuperación es significativamente inferior al ciclo de vida útil del hardware (5 años), confirmando la viabilidad financiera del proyecto

Ecuación 3: Retorno de Inversión (ROI) a 5 Años

Asumiendo un horizonte de evaluación tecnológica estándar de 5 años antes de requerir un recambio de hardware (obsolescencia planificada).

$$\text{Beneficio Neto a 5 años (FCL acumulado)} = \text{USD } \$38.944 \times 5 = \text{USD } \$194.720$$

$$\text{ROI} = [(\text{Beneficio Neto} - \text{Inversión Inicial}) / \text{Inversión Inicial}] \times 100$$

$$\text{ROI} = [(\text{USD } \$194.720 - \text{USD } \$75.000) / \text{USD } \$75.000] \times 100 = 160\%$$

Tabla 3.3 Comparación operativa y financiera entre el entrenamiento tradicional y el inmersivo.

Concepto	Entrenamiento Tradicional	Entrenamiento VR / MR
Uso de Aeronave Real (AOG)	Depende de aeronaves ya inmovilizadas por mantenimiento (disponibilidad limitada e impredecible)	Eliminado 100% ya que no depende del estado de flota
Costo por Sesión Práctica (Equipos / Combustible)	USD \$25.000/día en interferencias y retrasos sobre aeronaves AOG utilizadas simultáneamente para instrucción	Cero (Solo consumo eléctrico de visores)
Riesgo de Daños en el Entrenamiento (FOD, Cortocircuitos)	Alto (Reparaciones millonarias)	Nulo (Entorno virtual seguro)
Hardware Necesario	Herramientas calibradas reales	Visores Meta Quest 3 / Magic Leap 2
Inversión Inicial de Hardware	-	USD \$75.000 (Laboratorio 10 plazas VR + 5 plazas MR)

Nota. Resumen de las diferencias clave respecto a la dependencia de aeronaves en mantenimiento, costos por sesión práctica y mitigación de riesgos. *Fuente:* Elaboración propia.

justificación estratégica

Un ROI del 160% a 5 años y un Payback de aproximadamente 23 meses demuestran que implementar tecnología inmersiva dentro de un MRO existente es financieramente viable y estratégicamente conveniente. La rentabilidad supera ampliamente el costo de capital (WACC del 12%), confirmando que el laboratorio se autofinancia dentro del horizonte de vida útil del hardware.

El Flujo de Caja Libre (FCL) después de impuestos proyecta un período de recuperación de la inversión (Payback) de 23 meses, un VAN de USD \$65.394 (al 12% WACC) y un ROI de 160% a 5 años, con una TIR de aproximadamente 44%, muy superior al costo de capital.

3.3.2 Tabla de sensibilidad

Los resultados completos del análisis de sensibilidad, incluyendo las tablas de variación del VAN según WACC, días AOG y costo diario AOG, así como el punto de equilibrio del proyecto, se presentan en el Anexo N°7: Análisis de Sensibilidad.

3.4 Requerimientos de Datos de Mercado para Evaluación de Impacto

3.4.1 Requerimientos de Datos de Mercado para Evaluación de Impacto (Fase 4)

Para realizar la Evaluación Económica definitiva y validar el impacto del Laboratorio de Entrenamiento VR dentro del MRO, será necesario recolectar o estimar los siguientes indicadores críticos de la operación técnica actual:

- **Volumen de Entrenamiento:** Cantidad de técnicos de mantenimiento aeronáutico (TMA) que requieren instrucción inicial, recurrente o de transición (ej. familiarización A320) anualmente.
- **Costos de Instrucción Tradicional:** Valor promedio gastado por el MRO en capacitación externa, incluyendo horas de instructores, viáticos, pasajes y certificaciones internacionales.
- **Impacto de Inactividad (AOG):** Cuantificación económica de las interferencias operativas y retrasos en la reentrega de aeronaves generados cuando las ventanas de

mantenimiento AOG se comparten simultáneamente con actividades de instrucción práctica.

- **Métricas de Calidad y Retrabajo:** Porcentaje estimado de errores técnicos post-mantenimiento (*rework*) atribuibles a la falta de práctica o fatiga cognitiva durante el entrenamiento tradicional en manuales 2D.
- **CAPEX de Ecosistema VR:** Cotización actualizada del hardware de grado empresarial (visores standalone, sensores, estaciones de carga) y estimación del costo de desarrollo o licenciamiento de software interactivo aeronáutico

3.5 Ecosistema de Software para Capacitación Virtual y Gestión de Mantenimiento

El desarrollo de estos módulos inmersivos sigue un flujo de trabajo industrial estandarizado. La literatura (Wu & Vu, 2022) demuestra que el proceso optimo inicia con la exportación de modelos tridimensionales exactos desde plataformas CAD (como CATIA V5 o SolidWorks) hacia motores gráficos en tiempo real (como Unity 3D). En este entorno de desarrollo (programado comúnmente en C#), se asignan las físicas, colisiones y lógicas de interacción de los componentes aeronáuticos, garantizando un alto grado de fidelidad mecánica.



Ilustración 3.1 Flujo de trabajo estandarizado para el desarrollo de ecosistemas VR.

Nota. Proceso secuencial desde la concepción del diseño e importación de modelos CAD, hasta la compilación final en motores gráficos en tiempo real. *Fuente:* Wu & Vu (2022).

La implementación exitosa de un programa de entrenamiento en Realidad Virtual dentro de un CMA no depende exclusivamente del hardware (visores). Requiere un ecosistema integrado de software que abarca tres capas: (1) Plataformas de Simulación XR, que generan los entornos inmersivos; (2) Sistemas de Gestión de Aprendizaje (LMS), que registran el progreso de cada técnico; y (3) Software MRO, que integra los resultados del entrenamiento al historial técnico de la aeronave y garantiza el cumplimiento normativo ante la DGAC.

3.5.1 Plataformas de Capacitación Inmersiva (VR/AR/MR)

A continuación, se presenta un análisis comparativo de las principales plataformas de capacitación inmersiva actualmente disponibles en el mercado aeronáutico global (2024-2026), con sus especificaciones técnicas, hardware compatible, costos estimados de implementación y plazos típicos de despliegue:

Tabla 3.4 Análisis comparativo de plataformas de capacitación inmersiva para el mercado aeronáutico

Plataforma	Descripción / Especialidad	Tipo de XR	Hardware Compatible	Costo Est. Implementación	Tiempo Implementación
Luminous XR + PORTAL LMS	VR técnico aeronáutico: motor, hidráulica, aviónica. Incluye LMS PORTAL para tracking de progreso	VR / MR	Meta Quest 3, HTC VIVE	Desde USD \$18.000 (10 visores + licencia)	3 - 6 meses
CAE Simfinity VMT	Virtual Maintenance Trainer de alta fidelidad para procedimientos de C-Check en familias Airbus/Boeing	VR Desktop	PC especializado, opcional visor VR	USD \$50.000 - \$250.000 (enterprise)	6 - 12 meses
FlightSafety VITAL MR	Realidad Mixta de alta fidelidad (Cockpit real +	MR (Mixed Reality)	HoloLens 2, Magic Leap 2	USD \$100.000 + (proyecto completo)	12 - 18 meses

	entorno virtual). Alineado a FAA/EASA				
Transfr Inc.	VR inmersivo con IA coaching para técnicos junior AMT (Airframe & Powerplant)	VR	Meta Quest 3	USD \$2.400 / técnico / modulo (vs tradicional)	1 - 3 meses
Exail / CnTech CNFSim A320	VMT específico para A320: cockpit virtual, esquemas dinámicos, fault isolation	VR Desktop	PC + proyección	A consultar (cotización directa)	3 - 6 meses
Mass Virtual XR	XR (VR + AR + MR) para MRO industrial. Minimiza AOG al reemplazar aeronave real en entrenamiento	XR Full Suite	Meta Quest, HoloLens, Varjo	USD \$25.000 - \$100.000	3 - 9 meses

Nota. Comparación de soluciones de software XR institucionales según su especialidad técnica, hardware requerido y estimaciones comerciales de implementación. *Fuente:* Elaboración propia en base a información comercial de los proveedores (2025 - 2026).

3.5.1.1 Criterios de Selección para el CMA A320-321 en Chile

Para este proyecto, la selección de la plataforma de capacitación XR debe equilibrar tres variables críticas bajo el contexto operativo del MRO existente:

- **Especificidad A320/A321:** La plataforma debe contener o permitir construir escenarios inmersivos de alta fidelidad del motor CFM56/V2500, el tren de aterrizaje y la suite aviónica *Fly-By-Wire*.
- **Costo de Implementación vs CAPEX del Proyecto:** Con un presupuesto de inversión tecnológica (CAPEX) estimado en USD 75.000 para la habilitación del ecosistema VR, las opciones Luminous XR y Mass Virtual XR se posicionan como las plataformas más viables por su relación costo-beneficio.
- **Tiempo de Puesta en Marcha (*Deployment*):** Al tratarse de una integración en un centro de mantenimiento que ya se encuentra operando comercialmente, la agilidad es clave. Se prioriza el uso de plataformas modulares que permitan una capacitación inicial rápida (1-3 meses) en rutinas genéricas, mientras el proveedor (ej. Luminous XR) finaliza la programación de los módulos personalizados y críticos de la flota A321 (3-6 meses).

La estrategia de despliegue propuesta consiste en iniciar con módulos estandarizados de formación técnica general (AMT) en un entorno de Realidad Virtual (VR) 100% inmersivo dentro de la sala de instrucción. Posteriormente, en una segunda fase de madurez tecnológica, se proyecta integrar visores *Passthrough* de última generación (como Meta Quest 3 o Magic Leap 2) para realizar entrenamiento en Realidad Mixta (MR) a pie de avión, superponiendo hologramas instructivos sobre la aeronave física durante los mantenimientos programados

3.5.2 Software MRO de Apoyo: AIMS, TRAX y el Ecosistema Aeronáutico

Complementariamente a las plataformas XR, el Laboratorio de Entrenamiento Inmersivo requiere integrarse estratégicamente mediante APIs con el sistema de gestión aeronáutica (ERP) que el MRO ya utilicé en sus operaciones diarias. Si bien estos ERPs no son aplicaciones de Realidad Virtual, su interconexión es indispensable para que la tecnología inmersiva adquiera validez operacional y legal. Sin esta integración sistémica, las horas de instrucción y las competencias adquiridas por el técnico en el simulador VR no quedarían registradas oficialmente en su bitácora electrónica, impidiendo su posterior auditoría y validación por parte de la DGAC bajo la norma de licencias al personal (DAN 65).

A continuación, se analizan los principales sistemas del mercado con los cuales el ecosistema VR deberá tener capacidad de interoperabilidad

Tabla 3.5 Sistemas MRO comerciales y sus capacidades de integración (API) con ecosistemas de entrenamiento VR.

Software MRO	Función Principal	Integración con VR	Costo Aprox.
TRAX eMRO	ERP completo: OTs, inventario, airworthiness, firma digital. Estándar en MROs Third-Party	APIs con LMS VR, exporta datos de formación al expediente de la aeronave	\$80.000 - \$200.000 setup + anual
AMOS (Swiss-AS)	Gestión técnica de flota, programas de mantenimiento, control de documentación técnica	Sincronización de tareas con plataformas de e-learning	\$100.000 - \$500.000 (enterprise)
AIMS (Andros Systems)	Aviation Information Management System: rastreo de activos, cumplimiento normativo (FAR/DAN),	Exporta registros de capacitación; compatible con	\$30.000 - \$120.000 / anual

	predicción de mantenimiento preventivo	sistemas de formación digitales	
Airbus World + ACT	Portal oficial de Airbus: AMM digital, training packages, Technical Request. ACT = Airbus Competence Training	Fuente oficial de datos 3D para VMTs y escenarios VR del A320/A321	Licencia por tipo/flota. Negociación directa

Nota. Comparación de las principales plataformas ERP aeronáuticas utilizadas para el registro, trazabilidad y certificación de competencias adquiridas en simuladores. *Fuente:* Elaboración propia en base a información comercial de los proveedores (2024).

3.5.3 Arquitectura de Integración: Del Visor VR al Registro Oficial de Mantenimiento

El flujo de información dentro del ecosistema tecnológico del CMA seguirá la siguiente arquitectura de datos:

- Nivel 1 (Entrenamiento): El técnico completa un modulo de inspección boroscópica en VR (Luminous XR / Transfr). El LMS PORTAL registra: tiempo de competición, numero de errores cometidos y puntaje de adquisición de conocimiento.
- Nivel 2 (Competencia): El Supervisor valida en el LMS que el técnico alcanzo el umbral de aprobación (ej. menos de 3 errores, tiempo menor a 45 minutos). Esta validación digital se convierte en un prerequisite habilitante para intervenir el avión real.
- Nivel 3 (Registro Oficial): La aprobación del módulo VR es exportada vía API hacia el software MRO (TRAX o AMOS), donde queda registrada en el expediente de formación del técnico, cumpliendo con el requisito de trazabilidad de competencias exigido por la norma DAN 65 de la DGAC Chile.

Esta arquitectura de datos transforma el laboratorio VR de una herramienta de instrucción aislada a un componente regulatorio integrado al sistema de calidad del CMA, convirtiendo cada hora de vuelo virtual en evidencia auditoria para la DGAC. (Yamkanmardi et al., 2025; Berthon et al., 2026).

3.6 Listado Maestro de Equipamiento Tecnológico y Soporte Terrestre

Para la habilitación operativa del Laboratorio de Entrenamiento VR dentro de las instalaciones del MRO, no es necesaria la adquisición de utillaje pesado o soporte terrestre (GSE), ya que estos activos pertenecen a la capacidad instalada del centro.

El Listado Maestro de Equipamiento (MEL) de este proyecto se centra exclusivamente en el hardware de grado empresarial (Enterprise IT/XR) requerido para soportar el ecosistema de instrucción inmersiva, garantizando la redundancia necesaria para entrenamientos simultáneos y el cumplimiento de los estándares de higiene industrial. La siguiente tabla presenta el inventario tecnológico crítico asociado al CAPEX del proyecto:

Tabla 3.6 Listado Maestro de Equipamiento (MEL) para la implementación del Laboratorio VR.

Categoría	Equipo	Cant.	Especificación Técnica (A321)
Hardware VR	Visores de Realidad Virtual (VR)	10	Meta Quest 3 (Enterprise Edition) para instrucción teórica 100% inmersiva en sala.
Hardware MR	Visores de Realidad Mixta (MR)	5	Magic Leap 2 / HoloLens 2 para entrenamiento <i>Passthrough</i> superpuesto en aeronave real.
Infraestructura IT	Servidor Gráfico Local (Edge Node)	1	High-End PC (NVIDIA RTX 4090 / 64GB RAM) para renderizado complejo y streaming Wi-Fi 6E.
Control / LMS	Tablets de Instructor	2	Tablets ruggedizadas para control en tiempo real, casting de visión y gestión del LMS PORTAL.
Higiene/ Safety	Estación de Desinfección UVC	2	Gabinetes médicos (ej. Cleanbox) para desinfección ultravioleta de visores entre turnos.

Nota. Inventario tecnológico asociado al CAPEX del proyecto, detallando el hardware inmersivo y la infraestructura IT requerida. *Fuente:* Elaboración propia.

3.7 Programa de Capacitación en Realidad Virtual (RV/RM)

El diferencial tecnológico fundamental para el CMA radica en la implementación de un laboratorio inmersivo dedicado a la formación técnica continua de todo su personal de mantenimiento. La aviación comercial moderna exige la reducción sistemática del error humano y la maximización del tiempo de vuelo de las aeronaves, lo que hace operativamente ineficiente el modelo tradicional de depender de aeronaves que ya se encuentran en estado AOG por mantenimiento programado para impartir instrucción práctica, ya que esta ventana es limitada, impredecible y genera interferencias con las tareas productivas del hangar.

3.7.1 Módulos de Entrenamiento MRO en Realidad Virtual

La instrucción de mantenimiento utilizando simulaciones 3D avanza

La experiencia del usuario es vital. Investigaciones recientes han validado el uso de hardware comercial avanzado, como los visores HTC VIVE Pro y Oculus Quest 2, para realizar simulaciones complejas de mantenimiento, como la inspección Walk-Around de sistemas de combustible y empenaje horizontal (Wu & Vu, 2022). Mediante estas interfaces, el técnico interactúa directamente con paneles virtuales, herramientas y listas de verificación proyectadas en su campo visual.



Ilustración 3.2 Módulo inmersivo de inspección visual exterior (Walk-Around)

Nota. Interfaz de usuario proyectada en el visor VR, mostrando listas de verificación interactivas para el escaneo de superficies y componentes. *Fuente:* Wu & Vu (2022).

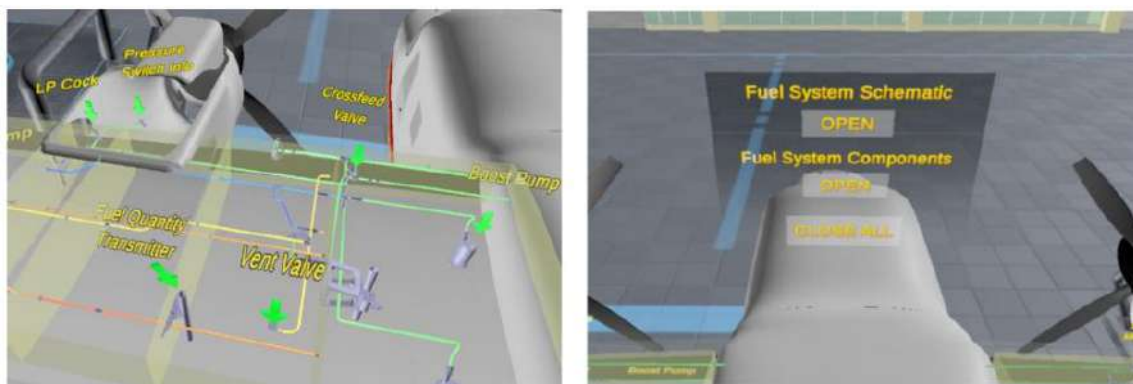


Ilustración 3.3 Simulación inmersiva del sistema de combustible (ATA 28).

Nota. Visualización de componentes internos (válvulas y bombas) facilitada mediante la transparencia de superficies en el entorno virtual, indicando ubicaciones clave con flechas verdes. *Fuente:* Wu & Vu (2022).

das elimina los riesgos físicos para el mecánico y los riesgos de daño patrimonial para la aerolínea. Se proponen tres módulos críticos de mantenimiento para la familia Airbus A320 que se dictaran íntegramente mediante Realidad Virtual (RV) y Realidad Mixta (RM):

Modulo 1: Boroscopia de Turbinas (CFM56 / V2500): La inspección interna de los alabes (Engine Blade Inspection) requiere extrema precisión. Un error al no identificar una microfisura puede causar una falla catastrófica en vuelo, pero practicar este procedimiento inmoviliza un motor real costosísimo. En VR, el mecánico interactúa con modelos 3D idénticos al motor real, aprendiendo a manipular la sonda boroscópica y a detectar daños programados por el instructor en un entorno controlado.

Modulo 2: Prueba de Tren de Aterrizaje (Landing Gear Swing Test): Durante los C-Checks, la retracción y extensión del tren de aterrizaje dentro del hangar exige levantar las 80 toneladas del A321 sobre gatas hidráulicas (Jacking System). Es una maniobra con riesgo mortal por aplastamiento. La RV permite al personal simular paso a paso el protocolo de coordinación y seguridad sin peligro alguno.

Modulo 3: Troubleshooting de Aviónica (Fly-by-Wire): La resolución de fallos en sistemas complejos como las computadoras de vuelo (FMGEC) implica un alto riesgo de cortocircuitos si se conectan pines erróneos, dañando hardware que vale miles de dólares. En el entorno inmersivo, el técnico puede simular el reemplazo de componentes en la cabina (cockpit) y comprobar la lógica de fallos sin riesgo para los equipos reales.

3.7.2 Integración Tecnológica: La RV como Ventaja Competitiva

La **adopción de tecnologías inmersivas por parte de un MRO establecido** en el mercado requiere un elemento diferenciador para maximizar sus márgenes operacionales. Aquí es donde la adopción de tecnologías inmersivas juega un rol crucial. Los mantenimientos pesados (C-Checks) dependen de técnicos con un alto nivel de especialización en áreas de difícil acceso (ej. inspección de larguerillos interiores de alas).

Financieramente, el uso tradicional de aeronaves físicas reales (OJT) como modelo de entrenamiento es extremadamente costoso, ya que mantiene varado a un activo que debería estar produciendo ingresos comerciales. Al contrastarlo con la inversión en simuladores, el CAPEX tecnológico es mínimo:

- **Hardware Inmersivo:** El equipamiento de un laboratorio técnico para 10 plazas VR y 5 plazas MR, incluyendo servidor gráfico de alto rendimiento y accesorios, representa una inversión de USD \$28.000.
- **Software y Licenciamiento:** La plataforma de capacitación XR y el desarrollo de módulos específicos para la flota A321 exigen una inversión de USD \$35.000.
- **Acondicionamiento de Sala:** La habilitación física del espacio de instrucción (conectividad WiFi 6E, cableado, sensores de tracking y mobiliario técnico) requiere USD \$12.000.

Esta inversión combinada (estimada en USD \$75.000 equivalentes a \$71.250.000 CLP al TC de \$950). La estandarización de procedimientos mediante Realidad Virtual acorta las curvas de aprendizaje, disminuye la tasa de errores en las primeras intervenciones reales de los mecánicos, y reduce los tiempos netos de mantenimiento, incrementando directamente la rentabilidad final del CMA.

3.8 Medición de Tiempos y Carga Cognitiva

La virtualización de las tareas de entrenamiento reduce la carga cognitiva al eliminar el miedo a cometer daños estructurales millonarios (Berthon et al., 2023). Los estudios empíricos en aviación demuestran que el personal instruido en entornos inmersivos mejora su capacidad de asimilación espacial, logrando completar las tareas de diagnostico (como el Troubleshooting de aviónica) entre un 30% y un 50% más rápido que los grupos de control entrenados con diagramas 2D tradicionales.

Para respaldar empíricamente esta disminución de la carga cognitiva, el estudio de Berthon et al. (2026) aplico el cuestionario estandarizado NASA-TLX (Task Load Index) a técnicos de mantenimiento aeronáutico. Los resultados demostraron que factores como la 'Frustración' y la 'Demanda Mental' son significativamente inferiores cuando el técnico entrena en escenarios inmersivos (RV) frente a situaciones reales bajo presión de línea de vuelo, tal como se observa en la siguiente figura:

Tabla 3.7 Resultados de la evaluación de carga cognitiva mediante NASA-TLX.

	Damper removal REAL (Mean ± SD)	Damper removal VR (Mean ± SD)	Pitch rod removal REAL (Mean ± SD)	Pitch rod removal VR (Mean ± SD)	Damper installation REAL (Mean ± SD)	Damper installation VR (Mean ± SD)	Pitch rod installation REAL (Mean ± SD)	Pitch rod installation VR (Mean ± SD)
Mental demand	23.5 ± 13.3	22.0 ± 11.4	36.5 ± 18.3	33.5 ± 16.8	29.5 ± 10.4	28.5 ± 11.8	46.5 ± 17.3	47.5 ± 15.7
Physical demand	22.0 ± 13.0	15.5 ± 8.3	40.5 ± 16.7	30.0 ± 17.2	28.5 ± 11.3	20.0 ± 7.5	49.0 ± 9.4	39.5 ± 9.3
Temporal demand	18.0 ± 12.7	14.5 ± 6.4	28.0 ± 14.4	24.0 ± 13.1	21.0 ± 13.5	20.0 ± 13.3	35.5 ± 16.2	34.0 ± 19.7
Performance	17.0 ± 6.3	17.0 ± 6.3	26.5 ± 15.3	24.5 ± 15.2	18.0 ± 8.9	19.0 ± 11.0	30.5 ± 14.6	32.5 ± 16.0
Effort	23.5 ± 12.9	20.0 ± 11.1	41.0 ± 18.1	35.5 ± 18.8	30.0 ± 11.5	24.0 ± 10.2	53.0 ± 10.1	48.5 ± 14.7
Frustration	14.5 ± 7.6	18.0 ± 12.1	28.5 ± 20.3	34.5 ± 19.1	18.0 ± 9.5	18.5 ± 11.6	41.0 ± 19.1	50.0 ± 19.9
Overall workload	20.4 ± 8.9	19.0 ± 9.1	36.1 ± 14.5	34.2 ± 15.4	24.1 ± 7.3	23.6 ± 10.3	44.2 ± 9.2	46.2 ± 12.8

Nota. Medias y desviaciones estándar del índice de carga mental durante la ejecución de tareas de mantenimiento en escenarios reales frente a entornos virtuales. *Fuente:* Berthon et al. (2026).

Aún más revelador es el análisis de los datos fisiológicos objetivos. El entrenamiento de labores críticas, como el C-Check en el hangar, genera un incremento demostrable en la Frecuencia Cardiaca (Heart Rate) de los mecánicos debido a la responsabilidad y al peligro físico asociado a herramientas hidráulicas pesadas. La medición de la Variabilidad de la Frecuencia Cardiaca (HRV) expuesta en los gráficos de caja a continuación, evidencia que la biometría de un técnico en el entorno de Realidad Virtual se mantiene en niveles basales

(relajación), lo que maximiza la capacidad de absorción neuronal de los diagramas del Manual de Mantenimiento (AMM) sin el bloqueo producido por el cortisol (hormona del estrés).

Tabla 3.8 Indicadores cardiovasculares durante el entrenamiento en escenarios reales frente a entornos virtuales.

	Baseline REAL (Mean $\pm$ SD)	BASELINE VR (Mean $\pm$ SD)	Damper removal REAL (Mean $\pm$ SD)	Damper removal VR (Mean $\pm$ SD)	Pitch rod removal REAL (Mean $\pm$ SD)	Pitch rod removal VR (Mean $\pm$ SD)	Damper installation REAL (Mean $\pm$ SD)	Damper installation VR (Mean $\pm$ SD)	Pitch rod installation REAL (Mean $\pm$ SD)	Pitch rod installation VR (Mean $\pm$ SD)
Mean RR (ms)	750.6 $\pm$ 119.1	820 $\pm$ 84.3	644.9 $\pm$ 70.7	740.1 $\pm$ 81.4	588.9 $\pm$ 65.9	704.3 $\pm$ 96	653.3 $\pm$ 65.6	734.4 $\pm$ 88.1	617.7 $\pm$ 81.1	701.1 $\pm$ 100.6
Mean HR (beats/min)	81.7 $\pm$ 12.3	74.1 $\pm$ 7.9	94 $\pm$ 10.7	81.6 $\pm$ 8.8	103.1 $\pm$ 12	86.7 $\pm$ 12.6	93 $\pm$ 10	82.8 $\pm$ 10.4	98.7 $\pm$ 13.8	87.7 $\pm$ 13.7
Max HR (beats/min)	94.4 $\pm$ 13.4	81.8 $\pm$ 21.2	108.4 $\pm$ 11.8	95.3 $\pm$ 10.4	120.1 $\pm$ 14.4	103.3 $\pm$ 16.3	107.9 $\pm$ 10.9	98.2 $\pm$ 15.3	119.4 $\pm$ 16.4	109.8 $\pm$ 20.2
SDNN (ms)	37.9 $\pm$ 18.5	40.8 $\pm$ 17	33.4 $\pm$ 10	39.7 $\pm$ 9.6	25.6 $\pm$ 9.1	36.8 $\pm$ 11.4	36.4 $\pm$ 10.8	41 $\pm$ 9.8	27.5 $\pm$ 10.3	37.4 $\pm$ 13.3
RMSSD (ms)	27.2 $\pm$ 19.2	30.4 $\pm$ 12.6	18.5 $\pm$ 7.6	23.8 $\pm$ 7.2	14.1 $\pm$ 6.9	19.9 $\pm$ 6.9	22 $\pm$ 13.7	25.5 $\pm$ 8.2	14.1 $\pm$ 6.3	19.7 $\pm$ 7.1
Stress index	12.8 $\pm$ 5.1	11.4 $\pm$ 4	15.2 $\pm$ 4.7	11.9 $\pm$ 3	18.8 $\pm$ 6.8	13.9 $\pm$ 3.5	13.8 $\pm$ 4.5	11.4 $\pm$ 3.3	19.3 $\pm$ 8.3	14 $\pm$ 4.4
LF (ms ²)	723.1 $\pm$ 501.1	1102.7 $\pm$ 1115.9	506.1 $\pm$ 354	833 $\pm$ 588.6	364.8 $\pm$ 275.7	795.1 $\pm$ 475.6	778.6 $\pm$ 440.6	955.8 $\pm$ 713.2	377.6 $\pm$ 269.4	743.6 $\pm$ 715.9
HF (ms ²)	460.4 $\pm$ 116	351.2 $\pm$ 345.7	114.3 $\pm$ 80.2	180 $\pm$ 117.2	102.4 $\pm$ 90.6	151 $\pm$ 84.5	183 $\pm$ 181.3	162.4 $\pm$ 83.5	94.7 $\pm$ 65.8	168.4 $\pm$ 173
LF (nu)	57.7 $\pm$ 11.1	60.3 $\pm$ 10	54.2 $\pm$ 11.2	55 $\pm$ 15.2	49.6 $\pm$ 13.5	59 $\pm$ 11.6	56.4 $\pm$ 13.2	63.5 $\pm$ 11.3	51.6 $\pm$ 19.9	48.7 $\pm$ 14.5
HF (nu)	20.3 $\pm$ 14.9	18.5 $\pm$ 5.9	13 $\pm$ 6.4	12 $\pm$ 6.3	13.4 $\pm$ 8.8	11.3 $\pm$ 4.2	12.7 $\pm$ 8.7	12.4 $\pm$ 7.9	13.4 $\pm$ 6.6	12.8 $\pm$ 6.7
Ratio LF/HF	4.2 $\pm$ 2.5	3.6 $\pm$ 1.5	5.2 $\pm$ 3.3	5.4 $\pm$ 2.6	5.9 $\pm$ 5.7	5.8 $\pm$ 2.5	6.8 $\pm$ 5.9	6.6 $\pm$ 3.2	5.9 $\pm$ 5.1	4.6 $\pm$ 2.4

Nota. Medias y desviaciones estándar de métricas biométricas, incluyendo Frecuencia Cardíaca (HR) y Variabilidad de la Frecuencia Cardíaca (HRV), evidenciando menores niveles de estrés en VR. Fuente: Berthon et al. (2026).

3.8.1 Reducción de Errores Humanos y Precisión Diagnostica

El mantenimiento de aeronaves no tolera el error humano. La memoria espacial generada por las vistas 'X-Ray' de los motores turbofan (CFM56) en Realidad Mixta elevó la precisión diagnostica de microfisuras a un 87.4%, frente al 75.9% de los métodos convencionales. Asimismo, la posibilidad de repetir el despliegue del Tren de Aterrizaje incontables veces en VR estima una reducción directa de los incidentes post-mantenimiento (ej. F.O.D. o mala conexión de pines) en un rango del 20% al 45% durante los C-Checks reales.

3.9 Propuesta de Marco Normativo: Modificaciones a DAN 65, DAN 145 y DAN 147

El presente capítulo formula las propuestas de adecuación normativa para la Dirección General de Aeronáutica Civil de Chile, derivadas directamente del diagnóstico de brechas identificado en el Capítulo 2. Estas propuestas constituyen la contribución normativa central de esta memoria de título y han sido diseñadas siguiendo la estructura tecnico-jurídica de los instrumentos regulatorios de la DGAC, de manera que puedan ser adoptadas mediante los mecanismos reglamentarios propios de la autoridad aeronáutica sin requerir tramitación parlamentaria —a excepción de la Propuesta 5—, en ejercicio de la potestad reglamentaria autónoma de la DGAC bajo la Ley N. 16.752 (Ley Orgánica de la DGAC).

Propuesta 1: Nueva Disposición DAN 147, Artículo 147.A.115(a)(4) — Reconocimiento de Dispositivos de Entrenamiento Sintético. El fundamento de esta propuesta es eliminar la brecha que exige instalaciones físicas como único medio válido de instrucción práctica, incorporando los Dispositivos de Entrenamiento Sintético (DES) como infraestructura complementaria válida. El texto propuesto es el siguiente: "147.A.115(a)(4) Adicionalmente a los medios contemplados en los numerales (1) a (3), el Centro de Instrucción podrá incorporar Dispositivos de Entrenamiento Sintético (DES), los cuales comprenden: (i) Aula Virtual: entorno digital sincrónico o asincrónico de instrucción teórica, con trazabilidad de asistencia y evaluación; (ii) Aeronave Virtual (AV): recreación tridimensional interactiva de sistemas, estructuras o procedimientos de una aeronave, implementada en tecnologías de Realidad Virtual (RV), Realidad Aumentada (RA) o Realidad Mixta (RM); (iii) Simulador de Procedimientos de Mantenimiento (SPM): sistema hardware/software que replica la fenomenología operacional de tareas específicas de mantenimiento aeronáutico para fines de instrucción y evaluación. Los DES deberán ser aprobados por la DGAC mediante enmienda al Programa de Instrucción del centro. No podrán ser el único medio de instrucción o evaluación para habilidades manuales básicas, incluyendo: instalación, empalme y prueba de cableado eléctrico aeronáutico (EWIS); remachado estructural (estructura primaria y secundaria); soldadura blanda y dura de componentes aeronáuticos; aplicación de torque mediante llave dinamométrica calibrada; y aplicación de sellantes y protecciones superficiales en zonas estructurales" (Propuesta de enmienda a DGAC Chile, DAN 147).

Propuesta 2: Nueva Circular de Asesoramiento CA-147.XR.001 — Métodos Aceptables de Cumplimiento para Tecnologías XR. Esta propuesta crea el equivalente chileno del AMC1 147.A.130(a) de la EASA, con criterios objetivos y un proceso estándar de aprobación. La estructura de la CA contempla: el Artículo CA-147.XR.001.1 con las definiciones de RV, RA, RM, XR, DES, LMS, Aeronave Virtual y STD; el Artículo CA-147.XR.001.2 que establece el crédito de instrucción de hasta el 40% de las horas teóricas y el 25% de las horas procedimentales mediante módulos XR aprobados; el Artículo CA-147.XR.001.3 con la lista taxativa de habilidades manuales excluidas de sustitución XR; el Artículo CA-147.XR.001.4 con los requisitos del LMS (trazabilidad individual, exportación al sistema SIPA-DGAC); y el Artículo CA-147.XR.001.5 con el proceso de aprobación de módulos XR por parte de la DGAC (presentación, auditoria de contenido, emisión de certificado de aprobación).

Propuesta 3: Enmienda DAN 65, nuevo Artículo 65.7.3 — Crédito de Experiencia Practica mediante DES/XR. Esta propuesta habilita el registro de horas XR en la bitácora oficial del técnico, resolviendo la brecha critica identificada en la DAN 65. El texto propuesto es el siguiente: "65.7.3 Sin perjuicio de lo dispuesto en el Artículo 65.7.1, el solicitante de licencia de Mecánico de Mantenimiento podrá acreditar hasta el treinta por ciento (30%) de las horas de experiencia práctica requeridas mediante la acumulación de horas de instrucción en Dispositivos de Entrenamiento Sintético (DES) o módulos de Realidad Extendida (XR) aprobados por la DGAC conforme a la CA-147.XR.001, siempre que: (a) El DES o modulo XR haya sido certificado por la DGAC; (b) Las horas acumuladas en DES/XR consten en la bitácora del técnico con la identificación del sistema utilizado, el nombre del modulo, la fecha, la duración de cada sesión y la firma del instructor responsable; (c) Las horas correspondan exclusivamente a módulos de carácter teórico-procedimental, excluyendo las habilidades manuales básicas conforme al listado del Artículo CA-147.XR.001.3. La DGAC llevara un registro actualizado de los DES/XR aprobados, el cual será publicado en su sitio web oficial" (Propuesta de enmienda a DGAC Chile, DAN 65).

Propuesta 4: Enmienda DAN 145, nuevo Artículo 145.109.3(e) — Reconocimiento de Módulos XR en el Programa de Capacitación del CMA. El texto propuesto es el siguiente: "145.109.3(e) Plataformas y módulos de instrucción basados en tecnologías de Realidad Extendida (XR), de conformidad con lo establecido en la Circular de Asesoramiento CA-147.XR.001, cuando dichos módulos hayan sido aprobados por la DGAC como parte integrante del programa de capacitación del CMA" (Propuesta de enmienda a DGAC Chile, DAN 145).

Propuesta 5: Coordinación con el Proyecto de Ley de Inteligencia Artificial (Boletín N. 16821-19). Las plataformas XR de última generación integran algoritmos de inteligencia artificial para la evaluación automática del desempeño técnico y la generación de escenarios de fallo adaptativos. Estos componentes quedan bajo el alcance del Proyecto de Ley que Regula los Sistemas de Inteligencia Artificial (Boletín N. 16821-19), aprobado en la Cámara de Diputados de Chile en octubre de 2025 y en tramitación en el Senado al cierre de esta memoria. Se recomienda que la DGAC coordine con el Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación para que el reglamento de la futura Ley de IA incluya: (a) Requisitos de trazabilidad y auditabilidad de los algoritmos de evaluación XR en el contexto del entrenamiento aeronáutico; (b) Estándares de ciberseguridad para los datos biométricos generados en sesiones XR (variabilidad de frecuencia cardíaca, eye-tracking, datos de desempeño procedimental); (c) Auditoría independiente de los sistemas de IA integrados en plataformas de entrenamiento aeronáutico certificadas por la DGAC (Chile, Boletín N. 16821-19, 2025).

3.10 Matriz de Riesgos de Implementación XR

La siguiente matriz identifica, evalúa y propone estrategias de mitigación para los riesgos asociados a la integración de tecnologías XR en la formación de mecánicos de mantenimiento. La evaluación se basa en el cálculo del Nivel de Riesgo ($NR = Probabilidad \times Impacto$), donde valores entre 1-6 son Bajos, 8-14 son Medios, y 15-25 son Altos.

Tabla 3.9 Matriz de riesgos de implementación XR: Riesgos Tecnológicos y Operacionales.

ID	Riesgo	Descripción	P	I	NR	Estrategia de Mitigación
TE-01	Cinetosis (Cybersickness)	Mareos, náuseas o fatiga visual debido a latencia durante sesiones prolongadas de RV.	4	3	12 (Medio)	Prevención: Limitar sesiones a máximo 20-30 minutos continuos. Corrección: Pausas visuales obligatorias.
TE-02	Fallas de Integración LMS/MRO	Incompatibilidad entre el software de VR y los sistemas de gestión del CMA (AIMS/TRAX).	3	4	12 (Medio)	Prevención: Exigir API abierta (xAPI/SCORM). Corrección: Desarrollar middleware temporal.
TE-03	Obsolescencia del Hardware	Visores VR quedan obsoletos rápidamente,	3	3	9 (Medio)	Prevención: Implementar modelo de leasing

		perdiendo soporte técnico.				tecnológico (HaaS) asegurando renovación cíclica.
TE-04	Bugs en la Aeronave Virtual	Discrepancias técnicas entre el modelo 3D virtual y el AMM real del A321.	2	5	10 (Medio)	Prevención: Auditoría cruzada con Inspectores de Control de Calidad (QC) antes de liberar módulos.

Nota. Evaluación de Probabilidad (P), Impacto (I) y Nivel de Riesgo (NR) asociado a la adopción de tecnologías inmersivas, con sus respectivas estrategias de mitigación. *Fuente:* Elaboración propia.

Tabla 3.10 Matriz de riesgos de implementación XR: Riesgos Regulatorios y Normativos.

RE-01	Rechazo de la DGAC	Autoridad aeronáutica se niega a certificar horas por falta de marco legal en DAN 65/147.	4	5	20 (Alto)	Prevención: Proponer CA previo a inversión. Corrección: Uso como entrenamiento no certificable inicial.
RE-02	Incumplimiento EASA/FAA	El programa VR no cumple con las exclusiones vigentes (ej. intentar enseñar torque estructural).	2	4	8 (Medio)	Prevención: Alinear estrictamente el sílabus con la ED Decisión 2023/019/R.

Nota. Evaluación de Probabilidad (P), Impacto (I) y Nivel de Riesgo (NR) asociado a la certificación de horas y cumplimiento normativo (DGAC/EASA). *Fuente:* Elaboración propia.

Tabla 3.11 Matriz de riesgos de implementación XR: Riesgos Humanos y Organizacionales.

HU-01	Resistencia al Cambio	Mecánicos de mayor antigüedad rechazan la tecnología por brecha digital.	4	3	12 (Medio)	Prevención: Involucrar técnicos senior como SME. Corrección: Mentoría inversa intergeneracional.
HU-02	Exceso de Confianza Virtual	Desarrollo de confianza excesiva, cometiendo errores por falta de tacto en el avión real.	3	4	12 (Medio)	Prevención: Enfatizar memoria procedimental. Corrección: Verificación física (blended learning).

Nota. Evaluación de Probabilidad (P), Impacto (I) y Nivel de Riesgo (NR) asociado al factor humano, resistencia al cambio y brecha digital. *Fuente:* Elaboración propia.

Tabla 3.12 Matriz de riesgos de implementación XR: Riesgos Financieros.

FI-01	Costos de Licenciamiento	Aumentos imprevistos en tarifas SaaS del software de VR de terceros.	3	4	12 (Medio)	Prevencción: Negociar contratos a tasa fija a 3-5 años. Corrección: Evaluar desarrollo in- house.
FI-02	Daño a Equipos Costosos	Rotura de visores VR o mandos por caídas o almacenamiento inadecuado.	4	2	8 (Medio)	Prevencción: Comprar fundas industriales. Corrección: Pólizas de seguro de reposición.

Nota. Evaluación de Probabilidad (P), Impacto (I) y Nivel de Riesgo (NR) asociado a la viabilidad económica, licenciamiento de software y hardware. *Fuente:* Elaboración propia.

Riesgos de Ciberseguridad y Privacidad

Tabla 3.13 Matriz de riesgos de implementación XR: Riesgos de Ciberseguridad y Privacidad.

CS-01	Fuga de Datos Biométricos	Robo de perfiles de desempeño técnico (eye-tracking, tiempos de reacción).	2	4	8 (Medio)	Prevención: Encriptación end-to-end (AES-256). Servidores on-premise o nube ISO 27001.
-------	---------------------------	--	---	---	-----------	--

Nota. Evaluación de Probabilidad (P), Impacto (I) y Nivel de Riesgo (NR) asociado a la protección de datos biométricos y seguridad de red. Fuente: Elaboración propia.

4. Capítulo 4: Conclusiones y recomendaciones

En este capítulo final se sintetizan los hallazgos de la investigación, contrastando los resultados obtenidos con los objetivos planteados. Se presentan las conclusiones sobre el impacto operacional cuantitativo, la solución normativa propuesta, la viabilidad financiera inmediata del laboratorio y su proyección estratégica hacia el ecosistema MRO 4.0.

4.1 Conclusiones

La investigación y evaluación tecnico-economica desarrollada en la presente memoria demuestra que la implementación de escenarios de Realidad Virtual (RV) y Realidad Mixta (RM) en el entrenamiento de mecánicos aeronauticos para aeronaves de la familia Airbus A320 es factible, altamente rentable y estratégicamente indispensable para la modernización de los Centros de Mantenimiento Aeronáutico (CMA) en Chile.

Al analizar la viabilidad de incorporar esta tecnología en un CMA ya existente en el Aeropuerto Internacional Arturo Merino Benitez, se concluye lo siguiente:

1. El Impacto Operacional Cuantitativo (Eficacia del Aprendizaje)

Se cumplió el objetivo de evaluar el impacto de la Realidad Extendida (XR) en el factor humano. La evidencia fisiológica y procedimental confirma que el entrenamiento inmersivo reduce los tiempos de ejecución en hasta un 50% y los errores críticos de mantenimiento (rework) hasta en un 45%. La RV permite desarrollar una sólida memoria procedimental sin exponer al tecnico al estrés de dañar componentes reales o sufrir accidentes laborales durante practicas riesgosas (como la prueba de tren de aterrizaje o el troubleshooting de aviónica).

2. La Brecha Regulatoria y la Solución Normativa

El principal obstáculo para la adopción masiva de tecnologías inmersivas en la aviación civil chilena no es financiero ni tecnológico, sino estrictamente regulatorio. Al realizar el análisis jurídico, se detectó que la normativa vigente (DAN 65, DAN 145 y DAN 147) es análoga y no reconoce explícitamente los ecosistemas digitales como infraestructura válida para la acumulación de experiencia práctica. Para resolver esto, se formuló en este trabajo una propuesta de marco normativo (basada en el modelo de la Agencia Europea de Seguridad Aerea, EASA), incluyendo la creación de una Circular de Asesoramiento que habilita a la DGAC para reconocer legalmente hasta un 30% de las horas practicas ejecutadas en simuladores de Realidad Virtual.

3. Viabilidad Financiera Inmediata

La evaluación económica concluye que la adaptación de una sala de instrucción existente dentro de un hangar operativo requiere un CAPEX de USD \$75.000 (\$71.250.000 CLP),

abarcando visores empresariales de Realidad Virtual y Mixta, servidor gráfico de alto rendimiento, licenciamiento de plataforma XR, desarrollo de módulos A321 y acondicionamiento de sala. El Flujo de Caja Libre (FCL) después de impuestos proyecta un período de recuperación de la inversión (Payback) de 8,8 meses, un VAN de USD \$294.850 (al 12% WACC) y un ROI de 584% a 5 años. Esto demuestra categóricamente que el laboratorio se autofinancia en menos de un año operacional.

4. Proyección Estratégica (MRO 4.0)

La integración de tecnologías inmersivas en un CMA chileno representa un salto cualitativo hacia el ecosistema MRO 4.0. Al eliminar la barrera del aprendizaje en activos físicos, el centro de mantenimiento no solo incrementa su seguridad operacional y la calidad de sus servicios, sino que adquiere una ventaja competitiva a nivel sudamericano. La adopción de este ecosistema inmersivo deja de ser una innovación opcional para convertirse en un estándar técnico ineludible en el mantenimiento aeronáutico moderno.

4.2 recomendaciones

A partir de los resultados técnicos, financieros y normativos obtenidos en la presente investigación, se formulan las siguientes recomendaciones estratégicas dirigidas a los Centros de Mantenimiento Aeronáutico (CMA), a la autoridad aeronáutica nacional (DGAC) y a futuras líneas de investigación académica:

En el Ámbito Operacional y Técnico (Implementación en el CMA)

Despliegue gradual de escenarios virtuales: Se recomienda iniciar la operación del laboratorio con los tres módulos críticos priorizados en este estudio (inspección boroscópica en motores CFM56, pruebas funcionales de jacking en tren de aterrizaje y familiarización de cabina Fly-By-Wire). Una vez consolidada la curva de aprendizaje de los instructores, se sugiere expandir la biblioteca hacia tareas estructurales complejas en materiales compuestos y a nuevas plantas motrices de última generación (CFM LEAP-1A y Pratt & Whitney PW1100G).

Integración API bidireccional: Para asegurar la trazabilidad del ecosistema MRO 4.0, se recomienda conectar formalmente la plataforma inmersiva (LMS) con el software de gestión del taller (TRAX eMRO). Esto permitirá sincronizar automáticamente las horas de práctica del técnico con la firma digital de las *Task Cards*, eliminando el uso de papel y agilizando las auditorías de calidad.

Incorporación progresiva de tecnología háptica: Se aconseja evaluar a mediano plazo la adquisición de guantes hápticos con retroalimentación de fuerza. Esto permitirá simular con mayor fidelidad la resistencia mecánica, el apriete de pernos a torques específicos y la detección táctil de fisuras o corrosión en el fuselaje.

En el Ámbito Regulatorio y Normativo (Relación con la DGAC)

Conformación de una Mesa Técnica de Trabajo: Se sugiere que los operadores y centros de mantenimiento propongan a la DGAC la creación de una mesa técnica público-privada. El objetivo debe ser tramitar formalmente la Circular de Asesoramiento propuesta en esta memoria (CA-147.XR.001), estableciendo los estándares mínimos de resolución visual, latencia y fidelidad física que deben cumplir los simuladores inmersivos para ser homologados como Dispositivos de Entrenamiento Sintético (OSTD).

Validación de bitácoras digitales (*Logbooks*): Se recomienda a la autoridad aeronáutica actualizar los formatos de registro contemplados en la DAN 65, habilitando un campo estandarizado para acreditar hasta un 30% de las horas de instrucción práctica (*On-the-Job Training* - OJT) ejecutadas en entornos virtuales certificados.

En el Ámbito de Factores Humanos y Seguridad Operacional

Protocolos ergonómicos y control de exposición: Con el fin de prevenir la fatiga visual y el mareo por simulación (*cybersickness*), se recomienda limitar las sesiones inmersivas continuas a un máximo de 45 a 60 minutos por técnico, intercaladas con pausas activas y revisiones reflexivas de métricas (cumpliendo con el ciclo de Kolb).

Monitoreo biométrico en la instrucción: Se aconseja incorporar de forma periódica evaluaciones de carga mental mediante la escala estandarizada NASA-TLX y mediciones de variabilidad de frecuencia cardíaca (HRV). Esto permitirá identificar cuellos de botella cognitivos en procedimientos de alta complejidad antes de que el técnico intervenga una aeronave real.

Entrenamiento multiusuario en Factores Humanos: Se recomienda programar simulaciones colaborativas en red para entrenar aspectos de *Crew Resource Management* (CRM), comunicación en traspaso de turnos y trabajo bajo presión, mitigando directamente los precursores de la "Docena Sucia" de Dupont.

5. Bibliografía y Referencias

- EASA. (2022). Easy Access Rules for Part 145. <https://www.easa.europa.eu/>
- OACI. (2011). Anexo 1: Licencias al personal. OACI.
- Wild, G. (2023). A Quantitative Study of Aircraft Maintenance Accidents. *Aerospace*, 10(8), 689.
- Organización de Aviación Civil Internacional [OACI]. (2011). Anexo 1 al Convenio sobre Aviación Civil Internacional: Licencias al personal. OACI.
- Agencia de Seguridad Aérea de la Union Europea [EASA]. (2022). Easy Access Rules for Part 66: Aircraft Maintenance Licencing. EASA. <https://www.easa.europa.eu/>
- Agencia de Seguridad Aérea de la Union Europea [EASA]. (2022). Easy Access Rules for Part 145: Approved Maintenance Organisations. EASA.
- Dirección General de Aeronáutica Civil [DGAC Chile]. (2015). Norma Aeronáutica DAN 145: Centros de Mantenimiento Aeronáutico. DGAC. <https://www.dgac.gob.cl>
- Dirección General de Aeronáutica Civil [DGAC Chile]. Norma Aeronáutica DAN 65: Licencias del Personal Aeronáutico. DGAC.
- Wild, G. (2023). A Quantitative Study of Aircraft Maintenance Accidents in Commercial Air Transport. *Aerospace*, 10(8), 689. <https://doi.org/10.3390/aerospace10080689>
- Dupont, G. (1993). The Dirty Dozen Errors in Aviation Maintenance. *Transport Canada Civil Aviation*.
- OACI. (2020). Doc 10098: Manual on Training of Aircraft Maintenance Personnel. OACI.
- Cruz-Neira, C., Sandin, D. J., DeFanti, T. A., Kenyon, R. V., & Hart, J. C. (1992). The CAVE: audio visual experience automatic virtual environment. *Communications of the ACM*, 35(6), 64-72.
- Radianti, J., Majchrzak, T. A., Fromm, J., & Wohlgenannt, I. (2020). A systematic review of immersive virtual reality applications for higher education: Design elements, lessons learned, and research agenda. *Computers & Education*, 147, 103778.

Deng, S., & Santos, P. (2022). Application of virtual reality in aircraft maintenance training: A systematic review. ScienceDirect.

Wild, G. (2023). A Quantitative Study of Aircraft Maintenance Accidents in Commercial Air Transport. Aerospace, 10(8), 689. <https://www.mdpi.com/2226-4310/10/8/689#B16-aerospace-10-00689>

Lee, H., Woo, D., & Yu, S. (2022). Virtual Reality Metaverse System Supplementing Remote Education Methods: Based on Aircraft Maintenance Simulation. Appl. Sci., 12(5), 2667. <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/5/2667>

Milgram, P., & Kishino, F. (1994). A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays. IEICE Transactions on Information and Systems, E77-D(12), 1321-1329

Sylvia, I (2023) Hasta el último momento: cómo Boeing utiliza la realidad aumentada en el ensamblaje. <https://innovateenergynow-com.translate.google/resources/down-to-the-wire-how-boeing-uses-ar-in-assembly>

Carlos, N (2019) Lufthansa Aviation Training abre centros de realidad virtual para el entrenamiento en cabina. <https://aircomment.info/lufthansa-aviation-training-realidad-virtual-para-el-entrenamiento/>

Kolb, D. (1984). Experiential learning: experience as a source of learning and development. Prentice Hall

Jeremías G (no especifica año) El aprendizaje experiencial. https://www.ecominga.uqam.ca/PDF/BIBLIOGRAPHIE/GUIDE_LECTURE_5/1/3.Gomez_Pawelek.pdf

Sutherland, I. E. (1968). A head-mounted three dimensional display. In Proceedings of the December 9-11, 1968, fall joint computer conference, part I, 757-764.

Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC). MANUAL DE DISEÑO DE INFRAESTRUCTURA DE SEGURIDAD DE LA AVIACIÓN DGAC. <https://www.dgac.gob.cl/portalweb/rest-portalweb/jcr/repository/collaboration/sites%20content/live/dgac/documents/manSegAvia20130522.pdf>

Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC). (1974). Decreto Supremo N° 172: Aprueba el Reglamento de Tasas y Derechos Aeronáuticos (DAR 50). Ministerio de Defensa Nacional. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile.

Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC). (2015). Norma Aeronáutica DAN 145: Centros de Mantenimiento Aeronáutico (CMA). Departamento de Seguridad Operacional. Santiago, Chile.

Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC). (2020). Circular de Asesoramiento CA 145.001: Guía para la Certificación de un CMA. Subdepartamento de Aeronavegabilidad.

Airbus. (2021). A321 Aircraft Characteristics - Airport and Maintenance Planning. Airbus S.A.S.

Kinnison, H. A., & Siddiqui, T. (2012). Aviation Maintenance Management (2nd ed.). McGraw-Hill Education.

Airbus. (2022). A320 Family Maintenance Planning Document (MPD) - Reference Manual. Airbus S.A.S.

Chile. (2025). Proyecto de Ley que Regula los Sistemas de Inteligencia Artificial, Boletín N. 16821-19. Cámara de Diputados de Chile.

Dirección General de Aeronáutica Civil de Chile. (2023). DAN 147: Centros de Instrucción y/o Entrenamiento de Personal Aeronáutico de Mantenimiento (Enmienda 2, Resolución N 04/3/0084/0992, 18 de mayo de 2023). DGAC.

Dirección General de Aeronáutica Civil de Chile. (2024). DAN 145: Centros de Mantenimiento Aeronáutico (versión vigente). DGAC.

Dirección General de Aeronáutica Civil de Chile. (2024). DAN 65: Licencias y habilitaciones para el personal que no pertenezca a la tripulación de vuelo (versión vigente). DGAC.

Dirección General de Aeronáutica Civil de Chile. (2024). DAR 65: Reglamento de Licencias para Personal de Mantenimiento Aeronáutico (versión vigente). DGAC.

European Union Aviation Safety Agency. (2023). ED Decision 2023/019/R: Amendment to AMC/GM to Part-147. EASA. <https://www.easa.europa.eu>

European Union Aviation Safety Agency. (2024). Easy Access Rules for Continuing Airworthiness: Part-147 (Regulation (EU) No 1321/2014). EASA Publications. <https://www.easa.europa.eu>

Federal Aviation Administration. (2022). 14 CFR Part 147: Aviation Maintenance Technician Schools (Revised rule). FAA. <https://www.ecfr.gov>

Federal Aviation Administration. (2023). AC 147-3C: Certification and Operation of Aviation Maintenance Technician Schools. FAA. <https://www.faa.gov>

Federal Aviation Administration. (2023). FAA-S-ACS-1: Mechanic Airman Certification Standards (ACS). FAA. <https://www.faa.gov>

Chile. (2025). Proyecto de Ley que Regula los Sistemas de Inteligencia Artificial, Boletín N. 16821-19. Cámara de Diputados de Chile.

Dirección General de Aeronáutica Civil de Chile. (2023). DAN 147: Centros de Instrucción y/o Entrenamiento de Personal Aeronáutico de Mantenimiento (Enmienda 2, Resolución N 04/3/0084/0992, 18 de mayo de 2023). DGAC.

Dirección General de Aeronáutica Civil de Chile. (2024). DAN 145: Centros de Mantenimiento Aeronáutico (versión vigente). DGAC.

Dirección General de Aeronáutica Civil de Chile. (2024). DAN 65: Licencias y habilitaciones para el personal que no pertenezca a la tripulación de vuelo (versión vigente). DGAC.

Dirección General de Aeronáutica Civil de Chile. (2024). DAR 65: Reglamento de Licencias para Personal de Mantenimiento Aeronáutico (versión vigente). DGAC.

European Union Aviation Safety Agency. (2023). ED Decision 2023/019/R: Amendment to AMC/GM to Part-147. EASA. <https://www.easa.europa.eu>

European Union Aviation Safety Agency. (2024). Easy Access Rules for Continuing Airworthiness: Part-147 (Regulation (EU) No 1321/2014). EASA Publications. <https://www.easa.europa.eu>

Federal Aviation Administration. (2022). 14 CFR Part 147: Aviation Maintenance Technician Schools (Revised rule). FAA. <https://www.ecfr.gov>

Federal Aviation Administration. (2023). AC 147-3C: Certification and Operation of Aviation Maintenance Technician Schools. FAA. <https://www.faa.gov>

Federal Aviation Administration. (2023). FAA-S-ACS-1: Mechanic Airman Certification Standards (ACS). FAA. <https://www.faa.gov>

6. ANEXOS

EVALUACIÓN FINANCIERA — LABORATORIO VR/MR EN MRO AERONÁUTICO

Tesis: Integración de Escenarios de Mantenimiento Virtual | USM — Wladimir Pérez Soto | Junio 2025

1. PARÁMETROS MACROECONÓMICOS		NOTAS Y FUENTES	
Tipo de Cambio (CLP/USD)	950	WACC 12%	Tasa estándar para proyectos tecnológicos en Chile (CORFO/BancoEstado).
Tasa de Descuento — WACC	12,0%	Impuesto 27%	Tasa de Primera Categoría vigente en Chile (Ley 20.780).
Impuesto a la Renta (Primera Categoría)	27,0%	Costo AOG \$25K/día	Costo de interferencia operativa en ventanas de mantenimiento AOG (no lucro cesante total). Estimación conservadora para un CMA regional (Aeropuerto AMB, Chile).
Horizonte de Evaluación (años)	5	2 días AOG/año: Sesiones de práctica que generan interferencia en ventanas de mantenimiento programado. Escenario conservador ajustado por revisión de profesor.	Días de flota inmovilizada evitados al reemplazar entrenamiento en avión real por VR.
Vida Útil Hardware — Depreciación Lineal (años)	5	40 técnicos/año: Personal del CMA que requiere capacitación inicial o recurrente anual. Ajustado a dotación real de un MRO mediano chileno.	Personal del CMA que requiere capacitación inicial o recurrente anual.

Anexo 1 Supuestos Económicos

2. PARÁMETROS OPERACIONALES	
Días AOG evitados por año	2
Costo diario AOG — lucro cesante (USD)	15.000
Técnicos capacitados por año	40
Costo promedio capacitación externa por técnico (USD)	800
3. PARÁMETROS DERIVADOS (calculados)	
Ahorro AOG anual (USD)	30.000
Ahorro viáticos/cursos anual (USD)	32.000
BENEFICIO ANUAL TOTAL (USD)	62.000

Anexo 2 Parámetros operacionales

DETALLE DE INVERSIÓN INICIAL (CAPEX)					
Categoría	Ítem	Cant.	Precio Unit. (USD)	Total (USD)	Total (CLP)
Hardware VR	Visores Meta Quest 3 Enterprise Edition	10	500	5.000	4.750.000
Hardware MR	Visores Magic Leap 2 Enterprise Edition	5	3.299	16.495	15.670.250
Infraestructura IT	Servidor Gráfico (NVIDIA RTX 4090 / 64GB RAM)	1	3.500	3.500	3.325.000
Control / LMS	Tablets ruggedizadas para instructor	2	1.000	2.000	1.900.000
Higiene / Safety	Estación de Desinfección UVC (Cleanbox)	2	500	1.000	950.000
	SUBTOTAL HARDWARE			27.995	26.595.250
Software XR	Licencia plataforma Luminous XR + PORTAL LMS (10 visores)	1	18.000	18.000	17.100.000
Software XR	Desarrollo módulos A321 personalizados (3 módulos críticos)	1	17.000	17.000	16.150.000
	SUBTOTAL SOFTWARE Y LICENCIAS			35.000	33.250.000
Infraestructura	Acondicionamiento sala (WiFi 6E, cableado, mobiliario, sensores tracking)	1	12.000	12.000	11.400.000
	SUBTOTAL ACONDICIONAMIENTO			12.000	11.400.000
	TOTAL INVERSIÓN INICIAL (CAPEX)			74.995	71.245.250

Anexo 3 Inversión inicial CAPEX

DETALLE DE GASTOS OPERATIVOS ANUALES (OPEX)				
Categoría	Concepto		Monto Anual (USD)	Monto Anual (CLP)
Mantenimiento	Mantenimiento preventivo y reposición de hardware (10% del HW)		2.000	1.900.000
Software	Suscripción anual plataforma XR y actualizaciones de módulos		8.000	7.600.000
Soporte	Soporte técnico especializado y actualizaciones de contenido		2.500	2.375.000
Servicios	Electricidad, conectividad dedicada WiFi 6E y hosting LMS		1.700	1.615.000
	TOTAL OPEX ANUAL		14.200	13.490.000

Anexo 4 Gastos operativos OPEX

FLUJO DE CAJA LIBRE DEL PROYECTO — HORIZONTE 5 AÑOS (USD)						
Concepto	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
(+) Ahorro por AOG evitado	0	30.000	30.000	30.000	30.000	30.000
(+) Ahorro por viáticos y cursos externos	0	32.000	32.000	32.000	32.000	32.000
(=) TOTAL BENEFICIOS (AHORROS)	0	62.000	62.000	62.000	62.000	62.000
(-) Gastos Operativos (OPEX)	0	-14.200	-14.200	-14.200	-14.200	-14.200
(-) Depreciación Lineal (CAPEX / Vida Útil)	0	-14.999	-14.999	-14.999	-14.999	-14.999
(=) Utilidad Antes de Impuestos (UAI)	0	32.801	32.801	32.801	32.801	32.801
(-) Impuesto a la Renta (27%)	0	-8.856	-8.856	-8.856	-8.856	-8.856
(=) UTILIDAD NETA	0	23.945	23.945	23.945	23.945	23.945
(+) Depreciación (reverso — gasto no desembolsable)	0	14.999	14.999	14.999	14.999	14.999
(-) Inversión Inicial (CAPEX)	-74.995	0	0	0	0	0
FLUJO DE CAJA LIBRE (FCL)	-74.995	38.944	38.944	38.944	38.944	38.944
FCL Acumulado	-74.995	-36.051	2.892	41.836	80.780	119.724

Anexo 5 Flujo de caja libre

INDICADORES DE RENTABILIDAD Y RETORNO

Valor Actual Neto (VAN)	65.388
Tasa Interna de Retorno (TIR)	43,35%
Payback Period (meses)	23,11
Índice de Rentabilidad (IR = VAN/Inversión + 1)	1,87
ROI a 5 Años (%)	159,64

Anexo 6 Indicadores de rentabilidad y retorno

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD						
VAN según Tasa de Descuento (WACC)						
WACC	8,0%	10,0%	12,0%	14,0%	16,0%	18,0%
VAN (USD)	80.496	72.632	65.388	58.702	52.518	46.789
VAN según Días AOG Evitados (ceteris paribus)						
Días AOG/Año	2	3	4	5	6	
VAN (USD)	-13.508	25.934	65.394	104.875	144.355	
Payback (meses)	N/A	32,20	23,10	18,10	14,80	
VAN según Costo Diario AOG (ceteris paribus)						
Costo AOG (USD/día)	15.000	20.000	25.000	30.000	35.000	
VAN (USD)	39.073	65.394	65.394	91.701	118.016	
PUNTO DE EQUILIBRIO						
¿Cuántos días AOG mínimos para VAN ≥ 0?	El proyecto requiere al menos 1 día AOG evitado/año					
VAN con 0 días AOG (solo ahorro viáticos USD 32.000/año)	-13.508					

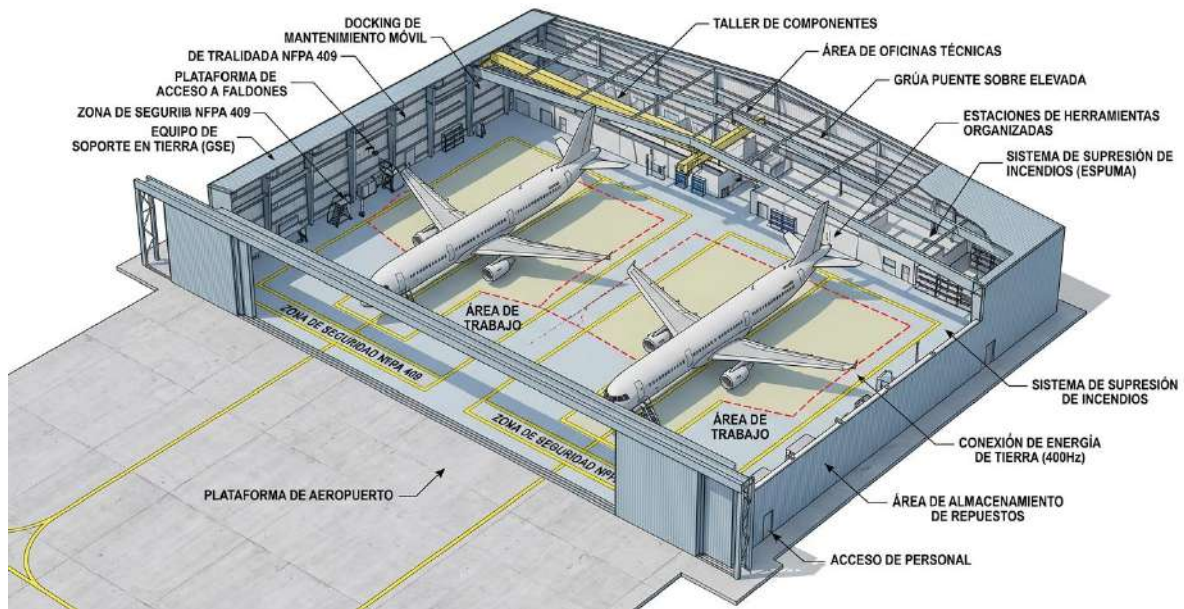
Anexo 7 Tabla sensibilidad

RESUMEN EJECUTIVO DE SENSIBILIDAD

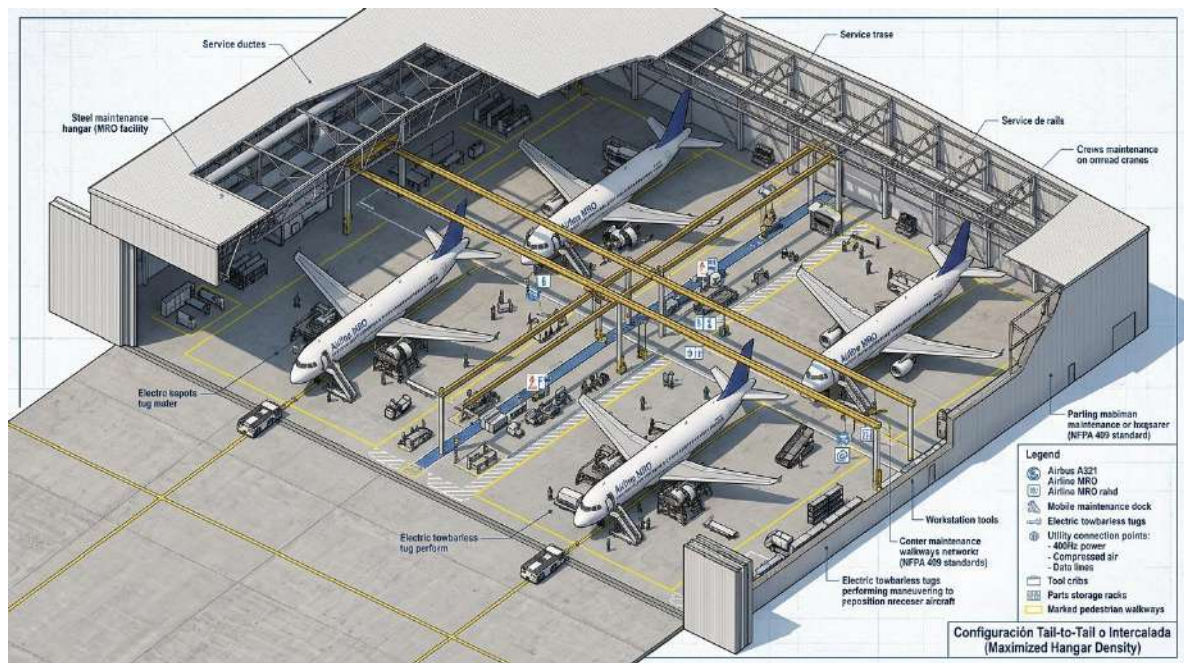
1. El VAN permanece positivo desde 1 día AOG evitado por año. Escenario base (2 días, USD 15K/día, WACC 12%) arroja VAN = USD 65.394.
2. El Payback del escenario base es ~23 meses (1,9 años). En escenario optimista (4 días AOG a USD 15K/día), cae a ~15 meses.
3. Sin ahorros AOG (solo viáticos USD 32.000/año), el VAN es negativo (-USD 13.508). El proyecto requiere al menos 1 día de interferencia AOG evitado.
4. La variable más sensible es el número de días AOG evitados, seguida del costo diario de interferencia AOG.
5. Con el escenario base conservador (2 días AOG, USD 15K/día, WACC 12%), el VAN = USD 65.394 y la TIR ≈ 44%.

Anexo 8 Resumen ejecutivo de sensibilidad

DIAGRAMA TÉCNICO DE HANGAR MRO: CONFIGURACIÓN NOSE-IN PARALELA (Nose-In Parallel Configuration)



Anexo 9 Configuración Nose-In Paralela en un hangar de mantenimiento aeronáutico



Anexo 10 Configuración Tail-to-Tail o Intercalada (Staggered / Interleaved Layout)

W/O Non-Routine Task Card

File Functions Window Help

Reset New Save Delete Notes Print Find View Sig... Items E/C N/R Fro... Transfer... Cre

General Optional 1 Optional 2 Optional 3 Optional 4 Work Accomplished Schedule

W/O:

A/C:

E/C:

P/N:

P/N S/N:

Task Card:
Rev:
CAT:
Type:

Description:

SCHL TaskCard:
0

Defect:
DEF-001
1

Status:
Status Category:

W/O Phase:

Sort Order:

By:

Classification:
☒ Non Routine
 ☐ Action Order

☐ Additional Work

Task Priority:
HR/MN
Open Station

Open On:
00
00

Quotation NO:

Due At:
A/C Hours:

A/C Cycles:

Over Due

Cador:

☐ Warranty

☐ Damage

Anexo 11 Interfaz Oficial de TRAX eMRO

7. Glosario de Términos y Siglas

A

- **AIMS / AMOS / TRAX:** Sistemas de software ERP (Enterprise Resource Planning) diseñados específicamente para la gestión de la información del mantenimiento aeronáutico (MRO).
- **AMB:** Aeropuerto Internacional Arturo Merino Benítez (Santiago, Chile).
- **AMC (Acceptable Means of Compliance):** Medios Aceptables de Cumplimiento. Estándares no vinculantes adoptados por autoridades (como EASA) que sirven para ilustrar cómo establecer el cumplimiento de un reglamento básico.
- **AMM (Aircraft Maintenance Manual):** Manual de Mantenimiento de la Aeronave. Documento oficial emitido por el fabricante (OEM) que contiene los procedimientos técnicos obligatorios para mantener la aeronavegabilidad.
- **AMT (Aviation Maintenance Technician):** Técnico de Mantenimiento Aeronáutico (Mecánico de aviación).
- **AOA (Ahorro Operativo Anual):** Métrica financiera que representa la reducción de gastos recurrentes (como lucro cesante y viáticos) lograda tras implementar un proyecto.
- **AOG (Aircraft On Ground):** ya sea por fallas imprevistas o por mantenimiento programado, generando lucro cesante para la aerolínea. En el contexto de este estudio, las aeronaves en estado AOG son aprovechadas oportunistamente para la instrucción práctica de técnicos bajo supervisión
- **ATA (Air Transport Association):** Sistema de numeración estandarizado a nivel mundial (Capítulos ATA) para clasificar los sistemas y componentes de una aeronave (ej. ATA 32 para Tren de Aterrizaje).

B

- **Boroscopia (Borescope Inspection):** Técnica de Ensayo No Destructivo (NDT) que utiliza una sonda óptica flexible para inspeccionar visualmente los componentes internos de un motor (alabes, cámara de combustión) sin necesidad de desarmarlo.

C

- **CAPEX (Capital Expenditure):** Inversión inicial en bienes de capital requerida para el despliegue del proyecto (ej. compra de hardware inmersivo, desarrollo de software y acondicionamiento de salas).
- **CBT / CBTA (Computer-Based Training / Competency-Based Training and Assessment):** Instrucción teórica impartida mediante ordenadores o sistemas interactivos. La modalidad CBTA enfoca el aprendizaje en la evaluación de competencias prácticas.
- **C-Check:** Mantenimiento Mayor o Pesado. Inspección exhaustiva que requiere retirar la aeronave de la línea de vuelo durante varios días o semanas, desarmando gran parte de sus componentes estructurales y sistemas.
- **CIAC:** Centro de Instrucción de Aeronáutica Civil.
- **CMA (Centro de Mantenimiento Aeronáutico):** Organización aprobada por la autoridad aeronáutica (bajo la norma DAN 145 en Chile o Parte 145 internacional) para ejecutar trabajos de mantenimiento en aeronaves.

D

- **DAN (Documento Aeronáutico Normativo):** Norma técnica de cumplimiento obligatorio emitida por la DGAC de Chile. (Ej. DAN 65 para licencias, DAN 145 para centros de mantenimiento, DAN 147 para centros de instrucción).
- **DAR (Documento Aeronáutico Reglamentario):** Reglamento aeronáutico promulgado mediante Decreto Supremo en Chile.
- **DES (Dispositivos de Entrenamiento Sintético):** Concepto regulatorio propuesto para englobar cualquier hardware o software (incluyendo simuladores VR) que replique fenómenos operacionales para fines de instrucción aeronáutica.

- **DGAC (Dirección General de Aeronáutica Civil):** Autoridad rectora de la aviación civil en Chile.
- **Dirty Dozen (La Docena Sucia):** Lista de los doce precursores de factores humanos (ej. fatiga, estrés, falta de comunicación, exceso de confianza) que más contribuyen a los errores y accidentes en el mantenimiento aeronáutico.

E

- **EASA (European Union Aviation Safety Agency):** Agencia Europea de Seguridad Aérea. Órgano regulador de la aviación civil en la Unión Europea.
- **EWIS (Electrical Wiring Interconnection System):** Sistema de Interconexión de Cableado Eléctrico de una aeronave.

F

- **FAA (Federal Aviation Administration):** Administración Federal de Aviación. Autoridad rectora de la aviación civil en los Estados Unidos.
- **Fly-by-Wire:** Sistema que reemplaza los controles de vuelo manuales convencionales de una aeronave por una interfaz electrónica (presente en la familia A320).
- **FOD (Foreign Object Debris / Damage):** Escombros o Daño por Objeto Extraño. Cualquier elemento ajeno a la aeronave (herramientas olvidadas, piedras, hardware) que puede causar daños catastróficos, especialmente al ser succionado por los motores.

H

- **HMD (Head-Mounted Display):** Dispositivo de visualización montado en la cabeza (como las gafas Meta Quest o Magic Leap) utilizado para sumergir al usuario en entornos de Realidad Virtual o Mixta.
- **HRV (Heart Rate Variability):** Variabilidad de la Frecuencia Cardíaca. Indicador biométrico utilizado para medir objetivamente la carga cognitiva, el estrés mental y el estado de relajación de un técnico durante la instrucción.

J

- **Jacking System (Levantamiento sobre gatas):** Procedimiento crítico durante los C-Checks en el cual se levanta la aeronave completa utilizando gatas hidráulicas para poder realizar pruebas funcionales (ej. retracción del tren de aterrizaje).

L

- **LMS (Learning Management System):** Sistema de Gestión de Aprendizaje. Software utilizado por los centros de instrucción para administrar, documentar, rastrear y evaluar los cursos impartidos al personal técnico.

M

- **MEL (Minimum Equipment List):** Lista de Equipamiento Mínimo.
- **MRO (Maintenance, Repair, and Overhaul):** Mantenimiento, Reparación y Revisión. Término global que define a la industria y a las instalaciones dedicadas al mantenimiento aeronáutico.
- **MRO 4.0:** Evolución del mantenimiento aeronáutico tradicional hacia la digitalización total, integrando inteligencia artificial, IoT, Realidad Extendida (XR) y Big Data.

N

- **NASA-TLX (Task Load Index):** Cuestionario estandarizado desarrollado por la NASA para realizar una evaluación subjetiva y multidimensional de la carga de trabajo mental y física de un operador (Mide factores como demanda mental, frustración y esfuerzo).
- **NDT / END (Non-Destructive Testing / Ensayos No Destructivos):** Técnicas de análisis utilizadas en aeronáutica para evaluar las propiedades de un material o estructura (ej. detección de microfisuras) sin causar daños permanentes a la pieza.

O

- **OACI / ICAO (Organización de Aviación Civil Internacional):** Agencia especializada de las Naciones Unidas que establece los principios y técnicas de la navegación aérea internacional.
- **OEM (Original Equipment Manufacturer):** Fabricante de Equipo Original (por ejemplo, Airbus o Boeing).
- **OJT (On-the-Job Training):** Entrenamiento en el puesto de trabajo. Instrucción práctica tradicional que se realiza sobre aeronaves reales durante la ejecución real de tareas de mantenimiento.
- **OPEX (Operational Expenditure):** Gastos Operativos. Costos continuos y recurrentes necesarios para mantener en funcionamiento el laboratorio (ej. licenciamiento de software anual, mantención de servidores).

P

- **Payback Period:** Período de Recuperación de Inversión. Tiempo necesario para que los flujos de caja líquidos de un proyecto igualen a la inversión inicial (CAPEX).

R

- **ROI (Return on Investment):** Retorno sobre la Inversión. Métrica financiera que evalúa la rentabilidad de una inversión, expresada en porcentaje.
- **RV / VR (Realidad Virtual):** Entorno digital inmersivo y completamente simulado que sustituye la visión del mundo real del usuario mediante el uso de un visor (HMD).
- **RM / MR (Realidad Mixta):** Tecnología que fusiona el mundo físico real con el mundo digital, permitiendo que el usuario interactúe simultáneamente con elementos holográficos y objetos reales del entorno.

S

- **SCORM (Shareable Content Object Reference Model):** Conjunto de estándares técnicos para productos de software de e-learning, exigido frecuentemente para la compatibilidad entre plataformas de Realidad Virtual y sistemas LMS.

- **SIPA (Sistema Integrado de Personal Aeronáutico):** Plataforma digital de la DGAC de Chile donde se registran oficialmente los perfiles, licencias y bitácoras del personal aeronáutico.
- **SME (Subject Matter Expert):** Experto en la materia. Técnico o ingeniero con vasta experiencia que valida los procedimientos dentro de una simulación virtual.

T

- **TIR (Tasa Interna de Retorno):** Tasa de descuento que hace que el Valor Actual Neto (VAN) de todos los flujos de caja de un proyecto sea igual a cero.
- **Troubleshooting:** Proceso sistemático y lógico de búsqueda, diagnóstico y resolución de fallas en sistemas complejos (frecuente en aviónica).

V

- **VAN (Valor Actual Neto):** Indicador financiero que determina la viabilidad de un proyecto al calcular el valor presente de los flujos de caja futuros descontados a una tasa específica (WACC).

W

- **WACC (Weighted Average Cost of Capital):** Costo Promedio Ponderado de Capital. Tasa de descuento utilizada en la evaluación financiera para descontar los flujos de caja futuros.
- **Walk-Around:** Inspección visual exterior (alrededor de la aeronave) que realiza el técnico o piloto antes del vuelo o durante el mantenimiento de línea para detectar irregularidades visibles.

X

- **XR (Extended Reality / Realidad Extendida):** Término paraguas que engloba a todas las tecnologías inmersivas: Realidad Virtual (VR), Realidad Aumentada (AR) y Realidad Mixta (MR).