

COLISIONES EN EL AIRE (MAC)

DEL RIESGO INVISIBLE A LA PREVENCIÓN EFECTIVA





BROCHURE DE SEGURIDAD OPERACIONAL

COLISIONES EN EL AIRE (MAC)

DEL RIESGO INVISIBLE A LA PREVENCIÓN EFECTIVA



Las **colisiones en el aire** (Midair Collisions – MAC) constituyen eventos de baja frecuencia, pero con consecuencias potencialmente catastróficas, lo que las convierte en uno de los riesgos residuales más críticos de la aviación. El análisis internacional desarrollado por organismos como la **Oficina de Investigación de Accidentes Aéreos de Francia** (BEA, sigla en francés), la **Administración Federal de Aviación** (FAA, sigla en inglés), la **Junta Nacional de Seguridad en el Transporte** (NTSB, sigla en inglés) y la **Autoridad de Aviación Civil del Reino Unido** (UK CAA, siglas en inglés) evidencia que estos eventos no ocurren de manera aleatoria, sino que responden a patrones

operacionales claramente identificables, asociados a factores humanos, técnicos y organizacionales recurrentes.

Desde la perspectiva de la taxonomía ADREP de la OACI, la clasificación MAC (Airprox/TCAS Alert/Loss of Separation/Near Midair Collisions/Midair Collisions) trasciende el concepto de colisión en vuelo y engloba un conjunto amplio de ocurrencias relacionadas con la separación y el riesgo de colisión entre aeronaves en vuelo. Esta clasificación constituye una herramienta esencial para el reporte, análisis, investigación y gestión del riesgo dentro de los Sistemas de Gestión de la Seguridad Operacional (SMS).

DEFINICIÓN Y CLASIFICACIÓN MAC SEGÚN LA TAXONOMÍA ADREP

La clasificación MAC abarca todas las ocurrencias vinculadas con la separación y el riesgo de colisión entre aeronaves mientras ambas se encuentran en vuelo, independientemente de si su origen se encuentra en la **provisión de los servicios de tránsito aéreo (ATS)** o en la **operación de la tripulación de vuelo**.

Dentro de esta clasificación se incluyen cuatro tipos de eventos interrelacionados, que representan distintos niveles de degradación de las barreras de separación y prevención de colisiones:

- **Proximidad peligrosa entre aeronaves (AIRPROX)**, incluyendo cuasi colisiones (near midair collision).
- **Pérdidas de separación**, ya sean verticales, laterales o longitudinales, conforme a los mínimos establecidos.
- **Alertas genuinas ACAS/TCAS**, tanto Traffic Advisories (TA) como Resolution Advisories (RA), asociadas a conflictos aire-aire.
- **Colisión en el aire (Midair Collision)** entre aeronaves.

1. AIRPROX (Proximidad Aérea)

Un AIRPROX se define como una situación en la que dos aeronaves se aproximan a una distancia tal que, a **juicio de un piloto o de un controlador de tránsito aéreo**, la seguridad pudo haberse visto comprometida.

Este tipo de evento no implica necesariamente **una colisión ni una infracción formal de los mínimos de separación**. Su evaluación se fundamenta en **la percepción de riesgo real**, considerando la distancia, la posición

relativa y las velocidades de las aeronaves involucradas.

Clasificación de AIRPROX (según OACI)

Tras su análisis, un AIRPROX se clasifica en una de las siguientes categorías:

- **A– Riesgo de colisión real (cuasi colisión).**
- **B– Seguridad posiblemente comprometida.**
- **C– Sin riesgo de colisión.**
- **D– Riesgo no determinable, por insuficiencia de información.**



2. Pérdida de separación

Una pérdida de separación se produce cuando dos aeronaves, operando en espacio aéreo controlado, incumplen los mínimos de separación vertical, lateral o longitudinal establecidos por los servicios ATS conforme a las normas de la OACI.

Aunque ambos conceptos están relacionados, no son equivalentes:

El **AIRPROX** responde a una **percepción subjetiva de riesgo**, basada en la apreciación de pilotos o controladores.

La **pérdida de separación** constituye una **infracción objetiva y técnica** de los mínimos aplicables.

Una pérdida de separación puede generar o no un AIRPROX, y un AIRPROX puede ocurrir aun cuando no exista una pérdida formal de separación.



3. Alertas ACAS/TCAS

El Sistema Anticolisión Abordo II (ACAS II) representa una barrera de último recurso, diseñada para reducir el riesgo de colisiones en el aire o cuasi colisiones, independientemente de los procedimientos de separación ATS.

El ACAS II puede emitir dos tipos de alertas:

Traffic Advisory (TA): alerta preventiva destinada a facilitar la localización visual de la aeronave en conflicto y preparar a la tripulación para una posible acción evasiva.

Resolution Advisory (RA): instrucción visual y sonora obligatoria que ordena la ejecución inmediata de una **maniobra vertical** (ascenso o descenso) para evitar una colisión inminente.

Los **RA tienen prioridad sobre las instrucciones del Controlador de tráfico aéreo (ATC, sigla en inglés)**, reflejando una situación crítica que requiere una respuesta inmediata por parte de la tripulación de vuelo.

4. Colisión en el aire

Una colisión en el aire es un accidente grave en el que dos aeronaves entran en contacto físico mientras ambas se encuentran en vuelo, excluyendo colisiones en tierra o impactos con obstáculos.

Aunque su ocurrencia es poco frecuente, este tipo de evento presenta una severidad extremadamente alta, con un elevado potencial de víctimas fatales y pérdida total de aeronaves, y representa el resultado final del fallo de todas las barreras de prevención y mitigación.

FACTORES DE RIESGO MÁS COMUNES EN LOS EVENTOS MAC

El análisis estadístico internacional identifica como factores de riesgo predominantes:

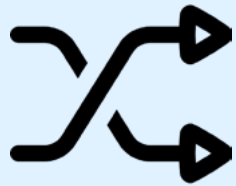
- **Alta densidad de tráfico**, especialmente en las cercanías de aeródromos y áreas de operación intensiva. Más del 50 % de las colisiones analizadas por la FAA ocurrieron en o cerca de aeródromos, principalmente en circuitos de tránsito o aproximaciones finales.
- **Operaciones a baja altitud**, principalmente por debajo de los 3,000 ft AGL. Los estudios del BEA y la FAA indican que la mayoría de los MAC se producen por debajo de los 3,000 ft AGL, donde se concentran las operaciones de reglas de vuelo visual (VFR, sigla en inglés) y de instrucción.
- **Fases críticas del vuelo**, aproximadamente dos tercios de las colisiones ocurren durante ascenso, descenso, aproximación o aterrizaje.
- **Predominio de operaciones VFR en condiciones VMC** con alta dependencia del principio see-and-avoid. En los estudios norteamericanos, casi el 100 % de los MAC ocurrieron en condiciones meteorológicas visuales (VMC, sigla en inglés), y la mayoría involucraron al menos una aeronave operando bajo reglas VFR.
- **Limitaciones del sistema visual humano**, investigaciones citadas por la UK CAA muestran que el ojo humano solo puede enfocar eficazmente un sector de 10–15°, lo que limita la detección de aeronaves en trayectorias convergentes.

CAUSAS RECURRENTE DE LOS EVENTOS MAC

Las investigaciones coinciden en identificar como causas recurrentes:



- **Fallo en la detección visual oportuna** asociado a la degradación del principio see-and-avoid. En estudios de la FAA/NTSB, aproximadamente 88 % de los pilotos involucrados no vieron la otra aeronave a tiempo para ejecutar una maniobra evasiva.



- **Trayectorias de convergencia con rumbo constante** que reducen significativamente el tiempo de reacción. En una proporción significativa de los casos, las aeronaves permanecieron visualmente estáticas en el parabrisas hasta segundos antes del impacto, reduciendo el tiempo efectivo de reacción a menos de 20 segundos.



- **Complacencia operacional** independientemente del nivel de experiencia del piloto. Datos del NTSB revelan que alrededor del 50 % de los pilotos involucrados tenían más de 1,500 horas de vuelo, y cerca de un tercio superaba las 3,000 horas, confirmando que la experiencia no elimina el riesgo.



- **Comunicaciones incompletas o mal interpretadas**, en múltiples investigaciones se identificaron comunicaciones incompletas, mal interpretadas o en frecuencias separadas, contribuyendo a una imagen mental errónea del tránsito.



- **Limitaciones de los sistemas de alerta**, en operaciones cercanas al terreno, sistemas como el TCAS inhiben las RAs por debajo de 1000 ft AGL, reduciendo su efectividad en fases finales del vuelo.

Contexto operacional típico de los eventos MAC

Los eventos MAC se concentran de forma recurrente en:

- **Condiciones meteorológicas visuales (VMC).** Más del 95 % de los eventos estudiados ocurrieron con buena visibilidad.
- **Operaciones diurnas**, la mayoría de los MAC se registran de día, cuando los pilotos confían plenamente en la detección visual.
- **Entornos rutinarios**, como circuitos de tránsito, aproximaciones prolongadas y rutas frecuentemente utilizadas.

Estos elementos confirman que los MAC **no son eventos fortuitos**, sino la manifestación de **riesgos conocidos en escenarios previsibles**.



Barreras principales contra los eventos MAC

La prevención de los MAC se sustenta en un modelo multicapa de barreras, cuya efectividad depende de su funcionamiento integrado:

Gestión estratégica de conflictos

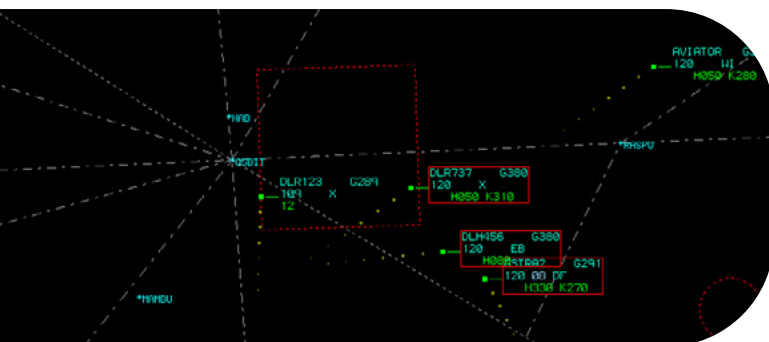
Estas barreras buscan prevenir la generación del conflicto desde el diseño del sistema:

- **Diseño del espacio aéreo**, incluyendo la clasificación del espacio, la estructura de rutas, niveles de vuelo, así como las salidas normalizadas por instrumentos (SID, sigla en inglés) y rutas estándar de llegada a la terminal (STAR, sigla en inglés) alrededor de aeropuertos.
- **Gestión del flujo y la capacidad del tránsito aéreo (ATFCM)**, que incluye la planificación de capacidad, el uso flexible del espacio aéreo y la gestión de flujos.
- **Sincronización del tránsito**, mediante la planificación de sectores, planificación multisectorial y secuenciación de llegadas y salidas.

Gestión estratégica de conflictos

Estas barreras actúan cuando el conflicto ya existe:

- **Gestión del conflicto por ATC**, mediante la provisión de separación entre aeronaves.
- **Gestión del conflicto por los pilotos**, quienes asumen la responsabilidad de evitar otras aeronaves, con o sin asistencia de información de tránsito por ATC.



Sistema de prevención de colisiones por ATC

- **Short-Term Conflict Alert (STCA)**, que alerta a los controladores sobre conflictos inminentes.

Prevención de colisiones a bordo

- **Airborne Collision Avoidance System (ACAS/TCAS)**, diseñado para proporcionar alertas y resoluciones de última instancia.
- **Evitación visual a bordo (see-and-avoid)**, que continúa siendo una barrera fundamental, especialmente en operaciones VFR, aunque limitada por las capacidades humanas.

Buenas prácticas para la prevención de eventos MAC

Prácticas operacionales

- Implementar escaneo visual estructurado y continuo, demostrado como la barrera más efectiva frente a la limitación visual humana.
- Incrementar la vigilancia en áreas donde las estadísticas muestran mayor concentración de eventos: aeródromos, circuitos y zonas de entrenamiento.

Prácticas tecnológicas

- Uso permanente de luces anticollisión y de aterrizaje, que incrementan significativamente la detectabilidad visual.
- Empleo constante de transpondedores con reporte de altitud (modo C/S), que permiten alertas TCAS en aeronaves cercanas.

Prácticas humanas y organizacionales

- Reconocer que la visión humana es fallible, incluso en pilotos experimentados.
- Gestionar la carga de trabajo y la fatiga, factores presentes en un alto porcentaje de eventos analizados.
- Fomentar el reporte de AIRPROX y cuasi colisiones, herramienta clave para identificar tendencias antes de un accidente.



RIESGO EMERGENTE DE EVENTOS MAC ASOCIADO AL AUGE DE LAS AERONAVES NO TRIPULADAS (UAS/RPAS)



El crecimiento acelerado de las operaciones con aeronaves no tripuladas (UAS/RPAS) ha introducido un nuevo perfil de riesgo de Colisiones en el Aire (MAC), caracterizado por la coexistencia de aeronaves tripuladas y no tripuladas compartiendo el mismo espacio aéreo, particularmente a baja altitud, en entornos cercanos a aeródromos y sobre áreas urbanas.

A diferencia de la aviación tripulada, las operaciones con UAS presentan características operacionales diferenciadas que incrementan el riesgo de eventos MAC, entre las que destacan limitaciones inherentes al principio see-and-avoid, perfiles de vuelo altamente variables, y un número creciente de operadores con distintos niveles de formación y madurez operacional. Estas condiciones generan nuevas interacciones de riesgo, especialmente en el espacio aéreo bajo, donde históricamente ya se concentra la mayor incidencia de AIRPROX, pérdidas de separación y cuasi colisiones.

Ante este nuevo escenario operacional, los Proveedores de Servicios de Navegación Aérea (ANSP) desempeñan un papel fundamental en la mitigación del riesgo de eventos MAC entre aeronaves tripuladas y no tripuladas, mediante la implementación de sistemas de Gestión del Tránsito de Aeronaves No Tripuladas (UTM – Unmanned Aircraft System Traffic Management).

Un sistema UTM permite establecer barreras estratégicas y tácticas específicas para las operaciones UAS, integrándose de forma coordinada con los servicios ATS.

La prevención de las colisiones en el aire no depende de la ausencia de errores, sino de la capacidad del sistema para anticiparlos, detectarlos y contenerlos antes de que se alineen. Los eventos MAC nos recuerdan que el riesgo no suele manifestarse en escenarios extremos, sino en operaciones rutinarias, con buen clima y procedimientos conocidos, donde la confianza puede sustituir a la vigilancia.

Gestionar este riesgo exige disciplina operativa, pensamiento sistémico y una cultura de reporte sólida, en la que cada AIRPROX, cada pérdida de separación y cada alerta ACAS se entiendan como oportunidades de aprendizaje y fortalecimiento del sistema. Cuando el diseño del espacio aéreo, los servicios ATS, la tecnología y el desempeño humano trabajan de manera integrada, el cielo deja de ser un espacio reactivo y se convierte en un entorno gestionado conscientemente.

La seguridad operacional no se construye esperando que nada ocurra, sino **actuando antes de que todo falle.**



Eduardo García Cuevas

Especialista en aviación con 15 años de experiencia en la industria, con una trayectoria sólida en Servicios de Tránsito Aéreo (ATS) y Gestión de la Seguridad Operacional (SMS). Se desempeña como Supervisor de Torre de Control de Tránsito Aéreo y Controlador de Tránsito Aéreo, combinando experiencia operativa con una visión estructurada de la seguridad y la gestión del riesgo.

Cuenta con experiencia como Instructor OJT para Control de Tránsito Aéreo, Instructor SMS en la Academia Superior de Ciencias Aeronáuticas (ASCA), Auditor Interno SMS y Analista de Gestión de Riesgos de Seguridad Operacional, participando activamente en el fortalecimiento de la cultura de seguridad operacional y en la mejora continua de los procesos aeronáuticos. Su perfil integra conocimiento técnico, disciplina operacional y compromiso con los más altos estándares de seguridad en la aviación.

BROCHURE DE SEGURIDAD OPERACIONAL

