

Manual del Curso Teórico de Piloto Privado de Avión



MÓDULO H

Principios de Vuelo

16 horas · Temas 37 al 38

Según RAAC 141 · Apéndice A · V Edición Mayo 2026

- Aerodinámica básica y principios de vuelo
- Reconocimiento de pérdida (stall)
- Entrada en barrena (spin) y técnicas de recuperación

Índice de Contenidos

Prefacio	8
Cómo está organizado este manual.....	10
Carga horaria sugerida (16 horas cátedra)	10
Programa oficial — Módulo H (RAAC 141 Apéndice A, V Edición Mayo 2026)	11
Niveles de aprendizaje	11
Temas del Módulo H — Principios de vuelo (16 horas).....	12
Abreviaturas y siglas utilizadas	13
PARTE 1 — Aerodinámica básica y principios de vuelo	16
Capítulo 1. La atmósfera como medio de vuelo	16
1.1 Propiedades físicas del aire.....	16
1.2 La atmósfera estándar internacional (ISA).....	16
Capítulo 2. El aire en movimiento.....	17
2.1 Flujo y línea de corriente	17
2.2 Ecuación de continuidad	18
2.3 Ecuación de Bernoulli.....	18
2.4 Tubo de Pitot y línea estática.....	19
Capítulo 3. El perfil aerodinámico.....	20
3.1 Terminología del perfil.....	20
3.2 Tipos de perfiles	20
3.3 Ángulo de ataque (AOA, α)	20
3.4 Ángulo de incidencia (AOI).....	22
3.5 Otros ángulos del ala.....	22
Capítulo 4. La sustentación	22
4.1 Origen físico	22
4.2 La ecuación de la sustentación	23
4.3 Coeficiente de sustentación CL.....	23
4.4 Distribución de presión sobre el perfil.....	24
4.5 Centro de presión y centro aerodinámico	25
Capítulo 5. La resistencia	25
5.1 Concepto	25
5.2 Resistencia parásita.....	25
5.3 Resistencia inducida.....	25
5.4 Resistencia total.....	26

5.5 Curva polar L/D	27
Capítulo 6. Las cuatro fuerzas y el vuelo recto nivelado.....	27
6.1 Las cuatro fuerzas	27
6.2 Equilibrio en vuelo recto nivelado	27
6.3 Equilibrio en ascenso constante	28
6.4 Equilibrio en descenso constante (sin motor o con motor reducido)	29
6.5 Equilibrio en viraje nivelado.....	29
Capítulo 7. El ala como conjunto	30
7.1 Geometría del ala.....	30
7.2 Tipos de planforma	31
7.3 Distribución de sustentación a lo largo de la envergadura	31
7.4 Dispositivos hipersustentadores.....	31
7.5 Spoilers y aerofrenos	34
7.6 Winglets	34
Capítulo 8. Superficies y mandos de control	35
8.1 Mandos primarios	35
8.2 Mandos secundarios	36
8.3 Equilibrio de los mandos: balance estático y aerodinámico.....	37
8.4 Esfuerzos sobre los mandos.....	38
8.5 Velocidad de maniobra (VA)	38
Capítulo 9. Estabilidad y los tres ejes.....	40
9.1 Concepto de estabilidad	40
9.2 Los tres ejes.....	40
9.3 Estabilidad longitudinal (pitch)	41
9.4 Estabilidad lateral (roll).....	41
9.5 Estabilidad direccional (yaw)	42
9.6 Trade-off estabilidad / maniobrabilidad.....	42
Capítulo 10. El viraje	42
10.1 Mecánica del viraje	42
10.2 Factor de carga en el viraje	43
10.3 Tipos de viraje	43
10.4 Aplicación operacional.....	44
Capítulo 11. La hélice	45
11.1 Principio de funcionamiento.....	45
11.2 Hélice de paso fijo.....	45

11.3 Hélice de paso variable o de velocidad constante.....	45
11.4 Efectos del motor / hélice sobre el avión	46
.....	47
Capítulo 12. Performance básica del avión	49
12.1 Curva de potencia (potencia requerida vs disponible)	49
12.2 Régimen de ascenso.....	49
12.3 Ángulo de ascenso	50
12.4 Crucero económico vs máximo	50
12.5 Descenso	50
12.6 Efectos de la altitud densidad sobre la performance	50
12.7 Efectos del peso sobre la performance	50
12.8 Efectos del viento sobre la performance en pista	51
PARTE 2 — Reconocimiento de la pérdida, entrada en barrena y técnicas de recuperación	52
Capítulo 13. La pérdida (stall) — aerodinámica.....	52
13.1 Definición precisa.....	52
13.2 Mecanismo aerodinámico de la pérdida	53
13.3 Ángulo de ataque crítico	54
13.4 La velocidad de pérdida (VS).....	54
13.5 VS varía con el peso	55
13.6 VS varía con el factor de carga	55
13.7 VS y configuración.....	55
13.8 VS y altitud / densidad	55
Capítulo 14. Reconocimiento de la pérdida.....	56
14.1 Síntomas previos a la pérdida (aproximación).....	56
14.2 Síntomas durante la pérdida.....	56
14.3 Reconocimiento por fase de vuelo	57
14.4 La «mente del piloto» en la pérdida inminente.....	58
Capítulo 15. Recuperación de la pérdida	58
15.1 Procedimiento estándar	58
15.2 Errores comunes en recuperación	59
15.3 Recuperación con potencia (power-on stall).....	60
15.4 Recuperación con flaps (configuración de aterrizaje)	60
Capítulo 16. Tipos especiales de pérdida.....	60
16.1 Pérdida acelerada (accelerated stall).....	60
16.2 Pérdida secundaria (secondary stall)	61

16.3 Pérdida cruzada (cross-control stall).....	61
16.4 Pérdida con hielo (icing-induced stall).....	61
16.5 Pérdida en aterrizaje (stall on landing).....	62
Capítulo 17. Pérdida y los avisos en cabina	62
17.1 El detector de pérdida (stall warning)	62
17.2 Indicador de AOA (AOA indicator)	62
17.3 Velocímetro y el «escenario peligroso».....	63
Capítulo 18. La barrena (spin) — aerodinámica	63
18.1 Definición	63
18.2 Aerodinámica de la autorrotación	64
18.3 Diferencia con la espiral.....	65
18.4 Condiciones que predisponen a barrena	65
18.5 Fases de la barrena	65
18.6 Tipos de barrena	66
18.7 Certificación para barrena	66
Capítulo 19. Recuperación de la barrena.....	66
19.1 Procedimiento estándar	66
19.2 Errores en la recuperación.....	67
19.3 Recuperación por modelo de avión	67
19.4 Altitud necesaria para recuperación.....	67
Capítulo 20. Spiral dive — la confusión peligrosa.....	68
20.1 Definición	68
20.2 Cómo se entra en espiral	68
20.3 Distinción crítica entre espiral y barrena	69
20.4 Recuperación de la espiral	69
20.5 El «178 segundos» de Illinois	69
Capítulo 21. Prevención: la disciplina del piloto PPA.....	70
21.1 Disciplina de velocidad.....	70
21.2 Disciplina de actitud.....	70
21.3 Disciplina de coordinación	70
21.4 Disciplina de configuración	70
21.5 Disciplina de peso y balance	71
21.6 Disciplina del entrenamiento periódico.....	71
21.7 Disciplina mental.....	71
Capítulo 22. Entrenamiento práctico recomendado	71

22.1 Ejercicios PPA típicos en aviones de categoría normal.....	71
22.2 Ejercicios en aviones acrobáticos (con instructor habilitado)	72
22.3 Recomendaciones	72
Capítulo 23. Conclusión integradora.....	72
Bibliografía y fuentes consultadas	73
Normativa argentina	73
Publicaciones técnicas argentinas	73
Normativa internacional	73
Textos clásicos de aerodinámica.....	73
Textos para piloto privado	74
Pérdida y barrena específicamente	74
Hélice y motor sobre avión	74
Estabilidad y control.....	75
Recursos didácticos y digitales.....	75
Recursos digitales argentinos esenciales.....	75

MANUAL DEL ALUMNO

PRINCIPIOS DE VUELO

Curso de Piloto Privado de Avión (PPA)

República Argentina — Regulación ANAC (RAAC)

Material de instrucción teórica — 16 horas cátedra

Áreas de conocimiento

1. Aerodinámica básica y los principios de vuelo.
2. Reconocimiento de la pérdida (stall), entrada en barrena (spin) y técnicas de recuperación.

Edición de instrucción — Uso académico

Prefacio

Este manual es material didáctico de referencia para la asignatura «Principios de Vuelo» del Curso de Piloto Privado de Avión (PPA) en la República Argentina. Está estructurado para cubrir las 16 horas cátedra exigidas por el programa oficial de la ANAC y desarrolla las dos áreas de conocimiento del programa, enmarcadas en la regulación argentina (RAAC, particularmente Parte 61 y Parte 91), las publicaciones técnicas aplicables, y los estándares internacionales (OACI Anexo 8, FAA Pilot's Handbook of Aeronautical Knowledge, EASA Aeronautical Knowledge for VFR Pilots).

La aerodinámica es la rama de la mecánica de fluidos que estudia el comportamiento del aire en torno a un objeto en movimiento relativo. Aplicada al avión, da respuesta a la pregunta más básica del piloto: ¿por qué vuela? Y, lo que es operacionalmente más importante, ¿cuándo deja de volar? El alumno PPA que comprende los principios de vuelo no opera el avión por memorización de procedimientos sino por entendimiento de la física: sabe por qué el ala produce sustentación, por qué un viraje cerrado eleva la velocidad de pérdida, por qué un avión cargado al límite trasero del centrado tiende a la inestabilidad, por qué la barrena es asimétrica y por qué la recuperación de la barrena tiene la forma específica que tiene. Sin ese entendimiento, el piloto es vulnerable: ante una situación no rutinaria, no tiene marco conceptual para decidir.

Esta asignatura es la base teórica del curso PPA. Sus conceptos atraviesan luego cada otra materia. Performance y planificación aplica aerodinámica al cálculo concreto. Meteorología explica el aire en que vuela el avión. Factores humanos describe al piloto que opera el avión. Procedimientos operacionales integra todo en situaciones reales. Pero la primera disciplina, la más fundamental, es esta: la de las fuerzas, los flujos, las superficies y las pérdidas. El alumno que la domina, llega al examen con ventaja sustancial.

El manual está pensado para aviones livianos y deportivos de instrucción típicos de la aviación general argentina: Cessna 150/152/172/182, Piper PA-28 Cherokee/Warrior/Archer, Diamond DA20/DA40, Tecnam P2002/P2008/P2010, Aero Boero AB-115/AB-180, Beechcraft Sundowner, además de motoplaneadores y aviones experimentales LSA frecuentes. Las cifras numéricas que aparecen (velocidades, factores, gradientes) son representativas de estos aviones; el dato preciso para cada operación es el POH del avión específico. Las particularidades argentinas — operación en altura del NOA, Patagonia con vientos persistentes, cordillera, calor estival pampeano — son aludidas donde corresponde para enraizar la teoría en la práctica nacional.

La segunda parte del manual cubre la pérdida (stall) y la barrena (spin): los dos estados aerodinámicos críticos que más muertes producen en aviación general en todo el mundo, incluyendo Argentina. Los informes JST son consistentes: pérdida de control en vuelo (LOC-I — Loss of Control In-flight) es la categoría dominante de accidentes mortales, y en muchos casos su origen es una pérdida desarrollada a

baja altitud que el piloto no reconoció a tiempo o que no supo recuperar. El alumno PPA debe llegar a la pista de instrucción no solo capaz de ejecutar una recuperación cuando el instructor lo provoca en un ejercicio, sino capaz de RECONOCER los síntomas en cualquier fase del vuelo y de PREVENIR la entrada en pérdida desde la propia gestión de la velocidad, la actitud y la coordinación. Este manual entrega el sustrato conceptual para ello.

Cómo está organizado este manual

La materia se divide en dos Partes que corresponden estrictamente a las áreas oficiales del programa PPA:

- Parte 1 — Aerodinámica básica y principios de vuelo. La atmósfera, el aire en movimiento, perfiles aerodinámicos, sustentación y resistencia, las cuatro fuerzas, el ala como conjunto, dispositivos hipersustentadores, mandos y superficies de control, estabilidad estática y dinámica, los ejes y el control, performance básica, el viraje, la hélice, los efectos del motor sobre el avión, y otros principios aplicados.
- Parte 2 — Reconocimiento de la pérdida, entrada en barrena y técnicas de recuperación. La pérdida en detalle: aerodinámica, factores, reconocimiento, recuperación; pérdida en distintas configuraciones (sin potencia, con potencia, en viraje, con flaps, en aceleración); accelerated stall y secondary stall; barrena: aerodinámica de la autorrotación, fases, tipos, recuperación; spiral dive como confusión peligrosa; prevención y entrenamiento del piloto PPA.

Carga horaria sugerida (16 horas cátedra)

Bloque	Contenido	Horas
1	La atmósfera como medio. Propiedades del aire. ISA	0,5
2	Flujo de aire. Ecuación de continuidad. Bernoulli	1,0
3	Perfil aerodinámico. Terminología. Ángulo de ataque	1,0
4	Sustentación: origen. Coeficientes. Distribución de presión	1,0
5	Resistencia: parásita, inducida, total. Curva de polar	1,0
6	Las cuatro fuerzas. Equilibrio en vuelo recto y nivelado	0,5
7	El ala: planforma, aspecto, torsión, dispositivos hipersustentadores	1,0
8	Superficies de control. Mandos primarios y secundarios. Trim	1,0
9	Estabilidad estática y dinámica. Los tres ejes	1,0
10	El viraje. Factor de carga. Velocidad de pérdida en viraje	1,0
11	La hélice. Efectos del motor sobre el avión (torque, P-factor, slipstream, gyro)	1,0
12	Performance básica: ascenso, descenso, crucero. Curva de potencia	1,0
13	La pérdida: aerodinámica, factores, reconocimiento	1,5
14	Pérdida en distintas configuraciones y situaciones	1,0

15	La barrena: autorrotación, fases, tipos, recuperación	1,5
16	Spiral dive vs barrena. Prevención. Entrenamiento PPA	1,0
	TOTAL	16,0

NOTA: La distribución es indicativa. El instructor adaptará tiempos al ritmo del grupo. Se recomienda fuertemente que el contenido teórico de pérdida y barrena se sincronice con sesiones prácticas en avión: ejercicio de aproximación a la pérdida, pérdida con y sin potencia, recuperación, ejercicios en configuración de aterrizaje, todo a altitud segura de al menos 3.000 ft AGL. La barrena completa se practica solo en aviones certificados para ello (Aero Boero AB-115 con instructor calificado, por ejemplo); en aviones de la categoría normal (Cessna 152/172, Piper PA-28) solo se practica APROXIMACIÓN a la pérdida sin entrar en barrena.

Programa oficial — Módulo H (RAAC 141 Apéndice A, V Edición Mayo 2026)

El siguiente programa corresponde al Módulo de materia H del Apéndice A de la RAAC Parte 141, edición vigente. Establece los temas obligatorios y el nivel de aprendizaje requerido para cada uno al completar el curso.

Niveles de aprendizaje

Para las diversas materias que comprende el currículo del curso, se establecen los siguientes niveles de aprendizaje, determinando el grado de conocimiento, pericia y aptitudes que se requiere de los estudiantes al completar cada materia:

Nivel	Descripción
Nivel 1	Conocimiento básico de principios generales. No requiere el desarrollo de pericia y habilidad práctica. Se alcanza a través de la instrucción teórica, la demostración y discusión.
Nivel 2	Comprensión de principios generales relacionados con los conocimientos adquiridos. Requiere del desarrollo de habilidades para realizar operaciones básicas. Se alcanza a través de la instrucción teórica, la demostración, discusión y de aplicación práctica limitada.
Nivel 3	Fijación profunda de los fundamentos y un alto grado de aplicación práctica. Habilidad práctica para aplicar los conocimientos con rapidez, precisión y buen juicio. Desarrollo de habilidades y preparación suficiente para operar una aeronave con seguridad.

Temas del Módulo H — Principios de vuelo (16 horas)

Nivel	Tema N°	Descripción del tema
3	37	Aerodinámica básica y los principios de vuelo.
3	38	Reconocimiento de la pérdida (stall), entrada en barrena (spin) y técnicas de recuperación.

Abreviaturas y siglas utilizadas

Sigla	Significado
OACI / ICAO	Organización de Aviación Civil Internacional
ANAC	Administración Nacional de Aviación Civil (autoridad argentina)
RAAC	Reglamentos Argentinos de Aviación Civil
JST	Junta de Seguridad en el Transporte
POH / AFM	Pilot's Operating Handbook / Airplane Flight Manual
ISA	International Standard Atmosphere
AOA / α	Angle of Attack / Ángulo de ataque
AOI	Angle of Incidence / Ángulo de calado
L / D	Lift / Drag — Sustentación / Resistencia
L/D	Relación sustentación/resistencia (eficiencia)
CL / CD	Coeficiente de sustentación / Coeficiente de resistencia
CL_max	Coeficiente de sustentación máximo
α_{crit}	Ángulo de ataque crítico
ρ (rho)	Densidad del aire
q	Presión dinámica = $\frac{1}{2}\rho V^2$
S	Superficie alar
AR	Aspect Ratio — Alargamiento del ala
MAC	Mean Aerodynamic Chord — Cuerda aerodinámica media
CG	Center of Gravity — Centro de gravedad
AC / CP	Aerodynamic Center / Center of Pressure
IAS / CAS / TAS / GS	Indicated / Calibrated / True / Ground Speed
VS / VS0 / VS1	Velocidades de pérdida (general / configuración aterrizaje / configuración limpia)
VX / VY	Velocidades de mejor ángulo / mejor régimen de ascenso
VA	Velocidad de maniobra

VNO / VNE	Velocidad normal de operación / nunca exceder
VFE	Velocidad máxima con flaps extendidos
VLE / VLO	Velocidad con tren extendido / extendiendo el tren
VR / V1 / V2	Velocidades de rotación / decisión / despegue seguro
VLOF	Velocidad de despegue (lift-off)
g / G	Aceleración de la gravedad / factor de carga
FL	Flight Level
AGL / AMSL	Above Ground Level / Above Mean Sea Level
DA / PA	Density Altitude / Pressure Altitude
OAT	Outside Air Temperature
MTOW / MLW	Maximum Take-Off / Landing Weight
RPM / MAP	Revoluciones por minuto / Manifold pressure
MIXT	Mezcla aire-combustible
FLAPS	Dispositivos hipersustentadores del borde de fuga
SLATS	Dispositivos hipersustentadores del borde de ataque
AILERON	Alerón
ELEV	Elevador / Profundidad
RUDDER	Timón de dirección
TRIM	Compensador
STAB	Estabilizador
BLD / WSH	Blade / Washout (torsión del ala)
RC	Rate of Climb — Régimen de ascenso (ft/min)
LOC-I	Loss of Control In-flight
CFIT	Controlled Flight Into Terrain
P-FACTOR	Factor P (asimetría de tracción de la hélice)
SLIPSTREAM	Estela helicoidal de la hélice

GYRO PRECESSION	Precesión giroscópica
TORQUE	Par motor (reacción)
LMD / WCG	Limited / Wide CG envelope
FBW	Fly-By-Wire (no aplica a PPA)

PARTE 1 — Aerodinámica básica y principios de vuelo

Esta parte construye, paso a paso, el modelo físico con el que se entiende el vuelo del avión. Comienza por las propiedades del medio (el aire) y sus leyes de comportamiento, pasa por el perfil aerodinámico y el origen de la sustentación y la resistencia, llega a las cuatro fuerzas en equilibrio, integra el ala completa con sus dispositivos, desarrolla la estabilidad y los mandos, y cierra con performance básica, el viraje, la hélice y los efectos del motor sobre el avión. Cada concepto se introduce con la mínima formalidad necesaria y con conexión inmediata a la operación de un avión PPA típico en territorio argentino.

Capítulo 1. La atmósfera como medio de vuelo

1.1 Propiedades físicas del aire

El aire es un fluido gaseoso cuyo comportamiento puede modelarse, para los rangos de presión, temperatura y velocidad de la aviación general, como un gas ideal compresible. Para velocidades subsónicas bajas ($M < 0,3$, prácticamente todo el rango PPA), el aire puede tratarse incluso como incompresible: las variaciones de densidad por el paso del avión son despreciables. Esta simplificación habilita el uso de la ecuación de Bernoulli y otras herramientas clásicas.

Propiedades relevantes del aire para aerodinámica:

- Densidad (ρ): masa por unidad de volumen. Al nivel del mar, atmósfera ISA: $1,225 \text{ kg/m}^3$. Disminuye con altitud y con temperatura.
- Presión estática (p): fuerza por unidad de superficie. Al nivel del mar ISA: $1013,25 \text{ hPa}$.
- Temperatura (T): determina densidad. ISA al nivel del mar: $15 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Viscosidad: resistencia al esfuerzo cortante. Pequeña en aire pero responsable de la capa límite.
- Velocidad del sonido (a): depende de temperatura. Al nivel del mar ISA: $340 \text{ m/s} = 661 \text{ kt}$.

1.2 La atmósfera estándar internacional (ISA)

Ya tratada en otros manuales. Recordatorio operacional:

- Al nivel del mar: $p = 1013,25 \text{ hPa}$, $T = +15 \text{ }^\circ\text{C}$, $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$.
- Gradiente vertical de temperatura: $-2 \text{ }^\circ\text{C}$ cada 1.000 ft hasta la tropopausa estándar (36.090 ft).
- Sobre 36.090 ft : temperatura constante en $-56,5 \text{ }^\circ\text{C}$ (irrelevante para PPA típico).
- La densidad cae aproximadamente 3% cada 1.000 ft cerca de superficie.

Importancia para principios de vuelo:

- Toda la performance aerodinámica del avión depende de la densidad. A menor densidad (más altitud, más calor), menor sustentación a la misma IAS y misma actitud.

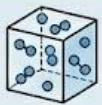
- La velocidad indicada (IAS) que el piloto lee «esconde» la densidad: a IAS 60 kt en SAEZ al nivel del mar y en SASA Salta a 4.058 ft, la TAS es distinta y la sustentación generada por unidad de IAS es la misma (porque IAS «cancela» el efecto de densidad).
- Las velocidades de pérdida en el POH están dadas en IAS o CAS, no en TAS. Esto significa que la pérdida ocurre A LA MISMA IAS en cualquier altitud (con masa constante), aunque la TAS verdadera de pérdida sea mayor en altura.
- La distancia de despegue, sin embargo, se calcula en función de la DA y depende de TAS verdadera para lograr VLOF: a más DA, más distancia.

PROPIEDADES FÍSICAS DEL AIRE Y ATMÓSFERA ISA (INTERNATIONAL STANDARD ATMOSPHERE)

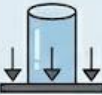
EL AIRE COMO FLUIDO GASEOSO: Comportamiento de Gas Ideal Compresible (rangos generales de aviación)

SIMPLIFICACIÓN OPERACIONAL PARA BAJAS VELOCIDADES (PPA, $M < 0,3$): Tratado como **INCOMPRESIBLE**, permitiendo uso de Bernoulli

1. PROPIEDADES FÍSICAS RELEVANTES



DENSIDAD (ρ): Masa por volumen.
(ISA MSL: $1,225 \text{ kg/m}^3$)
DISMINUYE CON ALTITUD Y TEMPERATURA



PRESIÓN ESTÁTICA (p):
Fuerza por superficie.
(ISA MSL: $1013,25 \text{ hPa}$)



TEMPERATURA (T):
Determina energía cinética y afecta densidad.
(ISA MSL: $+15 \text{ }^\circ\text{C}$)

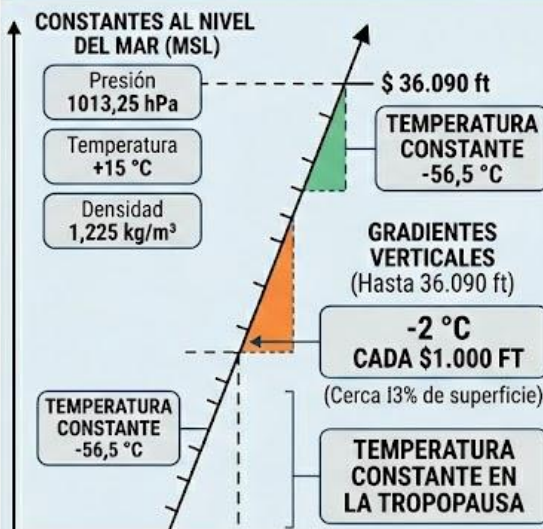


VISCOSIDAD:
Resistencia al esfuerzo cortante. Pequeña, pero responsable de la **CAPA LÍMITE**



VELOCIDAD DEL SONIDO (a):
Depende de T .
(ISA MSL: $340 \text{ m/s} \approx 661 \text{ kt}$)

2. LA ATMÓSFERA ESTÁNDAR INTERNACIONAL (ISA)



3. IMPORTANCIA CRÍTICA PARA PRINCIPIOS DE VUELO

GENERACIÓN DE SUSTENTACIÓN Y RESISTENCIA:



Menor densidad \rightarrow Mayor TAS necesaria para misma Sustentación

PERFORMANCE DEL MOTOR Y LA HÉLICE:



Aire caliente/alto \rightarrow Menos oxígeno y tracción

ALTITUD DE DENSIDAD:

Corregida por T no estándar.
Día caluroso/alto \rightarrow Carreras más largas, ROC reducido



Flightpath

Capítulo 2. El aire en movimiento

2.1 Flujo y línea de corriente

Cuando el avión se mueve por el aire (o el aire pasa sobre el avión, equivalentemente desde el marco de referencia del avión), el fluido se desplaza siguiendo trayectorias llamadas líneas de corriente (streamlines). Cada partícula sigue una trayectoria que depende de la forma del objeto y de las condiciones del flujo.

Conceptos:

- Flujo laminar: las partículas se desplazan en capas paralelas, sin mezclarse. Bajo, ordenado, eficiente.
- Flujo turbulento: las partículas se mezclan caóticamente. Mayor resistencia.
- Capa límite: la fina capa de aire en contacto con la superficie del avión donde, por la viscosidad, la velocidad varía de cero (en la superficie) a la velocidad del flujo libre.
- Punto de transición: donde el flujo laminar se vuelve turbulento dentro de la capa límite.
- Separación del flujo: cuando la capa límite se «despega» de la superficie. Es lo que ocurre en la pérdida.

2.2 Ecuación de continuidad

Para un flujo incompresible (válido en aviación PPA), la masa que entra en un tubo de corriente sale por el otro extremo. Si el tubo se estrecha, la velocidad aumenta:

$\rho \times A \times V = \text{constante}$, donde A es el área transversal y V la velocidad.

Como ρ es aproximadamente constante en bajas velocidades:

$A \times V = \text{constante} \rightarrow$ si A disminuye, V aumenta proporcionalmente.

Aplicación: cuando el aire pasa sobre la curvatura superior de un ala, las líneas de corriente se acercan (el tubo se estrecha) y la velocidad aumenta. Este aumento de velocidad será la base para entender la presión reducida en la superficie superior del ala.

2.3 Ecuación de Bernoulli

Para un fluido incompresible, sin viscosidad, en flujo estacionario y a lo largo de una línea de corriente, se cumple:

$$p + \frac{1}{2}\rho V^2 + \rho gh = \text{constante}$$

Donde:

- p = presión estática.
- $\frac{1}{2}\rho V^2$ = presión dinámica (también llamada presión de impacto o «q»).
- ρgh = presión hidrostática (varía con altura).

Para aplicación al ala, las diferencias de altura entre el extradós y el intradós son despreciables, así que:

$$p + \frac{1}{2}\rho V^2 = \text{constante}$$

Consecuencia: SI LA VELOCIDAD AUMENTA, LA PRESIÓN ESTÁTICA DISMINUYE. Si la velocidad disminuye, la presión aumenta.

Aplicación al ala: sobre el extradós (cara superior, curvada), la velocidad del aire es mayor que sobre el intradós (cara inferior, más plana). Por Bernoulli, la presión sobre el extradós es MENOR que sobre el

intradós. La diferencia de presiones, integrada en toda el área, da una fuerza neta hacia arriba: la sustentación.



La sustentación se genera por la diferencia de presión entre extradós e intradós del perfil alar.

NOTA: Bernoulli explica parte del mecanismo pero NO es la única explicación de la sustentación. La teoría más completa incluye la deflexión del aire hacia abajo (downwash), la circulación (Kutta-Joukowski) y la conservación del momento. Para PPA basta entender que (a) el aire fluye más rápido sobre el extradós, (b) eso reduce la presión por encima, (c) el ala empuja aire hacia abajo y, por tercera ley de Newton, recibe empuje hacia arriba. Las tres descripciones son consistentes y complementarias.

2.4 Tubo de Pitot y línea estática

Los anemómetros e indicadores de velocidad de los aviones explotan directamente Bernoulli. El tubo de Pitot capta la presión total (estática + dinámica) frontalmente. La línea estática capta solo la presión estática. La diferencia es $\frac{1}{2}\rho V^2$ y se traduce a IAS mediante el calibrado del instrumento (que asume ρ ISA al nivel del mar).

- Pitot bloqueado en ascenso: la IAS aumenta falsamente (la presión estática cae con altitud, pero la dinámica encerrada en el Pitot permanece).
- Pitot bloqueado en descenso: la IAS disminuye falsamente.
- Línea estática bloqueada: el altímetro queda pegado a la altitud del bloqueo; el VSI deja de responder; la IAS se vuelve errática.

Capítulo 3. El perfil aerodinámico

3.1 Terminología del perfil

Un perfil aerodinámico (airfoil) es la sección transversal del ala. Sus elementos:

- Borde de ataque (leading edge, LE): el redondeado, frontal.
- Borde de salida o de fuga (trailing edge, TE): el agudo, posterior.
- Cuerda (chord): línea recta del LE al TE. Longitud característica del perfil.
- Línea media o de curvatura media (mean camber line): línea equidistante entre extradós e intradós. Si el perfil es simétrico, coincide con la cuerda.
- Espesor máximo: distancia máxima entre extradós e intradós, expresada como porcentaje de la cuerda. Perfiles típicos PPA: 10–14 %.
- Curvatura máxima (camber): distancia máxima entre la línea media y la cuerda. Perfiles típicos PPA: 1–4 %.
- Posición del espesor máximo y de la curvatura máxima: típicamente a 25–40 % de la cuerda desde el LE.
- Extradós: superficie superior, generalmente curvada.
- Intradós: superficie inferior, generalmente más plana o ligeramente curvada.

3.2 Tipos de perfiles

- Simétrico: extradós e intradós iguales. Curvatura nula. Producen sustentación solo con ángulo de ataque positivo. Usados en superficies de control y en aviones acrobáticos.
- Asimétrico convencional: extradós curvado, intradós más plano. Producen sustentación incluso a ángulo de ataque cero. Mayoría de aviones PPA.
- Reflex (curvatura invertida): borde de fuga curvado hacia arriba. Usados en alas voladoras y algunos LSA.
- Laminares: diseñados para mantener flujo laminar sobre gran parte de la cuerda. Mayor eficiencia en crucero, sensibles a contaminación (insectos, hielo).
- Series NACA: nomenclatura clásica norteamericana. NACA 4 dígitos (2412, 2414): el primer dígito es la curvatura máxima en % de cuerda, el segundo la posición de esa curvatura en décimas de cuerda, los últimos dos el espesor máximo en %. NACA 23012, 64A415, etc. en series posteriores. El Cessna 172 usa NACA 2412; el Piper PA-28, NACA 65 series.

3.3 Ángulo de ataque (AOA, α)

El ángulo de ataque es el ángulo entre la cuerda del perfil y el vector velocidad del aire incidente (viento relativo, relative wind). Es el parámetro aerodinámicamente más importante del ala. Aclaraciones cruciales:

- AOA NO ES lo mismo que el ángulo entre el avión y el horizonte (pitch attitude). El piloto ve la actitud por el horizonte; la actitud y el AOA difieren por la trayectoria del avión.



La pérdida aerodinámica ocurre cuando se supera el ángulo de ataque crítico, independientemente de la velocidad.

- Un avión en picada pronunciada puede tener pitch -20° y AOA bajo (porque el viento relativo viene casi de adelante). Un avión en ascenso pronunciado tras una recuperación puede tener pitch $+30^\circ$ y AOA bajo. Un avión con pitch nulo y descendiendo verticalmente tendría AOA = 90° (en pérdida total).
- El ALA siente AOA, NO actitud. La pérdida ocurre por AOA, no por actitud.

ADVERTENCIA: Esta distinción AOA vs. actitud es la causa de muchas pérdidas accidentales: el piloto se concentra en la actitud (lo que ve del horizonte) y no en lo que el ala recibe (vector velocidad del aire). Un avión en recuperación de viraje con factor de carga alto puede entrar en pérdida con actitud levemente positiva, porque la trayectoria es descendente y el AOA es muy alto.

3.4 Ángulo de incidencia (AOI)

El ángulo de calado o de incidencia es el ángulo FIJO entre la cuerda del ala y el eje longitudinal del fuselaje. Es de diseño, no varía en vuelo.

- Permite que el ala tenga AOA óptimo de crucero cuando el fuselaje está nivelado, minimizando la resistencia parásita.
- Típicamente 1° – 3° positivo en aviones PPA.
- No se confunde con AOA: AOI es construcción, AOA es vuelo.

3.5 Otros ángulos del ala

- Diedro (dihedral): ángulo que forma el ala con la horizontal vista desde el frente. Positivo significa que las puntas están más altas que la raíz. Aporta estabilidad lateral (cap. 9). PA-28 tiene unos 5° ; Cessna 172 alto-ala efectivo similar por la geometría aunque con menor diedro físico.
- Flecha (sweep): retraso de la línea de bordes de ataque respecto a una perpendicular al eje. Significativa en aviones rápidos; en PPA es nula o muy pequeña.
- Torsión (washout o twist): la cuerda en la punta del ala forma un ángulo distinto al de la raíz. Negativa (washout) significa punta menos angulada que raíz: la raíz entra en pérdida primero, conservando control de alerones. Cessna 172, PA-28, la mayoría de PPA: torsión negativa de 2° – 4° .

Capítulo 4. La sustentación

4.1 Origen físico

La sustentación se origina por la diferencia de presiones entre extradós e intradós, complementada con la deflexión del aire hacia abajo. Mecanismos integrados:

1. El ala, con curvatura y/o AOA, fuerza al aire a desviarse: una parte va por arriba, otra por abajo.
2. Por la curvatura y el AOA, las líneas de corriente del extradós se acercan, la velocidad aumenta y por Bernoulli la presión cae.
3. En el intradós las líneas se separan ligeramente, la velocidad baja, la presión sube (en alas simétricas a AOA positivo).
4. La diferencia de presión, integrada en toda la superficie del ala, produce una fuerza neta perpendicular al viento relativo.
5. Simultáneamente, el aire que sale por el TE va hacia abajo (downwash): el ala ha empujado aire hacia abajo. Por tercera ley de Newton, el aire ha empujado al ala hacia arriba.

Las dos descripciones (presión y momento) son la misma física vista desde dos perspectivas. Ambas son correctas y necesarias para entendimiento completo.

4.2 La ecuación de la sustentación

La sustentación generada por un ala está dada por:

$$L = \frac{1}{2}\rho V^2 \times S \times CL$$

Donde:

- L = sustentación (en Newtons o en libras-fuerza).
- ρ = densidad del aire.
- V = velocidad respecto al aire (TAS).
- S = superficie alar.
- CL = coeficiente de sustentación (adimensional). Depende de la forma del perfil y del AOA.

Implicaciones para el piloto:

- La sustentación crece con el cuadrado de la velocidad: si V se duplica, L se cuadruplica para el mismo AOA.
- La sustentación crece con la densidad: a mayor altitud (menor ρ), se requiere más velocidad o más AOA para misma L.
- La sustentación crece con la superficie: aviones grandes con alas grandes generan más L. Por eso un C172 puede sostener más peso que un C150.
- La sustentación crece con CL: aumentando AOA, hasta el ángulo crítico. También aumentando curvatura (extendiendo flaps).

4.3 Coeficiente de sustentación CL

El CL es adimensional y depende de:

- Forma del perfil (constante para un perfil dado).
- Ángulo de ataque (variable, lo que el piloto controla).
- Configuración de flaps y slats.
- Número de Reynolds (despreciable para PPA, varía poco).

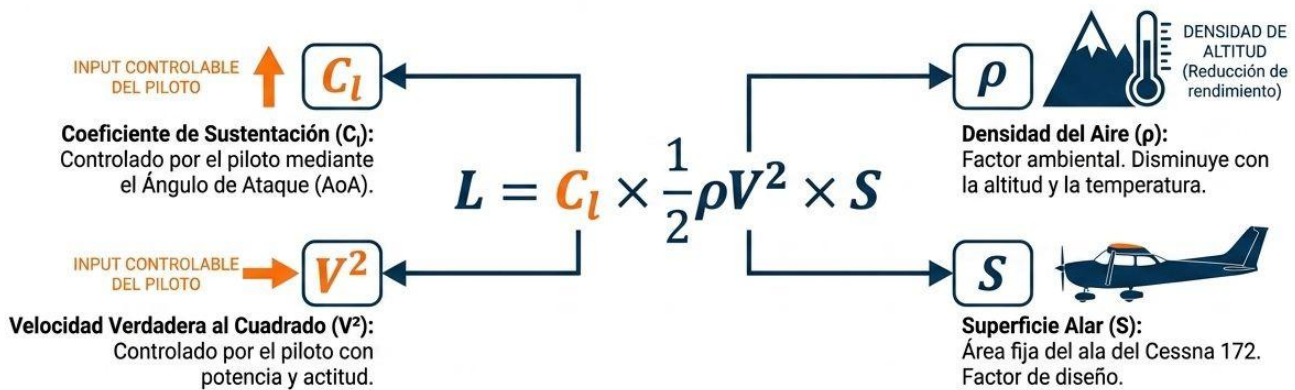
La curva CL vs α tiene forma característica:

- A AOA = 0° en perfil asimétrico convencional: CL típicamente 0,2–0,3.
- A AOA en aumento: CL crece aproximadamente lineal a razón de unos 0,1 por grado en perfiles típicos.
- A AOA crítico (α_{crit} , típicamente 15°–18° en perfiles PPA): CL alcanza su máximo, CL_{max} ≈ 1,4–1,6 sin flaps; 1,8–2,3 con flaps plenos.
- Más allá de α_{crit} : CL CAE bruscamente porque el flujo se separa del extradós. Es la PÉRDIDA.

La ecuación de la sustentación

$$\text{Concepto Central: } L = C_l \times \frac{1}{2} \rho V^2 \times S$$

- Las variables absolutas de la sustentación: Coeficiente (C_l), densidad del aire (ρ), velocidad verdadera al cuadrado (V^2) y superficie alar (S).
- La **altitud** y las **altas temperaturas** reducen drásticamente la densidad del aire (ρ), disminuyendo el rendimiento aerodinámico del ala.
- Para compensar esta pérdida al descender la densidad, el piloto debe aumentar el Ángulo de Ataque (subir C_l) o volar a mayor velocidad (V).



Flightpath

4.4 Distribución de presión sobre el perfil

A un AOA dado, la distribución de presión no es uniforme:

- En el extradós: la presión es notablemente menor que la presión ambiente. El pico de succión está cerca del LE (típicamente a 10–25 % de la cuerda).
- En el intradós: la presión es ligeramente mayor que la ambiente.
- Conclusión: la mayoría de la sustentación viene de la SUCCIÓN del extradós, no del empuje del intradós. En aviones livianos, ~70 % de la sustentación es por presión negativa arriba.

Este detalle es importante porque:

- Contaminación del extradós (insectos, hielo, escarcha, suciedad) reduce notablemente CL_{max} .
- El pico de succión cerca del LE explica por qué el hielo en el LE es tan destructivo aerodinámicamente.

4.5 Centro de presión y centro aerodinámico

- Centro de presión (CP): punto donde se considera aplicada la fuerza resultante de la sustentación. Su posición varía con el AOA: con AOA creciente, CP avanza hacia el LE.
- Centro aerodinámico (AC): punto del perfil donde el momento aerodinámico es CONSTANTE con el AOA. En perfiles convencionales, está aproximadamente al 25 % de la cuerda desde el LE. Es punto fijo del perfil.

La distinción importa para la estabilidad longitudinal (Cap. 9). El estabilizador y el centrado del avión se diseñan en relación al AC del ala.

Capítulo 5. La resistencia

5.1 Concepto

La resistencia (drag, D) es la fuerza opuesta al movimiento del avión a través del aire. Es el «costo» del vuelo: el motor debe vencerla constantemente. Su minimización es central para la eficiencia.

5.2 Resistencia parásita

Es la resistencia que NO depende de la generación de sustentación. Tiene tres componentes:

- Resistencia de forma (form drag): por la forma del avión. Una placa plana frente al viento tiene gran resistencia de forma; un perfil aerodinámico mínima.
- Resistencia de fricción (skin friction): por la viscosidad del aire sobre la superficie del avión. Depende del área mojada (wetted area) y de la rugosidad de la superficie.
- Resistencia de interferencia (interference drag): por las uniones entre componentes (ala-fuselaje, fuselaje-empenaje). El flujo en estas zonas crea turbulencia adicional.

La resistencia parásita crece con el CUADRADO de la velocidad. Doblar la velocidad cuadruplica la resistencia parásita.

5.3 Resistencia inducida

Es la resistencia GENERADA por la producción de sustentación. Origen físico:

- Cuando el ala produce sustentación, el aire del intradós (mayor presión) escapa hacia las puntas y se enrolla hacia el extradós (menor presión), generando vórtices de punta.
- Estos vórtices inclinan el viento relativo hacia abajo (downwash) en la zona del ala.
- La inclinación del viento relativo inclina el vector de sustentación, dando una componente hacia atrás: esa componente es la resistencia inducida.

Características:

- La resistencia inducida es PROPORCIONAL AL INVERSO DEL CUADRADO DE LA VELOCIDAD: $D_i \approx k \times W^2 / (\frac{1}{2}\rho V^2 S \times \pi \times AR \times e)$, donde AR es alargamiento y e factor de Oswald.

- A baja velocidad, alta resistencia inducida (el ala debe trabajar a alto CL, alto AOA, mucho downwash).
- A alta velocidad, baja resistencia inducida (CL bajo, AOA bajo).
- Disminuye con mayor alargamiento (AR): alas largas y angostas tienen menos resistencia inducida que cortas y anchas. Por eso los planeadores tienen alas larguísimas.
- Disminuye con dispositivos de punta (winglets): reducen la formación del vórtice.

5.4 Resistencia total

La resistencia total es la suma de parásita e inducida:

$$D = D_{\text{parásita}} + D_{\text{inducida}}$$

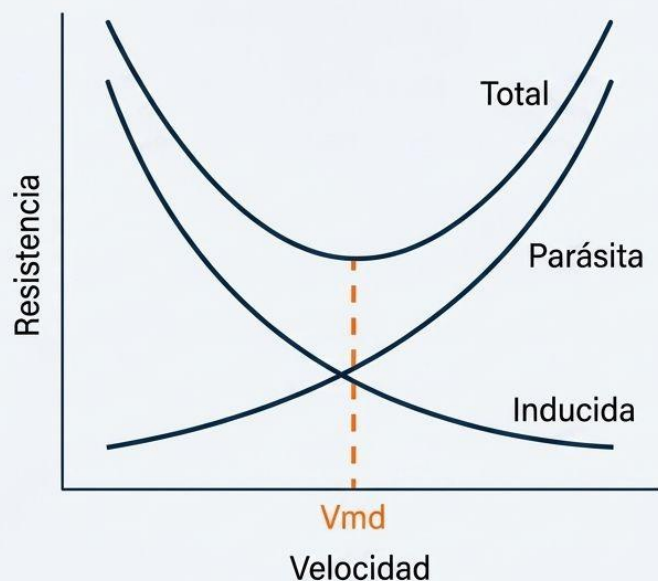
$D_{\text{parásita}}$ crece con V^2 ; D_{inducida} cae con $1/V^2$. La suma tiene un MÍNIMO a una velocidad específica llamada VELOCIDAD DE MÁXIMA EFICIENCIA o velocidad de mejor L/D.

- Por debajo de esa velocidad: domina la inducida. «Curva de potencia inversa» o «back side of the power curve»: para mantener altitud se necesita MÁS potencia a MENOR velocidad. Régimen peligroso operacionalmente.
- Por encima de esa velocidad: domina la parásita. Régimen normal de operación.

Resistencia parásita e inducida

Concepto Central: La curva de resistencia total

- **Resistencia parásita:** Generada por la fricción y la forma del avión; crece exponencialmente con el cuadrado de la velocidad.
- **Resistencia inducida:** Un subproducto inevitable de la sustentación (vórtices); disminuye a medida que el avión vuela más rápido.
- **Velocidad de mínimo arrastre (Vmd):** El punto exacto donde la suma de ambas resistencias es mínima, maximizando la autonomía (L/D max).



5.5 Curva polar L/D

La curva polar es una representación del comportamiento aerodinámico del ala: relaciona CL con CD para distintos AOA. Permite identificar:

- $(L/D)_{max}$: máximo cociente sustentación/resistencia. Es el punto óptimo aerodinámico.
- Velocidad correspondiente a $(L/D)_{max}$: es la velocidad de PLANEAMIENTO MÁXIMA DISTANCIA. Si el motor falla, esta es la velocidad a mantener para llegar lo más lejos posible.
- Velocidad de mínimo descenso (mínimo D/V): es ligeramente menor que la de $(L/D)_{max}$. Es la velocidad para PERMANECER MÁS TIEMPO EN VUELO con motor apagado (útil si se espera ayuda o se necesita tiempo para gestionar).

Valores típicos para un Cessna 172N:

- $(L/D)_{max} \approx 10-11$.
- Velocidad de planeo máxima distancia: ~ 65 KIAS.
- Velocidad de mínimo descenso: ~ 60 KIAS.
- Régimen de descenso en planeo a $(L/D)_{max}$: $\sim 500-600$ ft/min.
- Distancia de planeo desde 5.000 ft AGL: $\sim 8-9$ NM con aire calmo.

Capítulo 6. Las cuatro fuerzas y el vuelo recto nivelado

6.1 Las cuatro fuerzas

Sobre un avión en vuelo actúan cuatro fuerzas fundamentales:

- Sustentación (L, Lift): perpendicular al vector velocidad relativa al aire, hacia arriba en vuelo nivelado.
- Peso (W, Weight): vertical hacia abajo, en dirección del centro de la Tierra. Es la fuerza gravitacional sobre la masa del avión.
- Tracción (T, Thrust): hacia adelante, en dirección del eje longitudinal aproximadamente (varía con AOA y montaje del motor). Producida por la hélice.
- Resistencia (D, Drag): hacia atrás, en dirección opuesta al vector velocidad.

6.2 Equilibrio en vuelo recto nivelado

Para que el avión vuele en línea recta a velocidad y altitud constantes:

- $L = W$ (la sustentación iguala al peso).
- $T = D$ (la tracción iguala a la resistencia).

Cualquier desbalance produce aceleración:

- Si $L > W$: ascenso. Si $L < W$: descenso.
- Si $T > D$: aceleración. Si $T < D$: desaceleración.

Principios de Vuelo — PPA

Las cuatro fuerzas del vuelo

Concepto Central: El equilibrio aerodinámico

- En vuelo recto, nivelado y constante, las fuerzas se anulan: la Sustentación (L) iguala al Peso (W) y el Empuje (T) iguala al Arrastre (D).
- En el ascenso, el Empuje supera al Arrastre ($T > D$); durante un viraje, la Sustentación total debe superar al Peso ($L > W$).
- Cualquier cambio en la trayectoria de la aeronave es el resultado directo y físico de alterar este equilibrio de fuerzas.



El piloto controla:

- T (con el acelerador del motor).
- L (indirectamente, mediante AOA con elevador, y mediante velocidad con acelerador y actitud).
- D (indirectamente, con configuración: flaps, tren, slips).
- W (no se controla en vuelo; está fijado por la carga al despegar y por el consumo de combustible).

6.3 Equilibrio en ascenso constante

Para ascenso constante con régimen R/C (rate of climb):

- La trayectoria forma un ángulo γ con la horizontal.
- L sigue siendo aproximadamente perpendicular a la trayectoria (ahora levemente inclinada).
- Pero el peso sigue siendo vertical.
- Análisis: $T = D + W \times \sin \gamma$. La tracción debe vencer la resistencia Y y compensar la componente del peso a lo largo de la trayectoria.

- $L = W \times \cos \gamma$. La sustentación necesaria es ligeramente menor que el peso (porque parte del peso está «sostenido» por la tracción).

Implicación: la potencia disponible determina el régimen de ascenso máximo. $R/C \approx (T - D) \times V / W$. La potencia EXCEDENTE sobre la requerida para vuelo nivelado es lo que permite ascender.

6.4 Equilibrio en descenso constante (sin motor o con motor reducido)

En planeo (motor a ralentí o apagado):

- $T \approx 0$.
- La trayectoria desciende con ángulo γ .
- $W \times \sin \gamma = D$ (el peso «empuja» al avión hacia adelante venciendo D).
- $W \times \cos \gamma = L$.
- $\tan \gamma = D/L = 1/(L/D)$.

Conclusión: el mejor ángulo de planeo se logra a la velocidad de $(L/D)_{\max}$. Esa es la velocidad de máxima distancia de planeo.

6.5 Equilibrio en viraje nivelado

En viraje coordinado nivelado a alabeo constante ϕ :

- L se inclina con el alabeo. La componente vertical $L \times \cos \phi$ debe seguir igualando W.
- La componente horizontal $L \times \sin \phi$ produce la fuerza centrípeta que curva la trayectoria.
- Para mantener altitud: $L = W / \cos \phi$. La sustentación necesaria AUMENTA con el alabeo.
- Factor de carga $n = L/W = 1 / \cos \phi$.

Implicaciones (desarrolladas en Cap. 10):

- Alabeo 30°: $n = 1,15$. Sustentación 15 % mayor que el peso.
- Alabeo 45°: $n = 1,41$.
- Alabeo 60°: $n = 2,00$. Sustentación el DOBLE del peso.
- Como VS es proporcional a \sqrt{n} , VS también aumenta. A 60° de alabeo, VS aumenta un 41 % respecto al vuelo nivelado.

Las cuatro fuerzas del vuelo (equilibrio en viraje)

Concepto Central: Factor de carga

- Al inclinar las alas, el vector de sustentación se divide; su componente vertical debe seguir siendo igual al peso de la aeronave.
- Para lograrlo, la Sustentación Total debe aumentar drásticamente (tirando de la palanca), lo que genera un factor de carga superior a 1g.
- A 60° de inclinación, el factor de carga es 2g; el piloto no siente el aumento de peso directamente porque el asiento lo empuja hacia arriba.



Flightpath

Capítulo 7. El ala como conjunto

7.1 Geometría del ala

Más allá del perfil (sección transversal), el ala completa tiene parámetros geométricos:

- Envergadura (b , span): distancia punta-punta.
- Superficie alar (S): área en planta.
- Alargamiento (AR, aspect ratio): $AR = b^2 / S$. Adimensional. Mide qué tan «esbelta» es el ala. PPA típico: 6–10. Planeadores: 20–35.
- Cuerda media: $c_m = S / b$.
- Cuerda aerodinámica media (MAC): cuerda equivalente a efectos aerodinámicos. Usada para referencia del CG.
- Estrechamiento (taper ratio): cociente entre cuerda en la punta y cuerda en la raíz. Si el ala es rectangular = 1; si triangular = 0.
- Flecha: ya discutido. Despreciable en PPA.
- Diedro: ya discutido.
- Torsión (washout/washin): ya discutido.

7.2 Tipos de planforma

- Rectangular: cuerda constante de raíz a punta. Cessna 152, Cessna 172, Aero Boero AB-115. Ventajas: simple de fabricar, comportamiento de pérdida benigno (la raíz entra primero, control de alerones se conserva). Desventaja: resistencia inducida no óptima.
- Trapezoidal o con estrechamiento: cuerda menor en punta que en raíz. Piper PA-28, muchos LSA. Mejor aerodinámicamente (más cerca de la elíptica).
- Elíptica: distribución de sustentación uniforme, mínima resistencia inducida. Spitfire es el ejemplo clásico. Compleja de fabricar; rara en PPA.
- Delta o flechada: aviones rápidos, no PPA.

7.3 Distribución de sustentación a lo largo de la envergadura

Sobre un ala real, la sustentación NO está distribuida uniformemente:

- En la raíz, la sustentación es máxima.
- Hacia las puntas, disminuye gradualmente (porque los vórtices de punta reducen la presión efectiva).
- La planforma elíptica produce distribución de sustentación elíptica, óptima.
- Con torsión negativa (washout), la punta produce aún menos sustentación, lo que asegura que la pérdida comience en la raíz (área central del ala). El alerón sigue trabajando hasta más allá del comienzo de pérdida.

7.4 Dispositivos hipersustentadores

Los hipersustentadores aumentan el CL_{max} del ala, permitiendo volar a menor velocidad sin entrar en pérdida. Útiles en despegue y aterrizaje.

Flaps (borde de fuga)

- Flap simple (plain flap): el TE se defleca hacia abajo. Aumenta CL_{max} moderadamente. Aumenta también CD. Usado en aviones livianos como C152.
- Flap partido (split flap): el intradós del TE se defleca hacia abajo, el extradós queda. Más CD que el simple, similar CL_{max} .
- Flap ranurado (slotted flap): el flap se separa del ala dejando una ranura. El aire del intradós pasa por la ranura energizando el extradós del flap. Mucho mejor CL_{max} . Usado en C172, PA-28.
- Flap Fowler: el flap se desplaza hacia atrás y hacia abajo, aumentando además la SUPERFICIE alar. El más eficiente. Usado en aviones más sofisticados.
- Flap doble o triple ranurado: combina varios efectos. Aviones comerciales y algunos LSA modernos.



El uso de flaps en aproximación incrementa la sustentación y permite velocidades de aproximación más bajas.

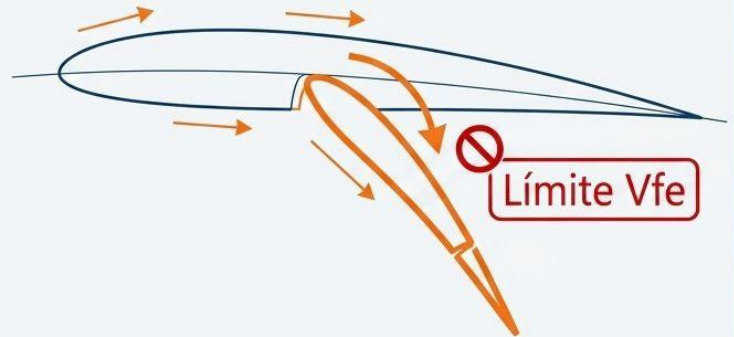
Efecto de extender flaps

- Aumento de CL_{max} → V_S disminuye.
- Aumento de curvatura efectiva del perfil.
- Aumento de C_D → mayor resistencia, mayor descenso a misma potencia, más empinada la senda de planeo.
- Pequeño desplazamiento del CP hacia atrás → cambio de momento de cabeceo (algunos aviones nariz abajo, otros nariz arriba).
- Generalmente la actitud baja al extender flaps (nariz abajo) en aviones PPA modernos.

Flaps: efectos sobre sustentación y arrastre

Concepto Central: Modificación del perfil alar

- Extender los flaps aumenta la curvatura efectiva del ala, elevando el C_L máximo y permitiendo volar a menor velocidad sin perder sustentación.
- Posición parcial (Despegue): Maximiza la sustentación con mínimo arrastre extra. Posición total (Aterrizaje): Máximo arrastre para frenar.
- Restricción Vfe: Nunca se deben extender ni mantener las superficies hipersustentadoras por encima de este límite de velocidad estructural.



Flightpath

Slats y slots (borde de ataque)

- Slat: superficie deflectable en el borde de ataque, que se extiende a alto AOA, energiza la capa límite del extradós y permite mayor α_{crit} .
- Slot: ranura fija o automática en el LE con efecto similar.
- Usados en algunos aviones modernos y de operación corta (STOL). No comunes en C152/172/PA-28 estándar.

Configuraciones de uso

Configuración	Flaps	Uso típico
Limpia	0°	Crucero, ascenso
Despegue (T/O)	10–15° (algunos POH)	Algunos despegues, especialmente pista corta
Aproximación	20–25°	Aproximación inicial, viraje base, final
Aterrizaje	30–40° (full)	Final corto, aterrizaje

NOTA: La configuración exacta varía por modelo. Consultar POH del avión específico para velocidades límite (VFE) y procedimientos. Extender flaps por encima de VFE puede dañar estructuralmente el ala. Retraer flaps con velocidad insuficiente puede llevar a pérdida (C_{L_max} disminuye al retraer).

Velocidades límite con flaps

- VFE (Maximum Flap Extended Speed): no extender flaps por encima.
- Marcada en arco BLANCO del anemómetro: límite inferior (VS0) a superior (VFE).
- En PA-28-140: VFE típica 100 KIAS (verificar POH).
- En C172N: VFE típica 110 KIAS para 10°, 85 KIAS para 30° (verificar POH).

7.5 Spoilers y aerofrenos

Dispositivos que REDUCEN la sustentación. Poco usados en PPA convencional, comunes en planeadores y aviones comerciales:

- Spoiler: superficie en el extradós que se levanta, separando el flujo y «matando» la sustentación localmente.
- Aerofreno: dispositivo que se extiende perpendicular al flujo aumentando solo D.
- Uso típico: control de descenso preciso, frenado en pista (aviones comerciales).

7.6 Winglets

- Pequeñas superficies verticales o curvadas en las puntas del ala.
- Reducen la resistencia inducida al disminuir la intensidad del vórtice de punta.
- Mejoran 3–5 % la eficiencia en crucero.
- Cada vez más comunes en aviones modernos y retrofits.

Capítulo 8. Superficies y mandos de control

8.1 Mandos primarios

Los mandos primarios controlan el avión alrededor de sus tres ejes principales (longitudinal, lateral y vertical):



El control preciso de los mandos de vuelo es la base de toda maniobra aeronáutica.

Alerones (ailerons)

- Superficies en el borde de fuga de las alas, cerca de las puntas.
- Deflexión asimétrica: cuando uno baja, el otro sube.
- Función: control de ALABEO (roll) alrededor del eje LONGITUDINAL.
- Conexión a cabina: volante o palanca (cíclico) lateral.
- Hacia la derecha → alerón derecho ARRIBA (menos sustentación), izquierdo ABAJO (más sustentación) → ala derecha baja → roll a la derecha.

Elevador o profundidad (elevator)

- Superficie en el borde de fuga del estabilizador horizontal (en cola).
- Función: control de CABECEO (pitch) alrededor del eje LATERAL.
- Conexión a cabina: volante o palanca hacia adelante/atrás.
- Hacia adelante (push) → elevador abajo → cola arriba → nariz abajo → pitch nariz abajo.
- Hacia atrás (pull) → elevador arriba → cola abajo → nariz arriba → pitch nariz arriba.

- EL ELEVADOR CONTROLA AOA, no «altitud directamente». Tirando del elevador, AOA aumenta. Eso aumenta CL (a menos que se entre en pérdida) y por tanto sustentación; a velocidad constante, ascenso.

Estabilizador completo móvil (stabilator)

- Algunos aviones usan estabilizador horizontal completo móvil en lugar de elevador. Ejemplo: Piper PA-28, Piper PA-32.
- Función igual al elevador pero con superficie completa moviéndose.
- Tienen anti-balance tab para evitar sobrecontrol.

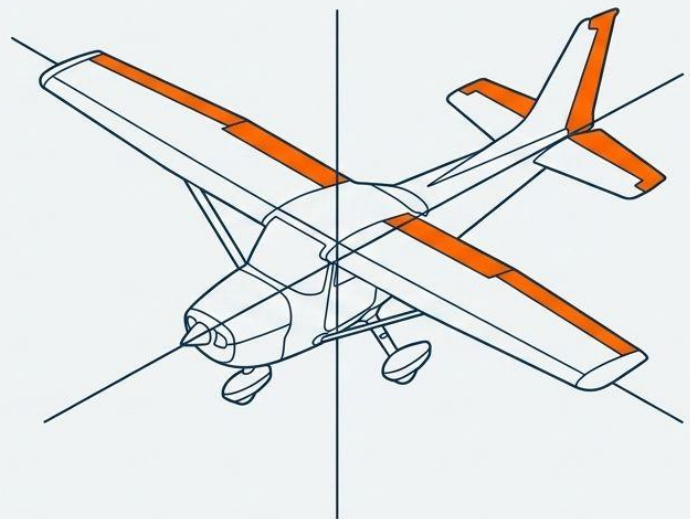
Timón de dirección (rudder)

- Superficie en el borde de fuga del estabilizador VERTICAL (deriva, en cola).
- Función: control de GUIÑADA (yaw) alrededor del eje VERTICAL.
- Conexión a cabina: pedales.
- Pedal derecho → timón a la derecha → nariz a la derecha → yaw a la derecha.
- Función principal: COORDINAR el viraje (cancelar la guiñada adversa de los alerones). Función secundaria: control en taxi, en aterrizaje con viento cruzado, en pérdida y barrena.

Controles de vuelo: efectos primarios y secundarios

Concepto Central: Aerodinámica de los ejes

- **Alerón (Alabeo):** Produce el efecto secundario de guiñada adversa, ya que el ala que sube genera mucho más arrastre inducido.
- **Timón de dirección (Guiñada):** Su efecto secundario primario es el alabeo inducido por la aceleración asimétrica de las alas.
- **Elevador (Cabeceo):** Controla la actitud longitudinal; exige la coordinación constante del pedaleo para neutralizar la guiñada del alerón.



8.2 Mandos secundarios

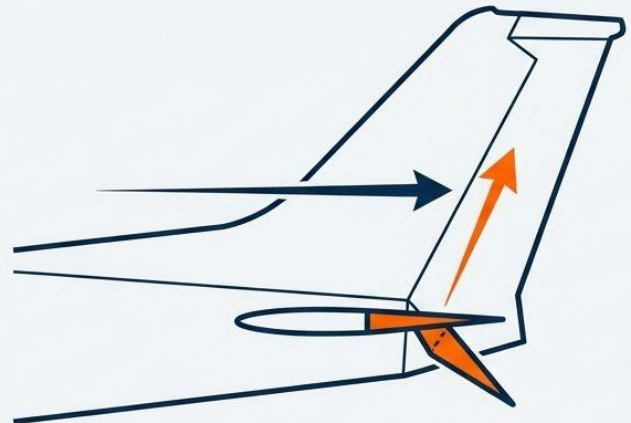
Compensadores (trim tabs)

- Pequeñas superficies en los mandos primarios que el piloto ajusta para que el avión vuele sin esfuerzo en la cabina.
- Trim de elevador: el más común en PPA. Permite que el avión mantenga una actitud (= AOA = velocidad) sin que el piloto tenga que sostener el volante. Crítico para vuelo prolongado.
- Trim de timón: en algunos aviones, compensa el efecto de la hélice (que tiende a tirar la nariz a un lado).
- Trim de alerones: en aviones con tanques desequilibrados o cargas asimétricas.
- En aviones simples (C152, C172 básico): trim solo de elevador, generalmente con una rueda en cabina.

El trim: equilibrar la aeronave

Concepto Central: Neutralización de fuerzas

- El compensador (trim) ajusta la posición neutral de los controles para que el avión mantenga su actitud sin fuerza sostenida por el piloto.
- El trim de profundidad es el más crítico: equilibra aerodinámicamente las fuerzas del centro aerodinámico contra el centro de gravedad.
- Secuencia estándar: Fijar la actitud deseada con la palanca → Aplicar y ajustar potencia → Trimear para quitar totalmente la presión física.



Spoilers, aerofrenos: ya tratados.

Slats, flaps: ya tratados.

8.3 Equilibrio de los mandos: balance estático y aerodinámico

- Balance estático: las superficies de control tienen masa equilibrada para evitar oscilaciones (flutter) y reducir esfuerzo del piloto. Pesos en bordes de ataque o sobre brackets.
- Balance aerodinámico: parte de la superficie está adelante de la línea de bisagra. Cuando se deflecta, el viento produce un momento que ayuda al piloto.

- Tabletas balanceadoras (servo tabs, antiservo tabs): pequeñas superficies en el mando primario que se mueven en sentido opuesto (servo, ayudan) o igual (antiservo, ajustan resistencia para evitar sobrecontrol).

8.4 Esfuerzos sobre los mandos

- Crecen con velocidad: el aire impactando con más q produce más fuerza.
- Crecen con deflexión.
- Deben estar dentro de límites para todos los regímenes de operación. Por eso se establece VA: velocidad por encima de la cual una deflexión PLENA del mando puede exceder los límites estructurales.

8.5 Velocidad de maniobra (VA)

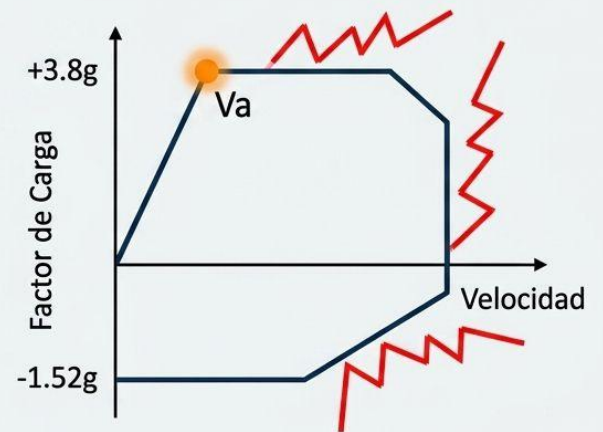
Es la velocidad máxima a la que se puede aplicar deflexión PLENA y abrupta del mando sin riesgo estructural. Importante:

- VA varía con el PESO del avión: a peso más bajo, VA es MENOR (porque a peso bajo, la estructura aguanta menos g antes de sufrir daño con la misma carga aerodinámica).
- POH publica VA al MTOW. Para pesos menores: $VA_{reducida} \approx VA \times \sqrt{W_{actual}/W_{MTOW}}$.
- Por encima de VA, evitar deflexiones bruscas. En turbulencia severa, mantener velocidad bajo VA.
- VA típica C172N: 99 KIAS al MTOW.
- VA típica PA-28-140: 89 KIAS al MTOW.

Velocidades límite y el diagrama Vn

Concepto Central: La envolvente estructural

- El diagrama Vn define los límites innegociables de velocidad contra el factor de carga (+3.8g y -1.52g para la categoría Normal).
- Velocidad de maniobra (V_a): Única velocidad donde una deflexión total y brusca de controles provoca pérdida aerodinámica ANTES de daño estructural.
- Operar por encima de V_a con deflexiones completas, o cruzar V_{no} en turbulencia, puede exceder y colapsar los límites de los materiales.



Capítulo 9. Estabilidad y los tres ejes

9.1 Concepto de estabilidad

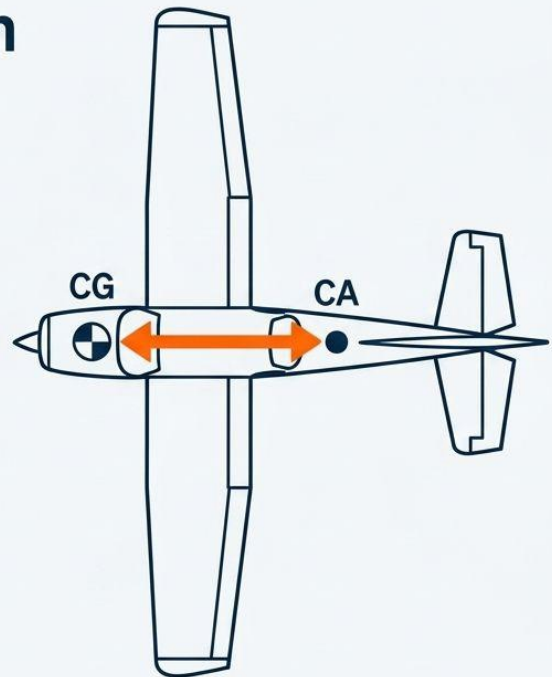
Estabilidad es la tendencia del avión a regresar a su estado de equilibrio tras una perturbación. Se distinguen:

- Estabilidad **ESTÁTICA**: la tendencia inmediata tras la perturbación. Puede ser positiva (vuelve), neutra (queda como está) o negativa (se aleja más).
- Estabilidad **DINÁMICA**: cómo evoluciona en el tiempo. Puede ser positiva amortiguada (las oscilaciones decrecen y vuelve), neutra (oscila constantemente), o negativa (las oscilaciones crecen).

Estabilidad estática del avión

Concepto Central: Tendencia de restauración

- **Estabilidad longitudinal**: Si el morro cae, el avión recupera solo gracias a que el Centro de Gravedad (CG) está adelante del Centro Aerodinámico.
- **Estabilidad lateral**: Si un ala baja de forma inadvertida, el diseño en diedro genera un mayor ángulo de ataque y una fuerza restauradora.
- **Estabilidad direccional**: Si el morro guiña, la gran superficie de la aleta dorsal y el timón actúan como una veleta para alinear la aeronave.



Flightpath

Un avión PPA bien diseñado tiene estabilidad estática positiva y dinámica positiva amortiguada en los tres ejes. El piloto «suelta los mandos» y el avión vuelve por sí solo a una condición estable de vuelo.

9.2 Los tres ejes

- Eje **LONGITUDINAL**: del morro a la cola. Rotación: **ALABEO** (roll). Controlado por **ALERONES**.
- Eje **LATERAL**: perpendicular al longitudinal, ala a ala. Rotación: **CABECEO** (pitch). Controlado por **ELEVADOR**.

- Eje VERTICAL: perpendicular al plano longitudinal/lateral, arriba/abajo del avión. Rotación: GUIÑADA (yaw). Controlado por TIMÓN.

Los tres ejes pasan por el CENTRO DE GRAVEDAD (CG).

9.3 Estabilidad longitudinal (pitch)

Es la estabilidad del avión en el eje lateral, controlando cabeceo. La condición clave: el AC (centro aerodinámico) del ala debe estar DETRÁS del CG (centro de gravedad). El estabilizador horizontal aporta una fuerza vertical (generalmente hacia abajo) que balancea el momento del ala.

Comportamiento ante perturbación de cabeceo:

- Si una ráfaga eleva la nariz: AOA aumenta, sustentación del ala aumenta, pero el estabilizador horizontal (con su distancia al CG) genera más momento restaurador que el ala → nariz baja, vuelve.
- Si la nariz baja inesperadamente: AOA disminuye, sustentación disminuye, el estabilizador genera momento que sube la nariz.

Factores que afectan la estabilidad longitudinal:

- Posición del CG: si está muy ATRÁS, la distancia entre AC y CG disminuye, la estabilidad disminuye. Puede llegar a ser NEUTRA o NEGATIVA. ES PELIGROSO. Por eso el centrado tiene un LÍMITE TRASERO.
- Posición del CG: si está muy ADELANTE, mucha estabilidad pero mucho esfuerzo de elevador en aterrizaje (puede no poder levantar la nariz al flare). Por eso hay LÍMITE DELANTERO.
- Área y posición del estabilizador horizontal.
- Brazo de palanca del estabilizador (más largo = más estabilidad).

Fenómenos asociados a la estabilidad longitudinal

- Phugoid: oscilación dinámica de período largo (30–60 segundos) en velocidad y altitud, sin cambio significativo de AOA. El avión sube, pierde velocidad, baja, gana velocidad, sube nuevamente. Bien amortiguada en aviones PPA. Es la oscilación que se observa al soltar los mandos en un avión sin trim correcto.
- Modo de período corto (short period): oscilación rápida en AOA. Bien amortiguada en aviones PPA bien diseñados.

9.4 Estabilidad lateral (roll)

Es la tendencia del avión a recuperar el alabeo nulo tras una perturbación. Mecanismos que la aportan:

- Diedro positivo: cuando el avión se inclina (alabeo) y se desliza lateralmente, el ala que va abajo recibe el viento relativo con AOA efectivo MAYOR (porque el aire viene desde el costado en parte y el ala baja está más perpendicular al viento), generando más sustentación → tiende a levantarse → roll restaurador.

- Posición alta del ala (high-wing como C152/172): efecto similar al diedro por la geometría.
- Flecha del ala: ya mencionada, despreciable en PPA.
- Área lateral del fuselaje: en deslizamiento lateral, el fuselaje también aporta restauración.

Modos asociados a estabilidad lateral

- Dutch Roll: oscilación combinada de roll y yaw. Bien amortiguada en aviones PPA.
- Spiral Divergence: tendencia a entrar en espiral si se deja con alabeo. Algunos aviones PPA tienen esta tendencia ligeramente, exigiendo atención del piloto.

9.5 Estabilidad direccional (yaw)

Es la tendencia del avión a alinearse con el viento relativo en el eje vertical. La aporta principalmente la deriva (estabilizador vertical):

- Cuando el avión se desvía en yaw (la nariz a un lado del vector velocidad), la deriva recibe viento de costado, genera sustentación lateral que «empuja» la cola → restaura.

La estabilidad direccional es generalmente buena y robusta en PPA. La deriva está dimensionada para aportarla con margen.

9.6 Trade-off estabilidad / maniobrabilidad

Más estabilidad = menos maniobrabilidad. Más maniobrabilidad = menos estabilidad.

- Avión de entrenamiento (C152, C172, PA-28): muy estable, fácil de volar, no muy maniobrable.
- Avión acrobático (Pitts Special, Sukhoi 26): casi neutramente estable, extremadamente maniobrable, exige piloto experimentado.
- Avión de combate moderno (F-16): inherentemente inestable, controlado por computadora (fly-by-wire). Imposible de volar sin asistencia electrónica. No aplica a PPA.

Capítulo 10. El viraje

10.1 Mecánica del viraje

Para virar, el avión debe generar una fuerza horizontal que curve la trayectoria. La forma en que un avión vira:

6. Aplicar alabeo (con alerones): el vector de sustentación se inclina lateralmente.
7. La componente vertical de sustentación ($L \times \cos \phi$) debe seguir igualando al peso. Para esto, el piloto aumenta el AOA con elevador (tira un poco del volante) → más L total.
8. La componente horizontal de sustentación ($L \times \sin \phi$) es la FUERZA CENTRÍPETA que curva la trayectoria.
9. Simultáneamente: aplicar timón para COORDINAR (cancelar la guiñada adversa de los alerones — el alerón abajo aumenta su resistencia inducida, produciendo yaw hacia afuera del viraje).

Resultado: viraje coordinado, sin deslizamiento, indicador de bola del coordinador centrado.

10.2 Factor de carga en el viraje

Como $L = W / \cos \phi$, el FACTOR DE CARGA $n = L / W = 1 / \cos \phi$:

Alabeo (ϕ)	Factor de carga (n)	VS multiplicador (v_n)	VS si VS_horizontal = 50 KIAS
0°	1,00	1,00	50 KIAS
15°	1,04	1,02	51 KIAS
30°	1,15	1,07	54 KIAS
45°	1,41	1,19	59 KIAS
60°	2,00	1,41	71 KIAS
70°	2,92	1,71	86 KIAS
75°	3,86	1,97	98 KIAS
80°	5,76	2,40	120 KIAS
90° (imposible nivelado)	∞	∞	—

ADVERTENCIA: La velocidad de pérdida aumenta con el alabeo. Un viraje a 60° eleva VS un 41 %. Un viraje a 75°, casi el doble. Si en patrón de tráfico (donde se vuela a velocidades modestas, $1,3 \times VS$) el piloto realiza un viraje cerrado por presión de tiempo o exceso de viento, puede entrar en pérdida ANTES de lo previsto. La mayoría de los accidentes de tipo «pérdida en base-final» tienen este factor: viraje muy cerrado (a veces $> 45^\circ$) en posición baja, sin margen de altitud para recuperación.

10.3 Tipos de viraje

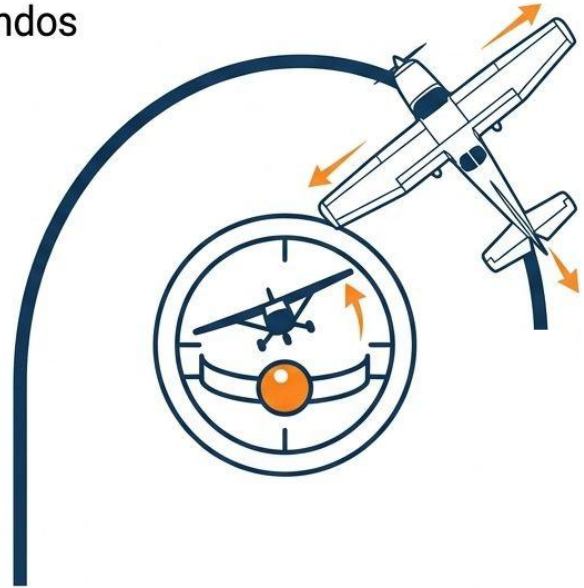
- Viraje coordinado: bola centrada. Sustentación inclinada balanceando peso y centrípeta. La técnica normal de instrucción y operación.
- Viraje deslizado (slip): mucho alabeo, poco timón. La nariz queda fuera de la dirección de viraje. La bola se va al lado del alabeo (afuera). Aplicación: aproximación con viento cruzado, descenso rápido sin extender flaps (slip controlado).

Viraje derrapado (skid): poco alabeo, mucho timón. La nariz se va más rápido que la trayectoria. La bola se va al lado opuesto del viraje (adentro). PELIGROSO en aproximación a la pérdida (induce barrena).

Viraje nivelado coordinado

Concepto Central: Sincronía de los tres mandos

- **Mecánica:** Inclinar las alas con el alerón, aumentar sustentación tirando de la palanca para mantener altitud, y coordinar con el pedaleo.
- A 30° de alabeo, se genera un viraje estándar constante de 3° por segundo, el balance ideal de control e inercia.
- **Advertencia crítica:** La velocidad de pérdida en viraje se multiplica por la raíz cuadrada del factor de carga (ej. a 60° , V_s aumenta un 41%).



Flightpath

En virajes coordinados, el factor de carga aumenta con el ángulo de bank, reduciendo la velocidad de entrada en pérdida.

10.4 Aplicación operacional

- En patrones de tráfico: alabeos típicos 15° – 25° . No exceder 30° en patrón a baja altitud y baja velocidad.
- En crucero: alabeos hasta 30° rutinarios, hasta 45° aceptables.
- Sobre 45° y especialmente sobre 60° : requiere atención al factor de carga, a la velocidad y al margen sobre VS.
- Viraje pronunciado (steep turn, 45° o 60°): maniobra de entrenamiento; exige coordinación, vigilancia de altitud y velocidad.



Capítulo 11. La hélice

11.1 Principio de funcionamiento

La hélice es una superficie aerodinámica rotatoria: cada pala es un perfil aerodinámico. Al girar, cada pala tiene velocidad relativa al aire compuesta por la velocidad de rotación (tangencial) y la velocidad del avión (axial). El AOA efectivo de la pala depende de ambos.

- Paso geométrico de la hélice: ángulo de calado de la pala. Si la hélice fuese una rosca atornillada en el aire, este es el avance teórico por revolución.
- Paso efectivo: el avance real (menor que el geométrico por el «slip» del aire).
- Eficiencia de la hélice: cociente entre potencia útil (tracción \times velocidad) y potencia del motor. Típicamente 70–85 % en el rango óptimo.

11.2 Hélice de paso fijo

- Las palas tienen paso constante, no ajustable.
- Optimización: solo para una combinación específica de velocidad y RPM.
- Diseño «climb prop»: paso bajo, optimiza ascenso y despegue, pierde eficiencia en crucero.
- Diseño «cruise prop»: paso alto, optimiza crucero, pierde rendimiento en despegue.
- Mayoría de aviones PPA básicos: C150, C152, C172N estándar, PA-28-140.

11.3 Hélice de paso variable o de velocidad constante

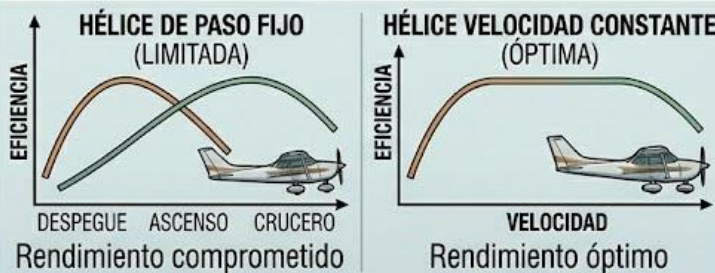
- Las palas pueden cambiar de paso en vuelo, controladas por un regulador (governor).
- El piloto selecciona RPM en el mando blue (prop control), y el governor ajusta paso para mantener esas RPM.

- Permite eficiencia óptima en todas las fases: paso bajo en despegue (alto RPM, alta tracción), paso alto en crucero (menos RPM, alta velocidad).
- Aviones PPA con esto: C172RG, C182, PA-28R Arrow, Mooney.

GUÍA TÉCNICA: COMPARATIVA DE HÉLICES (PASO FIJO VS. VELOCIDAD CONSTANTE)

ELEGIR EL SISTEMA ADECUADO SEGÚN LA OPERACIÓN, EL RENDIMIENTO Y EL COSTO

1. COMPARATIVA DE RENDIMIENTO Y EFICIENCIA



2. COMPARATIVA DE COSTO Y MANTENIMIENTO



3. RESUMEN DE VENTAJAS PRINCIPALES

HÉLICE PASO FIJO (VENTAJAS)	HÉLICE VELOCIDAD CONSTANTE (VENTAJAS)
Simplicidad Mecánica	Eficiencia Óptima
Bajo Peso	Mayor Rendimiento en todas las fases
Menor Carga de Trabajo del Piloto (1 mando)	Menor Consumo
Fiabilidad Mecánica	Mayor Velocidad de Crucero

4. RESUMEN DE DESVENTAJAS PRINCIPALES

HÉLICE PASO FIJO (DESVENTAJAS)	HÉLICE VELOCIDAD CONSTANTE (DESVENTAJAS)
Eficiencia Limitada	Complejidad Mecánica
Compromiso de Rendimiento	Mayor Peso
Mayor Carga de Trabajo del Motor	Mayor Costo de Operación y Mantenimiento
Mayor Consumo (relativo)	Requiere Sistema de Aceite

11.4 Efectos del motor / hélice sobre el avión

Torque (par motor)

- La hélice gira en un sentido (la mayoría de los aviones americanos: en sentido horario visto desde la cabina, es decir, antihorario visto desde adelante).
- Por tercera ley de Newton, el motor tiende a hacer girar el avión en sentido CONTRARIO al de la hélice.
- Resultado: tendencia a alabeo a la IZQUIERDA en aviones americanos (Cessna, Piper, Beechcraft) con hélice horaria vista desde cabina.
- Compensación: piloto aplica alerones a la derecha y/o el diseñador del avión inclina el motor o las alas para anular el efecto.

P-factor (factor P, asimetría de tracción)

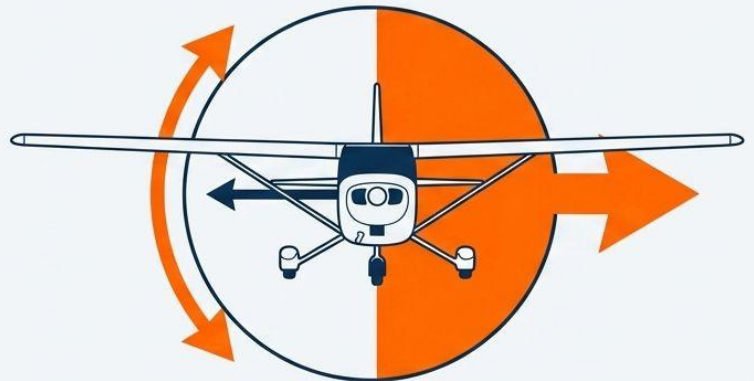
- Cuando el avión está a alto AOA (despegue, ascenso pronunciado), la pala DESCENDENTE de la hélice (la que va hacia abajo en su giro) tiene mayor AOA efectivo y produce más tracción que la pala ascendente.

- Para el avión típico americano (visto desde atrás, hélice gira horaria), la pala descendente es la del lado DERECHO.
- Resultado: más tracción a la derecha → yaw a la izquierda.
- Más pronunciado en despegue y ascenso pronunciado a baja velocidad.
- Compensación: PEDAL DERECHO en despegue y ascenso.

Efectos de la hélice en vuelo

Concepto Central: Tendencia izquierda a baja velocidad

- **Par reactivo:** La hélice gira a la derecha (vista desde cabina), transmitiendo una fuerza física que tiende a rotar el fuselaje a la izquierda.
- **Factor P:** En altos ángulos de ataque, la pala descendente genera mucho más empuje relativo, guiñando la nariz fuertemente a la izquierda.
- Estos efectos (junto a la estela helicoidal y la precesión giroscópica) actúan al unísono, exigiendo presión constante en el pedal derecho al ascender.



FACTOR P: ASIMETRÍA DE EMPUJE

La hélice no solo produce tracción: también introduce efectos secundarios que el piloto debe compensar:

Slipstream (estela helicoidal de la hélice)

- La hélice no empuja el aire en línea recta hacia atrás: lo empuja en hélice.
- Esa estela helicoidal envuelve el fuselaje y, al llegar a la deriva, la golpea desde un lado (típicamente del lado izquierdo en hélice horaria vista desde cabina).
- Resultado: yaw a la IZQUIERDA.
- Más pronunciado en alta potencia y baja velocidad (más slipstream, menos efectividad de timón).
- Compensación: pedal derecho. El diseñador puede inclinar la deriva ligeramente o ofrecer trim de timón.

Precesión giroscópica

- La hélice y el motor son un disco que gira: actúan como giroscopio.
- Si se aplica un momento al avión (subir la nariz, virar), la respuesta gyro se manifiesta 90° después en el sentido de rotación.
- En avión taildragger (rueda de cola) en despegue: al levantar la cola (rotación de pitch hacia abajo en torno al eje lateral), la precesión produce yaw a la IZQUIERDA.
- En aviones triciclo (C152, C172, PA-28): efecto menor en despegue.
- Compensación: pedal derecho en taildraggers, atención en aviones de hélice grande.

Resumen: «los cuatro efectos a la izquierda» en aviones americanos típicos

Los cuatro efectos (torque, P-factor, slipstream, precesión) tienden todos a llevar el avión a la IZQUIERDA.

Por eso:

- En despegue: SIEMPRE pedal derecho proporcional a la potencia y al AOA. El alumno PPA aprende a «sentir» el pedal necesario para mantener línea central.
- En ascenso máximo (VX, VY): mantener pedal derecho.
- En crucero: efectos menores; trim de timón en aviones que lo tienen.
- En descenso con potencia reducida: efectos casi nulos.

TENDENCIAS DE GIRO A LA IZQUIERDA (EFECTOS DEL MOTOR)

- En aviones monomotor de hélice dextrógira, 4 fuerzas desvían la nariz a la izquierda.
 - Son más críticas con alta potencia y baja velocidad de aire.
 - El piloto compensa aplicando presión proporcional en el pedal derecho.

LAS 4 CAUSAS DEL GIRO A LA IZQUIERDA

TORQUE (PAR MOTOR)



Reacción física al giro de la hélice que intenta rotar el fuselaje hacia la izquierda.

P-FACTOR (ASIMETRÍA DE TRACCIÓN)



La pala descendente de la hélice produce más empuje en ángulos de ataque altos.

SLIPSTREAM (ESTELA HELICOIDAL)



El flujo de aire en espiral golpea el lado izquierdo del estabilizador vertical.

PRECESIÓN GIROSCÓPICA



Reacción del disco de la hélice al cambiar de actitud (cabeceo), produciendo guiñada.

GESTIÓN OPERACIONAL (USO DEL PEDAL)

DESPEGUE Y ASCENSO MÁXIMO (VX/VY)



DERECHO

Aplicar pedal derecho proporcional a la potencia y al ángulo de ataque para mantener la línea central.

VUELO DE CRUCERO



COMPENSADOR DE TIMÓN



NEUTRO

Los efectos son menores; utilizar el compensador (trim) de timón si el avión dispone de él.

DESCENSO CON POTENCIA REDUCIDA



NEUTRO

Las tendencias son casi nulas; se requiere mínima o ninguna intervención en los pedales.

NOTA: En aviones europeos o ex-soviéticos con hélice de rotación CONTRARIA (giro antihorario visto desde la cabina, horario visto desde delante), los cuatro efectos se invierten: la tendencia es a la DERECHA y se requiere pedal IZQUIERDO. El alumno que cambia de avión debe internalizar esto. El Aero Boero AB-115 (argentino) tiene hélice estándar americana (giro horario visto desde cabina), comportándose como C172 a este respecto.

Capítulo 12. Performance básica del avión

La performance del avión se trató en detalle en el manual de Performance y Planificación. Aquí se da una visión integrada en términos aerodinámicos.

12.1 Curva de potencia (potencia requerida vs disponible)

Para el vuelo recto nivelado, el avión necesita una cierta POTENCIA REQUERIDA que vence la resistencia a una velocidad dada:

$$P_{req} = D \times V$$

Donde $D = D_{parásita} + D_{inducida}$. Como cada componente varía con V de distinta manera, P_{req} tiene forma característica:

- A muy baja velocidad: P_{req} alta ($D_{inducida}$ domina, V bajo, alto AOA).
- A velocidad intermedia: P_{req} mínima. Es la velocidad de mínima potencia, ligeramente menor que $(L/D)_{max}$.
- A alta velocidad: P_{req} alta ($D_{parásita}$ domina, V alto).

La POTENCIA DISPONIBLE depende del motor y de la hélice:

- A alta velocidad: la hélice es más eficiente, la potencia disponible es máxima.
- A baja velocidad: la hélice es menos eficiente.

La INTERSECCIÓN de $P_{disponible}$ y $P_{requerida}$ en distintas velocidades define:

- V_S : velocidad mínima sostenible (intersección a baja velocidad).
- V_{max} : velocidad máxima nivelada (intersección a alta velocidad).
- La diferencia entre P_{disp} y P_{req} a cada V es la POTENCIA EXCEDENTE, que es lo que permite ascender.

12.2 Régimen de ascenso

$R/C \approx (P_{excedente} / W) \times 33.000$ (en ft/min si potencia en HP y peso en lb).

- Es máximo cuando $P_{excedente}$ es máxima. Esa velocidad se llama V_Y (mejor régimen de ascenso).
- V_Y es típicamente cercana a la velocidad de máxima eficiencia.

12.3 Ángulo de ascenso

$\gamma \approx (T - D) / W$. Es máximo cuando $T - D$ es máxima.

- Esa velocidad se llama V_X (mejor ÁNGULO de ascenso).
- V_X es típicamente MENOR que V_Y .
- Aplicación: si hay obstáculo cerca tras el despegue, ascender a V_X para ganar altitud en menor distancia horizontal.
- Si hay obstáculos lejos pero quiero llegar pronto a altitud de crucero, ascender a V_Y .

12.4 Crucero económico vs máximo

- Crucero de velocidad máxima: 75 % de potencia o más, alta velocidad, alto consumo.
- Crucero de máxima ENDURANCE (tiempo de vuelo máximo): velocidad de mínima potencia, consumo mínimo por hora.
- Crucero de máximo ALCANCE (distancia máxima con dado combustible): velocidad de mejor L/D ajustada por viento.
- Aviones PPA: típicamente 65–75 % de potencia para crucero práctico, ~ 100–115 KIAS para C172.

12.5 Descenso

En descenso sin motor (planeo) ya se trató. En descenso con motor reducido:

- Régimen de descenso típico de tránsito: 500 ft/min a velocidad cómoda y motor a ~ 65 % de su potencia de crucero.
- Descenso de aproximación: ~ 500 ft/min, velocidad de aproximación según POH.

12.6 Efectos de la altitud densidad sobre la performance

- Mayor DA → menor densidad → menor potencia del motor (motores atmosféricos), menor tracción de la hélice, menor sustentación a misma IAS pero también menor resistencia a misma IAS.
- Resultado neto: distancia de despegue MÁS LARGA, régimen de ascenso MENOR, velocidades de pérdida iguales (en IAS), VFE y VNE iguales (en IAS).
- Aplicación a operación argentina: en SASA Salta (4.058 ft) en verano, DA puede llegar a 8.000 ft. Las distancias de despegue se incrementan 50 % o más. Verificar siempre con el POH.

12.7 Efectos del peso sobre la performance

- Mayor peso → mayor sustentación necesaria → mayor AOA a misma velocidad → mayor V_S , mayor distancia de despegue, menor régimen de ascenso, mayor radio de viraje, mayor distancia de aterrizaje.
- $V_{S_actual} \approx V_{S_MTOW} \times \sqrt{W_actual / W_MTOW}$.

- Por ejemplo C172 a 80 % de MTOW: $VS \approx VS_{MTOW} \times \sqrt{0,80} \approx 0,89 \times VS_{MTOW}$.

12.8 Efectos del viento sobre la performance en pista

- Viento de cara: REDUCE distancia de despegue y de aterrizaje ($V_{\text{avión sobre suelo}} = TAS - V_{\text{viento}}$).
- Viento de cola: AUMENTA distancias considerablemente.
- Viento cruzado: no afecta significativamente la distancia, pero exige técnica de aterrizaje específica y respeta limit demostrado por POH.
- Regla aproximada: cada 10 kt de viento de cara reduce $\sim 10\%$ la distancia de despegue. Cada 10 kt de viento de cola la aumenta $\sim 20\%$.

PARTE 2 — Reconocimiento de la pérdida, entrada en barrena y técnicas de recuperación

La pérdida (stall) y la barrena (spin) son los estados aerodinámicos críticos que más muertes producen en aviación general. Los informes JST son consistentes con la estadística mundial: «pérdida de control en vuelo» (LOC-I) es la categoría dominante de accidentes mortales en aviación general en Argentina, y en muchos casos su origen es una pérdida desarrollada o no reconocida que llevó a barrena o impacto con terreno. Esta parte del manual desarrolla la fenomenología, el reconocimiento y la recuperación de estos estados, con énfasis en la PREVENCIÓN.

Capítulo 13. La pérdida (stall) — aerodinámica

13.1 Definición precisa

La pérdida es el estado aerodinámico en que el flujo de aire sobre el extradós del ala se SEPARA, llevando a una caída brusca del coeficiente de sustentación (CL). Ocurre cuando el ÁNGULO DE ATAQUE excede el ángulo crítico (α_{crit}).

Conceptos cruciales que el alumno PPA debe internalizar:

- La pérdida es función del AOA, NO de la velocidad. La velocidad de pérdida (VS) es la velocidad a la que SE ALCANZA el AOA crítico en una condición específica (vuelo nivelado, $n = 1$).
- El ala puede entrar en pérdida a CUALQUIER velocidad, a CUALQUIER actitud, en CUALQUIER fase del vuelo. Solo requiere que se alcance α_{crit} .
- Por ejemplo, en un viraje cerrado a alta velocidad, tirar bruscamente del elevador puede llevar el AOA al crítico aunque la velocidad sea alta (accelerated stall).
- Por ejemplo, en un picado pronunciado, tirar bruscamente del elevador para recuperar nivelado puede producir pérdida momentánea aunque la velocidad sea alta.
- Por ejemplo, en el flare al aterrizar, mantener el elevador atrás demasiado tiempo lleva el AOA hacia el crítico (controlado: la pérdida en el suelo deposita el avión); si se hace en el aire por error, pérdida real.

ADVERTENCIA: La concepción de que «el avión entra en pérdida porque va lento» es PARCIALMENTE correcta y por eso peligrosa. Lo correcto es: «el avión entra en pérdida porque excedió el AOA crítico». La velocidad baja predispone a alto AOA, sí, pero NO es la causa. La causa es siempre el AOA. Esta distinción es la clave del reconocimiento operacional.

13.2 Mecanismo aerodinámico de la pérdida

Para entender qué pasa físicamente:

10. A AOA bajo, el flujo sobre el extradós es laminar o turbulento adherido. Las líneas de corriente siguen el contorno del ala.
11. Al aumentar AOA, el punto de transición laminar-turbulento se mueve hacia adelante, y el flujo turbulento ocupa más extradós. CL sigue creciendo.
12. Al acercarse a α_{crit} , el flujo comienza a SEPARARSE cerca del borde de fuga. CL crece más lentamente.
13. A α_{crit} , la separación avanza hacia adelante y, en cuestión de fracciones de segundo, cubre la mayor parte del extradós. CL ALCANZA SU MÁXIMO (CL_{max}).
14. Si se sigue aumentando AOA: el flujo está separado en casi toda la cuerda. CL CAE BRUSCAMENTE. CD aumenta. El ala ha entrado en pérdida.

La caída de CL es lo que el piloto siente como «el avión deja de sostenerme»:

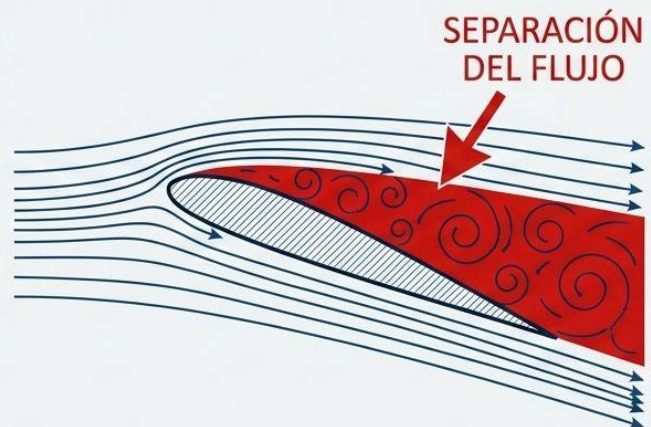
- La sustentación cae bruscamente.
- La nariz tiende a caer (porque el ala produce menos momento de sustentación).
- La actitud puede pasar de positiva a negativa rápidamente.
- Si la pérdida es asimétrica (un ala antes que la otra), el avión también rola.

El Manual Técnico Operacional

La pérdida aerodinámica (*stall*)

Concepto Central: Exceso de Ángulo de Ataque

- La pérdida ocurre única y exclusivamente cuando se supera el Ángulo de Ataque crítico (típicamente 15-20°); el flujo se separa del extradós.
- NO depende de la velocidad ni de la actitud: en un viraje cerrado, la pérdida puede ocurrir a velocidades mucho mayores que V_{s1} .
- Síntomas inconfundibles previos a la rotura: efectividad reducida de los controles, alarma acústica (*horn*) y severa vibración estructural.



13.3 Ángulo de ataque crítico

El α_{crit} depende del perfil. Para perfiles típicos de aviones PPA:

- Sin flaps: $\alpha_{crit} \approx 15^\circ-18^\circ$.
- Con flaps: α_{crit} menor, $\approx 12^\circ-15^\circ$ (los flaps aumentan CL_{max} pero a menor α , lo que es una ventaja porque permite velocidad menor a misma sustentación).
- Modificado por: hielo en el LE (reduce α_{crit} drásticamente), contaminación (insectos, suciedad).

Importante: el AOA es invisible para el piloto en aviones PPA típicos (no hay indicador de AOA). El piloto lo INFIERE por velocidad, actitud, sonido, y por las advertencias del avión.

13.4 La velocidad de pérdida (VS)

VS es la velocidad mínima a la que el ala produce sustentación igual al peso EN UNA CONDICIÓN ESPECÍFICA. Las condiciones de referencia y los símbolos:

- VS: velocidad de pérdida en una configuración dada, generalmente vuelo nivelado, peso definido.
- VS0: velocidad de pérdida con flaps en posición de aterrizaje (configuración «sucia»). Marcada en el ANEMÓMETRO como borde inferior del ARCO BLANCO.
- VS1: velocidad de pérdida en configuración limpia (flaps arriba, tren arriba si retráctil). Marcada como borde inferior del ARCO VERDE.

Valores típicos:

Avión	VS0 (KIAS, MTOW)	VS1 (KIAS, MTOW)	VFE
Cessna 152	35	43	85
Cessna 172N	41	47	85 (40°) / 110 (10°)
Piper PA-28-140	55	64	100
Piper PA-28-181 Archer	45	53	102
Diamond DA20	32	35	105
Tecnam P2008	40	45	80
Aero Boero AB-115	36	41	80

NOTA: Las cifras son representativas. El POH del avión específico es la fuente operativa. Las velocidades pueden variar entre series del mismo modelo.

13.5 VS varía con el peso

- Como $L = \frac{1}{2}\rho V^2 S C_L$, y en pérdida $L = W$ (vuelo nivelado), $C_L = C_{L_max} \rightarrow VS = \sqrt{2W / (\rho \times S \times C_{L_max})}$.
- VS es proporcional a \sqrt{W} .
- Un avión a 80 % del MTOW tiene $VS = VS_MTOW \times \sqrt{0,8} \approx 0,89 \times VS_MTOW$.
- Un avión a 60 % del MTOW tiene $VS \approx 0,77 \times VS_MTOW$. Diferencia del 23 %.
- Ejemplo: C172 a MTOW tiene $VS1 = 47$ KIAS. A 60 % MTOW (caso entrenamiento con solo piloto y poco combustible), $VS1 \approx 36$ KIAS.

13.6 VS varía con el factor de carga

Ya tratado en el Cap. 10. La relación crucial:

$$VS_n = VS \times \sqrt{n}$$

Donde n es el factor de carga. Implicaciones:

- En vuelo nivelado $n = 1$: VS es la del POH.
- En viraje a 60° $n = 2$: VS aumenta 41 %.
- En recovery de picado tirando 2,5 g: VS aumenta 58 %.
- Esta variación NO está reflejada en el anemómetro: el piloto puede leer 60 KIAS, alabeo 60° , y estar a 1 kt sobre la pérdida sin que el instrumento lo advierta.

13.7 VS y configuración

- Flaps extendidos: C_{L_max} aumenta \rightarrow VS DISMINUYE.
- Tren extendido (en retráctil): no afecta significativamente VS, pero aumenta CD.
- Hielo en LE: C_{L_max} disminuye dramáticamente \rightarrow VS AUMENTA, sustancialmente. Puede ser 30–40 % mayor.
- Contaminación (insectos, escarcha, lluvia fuerte): pequeños aumentos de VS, hasta 10 % en algunos casos.

13.8 VS y altitud / densidad

Como VS depende de la densidad (ρ), en altitud densidad alta:

- La VS verdadera (TAS) AUMENTA con altitud.
- La VS INDICADA (IAS o CAS) es aproximadamente CONSTANTE (porque IAS «cancela» el efecto de densidad).
- El piloto opera con IAS, así que VS «en la cabina» no cambia con altitud.

- Pero el riesgo es indirecto: a altitud densidad alta, la performance del avión es peor, los virajes deben ser más amplios, y el margen sobre pérdida puede ser comprometido si el piloto no ajusta el plan.

Capítulo 14. Reconocimiento de la pérdida

14.1 Síntomas previos a la pérdida (aproximación)

Antes de entrar en pérdida, el avión envía varias señales que el piloto debe reconocer:

- Velocidad baja: el anemómetro muestra valores por debajo de la velocidad de aproximación esperada. La señal más obvia, pero no la única.
- Actitud alta de la nariz: el piloto ve más cielo que de costumbre por el parabrisas.
- Esfuerzos pesados de mandos: los alerones, elevador y timón pierden efectividad. El piloto tiene que mover más para obtener la misma respuesta.
- Sonido del aire: el «silbido» del aire sobre el fuselaje y las alas disminuye, se vuelve más grave.
- Vibración o «buffeting»: el flujo separado del extradós produce turbulencia que se siente en el estabilizador horizontal (que está detrás del ala). La vibración se transmite a la palanca y al fuselaje. Es una de las señales más fiables y específicas.
- Sonido del «warning» (avisador acústico de pérdida): casi todos los aviones PPA tienen un detector de AOA en el borde de ataque que activa una alarma sonora (bocina, vane) cuando AOA se acerca al crítico. Activación típica: 5–10 kt antes de VS.
- Indicador visual: algunos aviones tienen luz de aviso de pérdida o indicador de AOA.
- Mando de timón con efecto menor: en aproximación a pérdida coordinada, los pedales pierden autoridad.

14.2 Síntomas durante la pérdida

- Caída brusca de la nariz: la sustentación cae, el momento del estabilizador empuja la nariz abajo.
- Caída de altitud: incluso con elevador atrás, el avión desciende. Puede ser severa.
- Buffeting pronunciado.
- Pérdida de respuesta del elevador a la entrada (tirar más no produce más nariz arriba).
- Posible alabeo si la pérdida es asimétrica: un ala pierde sustentación antes que la otra. Si el avión está en bola descentrada (deslizamiento), un ala entra primero → roll hacia ese lado → posible entrada en BARRENA.
- Velocidad indicada típicamente baja, pero NO siempre (pérdida acelerada con velocidad alta es posible).

14.3 Reconocimiento por fase de vuelo

En vuelo nivelado a baja velocidad (slow flight)

- Es la situación más controlable: el piloto la está produciendo a propósito en un ejercicio.
- Síntomas claros, recuperación simple.

En aproximación final

- Aproximación demasiado lenta, especialmente con viento de cola o cizalladura.
- Si el piloto «mantiene la altura tirando» del elevador, la velocidad cae y el AOA sube.
- Recuperación a baja altitud es marginal: poco margen vertical para perder altitud.
- ESTA es la pérdida que mata.

En patrón base-final (viraje cerrado)

- Especialmente en aeródromos no familiares o con viento que «empuja» el avión más allá de la línea de pista.
- Piloto vira para «meterse en final»: alabeo cerrado, posiblemente con timón derrapante para «ayudar» a virar.
- El derrape coordinado con el alerón puede pre-disponer a barrena.
- Otro caso del clásico «stall-spin» a baja altitud.

ADVERTENCIA: La pérdida en base-final es uno de los escenarios más letales en aviación general. El protocolo de defensa: (1) volar el patrón a velocidades del POH, con margen al menos 30 % sobre VS; (2) virajes coordinados, alabeo no mayor a 30°; (3) si la geometría del patrón falla, IR ALREDEDOR (go-around) y rehacer, NO intentar «corregir» con virajes cerrados. La regla es categórica: si me veo apretando el viraje a baja altitud en base o final, es señal de aborto.

En recuperación de descenso o picada

- Pull-up brusco para recuperar nivelado tras un descenso pronunciado.
- Factor de carga sube → VS sube → pérdida acelerada posible aunque velocidad sea alta.
- Síntomas: buffeting, pérdida de respuesta del elevador.

En despegue, justo después de rotación

- Si el piloto rota demasiado pronto (velocidad insuficiente) o eleva la nariz demasiado.
- Avión deja la pista pero no tiene velocidad para sostenerse: cae, retoca pista, posibles daños.
- Especialmente peligroso en aeródromos cortos en altura (alta DA).

En ascenso pronunciado

- Si se intenta VX cuando el avión está cargado al MTOW y a DA alta, el régimen es marginal.

- Si una distracción (mirar afuera, conversar con pasajero, ajustar radio) lleva a aumentar la actitud para «ascender más rápido», puede entrar en pérdida.

14.4 La «mente del piloto» en la pérdida inminente

Aspectos psicológicos:

- El piloto sin entrenamiento adecuado tiende a TIRAR del elevador cuando ve que el avión pierde altitud. Si está cerca de pérdida, tirar EMPEORA todo. Es contraintuitivo y mortal.
- El piloto debe ENTRENAR la respuesta correcta: empujar el elevador (bajar la nariz) para reducir AOA. La práctica con instructor a altitud segura es esencial.
- El sonido del aviso de pérdida es una señal clara: el piloto debe registrarla como «AOA cercano al crítico, BAJAR LA NARIZ».

Capítulo 15. Recuperación de la pérdida

15.1 Procedimiento estándar

La recuperación de una pérdida convencional (con o sin potencia, sin barrena) sigue un procedimiento universal aceptado por FAA, EASA, y ANAC:

15. REDUCIR el AOA: empujar el volante hacia adelante (nariz abajo). Esta es la acción MÁS IMPORTANTE y debe ser INMEDIATA. Reducir AOA es lo único que «sale» de la pérdida aerodinámicamente.
16. Aplicar POTENCIA plena (mezcla rica, palanca al frente). Esto acelera la recuperación y minimiza la pérdida de altitud.
17. Mantener alas niveladas con coordinación de timón y alerones (sin uso excesivo de alerón a alto AOA por riesgo de pérdida asimétrica).
18. Una vez que el avión vuela normalmente (velocidad creciente, buffeting cesa): suavemente recuperar nivelado, vigilar para no producir SECONDARY STALL.
19. Mantener ese estado un momento; verificar instrumentos, posición, plan.

Recuperación de la pérdida

Concepto Central: Reducción inmediata del AoA

- **Paso vital:** Empujar la palanca hacia adelante enérgicamente para REDUCIR el AoA por debajo del límite crítico y restaurar el flujo.
- **Aplicar potencia máxima** de inmediato para recuperar energía y mantener las alas niveladas utilizando estrictamente los pedales.
- **Error común letal:** Aplicar solo potencia o tirar de la palanca apresuradamente para no perder altitud, lo que induce una pérdida secundaria.



Flightpath

El procedimiento NUDGE:

- «N»: Nose down (reducir AOA, lo primero).
- «U»: Use power (aplicar potencia).
- «D»: Don't bank (mantener nivelado).
- «G»: Get out (recuperar nivelado).
- «E»: Evaluate (revisar la situación).

O la versión PARE más simple:

- «P»: Power (potencia plena).
- «A»: Attitude (nariz abajo o nivelar).
- «R»: Rudder (timón para coordinar).
- «E»: Elevator (suavemente para recuperar).

15.2 Errores comunes en recuperación

- Tirar del elevador al detectar pérdida o caída de altitud: PROHIBIDO. Empeora todo.
- Usar solo alerones para nivelar alas: en pérdida, los alerones pueden no ser efectivos o incluso producir pérdida en el ala que se intenta levantar (el alerón abajo aumenta AOA local).

- Aplicar potencia sin reducir AOA: la potencia ayuda pero no es suficiente; el AOA debe reducirse.
- Recuperar nivelado demasiado pronto, antes de tener velocidad: puede inducir un secondary stall.
- Pánico, sobrecorrección, parálisis.

15.3 Recuperación con potencia (power-on stall)

Pérdida con potencia significativa (ascenso pronunciado, después de despegue):

- Síntomas más bruscos por los efectos del motor (torque, P-factor, slipstream tendiendo al alabeo a la izquierda).
- Recuperación similar pero con cuidado de coordinación: la potencia genera mucho yaw a la izquierda; el avión puede rolar izquierda durante recovery.
- Mantener pedal derecho proactivamente.

15.4 Recuperación con flaps (configuración de aterrizaje)

- Si la pérdida ocurre con flaps en posición de aterrizaje (30° o 40°), la recuperación es similar pero la velocidad de vuelo posterior es menor (configuración sucia).
- NO retraer flaps inmediatamente al recuperar: pueden estar bajo VFE pero la retracción brusca reduce CL_{max} y puede provocar nuevo stall.
- Procedimiento: reducir AOA, aplicar potencia, ganar velocidad, retraer flaps PROGRESIVAMENTE a las velocidades del POH.
- En aviones con flaps eléctricos (C172): la retracción es lenta de por sí; el riesgo es menor.
- En aviones con flaps manuales (Cessna antiguos, PA-28): retraer un nivel por vez.

Capítulo 16. Tipos especiales de pérdida

16.1 Pérdida acelerada (accelerated stall)

Pérdida producida por aumento súbito del factor de carga (g):

- En viraje cerrado: el piloto tira más para mantener altitud, aumenta AOA, alcanza crítico.
- En recuperación de picado: tirar bruscamente del elevador aumenta el factor de carga.
- En turbulencia severa: ráfagas verticales aumentan AOA momentáneamente.

Características:

- Velocidad indicada PUEDE SER ALTA (no necesariamente baja).
- El buffeting aparece antes.
- La pérdida es más brusca.
- Posible pérdida asimétrica con alabeo en el sentido contrario al viraje.

Recuperación:

- REDUCIR el factor de carga: relajar el elevador, no tirar.
- Si la situación está en viraje pronunciado: nivelar progresivamente.
- Generalmente la recuperación es rápida porque la velocidad ya es alta.

16.2 Pérdida secundaria (secondary stall)

Ocurre cuando, durante la recuperación de una pérdida, el piloto intenta recuperar nivelado demasiado pronto o demasiado bruscamente:

- El avión está saliendo de pérdida, velocidad creciente pero aún baja.
- El piloto tira para nivelar.
- AOA sube de nuevo hacia crítico → pérdida secundaria.

Prevención: tras la recuperación primaria, esperar a tener velocidad cómoda (al menos $1,3 \times VS$, idealmente más) antes de transitar a vuelo nivelado o ascendente.

16.3 Pérdida cruzada (cross-control stall)

Pérdida en deslizamiento o derrape cruzado (cross-controlled), donde alabeo y timón están aplicados a lados opuestos:

- Típicamente en base-final cuando el piloto intenta corregir alineación con pista usando timón en lugar de virar más con alabeo (skidding turn).
- El ala interior del viraje (al lado del timón) puede entrar en pérdida antes que la exterior.
- La pérdida es asimétrica, el avión rola RÁPIDAMENTE hacia el ala que entró en pérdida (hacia el interior del viraje), y puede entrar inmediatamente en BARRENA.

ADVERTENCIA: La pérdida cruzada en base-final es la receta clásica del «stall-spin» mortal a baja altitud. No hay margen vertical para recuperar. La defensa es absoluta: viraje base-final COORDINADO siempre, alabeo $\leq 30^\circ$, NO usar timón para «forzar» alineación.

16.4 Pérdida con hielo (icing-induced stall)

- Hielo en LE distorsiona el perfil, reduce CL_{max} drásticamente, AVANZA α_{crit} (entra antes en pérdida).
- VS puede aumentar 30–50 %.
- Síntomas previos pueden estar ENMASCARADOS (el buffeting es menos perceptible).
- El aviso acústico puede no activarse a tiempo si el sensor está congelado.

Recuperación:

- Mismo procedimiento básico pero más velocidad de recuperación.
- MÁS importante: salir de las condiciones de engelamiento (cambiar altitud, salir de la nube).

- Velocidad de aproximación con hielo debe ser MÁS ALTA que la normal (consultar POH si hay procedimientos para hielo conocido; en aviones no FIKI, simplemente prevención total).

16.5 Pérdida en aterrizaje (stall on landing)

El aterrizaje normal en avión incluye un FLARE: justo antes de tocar pista, el piloto eleva la nariz para reducir el régimen de descenso y aterrizar suavemente con las ruedas principales primero. Esto se hace progresivamente AOA creciente.

- Aterrizaje normal en C172: tocar pista con AOA cerca del crítico, justo antes de pérdida → tres-ruedas o ruedas principales primero.
- Si el piloto exagera el flare (eleva demasiado la nariz), el avión entra en pérdida ANTES de tocar la pista: cae bruscamente, daño al tren o estructura («hard landing»).
- Si el piloto no flarea lo suficiente, aterriza «con rueda de nariz primero»: estresa el tren delantero, posible rebote («bouncing»).
- La técnica correcta de flare es uno de los aprendizajes centrales del PPA. Se practica hasta dominar.

Capítulo 17. Pérdida y los avisos en cabina

17.1 El detector de pérdida (stall warning)

La mayoría de los aviones PPA tienen un detector AOA simple:

- Mecánico: una pequeña aleta o vane en el borde de ataque del ala que, al alcanzar AOA cerca del crítico, levanta o gira por la presión local.
- Eléctrico: el movimiento del vane cierra un interruptor que activa una bocina, una luz, o ambos.
- Calibración: la activación es a 5–10 kt antes de VS en la configuración (limpia o con flaps).

Limitaciones:

- El vane puede congelarse en condiciones de hielo.
- La activación es por AOA, no por velocidad: en pérdida acelerada con velocidad alta, el aviso suena con alta velocidad indicada.
- Algunos aviones no tienen aviso luminoso, solo sonoro.
- El piloto debe verificar el funcionamiento del aviso en el prevuelo (el POH indica cómo, generalmente succionando el vane o levantándolo a mano).

17.2 Indicador de AOA (AOA indicator)

Algunos aviones modernos PPA (especialmente Diamond DA20/40, algunos Tecnam) tienen indicador de AOA en cabina:

- Muestra el AOA actual como porcentaje del crítico, o como flechas/banderas indicadoras.

- Mucho más útil que la velocidad: indica directamente lo que importa aerodinámicamente.
- Permite vuelos a velocidad próxima al óptimo (mejor L/D) sin entrar en pérdida.
- Reduce significativamente el riesgo de pérdida accidental.

NOTA: *El AOA indicator es una mejora de seguridad significativa que aún no se ha generalizado en aviones de instrucción PPA. Cuando esté disponible en el avión, el alumno debe aprender a usarlo prioritariamente.*

17.3 Velocímetro y el «escenario peligroso»

- El velocímetro tiene un ARCO BLANCO (configuración flaps): de VS0 a VFE.
- ARCO VERDE (operación normal): de VS1 a VNO.
- ARCO AMARILLO (precaución, solo en aire calmo): de VNO a VNE.
- LÍNEA ROJA: VNE.
- LÍNEA RADIAL (al borde inferior verde): VS1.

La interpretación operacional: volar siempre dentro del arco verde en operación normal; respetar el arco blanco con flaps; respetar el amarillo solo en aire calmo; nunca exceder VNE.

Capítulo 18. La barrena (spin) — aerodinámica

18.1 Definición

La barrena es un estado aerodinámico en el cual el avión se encuentra en pérdida y simultáneamente rota en torno a su eje vertical, descendiendo en una trayectoria helicoidal. Es la consecuencia más grave de una pérdida cuando esta es asimétrica.

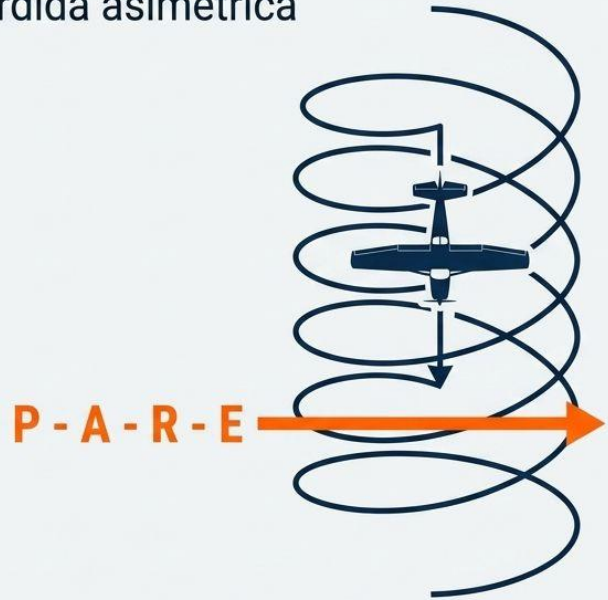
Distinciones cruciales:

- La BARRENA es PÉRDIDA + AUTORROTACIÓN: las dos alas están en pérdida, una más que la otra, y la asimetría sostenida produce rotación.
- La barrena NO es lo mismo que la PICADA EN ESPIRAL (spiral dive). En la espiral el avión NO está en pérdida; está volando normalmente en alabeo cerrado con velocidad creciente. Veremos esta distinción crítica en el Cap. 20.
- Una pérdida asimétrica que el piloto no recupera puede desarrollarse en barrena en pocos segundos.

La barrena (spin): aerodinámica y recuperación

Concepto Central: Autorrotación por pérdida asimétrica

- La barrena es una pérdida asincrónica provocada por pisar mal el pedal (derrape); un ala entra en pérdida más profunda y el avión rota.
- La aeronave ingresa en una trayectoria helicoidal descendente, sostenida por la aerodinámica asimétrica del ala interior.
- Recuperación PARE: Potencia en reposo, Alerón neutro, Rudder contrario a la rotación, Elevador adelante para romper el stall.



Flightpath

18.2 Aerodinámica de la autorrotación

Cuando ambas alas están cerca del AOA crítico, basta una pequeña diferencia de AOA entre ellas (por turbulencia, deslizamiento, derrape, deflexión asimétrica de alerones) para que una entre antes en pérdida:

20. El ala con mayor AOA (digamos, la izquierda) pierde sustentación primero. CL cae.
21. El ala derecha, con menor AOA pero también cerca del crítico, mantiene aún sustentación o está en pérdida menos profunda. Su CL es mayor.
22. La asimetría de CL produce alabeo HACIA EL ALA EN PÉRDIDA (a la izquierda en este caso).
23. El alabeo introduce más asimetría: el ala izquierda «cae» más, su AOA efectivo (considerando el componente vertical de la velocidad relativa) AUMENTA aún más. Su pérdida se profundiza.
24. Simultáneamente, el ala derecha «sube», su AOA efectivo DISMINUYE, y sale de la condición de pérdida o se aleja del crítico.
25. Ahora la izquierda está MUY EN PÉRDIDA, la derecha NO o casi no. La asimetría se sostiene.
26. Como la izquierda está en pérdida, también tiene MAYOR resistencia (CD alto). La derecha tiene menor resistencia.
27. La asimetría de resistencia produce YAW HACIA EL ALA EN PÉRDIDA (izquierda).

28. El yaw hacia izquierda hace que el ala izquierda «retroceda» en el viento relativo: su velocidad relativa al aire disminuye → su AOA efectivo aumenta más → pérdida más profunda.
29. El ala derecha, «avanzando» en el viento relativo, ve aumentar su velocidad → aún más alejada de la pérdida.
30. La autorrotación se sostiene: el avión rota sobre su eje vertical (combinado con descenso vertical) en una autorrotación estable.

La trayectoria resultante: el avión cae en una espiral cerrada (radio < envergadura típicamente), girando alrededor de un eje aproximadamente vertical, con la nariz por debajo del horizonte. Velocidad de descenso: ~ 4.000–6.000 ft/min en aviones PPA típicos. Velocidad de rotación: una vuelta cada 2–3 segundos.

18.3 Diferencia con la espiral

- Barrena: ambas alas en pérdida. Velocidad indicada BAJA (cerca de VS). Factor de carga BAJO (~1 g o menos). Rotación a velocidad angular constante. Nariz baja.
- Espiral (spiral dive): alas NO en pérdida. Velocidad indicada CRECIENTE (puede llegar a VNE rápido). Factor de carga ALTO (3–5 g posibles). Alabeo cerrado mantenido. Nariz muy baja, picada.

18.4 Condiciones que predisponen a barrena

- Pérdida con derrape (skid): bola descentrada hacia el interior del viraje, especialmente en base-final.
- Pérdida con alabeo establecido: la asimetría inicial está dada.
- Pérdida con potencia alta: el yaw producido por la potencia ayuda a la autorrotación.
- Pérdida en viraje pronunciado y atrasado: alta vulnerabilidad.
- Pérdida en ascenso pronunciado tras despegue.
- Pérdida con CG atrasado: la recuperación es más difícil, y la entrada más probable.

18.5 Fases de la barrena

Una barrena «completa» tiene fases reconocibles:

- Fase de incipencia (incipient spin): primeras 2–3 vueltas. La barrena se está estableciendo, los parámetros no son estables. La rotación es desordenada. RECUPERACIÓN FÁCIL si se actúa rápido.
- Fase desarrollada (fully developed spin): rotación estable, parámetros constantes. La recuperación requiere procedimiento específico.
- Fase de recuperación: tras aplicar el procedimiento, el avión sale de la autorrotación y vuelve a vuelo normal.

Para el piloto PPA: en cualquier práctica de pérdida, si se detecta el inicio de rotación (incipient spin), se debe interrumpir INMEDIATAMENTE el ejercicio aplicando el procedimiento de recuperación. NUNCA permitir el desarrollo de la barrena en aviones no certificados para spin.

18.6 Tipos de barrena

- Barrena erecta (upright spin): el avión cae con la nariz hacia abajo. La más común y la enseñada.
- Barrena invertida (inverted spin): el avión cae con la nariz hacia abajo pero con el dorso hacia abajo (el piloto está «invertido»). Solo en aviones acrobáticos.
- Barrena plana (flat spin): la nariz NO está muy abajo (actitud horizontal o moderada). Velocidad de rotación más alta, factor de carga lateral mayor, más difícil de recuperar. Puede ser inducida por CG atrasado o carga mal distribuida. ALGUNOS aviones son propensos a flat spin; otros casi nunca. En aviones PPA estándar es rara.
- Barrena acelerada o «steep spin»: nariz muy abajo, rotación rápida.

18.7 Certificación para barrena

Los aviones se certifican para distintas categorías:

- Categoría NORMAL (la mayoría de los aviones PPA): NO certificado para barrena intencional. El POH lo prohíbe. La barrena en estos aviones es siempre un evento NO PLANIFICADO y debe evitarse a toda costa. Si entra, hay procedimiento de recuperación pero NO se entrena la barrena completa.
- Categoría UTILIDAD (utility): certificada para algunas maniobras, posiblemente incluyendo barrena de hasta cierto número de vueltas. C172 en algunas configuraciones (peso reducido, sin pasajero atrás) entra en categoría utility.
- Categoría ACROBÁTICA: certificada para barrena completa y otras maniobras. Aero Boero AB-95/115 en cierta configuración es acrobático; Cessna 152 Aerobat; Citabria; Pitts. En estos aviones se puede entrenar barrena con instructor calificado.

NOTA: En Argentina, la barrena se entrena formalmente en aviones acrobáticos con instructor habilitado. El alumno PPA estándar (en C152, C172 normal, PA-28) hace solo APROXIMACIÓN a pérdida y recuperación, sin entrar en barrena. Para entrenar barrena completa, se debe usar un avión apropiado en una escuela específica con instructor habilitado.

Capítulo 19. Recuperación de la barrena

19.1 Procedimiento estándar

El procedimiento de recuperación estándar de barrena, aplicable a la mayoría de los aviones convencionales, tiene una secuencia precisa. La nemotécnica internacional usada es PARE:

31. P — POTENCIA: REDUCIR a ralentí. La potencia alta sostiene la autorrotación; quitarla es lo primero.

32. A — ALERONES: NEUTRO. Los alerones a alto AOA pueden empeorar la barrena.
33. R — RUDDER (timón): aplicar PLENO al lado OPUESTO de la rotación. Si la barrena es a la izquierda, pedal derecho pleno.
34. E — ELEVADOR: empujar hacia ADELANTE (nariz abajo) SOLO DESPUÉS de haber aplicado el timón. Esto reduce AOA y rompe la condición de pérdida.

Tras esta secuencia, el avión sale de la barrena, queda en picada pronunciada y con velocidad creciente. Entonces:

35. Centrar el timón inmediatamente después de que la rotación cese (si no, podría entrar en barrena al lado opuesto).
36. Suavemente recuperar nivelado tirando del elevador, vigilando para no exceder factor de carga ni VNE.
37. Aplicar potencia gradualmente cuando esté nivelado.

Versión simplificada en inglés: «PARE» = Power idle, Ailerons neutral, Rudder opposite, Elevator forward.

Versión Beggs-Mueller (alternativa publicada): «hands off, opposite rudder». Para muchos aviones modernos, soltar el control de cabeceo y aplicar pedal opuesto es suficiente para iniciar recuperación. Sin embargo, PARE es el estándar enseñado.

19.2 Errores en la recuperación

- Aplicar alerones al lado opuesto de la rotación: PEOR. Aumenta la asimetría.
- Tirar del elevador en lugar de empujar: mantiene la pérdida.
- Aplicar timón y elevador SIMULTÁNEAMENTE: en algunos aviones puede no funcionar; el orden TIMÓN→ELEVADOR es el aprendido.
- No centrar el timón tras detener rotación: puede inducir barrena al lado opuesto.
- Tirar bruscamente del elevador para recuperar nivelado tras la salida: posible secondary stall, o sobrecarga estructural.

19.3 Recuperación por modelo de avión

El procedimiento estándar PARE funciona para la mayoría de los aviones PPA, pero el POH del avión específico debe leerse:

- Cessna 152: PARE estándar. El AB-95/AB-115 argentino también.
- Algunos aviones especiales: pueden requerir variantes (mantener flaps en cierta posición, secuencia distinta).
- Aviones con CG atrasado o cargas extrañas: la barrena puede ser «plana» o particularmente persistente. Recuperación puede requerir varias vueltas.

19.4 Altitud necesaria para recuperación

Una barrena pierde aproximadamente 500–1.000 ft por vuelta de autorrotación, más la altitud de la recuperación posterior. Para una barrena de 1–2 vueltas con recuperación pronta:

- Altitud perdida típica: 1.500–2.500 ft.
- Por eso los ejercicios de pérdida con barrena se INICIAN a mínimo 4.000 ft AGL (preferiblemente 5.000 ft) para tener margen.
- Por eso una barrena que entra a baja altitud (base-final típicamente bajo 1.000 ft AGL) NO ES RECUPERABLE: no hay margen vertical.

ADVERTENCIA: La pérdida-barrena a baja altitud es el escenario MORTAL más documentado en aviación general. Defensa absoluta: vuelo coordinado siempre, especialmente en patrón; alabeo limitado; márgenes de velocidad respetados; CG dentro de la envolvente. Y, si se llega a entrar en pérdida a baja altitud, recuperación inmediata empujando para reducir AOA antes que se desarrolle asimetría.

Capítulo 20. Spiral dive — la confusión peligrosa

20.1 Definición

La picada en espiral (spiral dive) es una situación donde el avión está en alabeo pronunciado, picada (nariz baja), velocidad CRECIENTE rápidamente, factor de carga ALTO. El avión NO está en pérdida; está volando normalmente, pero en una trayectoria que lo lleva a exceder VNE o a sobrecargas estructurales si no se corrige.

20.2 Cómo se entra en spiral

- Pérdida de referencia visual (VFR en IMC, vuelo nocturno sin instrumentos, distracción).
- El avión desarrolla alabeo gradual no advertido por el piloto (por inestabilidad lateral leve, asimetría de combustible, perturbaciones).
- Al alabeo aumentando, la sustentación se inclina más, el componente vertical disminuye, el avión empieza a perder altitud.
- Si el piloto, sin ver el horizonte, intenta «levantar la nariz» tirando del elevador para detener la pérdida de altitud, EMPEORA la situación: tirar en alabeo cierra el viraje, factor de carga aumenta, velocidad aumenta (porque el descenso continúa).
- En segundos: alabeo 60° o más, picada pronunciada, velocidad creciendo, factor de carga 2–3 g o más.

20.3 Distinción crítica entre espiral y barrena

Característica	Barrena (spin)	Picada en espiral (spiral dive)
Velocidad indicada	Baja, cerca de VS, estable	Alta, creciendo rápidamente
Factor de carga	Bajo, ~1 g	Alto, 2–5 g
Estado del ala	En pérdida (ambas)	No en pérdida
Rotación	Sí, alrededor del eje vertical	No primariamente; alabeo establecido
Audio en cabina	Aire grave, suave	Aire agudo, fuerte (alta velocidad)
Buffeting	Sí	No
Aviso de pérdida	Activo	Inactivo
Trayectoria	Espiral cerrada (radio pequeño)	Espiral amplia
Recuperación	PARE (potencia, alerones, rudder, elevador)	Reducir potencia, NIVELAR alas, suavemente recuperar nivelado

ADVERTENCIA: CRÍTICO: Las recuperaciones de barrena y espiral son DIFERENTES y aplicar la equivocada empeora la situación. En barrena, aplicar PARE; en espiral, primero NIVELAR alas y luego recuperar de la picada. Aplicar PARE en espiral (timón pleno opuesto al alabeo con velocidad alta) puede causar daño estructural del estabilizador vertical o crear barrena. Aplicar nivelado de alas con tirón en barrena no es efectivo y profundiza la pérdida.

20.4 Recuperación de la espiral

38. REDUCIR POTENCIA a ralentí (para evitar que la velocidad aumente más).
39. NIVELAR ALAS con alerones coordinado con timón. Esto es lo primero y más importante.
40. Una vez con alas niveladas, SUAVEMENTE tirar del elevador para recuperar nivelado. Vigilar para no exceder factor de carga ni VNE.
41. Aplicar potencia gradualmente cuando esté nivelado.

20.5 El «178 segundos» de Illinois

El famoso estudio de la Universidad de Illinois (1954) mostró que pilotos VFR sin entrenamiento instrumental, al entrar en IMC, perdían el control en promedio en 178 segundos. La causa más común: SPIRAL DIVE. El piloto, sin horizonte visible, no detecta el alabeo desarrollándose, tira para mantener altura, entra en espiral, no puede salir sin referencia.

Lección: el alumno PPA debe (a) NUNCA entrar en IMC inadvertidamente, (b) si entra, aplicar maniobra 180° por instrumentos (referencia: horizonte artificial), (c) tener entrenamiento básico instrumental incluso siendo PPA estricto.

Capítulo 21. Prevención: la disciplina del piloto PPA

El alumno PPA argentino que sale del curso con buen entrenamiento de pérdida/barrena debería tener internalizadas las siguientes disciplinas. Son las que separan al piloto seguro del piloto vulnerable:

21.1 Disciplina de velocidad

- Conocer las velocidades del POH: VS, VS0, VS1, VR, VX, VY, VFE, VA, VNE.
- Volar siempre con margen sobre VS. En patrón: $1,3 \times VS$ típicamente. En aproximación final: $VS \times 1,3 +$ margen por viento gusty.
- Ajustar velocidad de aproximación según peso: aviones más livianos pueden volar a velocidades menores, pero respetar el POH.
- Vigilar el velocímetro: chequeo periódico durante todas las fases del vuelo.

21.2 Disciplina de actitud

- Conocer las actitudes típicas: nivel en crucero, ascenso a VY ($\sim 5^\circ - 7^\circ$ de pitch), descenso típico ($\sim 3^\circ - 5^\circ$ nariz abajo).
- Reconocer actitudes inusuales: nariz muy arriba ($> 10^\circ$) o muy abajo ($> -10^\circ$) son señales de algo no rutinario.
- Mirar el horizonte exterior continuamente. Por instrumentos solo cuando necesario.

21.3 Disciplina de coordinación

- Bola del coordinador centrada en todos los virajes. Es la primera señal de un viraje correcto.
- En el patrón base-final, especialmente, coordinación estricta.
- Si se detecta uso de timón cruzado con alerones (cross-controlled): pregunta inmediata «¿por qué estoy haciendo esto?».

21.4 Disciplina de configuración

- Flaps en posición apropiada para la fase.
- Mezcla apropiada para la altitud.
- Trim para reducir esfuerzo.
- Combustible al tanque correcto.
- Verificación periódica.

21.5 Disciplina de peso y balance

- Cálculo de peso y balance antes de cada vuelo.
- CG dentro de la envolvente. CG atrasado predispone a pérdida y barrena.
- Peso bajo MTOW.

21.6 Disciplina del entrenamiento periódico

- Práctica regular de aproximación a pérdida y recuperación con instructor.
- Cada 6 meses como mínimo si se vuela poco; más frecuente si se vuela más.
- Vuelo de entrenamiento con instructor periódico (BFR — biennial flight review en países que lo exigen, en Argentina equivalente).
- Vuelo con simulador (cuando disponible) para escenarios de barrena en aviones donde no se puede entrenar.

21.7 Disciplina mental

- Conciencia de que «esto puede pasarme a mí». No subestimar el riesgo.
- Anti-«get-there-itis»: no acomodar el vuelo a presiones de tiempo.
- Reconocer signos de fatiga, distracción, complacencia.
- Mantener disciplina de práctica incluso cuando se acumulan horas.

Capítulo 22. Entrenamiento práctico recomendado

22.1 Ejercicios PPA típicos en aviones de categoría normal

- Aproximación a pérdida sin potencia (power-off stall): a velocidad descendente, configuración de aterrizaje, hasta primer signo de pérdida (buffeting o aviso acústico). Recuperación: nariz abajo + potencia.
- Aproximación a pérdida con potencia (power-on stall): a velocidad de aproximación, potencia plena (despegue), nariz progresivamente arriba hasta primer signo de pérdida. Recuperación coordinada.
- Pérdida en viraje (turning stall): viraje a 30° de alabeo, mantener altitud tirando, hasta primer signo. Recuperación cuidadosa de no agravar el viraje.
- Slow flight: vuelo a velocidad cercana a VS, manteniendo altitud con AOA alto. Sentir los esfuerzos en mandos, escuchar el buffeting incipiente. NO entrar en pérdida; mantenerse en el «borde» y aprender el feeling.
- Steep turns: virajes a 45° de alabeo, mantener altitud (factor de carga 1,41). Cobertura del aumento de VS y sensación de g. Buen entrenamiento de coordinación y consciencia espacial.

22.2 Ejercicios en aviones acrobáticos (con instructor habilitado)

- Entrada en barrena intencional desde aproximación de pérdida con derrape.
- Identificación de fases (incipient, fully developed).
- Aplicación del procedimiento PARE.
- Práctica hasta dominar la recuperación en menos de 1–2 vueltas.
- Spiral dive intencional, identificación, recuperación.

22.3 Recomendaciones

- Hacer todos los ejercicios a altitud MÍNIMO 3.000 ft AGL, preferiblemente 5.000 ft.
- Iniciar con clearing turns: virajes para verificar que no hay tráfico en el área de práctica.
- Comunicar a FIS si se está en zona controlada o frecuencia de tráfico.
- Instructor habilitado siempre; el alumno NO practica solo pérdida agresiva.
- Documentar en el libro de vuelo el ejercicio realizado.

Capítulo 23. Conclusión integradora

Esta asignatura «Principios de Vuelo» es la base teórica del piloto PPA. Sus conceptos atraviesan toda la operación posterior. El alumno que ha entendido a fondo aerodinámica básica, las cuatro fuerzas, los mandos, la estabilidad, el viraje, la hélice, y muy especialmente la pérdida y la barrena, tiene el marco conceptual para todas las decisiones operacionales futuras. Sin este marco, el piloto opera por memoria; con él, opera por entendimiento.

La pérdida y la barrena no son fenómenos misteriosos: son consecuencias previsibles de exceder el AOA crítico, y obedecen leyes físicas comprensibles. La prevención es DISCIPLINA: velocidad, actitud, coordinación, configuración, centrado, entrenamiento. La recuperación es PROCEDIMIENTO: NUDGE o PARE según el caso, ejecutado con precisión sin pánico. El alumno que llega al examen práctico habiéndolas internalizado puede aprobarlo con tranquilidad y luego operar como piloto privado con margen ante lo imprevisto.

La consigna final, repetida en cada manual y aplicable también aquí: el ala vuela por AOA, no por velocidad. Cualquier confusión en este punto, en cualquier fase del vuelo, en cualquier momento de la carrera, puede costar la vida. El alumno PPA argentino que cierra este manual con esta convicción internalizada está formado.

Bibliografía y fuentes consultadas

Este manual integra información de las siguientes fuentes, vigentes y aplicables a la formación PPA en Argentina. Se invita al alumno a consultarlas para profundizar puntos específicos.

Normativa argentina

- ANAC — Reglamentos Argentinos de Aviación Civil (RAAC). Parte 61 (Licencias), Parte 91 (Reglas generales de operación), Parte 23 (Normas de aeronavegabilidad). Edición vigente en <https://www.argentina.gob.ar/anac>.
- Ley Nº 17.285 — Código Aeronáutico Argentino.

Publicaciones técnicas argentinas

- ANAC — Manuales y guías de instrucción.
- JST — Informes de accidentes con factores aerodinámicos. <https://www.argentina.gob.ar/jst>
- FAdA (Fábrica Argentina de Aviones) — Manuales y documentación de aviones de producción nacional.

Normativa internacional

- OACI — Anexo 1: Licencias al personal.
- OACI — Anexo 8: Aeronavegabilidad de las aeronaves.
- OACI Doc. 7192 — Training Manual.
- OACI Doc. 9683 — Manual de Instrucción sobre Factores Humanos.

Textos clásicos de aerodinámica

- Anderson, J. D. — Fundamentals of Aerodynamics. McGraw-Hill. Texto universitario clásico, exhaustivo, mathematical-detail-heavy.
- Anderson, J. D. — Introduction to Flight. McGraw-Hill. Más accesible, ideal para piloto/ingeniero.
- Hurt, H. H. — Aerodynamics for Naval Aviators. NAVWEPS 00-80T-80. Texto clásico US Navy, gratis online, excelente.
- Kermode, A. C. — Mechanics of Flight. Pearson. Texto británico clásico, varias ediciones.
- McCormick, B. W. — Aerodynamics, Aeronautics, and Flight Mechanics. Wiley.
- Stinton, D. — The Anatomy of the Aeroplane / The Design of the Aeroplane. Blackwell. Lectura de cultura para piloto avanzado.

Textos para piloto privado

- FAA — Pilot's Handbook of Aeronautical Knowledge (FAA-H-8083-25C). Capítulos 4 (Principles of Flight), 5 (Aerodynamics), 6 (Flight Controls), 11 (Aircraft Performance).
- FAA — Airplane Flying Handbook (FAA-H-8083-3C). Capítulos sobre stall, spin, maniobras.
- FAA — Advisory Circular AC 61-67C: Stall and Spin Awareness Training.
- Underdown, R. B.; Standen, B. — Principles of Flight. Pooley's Air Pilot's Manual Volume 2. Texto británico clásico para PPA.
- Kershner, William K. — The Student Pilot's Flight Manual; The Advanced Pilot's Flight Manual. Iowa State University Press.
- Kershner, William K. — The Basic Aerobatic Manual. Iowa State. Recurso para pérdida y barrena.
- Machado, Rod — Private Pilot Handbook. Aviation Speakers Bureau.
- Langewiesche, Wolfgang — Stick and Rudder: An Explanation of the Art of Flying. McGraw-Hill, 1944. Clásico fundamental sobre AOA y técnica de vuelo. Lectura obligada.

Pérdida y barrena específicamente

- FAA — Stall Prevention. Multiple FAA publications and Advisory Circulars.
- FAA — Upset Prevention and Recovery Training (UPRT). Industry standards.
- EASA — Upset Prevention and Recovery Training.
- Beggs, G.; Mueller, E. — Spins in the Light Plane. Articles and instructional material.
- Müller, Eric — Flight Unlimited. Recurso sobre vuelo acrobático y barrena.
- AOPA Air Safety Institute — Stall and Spin Awareness, Maneuvering Flight courses. <https://www.aopa.org/training-and-safety/air-safety-institute>
- NASA — Reports on stall/spin research. NASA Langley research on aircraft spin behavior.
- NTSB — Loss of Control In-Flight reports. <https://www.nts.gov>

Hélice y motor sobre avión

- Glauert, H. — The Elements of Aerofoil and Airscrew Theory. Cambridge University Press. Clásico.
- Wald, Q. R. — The Aerodynamics of Propellers. Progress in Aerospace Sciences.
- Hartman, E. P.; Biermann, D. — The aerodynamic characteristics of full-scale propellers. NACA Report 640.

Estabilidad y control

- Etkin, B.; Reid, L. D. — Dynamics of Flight: Stability and Control. Wiley. Texto universitario clásico.
- Stevens, B. L.; Lewis, F. L. — Aircraft Control and Simulation. Wiley.
- Pamadi, B. N. — Performance, Stability, Dynamics and Control of Airplanes. AIAA.

Recursos didácticos y digitales

- AOPA Air Safety Institute — Courses on aerodynamics, stall, spin.
<https://www.aopa.org/training-and-safety/air-safety-institute>
- FAA Safety — <https://www.faa.gov>. Courses and articles.
- Skybrary — <https://www.skybrary.aero>. Articles on aerodynamics, stall, spin, LOC-I.
- MIT OpenCourseWare — Aerospace Engineering courses freely available.
- YouTube — Several reputable channels (e.g., Real Engineering, Mentour Pilot for operational perspective, AeroEngineering): use with judgment.

Recursos digitales argentinos esenciales

- ANAC: <https://www.argentina.gob.ar/anac>
- ANAC AIS: <https://ais.anac.gob.ar>
- SMN: <https://www.smn.gob.ar>
- JST: <https://www.argentina.gob.ar/jst> (informes y boletines de seguridad)

Esta bibliografía es indicativa y no exhaustiva. La aerodinámica básica es una ciencia con principios estables (las ecuaciones de Bernoulli, las fuerzas de sustentación, los conceptos de pérdida y barrena son los mismos hoy que hace 80 años), pero la pedagogía evoluciona, los aviones cambian, y los hallazgos en investigación de accidentes refinan continuamente la enseñanza operacional. El alumno PPA argentino debe consultar el POH del avión específico que opera (es el documento de mayor autoridad para su operación particular), y mantenerse al día con las publicaciones de la ANAC y los informes JST. Las cifras numéricas, ejemplos y casos descritos son representativos y pedagógicos; los valores operativos definitivos provienen del POH, del AIP vigente y del avión real bajo las manos del piloto.